

Recherche interdisciplinaire pour le développement durable

Application à différentes thématiques de territoire

et la biodiversité des espaces ruraux malgaches

Direction scientifique
Hervé Duchaufour

Editeurs scientifiques

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Jacqueline Rakotoarisoa

Bruno Ramamonjisoa

Rakotondravao





Recherche interdisciplinaire pour le développement durable

Application à différentes thématiques de territoire

et la biodiversité des espaces ruraux malgaches

Direction scientifique
Hervé Duchaufour

Editeurs scientifiques
Tantely Razafimbelo-Andriamifidy
Jacqueline Rakotoarisoa
Bruno Ramamonjisoa
Rakotondravao

Antananarivo 2016



Mise au point des manuscrits et mise aux normes de la collection PARRUR

Hervé DUCHAUFOUR

Graphisme

Arsène Andriantsiferana, GROOVY ARTISTIK

Référence de l'ouvrage pour citation

DUCHAUFOUR H., RAZAFIMBELO T., RAKOTOARISOA J., RAMAMONJISOA B. et RAKOTONDRAVAO (Editeurs Scientifiques) - (2016) : Recherche interdisciplinaire pour le développement durable et la biodiversité des espaces ruraux malgaches. Application à différentes thématiques de territoire. Actes du projet FSP PARRUR « Partenariat et Recherche dans le secteur RURAl ». Antananarivo SCAC/PARRUR, Ed. MYE, 400 pages



Fiarovana amin'ny riaka / La lutte contre l'érosion

© PARRUR, 2016

ISBN : 000-0-0000-0000-0

Préface

Dr Claudine RAMIARISON

Directeur Général de la Recherche Scientifique

Des collectifs de recherche pour pérenniser les agroécosystèmes

La redynamisation de la recherche est au centre des préoccupations à Madagascar depuis ces dernières années. L'adaptation et le renouvellement de ses outils et méthodes face au contexte dans lequel elle évolue, sont indispensables afin d'améliorer les performances et lui permettre de prendre sa place dans le paysage économique et social du pays. La recherche a été marquée par d'importantes évolutions visant à lui donner plus de lisibilité.

Le présent ouvrage s'inscrit dans cette nouvelle dynamique de la R&D à Madagascar apportée par la stratégie nationale de la Recherche adoptée en 2013, ainsi que par les récents plans directeurs de la recherche, plus particulièrement celui portant sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et nutritionnelle et, celui traitant de l'environnement et du changement climatique. Il porte sur l'analyse des multiples facettes du développement rural et de l'agriculture malgache, domaines de recherche ayant toujours fait partie des priorités à Madagascar.

C'est un recueil de travaux menés tout au long de ces cinq dernières années, avec le soutien du projet Fonds de Solidarité Prioritaire « Partenariat et Recherche dans le secteur RURAl », sur des thématiques très diversifiées du développement rural. Ces recherches répondent aux enjeux qui sont à la fois naturel, environnemental, économique, social et culturel.

Les besoins de la R&D actuels vont, en effet, au-delà des inventaires et de l'amélioration des connaissances, puisque de plus en plus les attentes de la population tendent vers la satisfaction des besoins économiques et vers une dimension de valorisation des ressources naturelles.

Accroissement de la demande agricole, baisse de la productivité, capacités de résilience face au changement climatique, font partie des enjeux pour lesquels des attentes sont fortement exprimées par la population et auxquels cet ouvrage donne des éléments de réponses. Ce qui le rend d'autant plus pertinents pour les prises de décision dans ce secteur de l'économie nationale.

Les thématiques traitées ont fait appel à des chercheurs d'origine diversifiée, nationaux comme internationaux, regroupés au sein de collectifs créés à cet effet. Elles abordent des sujets d'actualité, tels que les normes et la qualité des produits de rente, les enjeux et impacts du changement climatique, à travers les recherches sur le carbone du sol, les paiements pour les services environnementaux, l'analyse de certaines filières à forte valeur ajoutée ou encore, les problèmes de santé animale. En outre, la relance de certaines productions qui ont fait la renommée de Madagascar, les mécanismes de marché, ont fait l'objet d'études présentées dans cet ouvrage.

Les approches dans la réalisation de ces travaux ont voulu innover, démontrant que les filières agricoles révèlent de multiples facettes et ne sont pas uniquement l'apanage d'une discipline unique ou encore d'une institution. Elles concernent aussi d'autres champs relevant des sciences de la nature et de l'environnement, ceux de la société et de la culture qui ont leurs apports dans la recherche sur le développement rural, les résultats obtenus s'en trouvent d'autant plus riches.

Le ton a été donné dès l'ouverture même des appels d'offre lancés requérant l'interdisciplinarité dans la composition des équipes, impliquant des opérateurs et autres utilisateurs des résultats et la collaboration entre institutions nationales et internationales.

L'objectif de cette mutualisation des ressources humaines et matérielles est d'optimiser les échanges de savoir-faire et de méthodes. Ce qui peut donner des résultats inattendus au sein de chaque collectif.

Ces collectifs créés constituent en tant que tel des dispositifs visant à améliorer l'efficacité des politiques de gestion même de la recherche à Madagascar. En tant que méthode, ils font partie de l'apprentissage dans ce contexte de mondialisation.

Les interactions entre formation-recherche-action, l'implication d'étudiants, de jeunes chercheurs, de doctorants aux côtés de chercheurs seniors et des partenaires traduisent une volonté de former à la recherche par la recherche, tel que préconisée dans la stratégie nationale de l'année 2013. Cette démarche répond aux besoins de former une relève permettant de pallier au vieillissement progressif du personnel chercheur et enseignant.

La pérennisation de ces approches de mutualisation par l'intermédiaire de ces pôles de compétence ou collectifs promus par la Stratégie Nationale de la Recherche de 2013, est destinée à faire avancer les réflexions scientifiques et, dans le cas présent, pour le bénéfice du développement rural à Madagascar. Elle devient un impératif pour améliorer les performances. Elles commencent à être visibles, plus particulièrement avec la collaboration progressive entre les écoles doctorales et les centres nationaux de recherche, dans le développement de projets communs, visant à rationaliser les activités et les fonctions.

Certes, il existe des contraintes liées à des cloisonnements disciplinaires que les chercheurs doivent surmonter. Mais les travaux menés dans le cadre du FSP PARRUR qui sont présentés dans le présent ouvrage, ont valeur d'expériences pour la conduite de recherche mutualisée dans le domaine du développement rural.

La pertinence des approches peut être appréciée à travers les résultats des travaux menés ; de même, les échanges au sein des équipes pluridisciplinaires permettent de mieux faire face aux enjeux et défis nouveaux.



« Les connaissances sont de plus en plus segmentées
et les problèmes à résoudre de plus en plus complexes et globaux »
Edgar Morin, article du journal Le Monde du 27/02/1998

Présentation

Hervé DUCHAUFOUR

Chef de projet PARRUR
Coopération franco-malgache en appui à
l'Enseignement Supérieur et à la Recherche Scientifique

Un pays riche, des territoires variés mais une ruralité stagnante et pauvre !

L'étendue des territoires de Madagascar lui permet de disposer d'un potentiel agricole considérable à l'image de la diversité de ses produits agricoles, de sa richesse de cultures d'exportations (cacao, vanille, litchi, épices...) et de ses ressources naturelles dont la plupart sont autant emblématiques qu'endémiques.

Bien que le secteur agricole emploie 86 % de la population nationale dont 60 % de jeunes, il ne contribue qu'à 26 % du PIB du pays (Note d'Orientation Politique du PSAEP-CAADP, 2014). Le développement de son agriculture, insuffisamment utilisée et dominée par la riziculture et l'élevage bovin, se heurte à de nombreux problèmes auxquels s'ajoute une faiblesse de la gouvernance des sous-secteurs AEP¹. Les petits producteurs agricoles souffrent de l'accès insuffisant aux marchés et aux financements destinés à l'achat d'intrants, aux investissements nécessaires pour améliorer les performances de leur agriculture familiale et de la faiblesse de la couverture sanitaire et de la santé publique. Nombreux sont les pauvres des régions reculées les moins favorisées qui ne peuvent profiter des technologies mises au point par la Recherche-Développement en particulier dans les territoires où les politiques publiques ne sont pas porteuses.

Néanmoins, grâce à leur savoir-faire et leurs modes d'organisation autochtones, les populations rurales luttent contre la crise alimentaire et font face au changement climatique en recherchant et adaptant par eux-mêmes des modes de production et d'organisation informels. Les solutions créatives de ces petits exploitants peuvent être une source d'amélioration et d'intensification de la productivité agricole dans les régions aux conditions climatiques les plus favorables et riches en ressources mais leurs actions informelles ne sont pas forcément durables.

Le rôle de la recherche pour le développement durable et la sécurité alimentaire à Madagascar

Le développement de la recherche et de l'innovation dans le secteur rural formel s'est accéléré ces trente dernières années grâce à la création des Centres Nationaux de Recherche (CNR) qui ont appliqué des méthodes scientifiques dans les économies des zones rurales malagasy. Depuis les années 90, les priorités

¹ AEP : Agriculture-Elevage-Pêche.

de la Recherche-Développement dans les sous-secteurs AEP ont été définies par les pouvoirs publics avec l'aide des institutions de recherche internationales et des Partenaires Techniques Financiers (PTF), en proposant comme nouvelle orientation, l'intensification et le développement durables contre la réduction de la pauvreté et l'insécurité alimentaire, tout en conciliant une croissance économique rapide (PSAEP-COMPACT, 2015).

La Recherche-Développement s'est adossée aux politiques publiques opérées à travers les nombreux programmes et projets portés par les documents de références qui se sont échelonnés au fil des années (DSRP, LPDR, PNDR, MAP, SNRD, PNIAEP, PSAEP-COMPACT). Devant l'étendue des contraintes et des problèmes du paysannat rural, son rôle et son importance pour le développement à Madagascar sont indéniables : sa vocation est de répondre aux enjeux cruciaux en matière de sécurité alimentaire, de nutrition, d'augmentation des revenus et de conditions de vie des petits producteurs ruraux, tout en limitant les impacts négatifs sur l'environnement.

Répondre à de nouveaux défis

Au-delà des questions d'augmentation de la production et d'intensification agricole, la recherche dans le secteur rural malgache doit tenir compte des nouveaux défis liés à la mondialisation et au changement climatique. Le chercheur est désormais contraint à sortir de sa tour d'ivoire en ciblant ses objectifs de recherche en fonction des conditions locales, en se souciant d'associer les ruraux les plus défavorisés en tant qu'acteurs et en les aidant à se libérer de leur pauvreté par différents moyens :

- Amélioration de la nutrition (*productivité et qualité d'un produit*) ;
- Augmentation de la résilience (*durabilité et viabilité d'un espace/milieu/espèce*) ;
- Adaptation au changement climatique (*agriculture intelligente face au changement du climat*) ;
- Accès équitable aux ressources naturelles productives en améliorant leur utilisation post-récolte et accès à la technologie génétique (*partage juste et équitable des avantages liés aux ressources*) ;
- Accès à l'information des prix aux marchés (*traçabilité des prix agricoles pour tous*) ;
- ... Mais aussi par la préservation de la biodiversité qui constitue, avec la terre et l'eau, leur première richesse patrimoniale.

Etablir de nouvelles relations entre la recherche et les populations rurales

Lorsque l'on parle de développement rural, le terme dépasse la simple notion de développement agricole. Il englobe l'espace rural où les « agricultures » sont au centre du système socio-économique mais au sein duquel il existe des fonctionnalités multiples et des activités diversifiées pour lesquelles le chercheur, en lien avec le développeur, les intégrera sur le terrain dans un objectif de développement cohérent.

Ainsi, pour mieux servir l'économie, l'environnement et la société des territoires ruraux, les chercheurs ont rénové leurs méthodes de recherche avec des approches plus intégratives et participatives mettant l'agriculteur au premier plan, ceci à chaque étape du processus d'innovation. L'interdisciplinarité, l'approche systémique et la démarche itérative sont devenues leur « *modus operandi* » et s'inscrivent dans cette optique de développement durable et solidaire donnant aujourd'hui plus de crédibilité aux collectifs de recherche qui désormais mettent en place la participation effective des bénéficiaires à la définition et à la mise en œuvre des priorités de la recherche.

Création d'un fonds compétitif

Le Document Cadre de Partenariat (DCP) Madagascar/France (2006-2010) a retenu le secteur du développement rural comme un axe prioritaire de la coopération franco-malgache et la protection de la biodiversité ainsi que le renforcement des capacités par l'enseignement supérieur et la recherche comme des domaines transversaux de partenariat à privilégier. C'est ainsi que le Projet PARRUR (« Partenariat et Recherche dans le secteur RURal »), financé sur le Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) de la coopération française, a été conçu en 2009 pour favoriser le décloisonnement de la recherche malgache dans le secteur du développement rural² par la promotion de dispositifs en partenariat, en lien avec les communautés scientifiques régionale et internationale.

Le FSP PARRUR a été appelé à financer des projets de Recherche-Développement pour promouvoir le secteur rural, construits sur la base de trois critères distinctifs : « Partenariat, interdisciplinarité et mutualisation des compétences » et répondant à trois objectifs spécifiques :

- Recherche sur des systèmes innovants (production et filière) ;
- Renforcement des capacités des producteurs et développement d'innovations technologiques à fort impact ;
- Valorisation des résultats de la recherche auprès des bénéficiaires.

Trois appels à propositions ont été lancés entre 2010 et 2013, chacun ciblant des thématiques spécifiques au développement des espaces ruraux et pour lesquelles se sont constitués des collectifs de recherche pluridisciplinaires regroupant des acteurs de la Recherche-Développement franco-malgache : i) en premier lieu des équipes de la recherche publique issues des CNR et du réseau universitaire malgaches (étudiants de master et des écoles doctorales) ; ii) des chercheurs d'institutions de recherche françaises (IRD, CIRAD, IP, INRA, IFREMER et CNRS) ; iii) des acteurs de terrain représentés le plus souvent par des associations paysannes et des ONG des secteurs environnemental, agricole, agroalimentaire et halieutique ; enfin, iv) des opérateurs du développement à l'exemple des services déconcentrés de l'Etat, des organisations professionnelles ou des entreprises à vocation commerciale.

Les projets ont été sélectionnés par un comité scientifique (indépendant du comité de pilotage) comprenant des scientifiques issus des milieux de la recherche franco-malgache. Ce comité était co-présidé par le chef de projet et une personnalité scientifique indépendante.

Au total, quatorze collectifs ont reçu une subvention allant de 32 à 75 K€ par projet. Chacune des équipes constituées a réuni entre 10 et 20 chercheurs de disciplines différentes. Cet ouvrage présente le résultat scientifique de onze d'entre eux et vient compléter la liste des ouvrages déjà parus dans la collection des éditions PARRUR³.

² Secteur qui fait référence aux domaines de l'agronomie, foresterie, l'environnement, les sciences économiques et sociales.

³ Collectif SYLVA TERRA (2014) : La terre : A qui, pour qui, pourquoi ? (CITE-PARRUR, 196 pages) ; Collectif FPPSM (2015) : Transitions agraires au Sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation (IRD- PARRUR, 366 pages).

Les collectifs de recherche « PARRUR » : Un exemple de recherche thématique pluridisciplinaire pour un modèle de développement rural

Parmi les onze projets, plusieurs font état de « recherches-filières » importantes pour l'alimentation humaine ou pour des opportunités de revenus pour les populations rurales. Le développement d'itinéraires techniques, la mise au point de méthodes de lutte et de leur diffusion auprès des producteurs et l'adoption de technologie de transformation constituent l'axe prioritaire de leurs travaux de recherche. Selon les sujets traités, les collectifs ont répondu aux différents défis exposés en fonction des modèles et des techniques dont les groupes cibles ont besoin :

- **« Réveiller un trésor en sommeil », tel est le slogan porté par les PTF pour relancer la cacaoculture du Sambirano. La recherche y participe ! :**

Grâce à la combinaison d'un climat chaud et humide et de la fertilité du sol, la vallée du Sambirano peut produire les 3 principales variétés de cacao les plus demandées dans le monde. Entre les années 1960 et 1972, l'Institut Français du Café et du Cacao (IFCC) a effectué des recherches sur la sélection de variétés de plants de cacao (Criollo pure - Trinitario hybride), recherches qui ont ensuite été abandonnées durant plus de quarante années. Ces anciennes recherches sur les variétés et les introductions de plants dans les vergers font que le cacao malgache est considéré aujourd'hui comme l'un des meilleurs du monde en obtenant en 2015 le label Cacao Fine de l'Organisation Internationale du Cacao (ICCO-Londres). Les travaux du collectif ont consisté à relancer de toute urgence la recherche sur la **sélection variétale de plants de cacao (chapitre 1)** à partir des 22 clones rescapés des anciennes collections de l'IFCC. Deux procédés ont visé à rehausser la qualité organoleptique des fèves, l'un consistant à la création de champs semenciers biclonaux à partir de la multiplication végétative de plants, le second par la multiplication par embryogénèse somatique des clones sélectionnés. Durant les cinq prochaines années, la recherche s'est engagée à produire plus de 3 millions de plants Criollo/Trinitario pour le compte du projet « Pôles Intégrés de Croissance et Corridors » (PIC2)⁴. En même temps, un important volet de sensibilisation et d'accompagnement à la rénovation des vergers paysans est programmé pour les prochaines années ;

- **Valoriser des espèces à fort potentiel de rente, destinées à l'exportation :**

L'une d'entre elles, peu connue, **le tsiperifery (chapitre 3)**, fait partie des épices rares, recherchées et appréciées des pays consommateurs sous le nom générique de « poivre sauvage à queue ». Cette espèce endémique à Madagascar offre des opportunités de diversification d'activités et de revenus pour les populations rurales mais la désorganisation de la filière et les pratiques de récolte destructives et incontrôlées nécessitent de mettre en place rapidement des techniques de récolte et post-récolte plus durables et de domestiquer le poivrier en le sélectionnant en fonction de la qualité des morphotypes identifiés. D'autres, comme le **girofle (chapitre 2)**, font la renommée de Madagascar à l'exportation. Toutes les parties du giroflier - feuilles, fleurs et fruits - ont des propriétés aromatiques mais leurs caractères parfumés varient selon les stades phénologiques de la plante et les techniques post-récoltes pratiquées. Les recherches ont non seulement permis d'identifier les optimums de qualité et de rendement des huiles essentielles extraites de ces différents matériels végétaux (feuilles et clous) mais aussi contribuent à réduire significativement la consommation en bois-énergie nécessaire à leur extraction ;

- **Assurer aux agriculteurs des Hauts Plateaux un accès à des semences et plants de bonne qualité adaptés localement** afin de lutter contre les maladies et ravageurs de grandes cultures (riz pluvial et pomme de terre) :

La **pyriculariose du riz pluvial (chapitre 4)**, maladie provoquée par un champignon, largement répandue dans les bassins de production malgaches, peut provoquer des ravages lorsque les conditions sont favorables atteignant parfois des pertes jusqu'à 100 % de la récolte. De même, le **flétrissement bactérien de la pomme de terre (chapitre 5)** causé par un pathogène bactérien provoque de graves pertes dans les zones de production d'altitude du Vakinankaratra. Le succès des moyens de lutte contre ces maladies s'est développé grâce à la disponibilité et la diffusion de technologies avancées par la Recherche-Développement lesquels contribuent significativement à la sécurité alimentaire de ces régions d'altitude. L'objectif consiste à accroître la production du riz pluvial et de pommes de terre tout en protégeant les producteurs et l'environnement grâce à l'adoption d'une approche holistique intégrée de protection des cultures : sélection de variétés résistantes (plants et semences sains) qui réduisent le développement de la maladie et des parasites courants et adoption de pratiques culturales améliorées (rotation des cultures, compostage, plantes de couvertures) qui améliorent la qualité des sols ;

L'instabilité et l'envolée des prix agricoles sont néfastes autant pour les producteurs que les consommateurs les plus pauvres. Ce thème est au cœur des débats politiques lorsqu'il est suivi de crises alimentaires dans les pays les plus vulnérables et les plus sensibles aux aléas climatiques (cyclones, sécheresse) et attaques de criquets. La question de la gestion de l'instabilité des prix et de leurs instruments devient un sujet d'actualité qui préoccupe et mobilise de plus en plus les chercheurs et leurs partenaires. Leur objectif est de mettre en place des systèmes d'information efficaces et bon marché dont l'effet permettrait de limiter les obstacles à l'accès aux marchés et à la détérioration des termes de l'échange entre les zones rurales pauvres et les principaux marchés. Cependant, si la mondialisation et le progrès technique sont en effet associés à toute une série d'évolutions technologiques touchant les systèmes d'information, la production, les biens et les services, une des questions que le chercheur se pose est de savoir si ces avantages sont pour autant généralisables et uniformes et donc profitables pour tous.

- **Comment faire accéder et profiter aux ruraux les plus pauvres des technologies de l'information et de la communication pour faire face à la libre concurrence et à la « défaillance » des prix des marchés ? :**

Un collectif et ses partenaires, un opérateur privé et des ONG, se sont interrogés sur l'opérationnalisation et le bienfondé des **Systèmes d'Information des Marchés (SIM) au niveau de la filière riz (chapitre 6)**. Leurs études ont comparé deux bassins de productions à Madagascar, l'un bien desservi et proche de la capitale, le second enclavé avec des services d'infrastructures et de réseau routier défaillants. Les travaux ont porté sur deux aspects : i) analyse de l'impact des améliorations de communication dont l'effet attendu est d'homogénéiser la demande, et ii) le suivi des niveaux de concurrence sur les marchés. Différentes catégories d'acteurs intervenant dans la chaîne de commercialisation et distribution du riz ont été enquêtées, des petits producteurs les plus pauvres et les plus reculés qui bénéficient le moins de ces services jusqu'aux plus gros collecteurs et revendeurs dont les stratégies de commercialisation intensifient la concurrence des prix des principaux marchés. Les résultats de leur expertise scientifique mettent clairement en évidence la nécessité d'anticiper les besoins et la définition d'une politique de stabilisation des prix ainsi que l'émergence d'une forme de gouvernance au niveau des marchés impliquant de fait, une certaine coordination entre l'Etat et les acteurs privés les plus influents de la filière. Au niveau des territoires de production, les programmes d'appui à la filière ont le devoir de mettre en avant des stratégies d'action qui permettraient d'élargir le marché ; celles-ci passeraient d'une part par le développement de l'esprit d'entreprise et de la gestion communautaire des stocks des populations pauvres, et d'autre part par des échanges équitables et formels entre grands et petits producteurs.

⁴ Contrat entre la station de recherche du FOFIFA à Ambanja et le projet PIC2.

L'élevage est un enjeu majeur à Madagascar puisque l'animal constitue une source d'alimentation pour la famille et une source de revenus et d'épargne pour les exploitants. Dans le domaine de la santé animale, la situation de Madagascar fait face à des maladies responsables d'épizooties meurtrières ainsi que de zoonoses majeures qui sont loin d'être globalement maîtrisées faute de campagnes de sensibilisation et de vaccination adaptées à l'échelle du pays. Les recherches effectuées par deux collectifs ont d'abord une vocation sanitaire afin de réorienter les actions vis à vis de certaines de ces maladies qui ont essentiellement un impact économique. Elles contribuent également à faire face aux crises sanitaires qui peuvent se développer localement et qui souvent, mobilisent des moyens financiers et humains considérables.

- **Mieux connaître la diversité génétique du matériel halieutique pour accroître la performance zootechnique des produits piscicoles :**

Depuis plus d'un demi-siècle à Madagascar, le succès de la *pisciculture familiale et de la rizipisciculture (chapitre 7)* chez les petits producteurs d'alevins (écloserie paysanne) et éleveurs-pisciculteurs (grossissement) est grandissant. Cette augmentation de la production piscicole, notamment du tilapia et de la carpe, réduit significativement l'insécurité alimentaire et la malnutrition des populations rurales. Cependant, cette intensification et accélération piscicole n'ont jamais fait l'objet de recherche intensive et de suivi sur le développement des souches introduites par les centres d'expérimentations de l'époque. Un collectif s'est constitué pour dédier ses recherches à la génétique de la carpe (comparée parallèlement à celle du tilapia) à Madagascar. Une approche globale de la gestion de la variabilité génétique chez les populations de carpe, fondée à la fois sur un examen des pratiques et sur des études génétiques des populations de carpe montre l'adaptation des poissons aux différents milieux, sauvages et d'élevage, et l'existence de trois populations de carpe différentes sur le plan génétique qui seraient la conséquence des différentes introductions successives. Ces résultats apportent de précieuses informations pour l'élaboration des stratégies d'appui à ce secteur.

- **Participer à la mise en place d'une bonne politique de lutte contre la cysticercose et la maladie de Newcastle qui constituent un problème de santé publique important à Madagascar :**

La prévalence active de la *cysticercose (chapitre 9)* y est estimée à 10%. Elle indique une forte endémicité qui place le pays parmi les plus touchés du monde. Elle peut atteindre les sujets de tous les âges et est présente aussi bien en milieu urbain qu'en milieu rural. La maladie de *Newcastle (chapitre 8)* quant à elle, est la première maladie des volailles à Madagascar. Elle est présente dans tout le pays et occasionne une perte économique importante liée à la propagation de ce virus, souvent négligé par les éleveurs de volailles. Ces derniers accordent insuffisamment d'importance aux mortalités répétées au sein de leur cheptel alors que ces deux maladies constituent une grande menace pour la santé animale et celle des consommateurs. A cela s'ajoute le manque de sensibilisation des éleveurs concernant les épidémies qui rend très difficile le suivi et la maîtrise des dispositifs d'épidémiologie-surveillance (FERT-FIFATA, 2012). Deux collectifs ont donc consacré leurs efforts de recherche pour mettre en place des mesures efficaces de *lutte contre ces deux maladies animales*. Leurs objectifs à moyen terme est d'entraîner une chute importante de la prévalence en améliorant les performances productives de ces élevages (porcs et volailles) au niveau de l'exploitation, de maîtriser les épidémies et de protéger les consommateurs.

Il est présent dans les esprits de tous les malgaches, mais aussi celui des touristes vazaha. *Le baobab (chapitre 10)* est un arbre qui détient tous les records, celui de longévité, de tour de circonférence... Appartenant aux espèces succulentes, le parenchyme spongieux de son tronc se gorge d'eau, ce qui lui permet ainsi de résister à de longues sécheresses. Sur les huit espèces dans le monde, six sur les sept présentes à Madagascar sont endémiques et classées sur la liste rouge des espèces en danger d'extinction

par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). Aujourd'hui, les parcs forestiers à forte population de baobabs de l'Ouest de Madagascar se réduisent comme une peau de chagrin et ces géants se retrouvent de plus en plus isolés au milieu d'un espace agricole voué à l'agriculture vivrière sur brûlis (hatsaky). Depuis longtemps, les chercheurs se sont intéressés à ces arbres emblématiques ; un collectif impliquant des spécialistes seniors et de jeunes doctorants, a voué entièrement ses travaux de recherche à la compréhension de la résilience de ces espèces dans le but de préserver leur biodiversité. La biologie des baobabs est particulièrement difficile à étudier : la floraison s'étale sur une courte période et les fleurs, éphémères, éclosent la nuit. En revanche, les fruits (graines des drupes) présentent un épais tégument résistant qui permet à la graine de persister plusieurs mois en attendant les conditions les plus favorables à la germination. De jeunes chercheurs se sont intéressés aux différents modes de reproduction des baobabs de l'Ouest malgache : du parfum émis par les fleurs qui attire les visiteurs-pollinisateurs ; de la levée tégumentaire des graines dans le transit intestinal de grands vertébrés ; de leur dispersion sur de grandes distances par l'eau ; de la prédation des jeunes pousses par les achates. Le lecteur découvrira toutes ces caractéristiques écosystémiques qui font que cet arbre se régénère tant bien que mal malgré un milieu environnant de plus en plus hostile.

La littérature scientifique regorge d'exemples de modes d'utilisation des sols maximisant l'utilisation de l'énergie lumineuse et de l'eau pour optimiser la production de biomasse, développer les cycles des minéraux et de la matière organique, éviter les pertes en eau, jouer sur les effets allopathiques entre les plantes et les microorganismes et enfin, tirer parti des caractéristiques de diverses espèces cultivées pour minimiser la compétition entre elles et maximiser leurs complémentarités. Ce type de raisonnement écosystémique est l'apanage d'un réseau de recherche très actif à Madagascar qui oriente ses travaux pour mettre en valeur ces processus dans différents milieux agroécologiques et favoriser le développement de systèmes agricoles durables et donc « écologiquement intensifs ».

- **Optimiser les processus agroécologiques en utilisant au mieux les propriétés des agroécosystèmes cultivés pour lutter contre le changement climatique :**

Le collectif s'est basé sur des observations et pratiques des agriculteurs de gestion durable et sur la performance de leurs écosystèmes agroforestiers à base de giroflier développés dans les territoires de l'Est de Madagascar. Les résultats de leurs observations montrent que l'association agriculture - élevage, l'agroforesterie, le développement de cultures associées, les techniques de SCV (« agriculture de conservation ») opérés dans différentes situations de milieu, permettent de restaurer la fertilité des sols et d'améliorer la résilience des systèmes de culture associés au couvert forestier par l'entremise de la *séquestration du CO₂ (chapitre 11)*. Au même titre que les cacaoyères sous couvert du Sambirano, ces recherches opérées dans les systèmes agroforestiers frontaliers aux corridors forestiers, viennent confirmer la nécessité de combiner les connaissances paysannes et celles des chercheurs pour mettre au point des indicateurs du changement. De tels systèmes durables pourront être transposables et adaptés à d'autres conditions socio-économiques et écologiques locales et faire partie des nouvelles stratégies d'adaptation et d'atténuation avec les parties prenantes, les PTF et opérateurs de terrain en priorité. Les ONG peuvent effectivement jouer un rôle important de médiateurs et de partenaires dans l'établissement de ces relations et dans la mise en oeuvre de recherches en partenariat... L'exemple du programme « Mahavotra », opéré par AGRISUD International et Fondation GOODPLANET dans la région Itasy, en est la parfaite démonstration.

Partager la connaissance et former les formateurs pour que les jeunes agriculteurs puissent exploiter une plus large part de la chaîne des valeurs

Il ne peut y avoir de bons conseils prodigués aux agriculteurs sans service de vulgarisation efficaces, efficaces et surtout, sans contenu ! Convaincu que la formation professionnelle agricole constitue l'une des clefs du développement rural, le projet PARRUR s'est fermement engagé à mettre les connaissances issues de sa Recherche-Développement au service de l'action de la politique et de la formation professionnelle agricole.

Aucun des collectifs n'a été négligé même si au départ, la plupart des chercheurs considéraient qu'il s'agissait d'un surplus de travail et d'un nouveau métier (chercheur-vulgarisateur) qui n'entraînait pas directement dans leur champ de compétences ! Une démarche réflexive, suivie d'une mobilisation active, ont ainsi permis de faire une mise au point sur les initiatives et les opportunités prometteuses de leur production scientifique.

Un volet du projet PARRUR, dénommé « Capitalisation-Valorisation-Communication/Diffusion » (CVC/D) des résultats de la recherche, leur a été consacré. Différents modèles et supports de vulgarisation ont été élaborés avec l'appui de la cellule du projet pour une diffusion à grande échelle auprès des populations cibles. Sa vocation est de répondre de manière adaptée et différenciée aux difficultés spécifiques ressenties par les agriculteurs au moyen de messages clés, de conseils et de mesures accessibles.

Son contenu est inséré dans un DVD-ROM. Ce dernier comprend la fourniture de la production scientifique, notamment les articles parus dans des revues spécialisées, mais surtout les outils pédagogiques (*cahier de vulgarisation, posters, affiches, catalogues de variétés, dépliants*) rédigés dans les deux langues pour une diffusion des messages sur le terrain. D'autres supports sont destinés préférentiellement à l'enseignement professionnel et numérique (*films documentaires⁵, podcasts⁶, contenus d'écoles thématiques, modules de formation, etc.*).

Ce volet CVC/D PARRUR favorise la libre circulation de l'information documentaire, scientifique et technique. Il est donc à considérer comme un service à la formation continue et non formelle dont l'utilisation potentielle est destinée aux programmes mis en place dans le cadre de la refonte du système de la formation professionnelle agricole à Madagascar (FORMAPROD, 2014). Quelques uns de ces outils peuvent également être facilement exploités par les instituteurs des écoles rurales.

Ce volet doit aller au-delà de la simple fourniture d'informations techniques aux populations cibles, que ce soit sur le type de variétés de semences à utiliser, la façon de lutter contre les maladies et les ravageurs ou la diffusion de techniques de semis sous couvert végétal performantes...

Une approche pluraliste de son utilisation est aussi à encourager avec l'implication des ONG, notamment pour :

- Impulser des compétences «transversales», non techniques ;
- Générer et promouvoir des innovations auprès des associations paysannes, des petites entreprises de transformation ou de différents groupes et individus opérant tout au long des chaînes de valeur ;
- Autonomiser les agriculteurs en les aidant à développer leurs capacités à tirer parti des opportunités de marché, à s'adapter au changement climatique, à forger de nouveaux partenariats, à apprendre comment utiliser au mieux les technologies de l'information et de la communication.

⁵ Accessibles sur le site You Tube : <https://www.youtube.com/channel/UCpyWylXyNUosd55Nw3uzNw>

⁶ Mis en ligne sur la plateforme audiovisuelle UNuM.pod : <http://pod.irenala.edu.mg/videos/>

Acronymes et abréviations

ACP	: Analyse en Composantes Principales
ACM	: Agent Communautaire de Santé Animale
ACSA	: Agent Communautaire de Santé Animale
ADAPS	: Association pour le Développement de l'Agriculture et du Paysannat du Sambirano (Ambanja)
AFC	: Analyse Factorielle de Correspondance
Ag	: Antigène
AGRISUD	: Organisation de solidarité internationale française (Bordeaux - France)
AFDI	: Agriculteurs Français et Développement International
APDRA	: Association française pour le développement de la pisciculture paysanne
ARDA	: Association Régionale de Développement Aquacole
AVSF	: Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières
BM	: Banque Mondiale
C	: Carbone
CAH	: Classification Ascendante Hiérarchique
CC	: Changement Climatique
CDC	: Center for Disease Control (CYSTICERCOSE)
CNR	: Centre National de Recherche (Madagascar)
CNRE	: Centre National de Recherches en Environnement (Madagascar)
CNRS	: Centre National de la Recherche Scientifique (France)
COI	: Commission de l'Océan Indien
CTHT	: Centre Technique Horticole de Tamatave
CRFPA	: Centre Régional de Formation Professionnelle Agricole
CPG	: Chromatographie en Phase Gazeuse
CVC/D	: Capitalisation-Valorisation-Communication/Diffusion (Projet PARRUR)
DALYs	: Disability Adjusted Life Year (CYSTICERCOSE)
DCP	: Document Cadre de Partenariat (France-Madagascar)
DIREL	: Direction Régionale de l'Elevage (Madagascar)
DRZV	: Département de Recherche Zootechnique et Vétérinaire (FOFIFA - Madagascar)
DSPR	: Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté (Madagascar)
DSV	: Direction des Services Vétérinaires (Madagascar)
EITB	: Enzyme-linked ImmunoelctroTransfer Blot (Test Western Blot) (CYSTICERCOSE)
ELISA	: Enzyme Linked ImmunoSorbent Assay (test Immunologique) (RALSTONIA et CYSTICERCOSE)

EP	: Ecloserie Paysanne (MADAPISCI)
ESSA	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques de l’Université d’Antananarivo
FERT	: Association française de coopération internationale pour le développement agricole
FOFIFA	: Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural malgache (Madagascar)
FORMAPROD	: Programme de formation professionnelle et d’amélioration de la productivité agricole (FIDA, Madagascar)
FSP	: Fonds de Solidarité Prioritaire (MAEDI - France)
GCV	: Grenier Commun Villageois (INFORIZ)
GES	: Gaz à Effet de Serre (CARBONE)
HE	: Huile Essentielle
IA	: Influenza Aviaire (Newcastle)
IFCC	: Institut Français du Café et du Cacao
IFREMER	: Institut Français de Recherche pour l’Exploitation de la Mer (France)
IHSM	: Institut Halieutique et des Sciences Marines de l’Université de Tuléar
IMRA	: Institut Malgache de Recherches Appliquées
IMVAVET	: Institut Malgache des Vaccins Vétérinaires
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique (France)
INSTAT	: Institut National de la Statistique (Madagascar)
IPM	: Institut Pasteur de Madagascar
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement (France)
IRM	: Imagerie par Résonance Magnétique
IUCN	: Union internationale pour la conservation de la nature
LCR	: Liquide céphalo-rachidien (CYSTICERCOSE)
MAEDI	: Ministère des Affaires Etrangères et du Développement International (France)
MAP	: Plan d’Action pour Madagascar
MBG	: Missouri Botanical Garden (Etats-Unis)
MN	: Maladie de Newcastle
MRD	: Maximum Recovery Diluant (RALSTONIA)
NCC	: Neurocysticercose
NDV	: Newcastle Disease Virus
OdR	: Observatoire du Riz (Madagascar)
OIE	: Organisation Mondiale de la Santé Animale
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
ONG	: Organisation Non Gouvernementale
PARRUR	: PARtenariat et Recherche dans le secteur RURal

PASAEP	: Programme Sectoriel Agriculture Elevage et Pêche (Madagascar)
PCR	: Polymerase Chain Reaction (Newcastle et CYSTICERCOSE)
PED	: Pays en développement
PIC 2	: Pôles Intégrés de Croissance et Corridors (BM, Madagascar)
PMG	: Poids de Mille Grains (GIPYRI)
PNIAEP	: Plan National d’Investissement Agriculture, Elevage et Pêche (Madagascar)
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
POCT	: Programme Opérationnel de Coopération Territoriale (FED-FEDER)
PPA	: Producteurs Privés d’Alevins (MADAPISCI)
QUALIREG	: Réseau scientifique et technique des acteurs de l’Agroalimentaire de l’Océan Indien
TEF	: Herbier du FOFIFA
TAN	: Herbier de Tsimbazaza (PBZT)
REDD+	: Réduction des Emissions de gaz à effet de serre issus de la Déforestation et de la Dégradation des forêts (CARBONE)
RFLP	: Restriction Fragment Length polymorphism (CYSTICERCOSE)
SCAC	: Service de Coopération et d’Action Culturelle (Ambassade de France)
SCRID	: Systèmes de Culture et Rizicultures Durables
SCO	: Stock de Carbone Organique (CARBONE)
SCV	: Semis direct sous Couverture Végétale
SECAMAD	: Société d’Exploitation de Cacao de Madagascar
SIM	: Système d’Information sur le Marché
SNC	: Système Nerveux Central (CYSTICERCOSE)
SM	: Spectrométrie de Masse
SNRD	: Stratégie Nationale de Relance du Développement (Madagascar)
SOMIA	: Société Malgache d’Industrie et d’Agriculture (QUALIKKO)
SPAD	: Systèmes de Productions d’Altitude et Durabilité (FOFIFA, Antsirabe)
SRPRH	: Service Régional de la Pêche et des Ressources Halieutiques
UMR	: Unité Mixte de Recherche
UNICEF	: Fonds des Nations unies pour l’enfance
WASH	: Water Sanitation Hygiene (CYSTICERCOSE)

Les cultures de rente d'exportation

Préserver la qualité dans un contexte de relance

Le secteur agricole représente une composante essentielle de l'économie malgache. Il contribue pour près de 30 % au Produit Intérieur Brut et emploie 80 % de la population active. Les populations rurales pratiquent essentiellement une agriculture vivrière rattachée à de longues traditions, et dont les produits sont en grande majorité destinés à l'autoconsommation familiale. Mais, elles produisent aussi, en particulier dans les régions côtières, des cultures, dites de rente, qui, par opposition à la polyculture vivrière, sont généralement commercialisées sur le marché extérieur procurant des recettes d'exportation.

Dans les années 70, Madagascar était encore l'un des plus importants pays producteurs de cultures d'exportation dans le monde : Vanille, café, girofle, poivre et cacao figuraient en tête des produits exportés lesquels constituaient les principales sources de recettes du pays. Suite à ces années fastes, ces denrées ont subi de fortes fluctuations des prix. La baisse notable de leur cours sur le marché international a durement affecté la production nationale de ces produits et par voie de conséquence, a contribué à déstructurer ces filières de rente sur les territoires de production.

Les causes de leur régression sont multiples. Mais, d'une manière générale, cette baisse est due à la vieillesse des plantations, à l'abandon d'entretien adéquat ainsi qu'aux mauvaises conditions de récolte et de traitements post-récolte. Ces filières, aujourd'hui insuffisamment organisées, se traduisent par des produits-marchand de mauvaise qualité et une perte de compétitivité pour faire de l'agriculture de rente, un moteur puissant de l'économie malgache.

Ces deux dernières décennies ont connu des cours mondiaux plus favorables. Des efforts devront donc être fournis pour que Madagascar puisse recouvrer sa renommée d'antan. Dans ce contexte de relance, le marché étant devenu beaucoup plus exigeant sur la qualité et la sécurité sanitaire de ces produits, de nouvelles voies de valorisation devront faire l'objet d'études de recherches pour satisfaire cette nouvelle tendance sur le marché international.

Pour le cacao, le concept d'indication géographique protégée « Cacao de Madagascar » et plus particulièrement le « Cacao du Sambirano », pourrait être un outil de valorisation intéressant. Les premiers travaux du collectif « QUALIKKO » ont démarré pour atteindre à moyen terme cet objectif : Dans un premier temps, les chercheurs ont dressé un état des lieux des vergers du Sambirano pour évaluer le potentiel génétique des arbres-cacaoyers existants. Dans un second temps, le collectif s'est lancé dans un programme de sélection variétale adéquat accompagné de procédés pré et post-récolte plus appropriés. Après plusieurs décennies de léthargie, ce nouveau départ de la recherche de la filière cacao devrait aider les nombreux acteurs économiques impliqués (collecteurs, préparateurs, exportateurs, coopératives, grands exploitants) à prendre rapidement les mesures nécessaires (sous entendu équitables) auprès des petits producteurs pour pérenniser « **la qualité du cacao du Sambirano** » considéré comme étant parmi les meilleurs du monde, même s'il ne représente qu'une très faible part de la production mondiale (0,12 %). Le maintien du label « Cacao Fine » obtenu récemment (septembre 2015) par l'Organisation Internationale du Cacao (ICCO, Londres) en dépend.

Les résultats des travaux du collectif « GIROFLIER », du même nom de l'arbre introduit dans le pays au début du 19ème siècle, démontrent la forte valeur ajoutée économique de cette filière. Celle-ci est cependant conditionnée à un impératif de rajeunissement des parcs à giroflier et de rationalisation de l'exploitation de l'arbre mais également à une meilleure technologie et maîtrise de la transformation de ses produits que sont les feuilles, les clous et griffes. Les distillations artisanales opérées par les nombreux petits producteurs traditionnels s'en verraient significativement améliorées à la fois au niveau des rendements et de la qualité de la précieuse Huile Essentielle mais aussi de sa teneur en eugénol dont l'exportation fait la renommée mondiale de Madagascar.

Outre ces deux cultures de rente d'exportation traditionnelles, Madagascar gagnerait aussi à augmenter ses recettes d'exportation en valorisant sur le marché international des produits non conventionnels tel que le poivre sauvage, communément désignée poivre à queue ou « Tsiperifery ». Ce produit de niche, mal connu sur le plan scientifique, intéresse de plus en plus les pays occidentaux consommateurs de ce poivre en raison de ses qualités organoleptiques et ses saveurs exceptionnelles. Mais la pression et l'exploitation minière exercée sur cette espèce endémique de Madagascar risque fortement de menacer la filière à peine naissante du Tsiperifery. Le collectif INNOVEPICE, créé à cet effet, souhaite trouver des solutions d'exploitations durables en menant diverses recherches spécifiques à cette espèce méconnue et orientées sur l'analyse complète, de l'amont à l'aval, de la filière : description botanique de l'espèce et sa distribution géographique ; modes de récoltes et de traitements post-récolte artisanaux ; commercialisation et enfin, caractérisation de ses propriétés aromatiques. Les quelques premiers résultats obtenus sont présentés dans cet ouvrage.

Ces deux derniers travaux de recherche sur le girofle et Tsiperifery, sont désormais regroupés aujourd'hui sous l'unique appellation « INNOVEPICE » : « **Innovons dans la filière « Epices » malgache** ».



Les cacaoyères du Sambirano Des produits à fort potentiel qualitatif insuffisamment valorisés

The cocoa of Sambirano Products with high quality potential under-valued

F. DESCROIX ¹
J. J. RAKOTOMALALA ²
E. BOUSQUET ³
D. H. RAHAINGOSAMBATRA ⁴
A. CHEN-YEN-SU ⁵

- (1) Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement - La Réunion 7 Chemin de l'IRAT, Saint Pierre
(2) Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Département de Recherches Agronomiques, BP 1444, Antananarivo 101, Madagascar
(3) Montpellier SupAgro, 2 Place Pierre Viala 34060, Montpellier Cedex 02 France
(4) Université d'Antananarivo - Faculté des Sciences, Département de Biologie et Ecologies Végétales, BP 906 Antananarivo 101, Madagascar
(5) Université de La Réunion - UFR des Sciences et Technologies, Saint Denis Campus Universitaire de Moufia, 15 Avenue René-Cassin CS 92 003, Saint Denis Cedex 9

Résumé

Malgré des caractéristiques organoleptiques très appréciées par les chocolatiers, la grande majorité des productions de cacao malgaches est achetée en « cacao standard » aux petits paysannats. Seules les plantations industrielles mettent en marché du cacao de qualité supérieure.

Le cacao de Madagascar figure parmi les rares cacaos fins de la planète. Peu d'études concernant la filière cacaoyère malgache ont été réalisées. Ce travail a pour but de mettre en lumière des liens pouvant exister entre les modes de transformation post-récolte des divers producteurs de fèves de cacao et leur qualité sensorielle.

Deux études conduites dans le Sambirano en 2013 dans le cadre du réseau de coopération scientifique en océan Indien QualiREG¹ ont permis de faire un point sur les vergers cacaoyers et sur les procédés de transformation dans les différentes zones du Sambirano et les différentes structures de production du petit paysan à la plantation industrielle.

Ces études remettent en cause les affirmations communément publiées que le verger cacaoyer est en déclin et que le cacao du Sambirano se dégrade par manque d'encadrement et de compétence des petits producteurs. Elles montrent en effet l'intérêt des familles rurales pour le produit cacao puisque ces dernières sans appui technique ni aide financière cultivent et rénovent à leur rythme les cacaoyères par la mise en œuvre de dispositifs de plantation et de pratiques culturelles comparables à ceux des compagnies industrielles. Les échantillons provenant de divers producteurs de la région du Sambirano (Madagascar) ont été comparés du point de vue biochimique et sensoriel. Les analyses sensorielles et chimiques ont confirmé la qualité des cacaos malgaches et ont montré que les procédés de transformation du cacao mis en œuvre par les paysans, principalement en sacs, permettent d'obtenir des produits de qualités biochimique et sensorielle équivalentes à celle du procédé suivi par les industriels, lorsque la durée de fermentation est de 5 à 6 jours.

L'augmentation d'année en année des produits de moindre qualité quel que soit le type d'exploitation découle non d'une méconnaissance par les paysans mais de fécondations croisées entre Forastero et Trinitario et d'une forte demande en cacao standard pour laquelle les producteurs et les collecteurs réduisent la durée de fermentation. Il convient d'enrayer cette dégradation continue par la distribution massive d'un matériel végétal Trinitario à amande claire. Ce constat milite pour une relance de la sélection variétale qui devra être suivie de la distribution de matériel végétal quantitativement et qualitativement performant.

Dans cette optique, la création de champs semenciers biclonaux et des essais de multiplication végétative par greffage-bouturage et embryogenèse somatique ont été démarrés dans le cadre des travaux du projet PARRUR QUALIKKO.

Abstract

Despite the organoleptic characteristics highly valued by the manufacturer of chocolate, the vast majority of Malagasy cocoa production is bought in the small farming communities as «standard cocoa». Only industrial plantations commercialize high quality cocoa. Few studies on Malagasy cocoa sector achieved over the last 20 years.

Two studies conducted, funding by QualiREG¹ in Sambirano in 2013 helped to make a point about cocoa orchards and processing methods used in different areas of Sambirano. This was done for the main categories of producers, from small family producers to the industrial plantation.

These studies question the assertions commonly published as cacao orchard is declining and the cocoa Sambirano degrades by lack of supervision and competence of small producers.

¹ www.qualireg.org

Indeed they showed the interest of rural families for cocoa products as these ones cultivate and renovate their cocoa plantation at their own pace without technical support and financial assistance. To achieve this they apply the implementation of planting devices and farming practices similar to those of industrial companies.

The samples from various producers Sambirano region (North West of Madagascar) were compared for their biochemical composition and sensory term. Sensory and chemical analyzes confirmed the quality of cocoa from Sambirano and have shown that cocoa processing performed by farmers, mainly bags allowed to obtain, when the fermentation period is 5 to 6 days, a product with biochemical and sensory characteristics equivalent to that of the process followed by large producers. The increasing year by year lower quality products, whatever the type of production structure arises not from a lack of knowledge by farmers but cross-fertilization between Forastero and Trinitario and strong demand for cocoa standard for which producers and collectors reduce the fermentation time. It is necessary to halt the continued degradation by the mass distribution of plant material Trinitario with light almond. This finding argues for a revival of varietal selection, which must be followed by the distribution of high performance plant material quantitatively and qualitatively. In this goal, the implantation of biclinal fields and trial cloning using embryogenesis and graft-cutting techniques were took off.

Introduction

ORIGINES DU CACAO DANS LE MONDE

Le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) est un arbre originaire du continent américain. D'après Cheesman² (1944), il proviendrait de la Haute Amazonie dans une zone comprise entre les rivières Napo, Putumayo et Caqueta, qui prennent naissance dans les Andes équatoriennes et affluent vers le fleuve Amazone. Toutefois, même si sa dispersion a pu se faire naturellement dans toute la région de la Haute Amazonie, les données récentes indiquent que l'introduction du cacaoyer en Amérique centrale (Mexique) est probablement l'œuvre de l'homme (Motamayor et al., 2002). L'histoire du cacaoyer remonte à celle des Indiens d'Amérique centrale, qui considéraient le cacao comme un élixir divin. Sa culture s'est répandue successivement grâce aux civilisations Olmèques, Mayas et Aztèques. D'après les sources de la linguistique historique, le premier utilisateur du cacao a été le peuple Olmèque. Le mot « cacao », prononcé kakawa à l'origine, est un mot emprunté à la famille linguistique mixe-zoque. Les linguistes le situent environ 1000 ans avant Jésus-Christ (J.C.) en usage à l'apogée de cette civilisation³.

Le peuple Olmèque est considéré comme l'origine de toutes les civilisations apparues en Amérique centrale, incluant les Mayas et les Aztèques. Les Olmèques ont commencé à s'installer au Sud du Mexique dans la région de « Soconusco » connue aujourd'hui comme l'état de Chiapas, Veracruz et aussi à Tabasco, environ 1500 ans avant J.C.⁴

² Cheesman EE. 1944. Notes on the nomenclature, classification and possible relationships of cacao populations. Trop Agric 21 : 144-159.

³ Justeson JS, Norman WM, Campbell L. and Kaufman T., 1985. The Foreign Impact on Lowland Mayan language and Script. Middle American Research Institute Publication 53.

⁴ Stone D. 1984. Pre-Columbian migration of *Theobroma cacao* Linnaeus and *Manihot esculenta* Crantz from Northern South America into Mesoamerica: a partial hypothetical view. In: Pre-Columbian Plant Migration. Cambridge, MA, Harvard University Press. Pp. 67-79, 81-83.

Le cacao était traditionnellement utilisé par les indigènes du Mexique et d'Amérique centrale, notamment les Aztèques et les Mayas. Dans la haute société Maya, les cérémonies funéraires étaient grandioses et le défunt était gratifié d'offrandes particulières qui l'accompagneraient dans sa vie future (Coe, 1973 ; Reents-Budet, 1996).

Des analyses chimiques réalisées dans une tombe Maya découverte à Río Azul (Guatemala), ont démontré qu'elle avait contenu du cacao. Une très belle pièce fut même trouvée représentant le « transfert » du chocolat d'un récipient à l'autre pour le faire mousser.

Un historien spécialiste des Mayas (Ted lock, 1993), remarque que le cacao et les boissons à base de chocolat avaient un usage répandu et une grande importance dans les rituels de guerre, les danses, les banquets et pendant les cérémonies de mariage dans la classe dirigeante des Mayas. Les Mayas préparaient cette boisson en agrégeant divers produits (piment, miel, fleurs, gingembre, vanille, maïs cuit, et herbes) à température froide, tiède ou chaude.

Le cacao était la marchandise la plus importante, et les fèves de cacao servaient également de monnaie pour soutenir le vaste commerce existant entre les différentes cités Mayas. A Cacaxtla, actuel état de Tlaxcala (Mexique), se trouve une fresque représentant le dieu des marchands (EK Chuah ou dieu L) faisant une halte sur le chemin, debout en face d'un cacaoyer. Les espagnols, qui rencontrèrent pour la première fois le cacao dans les Caraïbes en 1494 l'appelèrent « théobroma cacao ». Théobroma signifiant nourriture des dieux. Ils ne fixèrent leur attention sur la fève qu'à partir de la conquête du Mexique. Si son adoption connut un immense succès au sein de l'élite coloniale, c'est parce que les Espagnols transformèrent la recette de la boisson pour l'adapter à leurs goûts. Après la colonisation du Mexique, le cacao fut exporté vers les métropoles européennes. C'est d'abord chez les élites européennes que le chocolat se diffusa, sous forme de boisson mais aussi de confiseries. La boisson suscita rapidement la méfiance de l'église car le chocolat était connu pour être aphrodisiaque (Méndez et Agueda, 1998).

LA PRODUCTION DE CACAO AUJOURD'HUI

Le cacao (*theobroma cacao*), l'espèce est répartie en trois types : Criollo d'Amérique centrale et du Mexique, Forastero d'Amazonie et Nacional d'Equateur, plus un hybride Trinitario de Trinidad. La consommation en cacao connaît une augmentation annuelle constante supérieure à 3 %. L'entrée sur le marché du cacao de nouveaux pays consommateurs de chocolat, comme la Chine et l'Inde, est prometteuse.

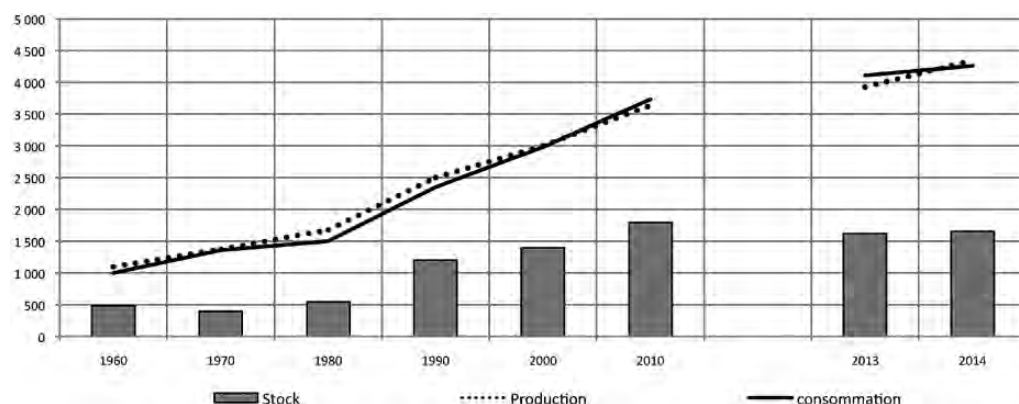


Figure 1 : Evolution de la production, consommation et stocks de cacao en K tonnes

Le cacao à Madagascar

L'INTRODUCTION DU CACAOYER À Madagascar

En débarquant à Sainte-Marie, le Commandant particulier... Lui-même fit sans tarder préparer un terrain d'essais, au lieu-dit Ambodifototra. Le 10 avril 1823, le jardinier-botaniste LE Nouc adressait à Bréon, nommé directeur du jardin royal de Bourbon, une demande variée : deux pieds de Poivriers, deux Pommiers (Reinette et Cal ville), Cerisiers, deux Vanganayers (Mandariniers), deux pieds de Vigne muscat, des baies de Girofle et de Cacao. Sous la direction de LE Nouc le jardin d'essais put enfin se développer. En 1824, sur l'habitation royale les Cacaoyers sont représentés par 700 individus de deux pieds de hauteur⁵.

Dans la région Est, l'agriculture est très développée car la colonisation européenne a débuté dans la région bien avant la conquête. Des colons de l'île Maurice et de la Réunion y avaient installé de superbes plantations, souvent de compte à demi avec la Reine et le premier Ministre : tels Arnoux, de Lastelle, Lambert. Aujourd'hui le planteur européen cultive le Caféier (un peu partout), la Vanille (Maroantsetra, Antalaha), le Giroflier (Sainte-Marie), le Cacaoyer (Tamatave, Vatomandry), l'Ylang-ylang (un peu partout), la Canne à sucre (Tamatave). En 1905 la région Est malgache représentait 308 725 cacaoyers qui ont produit 83,5 tonnes de cacao en 1919 et 54,5 tonnes en 1920⁶.

Dans la Région du Sambirano, de hardis particuliers et des sociétés se sont installés et cultivent le Manioc, le Cocotier, la Vanille, le Bananier, l'Oranger, le Mandarinier, le Citronnier avec succès ; ils commencent par la suite à planter des Cacaoyers. Les premiers cacaoyers sont plantés par Monsieur Millot, la souche provenait du jardin botanique de Buitenzorghe de Java. Comme les premiers arbres de cacao arrivés dans l'Asie du sud-est l'ont été aux Philippines entre 1660 et 1670⁷ et qu'ils y ont été amenés d'Acapulco au Mexique, où était basée la flotte de Manille, il est raisonnable de penser que la provenance du cacaoyer à Java pourrait être le sud des Philippines (François RUF)⁸.

Vers les années 1920, la variété Forastero, une variété géante, productive mais dont les fèves sont de qualité médiocre, fut introduite à son tour pour remédier au manque de productivité du criollo. Plus de 75 % des arbres plantés dans les années 20 appartiennent à cette variété. En 1938 Madagascar exportait 3100 tonnes de cacao⁹.

LA CULTURE DU CACAOYER AUJOURD'HUI

Entre les années de 1960 et 1972, l'Institut Français du Café et du Cacao, organisme français de recherche œuvrant sur les plantes stimulantes à Madagascar, avait orienté 90 % de ses activités, sur les croisements Forastero x Criollo afin d'obtenir des Trinitario adaptés à la région du Sambirano.¹⁰

⁵ Les débuts de la colonisation agricole à l'île Sainte-Marie de Madagascar. In : Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale. 17^e année, bulletin n°192-193, Août-septembre 1937, pp. 610-618.

⁶ Ressources naturelles à Madagascar et évolution de l'Agriculture dans l'île D'après A. DANDOUAU (1922).

⁷ <http://choco-story-brugge.be/FR/indonesie.htm>

⁸ <https://books.google.com/books?isbn=2865375943> François Ruf - 1995 - Agroforestry.

⁹ L'œuvre agricole de la France à Madagascar. Par ED François, Gouverneur des Colonies, ancien Inspecteur général de l'agriculture.

¹⁰ Rapports annuels IFCC Ambanja 1960-1972.

La sélection et la vulgarisation d'hybrides Trinitario à fort pourcentage d'amandes blanches (de type Criollo) a été poursuivie par FOFIFA jusqu'en 1980¹¹. Durant cette période, les plantations coloniales cédèrent la place aux grandes sociétés privées et les petits exploitants malgaches commençaient à planter le cacaoyer. Des programmes de multiplication végétative par bouturage des hybrides sélectionnés ont été mis en œuvre jusqu'au milieu des années 80 avec des fonds attribués par la CEAMP (Caisse d'Équipement Agricole et Modernisation du Paysannat), mais l'offre ne satisfaisait pas la demande. Du coup, l'extension des plantations reposait sur des plants provenant de semences d'hybrides. La disjonction des caractères dans ces descendance est telle que les vieilles cacaoyères malgaches sont encore actuellement occupées aussi bien par les 3 variétés classiques, que par une multitude de génotypes intermédiaires, situation quasi unique dans le monde.

Malgré cette forte variabilité, du fait de l'effet terroir, mais aussi de la prépondérance d'hybrides Trinitario, à haut pourcentage de fèves à amandes blanches, sélectionnés dans les années 70-80, le cacao de Madagascar est encore considéré comme étant parmi les meilleurs du monde (obtention du label « Cacao Fine » de l'Organisation Internationale du Cacao).

Aujourd'hui la culture du cacao est concentrée dans la vallée du Sambirano (95 % de la production malgache) qui se situe dans le Nord-Ouest de Madagascar, dans la région de Diana. Protégé des alizés desséchants du Sud-Est par le massif montagneux Tsaratanana, le Sambirano bénéficie de paramètres climatiques favorables à la cacaoculture : un climat tropical chaud et humide avec une température moyenne annuelle de 26 °C et des amplitudes thermiques (maxima de 30-34 °C et des minima de 17-22 °C) et une pluviométrie moyenne supérieure à 2 500 mm. Les mois les plus arrosés sont janvier et février. La saison sèche, plus fraîche, s'étend de mai à octobre.

Avec 23 796 hectares¹² le verger cacaoyer du Sambirano, installé sous un couvert forestier, est réparti entre quelques dizaines de milliers de familles rurales et des plantations industrielles héritées des sociétés coloniales de plantation. L'économie du District d'Ambanja repose essentiellement sur le secteur primaire qui est basée sur les cultures d'exportation (cacao, poivre, café, vanille et plantes à parfum), sur la riziculture et de moindre proportion sur l'élevage et la pêche. En 2006, les acteurs du secteur primaire pratiquent jusqu'à 86 % l'agriculture, 9 % l'élevage et 5 % la pêche (Randrianirina, 2008).

De par sa superficie, ce verger cacaoyer est l'un des plus petits des pays producteurs de cacao dans le monde mais de par sa constitution en matériels végétaux, il est l'un des rares qui disposent d'un très bon potentiel qualitatif. La production annuelle malgache, estimée entre 5 000 et 6 000 tonnes de cacao marchand (1 et 1,5 % de la production mondiale), ne peut rivaliser avec les grands pays producteurs et doit miser sur son potentiel qualité. Le cacao du Sambirano est réputé pour ses caractéristiques aromatiques aux notes acidulées et fruitées.

Outre un revenu significativement supérieur aux autres produits d'exportation, le cacao présente l'avantage de procurer aux familles rurales un revenu significatif dix mois sur douze (Figure 2). Sur le plan écologique, cette filière d'exportation présente l'indéniable avantage d'une production agroalimentaire sous couvert forestier. Ce dispositif sera préservé de la pratique de l'agriculture sur brulis communément suivie dans de nombreuses régions malgaches tant que cette production sera économiquement plus intéressante pour les familles rurales que les autres productions agroalimentaires.

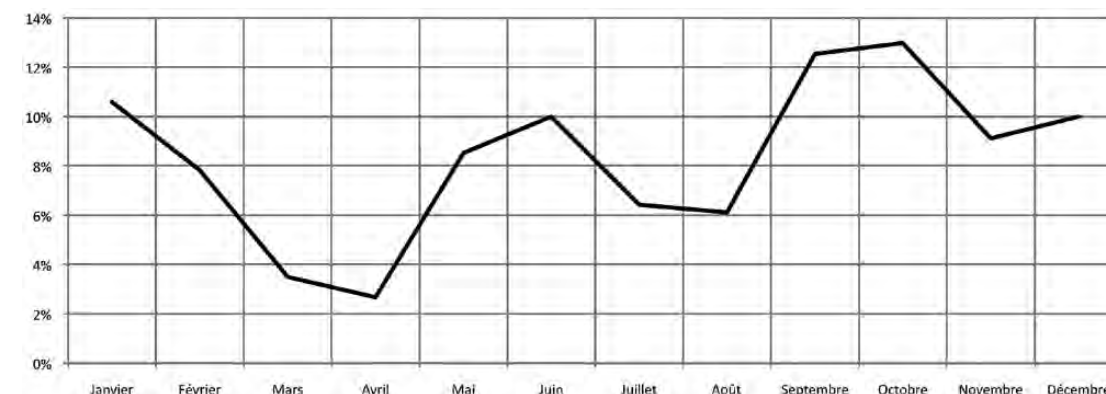


Figure 2 : Evolution mensuelle des productions en fèves fraîches pour la période 1999-2014 pour les plantations Akesson Organic (SOMIA) et Millot

SITUATION DE LA CACAOCULTURE DANS LE SAMBIRANO SELON LA LITTÉRATURE

Le Sambirano est remarqué pour avoir un cacao très caractéristique, à fort potentiel qualitatif, notamment du fait de la présence dans les vergers de la variété Criollo et de l'hybride Trinitario, au potentiel qualitatif bien supérieur à la variété Forastero, cultivée dans les principaux pays producteurs. Cependant, une grande majorité des productions est vendue en cacao standard (soit un cacao de moindre qualité à moindre prix). De nombreux rapports depuis la fin des années 1990 affirment que le désengagement de l'État et l'insuffisance de moyens des structures étatiques privent les paysans d'appui technique, de formation, d'accès aux semences et aux intrants. Ce qui serait la cause d'une faible productivité des cacaoyères.

Objectifs et réalisations du Projet Qualikko

Deux axes prioritaires ont été proposés par le projet PARRUR « QualiKKO » pour redynamiser la cacaoculture malgache. Ils visent (i) à accroître rapidement le volume de cacao haut de gamme et (ii) à amoindrir à moyen terme la trop importante diversité végétale des vergers.

DIVERSITÉ DES VERGERS ET DES PROCÉDÉS POST-RÉCOLTES

Pour pouvoir apprécier l'impact des interactions « dispositifs de plantations/procédés post-récoltes/différentes catégories de fèves » sur la qualité des produits finis, deux volets de recherches exploratoires ont été effectuées :

Lors du premier passage de F. Descroix dans le Sambirano, en décembre 2012, les observations et entretiens réalisés chez et avec des paysans et des opérateurs de la filière, ont fait percevoir une inadéquation entre les informations observées et recueillies et celles de la littérature que l'on eut résumer ci-après :

¹¹ Rapports annuels FOFIFA 1974-1980.

¹² Michel DUGUAUGEZ (in Rapport de mission, PIC 2, 2015)

- Les paysans, sans encadrement depuis de nombreuses années, méconnaissent la culture cacaoyère et les procédés de transformation primaire ;
- Les vergers cacaoyers paysans présentent une majorité de cacaoyers Forastero de moindre potentiel qualitatif que les vergers des groupes industriels composés principalement de Criollo et de Trinitario ;
- La faible production de la cacaoyère chez les petits producteurs en comparaison avec les entreprises industrielles serait due à plusieurs facteurs notamment le vieillissement des arbres, la disparition des arbres d'ombrage, la pratique d'autres cultures dans la cacaoyère, le manque d'entretien, l'indisponibilité des moyens financiers chez les paysans ;
- Les groupes industriels produisent du cacao supérieur tandis que les paysans du cacao standard par manque d'unités de transformation adaptées et principalement de magasins de stockage.

Aussi, deux études ont été mises en place pour faire un point sur l'état des vergers cacaoyers et sur les procédés de transformation mis en œuvre dans le Sambirano.

- Une première intitulée : Etude des dispositifs de culture de cacaoyers dans le Sambirano par l'évaluation de leur potentiel de productivité et l'appréciation de la qualité des produits (Rahaingosambatra Dina Harisoa pour obtenir le diplôme d'études approfondies de l'Université d'Antananarivo). Cette étude a été réalisée dans le cadre du réseau QualiREG sur financement POCT Réunion¹³ dans le cadre d'une collaboration du DP « Forêts et Biodiversité à Madagascar et du DP « Co-conception de système agroalimentaires de qualité du Cirad la Réunion », sous la co-direction pédagogique et scientifique de Messieurs Jean Jacques Rakotomalala du FOFIFA et Frédéric Descroix (CIRAD-Réunion).
- Une seconde intitulée : Caractérisation et éléments de différenciation des cacaos dans la vallée du Sambirano à Madagascar (Elisa Bousquet pour obtenir le diplôme d'ingénieur de Montpellier SupAgro en Systèmes Agricoles et Agroalimentaires Durables au Sud). Cette étude a été également réalisée sur financement QualiREG (POCT Réunion 2008-2013) dans le cadre d'une convention de stage entre Montpellier SupAgro, institut des régions chaudes et le CIRAD Persyst, DP « Co-conception de systèmes agroalimentaires de qualité du Cirad la Réunion » sous la direction scientifique de Frédéric DESCROIX (CIRAD-Réunion).

Etude 1 : les dispositifs de culture du cacaoyer dans le Sambirano en 2013
Comme les dernières données fiables datent des années 1970, les objectifs spécifiques ont consisté à faire une actualisation de la situation en 2013 par la caractérisation des dispositifs de plantations dans les principales structures de productions et les différentes zones du Sambirano dans le but de déterminer les éléments pour l'amélioration quantitative et qualitative de la production.

Méthodologie de l'étude des dispositifs de culture du cacaoyer
L'étude a considéré les dispositifs de plantations dans 4 structures de productions : groupe industriel (SOMIA), producteurs membres de coopératives (ADAPS), producteurs familiaux (indépendant), des cacaoculteurs non rencontrés nommés « inconnus ».

¹³ Programme Opérationnel de Coopération Territoriale (2008-2013) co-financé par l'Union Européenne (FEDER), l'Etat Français (FCR), le Conseil Régional de la Réunion et CIRAD

Tableau 1 : Ventilation des placettes selon les zones et les structures de production

Opérateurs Zones	ADAPS	Indépendant	Inconnu	SOMIA	Total
A HSM	14	7	2	0	23
A SM	0	0	0	21	21
BS	2	4	1	0	7
MS	3	0	3	0	6
HS	0	1	6	0	7
O	0	1	2	0	3
S	4	6	3	0	13
TOTAL	23	19	17	21	80

La cacaoyère du Sambirano a été découpée en 7 entités géographiques (Carte 1 et Photo 1-2) : le Sud d'Ambanja (S), la RN 6 d'Ambanja à Mailakapasy, l'Ouest (O) entre Hantsahampano et la baie d'Andamoty, les vergers de la SOMIA (A SM), la périphérie d'Ambanja hors vergers industriels (A HSM), le bas Sambirano (BS) de la sortie d'Ambanja jusque Ambobaka, le moyen (MS) Sambirano de Ambobaka jusque Maevatanana, le Haut Sambirano (HS) de Maevatanana jusque Marovato.

Des inventaires ont été réalisés dans 80 placettes de 100 m² chacune. Le tableau 1 relève le nombre de placettes étudiées suivant les structures de production et les zones.

Arbres d'ombrage au-dessus des cacaoyers
Les relevés des comptages des arbres d'ombrage ont été réalisés selon les zones et les structures. Le nombre d'arbres a été calculé à l'hectare (arbres comptés/100×10000). Les tableaux 2 et 3 ci-après donnent trois groupes pour le test de Fisher au seuil de 5 % tant pour les zones que pour les opérateurs.

Tableau 2 : Inventaire des arbres d'ombrage dans la cacaoyère selon les zones

Zones	Arbres/ha	Écartements en mètres	Fisher 5 %
BS	200,0	7,1 x 7,1	A
A HSM	190,0	7,2 x 7,2	A
S	138,5	8,5 x 8,5	AB
A SM	123,8	9,0 x 9,0	AB
MS	100,0	10,0 x 10,0	AB
HS	71,4	12,0 x 12,0	B
O	66,7	12,25 x 12,25	B

La surface moyenne au sol couverte par les arbres d'ombrage est :

- de 50 m² dans le bas Sambirano avec 28 % d'*Albizia lebbeck*, 21 % de *Cananga odorata*, 15 % de *Albizia saman*, 15 % de *Mangifera indica*, 15 % d'*Artocarpus heterophyllus* et 6 % de *Ceiba pentandra*. 10 % de ces arbres ont une hauteur < 12 mètres, 80 % une hauteur comprise entre 12 et 20 m et 10 % une hauteur > 20 mètres ;
- de 52 m² en périphérie d'Ambanja hors groupes industriels avec 43 % d'*Albizia lebbeck*, 24 % de *Albizia saman*, 6 % de *Spathodea campanulata*, 6 % d'*Artocarpus heterophyllus*, 3 % de *Terminalia mantaly*, 3 % de *Ceiba pentandra*, 3 % de *Ficus sp.* et environ 2 % d'autres espèces comme *Senna siamea*, *Spondias dulcis*, *Mangifera indica*, *Castilla elastica*, *Cananga odorata* et *Artocarpus altilis*. 33 % des arbres ont une hauteur < 12 mètres, 34 % une hauteur comprise entre 12 et 20 m et 33 % une hauteur > 20 mètres ;
- de 72 m² dans le sud, avec 29 % de *Albizia saman*, 24 % d'*Artocarpus heterophyllus*, 23 % d'*Albizia lebbeck*, 6 % de *Senna siamea*, 6 % *Spathodea campanulata*, 6 % de *Artocarpus altilis* et 6 % de *Cananga odorata*. 34 % des arbres ont une hauteur < 12 mètres, 33 % une hauteur comprise entre 12 et 20 m et 33% une hauteur > 20 mètres ;
- de 80 m² pour le groupe industriel, avec 47 % de *Albizia saman*, 37 % d'*Albizia lebbeck*, 5 % de *Ficus sp.*, 6 % *Senna siamea* et 5 % *Castilla elastica*. 34 % des arbres ont une hauteur < 12 mètres, 33 % une hauteur comprise entre 12 et 20 m et 33 % une hauteur > 20 mètres ;
- De 100 m² dans le moyen Sambirano avec 50 % d'*Albizia lebbeck*, 17 % de *Albizia saman*, 17 % d'*Artocarpus heterophyllus* et 16 % de *Terminalia mantaly*. 17 % des arbres ont une hauteur < 12 mètres, 66 % une hauteur comprise entre 12 et 20 m et 17% une hauteur > 20 mètres ;
- de 140 m² dans le haut Sambirano avec 75 % d'*Albizia lebbeck*, 25 % de *Syzygium sp* et 25 % de *Ceiba pentandra*. 60 % des arbres ont une hauteur < 12 mètres, 40 % une hauteur comprise entre 12 et 20 mètres ;
- de 150 m² dans l'Ouest. avec 50 % de *Cananga odorata* et 50 % de *Albizia saman*. 33 % des arbres ont une hauteur < 12 mètres, 34 % une hauteur comprise entre 12 et 20 m et 33 % une hauteur > 20 mètres.

Excepté dans l'Ouest où 50 % des arbres sont des *Cananga odorata* (Ylang Ylang) à frondaison réduite, les niveaux d'ombrage sont satisfaisants si nous considérons l'âge et de la frondaison des arbres d'ombrage. Des différences sont toutefois relevées suivant la répartition géographique.

Tableau 3 : Inventaire des arbres d'ombrage dans la cacaoyère selon les structures de production

Opérateurs	Arbres/ha	Ecartement en m	Fisher 5 %
ADAPS	182,609	7,4 x 7,4	A
Indépendant	136,842	8,6 x 8,6	AB
SOMIA	123,81	9,0 x 9,0	B
Inconnus	105,882	10,2 x 10,2	B

Bien que significativement différent à 5 % pour le test de Fisher, l'ombrage au-dessus des cacaoyers est satisfaisant quelle que soit la structure de production quand nous considérons l'âge et la frondaison des arbres d'ombrage. Les chiffres moyens montrent un nombre d'arbres par ha sensiblement plus faible dans la structure industrielle (21 placettes) et chez les producteurs inconnus (17 placettes), alors qu'il est plus important chez les producteurs de l'ADAPS et les indépendants (42 placettes).

Cet inventaire et les observations in situ montrent qu'il n'y a pas de réduction du nombre d'arbres d'ombrage chez les producteurs familiaux. Cet agrosystème forestier paysan est un mode d'exploitation et de conservation soutenables qui s'oppose au système de cultures sur abattis-brûlis (« tavy ») qui prédomine en zone périforestière.

Densité en cacaoyers/ha

La densité cacaoyère est de l'ordre de 900 pieds par hectare en moyenne pour 5 des 6 zones. Dans la zone O, l'importante différence entre la moyenne (633) et la médiane (800) montre que de nombreuses cacaoyères de cette zone ont des densités faibles en cacaoyers ou plus précisément de multiples plages sans cacaoyers dans les vergers.

La densité de cacaoyers par hectare est de 900 pieds ou plus dans 50 % des cacaoyères (médiane) pour toutes les structures de production.

Tableau 4 : Densité en cacaoyers par ha selon les zones

	O	MS	HS	BS	AHS	ASM
Médiane	800,0	900,0	900,1	900,1	909,1	932,6
Moyenne	633,6	888,6	891,9	1041,5	924,7	900,7

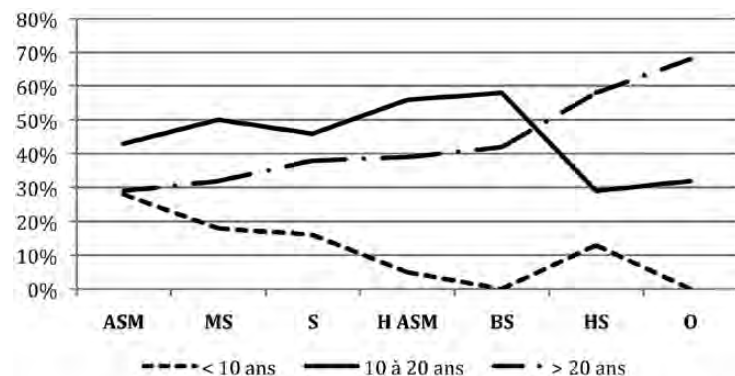
Tableau 5 : Densité en cacaoyers par ha selon les structures de productions

	ADAPS	Inconnus	Indépendants	SOMIA
Médiane	900,0	900,0	1 000,0	932,6
Moyenne	872,1	851,0	1 060,8	907,0

L'étude montre que les cacaoyères des petits producteurs ont une densité proche de 900 cacaoyers par hectare, équivalente à celle du groupe industriel. Notons que les indépendants appliquent des densités plus élevées qui correspondent à des écartements de 3 x 3 m couramment pratiqués dans d'autres pays producteurs de cacao.

Estimation de l'âge des cacaoyers

L'âge est estimé par le diamètre du tronc à 1 mètre de hauteur combiné avec la hauteur de l'arbre. Trois classes d'âge ont été considérées : de 0 à 10 ans - cacaoyers juvéniles entrant en production, de 10 à 20 ans - cacaoyers adultes en production, plus de 20 ans - cacaoyers adultes susceptibles de connaître une diminution des productivités.



ASM : SOMIA,
MS : Moyen Sambirano,
S : Sud d'Ambanja,
H ASM : Périphérie d'Ambanja
hors SOMIA,
BS : Bas Sambirano,
HS : Haut Sambirano,
O : Ouest

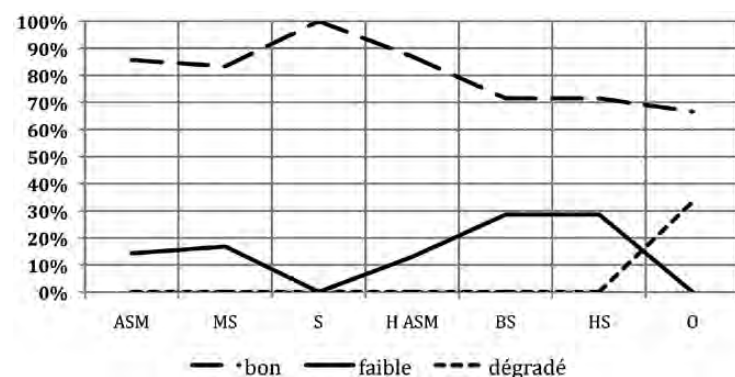
Figure 3 : Cacaoyers par tranche d'âge selon les zones

Du fait de sa disponibilité en foncier et de la stratégie de rénovation mise en œuvre ces dernières années, les vergers de la SOMIA ont aujourd'hui environ 30 % de jeunes vergers (< 10 ans) et 30 % de vieux vergers (> 20 ans). Ainsi cette compagnie industrielle a plus de jeunes cacaoyers par rapport aux paysans qui cependant rénovent ou étendent leurs vergers dans les zones du Sud, du haut et du moyen Sambirano. En effet notons la présence de jeunes cacaoyers (< 10 ans d'âge) dans les cacaoyères paysannes du MS, S, H ASM et HS. Dans le Bas Sambirano et en périphérie d'Ambanja, pourtant proche de la ville, les familles rurales donnent priorité aux cacaoyers dont un fort pourcentage de cacaoyers ont moins de 20 ans. La demande en vivriers de la ville d'Ambanja ne favorise pas la replantation cacaoyère dans l'Ouest, et le bas Sambirano. L'enquête a révélé que dans l'Ouest, les producteurs préfèrent accorder leur terrain et leur temps de travail aux cultures vivrières pour satisfaire la demande en vivriers, ceci en remplacement de la mortalité des vieux arbres.

Etat physiologique des frondaisons des cacaoyers

L'état physiologique des frondaisons a été évalué par l'observation de l'importance du nombre de feuilles et de leur état sanitaire.

Le Figure 4 montre que près de 80 % des cacaoyers ont un bon état physiologique pour le S, MS, H ASM et ASM, 70 % pour HS et BS. Seule la zone O présente des cacaoyers à la frondaison dégradée.

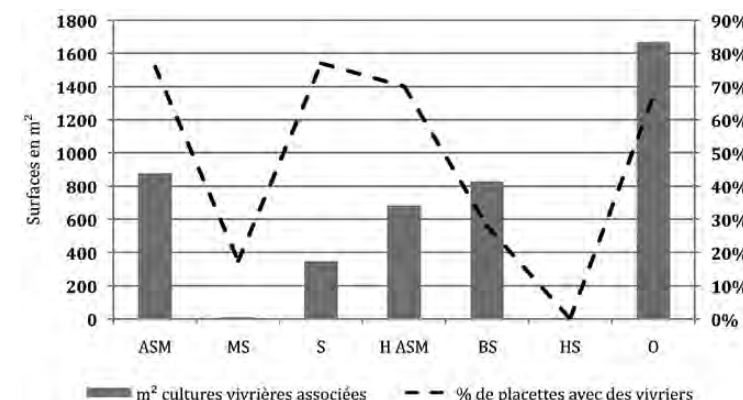


ASM : SOMIA,
MS : Moyen Sambirano,
S : Sud d'Ambanja,
H ASM : Périphérie d'Ambanja
hors SOMIA,
BS : Bas Sambirano,
HS : Haut Sambirano,
O : Ouest

Figure 4 : Etat des frondaisons des cacaoyers

Cultures vivrières en association avec les cacaoyers

L'analyse par zone relève (Figure 5) que dans la zone Ouest proche d'Ambanja, les producteurs pratiquent des cultures vivrières en moyenne sur 16 % des surfaces en cacaoyers. Dans les autres zones, A HSM, BS, A SM, ils les pratiquent sur 3,5 à 8,8 % des surfaces cacaoyères. Notons aussi que dans le MS et HS cette pratique est négligeable ou nulle.



ASM : SOMIA,
MS : Moyen Sambirano,
S : Sud d'Ambanja,
H ASM : Périphérie d'Ambanja
hors SOMIA,
BS : Bas Sambirano,
HS : Haut Sambirano,
O : Ouest

Figure 5 : Cultures vivrières dans la cacaoyère par zone

Ainsi, globalement, la pratique par les villageois d'autres cultures dans la cacaoyère est plus fréquente à proximité d'Ambanja mais peu ou pas pratiquée dans les zones éloignées de ce centre consommateur. Dans ces zones éloignées, elle découle de la distance et des difficultés de transport des produits vivriers vers les marchés consommateurs.

L'analyse de variance sur la surface moyenne occupée par les cultures associées par ha entre les structures de production ne donne pas de différence significative ($p = 0,424$). La SOMIA et les paysans indépendants pratiquent plus de cultures associées, respectivement 878 et 796 m²/ha (Figure 6).

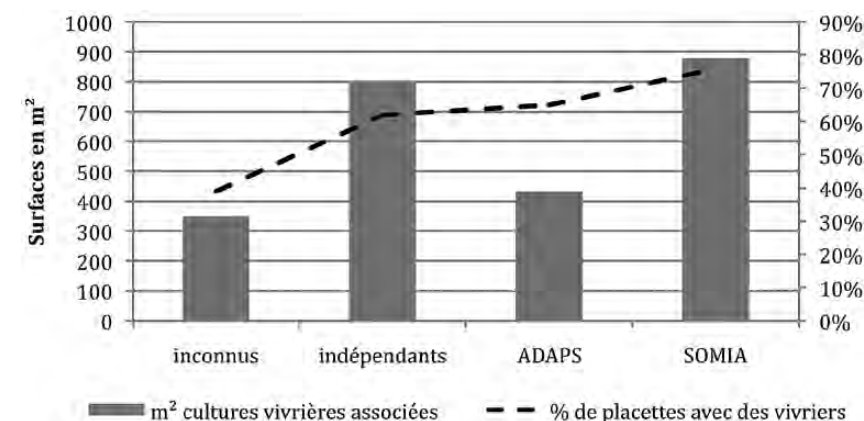


Figure 5 : Cultures vivrières dans la cacaoyère par zone

Nous devons préciser que le groupe industriel favorise la pratique de ces associations (notamment le bananier) pour l’alimentation de ses salariés pendant les heures où ils travaillent dans les vergers.

La pratique de cultures associées, dans les vergers cacaoyers des petits producteurs, qui mettrait en péril la production cacaoyère paysanne ne se vérifie donc pas.

Charge en fruits dans la période de l’étude

Les comptages de cabosses-chérelles, dans la période de l’étude, ne peuvent donner qu’une indication de la production des cacaoyers laquelle s’étale pendant 10 mois sur 12. Il n’est donc pas possible de calculer la productivité par hectare à partir de ces comptages.

Le test Fisher (Tableau 6) différencie quatre groupes pour la charge en cabosses selon les zones : le Moyen Sambirano et SOMIA (A) ont la plus forte charge en cabosses par ha. Le deuxième groupe (AB) correspond au S ; le troisième groupe (B) est formé par BS, HS et H ASM ; le dernier groupe (C) par l’Ouest.

La région Ouest avec une charge en cabosses beaucoup moindre que les autres est la résultante des différents paramètres du rendement précédemment étudiés comme un nombre d’arbres d’ombrage et de cacaoyers moins important et un fort pourcentage de frondaisons dégradées.

Tableau 6 : Charge en cabosses et chérelles¹⁴ par ha selon les zones dans la période 5 avril au 30 juin

Zones	Cabosses	Chérelles	Fisher 5 % (cabosses)
MS	5 518,2	2905,7	A
ASM	5 016,9	1900,5	A
S	4 654,3	1764,5	AB
BS	4 238,9	6884,3	B
HS	4 174,0	6591,1	B
H ASM	4 188,9	4272,1	B
O	2 269,3	1742,4	C

Tableau 7 : De la charge en cabosses et chérelles par ha selon les opérateurs

Zones	Cabosses	Chérelles	Fisher 5 %
SOMIA	5016,9	1904,7	A
Inconnus	4527,3	5744,2	A
Indépendants	4900,9	2545,9	A
ADAPS	3837,2	3750	A

¹⁴ Chérelle est le jeune fruit d’environ 10 cm de longueur qui va évoluer en cabosse moyenne (entre le stade chérelle et le stade adulte) puis en cabosse adulte lorsque le fruit atteint son développement maximum sans être parvenu à maturité.

Pour les opérateurs (Tableau 7) l’analyse des variances et le test de Fisher ne donnent aucune différence significative pour les rendements en cabosses+chérelles par ha.

Pour la période considérée ces résultats ne permettent pas de confirmer les affirmations courantes qui signalent une productivité beaucoup plus faible chez les paysans que chez les industriels. Si la charge en cabosses est légèrement moindre en paysannat, elle ne permet pas de relier cette charge en fruit avec la densité de l’encadrement puisque les producteurs de l’ADAPS sont les seuls à avoir bénéficié d’un encadrement technique ces dernières années (Financements AFDI, Picardie et Nespresso).

Discussions sur l’étude 1

Les résultats de l’étude contredisent les affirmations que le verger cacaoyer est en déclin et se dégrade par manque d’encadrement. La densité d’arbre d’ombrage et la proportion révélatrice de jeunes cacaoyers dans la majorité des cacaoyères familiales montrent l’intérêt des familles rurales pour le produit cacao. Ces dernières densifient ou replantent à leur rythme leurs cacaoyères le plus souvent sans appui technique ni financier par la mise en œuvre de pratiques copiées sur les entreprises industrielles. Les densités en arbres d’ombrage et cacaoyers, l’état des cacaoyères, le faible pourcentage de la surface en association avec des vivriers et la charge en cabosses sont proches quelques soient les zones et les structures de production.

Si le verger permet aujourd’hui encore des productions de qualité, il nous faut nous interroger sur la qualité du matériel végétal actuellement planté quel que soit la structure de production. En effet les fécondations croisées réduisent de générations en générations la proportion de fèves à tendance *Criollo* ou *Trinitario*, ce qui ne pourra que réduire à terme le potentiel de qualité du verger. Ce constat milite pour une relance de la sélection variétale qui devra être suivie de la distribution massive d’un matériel végétal *Trinitario* à amande claire, quantitativement et qualitativement performant.

Sur le plan écologique, cette filière d’exportation présente l’indéniable avantage d’une production agroalimentaire sous couvert forestier. Ce dispositif agroforestier sera préservé de la pratique de l’agriculture sur brûlis, écologiquement destructrice, mais communément pratiquée dans de nombreuses régions malgaches tant que cette production cacaoyère sera économiquement plus intéressante pour les familles rurales que les autres productions agroalimentaires pratiquées dans la zone. Ainsi soutenir et améliorer la production cacaoyère permettra de maintenir cet espace boisé dans cette zone habitée limitrophe de la Réserve Naturelle Intégrale de Tsaratanana. A contrario, la disparition progressive de ce tampon agroforestier ne pourra que favoriser la pénétration de la population dans la zone protégée qu’est cette réserve.

Etude 2 : Caractérisation et éléments de différenciation des cacaos dans la vallée du Sambirano

Il existe une nette diversité des cacaos au sein de la zone du Sambirano. Les échantillons collectés représentent plusieurs diversités en fonction des zones, des structures de production, des procédés de transformation et des durées de fermentation.

Rappelons que malgré une disparité réelle, le cacao malgache est, au niveau international, gage de qualité, et ce, car dans sa globalité classé en cacao fin.

Les acteurs post-récolte du cacao dans le Sambirano

Nombreux sont les acteurs de la filière cacao dans le district d'Ambanja. La filière dite classique du producteur à la société export comprend beaucoup d'intermédiaires. Le cacao est vendu par les producteurs à des sous-collecteurs et/ou des petits collecteurs, qui revendent aux moyens collecteurs, lesquels revendent aux grands collecteurs. Deux filières courtes, les groupements de producteurs (ou les coopératives) et certaines sociétés qui produisent et transforment le cacao et le négocient directement avec les sociétés exports.

Le plus souvent les petits producteurs vendent le cacao en frais ou en cacao fermenté, non trié et insuffisamment séché. Le sous-collecteur aide le petit collecteur à rassembler le cacao frais. Le petit collecteur et le moyen collecteur achètent en frais, transforment et vendent le cacao fermenté non trié et insuffisamment séché. Le grand collecteur achète en frais et effectue la fermentation et le séchage ou achète du cacao le plus souvent insuffisamment fermenté en demi-sec et effectue la fin du séchage, le triage et le conditionnement.

Le cacao marchand est majoritairement destiné à l'export. Quelques rares entreprises implantées à Madagascar transforment les fèves de cacao. C'est le cas de la Société d'Exploitation de Cacao de Madagascar (SECAMAD) qui est implantée à Diego Suarez et produit de la masse de cacao et celui des chocolateries ROBERT et CINAGRA, deux sociétés malgaches qui produisent du chocolat.

Les ressources variétales du Sambirano

La première variété de cacao cultivée à Madagascar dans la région Ouest fût le Criollo en fin du 19^e siècle puis au début du 20^e furent introduits les cacaoyers Forastero qu'on appelle aussi « cacao Tamatave » à Madagascar.

Fruit de l'allogamie, au sein d'une même cabosse, on retrouve des fèves violettes caractéristiques Forastero, des fèves claires caractéristiques Criollo et des fèves de couleurs intermédiaires moyen clair type Trinitario (Echelle de couleur des amandes de la Figure 1).

Les comptages effectués dans différents vergers de la zone du Sambirano (coupe longitudinale sur 50 fèves sélectionnées aléatoirement) permettent d'avoir une première évaluation de cette diversité. Ils relèvent une majorité de fèves du type Trinitario (Tableau 8), une présence non négligeable de fèves claires de type Criollo et la présence d'environ une fève sur trois de type Forastero.

Pour les données obtenues il n'y a pas de différence variétale significative calculée entre la zone du Haut Sambirano et celle du Bas Sambirano, ni entre les vergers de la société SOMIA et ceux des paysans. La constitution variétale des vergers ne peut donc pas être la cause de la différence de la qualité des produits d'origine paysanne et d'origine industrielle.

Tableau 8 : Pourcentages extrêmes de fèves par couleur dans les vergers du Sambirano

Amande	Couleur A	Couleur B	Couleur C	Couleur D
Haut Sambirano	0	[0 ; 3]	[57 ; 66]	[32 ; 42]
Bas Sambirano	[4 ; 5]	[1 ; 20]	[42 ; 47]	[31 ; 35]
Vergers paysans	[2 ; 4]	[9 ; 12]	[46 ; 51]	[36 ; 40]
Vergers SOMIA	[4 ; 7]	[22 ; 28]	[41 ; 48]	[22 ; 28]

Echantillonnage

Pour le suivi des procédés de transformation, le prélèvement d'un échantillon de cacao est fait en fèves fraîches et à chaque étape de la transformation (brassage ou transvasement) et avant la mise au séchage. Le prélèvement de 3 kg de cacao frais (pour obtenir environ 1kg de fèves sèches) est réalisé en une fois au centre du contenant pour éviter les variations dues à la localisation des fèves.

Pour le procédé industriel et pour garantir la position dans le bac ou pour les microfermentations de Criollo, l'échantillon est inséré dans des filets placés au cœur de la masse. Après chaque prélèvement, le cacao est séché alternativement au soleil et à l'ombre jusqu'à atteindre une hygrométrie inférieur à 8 %. Pour un bon séchage, des brassages réguliers du cacao sont effectués.

Ces échantillons correspondent à :

- 6 suivis de fermentation en sac avec prélèvement aux jours 0, 3 et 5 ;
- 3 suivis de fermentation en bac en bois cloisonné avec prélèvement aux jours 0, 3 et 5 ;
- 6 suivis de fermentation en bacs en bois disposés en cascade. avec prélèvement aux jours 0, 2, 4, 5 et 6 ;
- 3 suivis de fermentation de fèves de cacao type Criollo (terme utilisé pour cette étude qui comporte un minimum de 80 % de fèves à amandes blanches) en bac en bois disposé en cascade avec prélèvement aux jours 0, 4 et 6.

Au total 51 échantillons ont été caractérisés.

Les procédés post-récolte mis en œuvre

La cabosse de cacao qui a atteint sa maturité est récoltée à l'aide de « la gafo » puis déposée dans des corbeilles ou des sacs. L'écabossage se fait manuellement dans le verger à l'aide d'un coupe-coupe « meso be » (Photo 3). Une fois les fèves extraites de la cabosse, l'opérateur sépare les fèves du rachis, puis enlève les fèves immatures, germées ou infectées s'il souhaite obtenir un cacao de meilleure qualité (Photo 4). Le cacao est transporté jusqu'au lieu de transformation dans des sacs ou des tonneaux en plastique, à têtes d'homme, sur des charrettes tirées par des zébus ou bien sur des véhicules motorisés.

Nous devons noter une pratique croissante de vol de cabosses dans les vergers, pratique qui pénalise les producteurs mais aussi donne des cacaos de mauvaise qualité par la cueillette de fruits immatures. Cette pratique est la conséquence de l'affluence à certaines périodes d'acheteurs non professionnels du cacao qui recherchent une opportunité financière et qui, ne se souciant en rien de la qualité du produit, achètent tout ce qu'ils peuvent.

Parmi les diverses variantes de procédés post-récolte mises en œuvre dans la zone du Sambirano, nous avons étudié les trois procédés de fermentation du cacao majoritairement appliqués :

- Une fermentation dans des sacs, en plastique tressé, pratiquée par environ 55 % des coopératives et par la très grande majorité des petits et moyens collecteurs et les producteurs individuels ;
- Une fermentation dans des bacs en bois cloisonnés posés au sol, mis en oeuvre par certains moyens collecteurs et environ 40 % des coopératives ;
- Une fermentation dans des bacs en bois disposés en cascade (trois ou quatre rangées de bacs les un en dessous des autres), utilisée majoritairement par les grandes sociétés et certaines coopératives (environ 5 %).

La fermentation en sac

La fermentation en sac de polypropylène de récupération (conditionnement du riz) permet de traiter des petites quantités de fèves (Photo 5). Le sac peut contenir une quantité maximale de 12 kg de fèves fraîches. Dans la majorité des cas, ce contenant est privilégié pour obtenir du cacao dit standard et la fermentation est de courte durée (2 à 3 jours) et le séchage est partiel. Cependant on retrouve aussi des procédés de fermentation en sac, d'une durée de 4 ou 5 jours avec un brassage. Celui-ci est rempli parfois à moitié ou au $\frac{3}{4}$. S'il y a plusieurs sacs, ceux-ci sont mis les uns sur les autres à l'intérieur d'une cabane en rachis de Ravenala. Le séchage se fait au soleil selon les opérateurs sur des aires cimentées, des bâches plastiques ou des tapis en natte tressée. La durée moyenne est de 3 jours avec une exposition quotidienne moyenne de 8 heures au soleil. L'après-midi, le cacao est mis dans des sacs et rentré à l'intérieur des cabanes. Au bout des 3 jours, le cacao est mis en sac et vendu dès que possible à des collecteurs ou sociétés qui achètent les fèves semi-sèches. Ces opérateurs finiront le séchage et réaliseront un triage pour éliminer les fèves à défaut ou plates avant de les conditionner pour l'exportation.

La fermentation en bac cloisonné

Dans certaines structures, la fermentation est effectuée dans un bac en bois cloisonné, posé au sol ou bien dans deux bacs en bois séparés (Photo 6). Ce procédé permet de contenir un volume plus important que les sacs (200 à 250 litres de fèves fraîches correspondant entre 300 et 400 kg de fèves fraîches) et demande moins de place et d'investissement que les bacs en cascade. Notons que durant la période de l'étude, ce sont surtout des bacs vides non utilisés qui ont été répertoriés. Les propriétaires attendent la saison de haute production pour les utiliser alors que dans la période de faible production, ils fermentent en sac ou bien vendent en frais.

La fermentation en bacs en cascade

Le procédé de bacs en cascade est la référence qui permet d'obtenir la meilleure qualité (Photo 7). Il permet de fermenter et de brasser de gros volumes (1 500 kg de fèves fraîches par bac (1,8 m x 1,2 m x 0,8 m), c'est pourquoi il est utilisé par les compagnies industrielles, les moyens producteurs de plusieurs dizaines d'hectares de vergers et certaines coopératives. Généralement ces dernières utilisent des bacs plus petits (1,2 m x 0,8 m x 0,8 m).

Principales pratiques selon les zones

Dans la zone 1, le Haut Sambirano, les producteurs vendent en frais à un collecteur proche qui effectue la fermentation et le séchage. Une minorité transforme et vende en fermenté-séché à de plus grands collecteurs.

On retrouve surtout les procédés de fermentation dans des sacs ou bien dans le cas de certaines coopératives, dans un bac unique ou dans des bacs en cascade (3 bacs). Dans la zone 2, le Bas Sambirano, l'accès aux grandes sociétés et aux exportateurs est possible (route bitumée, temps de transport court) et les petits producteurs préfèrent vendre en frais (entrée d'argent rapide et travail moindre) à des grands collecteurs, une coopérative ou aux sociétés industrielles.

Dans les 2 zones, les différents procédés de fermentation (en sac, bac cloisonné et bacs en cascade) sont pratiqués en fonction de l'opérateur.

Suivi des paramètres physico-chimiques

Le suivi de la température de la masse en fermentation est effectué à l'aide de thermoboutons ($-40 / + 85^{\circ}\text{C}$, ATL[®]) déposés au centre de la masse, ce qui permet de relever la température toutes les heures (résolution de $0,1^{\circ}\text{C}$).

Le Figure 7 relève une montée en température qui montre qu'il y a bien fermentation. Le pH est mesuré à chaque étape directement dans la masse de cacao à l'aide d'un pH-mètre portable (HI 9124, HANNA), à trois emplacements différents (calcul de la moyenne) pour être le plus représentatif de l'ensemble de la masse, ceci quelque soit le contenant. Cette élévation de température diffère en fonction de la durée.

Evolution de la couleur des fèves durant la fermentation

La couleur interne des cotylédons varie en fonction de la fermentation. Elle est constatée par la méthode du cut test. L'amande d'une fève non fermentée est de couleur blanche ou ardoisée selon la variété. Durant la fermentation, la couleur vire au violet pour ensuite devenir brun foncé (Figure 8). Pour les échantillons étudiés, aucune fève ardoisée n'est retrouvée après 3 jours de fermentation et plus de 90 % des fèves sont brunes après 5 jours de fermentation quel que soit le contenant (sac ou bac en cascade).

Composition chimique des fèves de cacao

Les échantillons prélevés à Madagascar ont une empreinte spectrale proche infrarouge qui est comparable à l'ensemble de la base de données des cacaos échantillonnés au Cirad. Le modèle prédictif mis en place pour caractériser la composition chimique du cacao peut donc être utilisé pour ces échantillons. Les teneurs en matière grasse, caféine, théobromine, ammoniac (NH_3), en épicatechine et ses oligomères (les dimères : les procyanidines B2 et B5 et le trimère : la procyanidine C1) de chaque échantillon ont pu ainsi être calculées. On observe une diversité des spectres sur l'ensemble des cacaos collectés, ce qui montre qu'il y a des différences dans les compositions biochimiques des échantillons. Cette différence spectrale peut être mise en exergue en faisant l'écart-type des absorbances mesurées à chaque longueur d'onde. On observe un écart-type important aux longueurs d'onde à 420 nm et à 639 nm qui correspondent respectivement à la couleur bleu et à la couleur orange. Les échantillons n'absorbent pas à la même intensité ces longueurs d'onde : c'est à dire que la poudre de cacao reflète plus ou moins la couleur complémentaire, qui est orange brun et bleu vert. Les autres écarts-types importants sont au niveau des longueurs d'ondes 1 724 nm et 2 308 nm qui correspondent aux bandes d'absorption des $-\text{CH}_2$ des huiles et à 2 056 nm qui correspond à la bande d'absorption des liaisons N-H des protéines.

La teneur en matière grasse des échantillons varient entre 50 et 58 % de matière sèche. Cette variabilité est observée au sein même d'échantillons ayant eu le même procédé et la même durée de fermentation. La teneur en azote ammoniacal augmente de 0 ppm pour des fèves non fermentées à 350 ppm pour les fèves fermentées. La teneur en polyphénols (épicatechine et ses oligomères B2, B5 et C1) diminue de 3,5 à 0,5 mg/g de matière sèche au cours de la fermentation mais ne disparaît pas complètement. Le Figure 9 permet la visualisation de la teneur des échantillons analysés et de repérer le degré de fermentation des échantillons.

Les fermentations en sac et en bac dit standard (de 3 jours de fermentations) ont peu d'azote ammoniacal alors que le cacao dit supérieur en contient en moyenne 1,5 fois plus. A titre de comparaison les teneurs en NH_3 pour Sac 5 j sont de 205 ppm, pour bac 5 j de 240 ppm et pour bac 6 j de 340 ppm.

L'impact du procédé de fermentation du cacao sur les caractéristiques sensorielles

L'ACP de la Figure 10 permet de visualiser les 51 liqueurs de cacao. Les axes 1 et 2 portent respectivement 67,29 % et 11,04 % de l'information.

Il apparaît globalement 2 groupes de liqueurs bien distincts. Le cercle vert regroupe les lots fermentés de 3 à 6 jours, le cercle rose les lots non fermentés ou avec 1 à 2 jours de fermentation.

La CAH¹⁵ a classé les 51 liqueurs en 2 groupes.

Le Figure 11 représente la moyenne des notes des échantillons regroupés par groupe pour chaque descripteur.

Pour le groupe 1 (cacaos non fermentés ou fermentés 1 ou 2 jours), les liqueurs sont plutôt corrélées aux descripteurs négatifs : pharmaceutique, astringence, sous-bois, animal, amertume.

Quant au groupe 2 (cacaos fermentés 3 à 6 jours), les liqueurs sont plutôt corrélées aux descripteurs positifs : odeur fruitée, doux et chocolat, saveurs acidulée, fruits rouges, fruits jaunes, doux, chocolat.

Analyse sensorielle

Les analyses ont été réalisées à la Réunion avec le concours de la confrérie des dégustateurs experts sous la supervision et participation de Sophie Assemat, expert du Cirad en analyses sensorielles et membre de l'académie du Chocolat.

Après préparation des liqueurs¹⁶, les échantillons ont été dégustés par un panel de 11 juges¹⁷. Compte tenu du nombre de 51 échantillons, 6 séances de dégustation ont eu lieu afin de faire déguster les 51 liqueurs en 2 répétitions (16 échantillons à déguster par séance et 19 pour les deux dernières séances).

Les tests statistiques et les analyses de données mis en œuvre pour le traitement des résultats sont réalisés par le logiciel XLStat module MX.

La Figure 12 relève la note de synthèse qualité attribuée par le jury pour les échantillons regroupés par procédé et durée de fermentation.

Les résultats des tests sensoriels pour la note moyenne de qualité (moyenne estimée/10) montrent que les procédés paysans en sac avec des durées de fermentation de 4 à 5 jours en bleu foncé dans graphe 12 donnent des produits plus appréciés par le jury que ceux du procédé industriel en Bac avec une durée de fermentation de 6 jours, en bleu clair dans le graphe 12.

Les analyses comparatives ont permis de mettre en évidence :

- Une saveur acide plus marquée pour le procédé de fermentation en bac qu'en sac mais peu de différence globale entre les deux procédés ;
- Une évolution des saveurs au cours de la fermentation des fèves de cacao quels que soient le procédé et le type de producteur. Une fermentation minimale de trois jours est nécessaire pour que les caractéristiques (végétal, astringent, animal) soient substituées par le descripteur « doux » à partir de trois jours et aboutissent aux caractères doux, fruité, chocolat pour les 5^e à 6^e jours de fermentation (idéalement de cinq à six jours selon le type de producteur) ;
- une cinétique différente de la fermentation selon la variété Criollo (note de préférence mieux notée après 4 jours de fermentation) ou Trinitario.

¹⁵ Classification ascendante hiérarchique.

¹⁶ La liqueur de cacao correspond à la masse de cacao chauffée à une température de 48 °C (température optimale pour ressentir les différentes saveurs) 45 minutes avant la dégustation.

¹⁷ Le jury est constitué de 11 juges : 4 hommes (1 expert, 2 confirmés, 1 initié), 7 femmes (1 experte, 4 confirmées, 2 initiées).

Le cacao marchand, dans la zone du Sambirano

Le cacao marchand, dans la zone du Sambirano, est classé en deux qualités : cacao « standard » correspondant principalement aux produits des familles rurales et le cacao « supérieur » par les sociétés industrielles et certaines coopératives. La production de cacao « standard » semble être l'objectif dans la grande majorité des lieux de transformation en paysannat. Ceci est dû principalement au fait que la majorité des clients demandent du cacao standard. Cette demande est traduite pour les producteurs individuels et les collecteurs par la mise en œuvre de procédés avec des durées de fermentation réduites de 2 à 3 jours, y compris pour certains producteurs qui disposent des installations et de la compétence pour faire du cacao supérieur. Ainsi les techniques de fermentation préconisées par la vulgarisation pour obtenir de la qualité supérieure, qui sont connues et comprises par les producteurs et les collecteurs, ne sont pas appliquées faute d'une valorisation qui justifierait des procédés de 5 à 6 jours. Voici une liste non exhaustive de déviations relevées chez des collecteurs, paysans et sociétés coopératives pour s'adapter à la demande des acheteurs en produit standard : pas de raclage des bacs ni de lavage des sacs, pas d'élimination des rachis lors de l'écabossage, parfois présence de fèves pourries et immatures, pas de couverture sur le cacao (tissu en jute ou feuilles de bananiers), pas de brassage, réduction de moitié du temps de fermentation, réduction du temps de séchage, mélange de cacao frais et de cacao partiellement fermenté, mélange sur l'aire de séchage de cacao en séchage depuis quelques jours avec du cacao en sortie de fermentation.

Discussions sur l'étude 2

Les indicateurs étudiés témoignent d'une fermentation quel que soit le procédé mis en œuvre, en sac avec ou sans brassage, en bacs en cascade ou en bac cloisonné. En effet, la température de la masse de cacao augmente jusqu'à dépasser 45 °C dans tous les procédés. L'évolution de la couleur des cotylédons d'ardoisée au brun, de même que la couleur de la coque de marron clair à marron foncé sont des indicateurs d'une bonne fermentation. L'augmentation de la teneur en azote ammoniacal et la diminution de la teneur en polyphénols qui sont des descripteurs fiables, se vérifient dans tous les procédés au cours de la fermentation.

Cette étude a montré que le procédé de fermentation en sacs mis en œuvre par les familles rurales permet d'obtenir lorsque la durée de fermentation est de 5 à 6 jours des produits de qualité équivalente à celle du procédé industriel en bac avec une fermentation de 6 jours.

Cependant les petits producteurs pratiquent des fermentations de durée réduite de 2 à 3 jours pour les causes principales relevées ci-après :

- La très forte demande des acheteurs en cacao standard ;
- La peur du vol au champ de cabosses immatures ;
- Le nombre d'intermédiaires qui se partagent la rente cacao (sous-collecteur, petit collecteur, moyen collecteur, grand collecteur, société exportatrice) ;
- Les petits volumes et les besoins monétaires qui conduisent les familles à vendre en frais une grande part ou la totalité de leur cacao à des collecteurs qui ne trouvent pas d'intérêt financier à assurer une fermentation de durée suffisante ;
- Un prix de vente identique pour le paysan et le collecteur primaire quelle que soit la qualité du produit, ce qui favorise la pratique de durées de fermentation courtes de 2 à 3 jours ;
- L'affluence à certaines périodes d'acheteurs non professionnels du cacao qui recherchent une opportunité financière et qui, ne se souciant en rien de la qualité du produit, achètent tout ce qu'ils peuvent trouver.

Avec 23 796 hectares, le verger cacaoyer malgache est l'un des plus petits des pays producteurs de cacao mais de par ses matériels végétaux plantés, l'un des rares qui disposent d'un très bon potentiel qualitatif. Malgré des caractéristiques organoleptiques très appréciées par les chocolatiers, la grande majorité des productions malgaches est achetée en « *cacao standard* » aux petits paysannats. Ces différents éléments montrent, au-delà d'une diversité apparente, une certaine homogénéité des cacaos de la zone. Si le négoce distingue deux catégories : le cacao standard et le cacao supérieur, l'étude montre un bon à très bon potentiel qualitatif en référence à la norme ISO 2451. Malgré la diversité variétale observée, l'importance de fèves claires (22 % en moyenne de type Criollo et Trinitario à fèves claires, Tableau 8 et Figure 1) attestée par le ratio théobromine-caféine confirme ce potentiel. Si ce potentiel est relativement bien exprimé par les plantations industrielles et certaines coopératives de « *Lazan'ny Sambirano* », il est globalement plutôt déprécié par les collecteurs et les petits paysans qui produisent intentionnellement et principalement du cacao standard, alors que les procédés de transformation du cacao qu'ils mettent en œuvre permettent la production de cacao supérieur lorsqu'ils sont bien conduits.

Conclusion sur les études exploratoires

Les résultats de ces études montrent l'homogénéité des vergers cacaoyers quelle que soit la zone ou la structure de production et une diversité des qualités de cacao dépendant principalement de la durée de fermentation appliquée. Les analyses dévoilent aussi que les paysans ne sont pas à l'origine de la dégradation des produits parce qu'ils vendent majoritairement leur cacao en fèves fraîches aux collecteurs.

La détermination de la composition chimique a mis en évidence la qualité du cacao de Madagascar grâce à l'identification de certains paramètres (teneur en polyphénols faible, teneur en aldéhydes élevée en fin de fermentation, présence de note florale et fruitée). La durée de la fermentation pour le développement d'une qualité optimale est comprise entre quatre et six jours selon le type de contenant pour la fermentation.

L'analyse sensorielle a permis de caractériser les cacaos au niveau organoleptique et préciser leur typicité. Le potentiel de qualité gustative est identique quel que soit le type de producteur (paysans, coopérative, collecteurs) pour le procédé de fermentation en sac pour des durées similaires. L'étude a montré que fermenter 5 à 6 jours selon les procédés utilisés par les paysans, on obtient une qualité équivalente à celle issue du procédé mis en œuvre par les industriels.

Il est donc permis aux familles rurales de produire du cacao supérieur, sans pour autant investir dans des unités de moyenne capacité, mais en assurant des durées qui permettent une complète fermentation des produits. Mais pour favoriser cette pratique de fermentation de 5 à 6 jours, il importe de mettre en place un système d'achat des produits à la qualité. Sans un tel système, les producteurs et les collecteurs ne trouveront pas d'intérêt à changer leurs pratiques et à améliorer le produit s'ils ne peuvent percevoir une meilleure valorisation.

Ces données préalables sont une bonne base pour donner des pistes de travaux de recherches à poursuivre pour une identification précise de la spécificité qualitative des cacaos de cette zone de production.

Devant les suspicions de certains importateurs sur la dépréciation de la qualité du produit malgache, dont une des sources pourrait être attribuée à la forte diversité des plants constituant les cacaoyères actuelles, des actions visant la réduction de cette diversité ont été démarrées.

RÉDUCTION DE LA DIVERSITÉ VÉGÉTALE DES VERGERS

La forte diversité végétale actuelle provient probablement de l'extension et de la densification post-année 80 des plantations à partir de semences. Le cacaoyer étant une plante majoritairement allogame à fécondation croisée, les plants obtenus à partir de semences prises sur un arbre-mère sont forcément hétérogènes. Ainsi, même si les semences proviennent d'arbres-mères Trinitario à 100 % de fèves blanches, la descendance F2 de « demi-frères » qui en résulte sera toujours hétérogène du fait de la disjonction des caractères hérités des parents Criollo et Forastero. Cette hétérogénéité est d'autant plus accentuée à cause du mélange de pollen répandu par les trois variétés cohabitant dans le même verger.

Les études précédentes ont montré que l'application de procédés post-récolte adéquats permet d'avoir des produits de qualité pour l'ensemble des cacaos du Sambirano. Cependant le rajeunissement de certaines plantations qui datent de plus d'une quarantaine d'années s'avère être une nécessité afin d'augmenter le rendement et, partant, raffermir le revenu des producteurs. On constate d'ailleurs actuellement une forte demande en jeunes plants pour l'extension de nouvelles cacaoyères dans cette zone et même ailleurs, sur la côte Est.

Dans ce contexte, le projet PARRUR QualiKKO s'est attaqué à deux actions qui devraient contribuer à réduire la diversité végétale tout en rehaussant la qualité organoleptique des fèves produites pour rester concurrentiel sur le marché international : (i) la création de champs semenciers biclonaux et (ii) la multiplication par embryogénèse somatique des clones sélectionnés.

Les champs semenciers biclonaux

C'est une alternative qui a l'avantage de donner des résultats rapides à moindre investissement. Cette méthode a été appliquée en Côte d'Ivoire (Lachenaud et Sounigo, 1997) pour fournir des semences améliorées. Elle nécessite la connaissance au préalable de la compatibilité des clones utilisés (Lanaud et *al.*, 1987). Dans le cas de Madagascar, son adoption permettrait de réduire ostensiblement le coût de transport de jeunes plants surtout dans les zones enclavées du Haut Sambirano.

La technique consiste à multiplier par bouturage les arbres-mères sélectionnés, puis à les planter dans des champs isolés éloignés de toute plantation cacaoyère. Les semences à distribuer chez les planteurs seront issues de ces champs.

Pour ce faire, divers travaux préliminaires pouvant être exécutés durant la courte durée du projet ont été démarrés.

Inventaire des clones Criollo et Trinitario de la collection FOFIFA

Les anciens rapports de l'IFCC (1960 à 1972) font état de 72 clones composés de 42 Criollo purs introduites (IFM 1 à IFM 42) et 30 Trinitario (IFM 200 à 229) établis dans la station d'Ambanja.

Quarante cinq d'entre eux ont été conservés en parc à bois. Il en reste actuellement 22 clones rescapés des conséquences des aléas climatiques, mais surtout, des trentaines d'années de mise en veilleuse des activités du FOFIFA d'Ambanja, faute de crédit de fonctionnement. Le pourcentage de survivants varie de 0 à 44 %.

Parmi ces rescapés figurent des types Forastero purs (IFM205) et des Criollos et Trinitarios à pourcentage élevé de fèves claires (IFM 1, IFM 208, IFM 213, IFM 215 et IFM 227) (Tableau 9).

Les clones IFM1, IFM 215 et IFM 227 ont été retenus pour constituer les trois premiers champs semenciers biclonaux (CSB). La multiplication par bouturage des arbres-mères sélectionnés a été conduite au FOFIFA Ambanja après réhabilitation de la pépinière et des ombrières.

Tableau 9 : Inventaire des clones existants dans la collection de FOFIFA

Clones	Nb total	Nb survivants	% Survivants	% fèves blanches type Criollo	% fèves claires type Trinitario*	% fèves sombres type Forastero	Nb fèves observées
IFM 1	878	138	15,72	63	22	0	102
IFM 2	257	88	34,24	36	63	0	120
IFM 3	104	5	4,81				
IFM 14	52	14	26,92	36	63	0	116
IFM 15	232	16	13,22	55	45	0	70
IFM 201	1224	279	23,20	36	64	0	83
IFM 202	104	46	44,23	48	52	0	85
IFM 203	324	100	30,86	16	29	53	104
IFM 205	10	3	30,00	0	1	99	124
IFM 207	276	67	24,28	52	48	0	131
IFM 208	552	128	23,19	64	36	0	125
IFM 209	104	27	25,96	37	63	0	40
IFM 210	360	84	23,33	41	59	0	102
IFM 212	78	17	21,79	51	40	9	106
IFM 213	472	47	9,96	79	21	0	104
IFM 215	552	50	9,06	64	36	0	74
IFM 216	224	50	22,32	17	83	0	101
IFM 217	52	9	17,31				
IFM 218	260	39	15,00	51	41	8	108
IFM 219	104	30	28,85				
IFM 222	156	60	38,46	21	75	3	98
IFM 225	208	61	29,33	29	49	22	103
IFM 227	440	30	6,82	69	31		104
IFM 229	10	3	30,00				

* Fèves roses claires + violettes claires

Préparation des champs semenciers

Les champs semenciers sont constitués par la combinaison deux à deux des clones pro-venant des 3 arbre-mères sélectionnés, à raison de 5 lignes de 10 pieds par clone, soit un carré de 10 x 10 arbres (0,20 ha). Ces champs, entourés par une ceinture de haie vivante (*Calliandra sp.*, *Flemingia congesta*, ou *Gliricidia sp.*) ont été installés dans des endroits sécurisés sans cacaoyer dans un rayon de 50 m (Photos 10). De cette façon, on a la certitude que les semences que produit chaque champ biclonal proviennent de la combinaison génétique des 2 clones mis en présence. Un champ semencier peut produire jusqu'à 160 000 graines.

Dans le but de réduire le taux de fèves indésirables, les plantules à cotylédons colorés des semences provenant de chaque champ seront éliminées dès la levée en bacs de semis. Dans le futur, le ou les champs semenciers biclonaux qui auront donné les meilleures combinaisons après expérimentation en champs, pourront être installés dans des sites proches des planteurs.

Durant le projet, seuls les travaux de préparation des terrains ont pu être réalisés : délimitation des parcelles, extraction et débardage des gros arbres, piquetage, trouaison, plantation des bananiers comme ombrage provisoire, plantation des haies vivantes, semis et suivi en pépinière des arbres d'ombrage définitif (*Albizia saman*).

Bouturage et greffage des candidats arbres-mères

La réhabilitation des ombrières (remplacement des piquets et des lattes en bambous, aménagement des puits d'eau, achat et installation de motopompes pour les arrosages) et des nurseries (confection de châssis et propagateurs, fabrication et stérilisation de substrats...) ont été un préalable pour l'exécution des travaux de bouturage et de greffage (Photos 11).

Bouturage

Le substrat utilisé pour le bouturage est composé d'environ 60 % de bonne terre tamisée, 25 % de terreau et 15 % de sable de rivière. Pour avoir un bon résultat, la récolte des baguettes semi-aoûtées doit être effectuée entre 6 et 8 heures du matin, après une période pluvieuse. L'arrosage est laissé à l'appréciation d'un pépiniériste hautement qualifié. La viabilité des boutures dépend effectivement de l'humidité du substrat : elles pourrissent en cas de forte humidité et dépérissent rapidement si le substrat reste longtemps sec.

La conduite des opérations de bouturage dans des bacs en châssis couverts s'avère très décevant jusqu'à la fin du projet. A notre avis, ce fait est lié au mauvais contrôle de l'humidité et de la température ambiante (écart relativement élevé entre la température diurne et nocturne à l'époque de l'opération). Les bouturages directs en pots plastiques donnent de bien meilleurs résultats. Les explants orthotropes ou plagiotropes en pleine turgescence, comportant deux nœuds, sont prélevés tôt le matin après une journée pluvieuse. Les feuilles sont coupées de moitié pour réduire l'évapotranspiration (Photos 12). Les boutures, enduites de miel (substitut de l'exubérone) et de poudre de charbon (oxygénation) sont ensuite plantées dans des pots plastiques contenant le substrat préalablement arrosé, et disposées dans les propagateurs sous une atmosphère confinée. La réussite de l'opération se manifeste par l'émission de racines et d'un nouvel axe aérien (Photos 13).

La réussite au bouturage de trois clones à haut pourcentage de fèves blanches présélectionnés pour constituer les champs semenciers biclonaux ont été étudiés : IFM 1 affiche le meilleur résultat avec 76 % de réussite, suivi de IFM 227 (68 %) et de IFM 215 (56 %). Ces résultats sont encourageants étant donné le peu d'expérience des techniciens au moment de l'opération.

Greffage

Grefe-bouture

Cette technique couramment appliquée pour les caféiers a été pour la première fois transposée pour la multiplication végétative des cacaoyers. Elle consiste à combiner le greffage et le bouturage. Deux clones (IFM 205 type Forastero et IFM213 type Criollo) ont été choisis pour servir de porte-greffes (Photos 14 A).

La réussite des opérations varie selon les combinaisons porte-greffe/greffon. Le type Forastero IFM 205 s'avère être le meilleur porte-greffe (Figure 13).

Greffage sur pied franc en fente latérale

Le greffage direct en fente a été testé en utilisant une fois de plus le procédé utilisé pour les caféiers. Les porte-greffe sont des jeunes plants en pots âgés de 6 mois. Après ligature du raphia, une atmosphère ambiante humide est créée avec du sable légèrement mouillé dans un sac en plastique blanc, le niveau du sable étant ajusté jusqu'au-dessus de la blessure (Photos 14B) La ligature est contrôlée périodiquement jusqu'à la cicatrisation complète greffon. Le nombre insuffisant de pieds francs disponibles (5 pieds) au moment de l'opération ne permet pas d'avancer un pourcentage de réussite de cette méthode. Deux sur cinq sont malgré tout arrivés à terme.

Embryogénèse somatique

La seule façon de reproduire à l'identique les arbre-mères sélectionnés pour constituer un champ polyclonal demeure la multiplication végétative. Il n'est toutefois pas indiqué de procéder au bouturage classique pour satisfaire les besoins des planteurs (surface emblavée estimée à plus de 10 000 ha) car cette technique requiert des infrastructures lourdes et des moyens humains à coût trop élevé. La rentabilisation du ratio coût-efficacité de la multiplication végétative est actuellement possible grâce à la multiplication in vitro, et plus précisément, la technique d'embryogénèse somatique. Cet outil qui a déjà fait ses preuves sur différentes espèces de plantes pérennes comme le palmier à huiles (Kawh *et al.*, 1999), le caféier Arabica hybride (Etienne *et al.*, 2012) et aussi sur le cacaoyer (Maximova *et al.*, 2002) est la solution proposée par le projet QualiKKO pour résoudre à moyen terme l'hétérogénéité des fèves produites.

Au cours des 10 mois du projet, seules des mises au point préliminaires ont pu être conduites dans les laboratoires de l'IMRA qui dispose déjà d'infrastructures adéquates. En parallèle, un laboratoire a été aménagé et équipé dans les locaux de FOFIFA d'Ambanja et une technicienne, nouvellement recrutée par FOFIFA, a été formée par les experts de l'IMRA.

Les principales raisons du montage du laboratoire de culture in vitro à Ambanja sont : la proximité des arbres où l'on prélève les explants, la proximité des planteurs à qui l'on distribuera les jeunes plants dans le futur, le développement de la région, mais également par souci de pérennisation de l'opération.

Embryogénèse somatique

L'embryogénèse somatique est une des techniques de culture *in vitro* dont l'explant initial est un fragment d'organe. L'objectif est d'obtenir à partir des explants des cellules indifférenciées (cals) qui, par la suite, donneront des cellules embryogènes, lesquelles produiront à leur tour des plantes entières. Dans le cadre du projet PARRUR, les explants utilisés sont des fragments de feuilles issues de graines pré-germées en milieu stérile et des boutons des clones sélectionnés (Photos 15).

Les explants désinfectés avec différentes concentrations d'hypochlorite de sodium (2, 3 et 4 %) ou de calcium (2 et 3 %) sont cultivés sur un milieu contenant des éléments essentiels dont la plante a besoin (minéraux, eau, sucre, acides aminés) et des phytohormones : cytokinine pour la division des méristèmes et le débourrement des bourgeons, et auxine pour la formation racinaire (Photo 16 A-B). Les tubes de culture sont par la suite gardés à température ambiante et à l'obscurité dans l'étuve (Photo 16 - C). Le suivi s'effectue journalièrement.

Les meilleurs résultats de l'asepsie sont obtenus avec l'eau de javel à 2 % pour les feuilles (0 à 5 % de contamination) et l'hypochlorite de calcium à 3 % pour les fleurs (0 % de contamination).

La formation de cals à partir de boutons floraux collectés à Ambanja, ramenés par route à l'IMRA a été un échec. Le trajet Ambanja-Antananarivo a fait souffrir les fleurs et les microorganismes ont affiché une croissance exponentielle pendant le trajet. En revanche, à partir des feuilles stériles, 3 tubes sur 13 ont donné des résultats positifs après 10 jours de culture ((Photos 17).

A Ambanja, nonobstant la fréquence élevée des sources de contamination (T° élevée, humidité ambiante proche de la saturation) et le manque d'équipements appropriés pour la stérilisation, la maîtrise de l'asepsie a été une réussite. Lors d'une première manipulation, le taux de contamination des cultures varie de 10 à 80 % pour les fleurs et 10 à 40 % pour les feuilles. Après prise de précautions pour diminuer les risques de contamination (stérilisation sur pied avant collecte des feuilles et boutons floraux), aucun des tubes cultivés n'a été contaminé ((Photos 18).

Les cals apparaissent 7 jours après la mise en culture des explants floraux dans 12 tubes/50 dont 9/22 sur le milieu M1 et 3/28 sur PCG (Tableau 10). Il s'avère ainsi que c'est le milieu M1 qui est le plus approprié pour l'obtention de cals indifférenciés.

Tableau 10 : Les milieux de culture utilisés

Milieu M1		Milieu PCG	
Macroéléments	100 ml/l	Macroéléments	100 ml/l
Microéléments	10 ml/l	Microéléments	100 ml/l
Oligoéléments	10 ml/l	Oligoéléments	10 ml/l
Vitamine	1 ml/l	Vitamine	1 ml/l
Sucre	35 g/l	Sucre	20 g/l
BAP	2 ml/l	Glutamine	250 mg/l
2,4D	1 ml/l	Myo-inositol	100 mg/l
Agar	5 g/l	2,4D	2 ml/l
pH	5,6 à 5,8	Agar	5 g/l
		pH	5,6 à 5,8

Les 10 mois du projet étaient une période de diagnostic. Elle n'a permis qu'une évaluation du fonctionnement ou non celles des différentes techniques. Des résultats concrets ont été tout de même obtenus. Il est à signaler que la réussite de l'embryogénèse somatique nécessite impérativement l'utilisation de biofermenteurs (Photo 19).

Conclusion générale

Outre un revenu significativement supérieur aux autres produits d'exportation, le cacao présente l'avantage de procurer aux familles rurales un revenu hebdomadaire huit mois sur douze. La cacaoculture permet de maintenir une zone boisée avec des productions agroalimentaires sous couvert forestier, ce qui représente un grand intérêt écologique dans la région du Sambirano où les cultures sur brûlis réduisent d'année en année les surfaces boisées.

Dans un marché mondial dont la demande devrait s'accroître significativement avec l'augmentation de la consommation dans les pays émergents, la production malgache qui représente, bon an mal an, 4 000 à 6 000 tonnes de cacao marchand (entre 0,1 et 0,2 % des exportations mondiales selon les années) doit viser des marchés de niche « haut de gamme ». En effet avec des caractéristiques organoleptiques très appréciées par le négoce, le cacao du Sambirano, lorsqu'il est bien transformé, permet d'obtenir une qualité supérieure qui en fait l'une des origines les plus prisées.

Les données collectées permettent de compléter les informations sur les productions agricoles pérennes dans le Sambirano et de préciser les améliorations à mettre en œuvre pour une augmentation quantitative et qualitative de produits d'excellence.

En parallèle, le répertoire de matériel végétal de la collection et du parc à bois de FOFIFA a été remis à jour grâce au projet et complété au fur et à mesure par une base de données sur les caractères morpho-physiologiques, agronomiques et qualitatifs de chaque génotype.

Enfin, la mise en œuvre du projet signifie une nouvelle renaissance pour le centre FOFIFA d'Ambanja et lui permet d'élargir ses compétences à d'autres filières agricoles grâce aux infrastructures réhabilitées. La possibilité de pratiquer la culture in vitro ouvre de nouveaux horizons d'application sur des spéculations autres que le cacaoyer et ne manquerait pas d'activer la collaboration avec l'université d'Antsiranana, l'ESSA d'Antananarivo et les divers organismes de la région œuvrant pour la conservation de la biodiversité.

Il est tout de même à signaler que les dix mois du projet n'ont permis qu'un abordage sommaire des solutions proposées pour résoudre les principales problématiques de la cacaoculture malgache. La poursuite à terme, notamment de la mise en place des champs semenciers biclonaux et de l'embryogénèse somatique, est nécessaire pour que le projet aboutisse aux objectifs qui ont été fixés au départ.

Références bibliographiques

Barel, M., 2009 : *Du cacao au chocolat, l'épopée d'une gourmandise*. Edition Quae.

Bousquet E., 2013 : *Caractérisation et éléments de différenciation des cacaos dans la vallée du Sambirano à Madagascar*, diplôme d'ingénieur de Montpellier SupAgro en Systèmes Agricoles et Agroalimentaires Durables au Sud.

Cheesman E. E., 1944 : Notes on the nomenclature, classification and possible relationships of cacao population. *Tropical Agriculture* ; 21 : 143-159.

Chen-Yen-Su Alexandre, 2014 : *Analyse morphologique et profils aromatiques, sensoriel du cacao du Sambirano*, Mémoire de Master 2, Université de la Réunion, UFR des Sciences et Technologies.

Cuatrecasas J., 1964 : Cacao and its allies a taxonomic revision of the genus Theobroma. Contributions from the United States National herbarium, *Washington*. 6: 376-614 tome 2 ; 571 p.

Daily-bourse, 2013 : Editeur/hebergeur : AmartyWeb. *Cours du cacao* [en ligne]. Disponible sur « <http://www.daily-bourse.fr/cours-CACAO-commo.php> », (consulté le 30/09/2013)

Dandouau A., : *Ressources naturelles à Madagascar et évolution de l'Agriculture dans l'île de Sainte Marie à Madagascar*.

Etienne H., Bertrand B., Montagnon C., Bobadilla Landey R., Dechamp E., Jourdan I., Alpizar E., Malo E., Georget F., 2012 : Un exemple de transfert de technologie réussi dans le domaine de la micropropagation : la multiplication de *Coffea arabica* par embryogénèse somatique. *CahAgric* 21 : 115-124.

Figueira, 1992 : Genome size and DNA polymorphism in Theobromacacao. *Journal of the American Society of Horticultural Science*. 117: 673-677. International CocoaOrganization ICCO [site en ligne]: «<http://www.icco.org>».

JJustenson J.S, Norman W.M, Campbell L. and Kaufman T., 1985 : The Foreign Impact on Lowland Mayan language and Script. *Middle American Research Institute Publication* 53.

Kawh CH., Ng SK. and Thong KC., 1999 : Commercial production of clonal palms by tissue culture-prerequisites, constraints and issues. In : *Proceeding of the 1999 PORIM International Palm Oil Congress-Agriculture. Emerging Technologies and opportunities in the Next Millenium*. Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM), Kuala Lumpur, Malaysia.

Lachenaud P. et Sounigo O., 1991 : Production de semences de cacaoyer en Côte d'Ivoire. Influence des proportions relatives des parents d'un champ semencier biclonal sur la quantité, la qualité et l'origine génétique des semences. *Café, Cacao, Thé (Paris)*, 35, n°2, 105-112.

Lanaud, C., Sounigo O., AmefiaY. K., Paulin D., LachenaudP., et Clément D., 1987 : Nouvelles données sur le fonctionnement du système d'incompatibilité du cacaoyer et ses conséquences pour la sélection. *Café, Cacao, Thé (Paris)*, 31, n°4, 267-277.

Maximova S. N., Young A., Pishak S., Miller C., Traore A., Gultinan M. J. 2005 : Integrated System for Propagation of Theobroma cacao L. *Protocol for Somatic Embryogenesis in Woody Plants and Forestry Sciences*. Vol 77, pp 209-227.

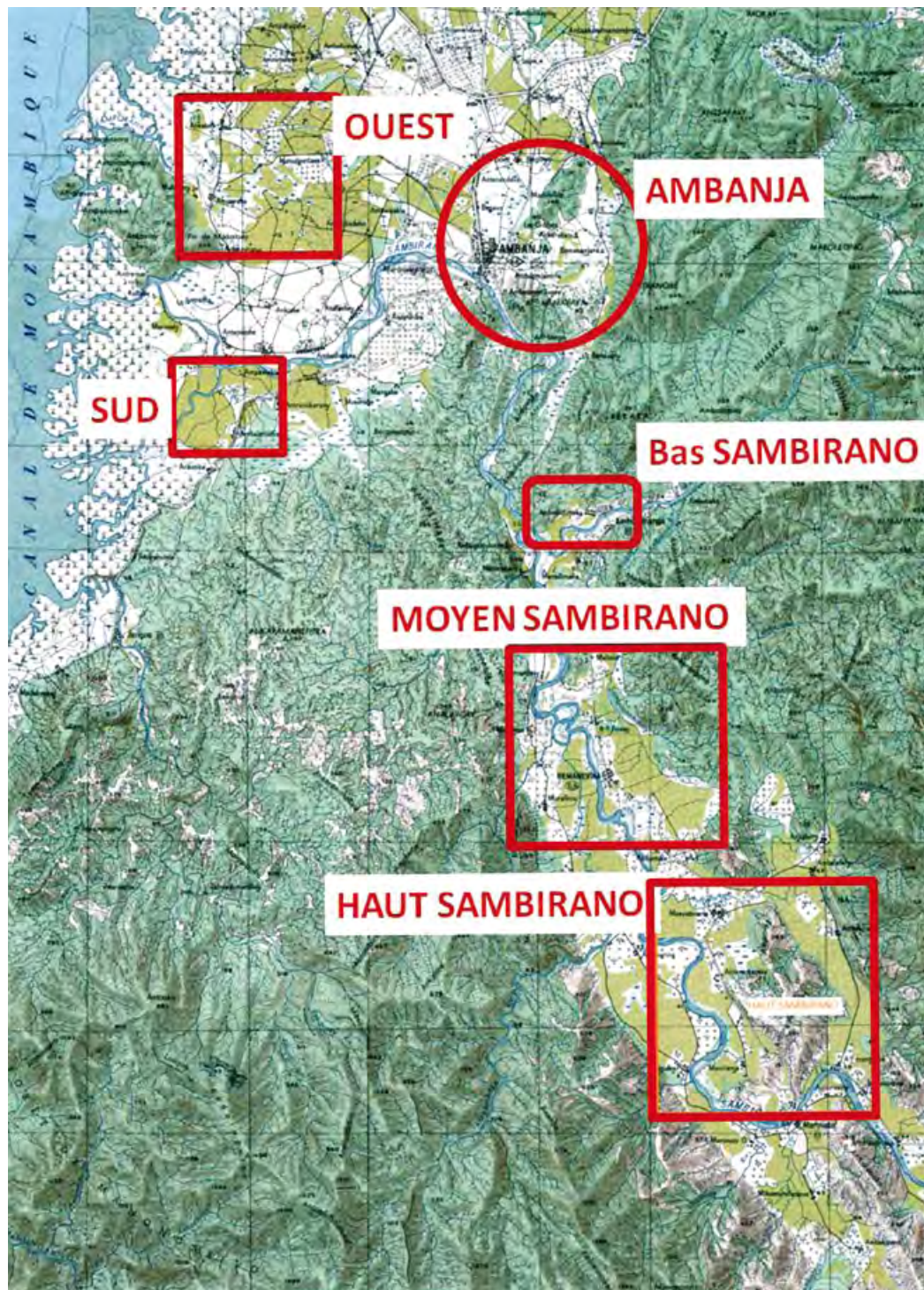
MEFB, *Institut National de la Statistique, les 22 régions de Madagascar en chiffres*, novembre 2004.

PAE ED François, *Gouverneur des Colonies, ancien Inspecteur général de l'agriculture L'œuvre agricole de la France à Madagascar*.

Rahaingosambatra D.,H., 2014 : *Etude des dispositifs de culture de cacaoyers en agroforesterie dans le Sambirano par l'évaluation de leur potentiel de productivité et l'appréciation de la qualité des produits*, Mémoire de Master 2, Université d'Antananarivo, Faculté des sciences, Département de biologie et écologie végétales.

Stone D., 1984 : *Pre-Columbian migration of Theobroma cacao Linnaeus and Manihotesculenta Crantz from Northern South America into Mesoamerica: a partial hypothetical view*. In: *Pre-Columbian Plant Migration*. Cambridge, MA, Harvard University Press. pp 67-79, 81-83.

Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale. 17^e année, bulletin n°192-193, août-septembre 1937. pp. 610-618. Les débuts de la colonisation agricole à l'île Sainte-Marie de Madagascar.



Carte 1 : Découpage de la région étudiée en 7 unités géographiques



Photo 1 : Cacaoyère dans le Sambirano



Photo 2 : Fructification cacaoyère



Photo 3 : Ecabossage



Photo 4 : Elimination des rachis



Figure 7 : Evolution des températures lors de la phase de fermentation en fonction de la durée et du contenant

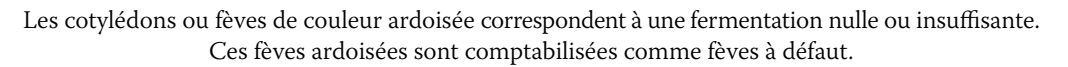
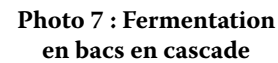


Photo 9 : Séchage sur natte en paysannat



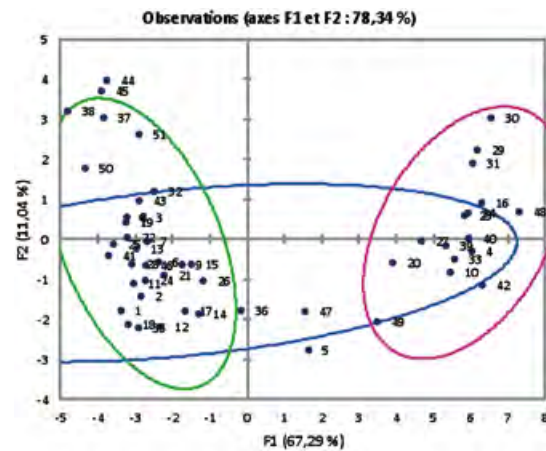


Figure 10 : ACP des 51 échantillons

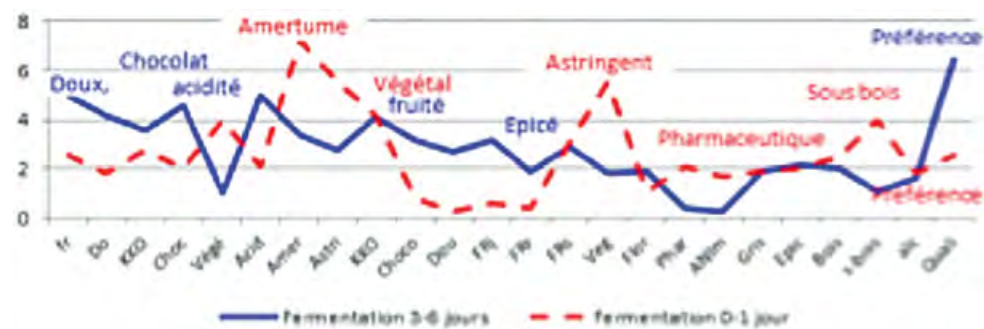


Figure 11 : Profil des liqueurs selon la CAH (classification ascendante hiérarchique)

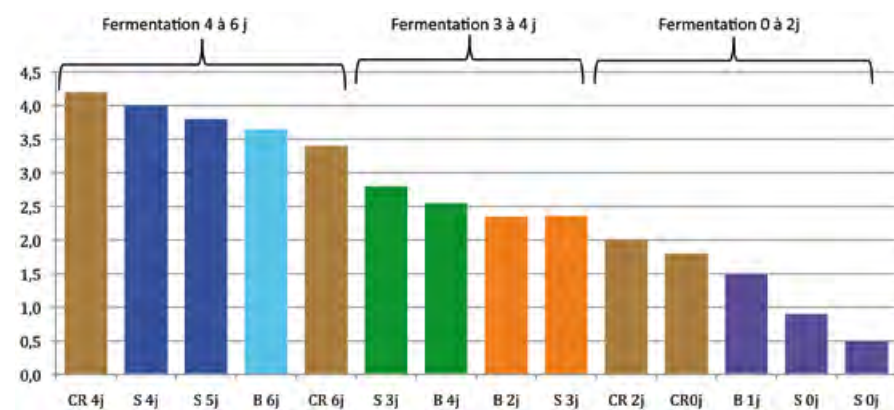


Figure 12 : Synthèse de la note de qualité des échantillons en fonction du procédé et de la durée de fermentation

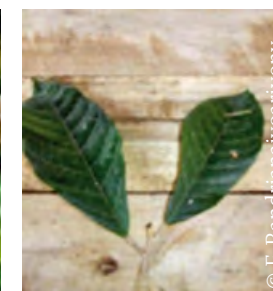
CR correspond à Criollo, S à sac et B à bac. Les lettres sont suivies du nombre de jour de fermentation



Photos 10 : Champs semenciers avec les haies vives



Photos 11 : Propagateurs amovibles



(A) Rejet orthotrope

(B) Rejet plagiotrope

(C) Explant à 2 noeuds

(D) Réduction de moitié de feuilles

Photos 12 : Préparation des boutures

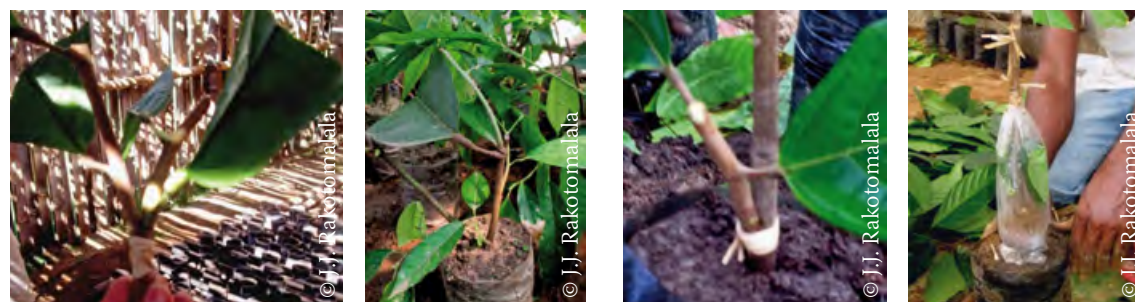


(A) Empotage

(B) Mise en propagateur

(C) Reprise

Photos 13 : Opération de bouturage



(A) Greffe bouture

(B) Greffe sur pied franc en fente latérale

Photos 14 : Techniques de greffage

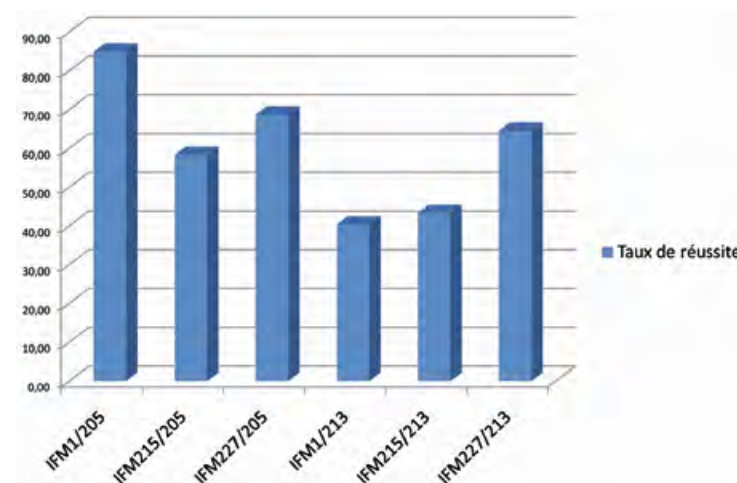
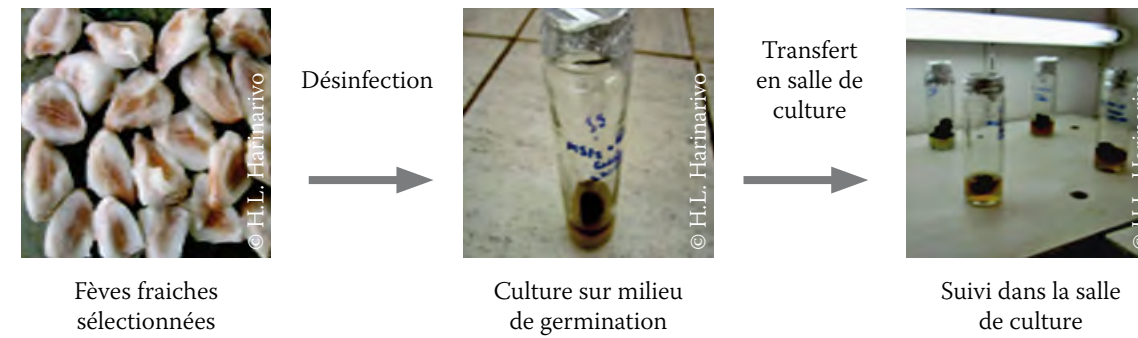


Figure 13 : Taux de réussite des greffe-boutures (Source : F. Randrianaivoarivony)



Fèves fraîches sélectionnées

Désinfection

Culture sur milieu de germination

Transfert en salle de culture

Suivi dans la salle de culture

Photos 15 : Germination in-vitro de fèves



(A) Organes de prélèvement d'explants



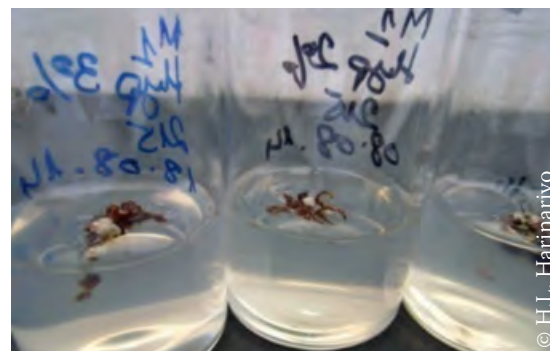
(B) Mise en culture sous hotte à flux laminaire

(C) Mise en culture à l'obscurité dans l'étuve

Photos 16 : Etapes préliminaires de l'embryogénèse somatique



(A) Explants de feuilles



(B) Cals obtenus à partir d'explants de feuilles

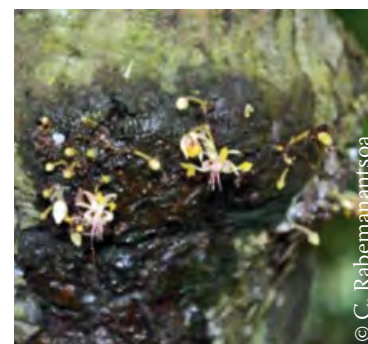
Photos 17 : Calogénèse à partir d'explants de feuilles et de fleurs



(A) Prétraitement des feuilles

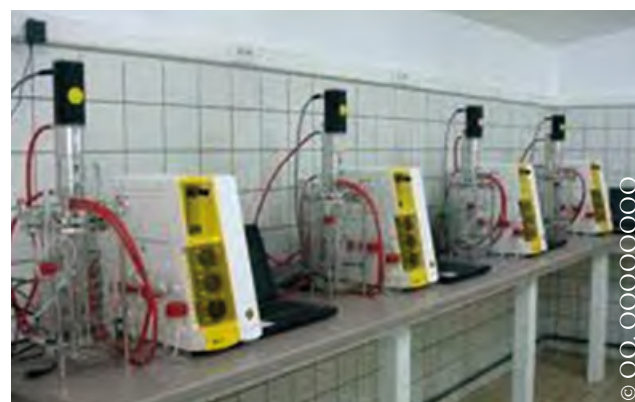


(B) Prétraitement des boutons floraux



(C) Boutons floraux prétraités

Photos 18 : Prétraitement sur pied à l'hypochlorite de calcium (3 %) pour les fleurs et à l'eau de javel (2 %) pour les feuilles



Photos 19 : Batterie de biofermenteurs

Pour l'optimisation de la qualité des produits du giroflier de Madagascar (clous et huiles essentielles) : étude des facteurs de leurs variabilités

Optimization on the quality on the clove tree from Madagascar (Cloves buds and essential oil): Studies of the factors of their variability

G. RAZAFIMAMONJISON^{1,2,3*}
R. BOULANGER⁴
M. JAHIEL^{2,3,5}
M. RAKOTOARISON¹
R. SANDRATRINIINA¹
J. RASOARAHONA¹
P. RAMANOELINA¹
F. FAWBUSH¹
M. LEBRUN⁴
P. DANTHU^{2,6,7}

- (1) Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175, Antananarivo, Madagascar
(2) DP Forêts et Biodiversité, BP 853, Antananarivo, Madagascar
(3) Centre Technique Horticole de Tamatave, BP 11, Tamatave, Madagascar
(4) CIRAD, UMR PERSYST « QualiSud », Food Processing Research Unit, 73, rue J.F. Breton, 34398 Montpellier Cedex 05, France
(5) CIRAD, UPR Hortsys, PS4, Boulevard de la Lironde, 34392 Montpellier Cedex 05, France
(6) CIRAD, UR 105, Campus de Baillarguet, 34392 Montpellier Cedex 05, France
(7) CIRAD, Direction régionale à Madagascar BP 853, Antananarivo Madagascar
* Corresponding author Email: rdinagaylor@yahoo.fr



Résumé

Le giroflier (*Syzygium aromaticum*) est un arbre introduit à Madagascar depuis environ un siècle. Il est distribué sur tout le littoral est, avec une forte concentration dans la région Analanjirofo. Deux « organes » sont collectés : les clous et les feuilles et deux produits majeurs sont commercialisés : les clous séchés, les huiles essentielles extraites des clous, des feuilles et des griffes.

Madagascar en est le premier exportateur mondial. Cependant une limite forte au développement de cette filière est la variabilité de la qualité des produits (clous et surtout huile essentielle). Les travaux antérieurs ont analysé la composition des huiles essentielles de girofle, mais ces travaux réalisés sur très peu d'échantillons et/ou sur des lots de feuilles ou de clous récoltés en vrac ne permettent pas d'accéder aux déterminants de la variabilité.

Six études ont été menées dans la région d'Analanjirofo avec l'objectif général d'appréhender les sources de variabilité afin de les maîtriser et de proposer aux opérateurs (paysans, et collecteurs) des éléments pour optimiser la qualité des clous et des huiles essentielles de girofle produits à Madagascar.

Les clous, feuilles et griffes sont collectés dans l'aire de distribution sur le littoral est de Madagascar dans la région d'Analanjirofo. L'extraction de l'huile essentielle est effectuée par hydrodistillation pendant quatre heures dans un appareil de type Clevenger modifié. Les huiles essentielles sont analysées par la chromatographie en phase gazeuse couplée de Spectrométrie de Masse (CPG/SM). L'analyse en composante principale a été utilisée pour mettre en évidence la variabilité de la composition chimique des huiles essentielles.

Les études ont permis de maîtriser les facteurs de variabilités du rendement et de la composition chimique des huiles essentielles de girofle. Il est possible d'utiliser la teneur en composant majoritaire pour différencier les huiles essentielles extraites de clous, de feuilles et de griffes du giroflier. Le meilleur moment de récolter les clous de girofle pour leurs huiles essentielles est au stade de bourgeon final (clous en pleine maturité) pour obtenir un meilleur rendement et une haute teneur en eugénol. Le rendement et la teneur en eugénol sont à l'optimum au stade des feuilles matures (feuilles vertes foncées). Il convient d'extraire l'huile essentielle de feuilles de giroflier après environ une semaine de séchage à l'ombre, puisque la teneur en huile essentielle est à son maximum. Les modifications et améliorations de l'alambic ont permis de diminuer le temps de distillation, de réduire la consommation de bois de chauffe et surtout d'améliorer le rendement et la teneur en eugénol et en β -caryophyllène de l'huile essentielle.

Mots clés : giroflier, clous, feuilles, griffes, hydrodistillation, alambic, huile essentielle, rendement, composition chimique eugénol.

Abstract

The clove tree (*Syzygium aromaticum*) was introduced in Madagascar at the beginning of the 19th century. Two major products are used and marketed from clove trees: the clove which is the unopened green fully grown buds upon drying, and the essential oil extracted either from buds, leaves or stems.

Madagascar is the world's leading exporter. However the non-consistency of the product quality (cloves and essential oils) constitutes a limiting factor to the development of the sector. Previous works attempted to measure the composition of clove essential oil, however, they were performed on limited quantity of samples collected from bulk products of leaves or buds which did not allow the determination of the factors of variability.

Six studies were conducted within the area of Analanjirofo, and the main objective was to identify the sources of variability on yield and chemical composition of the essence, and then make recommendations to the actors in the field, mainly farmers, on how to optimize the quality of cloves and of clove essential oil produced in Madagascar.

Buds, leaves and stems of *S. aromaticum* were collected on the east coast of Madagascar, the Analanjirofo region. The essential oils were extracted by hydrodistillation for 4 hours using a Clevenger-type equipment. The essential oils were analyzed by Gas Chromatography coupled by Mass Spectrometry (GC/SM). To highlight the effects of variability on the composition of *S. aromaticum* oil Principal Component Analysis were carried out.

Studies allowed a control of the factors of variability on yield and on chemical composition of the clove essential oils. It is possible to use the content in major component to differentiate the plant materials used in the extraction whether cloves, leaves or stems. The right moment to harvest cloves for their essential oils is towards the end of the bud stage if the aim is to obtain the highest yield and the highest content in eugenol. The optimum yield and eugenol content are obtained when the leaves reach full maturity (dark green color leaves). Drying the leaves in the shade prior to the extraction for approximately one week will provide better yield since the essential oil content is then maximal. Modifications and improvements were also performed on the alembic in order to reduce the distillation duration, to limit the consumption of firewood and especially to improve the yield and the eugenol and β -caryophyllene content of the oil.

Keywords: cloves, leaves, stems, hydrodistillation, alembic, essential oil, yield, chemical composition, eugenol.

Introduction générale

Le giroflier (*Syzygium aromaticum*) ou (*Eugenia caryophyllum*), est présent à Madagascar depuis la fin du XIX^e siècle. Le giroflier est surtout cultivé pour ses clous qui sont les boutons floraux cueillis avant leur épanouissement. On cultive également le giroflier pour ses feuilles et ses griffes dont on extrait une essence très riche en eugénol.

Pour les deux produits majeurs issus du giroflier (clous et essence), Madagascar est actuellement le premier exportateur mondial avec des quantités exportées moyennes de 11 000 tonnes pour les clous et de 1 500 tonnes pour l'essence. Les produits sont destinés principalement à fournir une demande asiatique en croissance constante du fait de l'augmentation régulière de la démographie.

Même si les principaux marchés récepteurs des produits issus du giroflier sont moins exigeants que les marchés européens, la concurrence sur ces produits et la diminution des marges bénéficiaires ont conduit les acheteurs à être plus exigeants en ce qui concerne la qualité : taille et poids des clous, humidité, teneur en eugénol des huiles essentielles.



Les analyses des « produits » confirment une importante variabilité en ce qui concerne ses caractéristiques qualitatives, rendant difficile la valorisation de produits de qualité supérieure et la mise en place de filière commerciale basée sur une maîtrise de critères qualitatifs (certification type Indications Géographiques, par exemple).

Qualité des clous

La qualité des clous varie selon les sources biologiques (stade de plantation) et les sources technologiques (opérations post-récolte). Le choix variétal est globalement limité pour le cas malgache et même si ce critère constitue en théorie un point essentiel de maîtrise de la qualité (Krishnamoorthy et Rema, 1994), peu de producteurs malgaches peuvent le moduler. Par ailleurs, les conditions pédologiques et le microclimat influent largement sur la productivité et la qualité des clous.

Les pratiques culturales semblent influencer plus sur la productivité que sur la qualité-même du produit. En effet, le giroflier requiert par nature peu de soins pour une production qui peut s'étaler sur une vingtaine d'années. Le paillage et l'écimage constituent des moyens d'optimiser la production, sans toutefois influencer sur la taille des clous, leur couleur ou sensiblement sur leur teneur en eugénol.

Par contre, la récolte constitue une phase induisant énormément d'hétérogénéité dans la construction de la qualité du produit. Le choix est déterminé par l'état du bouton floral dont la période optimale est très passagère et le degré de maturité des boutons floraux est échelonné sur chaque pied. Ils ne doivent pas être récoltés avant qu'ils ne virent au rose. Le moment optimum de récolte est celui où le bouton est de taille maximale et commence à virer au rouge mais n'est pas encore éclos (Gopalakrishnan *et al.*, 1982).

L'essentiel des opérations post-récolte est constitué par le séchage des boutons floraux, l'égrillage et le triage. Les opérations de séchage influent sur la qualité du clou. Trop d'humidité induit un brunissement excessif qui donne au clou une couleur brun foncé à noir alors que les normes parlent d'une couleur brun foncé. Le triage influe, quant à lui, sur le taux d'impuretés et le taux de clous sans têtes dans l'échantillon.

Qualité des huiles essentielles

La comparaison des résultats publiés par différents auteurs sur la composition chimique des huiles essentielles de girofle montre une grande diversité. Les huiles essentielles de clous, de feuilles et de griffes du girofle sont principalement caractérisées par l'eugénol, l'acétate d'eugényle et le β -caryophyllène mais à des proportions différentes selon les auteurs.

Une teneur élevée en eugénol et en β -caryophyllène, respectivement de 78 % et de 13 % est remarquée dans l'huile essentielle de clou de Prashar *et al.* (2006) alors que les huiles essentielles étudiées par Pawar et Thaker (2006) présentent une faible teneur en eugénol (47,64 %) avec une concentration en benzyl alcool de 34 %. Par ailleurs, les huiles essentielles de clous analysées par Fu *et al.* (2007) et Chaieb *et al.* (2007) diffèrent énormément. Les huiles analysées par Fu *et al.* sont caractérisées par l'eugénol (68,52 %), le β -caryophyllène (19 %), acétate d'eugényle (10,15 %) et α -caryophyllène (1,85 %) et celles de Chaieb *et al.* par l'eugénol (88,58 %), l'acétate d'eugényle (5,62 %), le β -caryophyllène (1,39 %) et d'autres constituants mineurs (0,1 à 0,9 %).

Pour les huiles essentielles de feuilles, une variabilité dans la composition chimique a aussi été mise en évidence. La composition chimique des huiles essentielles venant de Little Andaman (Raina *et al.*, 2007) est différente que celles venant de l'Indonésie (Vernin *et al.*, 1994) avec des variations en eugénol (94,4 % vs 71 %), caryophyllène (2,9 % vs 14 %) et α -humulène (0,36 % vs 1,75 %) respectivement. Il est à noter

aussi que le β -caryophyllène (2,9 %), le nérol (0,79 %) l'oxyde de caryophyllène (0,67 %) sont présents dans les huiles essentielles venant de Little Andaman alors que ces constituants sont absents ou sous forme de traces dans les échantillons venant du sud de l'Inde (Gopalakrishnan *et al.*, 1988). De même, l'acétate d'eugényle (1,5 %) et l' α -farnésol (0,5 %) ont été seulement détectés dans les huiles du sud de l'Inde.

Les constituants majeurs des huiles de griffes venant de l'Inde et Madagascar sont l'eugénol (70 % et 82 %) et le β -caryophyllène (19,5 % et 7,2 %). Des différences significatives sont observées dans la teneur en acétate d'eugényle des huiles essentielles de griffe provenant des deux régions (2,1 % vs 6 %), en α -humulène (1,9 % vs 0,8 %), en (E) α -bergamotène (1,3 % vs 0,2 %), en iso-eugénol-1 (0,8 % vs 0,1 %) ,en γ -cadinène (0,8 % vs 0,2 %), en (E)-nérolidol (0,1 % vs 0,4 %), en allo-aromadendrène (0,3 % vs 0,1 %) et en selinène (0,1 % vs 0,3 %) (Srivastava *et al.*, 2005).

La comparaison des résultats publiés par différents auteurs sur la composition chimique des huiles essentielles de clous, de feuilles et de griffes du girofle a montré une assez grande disparité.

Mais la limite de toutes ces études est liée au fait qu'elles sont réalisées sur un seul échantillon. La structuration n'est donc souvent pas connue : est-ce l'huile essentielle d'un seul individu, d'un mélange d'individus ? De plus les conditions de collectes, de stockage et de distillation sont rarement indiquées.

C'est dans ce contexte qu'une équipe de recherche multidisciplinaire française et malgache s'est saisie de cette problématique, avec l'appui du Ministère des Affaires étrangères français dans le cadre du projet FSP PARRUR : « **Optimisation de la qualité des produits du giroflier de Madagascar (clous et huiles essentielles) : étude des facteurs de leurs variabilités** ».

L'objectif est d'appréhender les sources de variabilité afin de les maîtriser et de proposer aux opérateurs (paysans, et collecteurs) des éléments pour optimiser la qualité des clous et des huiles essentielles de girofle produits à Madagascar. Six études ont été effectuées et publiées sous forme d'article international ou sous forme de mémoire de fin d'études.

Quelques mots sur les outils et sur la méthodologie

Les clous, feuilles et griffes sont collectés dans l'aire de distribution sur le littoral Est de Madagascar dans la région d'Analanjirifo. Dans l'ensemble des expérimentations, les clous, les feuilles et les griffes sont récoltés arbre par arbre afin d'avoir accès à la variabilité individuelle. L'ensemble des paramètres décrivant le « contexte de l'arbre » seront relevés.

L'extraction de l'huile essentielle est effectuée par hydrodistillation sur environ de 400 g de matière végétale fraîche, poids suffisant pour produire le volume d'huile essentielle nécessaire pour les analyses, dans un appareil de type Clevenger modifié. La distillation dure quatre heures après l'apparition de la première goutte de distillat à la sortie du tube de condensation de la vapeur. L'huile essentielle est séchée avec du sulfate de sodium anhydre et la teneur en huile essentielle, exprimée en ml du distillat par 100 g de matière sèche est calculée.

L'humidité journalière des échantillons est déterminée en utilisant une thermobalance type Sartorius MA 45, température réglée à 130°C, avec une perte en poids de 4 mg par 24 secondes. L'huile essentielle recueillie est stockée à 4 °C à l'obscurité avant toutes les analyses.



La détermination des caractéristiques physico-chimiques (densité, indice de réfraction) et des caractéristiques organoleptiques (aspect, couleur et odeur) est réalisée extemporanément¹.

Les huiles essentielles sont analysées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (CPG/SM). Toutes les analyses des huiles essentielles par CPG/SM sont effectuées dans les laboratoires du CTHT ou dans le laboratoire de la maison de la technologie du CIRAD à Montpellier.

Un soin particulier est apporté aux analyses statistiques descriptives multidimensionnelles et comparatives. Les outils utilisés sont l'analyse en composantes principale (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) basées sur teneurs des principaux composants.

Le giroflier à Madagascar

L'INTRODUCTION DU GIROFLIER À Madagascar

Le giroflier est un arbre originaire des îles Moluques en Indonésie. Son usage comme épice et plante aromatique est plurimillénaire ; il est mentionné dans des livres chinois d'avant l'ère chrétienne. Les produits du giroflier furent importés régulièrement en Europe dès le septième siècle (François, 1936 ; Maistre, 1964). Mais l'histoire moderne du girofle commence avec la découverte des îles Moluques en Indonésie par les Portugais et l'expédition commandée par Magellan. La première description du giroflier est donnée par Antonio Pigafetta dans son récit de voyage, « *navigation & découverte de l'Inde supérieure & îles de Malucque où naissent les clous de girofle, faite par Antonio Pigafetta, Vicentin et chevalier de Rhodes, commençant en l'an 1519* ».

Les Portugais détenaient le monopole du commerce de cette épice, jusqu'à ce que les Hollandais les chassant des Moluques, prennent l'hégémonie sur ce commerce au début du 17^e siècle (Maistre, 1964 ; Volper, 2011).

Afin d'empêcher toute concurrence possible, la production de clous de girofle fut concentrée sur l'île d'Amboine (Ambon) et les Hollandais tentèrent de détruire systématiquement les arbres des autres îles. Mais ce projet échoua, en partie grâce à la persévérance de Pierre Poivre, qui, pour le compte de la Compagnie des Indes, organisa plusieurs missions, entre 1772 et 1773, afin de rapporter et d'acclimater le girofle dans le Jardin des Pamplemousses à l'île de France (actuelle île Maurice). Ces arbres seront à l'origine des premières introductions à l'île Bourbon (La Réunion actuelle) et à Madagascar.

Concernant les premières introductions à Madagascar, deux versions sont proposées. Pour Campbell (2005), la première introduction date de 1803 et les premières cultures extensives de 1835 à Rianambo, près de Mahela, sous l'impulsion de Jean Laborde. Pour François (1936), Maistre (1955, 1964) et Volper (2011), les premiers plants furent installés dans l'île de Sainte Marie (au large de la Grande Terre) en 1827. Sainte-Marie est ainsi devenue le berceau historique de la giroflière malgache. Cependant la production de clous de girofle resta longtemps modeste (15 tonnes en 1880). Elle ne se développa sur la Grande Terre

qu'au moment de sa conquête par les Français, à partir de 1895. Cette culture pris rapidement un grand essor au point d'occuper beaucoup de terrains disponibles au détriment des cultures vivrières, dont la conséquence fut l'occurrence de disettes dans les zones giroflières (Tourneur, 1947a). Les plantations établies actuellement datent majoritairement des années 1920-1960 et constituent la base de la production actuelle de clous de girofle.

A partir des années 1920-1930, un second produit issu du giroflier émergea et se fit rapidement une place sur le marché international : l'essence de girofle (Ledreux, 1928, 1932 ; Maistre, 1955, 1936).

Aujourd'hui, Madagascar est parmi les premiers pays producteurs de clou de girofle et d'essence, et depuis les années 1990, le premier exportateur (Maistre, 1964 ; Teuscher *et al.*, 2005, INSTAT, 2012). Les produits du giroflier constituent en 2012 pour Madagascar la première exportation agricole en valeur devant la vanille et le litchi.

LE GIROFLE : UN ARBRE, DEUX PRODUITS

L'une des particularités du girofle, comparé à la majorité des plantes à épice, est de fournir deux produits d'intérêt économique majeur : les clous qui sont les boutons floraux et l'essence principalement produite par distillation des feuilles.

Quelques éléments de biologie de l'espèce

Le girofle (*Syzygium aromaticum* L., synonymes : *Caryophyllus aromaticus* L., *Eugenia aromatica* (L.) Baill., *Eugenia caryophyllata* Thunb., *Eugenia caryophyllus* (Spreng.) Bullock & S.G. Harrison) est un arbre de la famille des Myrtaceae. C'est une espèce caractéristique des régions de basses altitudes (0-300 m) au climat tropical humide sans saison sèche marquée, conditions réunies sur la côte orientale malgache (Maistre, 1964 ; De Haut de Sigy, 1967). Il est peu exigeant quant à la qualité des sols (François, 1934 ; Dufournet, 1968) et peut s'implanter sur des terrains qui ne conviennent pas au caféier (Castel, 1947). Il s'adapte très bien aux sols ferrallitiques tropicaux dessaturés mais n'aime pas les sols sableux. L'arbre a un houppier de forme conique (Photo 1A) et une hauteur moyenne de dix à douze mètres qui peut aller jusqu'à vingt mètres. Il a un feuillage persistant et coriace (Photo 1B).

Les fleurs à quatre pétales blancs rosés, caractérisées par leurs sépales rouges, sont rassemblées en cymes terminales de 20-25 fleurs, formant généralement trois fourches appelées « griffes » (François, 1934 ; Rabechault, 1955 ; Dufournet, 1968). La première floraison se produit à l'âge de 8-10 ans, mais il faut attendre que l'arbre atteigne vingt ans pour atteindre une pleine production (François, 1936 ; Maistre, 1955). Ce sont les boutons floraux non encore épanouis, appelés « clous », qui sont cueillis et séchés (Photos 1C et D).

La collecte des clous à Madagascar se fait entre octobre et janvier (Castel 1947 ; Duclos, 2012). Si la cueillette est trop tardive (au stade fleur), le produit est un « clou sans tête » de qualité inférieur (Castel 1947). Le fruit, appelé antofle, est une drupe à graine unique assez peu aromatique. Le giroflier n'a que peu d'ennemis connus. Le principal est « l'Andretra » (Photo 1E), chenille mineuse d'un lépidoptère, *Chrysotypus mabilianum* dont les premières attaques furent signalées en 1933 (Tourneur, 1947a).

¹ Extemporément : Qui n'a pas été préparé à l'avance.



Les dégâts sont importants bien que difficilement estimables et aucun moyen de lutte ou de prévention semblent avoir été mis en place durablement (Frappa 1954 ; Dubois et Ranaivosoa, 1966). Il faut noter aussi la sensibilité du giroflier aux vents, du fait de son feuillage dense et de son enracinement superficiel (Francois, 1936), alors que, paradoxalement, la zone giroflière malgache est particulièrement soumise aux cyclones (Donques, 1975 ; Ganzhorn, 1995).

Le clou : produit « historique » du giroflier

Les usages du clou de girofle sont variés. Le clou est aussi connu pour ses propriétés antiseptiques et anesthésiques, utilisées depuis très longtemps en dentisterie, en cosmétique et en parfumerie. C'est une épice utilisée dans de nombreuses cuisines orientales ou occidentales (ingrédients de la plupart des currys, du pain d'épices... ou de la choucroute). Ainsi, l'Europe et l'Inde sont parmi les importateurs de clous de qualité (Castel, 1947 ; FAOSTAT, 2013). Mais la majeure partie de la production mondiale (et donc malgache) de clou de girofle sert à la fabrication des kreteks, cigarettes traditionnelle indonésiennes composées d'un mélange de tabac et de clous (Francois, 1936 ; Duclos 2012). La qualité des clous utilisés pour cette production est de moindre importance. Cette cigarette est actuellement l'objet d'un bras de fer : les fabricants indonésiens de kreteks jouent sur les vertus antiseptiques du clou de girofle pour la présenter comme tout à fait anodine pour la santé alors que la grande industrie internationale du tabac tente actuellement de contrer la kretek pour imposer leurs produits (Hanusz, 2002 ; Lawrence et Collin, 2004 ; Arnez, 2009). Cependant, cet usage représente encore le principal marché pour le clou. Ruf (2000) estime qu'environ 75 % de la production mondiale de clous était dans les années 1980, destinée à la fabrication des kreteks.

La production de clous est très variable d'une année à l'autre, avec une alternance d'une bonne année de production de clous suivant une année moyenne et une mauvaise (Ledreux, 1932 ; Boiteau, 1936). Ramanantsoavina (1971) estime que l'amplitude de ces variations peut être de 1 à 7. Mais le déterminisme de ce phénomène d'alternance, très largement constaté, n'est pas actuellement établi (Maistre, 1964 ; Thankamani *et al.*, 1994).

L'essence de girofle : usages anciens et actuels

L'essence de girofle, est connue en Europe depuis le 16ème siècle. L'intérêt de cette essence réside essentiellement dans sa richesse en eugénol (Briand, 1996). Cette molécule est connue pour ses propriétés antibactériennes (Suresh *et al.*, 1992 ; Fu *et al.*, 2007). L'essence de girofle est très utilisée en pharmacie, en médecine humaine et vétérinaire et par les dentistes pour ses propriétés antiseptiques, anesthésiantes et analgésiques (Parle & Khanna, 2011). Elle a servi de base à l'hémi-synthèse de vanilline (Tourneur, 1947b ; Briand, 1996). C'est aussi une base largement utilisée en parfumerie : Opium d'Yves Saint-Laurent ou Air du Temps de Nina Ricci (entre autres) contiennent des essences de girofle (Briand, 1996).

L'essence de girofle est essentiellement produite à partir de feuilles qui sont distillées, mais elle peut l'être aussi à partir de clous ou de griffes (Ledreux, 1932). Les rendements matières sont élevés pour les griffes (de 15 à 20 %) et moindre pour les feuilles (4 à 5 %) (Tourneur, 1947b). Les huiles essentielles de girofle peuvent contenir jusqu'à 90 % d'eugénol selon l'organe distillé ou le mode de distillation (Gopalakrishnan et Narayanan, 1988 ; Raina *et al.*, 2001 ; Srivastava *et al.*, 2007 ; Razafimanonjison *et al.*, 2013, 2014, 2016), l'essence de feuilles et de griffes étant la plus riche (Tourneur, 1947b).

Les déchets de distillation des feuilles peuvent servir de compost favorisant la croissance du taro ou des bananiers. Ils peuvent servir de substrat pour l'élevage d'un champignon comestible de grande qualité, *Volvaria volvacea* (Bouriquet 1941, 1946), mais cet usage semble aujourd'hui perdu.

La production d'essence est réalisée par distillation dans des alambics (Photo 2) implantés dans chaque village de la zone giroflière et mis en location par leurs propriétaires aux paysans qui souhaitent distiller. Leur nombre estimé est flou, mais certainement très élevé : entre 1000 et 2000 dans la région de Fénérive-Est, Vavatenina et Soanierana Ivongo pour l'année 1951 (Ramalanjaona et Jourdan, 1961).

Production de clou et d'essence : un compromis dans la gestion des arbres

A Madagascar, les girofliers sont conduits pour produire à la fois des clous et de l'essence. Cette gestion, plus ou moins raisonnée et contrôlée est largement répandue et constitue une spécificité forte de la giroflière malgache.

La production des clous s'oppose a priori à celle des feuilles pour la distillation, car pour récolter des feuilles, les collecteurs coupent les extrémités des branches à 30 ou 40 cm de long. Ce point est peu documenté, mais il semble qu'une coupe systématique et trop importante de feuilles pour l'extraction d'essence peut avoir une influence négative sur la production de clous : De Haut de Sigy (1967) a remarqué qu'en périodes de prix favorables à la production d'essence, une collecte trop importante de feuilles engendrait une baisse de production de clous l'année suivante. Cependant, une taille adaptée consistant à élaguer la partie sommitale des arbres tout en maintenant les rameaux moyens et bas pour la production de clous, semble permettre de concilier les deux productions sans impact négatif significatif sur la production de clous. Cette pratique donne au houppier des girofliers une forme caractéristique en plateau.

Cette pratique pourrait être un élément amplifiant l'irrégularité interannuelle constatée pour la production malgache de clous. Cette irrégularité de production de clous pourrait expliquer le choix de certains agriculteurs de valoriser plutôt le développement de feuilles pour la production d'essence qui permet un revenu régulier lié à une disponibilité des feuilles toute l'année et à une forte demande en eugénol sur le marché international, entraînant une augmentation des prix.

ÉVOLUTION DE LA GIROFLIÈRE MALGACHE

Dynamique géographique

L'extension de la zone de production du girofle à Madagascar s'est faite depuis Sainte-Marie (possession française depuis 1750) vers la Grande Terre après la colonisation de celle-ci par les Français, au début du 20^e siècle. Cette extension s'est faite le long de la côte Est, région tropicale humide de basse altitude (Cornet, 1974) qui présente des contextes environnementaux adaptés à l'espèce. La zone giroflière s'étend aujourd'hui du nord au sud depuis Maroansetra jusqu'à Fort-Dauphin dans les régions Antsinanana, Analanjirofo (dont le nom signifie d'ailleurs « forêt de girofliers »), Vatovavy Fitovinany et Atsimo Atsinanana (Carte 1). Cependant, 90 % de la production de clous est concentrée dans la zone de Mananara, Fénérive-Est et Soanierana Ivongo (INSTAT, 2010). La production de Sainte-Marie est aujourd'hui anecdotique.

Évolution de la production malgache de clous et d'essence de girofle

L'histoire du giroflier à Madagascar peut être approchée par l'évolution des productions de clous et d'essence. Ces productions ont été assimilées aux exportations annuelles, ces produits étant exclusivement réservés aux marchés internationaux. L'analyse des courbes (Figure 1) fait apparaître une très large variation interannuelle de la production de clous, confirmant le constat des fortes alternances déjà signalées (Maistre, 1964). Mais au-delà de ces alternances, cette analyse permet de poser les hypothèses d'une périodisation dans le développement de la giroflière à Madagascar. Cette périodisation commence



avec le début du 20^e siècle, date à laquelle la production de girofle commence à devenir significative, même si quelques exportations semblent avoir été réalisées bien avant cette date, dès 1835 pour Campbell (2005). Six périodes ont pu être caractérisées par Danthu *et al.* en 2014 :

- La première période va de 1900 à 1929. L'extension de la giroflière est faible, estimée à 2 800 ha pour 1 600 tonnes de clous produits en 1929. La première vague de plantations est due à un soutien fort du pouvoir colonial (Brown, 2000). Ainsi François (1928) estime qu'un million de girofliers ont été plantés par de petits paysans malgaches dans le district de Mananara entre 1924 et 1926, sous l'impulsion de l'administrateur Ballot « qui s'est tout particulièrement attaché à la propagation des cultures indigènes ». Ce développement de la giroflière semble s'être parfois faite au détriment des cultures vivrières et en particulier du riz pluvial mais aussi des plantations de café (Tourneur, 1947). Cette période est aussi marquée par les premières distillations d'essence de girofle en 1911. Cette nouvelle pratique est liée d'une part à l'importation des premiers alambics à Madagascar (Ramalanjaona et Joudain, 1962 ; Dufournet, 1968) et d'autre part au fait que l'eugénol s'est révélé être un très bon plastifiant utilisé dans la fabrication des vernis des ailes d'avions, dont la guerre a décuplé la production (Gatefossé, 1921). Cependant la production d'essence reste modeste, la production annuelle étant toujours inférieure à 100 tonnes. Si les statistiques mentionnent les premières exportations d'essence de girofle en 1911, la production commence vraiment à se développer qu'à partir de 1920 (Tourneur, 1949b).
- La deuxième période, de 1930 à 1939, se caractérise par une augmentation significative des surfaces plantées en girofliers, qui passent de 2 000 ha en 1920 à 10 000 ha en 1938. Parallèlement, mais avec un temps de latence d'une dizaine d'années, la production de clous augmente passant de 2 800 tonnes en 1930 à 6 500 en 1938. La production annuelle d'essence progresse de 100 à 400 tonnes.
- La troisième période est brève. Elle est liée à la Seconde Guerre mondiale qui a entraîné des variations brusques des exportations de girofle. On observe une baisse significative des exportations (plutôt que de la production) de clous, entre 1939 et 1940, et une chute en 1942 (120 tonnes). De même la production d'essence de girofle devient quasi nulle : 2 tonnes en 1942 et 7 tonnes en 1943. Un redémarrage de la production est enregistré dès 1943, la production de clou atteignant alors entre 3 000 et 5 000 tonnes. Ces variations sont très liées à l'histoire de Madagascar. D'abord vichyste, l'île a subi un blocus de juin 1940 à fin 1942, puis est conquise par les Britanniques et les forces françaises libres à partir de janvier 1943, date de levée de ce blocus. Cependant le commerce du girofle reste mineur, comme ce fut le cas pour l'ensemble des productions coloniales destinées à l'exportation et non essentielle à l'effort de guerre (François, 1945 ; Castel, 1949). A noter que les exportations de 1946 et 1947 correspondent, en partie à un déstockage réalisé les années précédentes (Dufournet, 1968).
- La quatrième période va de 1946 à 1965. Elle correspond au plateau de production des plantations des années 1920. Par ailleurs, les superficies estimées passent de 22 000 ha en 1950 à 36 000 ha en 1960, ce qui correspond à la seconde grande vague de plantations. La production annuelle de clous oscille entre 3 000 et 7 000 tonnes, pour une moyenne de 4 750 tonnes, alors que celle de l'essence augmente régulièrement, passant de 500 tonnes en 1949 à plus de 1 000 tonnes. Le passage à l'Indépendance, en 1960, ne marque pas une rupture dans le développement giroflier, l'État malgache continuant à soutenir la filière. La recherche scientifique s'intéresse à l'espèce, comme le montrent les travaux importants de Maistre (1955, 1964), de Rabechault (1955) et de Ramalanjaona et Jourdan (1961) publiés à cette période.
- Durant la cinquième période, de 1965 à 2000, la production annuelle de clous oscille entre 4 000 et 15 000 tonnes, avec une moyenne de 10 500 tonnes et des pics de production de clous à 23 000 tonnes en 1974 et 17 000 en 1984. On estime à trois millions le nombre d'arbres potentiellement producteurs

(Ramanantsoavina 1971). Les superficies explosent dans les recensements malgaches, passant officiellement de 30 000 ha à 80 000 ha, mais ce gonflement des chiffres semble être plutôt une surestimation politique liée au contexte productiviste pendant de la période transitoire (1972-1975) puis socialiste (1975-1991). D'ailleurs, le retour à une surface estimée à 37 230 ha en 2005 suite à une réévaluation, confirme cette hypothèse. Il y eut toutefois des replantations au début des années 1970, avec la mise en œuvre de grands projets comme « L'opération café poivre girofle » de 1970/75 qui ont contribué à augmenter la production dans les années 1980 et 1990 mais aucun chiffre fiable n'est disponible. Durant cette période, et en particulier durant l'ère socialiste, le prix d'achat des clous aux paysans fut maintenu très bas par le gouvernement afin de favoriser la balance des paiements et compenser le déficit lié à l'importation de riz rendu nécessaire par le maintien du prix de vente de cette denrée de base artificiellement bas, entraînant une chute de la production rizicole. Un trafic d'exportation clandestin du girofle malgache s'organisa alors vers les Comores où les prix d'achat étaient plus élevés (Brown 2000). Depuis 1965, la production d'essence poursuit son essor, atteignant 2 000 tonnes en 2000.

- La dernière période va de 2001 à 2013. La production annuelle de clous oscille entre 8 000 et 19 000 tonnes, avec une moyenne de 11 500 tonnes. Nos enquêtes montrent une dynamique de replantation depuis les années 2000, mais on ne connaît pas l'importance de ce renouvellement, qui n'apparaît pas dans les statistiques agricoles. Le PPRR (Programme de Promotion des Revenus Ruraux) du FIDA a, par exemple, distribué, dans la région de Fénérive-Est environ 200 000 plants entre 2008 et 2010, et le CTHT, (Centre technique horticole de Tamatave), 160 000 plants entre 2009 et 2011, mais aucune mesure d'impact de ces projets n'a été faite. La dynamique de replantation n'est pas suffisamment connue pour savoir si elle a pu assurer le renouvellement de la ressource, alors que la figure 8 montre une baisse tendancielle de la production de clous pour cette période montrant l'effet conjugué du vieillissement des arbres, de l'effet du passage récurrent des cyclones et, possiblement, de la collecte excessive des feuilles au détriment de la production de clous. De fait, la production d'essence augmente très nettement, probablement lié à une augmentation des cours mondiaux qui connaissent un pic en 2011.

VALEUR ÉCONOMIQUE DU GIROFLE

Madagascar a exporté dans un premier temps (avant la Première Guerre mondiale) des produits d'extraction ou de cueillette (or, caoutchouc de forêts, raphia, cire...) (Campbell, 2005). A partir de 1913, l'île commença à exporter des produits agricoles ou issus de l'élevage : viande, peaux, café, vanille et girofle (Castel, 1947).

Place du girofle dans les exportations agricoles malgaches

Le Tableau 1 issu des travaux de Danthu *et al.* (2014) montre que le girofle (et ses deux produits, clou et essence) prend une part de plus en plus importante dans la valeur de ces exportations jusqu'à devenir la première source de rentrée de devises parmi les productions agricoles malgaches.

Le caoutchouc de forêts (avant l'arrivée sur le marché du caoutchouc d'hévéa des plantations asiatiques) et les peaux ont été les principales exportations malgaches jusqu'à la Première Guerre mondiale. La part du girofle était alors faible (1 % en valeur en 1910). Dans les années 1930, le café était de loin le principal produit exporté de Madagascar, suivi de la vanille et du girofle (qui a progressé à 4,4 % en 1938).



Enfin dans les années 2000, girofle et vanille dominent les exportations malgaches, loin devant le litchi, le sucre et le cacao. La part du girofle dans les exportations est de 19% pour l'année 2010 et de 25% pour 2012. L'augmentation régulière de la production (au moins jusque dans les années 2000) et la forte demande internationale, en clous comme en essence, ainsi que des prix élevés ont hissé le girofle à cette position dominante dans les exportations agricoles devenant ainsi une source majeure de revenu monétaire pour les populations rurales de la côte Est .

Tableau 1 : Place des produits du giroflier parmi les produits d'exportation de Madagascar
(Source : Danthu *et al.* 2014)

Année	Exportations totales des produits du giroflier (%)		Place des produits du giroflier parmi les exportations de ressource naturelle		Principales ressources naturelles exportées de Madagascar (%)
	Clou	Huile essentielle	Clou	Clous + Huile essentielle	
1899	0,2	-	8	-	or (31,2 %) - raphia (28,9 %) - caoutchouc (27,4 %)
1910	0,2	-	13	-	peau de bétail (21,6 %) - caoutchouc (21,3 %) - or (20,5 %)
1920	0,8	0,1	14	14	peau de bétail (19,8 %) - riz (11,7 %) - vanille (9,9 %)
1930	3,7	1,5	7	-	vanille (10,6 %) - pois du Cap (9,7 %) - café (9,4 %)
1938	4,4	1,3	6	3	café (31,7 %) - vanille (9,0 %) - peau de bétail (5,2 %)
1954	10,8	3,1	2	2	café (48,7 %) - vanille (5,2 %) - riz (4,0 %)
1966	2,4	1,6	10	5	café (31,5 %) - vanille (9,2 %) - extrait de viande (6,2 %)
2001	9,6	0,006	4	-	vanille (15,5 %) - coquillage (11,0 %) - pétrole (10,5 %)
2007	2,8	0,7	4	-	coquillage (10,1 %) - vanille (4,2 %) - pétrole (4,2 %)
2012	12,5	1	1	-	pétrole (6,8%) - coquillage (5,7%) - nickel (4,9%)

L'Indonésie premier producteur et importateur mondial, Madagascar premier exportateur

La production mondiale de girofle est actuellement dominée par trois pays : l'Indonésie, Zanzibar (incluant l'île de Pemba rattachée depuis 1964 à l'actuelle Tanzanie) et Madagascar. Viennent ensuite des pays mineurs comme les Comores ou Sri Lanka (Maistre, 1964 ; Martin, 1991 ; FAOSTAT, 2013 ; Danthu *et al.*, 2014) (Figure 2). Sur la période 2007/2011, la production annuelle indonésienne est en moyenne de 81 000 tonnes. Madagascar et Zanzibar arrivent ensuite avec une production annuelle d'environ 9 000 tonnes.

Ces deux pays sont les deux principaux exportateurs historiques de clous de girofle même si leur production actuelle est faible par rapport à celle de l'Indonésie.

En effet, l'Indonésie et son industrie de la kretek, est un grand consommateur de girofle. Pendant longtemps, la production indonésienne (inférieure à 10 000 tonnes jusque dans les années 1960) a été inférieure à sa consommation. Ce n'est que dans les années 1960/1970 que la production indonésienne a connu un boom passant à plus de 80 000 tonnes en moyenne à partir de 1985, devenant quasi auto-suffisante (Jahiel, 2011). Cependant une grande partie de la production de clous de Madagascar est encore aujourd'hui absorbée par le marché indonésien en transitant par le hub de Singapour qui réexporte la quasi-totalité de ses importations vers l'Indonésie. Toutefois la concurrence des grands groupes cigarettiers internationaux qui tentent de conquérir l'immense marché indonésien peut être, à moyen terme une cause de réduction des importations ce pays (Arnez, 2009).

Un petit flux de clou « épice » va vers les autres parties du monde et en particulier l'Europe (Maistre, 1964; FAOSTAT, 2013).

La domination de Zanzibar et de Madagascar sur le marché mondial du girofle est très ancienne puisque ces deux pays occupent les deux premières places sur le marché mondial du clou, avec 90 % des volumes échangés depuis le début du 20^e siècle (Maistre, 1964, Martin, 1991).

Entre 1900 et 1960, les exportations de Zanzibar furent régulièrement supérieures à celles de Madagascar (Danthu *et al.*, 2014) (Figure 3). La nette domination de Zanzibar s'explique par un rendement en clous de girofle bien supérieur à celui de la giroflière malgache : 640 kg/ha contre seulement 250 (FAOSTAT, 2010), cette différence étant principalement due au fait que les girofliers fleurissent deux fois par an à Zanzibar (une grande récolte de juillet à septembre et une petite de décembre à janvier) contre une seule fois à Madagascar (Castel, 1947 ; Dufournet, 1968) et que Zanzibar produit peu d'essence (Maistre, 1964).

Dans les années 1970/1990, l'un ou l'autre des deux pays occupait la place de premier exportateur. Mais à partir de 1990, les exportations malgaches augmentèrent alors que celles de Zanzibar suivirent une tendance à la baisse. Madagascar s'installa alors durablement comme premier exportateur mondial, avec des volumes annuels compris entre 10 000 et 15 000 tonnes. En 2009, l'importation mondiale de clous de girofle est d'environ 51 000 tonnes et est assurée à 30 % par Madagascar (Jahiel, 2010).

La production d'essences de girofle qui sert de base à l'extraction de l'eugénol est une spécificité essentiellement malgache et indonésienne. Les exportations indonésiennes ont dépassé 900 tonnes par an à trois reprises entre 1979 et 1982 alors que celles de Madagascar variaient entre 900 et 1 200 tonnes avec deux pics à 1 800 tonnes en 1984 et 1986 (Duclos, 2012). Les principales destinations sont la France (300-400 tonnes) et les USA (300-470 tonnes) et le reste est exporté en Indonésie où est extrait l'eugénol qui est ensuite réexporté en Europe ou aux États-Unis. L'Indonésie est ainsi devenue le premier importateur d'essence de girofle et le premier exportateur d'eugénol, Madagascar étant le premier exportateur d'essence de girofle. A noter que la demande mondiale en essence de girofle est estimée à 5 000 tonnes, largement supérieure à la production. Cette filière représente donc une belle potentialité d'avenir pour les producteurs malgaches (Duclos, 2012).



Variabilités des huiles essentielles de girofle

Les paragraphes suivants traitent des différents facteurs qui peuvent être à l'origine de la variabilité chimique rencontrée dans les huiles essentielles (HE) de girofle.

INFLUENCE DE LA PARTIE DE LA PLANTE EXAMINÉE (CLOUS, FEUILLES ET GRIFFES)

L'objectif de cette étude est de comparer la composition chimique des HE de clous, de feuilles et de griffes. Les échantillons utilisés ont été obtenus auprès des compagnies exportatrices d'huiles essentielles de girofle. (Tableau 2).

Tableau 2 : Origine et nombre d'échantillon d'huile essentielle

Pays	Matériel végétal			
	Clou	Feuille	Griffe	
Madagascar	39	28	27	
Indonésie	6	4	2	
Zanzibar	-	-	15	
Total	45	32	44	121

L'ACP (Figure 4) a permis de distribuer les 121 échantillons en trois groupes (Tableau 3) :

- Le groupe 1, constitué de 45 échantillons d'HE de clous, est caractérisé par une faible teneur en eugénol (72,08 - 82,36 %) et une forte teneur en acétate d'eugényle (8,61 - 21,32 %) ;
- Le groupe 2, composé de 32 échantillons d'HE de feuilles, est caractérisé par une teneur en eugénol comprise entre 75,04 et 83,58 % et par une teneur élevée en β -caryophyllène, comprise entre 11,65 et 19,53 % ;
- Le groupe 3, constitué de 44 échantillons d'HE de griffes, est caractérisé par un fort pourcentage en eugénol (87,52 - 96,65 %).

Nos résultats montrent que les organes de la plante (clous, feuilles et griffes) sont des facteurs qui influencent de façon significative la composition chimique des HE. Il est donc possible d'utiliser les teneurs en eugénol, en acétate eugényle et en β -caryophyllène pour différencier les HE extraites du giroflier.

INFLUENCE DE L'ORIGINE GÉOGRAPHIQUE

Huiles essentielles de clous provenant de Madagascar et de l'Indonésie

L'ACP de la Figure 5 des données chimiques des 45 échantillons met en évidence deux groupes (Tableau 4) :

- Le groupe 1 rassemble 39 individus provenant de Madagascar dont les HE sont caractérisées par une faible teneur en eugénol (72,08 - 80,71 %) et en β -caryophyllène (2,76 - 6,38%) mais avec une forte teneur en acétate d'eugényle (11,68 - 21,32 %).
- Le groupe 2 est constitué par 6 échantillons provenant de l'Indonésie. Dans ce groupe, la teneur en eugénol, en β -caryophyllène et en acétate d'eugényle est respectivement de 77,32 - 82,36 % ; 5,34 - 8,64 % et 8,61 - 10,55 %.

Huiles essentielles de feuilles provenant de Madagascar et de l'Indonésie

L'ACP (Figure 6) a permis de distribuer les 32 échantillons en deux groupes (Tableau 5) :

- Le groupe 1, constitué de 28 échantillons de Madagascar, est caractérisé par une forte teneur en eugénol (80,87 - 83,58 %).
- Le groupe 2, composé de 4 échantillons provenant de l'Indonésie, est caractérisé par une faible teneur en eugénol (75,04 - 83,58 %).

Huile essentielle de griffes provenant de Madagascar, de l'Indonésie et de Zanzibar

L'ACP (Figure 7) a permis de distribuer les 44 échantillons en deux groupes (Tableau 6) :

- Le groupe 1, constitué par les 27 échantillons de Madagascar est caractérisé par la forte teneur en eugénol (91,81 - 96,65 %) et une faible teneur en β -caryophyllène (1,66 - 4,48 %).
- Le groupe 2, composé par les 2 échantillons de l'Indonésie et 15 échantillons de Zanzibar est caractérisé par un faible pourcentage en eugénol (87,52 - 89,76 %) et une forte concentration en β -caryophyllène (7,40 - 9,70 %).

Le constituant majoritaire des HE de **clous** de Madagascar et de l'Indonésie est l'eugénol. Ce constituant est commun dans les HE de clous provenant de Madagascar et de l'Indonésie mais on observe une différence sur les teneurs en acétate d'eugényle et en β -caryophyllène.

La comparaison de la composition chimique des HE de **feuilles** de Madagascar avec celle de l'Indonésie montre une variation des teneurs en eugénol, en β -caryophyllène et en acétate d'eugényle.

Les constituants majeurs des HE de **griffes** provenant Madagascar, de l'Indonésie et de Zanzibar sont l'eugénol et le β -caryophyllène.

Une distinction de la teneur en eugénol et en β - caryophyllène a été montrée mais nos analyses ne permettent pas cependant de caractériser formellement les HE selon les origines géographiques des échantillons.



EFFETS DES STADES PHÉNOLOGIQUES SUR LES HE DE CLOUS DE GIROFLE DE Madagascar

La variation du rendement et de la composition chimique des HE de clous girofle de Madagascar est évaluée en fonction des différents stades phénologiques (Photos 3, Tableau 7) : date de collecte et caractéristiques physiques des clous de girofle (couleur, longueur, poids sec et taux d'humidité).

Tableau 7 : Stades phénologiques, date de collecte et les caractéristiques physiques des clous de girofle

Code	Stades phénologiques	Date de collecte	Couleur clou	Longueur (mm/clou)	Poids (mg/clou)	Humidité (%)	Code Ech
A	Bourgeon initial	Juillet 2012	Verte claire	5,88±1,43 a	13,23±6,15a	47,63±1,04 a	A1, A2, A3
B	Bourgeon 1	Août 2012	Verte	6,18±1,47 a	13,68±7,01 a	48,23±2,56 a	B1, B2, B3
C	Bourgeon 2	Septembre 2012	Verte foncée	10,75±1,06 b	41,97±9,66 b	53,47±1,83 b	C1, C2, C3
D	Bourgeon 3	Octobre 2012	Jaune pâle	13,31±1,20 c	61,23±12,98 c	57,57±1,01 c	D1, D2, D3
E	Bourgeon final	Novembre 2012	Jaune orangé	17,80±0,93 d	83,81±8,49 c	70,64±0,83 d	E1, E2, E3
F	Floraison	Décembre 2012	Rose rouge	21,45±0,91 e	334,55±20,90 d	71,48±1,06 e	F1, F2, F3
G	Fructification initial	Janvier 2013	Rouge	24,38±1,74 f	449,95±29,85 e	74,63±0,82 f	G1, G2, G3
H	Fructification final	Février 2013	Rouge	25,93±2,49 g	531,13±32,72 f	79,56±0,95 g	H1, H2, H3

La variation du rendement et la composition chimique des HE **de clous** de girofle suivant les huit stades phénologiques montrent une grande différence au niveau de la teneur en eugénol et en acétate d'eugényle. Selon nos résultats, le meilleur moment de récolter les clous pour leur extraction en HE est au stade de bourgeon final qui donne à la fois, un meilleur rendement et une haute teneur en eugénol. Ces résultats confirment les connaissances des paysans et des exploitants qui collectent les clous de girofle à ce stade phénologique.

Le rendement en HE varie de 2,52 à 17,94 ml par 100 g de matière sèche, atteignant un maximum au stade de bourgeon final (clou en plein maturité) et diminue rapidement pour atteindre le minimum au stade de fructification final (Figure 8).

L'eugénol et l'acétate d'eugényle sont les composants majoritaires. La teneur en eugénol augmente en fonction des différents stades phénologiques. Elle est au minimum au stade de bourgeon initial (39,66 %) et évolue pour atteindre le maximum au stade de fructification final (94,89 %). La teneur en acétate d'eugényle est au maximum au stade de bourgeon initial (56,07 %) et diminue rapidement pour atteindre le minimum au stade de fructification final (2,01 %) (Tableau 8).

L'ACP (Figure 9) a permis de distribuer les 24 échantillons d'HE de clous de girofle en deux groupes (Tableau 8) :

- Le groupe 1 rassemble tous les échantillons des stade du bourgeon initial au stade de bourgeon 3 (A1 - A3, B1 - B3, C2 - C3, D1 - D3) qui sont caractérisés par une faible teneur en eugénol (39,66 - 52,13 %) et une forte teneur en acétate d'eugényle (56,07 - 44,00 %).

- Le groupe 2, caractérisé par une forte teneur en eugénol (87,78 - 94,89 %) et une faible teneur en acétate d'eugényle (10,68 - 2,01 %) rassemble les échantillons de tous les autres stades, du bourgeon final à la fructification finale (E1 - E3, F1 - F2, G1 - G2, H1 - H2).

EFFETS DES STADES DE DÉVELOPPEMENT SUR LES HE DE FEUILLES DE GIROFLE DE Madagascar

Les HE de feuilles de girofle sont caractérisées en fonction de quatre stades de développement (Photo 4). Les détails sur les différents stades de développement, la date de collecte et les caractéristiques physiques (couleur, longueur et taux d'humidité) des feuilles de girofle sont résumés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Stades de développement, date de collecte et les caractéristiques physiques des feuilles de girofle

Code stade	Stades de développement	Date de collecte	Couleur	Longueur (cm/feuille)	Humidité (%)	Code Ech
A	Jeunes feuilles	Juillet 2012	Rouge	3,4±1,3 a	47,6±1,0 a	A1, A2, A3, A4, A5
B	Epanouissement stade 1	Septembre 2012	Rose	7,5±1,4 b	48,2±2,5 a	B1, B2, B3, B4, B5
C	Epanouissement stade 2	Novembre 2012	Vert pâle	9,6±1,1 c	53,4±1,8 b	C1, C2, C3, C4, C5
D	Feuilles Matures	Janvier 2013	Vert foncé	12,5±1,0 d	57,5±1,0 c	D1, D2, D3, C4, C5

Le rendement maximum (5,06 %) en HE est obtenu à partir des jeunes feuilles et le minimum (3,79 %) est détecté sur les feuilles matures (Figure 11).

En considérant les 4 constituants identifiés sur CPG/SM, l'ACP a permis de distribuer les 20 échantillons d'HE en 3 groupes (Tableau 10) :

- Le premier groupe, composé par les échantillons de jeunes feuilles est caractérisé par une faible teneur en eugénol (25,43 - 30,38 %) et par une forte teneur en acétate d'eugényle (61,44 - 65,52 %).
- Le second groupe rassemble les échantillons de feuilles en épanouissement au stade 1 dont la teneur en eugénol et en acétate d'eugényle est respectivement de 58,29 - 61,53 % et 26,67 - 32,65 %.
- Le troisième groupe, formé par les échantillons de feuilles en épanouissement au stade 2 et ceux des feuilles matures, est caractérisé par une forte teneur en eugénol (84,00 - 90,48 %) et un faible pourcentage en acétate d'eugényle (0,36 - 7,16 %).

La variation du rendement et la composition chimique des HE **de feuilles** de girofle suivant les quatre stades de développement montre une grande différence au niveau des teneurs en eugénol et en acétate d'eugényle. Selon nos résultats, le rendement et la teneur en eugénol sont à l'optimum au stade d'épanouissement 2 et au stade des feuilles matures.



EFFET DE SÉCHAGE SUR DES HE DE FEUILLES DE GIROFLIER DE Madagascar

L'effet de séchage à l'ombre a été également évalué sur le rendement et la composition chimique des HE de feuilles de giroflier afin d'optimiser la production. Le séchage a été réalisé dans les couloirs du laboratoire durant 15 jours en étalant la matière première en fines couches et en la retournant fréquemment.

L'analyse de la Figure 12 montre qu'au cours de séchage, la teneur en eau diminue progressivement de 54,78 % à 11,42 % puis devient plus ou moins constante.

Trois phases de séchage ont été identifiées :

- Phase I : du début du séchage jusqu'au troisième jour ;
- Phase II : 4^e jour au 7^e jour ;
- Phase III : 8^e jour au 15^e jour.

La Figure 13 représente la variation de la teneur en HE en fonction du temps du séchage. Le rendement augmente en fonction du séchage puis chute pour se stabiliser à partir de huitième jour de séchage. L'augmentation de la teneur en HE pendant les premiers jours de séchage est proportionnelle à la diminution du taux d'humidité. Le maximum de la teneur en HE est obtenu au sixième jour (5,58 ml par 100 g de MS).

Tableau 11 : Evolution de la teneur en composants majoritaires des huiles essentielles de feuilles de giroflier durant le séchage

Nombre de jour de séchage	β-caryophyllène		Oxyde de caryophyllène		Eugénol		Acétate d'eugényle	
0	6,33	±0,90	0,81	±0,09	87,25	±0,94	3,86	±1,49
1	6,84	±0,65	0,87	±0,06	87,03	±0,89	3,32	±0,41
2	7,19	±0,43	0,90	±0,04	88,16	±0,76	2,01	±0,44
3	6,72	±1,93	0,83	±0,16	89,75	±1,48	1,43	±0,37
4	8,33	±0,60	1,06	±0,03	87,74	±0,97	1,52	±0,23
5	6,74	±0,84	0,85	±0,08	89,93	±0,92	1,03	±0,07
6	7,00	±1,04	0,88	±0,09	88,80	±1,44	3,04	±0,19
7	7,17	±1,23	0,75	±0,15	87,73	±0,43	3,99	±1,51
8	7,53	±1,69	0,65	±0,27	89,47	±0,82	1,74	±1,50
9	6,92	±2,37	0,86	±0,38	90,05	±0,83	1,61	±1,80
10	6,81	±1,40	1,57	±0,50	88,78	±0,89	2,19	±1,68
11	6,21	±1,03	0,57	±0,28	90,17	±0,24	2,00	±0,07
12	5,96	±0,14	1,55	±0,21	88,61	±0,55	2,86	±0,44
13	5,31	±1,01	1,61	±0,29	88,25	±0,10	3,81	±1,00
14	6,93	±1,49	1,93	±0,77	88,63	±0,63	1,57	±0,45
15	7,01	±0,08	1,47	±0,25	88,44	±0,64	1,97	±0,73

La concentration en HE est à son maximum avec un niveau d'humidité d'environ 17 % correspondant à une durée de séchage optimale entre 6 et 8 jours.

Les analyses sur chromatographie en phase gazeuse des 75 échantillons de feuilles de giroflier ont permis d'identifier les quatre composants majoritaires que sont : eugénol, β-caryophyllène, acétate eugényle et oxyde de caryophyllène (Tableau 11). La déshydratation des feuilles semble ne pas avoir d'impact sur la composition chimique des HE des feuilles fraîches ou séchées après 15 jours. La teneur en composants majoritaires reste approximativement stable.

Cette étude montre que la teneur en HE **de feuilles de giroflier** varie significativement en fonction de la durée de séchage. La meilleure concentration (5,58 ml par 100 g de MS) est obtenue au sixième jour de séchage sans que la composition chimique ne soit affectée de manière notable. Pour une exploitation industrielle, il convient donc d'extraire l'HE des feuilles de giroflier environ une semaine après leur récolte, puisque la teneur en HE serait à son maximum. Au-delà de cette période, les feuilles perdent quantitativement et qualitativement leurs HE.

ÉTATS ET ANALYSES CRITIQUES DE LA PRATIQUE ACTUELLE DE LA DISTILLATION PAYSANNE

Matières premières

Les matières premières sont composées par l'eau, le combustible et les feuilles de giroflier :

L'eau : Elle est nécessaire dans la cucurbit et le réfrigérant. Sa qualité n'a aucune importance, à condition toutefois qu'elle soit suffisamment limpide. Par contre, une grande quantité d'eau est nécessaire à la réfrigération. La présence d'un ruisseau ou une source abondante conditionne donc l'emplacement de l'alambic dans la zone à girofliers.

Le combustible : Le chauffage de l'alambic est assuré par la combustion du bois. Les bois de chauffe sont transportés le plus souvent à dos d'homme d'une distance variant de 1 à 2 km de l'alambic. Les distillateurs utilisent tous types de végétaux ligneux (bambou, albizzia, giroflier, caféier, litchier, gliricidia...).

Les feuilles de giroflier : Elles sont en réalité des rameaux constitués plus ou moins de branchettes. La collecte des feuilles s'effectue à l'aide d'une sorte de coupe-coupe appelée localement « boriziny ». Les parties sectionnées sont les branchages de la cime des girofliers. Les rameaux sont assemblés en fagots de 15 à 20 kg à l'aide d'une ficelle. Les fagots sont amenés à proximité de l'alambic, disposés sur une aire découverte et attendent leur tour d'être distillés.

Alambic traditionnel

L'HE est extraite par distillation des feuilles. Le procédé de distillation est un entraînement des substances par la vapeur d'eau dans un alambic qui est ensuite liquéfiée pour donner le distillat (Photo 5A). Les alambics sont plus moins perfectionnés selon les moyens de leurs propriétaires mais sont, en général, assez simples. Le modèle le plus courant est du type « Deroy », à feu nu, à cucurbit reliée par un col de cygne au refroidisseur cylindrique. La base de la cucurbit est placée dans un fourneau de pierres liées à la glaise. Le refroidisseur



est suffisamment surélevé pour permettre le retour par gravitation des eaux florales à la cucurbite. La capacité de celle-ci varie de 900 litres jusqu'à 1 500 litres, la dimension la plus répandue étant voisine de 1 000 litres.

Le foyer : Il est élaboré de façon simple et rudimentaire (Photo 5B). Les bois de chauffe sont posés directement au sol. La plupart des flammes sont à l'extérieur et les gaz chauds lèchent à peine le fond de la cuve et sont aussitôt évacués. La mauvaise conception de la cheminée de tirage de fumée et de feu entraîne la présence de fumée dans l'atelier de distillation et l'augmentation du temps d'apparition de la première goutte de distillat et par conséquent la consommation excessive de combustible.

La cuve ou cucurbite : La plupart des cuves ont une capacité de 1 000 litres. L'ensemble de la cuve est en aluminium avec une épaisseur entre 1 mm et 1,5 mm. Le fond de la cuve est toujours en fer avec une épaisseur entre 2 mm à 2,5 mm. L'assemblage de la cuve et du fond est assuré par des simples rivets. A l'ouverture s'amorce une gouttière en « V » destinée à former le joint avec le chapiteau (Photo 5C).

L'étanchéité de la cuve avec le chapiteau est assurée par bourrage dans les interstices des pourritures de fibres de bananiers (Photo 5D).

Le fond de la cuve en fer étant trop épais, le temps d'ébullition de l'eau et l'apparition de la première goutte de distillat sont trop long. Cela entraîne en conséquence une consommation excessive de combustible. L'étanchéité de la cuve avec le chapiteau est très relative puisque des fuites de vapeurs sur le joint en pourritures de fibres de bananiers sont fréquemment remarquées.

Parfois, les feuilles et l'eau sont en contact direct avec le fond de la cuve. Si le distillateur ne fait pas attention, la cuve et les feuilles pourraient être grillées ce qui affecterait le rendement et la couleur de l'huile obtenue (noirâtre).

Le chapiteau : Il est généralement de forme conique. L'ensemble est constitué en aluminium avec une épaisseur entre 1 mm et 1,5 mm. L'orifice supérieur du chapiteau est légèrement évasé de façon à ce que le tuyau du col de cygne vienne s'y emboîter. L'étanchéité du chapiteau et du col de cygne est très relative. Elle est cependant assurée par bourrage dans les interstices des pourritures de fibres de bananiers.

Col de cygne : C'est le tuyau reliant le chapiteau et le condenseur. Il est généralement en tôle galvanisée ou en aluminium. La jonction entre le col de cygne et le condenseur est toujours assurée par le bourrage dans les interstices des pourritures de fibres de bananiers (Photo 5E). L'inclinaison du col de cygne est insuffisante, des gouttes d'HE s'y condensent, au début de la distillation et même après, et sont difficilement chassées.

Le condenseur : D'une hauteur de hauteur est de 75 cm, il est généralement en aluminium et constitué par un anneau cylindrique de 32 cm de diamètre extérieur et de 15 cm de diamètre intérieur. Il est muni à l'intérieur de quatre chambres de détentes horizontales laissant un jeu de 2 mm avec la paroi. A la base se situe un tuyau qui évacue l'eau et l'HE condensées. Le condenseur est plongé dans un fût en fer de capacité de 200 litres faisant fonction de réfrigérant (Photo 5F). La circulation de l'eau dans le réfrigérant est toujours à co-courant (circulation dans le même sens avec l'entrée et la sortie de l'eau en haut du fût). La surface de réfrigération de la condensation étant faible, l'eau sortant du fût est très chaude. Indépendamment de la perte en huile que cette température peut entraîner par vaporisation du condensat, la vitesse et le retour des eaux florales dans la cucurbite sont insuffisants.

L'essencier : Il permet la séparation de l'HE et les eaux florales (Photo 5G). Il est constitué par deux seaux en plastique de capacité de 15 et 5 litres.

Conduite de distillation

Le chargement de la cucurbite commence une fois que les deux matières premières, feuilles et bois de chauffe, sont réunies. Les brindilles feuillues sont placées et tassées par piétinement dans la cucurbite et recouvertes d'eau d'environ 300 litres (Photo 5H). On compte 180 à 240 kg de feuilles, soit douze à quatorze fagots pour une capacité de 1 000 litres de l'alambic. La chauffe commence lentement au début pour éviter les coups de feu. La distillation dure 24 heures.

Typologie des alambics

Distribution des alambics et échantillonnage

Il s'agit de rassembler dans un même groupe des alambics qui ont produit des HE de qualité voisine. D'un alambic à un autre, chaque distillation est inspectée depuis la préparation des matières premières jusqu'à ce que l'essence soit conditionnée dans son emballage de transport. Les faits marquants sont rigoureusement notés. A la fin de chaque opération, un échantillon de 30 ml d'HE acheté au producteur est conservé dans des flacons en verre ambré. La collecte des échantillons s'est effectuée dans 14 des 18 Fokontany d'Ambatoharanana (Tableau 12) et couvre 50 des 129 alambics identifiés. La collecte est associée à l'enregistrement du rendement à l'extraction, des caractéristiques techniques de l'alambic et des paramètres liés à la conduite de distillation.

Située sur le littoral Centre-Est de Madagascar, Ambatoharanana fait partie du District de Fénérive Est, dans la région Analanjirofo. Elle est localisée entre le 17°12' et 17°25' de latitude Sud (S) et le 49°12' et 49°20' de longitude Est (E). Son chef lieu, situé au (17°18' S ; 49°18' E) se trouve à une vingtaine de kilomètres au Nord-Ouest de Fénérive-Est. Elle est limitée à l'Est par les communes rurales d'Ampasina Maningory et d'Ambodimanga II, au Nord par la commune rurale de Vohipeno, à l'ouest par la commune rurale de Vohilengo et au Sud par le District de Vavatenina (Carte 2).

La carte 3A montre la position géographique des 50 alambics avec lesquels ont été prélevés les échantillons. La carte 3B représente quant à elle l'ensemble des 129 alambics identifiés dans la Commune d'Ambatoharanana. La densité moyenne revient donc à 1,5 alambic par kilomètre carré. Le faible nombre d'alambics de la zone Sud et Sud-ouest est lié aux problèmes d'eau. Contrairement à la partie Nord, ces zones sont caractérisées par des nappes phréatiques trop basses pour permettre l'exploitation de l'eau à la distillation.

La commune Ambatoharanana est constituée uniquement d'alambics traditionnels. Ces alambics sont tous équipés d'un col de cygne et d'un condenseur en aluminium. Les essenciers sont constitués par des seaux en plastique. La paroi de la cucurbite est fabriquée généralement avec des feuilles d'aluminium ou parfois, en fer et cuivre (Figure 14). Le fond de la cuve est toujours réalisé avec du fer galvanisé de 4 mm d'épaisseur, voire plus. Les matériaux de fabrication du chapiteau et de la cucurbite constituent les seuls éléments discriminatifs distinguant un alambic d'un autre. Les alambics traditionnels sont implantés près d'un point d'eau dirigeable à proximité des parcs à giroflier. Pour fonctionner correctement, les alambics ont besoin d'une importante quantité d'eau indispensable non seulement à la cuisson mais aussi à l'alimentation continue du système de réfrigération.



Tableau 12 : Liste des échantillons par Fokontany

N°	FOKONTANY	VILLAGES	CODES	NOMBRE ECH
1	AMBATOHARANANA		AMB	4
2	LOHARIANA		LHR	3
3	AMBODIAZININA		AHZ	7
4	AMBODIVOHITRA	Ambodivohitra	ABV	4
		Marovanihy	MRV	1
		Tsaratampona 2	TSR	3
		Andratambe	ADR	3
5	SOBERAKA	Ambolomadinika	ABL	2
		Sahavolo	SHV	1
		Ambodiovitra	ABO	1
		Antanankoro	ATK	1
		Manaratsandry	MNR	1
6	AMBODIHASINA		ABH	2
7	TSARATAMPONA I		TST	7
8	MANAKAMBAHINY		MKB	3
9	AMBODIAFOMENA		AFM	1
10	AMBOHIMANARIVO		AMN	1
11	AMBODIMANGA MAHALENA		ABM	1
12	AMPIRANAMBO II		APR	1
13	MANGOANDRANO		MGD	2
14	BEAMPY		BAP	1
				50

Classification des alambics en fonction de la composition chimique des HE produites

Le rendement varie entre 1,75 % et 3,40 % avec une moyenne de 2,39 %. La figure 15 affiche les variations du rendement qui sont perceptibles même au niveau d'un même alambic (ABH9, AHZ4, AHZ7, AMB2). Il est donc clair que la fluctuation du rendement ne peut pas être attribuée entièrement à l'alambic.

Cinquante échantillons d'HE sont pris sur les 50 alambics traditionnels. L'ensemble des résultats des analyses chromatographiques met en évidence les 4 composants principaux que sont l'eugénol, le β -caryophyllène, l'oxyde de caryophyllène et l'acétate d'eugényle. Le coefficient de variation élevé dans l'ensemble des composants indique une assez grande hétérogénéité (Tableau 13).

Des analyses statistiques sont effectuées pour mettre en évidence cette variabilité des composants majoritaires identifiée par les analyses chromatographiques. Les ACP et CAH de la Figure 16 énoncent trois types d'alambics correspondant à trois profils chimiques.

Tableau 13 : Pourcentage relatif des composants majoritaires

	β -caryophyllène	Oxyde de caryophyllène	Eugénol	Acétate d'eugényle
Min	8,4	1,0	74,0	0,4
Max	19,7	2,2	87,4	3,9
Moy	14,5	1,6	81,1	1,5
CV (%)	14,0	13,8	3,54	53,3

La désagrégation des individus se fait généralement suivant l'axe F1. Cet axe oppose les individus nettement plus riches en eugénol avec ceux marqués par des teneurs élevées en β -caryophyllène et oxyde de caryophyllène. L'axe F2 décompose les individus de chaque type suivant la teneur en acétate d'eugényle. La figure 16 montre la répartition géographique des individus composant chaque type :

- Alambics de TYPE 1 : les alambics de type 1 sont constitués par 20 échantillons les plus riches en eugénol (83,77 %). En revanche, les autres composants sont à des concentrations plus basses avec des moyennes de β -caryophyllène, d'acétate d'eugényle et d'oxyde de caryophyllène respectivement de 12,67 %, 1,21 % et 1,39 % (Figure 17) ;
- Alambics de TYPE 2 : Ces 19 alambics ont fourni des HE dont la composition chimique globale est voisine de la moyenne générale de la population (Figure 17) ;
- Alambics de TYPE 3 : Il regroupe 11 alambics qui produisent des HE dont la teneur en eugénol est la plus basse de toute la population. Le β caryophyllène, l'acétate d'eugényle et l'oxyde de caryophyllène se trouvent par contre à des concentrations largement supérieures à la moyenne générale (Figure 17).

La classification ascendante hiérarchique confirme les trois types d'alambic établis en l'ACP. Dans les trois classes 1, 2 et 3 sont repartis 20, 19 et 11 individus. Ces classes correspondent respectivement aux types 1, 2 et 3 de l'ACP. La figure 16 restitue le dendrogramme de classification.

Suivi de cuissons

Cette opération a comme finalité de déterminer si chaque groupe d'alambics identifié produit des HE de qualité stable. Elle est mise en œuvre par une surveillance individuelle des processus de production. Les alambics isolés des groupes formés sont évalués sur plusieurs cuissons successives. Les HE qui en résultent sont analysées au CPG et les résultats sont soumis à un test d'homogénéité utilisant la statistique multidimensionnelle. A l'issue du test d'homogénéité, si les essences du même alambic sont chimiquement identiques, les alambics considérés produisent donc des HE de qualité stable. Dans le cas contraire, d'autres variables doivent être considérées dans le but d'avancer d'autres sources probables des variabilités.

Le suivi, exécuté sur 6 alambics, a permis d'obtenir 18 échantillons. L'objectif est de comparer la composition chimique des échantillons recueillis durant les suivis. Les alambics AHZ4, LHR3, AMB2, AMB3, AHZ7 et ABH9 produisent des HE de qualité chimique stable si les échantillons résultant des cuissons successives se trouvent assemblés dans le même groupe. Le tableau 14 résume les références des alambics suivis, les échantillons recueillis et le nombre des cuissons considérées.



Tableau 14 : Références des alambics suivis, les échantillons recueillis et le nombre des cuissons

Type d'alambic	Alambics	Nb de cuissons suivies par alambic	Code
1	AHZ4	3	AHZ4A, AHZ4B, AHZ4C
	LHR3	2	LHR3A, LHR3B
	AMB2	4	AMB2A, AMB2B, AMB2C, AMB2D
2	AMB3	3	AMB3A, AMB3B, AMB3C
3	AHZ7	3	AHZ7A, AHZ7B, AHZ7C
	ABH9	3	ABH9A, ABH9B, ABH9C

L'ACP a permis la répartition des individus en 3 groupes (Figure 18) :

- Tous les échantillons (LHR3A, LHR3B, AMB2A, AMB2B, AMB2C, AMB2D) issus de l'alambic LHR3 et AMB2 s'agglomèrent dans le groupe 2. Cela signifie que ces alambics ont fourni des HE de qualité similaire.

Les échantillons issus des autres alambics (AMB3, AHZ4, ABH9 et AHZ7) se sont éparpillés à travers les 3 groupes. Pour l'alambic AHZ4 par exemple, les trois échantillons AHZ4A, AHZ4B et AHZ4C sont respectivement agencés dans les groupes 1, 2 et 3. Seuls, 2 des 6 alambics évalués ont produit des essences de qualité voisine.

Il a été démontré durant le suivi que les alambics en soi ne garantissent pas l'obtention d'une HE standardisée.

Les caractéristiques quantitatives et qualitatives de l'HE de feuilles de giroflier ne peuvent donc être dissociées de l'association objective entre la matière première, la conduite de distillation et la configuration matérielle de l'alambic.

Le rendement dépend de la conduite de distillation et de la puissance de chauffe. Un puissant chauffage permet en effet, dans un bref délai, d'épuiser les matières premières de ses réserves aromatiques. Le matériel de fabrication de l'alambic tient également un rôle non négligeable, le meilleur rendement étant obtenu sur des alambics fabriqués exclusivement en aluminium.

La composition chimique varie en fonction de la puissance de chauffe et la conduite de distillation :

Une cuisson brève est affiliée à des produits pauvres en eugénol mais riches en d'autres éléments. L'eugénol étant plus dense que tous les autres composants chimiques, concentrer l'HE en eugénol requiert donc beaucoup plus de temps. La puissance de chauffe agit sur la composition chimique globale. Le ramollissement de la matière première favorise la libération de tous les principes volatiles. En plus, un chauffage poussé augmente le flux de vapeur transportant les molécules aromatiques libérées.

Les matériels de fabrication peuvent influencer la composition chimique en général et la teneur en eugénol en particulier. L'eugénol ayant réagi avec les métaux pour former l'eugénate de métal est irrécupérable au niveau des distilleries artisanales. L'aluminium permet d'avoir une HE de qualité visuelle satisfaisante.

Modifications et améliorations de l'alambic traditionnel

MODIFICATIONS ET AMÉLIORATIONS APPORTÉES

Réaménagement du foyer : Pour que l'ensemble de la cucurbite bénéficie de la puissance chauffante des gaz chauds provenant du foyer, il est indispensable d'étendre verticalement ce dernier par un anneau de 20 cm d'épaisseur. Cet anneau doit couvrir la circonférence de la cucurbite. L'extension se termine au niveau de la tuyauterie de cohobation par un remblayage capable de conserver la chaleur (Figure 19).

Afin d'améliorer l'aération du foyer, la mise en place d'une grille est indispensable. Ce dispositif va partager le foyer en deux niveaux (Figure 19). En plus d'être un support pour les combustibles, la partie supérieure est le siège d'un débit d'air de combustion primaire tandis qu'un débit d'air de combustion secondaire est prévu pour circuler au dessous de la grille. Pour pouvoir résister au feu, une telle structure doit être façonnée avec des métaux de grande épaisseur. La cherté de ces matériaux pourrait empêcher l'application de cette solution. A titre d'alternative, il peut être intéressant de creuser un canal le long de la profondeur du foyer pour pouvoir le surmonter par des pierres tout en laissant de grands orifices pour permettre la libre circulation de l'air. En outre, il doit être assez large pour faciliter l'enlèvement des excès de braises à l'aide d'une pelle (Figure 19 et Photo 6A).

Réaménagement de la cheminée : L'existence de la cheminée munie d'un volet réglable est indispensable, non seulement pour canaliser la sortie des gaz chauds, mais aussi pour définir un tirage (Photo 6B). Ce phénomène d'aspiration est dû à l'écart de densité entre les fumées chaudes et l'air ambiant. Pour la plupart des alambics, l'origine du conduit de la cheminée est au même niveau que la base du foyer. Cela entraîne l'expulsion directe des gaz caloporteurs vers l'extérieur. Le déplacement de la cheminée à la limite de l'extension verticale du foyer permet alors d'évacuer les masses d'air chaudes qu'après avoir chauffé la cucurbite. Pour des alambics ayant un volume moyen de 1 000 litres, le diamètre de la cheminée peut être fixé à 165 mm.

Modification de la cuve : Pour accroître le temps d'apparition de la première goutte de distillat, il suffit de remplacer le fond de la cuve par une tôle galvanisée ou en aluminium moins épaisse de 1,5 mm d'épaisseur. La modification de la cuve destinée à former le joint avec le chapiteau par une ouverture en « U » permet d'assurer l'étanchéité entre eux. Les pourritures de fibres de bananiers sont ainsi remplacées par un simple joint hydraulique (Photo 6C).

Le mode de chauffage des alambics exige l'adaptation d'une grille perforée (Photo 6D) située à une hauteur de 10 cm afin de laisser une partie vide entre le fond, les feuilles et l'eau. Cela permet d'éviter le phénomène de pyrolyse qui affecte la qualité de l'huile.

Modification du chapiteau : Pour assurer l'étanchéité du chapiteau avec le col de cygne, il suffit de remplacer les pourritures de fibres de bananiers par un simple joint hydraulique en modifiant légèrement l'évasement de l'orifice supérieur du chapiteau en « U » (Photo 6E).

Au cours de la distillation, les vapeurs condensées au niveau du dôme ne réintègrent pas systématiquement l'intérieur de l'alambic. Elles peuvent s'écouler le long de l'arrête du chapiteau et se déverser dans la gouttière en « V » de la cucurbite. Ce phénomène entraîne des pertes de « principes actifs ». Pour y remédier, il est nécessaire d'installer un déflecteur matérialisé par une lame de métal cylindrique sur la face interne du dôme. Celui-ci permet de ramener les condensats dans l'alambic (Figure 19).



Modification du col de cygne : Pour éviter la perte en huile qui se condense avant la réfrigération dans le col de cygne, une augmentation de son inclinaison est nécessaire. Ainsi, l'huile piégée dans le col de cygne s'écoulera par gravitation dans le condenseur.

Modification du condenseur : Sa hauteur ne peut être modifiée car elle est conditionnée par celle du fût dans lequel il est plongé. En revanche la modification du diamètre extérieur à 40 cm et du diamètre intérieur à 25 cm est envisageable afin de permettre une bonne réfrigération (Photo 6F).

L'adaptation de la circulation de l'eau du réfrigérant à contre courant, entrée en bas et sortie en haut, permet d'éviter la surchauffe de l'eau de réfrigération (Photo 6G).

Installation d'un système de cohobation : Durant la distillation, l'ajout d'eau intermédiaire arrête complètement l'ébullition. Cet arrêt peut durer environ 30 minutes. Au cours d'une distillation de 24 h, cette opération peut se reproduire, ce qui augmente proportionnellement la dépense en combustibles et le temps de distillation. Il est possible de réduire au maximum voire supprimer les séquences d'ajout d'eau intermédiaire par l'installation d'une tuyauterie de cohobation (Figure 19 et Photo 6H). Elle permet le retour continu de l'eau mère dans la cucurbite tout en évitant la fuite des vapeurs aromatiques.

Modification de l'essencier : Au contact avec le plastique, l'huile perd sa qualité. Le remplacement des deux seaux en plastique par des seaux en aluminium est indispensable (Photo 6I).

ÉTUDE DE LA PERFORMANCE EXTRACTIVE DE L'ALAMBIC AVANT ET APRÈS LES MODIFICATIONS ET LES AMÉLIORATIONS

Effets du mode de distillation et des spécificités des alambics sur des HE de feuilles de giroflier de Madagascar

Les conditions de production par l'étude du rendement et de la composition chimique des HE sont optimisées en fonction de l'alambic et des paramètres de distillation. L'objectif consiste donc de relever les paramètres liés au fonctionnement de l'alambic avant et après les modifications et améliorations (Tableau 15).

Tableau 15 : Paramètres à relever

Combustibles	Combustibles consommés durant la distillation (kg)
Durée	Durée d'apparition de la première goutte de condensat (h)
	Durée de distillation (h)
Huile essentielle	Cinétique de distillation (Quantité d'HE obtenue par heure)
	Quantité d'HE Obtenue (l)
	Rendement total en huile essentielle (V/P % de Matière fraîche)
	Composition chimique (% relatif)

Durée d'apparition de la première goutte : La modification du fond de cuve par une tôle galvanisée ou en aluminium de 1,5 mm d'épaisseur a permis d'accélérer l'ébullition de l'eau et de diminuer le temps d'apparition de la première goutte de distillat. Ce temps d'apparition de la première goutte est d'environ une heure et trente minutes avant les modifications alors qu'il est d'environ une heure seulement après les modifications (Figure 20).

Cinétique de distillation : Les modifications et les améliorations ont conduit à une vitesse d'extraction plus rapide, qui croit et décroît de façon modérée en un intervalle de temps court. Dans le cas de l'alambic traditionnel, on remarque une accélération plus faible de la vitesse d'extraction (Figure 21) : 99 % d'HE sont déjà extraites à la 15^e heure de distillation sur l'alambic modifié alors qu'on obtient cette proportion qu'à la 18^e heure sur l'alambic traditionnel. L'alambic modifié présente donc un grand avantage sur la durée de distillation.

Pour permettre un gain de rendement, la durée optimale d'extraction sur l'alambic modifié est d'environ 13 à 15 heures. A ce stade, les HE sont presque totalement extraites. Il est donc recommandé d'éviter d'excéder 15 heures d'extraction, car au-delà de ce seuil, la quantité d'HE obtenue devient insignifiante (Figure 21).

Rendement total en HE : Le rendement total en HE obtenue après 15 heures d'extraction sur l'alambic traditionnel est relativement inférieur à celui sur l'alambic modifié (Figure 22).

Consommation de bois après 15 heures de distillation : Les aménagements du foyer et l'installation d'une cheminée munie d'un volet réglable ont permis à l'ensemble de la cucurbite de bénéficier de la puissance chauffante des gaz chauds provenant du foyer. La diminution de la consommation de bois par rapport à la situation initiale (avant les modifications) est d'environ 150 Kg (Figure 23).

Composition chimique : Les figures 24 et 25 montrent la teneur et le pourcentage cumulé en eugénol et en β -caryophyllène à chaque heure de distillation. Même si les deux courbes ont la même allure, l'alambic modifié présente un grand avantage quant à la teneur en ces deux composants.

La performance de l'alambic traditionnel a été comparée avant et après modifications et améliorations. Ces dernières concernent : les différents joints d'étanchéité, l'augmentation du volume du foyer, la mise en place d'un système de récupération d'HE à l'intérieur du chapiteau, la modification du fond de cuve en aluminium, la mise en place d'une cheminée métallique à volet réglable, la mise en place de la grille métallique s'interposant entre le fond de l'alambic et la matière première et la mise en place d'un système de cohobation et la modification de l'essencier.

Elles ont permis de diminuer le temps de distillation, de réduire la consommation de bois de chauffe et surtout d'améliorer le rendement et la teneur en eugénol et en β -caryophyllène de l'HE.

Conclusion générale

Les résultats de ces études ont permis de maîtriser les facteurs de variabilités du rendement et de la composition chimique des HE de girofle. Il est possible d'utiliser la teneur en composant majoritaire pour différencier les HE extraites de clous, feuilles et griffes du giroflier :

- Le meilleur moment de récolter les clous de girofle pour leurs HE est au stade de bourgeon final pour obtenir un meilleur rendement et une haute teneur en eugénol ;



- Le rendement et la teneur en eugénol sont à l'optimum au stade des feuilles matures (feuilles vertes foncées) ;
- Il convient d'extraire l'HE de feuilles de giroflier après environ une semaine de séchage à l'ombre, puisque la teneur en huile serait à son maximum ;
- Les modifications et améliorations de l'alambic diminuent le temps de distillation, réduisent la consommation de bois de chauffe et surtout améliorent le rendement et la teneur en eugénol et en β -caryophyllène de l'HE.

Références bibliographiques

AFNOR, 2000. Recueil de normes : les huiles essentielles. Tome 2. Monographies relatives aux huiles essentielles, AFNOR, Paris, 661 - 663.

Alma M.H., Ertas M., Nitz S., Kollmannsberger H., 2007. Chemical composition and content of essential oil from the bud of cultivated Turkish clove (*Syzygium aromaticum* L.), BioResources, 2: 265 - 269.

Andrianirina N., Benoit-Cattin M., David- Benz H., 2010. Diversité, diversification et inégalités chez les ménages ruraux. Le cas de l'observatoire rural de Fénérive-Est à Madagascar. Actes des 4es journées INRA-SFER-CIRAD de recherches en sciences sociales. [En ligne] <http://www.sfer.asso.fr>. Accessed 30th November, 2013.

Andrianoelisoa H.S., Menut C., Collas de Chatelperron P., et al., 2006. Intraspecific chemical variability and highlighting of chemotypes of leaf essential oils from *Ravensara aromatica* Sonnerat, a tree endemic to Madagascar, Flavour and Fragrance Journal, 21: 833-838.

Arnez M., 2009. Tobacco and kretek: Indonesian drugs in historical change. Aktuelle Südostasienforschung / Current Research on South-East Asia, 2: 49-69.

Blanc-Pamard C., RUFF., 1992. La transition caféière. Côte Est de Madagascar. CIRAD et Centre d'Etudes Africaines Editeurs, Collection « Documents Systèmes Agraires », 16, 248 p.

Boiteau G., 1936. Le girofle. La Revue de Madagascar, 13 : 107-116.

Bouriquet G., 1941. Les Champignons de Madagascar. La Revue de Madagascar, 28 : 117-137.

Bouriquet G., 1942-1943. Notes de mycologie malgaches. Bulletin de l'Académie malgache, 25 : 12-24.

Bouriquet G., 1946. Les maladies du giroflier. In : Les maladies des plantes cultivées à Madagascar. Encyclopédie mycologique Paul Lechevalier Editeur, France, 237-252.

Briand C., 1996. L'essence de feuille de girofle, précurseur de nombreuses molécules indispensables aux créateurs de parfums et d'arômes alimentaires. Les Cahiers du CITE, 4: 61-62.

Brown M., 2000. A history of Madagascar. Damien Tunnacliffe Editor, Cambridge, 408 p.

Burt S., 2004. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods- A review. International Journal of Food Microbiology, 94: 223-253.

Campbell G., 2005. An economic history of imperial Madagascar, 1750-1895. Cambridge University Press, Cambridge, 413 p.

EL R., 1947. Commerce extérieur de Madagascar. M. de Copet (Éd.), Madagascar et Réunion, tome deuxième. Encyclopédie de l'Empire français, France, 101-114.

Chami F., Chami N., Bennis S., Bouchikhi T., Remmal A., 2005. Oregano and clove essential oils induce surface alteration of *Saccharomyces cerevisiae*, Phytotherapy Research, 19: 405 - 408.

Ciolina F., 1947. Le café. M. de Copet (Éd.), Madagascar et Réunion, tome premier. Encyclopédie de l'Empire français, France, 299-308.

Cornet A., 1974. Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar. Notice explicative 55, Office de la Recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM), France, 28 p. + appendices.

Dandoy G., 1973. Terroir et économie villageoise de la région de Vavatenina (Côte orientale malgache). In : G. Dandoy (Éd.), Atlas des structures agraires à Madagascar, Maison des Sciences de l'Homme et ORSTOM, France, 94 p.

Danthu P., Penote, Ranoarison K. M., Rakotondravelo J. C., Michel-Dounias I., Tiollier M., Michels T., Normand F., Razafimamonjison G., Fawbush F., Jahiel M., 2014. The clove tree of Madagascar: a success story with an unpredictable future, Bois et forêts des tropiques, 320, (2), 83 - 96.

DE HAUT DE SIGY G., 1968. Contribution à l'étude de la production de clous de girofle à Madagascar en rapport avec la pluviométrie. Institut de Recherches Agronomiques à Madagascar, Document n° 151, 11 p. + annexes.

DE NEMOURS C. P. (DUC), 1930. Madagascar et ses richesses. Collection Les Pays Modernes, Pierre Roger Éditeur, France, 294 p.

Decary E., 1937. Les débuts de la colonisation agricole à l'Ile de Sainte-Marie de Madagascar. Revue de Botanique appliquée et d'Agriculture coloniale, 17 : 610-618.

Donques G., 1975. Les cyclones tropicaux des mers malgaches. Mise au point. Madagascar, Revue de Géographie, 27 : 9-63.

Duault Y., 2008. Analyse financière et économique du programme d'intensification et de structuration des principales filières d'exportations. Rapport pour le Centre Technique Horticole de Tamatave, Tamatave, Madagascar, 134 p.

Dubois J., Ranaivosoa H., 1966. *Chrysopygus mabilianum* Viette, chenille mineuse du giroflier (Andretra). Biologie et lutte mécanique. L'Agronomie tropicale, 21 : 822-836.

Duclos T., 2012. Le girofle de Madagascar : l'exotisme par excellence ! Expression cosmétique, 13 : 208-213.

Dufournet R., 1968. Le giroflier et sa culture. Bulletin de Madagascar, 262 : 216-279.

Ebrahimi S.N., Hadian J., Mirjalili M.H., Sonboli A., Yousefzadi M., 2008. Essential oil composition and antibacterial activity of *Thymus caramanicus* at different phenological stages, Food Chemistry, 110: 927 - 931.

FAO, 2013. La crise du café et ses conséquences. [En ligne] <http://www.fao.org>. Accessed December 1 st, 2013.

FAOSTAT, 2013. Production. Trade. [On line] <http://faostat3.fao.org>. Accessed august 31 st, 2013.

Franchomme P., Jollois R., Pénol D., 2001. L'aromathérapie exactement. Éditions Roger Jollois, Limoges, 510 p.

François E., 1928. La culture du giroflier à Madagascar. Revue de Botanique appliquée et d'Agriculture coloniale, 8 : 693-696.

François E., 1934. Pour l'organisation de notre production de girofle et d'essence de girofle. Bulletin économique de Madagascar, août 1934, 732-736.

François E., 1936. Giroflier et girofle. Revue de Botanique appliquée et d'Agriculture coloniale, 16 : 589-608, 892-907.

François E., 1945. Le commerce extérieur de Madagascar en 1944. Revue de Madagascar, Numéro spécial, 26-30.



Frappa C., 1954. Sur la chenille de *Thyrididæ* du genre *Chrysotypus* nuisible au giroflier sur la côte est de Madagascar. Bulletin de Madagascar, 95 : 280-287.

Frère J., 1955. Le Girofle à Zanzibar. L'Agronomie tropicale, 10 : 485-498.

Fu Y. J., Zu Y. G., Chen L. Y., Shi X. G., Wang Z., Sun, S., Efferth T., 2007. Antimicrobial activity of clove and rosemary essential oils alone and in combination. Phytotherapy Research, 21: 989-994.

Gallieni J., 1908. Neuf ans à Madagascar. Librairie Hachette et Cie, France, 361 p.

Gatefossé J., 1921. Les végétaux aromatiques de Madagascar. L'Agronomie tropicale, 6 : 113-121.

Gopalakrishanan N., Narayanan C. S., 1988. Composition of clove leaf oil during leaf growth. Indian Perfumer, 32: 130-132.

Hanusz M., 2002. Kretek: the culture and heritage of Indonesia's clove cigarettes. Equinox Publishing (Asia), Jakarta, Indonésie, 220 p.

Heim R., Bouriquet G., 1937. La maladie de l'apoplexie du giroflier à Madagascar. Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie d'Agriculture de France, 23 : 25-29.

Heim R., Bouriquet G., 1939. Maladies et champignons du giroflier. Revue de Pathologie végétale et d'Entomologie agricole de France, 26 : 35 p.

JOURNAL OFFICIEL DE Madagascar ET DÉPENDANCES, 1930. Arrêté réglementant les conditions de circulation, de mise en vente et d'exportation de certains produits naturels de Madagascar et Dépendances. November 15th, 1930, 1016-1024.

Kim H.M., Lee E.H., Hong S.H., 1998. Effect of *Syzygium aromaticum* extract on immediate hypersensitivity in rats», Journal of Ethnopharmacology, 60: 125 - 131.

Kirkham M., 1928. Rapport sur l'industrie du girofle à Madagascar. Bulletin économique de Madagascar, 28: 76-80.

Lawrence S., Collin J., 2004. Competing with kreteks: transnational tobacco companies, globalisation, and Indonesia. Tobacco Control, 13 (Suppl. II): 96-103.

Ledreux A., 1928. Le giroflier dans les régions de Fénérive, Soanierana et Sainte-Marie. Bulletin économique de Madagascar, 1: 38-45.

Ledreux A., 1932. Le giroflier à Sainte-Marie et Madagascar. Bulletin mensuel de l'Institut National d'Agronomie Coloniale, 175/176 : 1-22, + appendices.

Leroy J. F., 1946. Le giroflier et les plantes à parfum. Revue internationale de Botanique Appliquée et d'Agriculture Tropicale, 26: 425-429.

Levasseur S., 2012. Analyse des systèmes agricoles à base de girofliers à Sainte-Marie, Madagascar : entre héritage colonial et innovations paysannes. Mémoire de fin d'étude, RESAD, Institut des Régions Chaudes, Montpellier, France, 74 p.

Locatelli B., 2000. Pression démographique et construction du paysage rural des tropiques humides : l'exemple de Mananara (Madagascar). Thèse de doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Montpellier, France, 441 p.

Maistre J., 1955. Le giroflier à Madagascar et Zanzibar. L'Agronomie tropicale, 10 : 413-448.

Maistre J., 1964. Le clou de Girofle. In : Les plantes à épices. G.-P. Maisonneuve, Larose Éditeur, France, 77-124.

Martin P. J., 1991. The Zanzibar clove industry. Economic Botany, 45: 450-459.

Michels T., Bisson A., Ralaivov V., Rabemananjara H., Jahiel M., Malézieux E., 2011. Horticultural agroforestry systems in the humid tropics: analysis of clove tree-based systems in Madagascar. Acta Horticulturae, 894: 161-168.

Parle M., Khanna D., 2011. Clove: a champion spice. International Journal of Research in Ayurveda & Pharmacy, 2: 47- 54.

MINAGRI (Ministère de l'Agriculture de Madagascar), 2011. Relance de la filière café à Madagascar. [En ligne] <http://www.agriculture.gov.mg>. Accessed October 17th, 2013.

MINISTÈRE DES COLONIES, 1917. Rapport sur la situation économique de la colonie de Madagascar et dépendances en 1915. Bulletin de l'office colonial, France, 657 p. [En ligne] <http://gallica.bnf.fr>.

Miyazawa M., Hisama M., 2001. Suppression of chemical mutagen induced SOS response by alkylphenols from clove (*Syzygium aromaticum*) in *Salmonella typhimurium*, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 49: 4019 - 4025.

Moreau S., 2013. Construction et déconstruction de patrimoines alimentaires à Madagascar: le cas du café. In : M.-C. Cormier-Salem, P. De Robert, D. Juhé-Beaulaton, B. Roussel (Éds.), Effervescence patrimoniale au Sud : entre nature et société. Éditions de l'IRD, Collection Latitudes 23, France, 313-335.

Nemeth E., Hethelyi E., Bernath J., 1994. Comparison studies on *Tanacetum vulgare* L. chemotypes, Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants, 2: 85 - 92.

Ogata M., Hoshi M., Urano S., Endo T., 2000. Antioxidant activity of eugenol and related monomeric and dimeric compounds», Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 48: 1467 - 1469.

P.P.R.R. (Programme de Promotion des Revenus Ruraux), 2013. [En ligne] <http://www.ppr.mg>. Accessed November 22nd, 2013.

Park I.K., Shin S.C., 2005. Fumigant activity of plant essential oils and components from garlic (*Allium sativum*) and clove bud (*Eugenia caryophyllata*) oils against the Japanese termite (*Reticulitermes speratus*), Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53: 4388 - 4392.

Pino J.A., Marbot R., Agüero J., Fuentes V., 2001. Essential oil from buds and leaves of clove (*Syzygium aromaticum* L. Merr. et Perry) Grown in Cuba, Journal of Essential Oil Research, 13: 278 - 279.

Prudhomme E., 1901. L'agriculture sur la côte Est de Madagascar. Comité de Madagascar, Tananarive, 118 p. + appendices.

Prudhomme E., 1909. Ressources agricoles de Madagascar. Bibliothèque d'Agriculture coloniale, Augustin Challamel Éditeur, France, 68 p.

Rabearimanana L., 1985. La politique économique coloniale sur la côte est (Madagascar) dans les années 1950. Omaly sy Anio, 21-22 : 307-337.

Rabehault H., 1955. Sur l'anatomie du giroflier (*Syzygium aromaticum* (L.) Merril et Perry). L'Agronomie Tropicale, 10 : 449-484.

Rahonintsoa E., 1978. Sainte-Marie de Madagascar : insularité et économie du girofle. Mémoire de maîtrise de géographie, Université d'Antananarivo, 166 p.

Rakotobe M., Menut C., Andrianoelisoa H.S., et al., 2008. The bark essential oil composition and chemotaxonomical appraisal of *Cedrelopsis grevei* H. Baillon from Madagascar, Natural Product Communications, 3: 1-6.

Ramalanjaona C., Jourdan E., 1961. L'essence de girofle de Madagascar. Technologie-Distillation-Emballage. Institut de Recherches Agronomiques à Madagascar, Tananarive, 66 p.

Ramanantsoavina G., 1971. Aperçu sur quelques produits agricoles malgaches (café, vanille, girofle, coton). Terre Malgache - Tany malagasy, 10 : 199-230.

Ramezani S., Rasouli F., Solaimani B., 2009. Changes in Essential Oil Content of coriander (*Coriandrum sativum* L.) aerial parts during four phenological stages in Iran, Journal of Essential Oil Bearing Plants, 12: 683-689.

Ramilison A., 1985. La production caféière à Madagascar. Omaly sy Anio, 21-22: 339-359.



Razafimamonjison G., Jahiel M., Ramanoelina P., Fawbush F., Danthu P., 2013. Effects of phonological stages on yield and composition of essential oil of *Syzygium aromaticum* buds from Madagascar. International Journal of Basics and Applied Sciences, 2: 312-318.

Razafimamonjison G., Jahiel M., Ramanoelina P., Fawbush F., Danthu P., 2014. Bud, leaf and stem essential oil composition of clove (*Syzygium aromaticum* L.) from Indonesia, Madagascar and Zanzibar, International Journal of Basics and Applied Sciences, 3: 224-233.

Razafimamonjison G., Boulanger R., Jahiel M., Ramanoelina P., Fawbush F., Lebrun M., Danthu P., 2016. Variations in yield and composition of leaf essential oil from *Syzygium aromaticum* at various phases of development, International Journal of Basics and Applied Sciences, 5, (1): 90-94.

Rollot C., 1923. Les productions agricoles de Madagascar. In: Madagascar économique - La foire commerciale de Tananarive. Les Impressions de l'Imerina, Tananarive, 143-182.

Ruff, 2000. L'avenir des cultures pérennes en Indonésie. Cacao et clou de girofle après la tempête monétaire. Tiers Monde, 41: 431-452.

Schweitzer C., Ranaivosoa L., 2007. Étude de marchés internationaux pour le piment et le girofle. Rapport final. Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche, Programme de Promotion des Revenus Ruraux (P.P.R.R.), Antananarivo, Madagascar, 118 p.

Shaaban H. E. A., El-Ghorab A. H., Shibamoto T., 2012. Bioactivity of essential oils and their volatile aroma components: Review. The Journal of Essential Oil Research, 24: 203-212.

Srivastava A. K., Srivastava S. K., Syamsundar K. V., 2005. Bud and leaf essential oil composition of *Syzygium aromaticum* from India and Madagascar. Flavour and Fragrance Journal, 20: 51-53.

Suresh P., Ingle V. K., Vijayalakshmi V., 1992. Antibacterial activity of eugenol in comparison with other antibiotics. Journal of Food Science and Technology, 29: 254-256.

Teuscher E., Anton R., Lobstein A., 2005. Girofle. In: Plantes aromatiques. Collection TEC & DOC, Éditions Lavoisier, Cachan, 266-272.

Thankamani C. K., Sivaraman K., Kandiannan K., Peter K. V., 1994. Agronomy of tree spices (Clove, nutmeg, cinnamon and allspice). A review. Journal of Spices and Aromatic Crops, 3: 105-123.

Torquebiau E. F., 2000. A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Vie/Life Sciences, 323 : 1009-1017.

Tourneur M., 1947a. Épices et aromates. M. de Coppet (Éd.), Madagascar et Réunion, tome premier. Encyclopédie de l'Empire français, France, 310-321.

Tourneur M., 1947b. Plantes à parfum. In: M. de Coppet (Éd.), Madagascar et Réunion, tome premier. Encyclopédie de l'Empire français, France, 322-327.

Tworkoski T., 2002. Herbicide effects of essential oils, Weed Science, 50: 425-431.

Vaxelaire D., 2013. Les chasseurs d'épices. Éditions Orphie, Chevagny-sur-Guye, 359 p.

Vernin G., Vernin E., Metzger J., Pujol L., Parkanyi C., 1994. GC/MS analysis of clove essential oils. In Spices Herbs and Edible Fungi, Charalambous G (ed.). Elsevier Science: Amsterdam, 483-500.

Zheng G.Q., Kenney P.M., Lam L.K.T., 1992. Sesquiterpenes from clove (*Eugenia caryophyllata*), Journal of Natural Products, 55: 999 - 1003.



(A) Pied de giroflier



(B) Feuilles de giroflier



(C) Clous de girofle



(D) Clous de girofle secs et frais

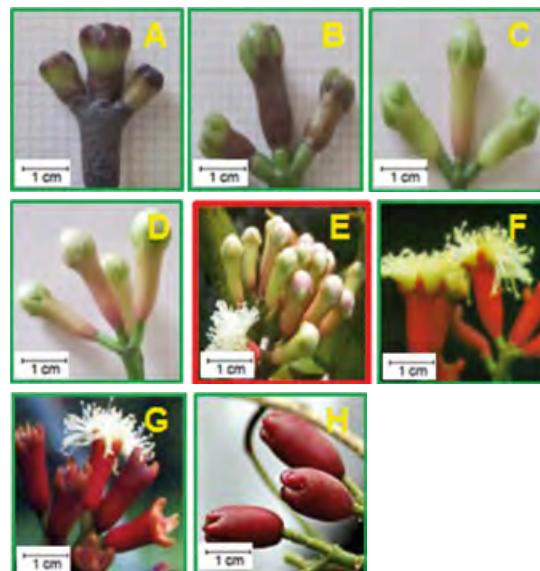


(E) *Chrysotypus mabilianum*

Photos 1 : Éléments de biologie du giroflier

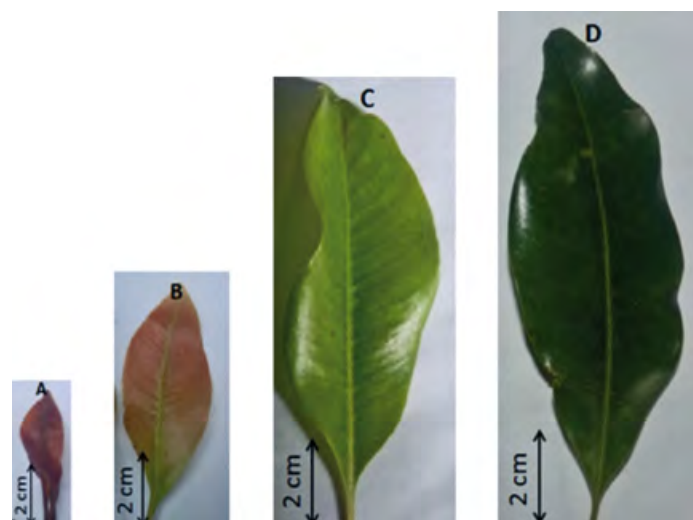


Photo 2 : Alambic de distillation



Photos 3 : Différents stades phénologiques du clou de girofle

A, B, C, D, E, F, G, H représentent respectivement le stade de bourgeon initial, le stade de bourgeon 1, le stade de bourgeon 2, le stade de bourgeon 3, le stade de bourgeon final, le stade de floraison, le stade de fructification initial et le stade de fructification final



Photos 4 : Quatre stades de développement de feuilles de girofle

A, B, C, D, représentent respectivement les jeunes feuilles, les feuilles en épanouissement au stade 1, les feuilles en épanouissement au stade 2 et les feuilles matures



(A) Alambic traditionnel d'extraction



(B) Foyer simple et rudimentaire



(C) Cuve ou cucurbitte d'alambic



(D) Etanchéité de la cuve avec le chapiteau



(E) Jonction entre le col de cygne et le condenseur



(F) Condenseur et réfrigérant



(G) Essencier en seau plastique



(H) Chargement de la cuve

Photos 5 : Alambic traditionnel et pratique actuelle de la distillation



(A) Foyer amélioré



(B) Cheminée munie d'un volet réglable



(C) Modification de l'ouverture de la cuve en « U »



(D) Grille perforée



(E) Orifice supérieur du chapiteau en « U »



(F) Condenseur modifié



(G) Réfrigérant à contre courant



(H) Système de cohobation

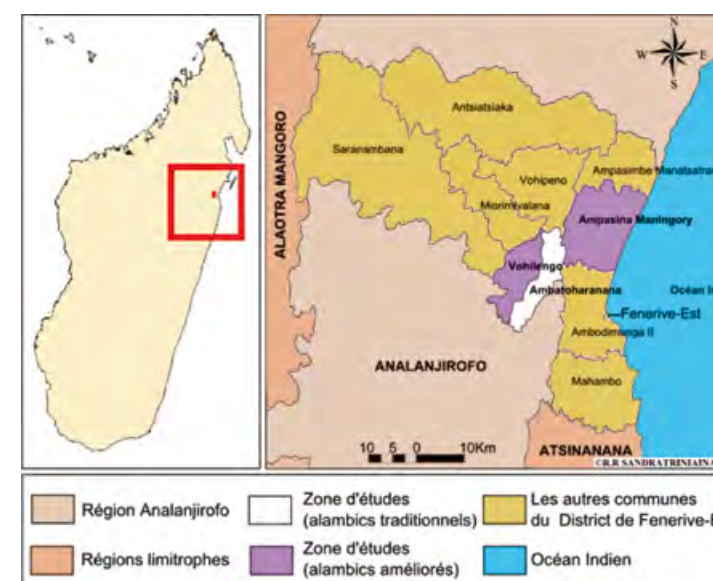


(I) Essenciers en aluminium

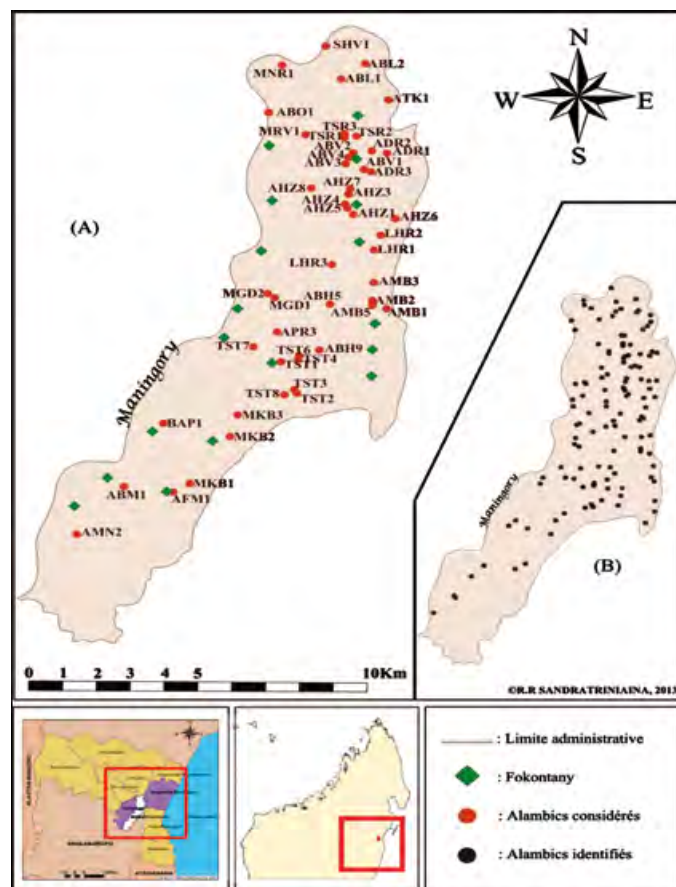
Photos 6 : Modifications et améliorations apportées sur l'alambic



Carte 1 : Répartition géographique du giroflier
(Source : Danthu et al., 2014)



Carte 2 : Localisation géographique du milieu d'études (Source : Sandratriniaina, 2013)



Cartes 3A et 3B : Cartographie des alambics dans la commune d'Ambatoharanana (Source Sandratriniana, 2013)

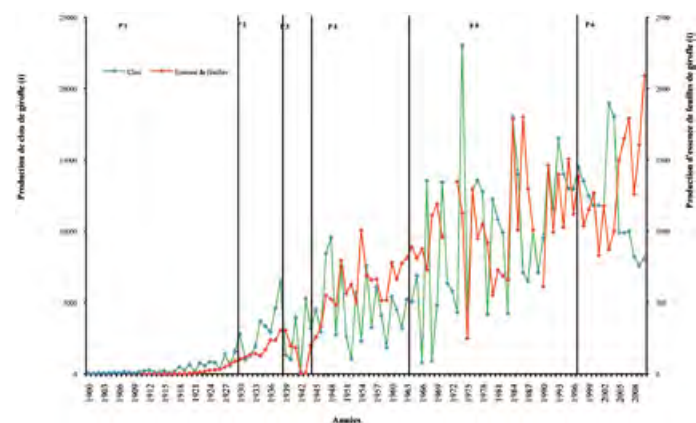


Figure 1 : Évolution de la production malgache de clous et d'essence de girofle (Source : Danthu et al., 2014)

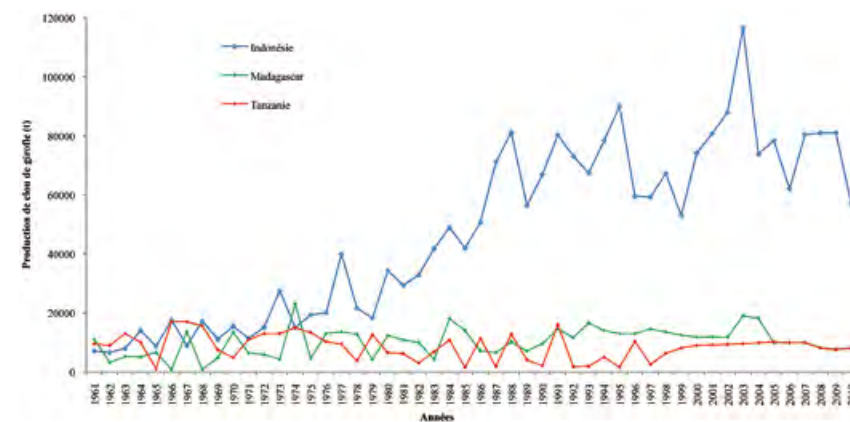


Figure 2 : La production de clou de l'Indonésie, Zanzibar et Madagascar (Source : Danthu et al., 2014)

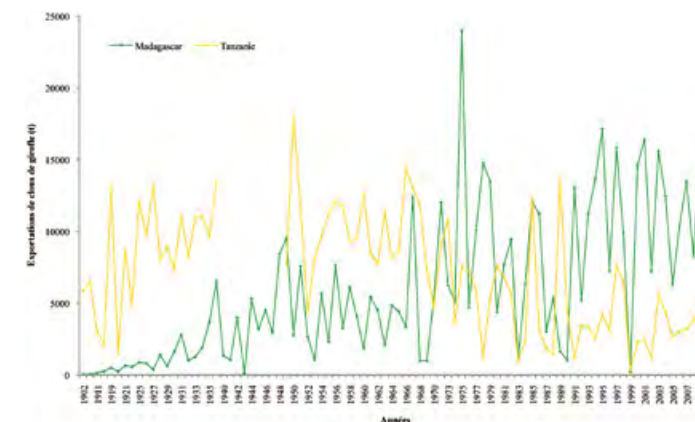
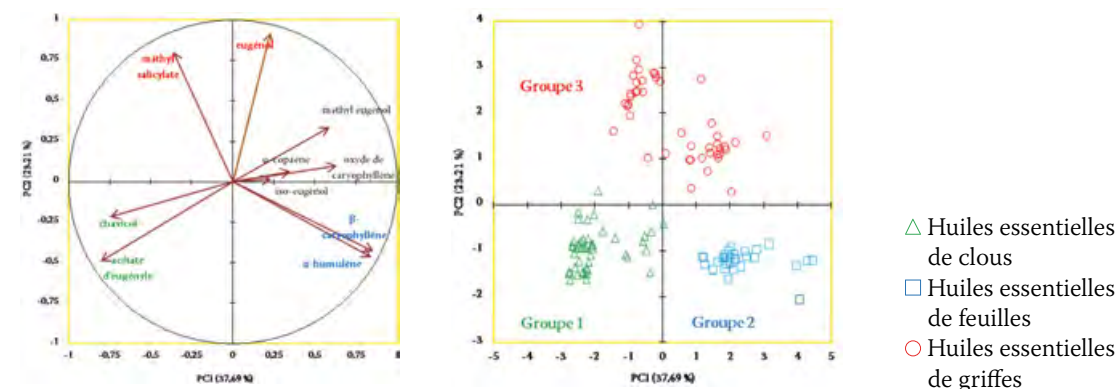
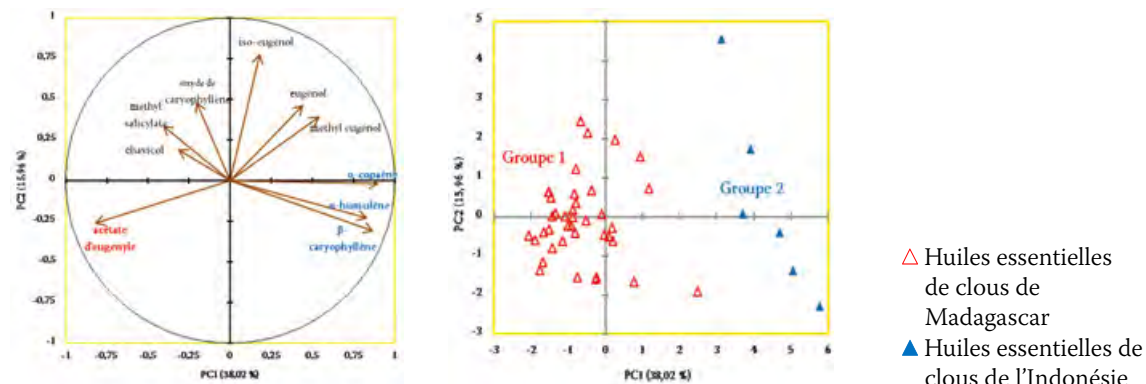


Figure 3 : Exportations de clou de girofle de Zanzibar et Madagascar (Source : Danthu et al., 2014)



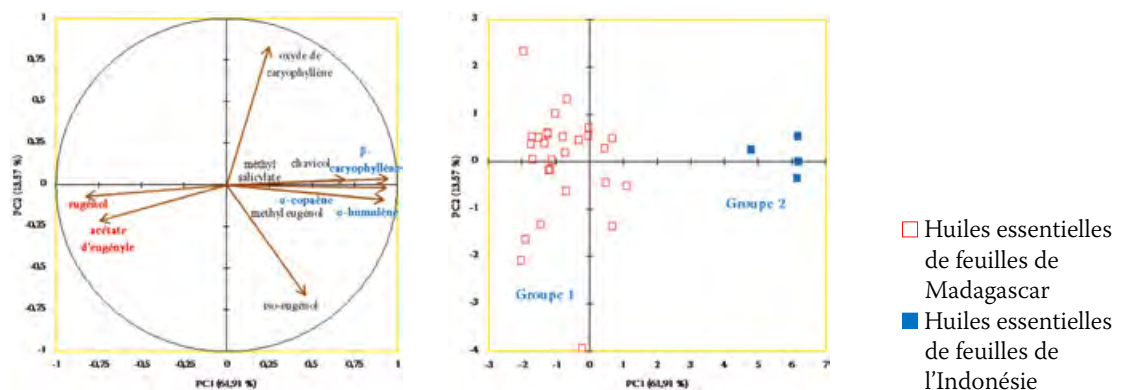
Cercle de corrélation des 10 variables Représentation graphique de la répartition des échantillons

Figure 4 : ACP effectuée sur 121 huiles essentielles et 10 variables prises en compte



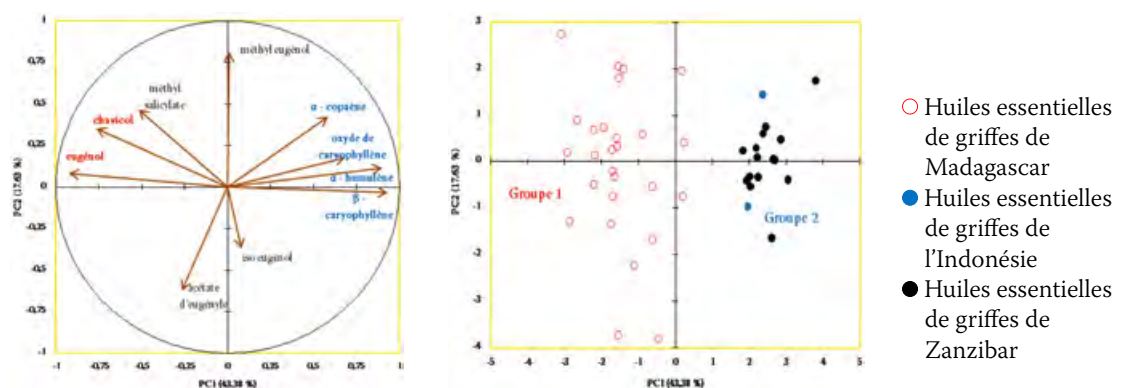
Cercle de corrélation des 10 variables Représentation graphique de la répartition des huiles essentielles de clous

Figure 5 : ACP effectuée sur 45 huiles essentielles de clous et 10 variables prises en compte



Cercle de corrélation des 10 variables Représentation graphique de la répartition des huiles essentielles de feuilles

Figure 6 : ACP effectuée sur 32 huiles essentielles de feuilles et 10 variables prises en compte



Cercle de corrélation des 10 variables Représentation graphique de la répartition des huiles essentielles de griffes

Figure 7 : ACP effectuée sur 44 huiles essentielles de griffes et 10 variables prises en compte

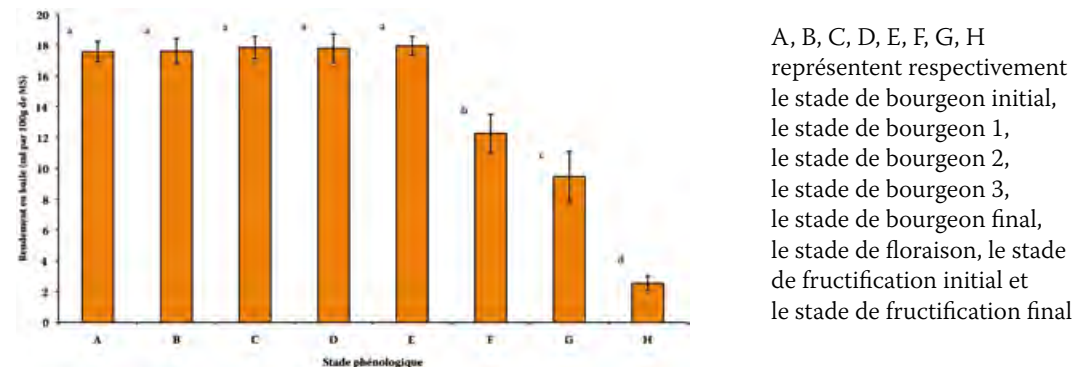
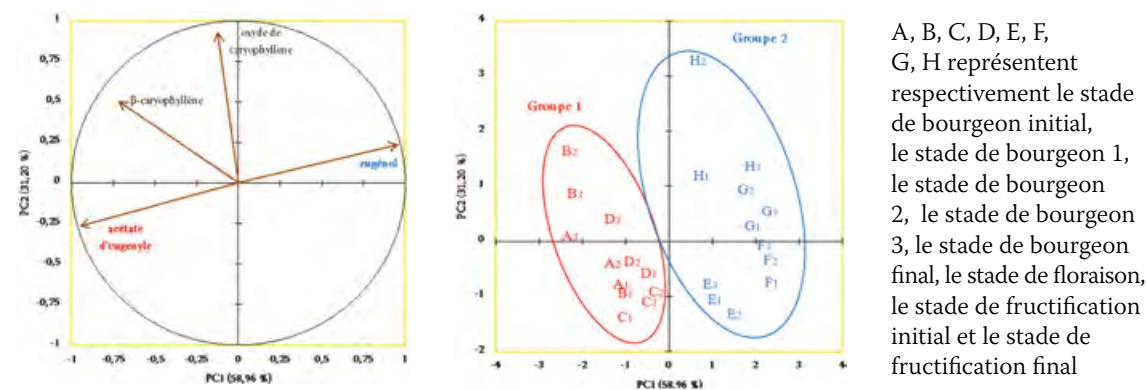


Figure 8 : Rendement en huile essentielle de clous de girofle suivant les huit stades phénologiques



Cercle de corrélation des 4 variables Représentation graphique de la répartition des huiles essentielles de clous

Figure 9 : ACP effectuée sur 24 huiles essentielles de clous et 4 variables prises en compte

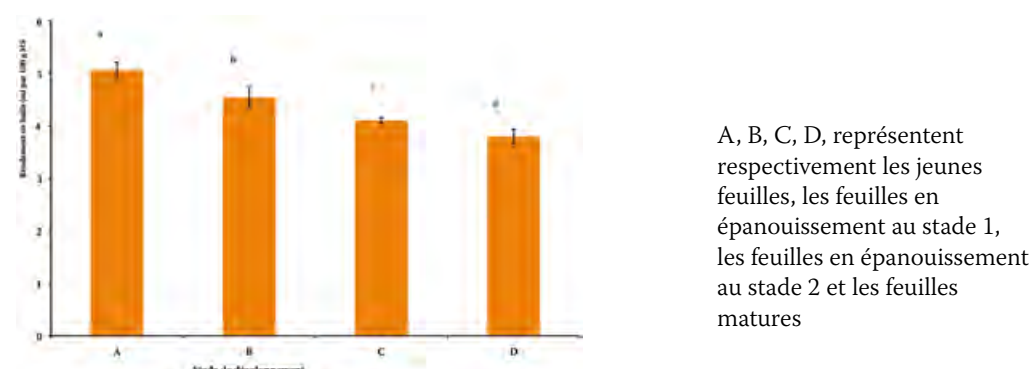
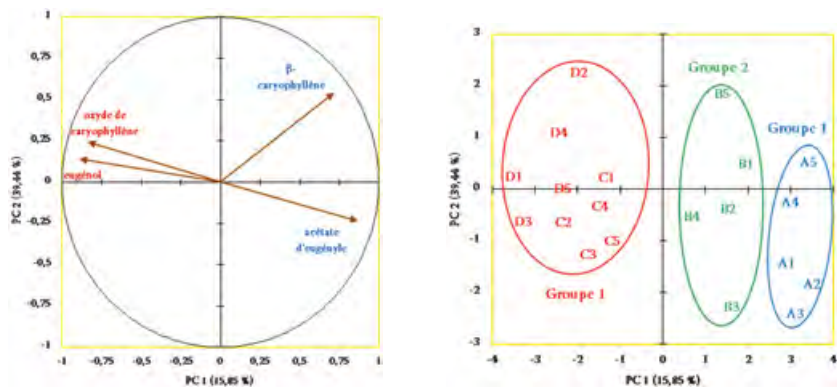


Figure 10 : Rendement en huile essentielle de feuilles de girofle suivant les quatre stades de développement



Cercle de corrélation des 4 variables

Représentation graphique de la répartition des huiles essentielles de feuilles

Figure 11 : ACP effectuée sur 20 huiles essentielles de feuilles et 4 variables prises en compte

A, B, C, D, représentent respectivement les jeunes feuilles, les feuilles en épanouissement au stade 1, les feuilles en épanouissement au stade 2 et les feuilles matures

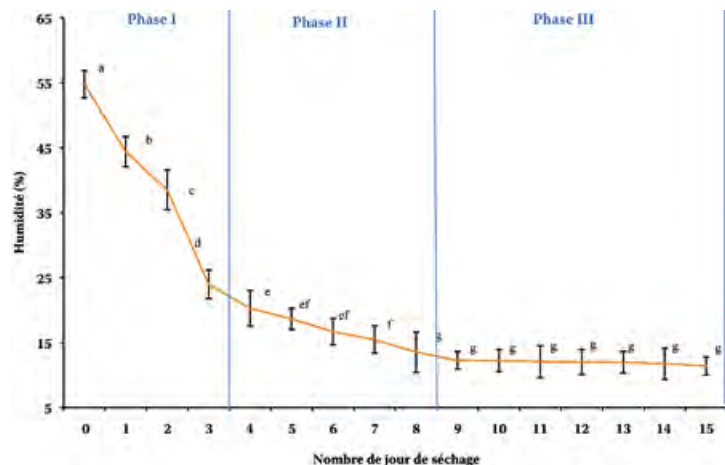


Figure 12 : Évolution de la teneur en eau des feuilles de giroflier au cours du séchage

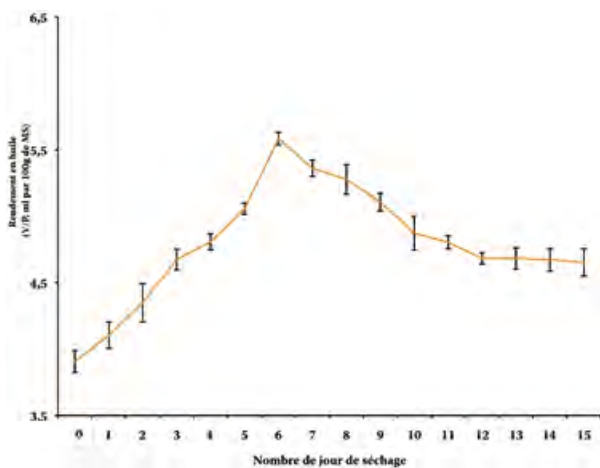


Figure 13 : Évolution des teneurs en huiles essentielles des feuilles de giroflier en fonction du séchage

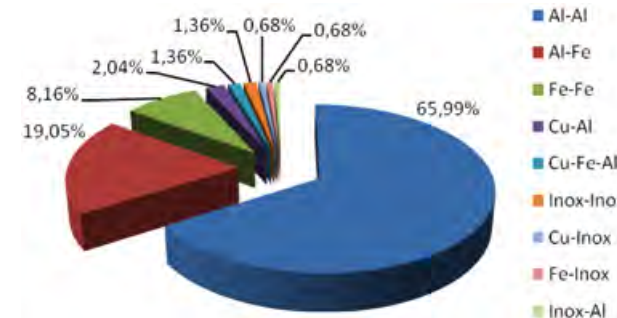


Figure 14 : Matériaux de fabrication des alambics

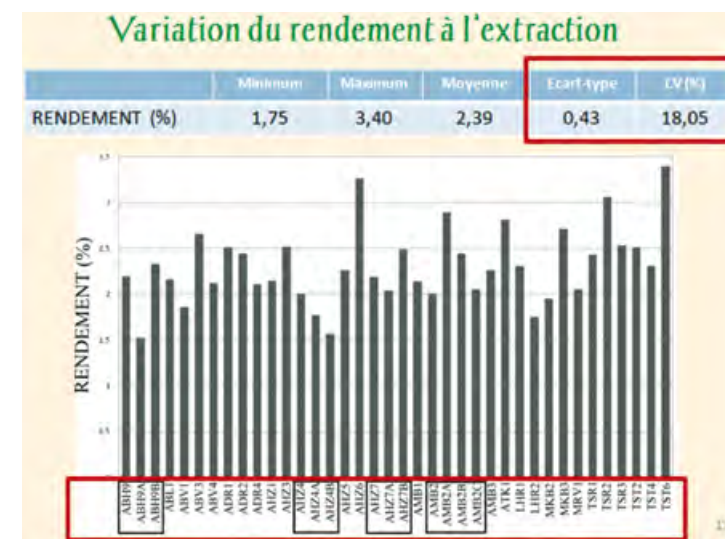
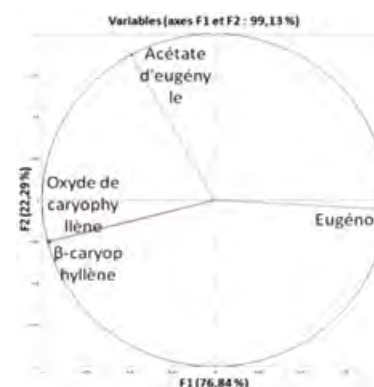
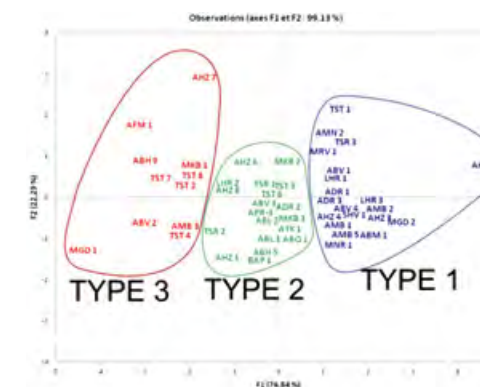


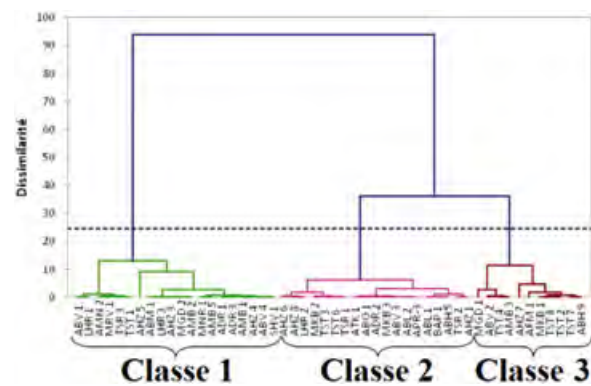
Figure 15 : Rendement en huile essentielle (Source Sandratriniana, 2013)



(A) Cercle de corrélation des variables



(B) Répartition des alambics selon la composition chimique



(C) Classification ascendante hiérarchique des trois types d'alambic

Figure 16 : ACP et CAH énoncent les trois types d'alambics correspondant à trois profils chimiques

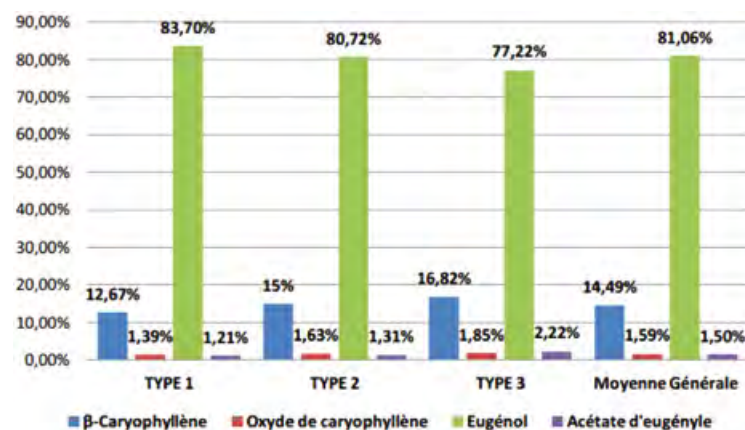


Figure n°17 : Pourcentage des différents éléments chimiques des échantillons issus de chaque type d'alambics

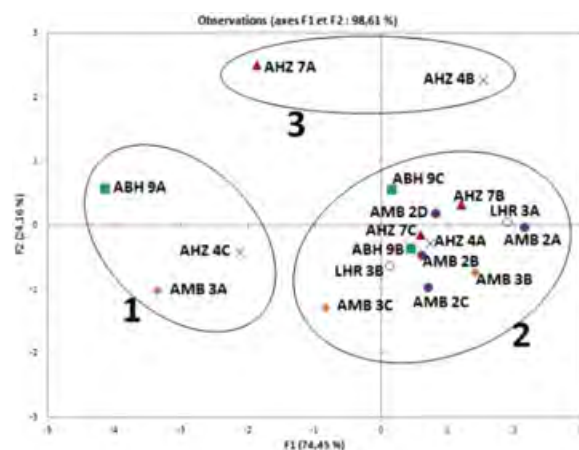
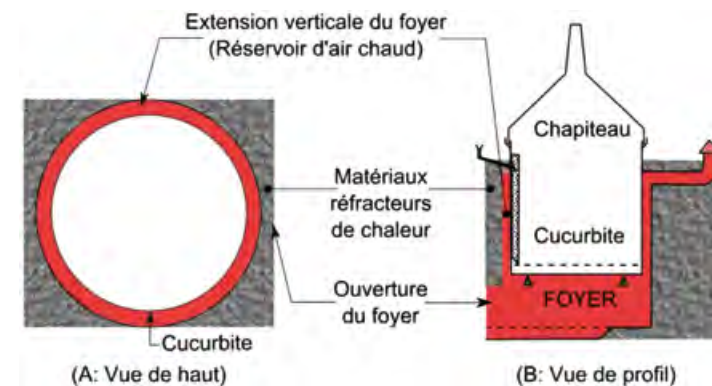
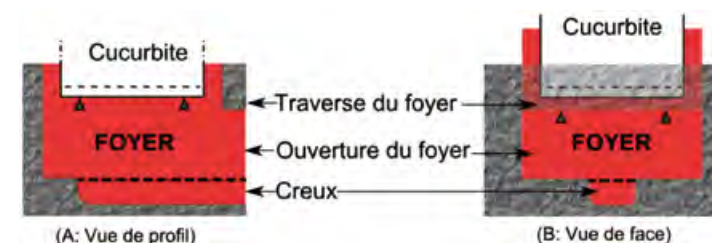


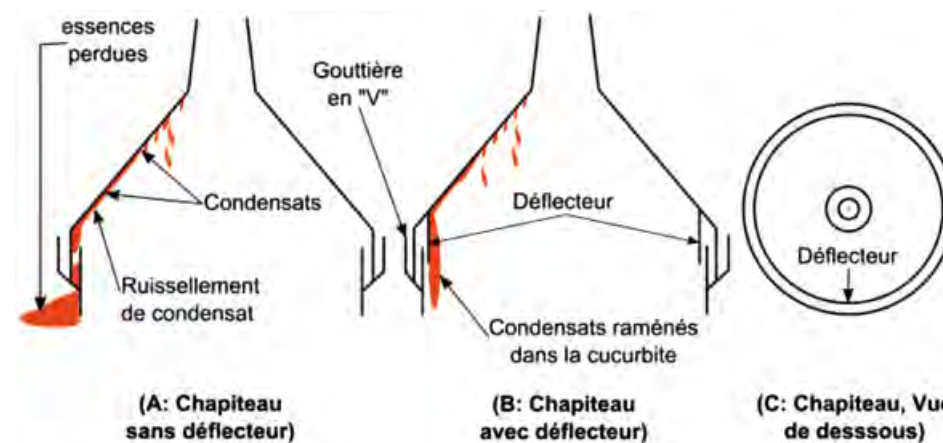
Figure 18 : Répartition des individus en 3 groupes



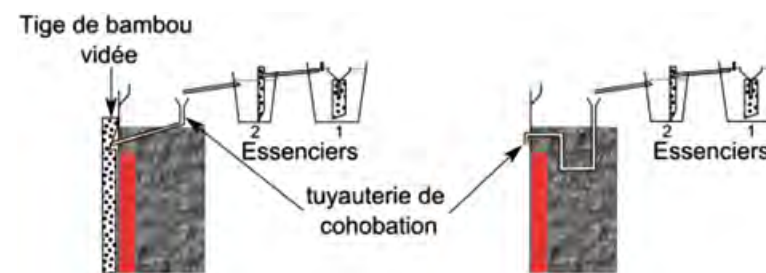
(A) Extension verticale du foyer



(B) Canal pour la circulation de l'air



(C) Déflecteur d'huile



(D) Système de cohobation

Figure 19 : Modifications et améliorations apportées sur l'alambic

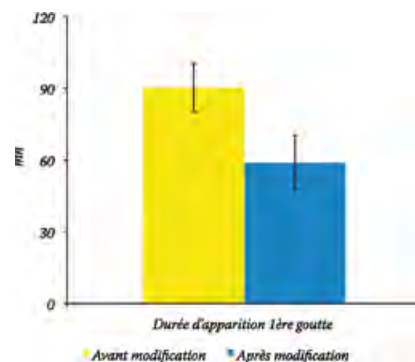
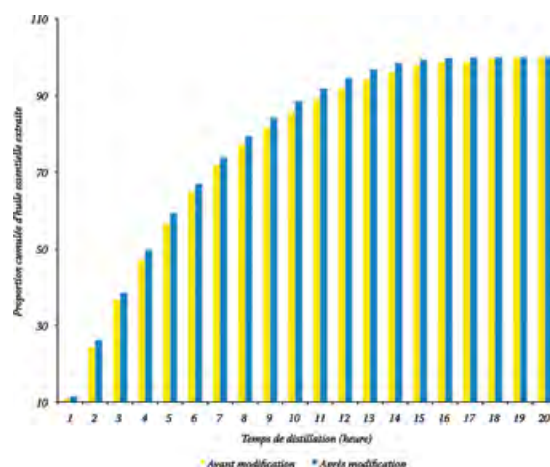
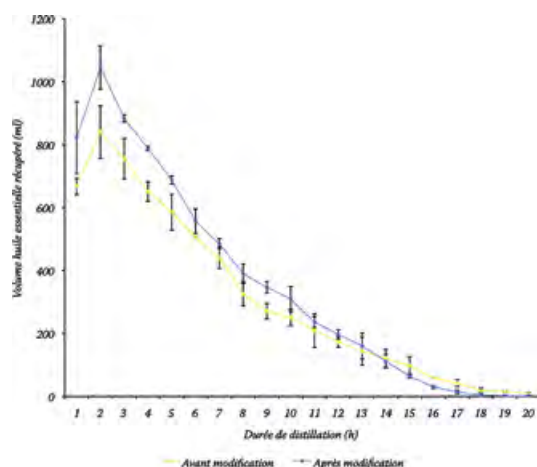


Figure 20 : Durée d'apparition de la première goutte de distillat



(A) Courbes de variation d'accélération de la vitesse d'extraction relative à l'alambic traditionnel et à l'alambic modifié

(B) Proportion cumulée d'huile essentielle extraite

Figure 21 : Cinétique de distillation

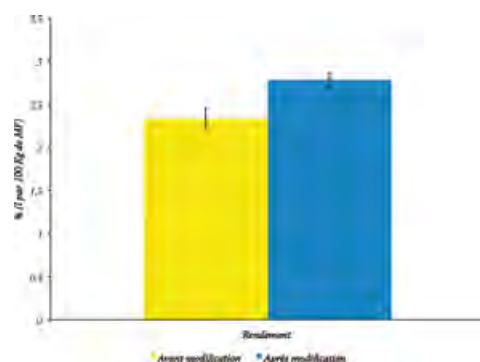


Figure 22 : Rendement total en huile essentielle après 15 heures de distillation

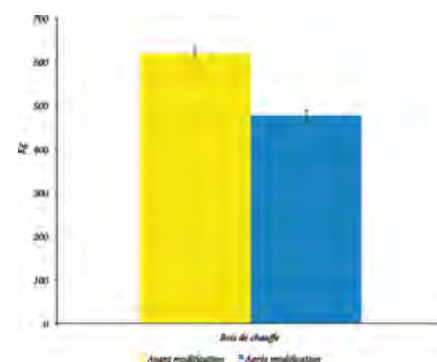


Figure 23 : Combustibles consommés

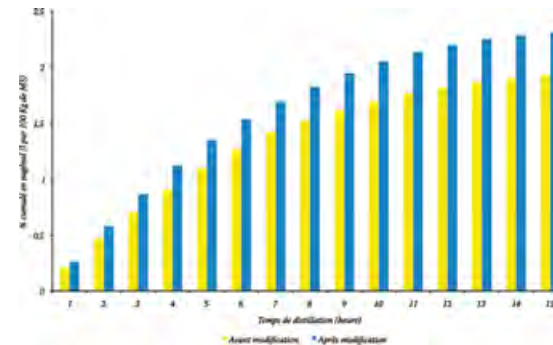
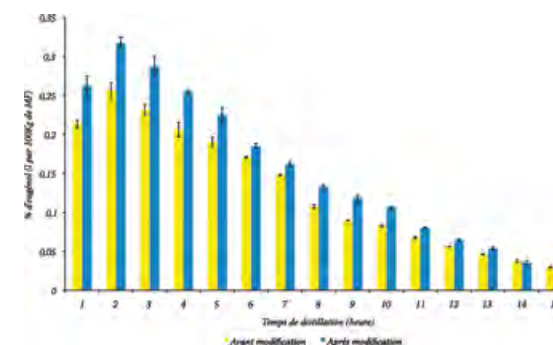


Figure 24 : Teneur et pourcentage cumulé en eugénol (l par 100 kg de MF)

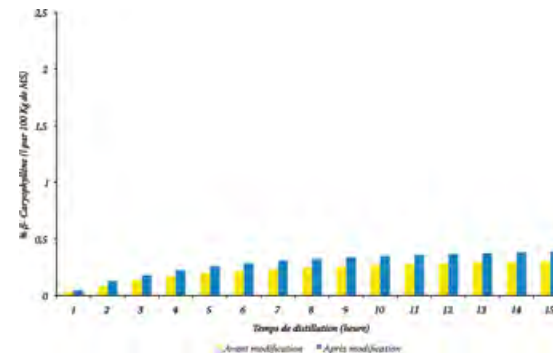
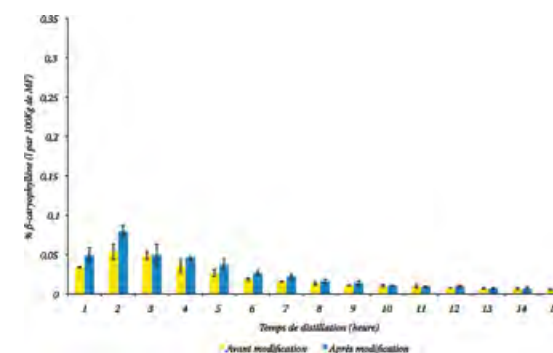


Figure 25 : Teneur en β -caryophyllène (l par 100 kg de MF)



Tableau 3 : Composition chimique (%) des huiles essentielles de clous, de feuilles et de griffes

IR	Constituant	Groupe 1 : Clou	Groupe 2 : Feuille	Groupe 3 : Griffes
1176	Méthyl Salicylate	0-0,32	trace	0-0,56
1241	Chavicol	0-0,24	0-0,13	0-0,22
1348	Eugénol	72,08-82,36	75,04-83,58	87,52-96,65
1375	α-copaène	0-0,27	0-0,24	0-0,27
1387	Méthyl eugénol	0-0,08	0-0,24	0-0,15
1420	β-caryophyllène	2,76-8,64	11,65-19,53	1,66-9,72
1453	Iso-eugénol	0-0,24	0-0,24	0-0,83
1465	α-humulène	0,34-1,04	1,38-2,17	0,22-1,31
1494	Acétate d'eugényle	8,61-21,32	0-1,45	0,07-2,53
1585	Oxyde de caryophyllène	0,06-0,37	0,05-0,55	0,14-0,68

Tableau 4 : Composition chimique (%) des huiles essentielles de feuilles de girofle de Madagascar et de l'Indonésie

IR	Constituant	Groupe 1 : Madagascar	Groupe 2 : Indonésie
1176	Méthyl salicylate	0-0,32	0,04-0,16
1241	Chavicol	0-0,24	0,13-0,18
1348	Eugénol	72,08-80,71	77,32-82,36
1375	α-copaène	0-0,11	0,17-0,27
1387	Méthyl eugénol	0-0,06	0,04-0,08
1420	β-caryophyllène	2,76-6,38	5,34-8,64
1453	Iso-Eugénol	0-0,20	0,02-0,24
1465	α-humulène	0,34-1,04	0,65-1,04
1494	Acétate D'eugenyle	11,68-21,32	8,61-10,55
1585	Oxyde De Caryophyllène	0,11-0,37	0,06-0,32

Tableau 5 : Composition chimique (%) des huiles essentielles de feuilles de girofle de Madagascar et de l'Indonésie

IR	Component	Groupe 1 : Madagascar	Groupe 2 : Indonésie
1176	Méthyl salicylate	trace	trace
1241	Chavicol	0-0,12	0,07-0,13
1348	Eugénol	80,87-83,58	75,04-77,54
1375	α-copaène	0-0,1	0,16-0,24
1387	Méthyl eugénol	0-0,1	0,15-0,24
1420	β-caryophyllène	11,65-15,02	17,04-19,53
1453	Iso-eugénol	0-0,24	0,08-0,13
1465	α-humulène	1,39-1,67	1,93-2,17
1494	Acétate d'eugényle	0,29-1,45	0-0,06
1585	Oxyde de caryophyllène	0,05-0,55	0,37-0,43

Tableau 6 : Composition chimique (%) des huiles essentielles de griffes de girofle de Madagascar, de l'Indonésie et de Zanzibar

IR	Component	Groupe 1 : Madagascar	Groupe 2 : Indonésie	Groupe 2 : Zanzibar
1176	Méthyl salicylate	0-0,56	0,06-0,20	0-0,27
1241	Chavicol	0-0,22	0	0
1348	Eugénol	91,81-96,65	88,76-89,28	87,52-89,47
1375	α-copaène	0-0,20	0,07-0,16	0-0,27
1387	Méthyl eugénol	0-0,15	0,03-0,11	0-0,15
1420	β-caryophyllène	1,66-4,48	7,40-7,75	7,19-9,70
1453	Iso-eugénol	0-0,80	0,01-0,03	0,01-0,10
1465	α-humulène	0,22-0,79	0,93-1,31	0,75-1,08
1494	Acétate d'eugényle	0,37-2,53	0,07-0,17	0,55-0,88
1585	Oxyde de caryophyllène	0,14-0,6	0,20-0,26	0,25-0,68

Tableau 8 : Composition chimique (%) des huiles essentielles de clous de girofle suivant les huit stades phénologiques

Constituant	RI	Groupe 1				Groupe 2			
		A	B	C	D	E	F	G	H
β-caryophyllène	1561	1,77±0,21	2,01±0,43	0,80±0,04	2,27±0,75	0,62±0,21	0,37±0,06	1,03±0,69	1,99±0,87
Oxyde de Caryophyllène	1993	0,48±0,12	0,74±0,63	0,27±0,13	0,25±0,15	0,06±0,03	0,27±0,09	0,60±0,19	1,01±0,61
Eugénol	2030	39,66±3,45	42,16±1,51	49,97±0,90	52,13±1,59	87,78±0,77	93,68±0,88	94,48±0,77	94,89±0,66
Acétate d'eugényle	2055	56,07±0,93	54,44±1,06	48,5±1,05	44,00±1,53	10,68±1,02	4,22±0,90	2,53±1,13	2,01±0,54

Tableau 10 : Composition chimique (%) des huiles essentielles de feuilles de girofle suivant les quatre stades de développement

Compounds	IR	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	
		A	B	C	D
β-caryophyllène	1561	5,64-6,97	5,66-8,63	5,21-5,70	4,63-6,42
Oxyde de caryophyllène	1993	0,06-0,15	0,03-0,08	0,06-0,10	0,13-0,24
Eugénol	2030	25,43-30,38	58,29-61,53	84,00-90,48	88,32-90,22
Acétate eugenyle	2055	61,44-65,52	26,67-32,65	0,96-7,16	0,36-1,64



Le Tsiperifery, poivre sauvage endémique de Madagascar, une richesse innovante dans la filière épice malgache

The Tsiperifery, endemic wild pepper from Madagascar, an innovative wealth in Madagascar's spice industry

H. ANDRIANOELISOA¹
H. RAZAFIMANDIMBY¹
J. M. LEONG PONG TSY²
J. R. RANDRIANAIVO³
H. RAKOTONDRAOELINA¹
N. MANJATO⁴
H. RAMBOLARIMANANA⁵

(1) Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA) Département de Recherches Forestières et de Gestion des Ressources Naturelles - Ambatobe - BP 1690 - Antananarivo 101 Madagascar

(2) Laboratoire Moléculaire et Biomoléculaire - DP F&B - Ambatobe Antananarivo 101 Madagascar

(3) Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA) Département de Recherches Technologiques - Ambatobe - BP 1690 Antananarivo 101 Madagascar

(4) Missouri Botanical Garden - 4344 Shaw boulevard - Saint Louis - MO 63110 (314) 577-5100

(5) Université d'Antananarivo ESSA IAA - BP 175 - Antananarivo 101 - Madagascar

Résumé

L'équipe de chercheurs multidisciplinaires du Dispositif de recherche et d'enseignement en partenariat Forêt et biodiversité (DP F&B) travaillant sur le poivre sauvage de Madagascar ou Tsiperifery, composée d'écologistes, de généticiens, de taxonomistes, de chimistes et de chercheurs spécialisés en technologie post-récolte, a réalisé un projet de recherche intitulé INNOVEPICE pour promouvoir la filière épice et valoriser les plantes endémiques ou introduites à Madagascar. Le Tsiperifery, désignant la liane sauvage aromatique et les fruits qu'elle produit présente de sérieux problèmes : la rareté des pieds en forêt due à son exploitation destructive et la dégradation de la qualité des épices mises sur le marché. La qualité de cette épice phare d'intérêt confirmé sur le marché international nécessite une amélioration.



Des résultats saillants sont obtenus permettant de (i) classer le Tsiperifery en 4 morphotypes codés M1, M2, M3 et M4 sur tout site d'étude confondu, (ii) mettre en évidence que ces 4 morphotypes de Tsiperifery forment un seul groupe distinct des *Piper* africains et de *P. borbonense* de la Réunion, affirmant l'endémicité de Tsiperifery, (iii) regrouper les fruits dans 3 classes chimiques distinctes quel que soit les traitements subis par les fruits. Les fruits murs séchés (< 13 % d'humidité) et stockés hermétiquement dans du sachet plastique préservent leur couleur rouge sans altérer leur qualité chimique (pipérine, huiles essentielles). Des techniques de bouturage sont découvertes par un opérateur privé, d'où l'existence d'une alternative à la cueillette destructive, d'un mode de collecte de fruits homogènes. Des descripteurs de qualité sont ainsi mis en évidence.

Mots clés : Tsiperifery, endémicité, poivre sauvage, épice, morphotype, huiles essentielles, Madagascar.

Abstract

The multidisciplinary researchers team of DP F & B working on the wild pepper from Madagascar or Tsiperifery, composed of environmentalists geneticists, taxonomists, chemists and researchers specialized in post harvest technology conducted a research project entitled INNOVEPICE to promote the spice industry and value endemic or introduced plants in Madagascar. The Tsiperifery designating the aromatic wild liana and the fruits it produces present serious problems: the scarcity of feet in the forest due to its destructive exploitation and the degradation of the quality of spices placed on the market. The quality of this spice flagship of interest confirm on the international market requires improvement. Encouraging results are obtained for (i) classify Tsiperifery to 4 morphotypes coded M1, M2, M3 and M4 on all of combined study sites (ii) to evidence that these four morphotypes of Tsiperifery form a single group distinct from African *Piper* and *P. borbonense* Reunion, claiming endemism of Tsiperifery, (iii) consolidate the fruits in 3 distinct chemical classes regardless of the treatment submitted the fruit. The dried mature fruits (< 13 % humidity) and stored tightly in plastic bag maintain their red color without altering their chemical quality (piperine, essential oils). The techniques of cuttings discovered by a private operator is encouraging hence the existence of an alternative to the destructive picking a fashion collection of fruits homogeneous. Quality descriptors are thus highlighted.

Key words : Tsiperifery, wild pepper, endemism, spice, morphotype, essential oils, Madagascar.

Problématique

Le Tsiperifery est une liane dont les graines sont rouges à maturité. Elles sont utilisées par les Malgaches comme épice et à des fins médicinales. Découvert en 2004 par un gastronome reconnu mondialement comme spécialiste des poivres, il est resté jusqu'en 2009 un produit extrêmement confidentiel, réservé à la haute gastronomie internationale de par ses caractéristiques organoleptiques que des experts en gastronomie qualifient d'unique.

Le Tsiperifery est devenu un produit à très fort potentiel commercial, largement diffusé dans les épiceries fines occidentales. En 2012, 350 tonnes de fruits frais ont été collectés dans les principaux bassins d'exploitation.

Néanmoins, les prix offerts par les négociants ont abouti non seulement à la mise en place de plusieurs filières nationales, mais aussi à une exploitation anarchique mettant en danger la survie de ce produit forestier.

En 2010, les régions d'Anjozorobe, de Moramanga et de Fianarantsoa ont exporté respectivement 200, 90 et 20 t de fruits frais. Les exportateurs de renommée ont remarqué un recul inquiétant de l'approvisionnement en 2012 (Touati, 2012).

Deux filières sont actuellement connues :

- Une filière nationale dont le prix du Tsiperifery à la cueillette se chiffre à 800 à 2 300 Ar le kg frais pour être vendu à 1 500 à 2 300 Ar le kg frais sur les marchés urbains et à 30 000 à 120 000 Ar le kg sec dans les épiceries fines ;
- Une filière internationale dont le prix du Tsiperifery à la cueillette se chiffre de 800 à 2 300 Ar le kg frais pour être vendu de 50 000 à 100 000 Ar (15 à 30 euros) le kg aux exportateurs, et de 80 à 400 euros le kg sec dans les épiceries fines sur le marché international, (Touati, 2012). De nos jours, le prix du kilo de Tsiperifery dans les épiceries fines a régressé (autour de 180 euros le kg).

Objectifs

Le Tsiperifery est peu connu scientifiquement et les publications scientifiques sont rares. Une équipe de chercheurs multidisciplinaires du Dispositif de recherche et d'enseignement en Partenariat « Forêt et Biodiversité » (DP F&B) s'est constituée en regroupant différents chercheurs de spécialités différentes : généticiens, chimistes, taxonomistes, écologistes et chercheurs spécialisés en technologies post-récolte. Elle a travaillé sur le programme de recherche « Développement de bases scientifiques pour la gestion et la valorisation durable du Tsiperifery à Madagascar » dans le cadre du collectif PARRUR INNOVEPICE. L'ambition est de contribuer à la promotion de la filière Epices dans l'optique de valoriser des plantes endémiques ou introduites à Madagascar comme le Tsiperifery.

Les travaux menés visent à déterminer les descripteurs de qualité du Poivre à queue Sauvage de Madagascar ou Tsiperifery dans le but de sélectionner les espèces à domestiquer.

Des disciplines aussi diverses que la génétique, l'écologie, la chimie, la technologie post-récolte concourent à l'atteinte de cet objectif. Leurs travaux, complémentaires et interdépendants, concilient la conservation et la valorisation ainsi que les aspects liés à l'écologie et l'économie des produits.

Approche méthodologique

Les zones d'études sont communes aux membres de l'équipe. Il s'agit d'Anosibe Analala, Beforona dans la région d'Alaotra Mangoro, et Kianjavato dans la région de Vatovavy Fitovinany. Dans la mesure du possible, l'équipe travaille également sur les mêmes pieds afin d'avoir accès à la variabilité mentionnée dans les travaux antérieurs d'étudiants, tant sur les plans morphologiques, génétiques que chimiques. Les échantillons étudiés par chaque discipline ont été collectés pied par pied lors des investigations menées par l'équipe (herbiers, feuilles, fruits et autres organes).



Avant de présenter les multiples travaux réalisés, il importe de préciser la notion de qualité des produits agroalimentaires que l'équipe INNOVEPICE Tsiperifery essaie d'acquérir pour cette épice.

QUELQUES NOTIONS DE QUALITÉ DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES

Suivant la norme ISO 8402, la qualité est l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés (organoleptiques) ou implicites (par exemple salubrité). Elle est définie dans le domaine de l'agroalimentaire par les 4 S : Satisfaction, Sécurité, Service, Santé, auxquels il convient de rajouter le R de Régularité (Combenegre, 1995). En 2005, la norme ISO 9000 l'a définie comme « *l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences* » (Gloanec *et al.*, 2010).

Auparavant, la qualité était définie par l'absence de défaut, de fraude et/ou de falsification. Par la suite, elle s'est basée sur des propriétés intéressant les consommateurs telles que les caractéristiques organoleptiques, nutritionnelles et la valeur d'usage.

Actuellement, elle désigne des caractéristiques recherchées susceptibles de donner droit à une plus-value, comme les modes de production (agriculture biologique...), les zones de production (territoire d'origine...) et les traditions dont elles sont porteuses (Gloanec *et al.*, 2010).

D'une manière générale, la qualité est une condition nécessaire de la réussite commerciale d'un produit qui permet à ce dernier d'être compétitif, vendable et surtout d'être prisé par le consommateur (Arthaud, 1994).

Le rapport qualité/prix est un des paramètres influençant la compétitivité d'un produit. La maîtrise de la qualité et des coûts est la clef nécessaire à la survie de l'entreprise (Arthaud, 1994).

Déterminants de la qualité d'un produit

La qualité d'usage ou de service d'un produit

Elle est liée à l'aptitude à la conservation, à la commodité d'emploi du produit, à l'aspect économique, commercial et réglementaire ainsi qu'à la présentation du produit ou conditionnement.

Elle a pour rôle de séduire les consommateurs par des aspects visuels d'où l'adage « le consommateur achète avec les yeux » (CTIFL, 2000).

La qualité nutritionnelle.

Elle est basée sur la connaissance du contenu physico-chimique des aliments pour déterminer l'aspect qualitatif et quantitatif (Arthaud, 1994).

La qualité sanitaire ou hygiénique ou salubrité.

Elle est déterminée à partir d'un contrôle microbiologique, toxicologique et éco toxicologique (Arthaud, 1994).

La qualité sensorielle ou organoleptique ou hédonique.

Elle peut être soit purement sensorielle telle que la sensation gustative, olfactive, tactile, visuelle et auditive ou psychologique lié à l'emballage et à la situation euphorisante (Arthaud, 1994).

Norme de qualité d'une épice

La norme de qualité d'un produit définit ses spécifications en matière de propriétés physiques, chimiques et organoleptiques. Elles sont déterminées par les comités techniques de l'ISO (AFNOR, 1999) et sont relatives aux :

- Caractéristiques organoleptiques par sa couleur, son odeur et sa saveur ;
- Caractéristiques botaniques par son nom français (ou étranger) et son nom latin, la nature de l'organe végétal employé (feuilles, racines) et les caractères macro et microscopiques ;
- Propriétés physico-chimiques à travers sa teneur en impuretés, en constituants dangereux, en humidité et en résidus de pesticides ;
- Propriétés bactériologiques à travers la nature des germes pathogènes l'infestant (Salmonelle, *Escherichia coli*, Staphylocoque doré...), son taux d'infestation et l'intensité de l'infection fongique (levures ou moisissures) (Rouzet *et al.*, 1990).

Contrôle de qualité

Le contrôle de qualité des épices consiste à la détermination de sa composition chimique. Cette dernière devrait être constante pour garantir la même capacité aromatisante et son innocuité aux doses normales d'emploi.

D'une manière générale, la qualité est traduite par les caractéristiques organoleptiques, physiques, chimiques et bactériologiques.

Le contrôle de la qualité des matières premières reçues est important puisqu'une large gamme de produits provenant de différentes origines inonde les marchés. Les différents fournisseurs doivent être suffisamment compétitifs afin de satisfaire les consommateurs qui sont de plus en plus exigeants sur l'origine et la qualité des produits qu'ils consomment.

Le contrôle s'effectue lors des transactions commerciales ou de l'utilisation industrielle par l'analyse et l'examen d'un échantillon du produit (Rouzet *et al.*, 1990). Il en est de même pour les importateurs qui sont responsables des produits qu'ils lancent sur le marché (Zafimahery, 2006).

Signe de qualité

Les signes de qualité consistent à viser aussi bien une meilleure valorisation de la production commercialisée par les professionnels qu'une identification claire des produits de qualité, en vue de faciliter le choix des consommateurs (Vernin, 1995).

Selon le Ministère français de l'Agriculture et de la Pêche chargé de la consommation, quatre signes garantissent la reconnaissance de qualité : les labels, la certification de conformité, l'agriculture biologique, l'appellation d'origine contrôlée.

DÉFINITION DU TERME ÉPICE

Le terme épice désigne les substances aromatiques végétales utilisées pour l'assaisonnement des mets. Le nom générique d'épices désigne également, les substances végétales, d'origine indigène ou exotique, aromatiques ou de saveur chaude, piquante, utilisées pour rehausser les goûts des aliments.



Le terme épice s'applique aussi aux produits naturels végétaux ou à leurs mélanges, sans autre matière étrangère, qui sont utilisés, soit sous forme entière soit en poudre, pour assaisonner les aliments en vue de donner de la saveur et de l'arôme et (Borget, 1991).

Classification des épices

D'après HEATH, spécialiste anglais des épices et des aromates, le critère de classification est basé à la fois sur la flaveur et sur les caractéristiques botaniques.

ÉTAT DES LIEUX DU TSIPERIFERY, POIVRE SAUVAGE ENDÉMIQUE DE Madagascar AU SEIN DE LA FILIÈRE ÉPICE MALGACHE

Le Tsiperifery ou poivre sauvage endémique de Madagascar est devenu de nos jours un produit à forte valeur commerciale au sein de la filière épice malgache. Ce produit connaît désormais une grande percée sur le marché international mais il risque pourtant de mettre en péril cette filière si l'on n'arrive pas à résoudre les problèmes de variabilité de la qualité et du stock disponible pour l'exportation de cette ressource. En effet, cette richesse menacée d'extinction est devenue d'une rareté frappante.

Par ailleurs, la qualité des produits livrés par les collecteurs laisse à désirer. De même les poivres secs traités et stockés par les exportateurs présentent parfois de moisissures. Or, le monde des affaires exige un rapport qualité/prix irréprochable et une stabilité constante des stocks d'un produit pour garantir la prospérité d'une entreprise.

En outre, le sort des paysans qui endurent les durs labeurs dans la cueillette, le prétraitement et l'acheminement du produit sur le marché est désormais incertain. Ils sont d'ailleurs les moins rémunérés de tous les acteurs de la filière.

A l'exception de rares et récents travaux d'étudiants, les publications scientifiques sur le Tsiperifery sont pratiquement inexistantes. Conscients de ces problématiques et pour pallier à cette défaillance d'études scientifiques, le collectif INNOVEPICE a mené des travaux scientifiques jamais entrepris sur ce poivre sauvage afin de répondre aux différentes interrogations qui se rapportent aux domaines suivants :

- **Écologique** qui consiste à l'étude de la biologie de l'espèce (écologie, phénologie, mode de régénération) et de l'impact des modes d'exploitation et des perturbations de son habitat, sur la ressource ;
- **Génétique** qui vise à déterminer une éventuelle classification de la plante en fonction de sa diversité morphologique, d'une part et à évaluer par séquençage la relation éventuelle de ces morphologies différentes avec le génome, d'autre part ;
- **Chimique** qui consiste à étudier la variabilité biochimique des poivres et de leur composition chimique dans le but d'identifier les composantes déterminant leur goût et leur flaveur. Elle tente également de comprendre la variation de ces déterminants (goût et flaveur) en fonction des facteurs tels que la taxonomie, l'effet terroir, la date et mode de récolte ainsi que le traitement post récolte ;
- **Post-Récolte** dont l'objectif est de déterminer les meilleures méthodes de transformation et de conservation du Tsiperifery pour l'obtention de produits de qualité.

Ces travaux scientifiques ont pour objet de créer les connaissances nécessaires en vue d'assurer la gestion durable de la ressource et d'améliorer la valorisation de ses produits (fruits ou huiles essentielles).

CLASSIFICATION DU TSIPERIFERY

Tsiperifery, appelé parfois Voatsiperifery, appartient au genre *Piper* de la famille des Piperacées au même titre que le poivre noir (*P. nigrum*). C'est un petit poivre sauvage à queue dont le grain n'est pas plus gros qu'un tête d'épingle (Figure 1).

Les espèces du genre *Piper* présentent différents types de port : herbacé, liane, arbuste ou arbre. Le genre est facilement reconnaissable par des tiges formées par des nœuds, des feuilles alternes et des ramifications apparaissant au niveau des nœuds, une inflorescence en épi cylindrique opposée à la feuille (sauf pour *P. umbellatum*).

Le genre *Piper* regroupe 2000 espèces connues dont 545 espèces seulement sont décrites (Jaramillo *et al.*, 2001). Cette grande proportion d'espèces non décrites (4/5) reflète une lacune importante en terme d'identification des espèces de *Piper* au niveau mondial. Le genre *Piper* est classé parmi les genres complexes en taxonomie, en raison d'une grande variabilité au niveau des feuilles et de la taille des fleurs (Ravindran *et al.*, 1992).

Description du Tsiperifery

La plante est une liane grimpant jusqu'à plus de 12 m sur un tuteur (Figure 1A). Elle grimpe en adhérant au support par des racines crampons naissant à la base des nœuds. L'existence de dimorphisme foliaire permet de différencier les individus adultes des jeunes. Les jeunes plantes n'ayant pas encore de rameaux portent uniquement des feuilles cordiformes, tandis que les individus pourvus de rameaux portent des feuilles oblongues.

La plante est dioïque : les fleurs mâles et les fleurs femelles sont donc portées par des pieds différents. Les inflorescences sont en épis solitaires de couleur blanchâtre et opposées aux feuilles. Les inflorescences femelles donnent les fruits en stipe. Par conséquent, seuls les pieds femelles sont ciblés par l'exploitation.

Les fruits sont des petites baies rouges orangées à maturité qui conservent leurs pédicelles en séchant. Ce qui fait que Tsiperifery est parfois appelé « poivre sauvage à queue de Madagascar » et est confondu avec *Piper borbonense* qui est le poivre sauvage à queue de la Réunion.

Le Tsiperifery est en général en floraison et en fructification pendant toute l'année, mais ceci dépend de l'espèce (d'après le rapport de Missouri Botanical Garden « MBG » rapporté par Manjato *et al.*, 2009). La difficulté d'accès aux fruits explique la cueillette anarchique et destructive, par arrachage des lianes ou abattage des tuteurs (Razafimandimby, 2011). Ce mode de récolte inconsidérée présente une grande menace de disparition pour cette ressource si aucune mesure ne sera prise.

Initialement, Tsiperifery désigne le nom vernaculaire des poivres sauvages de Madagascar sur les hautes terres malgaches. Cette dénomination a été retenue pour son appellation commerciale. En fait, les fiches botaniques des spécimens des herbaria nationales (TEF et TAN) renseignent sur d'autres appellations locales. Ces dernières varient d'une région à une autre comme Sakaiala ou Tsimahalatsaka dans la partie Est de l'île et Vahibe dans le Sud Est.



Récemment apparu sur le marché international, il séduit déjà les piperomanes et le monde de la restauration par sa fraîcheur, son piquant et sa belle touche citronnée (www.academiedespoivres.com). Ce poivre est d'une spécificité exceptionnelle. Il fait partie des poivres « confidentiels », haut de gamme, identifié par son originalité (Gloane *et al.*, 2010), mais quoique sauvage, il n'est pas classé comme produit forestier non ligneux à l'exportation. Il est exporté en tant que produit agricole.

Le Tsiperifery est également utilisé dans le domaine de la médecine traditionnelle. Il offre des vertus thérapeutiques contre la toux des enfants, les maux de ventre, les complications après l'accouchement comme la fièvre puerpérale ou sovoka. Il est aussi utilisé pour la prévention de l'épilepsie (Rabesa, 1986 ; Boiteau, 1999).

ÉTUDES ÉCOLOGIQUES DU TSIPERIFERY

Diversité morphologique du Tsiperifery

La diversité morphologique, observée au sein de Tsiperifery, est reconnue par les acteurs de la filière, des cueilleurs aux exportateurs. Les cueilleurs ont même signalé l'existence de morphotypes avec un goût plutôt amer piquant.

Les dernières données publiées sur la dénomination scientifique des poivres sauvages de Madagascar reflètent cette diversité :

- La classification de De Candolle en 1923 citait 3 noms dont *Piper borbonense* C.DC ou *Piper pyrifolium* VAHL et *Piper pachyphyllum* BAKER (Decary, 1946) ;
- Une classification provisoire du genre Piper malgache par MBG en 2010 rapporte à Tsiperifery 5 espèces dont *P. pachyphyllum*, *P. borbonense* et 3 nouvelles espèces endémiques ;
- Des travaux récents d'étudiants mentionnent également l'existence d'une diversité morphologique (Touati, 2012 ; Levesque, 2012).

Ainsi, pour classer Tsiperifery, deux références sont actuellement disponibles : une ancienne datant de 1923 (De Candolle) et qualifiée de globale par MBG, et une plus récente datant de 2010 (MBG) mais encore non valide. Pour ces raisons, nous parlerons ci-après de morphotypes au lieu d'espèces. Ces morphotypes fournissent aux acteurs de la filière des critères de distinction leur permettant de différencier les types morphologiques. En outre, l'homogénéité d'un lot au point de vue maturité et morphologie constitue déjà un indicateur de qualité sur le plan présentation physique.

Description des morphotypes

Les échantillons collectés dans les 3 sites du collectif INNOVEPICE (Kianjavato, Beforona et Sandrangato) sont issus de 35 pieds par site. Ils se rapportent à 4 groupes morphologiques ou morphotypes codés M1, M2, M3 et M4.

Les critères de distinction les plus évidents sont pour les feuilles : la forme, les tiges et la coriacité de leurs rameaux et pour les fruits : la forme du pédicelle et de la baie (Tableau 1).

Les quatre morphotypes de Tsiperifery sont dioïques. Les différences peuvent être observées uniquement sur les appareils reproducteurs et inflorescences.

Tableau 1 : Les critères morphologiques distinctifs des quatre morphotypes de Tsiperifery

Morphotype	Feuille	Fruit	Site de collecte
M1	Feuille juvénile oblongue crassuléscente (épaisse) à base symétrique ; feuille des rameaux également oblongue et crassuléscente à base symétrique et jeune feuille rouge violacée	Baie ovoïde de 0,5-0,6 x 0,4 cm à pédicelle tcourte 0,2-0,3 cm avec une protubérance à la base ; rouge orangé à maturité	Beforona
M2	Feuille juvénile cordiforme (en forme de cœur) et feuille des rameaux elliptique (obovale) à base asymétrique	Baie globuleuse de 0,3-0,4 cm de diamètre avec un pédicelle de 0,8 à 1,2 cm.	Beforona, Sandrangato Kianjavato
M3	Feuille juvénile cordiforme effilée et feuille de rameaux lancéolée membraneuse à base asymétrique	Baie ovoïde de 0,3-0,4 cm x 0,4-0,6 cm devenant rouge à maturité avec un pédicelle pubescent de 0,4 à 0,8 cm	Sandrangato, Kianjavato
M4	Feuille juvénile cordiforme et feuille de rameau plus ou moins coriace à base asymétrique	(aucun individu fertile n'a été rencontré)	Beforona

Cycle biologique du Tsiperifery

Les questions sur la biologie de Tsiperifery n'ont pas encore été abordées par la recherche. On sait néanmoins que d'une manière générale, le genre Piper a un fort potentiel de reproduction et de propagation végétative (De Souza *et al.*, 2009). Cette propagation végétative peut se faire, selon les cas, à partir des tiges, des racines ou de stolons. Un opérateur privé de Mandraka travaillant sur la multiplication par bouturage des rameaux depuis quelques années a réussi à avoir un taux de reprise avoisinant les 100 %. Des essais de multiplication par bouturage sont actuellement en cours.

Un plant juvénile de Tsiperifery présente un port herbacé de moins de 10 cm de hauteur. Il évolue en une liane avec l'émission de nouveaux nœuds et de nouvelles feuilles (Figure 1B). Cette liane rampe initialement au sol. Mais, à la rencontre d'un tuteur, elle s'accroche sur celui-ci, grâce aux racines crampons (Figure 1C).

Dès que la liane atteint un certain âge et une certaine hauteur, les rameaux apparaissent sur les nœuds. Des feuilles ovales naissent sur ces rameaux nouvellement formés. Ces derniers vont également porter les fleurs et les fruits.

Dans les 3 sites d'intervention du projet, la période de floraison et de fructification, matérialisée par la présence des appareils reproducteurs, s'étale sur toute l'année. On distingue cependant 2 pics de reproduction marqués par l'abondance des fleurs et des fruits (Tableau 2).

Tableau 2 : Variation des périodes de reproduction du Tsiperifery par site.

Site	Période de pic de floraison	Période de pic de fructification
Beforona	avril-mai ; août-septembre	mai-juin ; novembre-décembre
Sandrangato	février-mars ; juillet-août	mars-avril ; octobre-décembre
Kianjavato	février-mars ; juillet-août	Pas de fructification observée.



Au début de la fructification, les fruits apparaissent sur le rachis des inflorescences femelles encore sessiles. Ils se développent tout en émettant des pédicelles. La couleur évolue de vert en vert orangé puis de rouge en rouge orangé à l'approche de la maturation (Figure 1H,I,J).

Diversité écologique du Tsiperifery

Quels que soient les morphotypes, Tsiperifery se rencontre dans les forêts humides des côtes orientales de Madagascar, en zone de littoral et en basse, moyenne et haute altitudes (Carte 1). Il est aussi développé dans la forêt de plantation de *Pinus elliotii* de la station du Département de Recherches Forestières et Piscicoles (DRFP) du FOFIFA à Beforona.

Pour les 3 sites étudiés, les morphotypes M1 et M4 ne se rencontrent qu'à Beforona. M3 s'est adapté aux conditions de Sandrangato et Kianjavato (Tableau 3). Néanmoins, chaque morphotype semble être spécifique à une strate de la toposéquence. Ainsi, les morphotypes M1 et M4 n'ont été rencontrés que sur les crêtes (CR) à Beforona. M3 n'a été collecté que sur les mi-versants (MV) et les bas-fonds (BF). En revanche, ceux de M2 sont présents dans les 3 strates (Figure 2).

Tableau 3 : Répartition des échantillons de Tsiperifery issus de trois sites par morphotype.

Site	M1	M2	M3	M4	Total	Caractéristiques des sites
Beforona	11	11	0	13	35	Forêt artificielle de Pinus, 550 à 650 m d'altitude
Sandrangato	0	20	26	0	46	Forêt dense humide, envahie par quelques pieds d'Eucalyptus
Kianjavato	0	23	12	0	35	Forêt naturelle enrichie par une collection de caféiers sauvages à canopée fermée

Tsiperifery, liane forestière sciaphile et edificatrice (Razafimandimby, 2011), se sert de ses tuteurs pour jouir de la lumière dans la canopée. Les tuteurs sont en général des espèces arbustives de la forêt. Toutefois, des tuteurs inertes comme des rochers et des bois morts ont été observés.

Les tuteurs recensés appartiennent à 62 espèces repartis entre 35 familles floristiques. La composition floristique des tuteurs varie d'un morphotype à un autre. Les tuteurs de M2 et M3 sont plus diversifiés que ceux de M1 et M4.

Il a été également observé qu'un morphotype se développe plus fréquemment sur des tuteurs spécifiques, lesquels sont considérés comme des espèces tutrices potentielles (Tableau 4).

Tableau 4 : Nombre d'espèces tutrices et tuteurs potentiels des morphotypes.

Morphotype	M1	M2	M3	M4
Famille	3	23	25	5
Espèce	3	41	33	5
Espèce tutrices potentielles	<i>Pinus elliotii</i>	<i>Ravenala Madagascariensis</i> <i>Cryptocarya acuminata</i> , <i>Cryptocarya crassifolia</i> <i>Draceana reflexa</i> <i>Oncostemum botryoïdes</i> .	<i>Cyathea sp.</i> <i>Pandanus coniferoïdes</i> <i>Ocotea sp.</i> <i>Artocarpus sp.</i>	<i>Pinus elliotii</i>

Selon les dires de la communauté locale, les lianes de Tsiperifery préfèrent des tuteurs à écorce molle, épaisse et retenant l'humidité. Les observations sur terrain confirment cette assertion. En effet, la plupart des tuteurs potentiels des 4 morphotypes de Tsiperifery présente ces caractéristiques. C'est le cas des *Cyathea spp*, une fougère arborescente largement exploitée pour la confection de pots de fleurs, notamment des plantes épiphytes.

DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DU TSIPERIFERY

Le but de l'étude est de positionner Tsiperifery dans l'arbre phylogénique des *Piper*, de connaître la diversité génétique de Tsiperifery et de vérifier si cette diversité génétique correspond à la classification morphologique.

L'analyse génétique a été effectuée sur des échantillons d'ADN chloroplastique extraite d'échantillons de feuilles collectés à Beforona, Sandrangato et Kianjavato.

L'analyse de la diversité génétique, basée sur le cpDNA, a permis d'identifier différents haplotypes. L'arbre phylogénétique a été obtenu par la méthode *Unweighted Pair Group Method with Arithmetic mean* ou UPGMA (Figure 2). Des séquences d'espèces de *Piper* africaines, réunionnaise, mexicaine et hondurienne publiées sur GENBANK par Smith et *al.*, en 2008, ont été utilisées comme espèces externes (outgroup).

Tsiperifery forme un seul groupe distinct des espèces externes. Ce résultat affirme l'endémicité des 3 morphotypes représentés (M1, M2 et M4). Tsiperifery est ainsi différent de *P. borbonense*, le poivre à queue de l'île de la Réunion, comme son nom l'indique. *P. borbonense* est pourtant la plus utilisée en publicité et parfois même dans des articles scientifiques sur Tsiperifery.

Le groupe des Tsiperifery se divise en 2 clades distincts, se subdivisant chacun en 2 sous clades. Les échantillons de M2 sont plus distants de M3, M4 et M1. Les morphotypes M4 et M1 sont d'ailleurs morphologiquement très proches. Ces derniers sont en effet collectés uniquement à Beforona (Figure 3).

ÉTUDE DE LA TECHNOLOGIE POST-RÉCOLTE DU TSIPERIFERY

Le traitement post-récolte et la transformation du Tsiperifery commencent à partir de la récolte. En effet, pour obtenir des bons produits finis, il faut s'assurer de récolter des fruits mûrs et non immatures (Figure 4A). Ensuite, l'objectif consiste à déterminer les meilleures méthodes de transformation et de conservation du Tsiperifery pour l'obtention de produits de qualité.

Le séchage est l'étape la plus importante de la transformation avant la conservation car de cela dépendra la qualité du produit fini. Pour ce faire, des nouveaux procédés et des matériels de séchage simples et performants ont été apportés en vue d'améliorer la pratique paysanne. Après la récolte et pour une meilleure conservation, les fruits subissent des traitements soit par voie humide (l'échaudage ou le blanchissement), soit par voie sèche par le séchage direct (Levesque, 2012).

Échaudage

Ce procédé consiste à tremper le poivre en grappe pendant 5 à 10 minutes dans de l'eau chaude, voire bouillante, à une température supérieure à 85 °C mais inférieure à 100 °C (Figure 4B). Cette opération est suivie d'un temps de repos à l'ombre au cours duquel les fruits sont enveloppés dans une couverture pendant 12 à 24 heures avant le séchage (Weil *et al.*, 2014). Ils peuvent également être séchés directement



au soleil après échaudage. L'échaudage permet de préserver le poivre des attaques microbiennes, de favoriser le séchage et le brunissement des graines. Le poivre traité par échaudage est caractérisé par une couleur sombre assez homogène (Figure 4G).

Selon les paysans producteurs, le poivre échaudé se conserve bien. Il est conditionné dans des soubiques en nattes tressées, placées sur un étalage en bois et non à même le sol cimenté pour éviter la formation de moisissures. Selon leurs dires, le séchage sur natte directement au soleil des produits non échaudés, dure au moins deux semaines. Les paysans d'Anosibe Anala pratiquent l'échaudage à la demande des exportateurs comme SOPRAL.

Séchage

Trois techniques de séchage ont été testées : au séchoir solaire indirect de forme trapézoïdale, sur étals au soleil direct et au séchoir de type tente solaire (Figure 4C à E). Le séchoir solaire trapézoïdal et la tente solaire ont été fabriqués dans le cadre du projet PARRUR. Le séchoir solaire est constitué : i) d'une ossature en bois recouverte par un film en plastique rhodoïd, ii) de 10 claies de 0,64 m² chacune, disposées à l'intérieur de l'ossature, iii) d'un capteur en tôle ondulée galvanisée peinte en noir, d'une surface de 0,4 x 0,84 m, placé à l'intérieur au-devant du séchoir et, iv) d'un autre capteur en plastique noir de 1 x 0,8 m, placé au-dessus des claies. Ces capteurs servent à la fois d'absorbeur de chaleur et de protection des produits contre les rayons du soleil. L'entrée d'air s'effectue par une ouverture en-dessous et/ou au-devant du séchoir. En revanche, la sortie d'air se fait par une ouverture située en haut au dos du séchoir. Par mauvais temps, un appoint de chaleur peut être placé en-dessous du système pour élever la température dans le séchoir. Ce dernier peut être composé par un brûleur à gaz ou par un fût métallique servant d'échangeur chauffé par un brûleur à biomasses tels que les déchets végétaux, les copeaux ou la sciure.

Le séchoir à tente solaire est construit, en milieu rural, suivant le modèle d'un crib à maïs. Il est fabriqué avec du bois, des bambous et des plastiques que l'on peut trouver sur place et ses parois sont faites de plastique noir et transparent. Les produits sont étalés sur des étalages à l'abri du soleil. Le sol en dessous du séchoir est constitué d'un mélange de terre, de sable et de poudre de charbon qui sert d'absorbeur des rayons solaires en vue de réchauffer l'air environnant entrant par-dessous de l'appareil pour le séchage des produits. Des démonstrations sur la fabrication et l'utilisation de ce séchoir ont été organisées dans la région d'Anosibe Anala.

Les échantillons de Tsiperifery récoltés sur les sites ont été séchés dans le séchoir tente solaire pour la récolte d'échantillons. Le séchage des échantillons a été effectué dans le séchoir trapézoïdal dans les locaux du FOFIFA à Ambatobe.

Le séchage au soleil est le mode de séchage traditionnel en milieu paysan. Les produits sont tout simplement étalés sur des nattes posées sur le sol (Figure 4C). Après séchage, les poivres séchés ont été emballés et conditionnés aux bureaux du FOFIFA dans un emballage en plastique polypropylène.

Résultats

Dans nos essais, le séchoir solaire trapézoïdal donne une meilleure qualité de produits séchés par rapport au séchage au soleil. Ils sont exempts de poussières et ne sont pas attaqués par des insectes. La couleur des fruits séchés directement au soleil vire au noir à la fin du séchage. Le séchage au séchoir solaire dure 3 à 4 jours. Du point de vue économique et qualité de produit, il est plus intéressant et plus court comparativement au séchage direct au soleil dont la durée moyenne est de 2 semaines.

La pratique de l'échaudage raccourcit de 36 heures (soit 3 à 4 jours) le temps de séchage qu'il se fasse au séchoir ou directement au soleil.

Les paramètres de séchage au séchoir solaire sont les suivants :

- Teneur initiale en eau : 76 à 84 % ;
- Teneur finale en eau recommandée : 10 à 13 % ;
- Densité sur claie : 5 kg/m² ;
- Température de séchage : 30-55 °C ;
- Durée de séchage : 30 à 36 heures ou 4 jours ;
- Durée de conservation : plus d'un an.

La suppression du procédé de l'échaudage permet d'économiser de l'énergie et de la main d'œuvre. Par ailleurs, les produits non échaudés semblent bien conserver leur couleur rouge et leur arôme. Ces caractéristiques devraient toutefois être confirmées par l'analyse sensorielle. Les fruits échaudés sont, par contre, de couleur noire. Les fruits séchés au cours de l'étude et conservés dans des emballages en plastique polypropylène, n'ont subi aucune altération depuis 18 mois. Aucune trace de moisissure ni de changement de couleur n'ont été également détectés parmi les fruits emballés pendant cette durée de conservation (Figure 4F à I).

Les paysans sont intéressés par la tente solaire, matériel simple et efficace qu'ils peuvent fabriquer eux-mêmes à partir de matériaux disponibles localement. Les produits obtenus sont de bonne qualité et exempts d'impuretés. Le matériel fabriqué dans le village permet simultanément de faire la cueillette et de sécher partiellement ou entièrement les fruits. Ils peuvent aussi les stocker avant de les acheminer au marché. La qualité des produits séchés leur évite de transporter les produits frais sur de longues distances.

Conclusion

Le séchage au séchoir solaire permet d'obtenir de bons produits en économisant du temps, de la main-d'œuvre et de l'énergie. Par des techniques et moyens simples à la portée des paysans, on peut améliorer la qualité des fruits de Tsiperifery séchés pour la commercialisation et l'exportation. Des équipements simples et adéquats peuvent être conçus et fabriqués localement pour obtenir des produits respectant les normes de qualité au cours des différentes étapes de transformation du Tsiperifery, que ce soit à petite échelle ou semi-industrielle.

ÉTUDE CHIMIQUE DU TSIPERIFERY

La chimie joue un grand rôle dans la caractérisation de la qualité d'une épice. Les constituants chimiques du produit déterminent non seulement sa saveur et sa flaveur mais permettent aussi de déceler, à partir d'un seuil déterminé, l'existence des molécules caractérisées de toxique dans un produit agroalimentaire.

Dans le cas du Tsiperifery, en tant que poivre sauvage, le taux de pipérine détermine aussi un des facteurs de qualité du produit. Des échantillons de fruits collectés pied par pied ont fait l'objet d'étude chimique tant sur les huiles essentielles extraites que sur leur teneur en pipérines.



Les huiles essentielles (HE) de Tsiperifery : Composition chimique et rendement

Les pieds fertiles rencontrés dans les sites d'étude sont géo-référencés et les fruits disponibles récoltés. Des fruits à différents stades de maturité ont parfois été collectés sur un même pied.

Nous avons travaillé sur différents facteurs susceptibles d'induire la variabilité chimique au sein du Tsiperifery. Ces facteurs sont la maturité, la granulométrie, la déshydratation et le traitement post-récolte. Une étude plus complète a été également menée sur les différents organes de la plante selon la disponibilité du matériel végétal.

Tous les échantillons collectés ont été soumis à l'hydro distillation dans un appareil type Clevenger modifié et les extraits obtenus conservés dans des flacons ambrés à moins de 0 °C jusqu'à l'analyse.

Les HE prélevées ont été analysées par Chromatographie en phase gazeuse dans les laboratoires de l'Institut Malgache de Recherches Appliquées (IMRA) et de la Direction de la Protection des Végétaux (DPV).

Des analyses chromatographiques couplées à la spectrométrie de masse (SM) ont été effectuées dans les laboratoires du CIRAD Montpellier et de la Faculté de Pharmacie de l'Université de Montpellier 2 afin de confirmer les molécules identifiées et de déterminer les molécules non identifiées par les laboratoires locaux (non équipés de la SM).

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une méthode analytique de séparation des composés gazeux permettant leur quantification. Le couplage CPG/SM offre en revanche, une possibilité capitale d'identification des composants volatils grâce aux spectres obtenus correspondant.

La pipérine de Tsiperifery

La pipérine et la chavicine sont les alcaloïdes responsables du goût piquant chez les poivres. La pipérine constitue 95 % du principe piquant de ces derniers. Le dosage de la pipérine extraite à l'éthanol a été réalisé par spectrophotométrie avec une longueur d'onde de 343 nm (longueur d'onde où l'absorption de la molécule pipérine est maximale).

Résultats

Les données chimiques obtenues par analyse chromatographique des HE extraites des fruits de Tsiperifery et de celles des poivres classiques *Piper nigrum* ont été statistiquement comparées.

Les résultats obtenus par classification ont mis en évidence 4 groupes de poivres bien distincts (Figure 5) : Tsiperifery M1, Tsiperifery M2, Tsiperifery M3, et enfin le groupe du *Piper nigrum*. Les poivres du Tsiperifery M1 sont caractérisés par 2 molécules prépondérantes dont l' α -pinène (13 à 27 %) et le β -pinène (26 à 50 %). Ceux du Tsiperifery M2 se caractérisent par une molécule majoritaire dont l' α -phellandrène (25 à 37 %) et ceux du Tsiperifery M3 par une molécule à teneur élevée de p-cymène (20 à 38 %).

Les poivres du *Piper nigrum*, constitués majoritairement de deux molécules, le limonène (19 à 24 %) et l'oxyde de caryophyllène (13,5 à 19 %), se distinguent du Tsiperifery du point de vue chimique.

Les résultats des analyses chromatographiques des HE de morphotype M1 et/ou M2 ont montré que le degré de maturité des fruits (Figure 6A), les traitements post-récoltes tels que l'échaudage (Figure 6B) et la granulométrie (Figure 6C), n'ont pas d'incidence majeure sur la composition chimique des HE. Par contre,

ces différents facteurs ont un impact sur le rendement en huile obtenue. Les fruits verts contiennent plus de deux fois et demi d'HE (5 %) que les fruits mi-mûrs et rouges (de l'ordre de 2 %, Figure 7A). Les fruits concassés et non échaudés ont un meilleur rendement qui peut être jusqu'au double de celui des fruits entiers et échaudés (Figure 7B).

L'étude plus complète menée sur les différents organes de Tsiperifery a montré que la composition chimique des HE varie d'un pied à l'autre et parfois d'un organe à l'autre. La composition chimique des HE des différents organes de Tsiperifery est très variable au sein même d'un morphotype donné. Les HE des fruits diffèrent de celle des feuilles pour le pied M1 de Beforona (Figure 8A). Ces HE sont caractérisées par l' α - et le β -pinène à teneur importante (30 %), tandis que les HE des feuilles sont constituées de nérolidol supérieur à 80 %. On note aussi pour le même morphotype, une homogénéité de la composition chimique des HE quel que soit l'organe distillé (Figure 8B). La teneur en α -pinène et β -pinène des fruits mûrs frais, grappes, feuilles fraîches et tiges ligneuses est respectivement 20 et 35 %, 21 et 35 %, 30 et 43 % et enfin 22 et 35 %.

La Figure 9 traite les Tsiperifery de morphotype M2 de Beforona et d'Anosibe Anala, avec une forte présence d' α -phellandrène (> 25 %) dans les fruits. Des pieds de Beforona et d'Anosibe Anala montrent cependant une grande variabilité quant à la composition chimique des autres organes. Les feuilles du pied M2 de Beforona contiennent un lot de molécules de type terpénique atteignant à peine 5 à 10 %, tandis que les autres organes du pied M2 d'Anosibe Anala sont constitués principalement de méthyl eugénol (30 à 50 %) et de l'iso-élémicine autour de 20 % (Figure 9B). Par contre, on note, comme dans le cas de pied M1, une homogénéité de la composition chimique des HE d'un pied de morphotype M2 d'Anosibe Anala, quel que soit l'organe distillé, caractérisé par l' α -phellandrène, une molécule spécifique de ce morphotype. La Figure 9C montre la présence importante de l' α -pinène et de l' α -phellandrène dans les autres organes respectivement (13 à 23 % et 22 à 36 %) et les fruits en renferment (10 et 25 %). Quel que soit les morphotypes, les fruits et les stipes ont la même composition chimique (Figures 8B et 9B).

La moyenne des rendements en HE des différents organes de Tsiperifery est présentée sur la Figure 10 : les fruits et les stipes contiennent plus d'HE (> 3 %) que les feuilles (1.6 %). Les autres organes n'en contiennent que moins de 1 %.

Comme pour les HE, l'effet de l'échaudage sur la teneur en pipérine a été pris en compte pour les fruits de Tsiperifery M2 (Beforona et Anosibe Anala) et M1 (Anosibe Anala et Beforona). On note que les fruits non échaudés contiennent plus de pipérine que ceux échaudés. La différence varie de 0 à 0.5 % pour les morphotypes M1 et de 0.5 à 2 % pour les morphotypes M2 (Figure 11). D'autre part, les fruits de morphotype M2 sont moins riches en pipérine (autour de 1 %) que ceux de morphotype M1 dont la teneur en pipérine varie de 2.5 à 5.6 % pour les non échaudés.

Conclusion

La grande diversité chimique observée intra et inter-morphotypes au sein du Tsiperifery pourrait expliquer la préférence des consommateurs ou opérateurs sur tel ou tel type de fruits. En général, les fruits de petite taille sont prisés. Ces fruits correspondent aux morphotypes M2 et M3. Dans le cas des HE présentant une diversité chimique, les groupes obtenus statistiquement sont qualifiés de chémotypes. Le cas échéant, la composition chimique devrait être stable au cours de l'année et d'une génération à l'autre. Le chémotype doit ainsi être déterminé à partir d'un organe fixe de la plante, en général les feuilles. Dans le cas du Tsiperifery, ces conditions sont à vérifier avant de les qualifier avec certitude de « chémotypes ».



CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

Le Tsiperifery présente une grande variabilité morphologique, génétique et chimique. Ces variabilités semblent être liées à l'espèce mais aussi à l'organe distillé et au terroir.

Les résultats préliminaires obtenus jusqu'ici nous ont permis d'établir plus ou moins des corrélations entre les caractéristiques morphologiques, génétiques et chimiques de ces individus. Une question reste toutefois posée à savoir si ces individus représentent plusieurs espèces ou un complexe d'espèces.

Une analyse sensorielle des fruits issus des différentes classes de Tsiperifery identifiées dans cette étude devra être menée afin de compléter les descripteurs de qualité de cette épice.

Les recherches multidisciplinaires menées conjointement par les différents partenaires du DP « Forêts et Biodiversité » visent à accompagner la mise en place d'une filière durable du Tsiperifery, poivre sauvage de Madagascar. L'approche intégrée adoptée par le DP permet d'avoir différentes entrées pour la consolidation des connaissances autour de cette épice encore méconnue des scientifiques.

Les résultats préliminaires, obtenus durant ces deux années d'études, ouvrent de bonnes perspectives pour l'atteinte de cet objectif. Dès lors, la domestication, l'appui aux populations locales ainsi que le recours à un signe de provenance et de qualité constituent les voies à explorer prochainement.

Références bibliographiques

AFNOR, 1999 : *Ingrédients et additifs alimentaires* ; tome 2 ; 571 p.

Arthaud J.F., 1994 : *La qualité des produits alimentaires, politique, incitations, gestion et contrôle* ; Col. Sciences et techniques Agro-alimentaires ; Ed.lavoisier TE DOC ; 754 p.

Boiteau P., 1986 : Médecine traditionnelle et pharmacopée. *Précis de matière médicale malgache*, p22 ; 44 ; 76 ; 81

Borget M., 1991 : *Les plantes à épices* ; III G-P Maisonneuve et Larose, 11 : rue Victor-Cousin ; Coll. Techniques Agricoles et Productions tropicales ; 120p.

Combenegre J.P., 1995 : *Les signes de qualité des produits agro-alimentaires* ; Ed.France Agricole ; Groupe France Agricole ; 127p.

Decary, R., 1946 : Plantes utiles de la Flore Malgache. *Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*, 26(286), p 383-389.

De Souza, 2009 : Vegetation propagation in Piperaceae species, *Brazilian archives of biology and technology* 52, p 1357-1361.

Gloanec C. et al., 2010 : *Valorisation des filières épices à Madagascar, Potentiel et conditions d'émergence d'indications géographiques sur les filières poivre et girofle de Madagascar* ; Rapport de mission QualiREG novembre, 138p.

Jaramillo M.A., Manos P.S., 2001: Phylogeny and patterns of floral diversity in the genus Piper (Piperaceae). *American Journal of Botany* 88(4) : p 706-716.

Levesque A., 2012 : *Etude de différents schémas de vie mis en œuvre sur le Tsiperifery-poivre sauvage malgache*.

Manjato N., Ramahefarivelo A., Davidson C., Phillipson P., 2010: *The Malagasy species of Piper (Piperaceae)*, résumés du XIX^e congrès de l'AETFAT. National Botanic Garden of Belgium.

Rabesa Z., 1986 : Pharmacopée de l'Alaoatra, p13.

Ravindran P.N., Balakrishnan R., & Nirmalbabu K., 1992 : Numerical taxonomy of South Indian Piper L. (Piperaceae) cluster analysis. *Rheedea*, 2, p 55-61.

Razafimandimby H., 2011 : *Etudes écologique et ethnobotanique de Tsiperifery (Piper sp.) de la forêt de Tsiazompaniry pour une gestion durable* ; mémoire de DEA ; Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts ; 48p.

Rouzet M., Touche J., 1990 : *Epices et aromates* ; Coll.Sciences et techniques agro-alimentaires, Ed.Doc-Tec-Lavoisier ; 253p.

Smith J.F., Stevens A.C., Tepe E.J. , Davidson C., 2008: Placing the origin of two species-rich genera in the late cretaceous with later species divergence in the tertiary: a phylogenetic, biogeographic and molecular dating analysis of Piper and Peperomia (Piperaceae). *Plant Syst Evol* 275:9-30.

Touati G., 2012 : *Etat des lieux de la gestion du poivre sauvage de Madagascar : Un produit forestier non ligneux exploité pour la commercialisation*. Mémoire de fin d'étude ISTOM Ecole Supérieure d'Agro-Développement International.

Vernin X., 1995 : *Les signes de qualité, application aux fruits et aux légumes* ; Ctifl ; 94p.

Weil M., Descroix F., Shum Cheong Sing A, Boulanger R, Hoarau M., Levesque A., Bohuon P., 2014 : *Postharvest treatments of wild pepper (Piper sp) in Madagascar*.

Zafimahery H., 2006 : *Etude pour promouvoir l'amélioration de la qualité du girofle exporté* ; CHTT ; 78p.

[http:// www.ethicvalley.fr/Poivre rouge.html](http://www.ethicvalley.fr/Poivre_rouge.html)

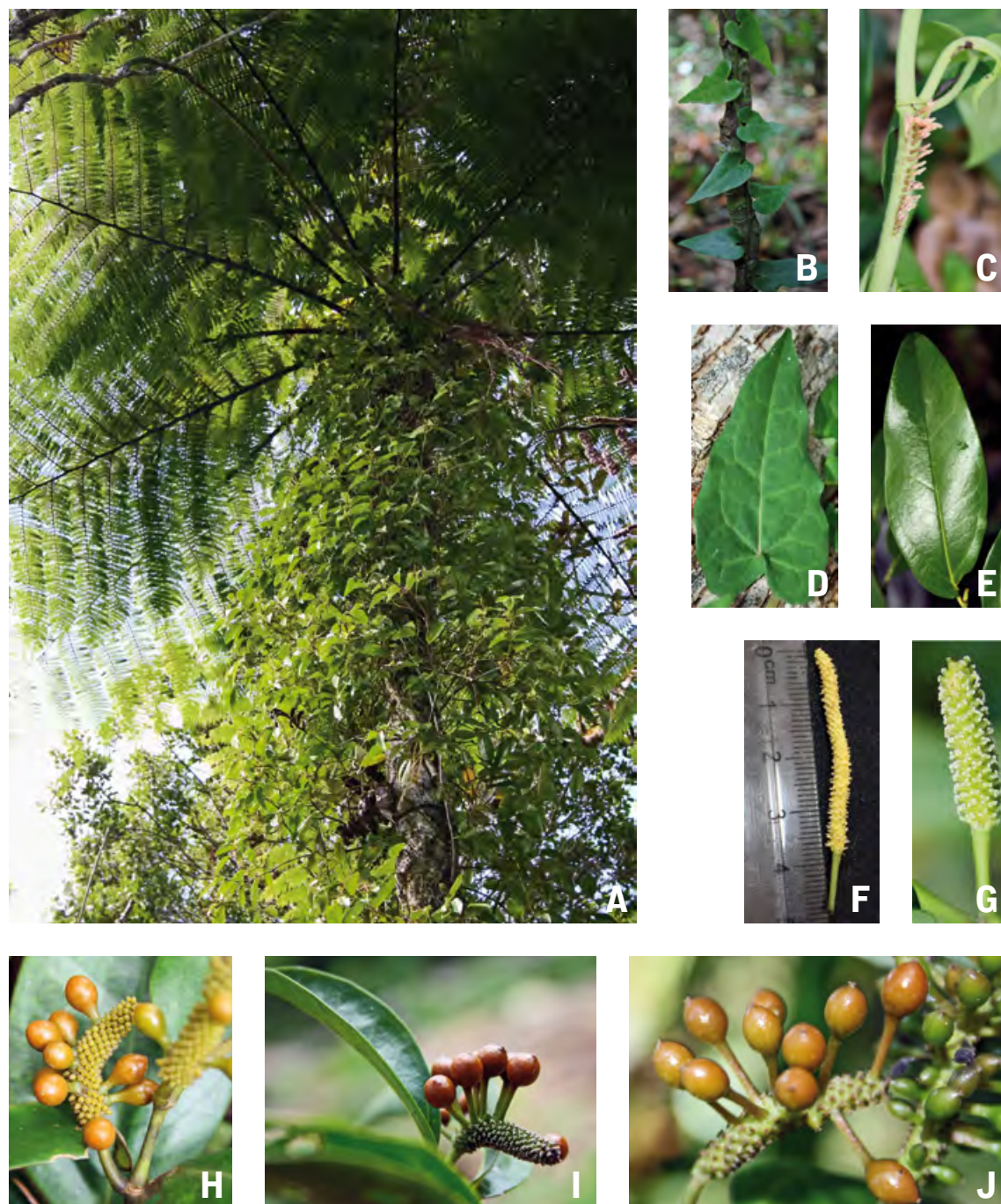
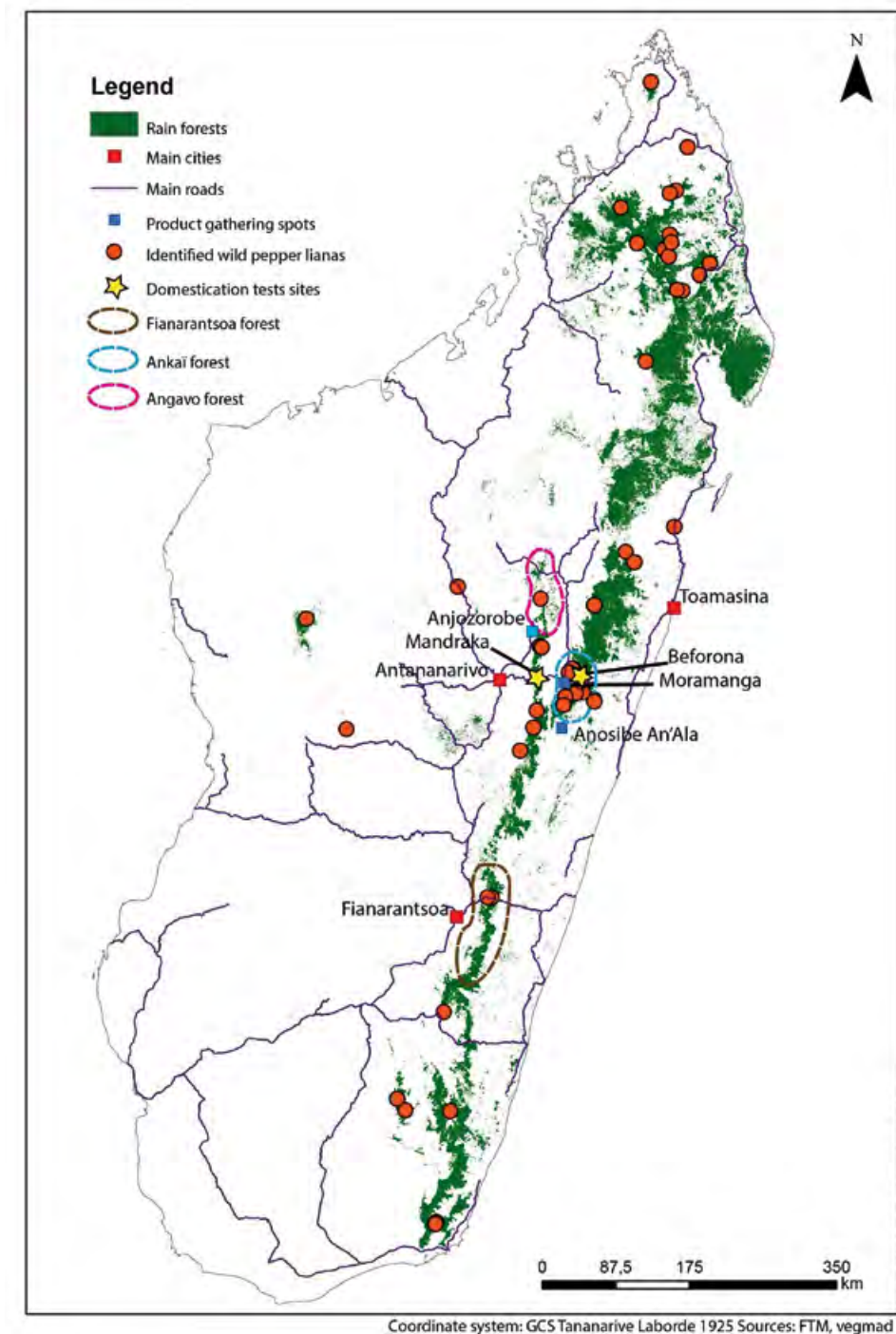


Figure 1 : Eléments de botaniques

(A) Tsiperifery sur son tuteur ; (B) Plant juvénile ; (C) Racines crampons ; (D) Feuille cordiforme ; (E) Feuille elliptique ; (F) Inflorescence mâle ; (G) Inflorescence femelle ; (H) Grappe mature de M1 ; (I) Grappe mature de M2 ; J. Grappe mature de M3 (Source : Razafimandimby H. et al., sous-presse)



Carte 1 : Bassins de collecte et points de collecte des spécimens d'herbier (TEF, TAN, www.tropicos.org, www.rebioma.net) de Tsiperifery à Madagascar
(Source : Razafimandimby H. et al., sous-presse)

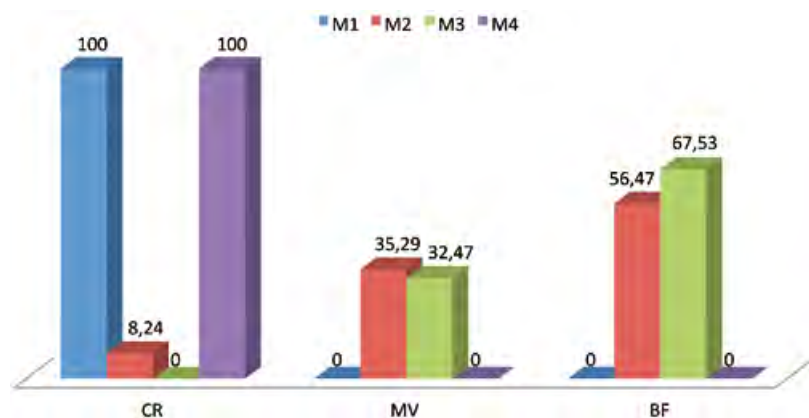


Figure 2 : Fréquence des individus par toposéquence

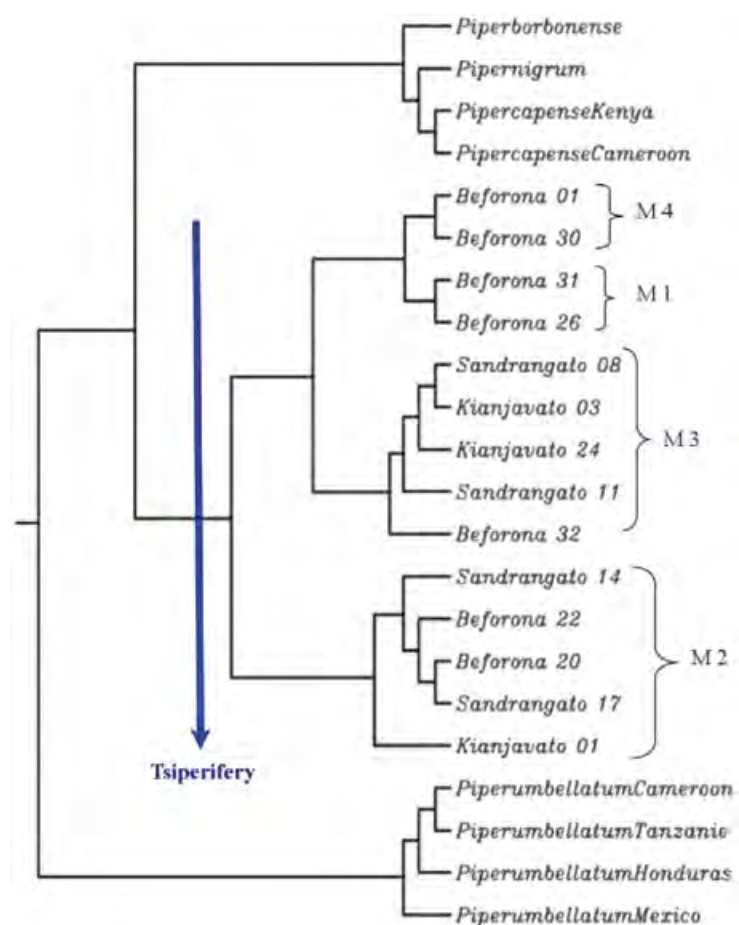


Figure 3 : Arbre phylogénétique de Tsiperifery par la méthode UPGMA



Figure 4 : La technologie post-récolte du Tsiperifery

(A) Fruits mûrs ; (B) Procédé d'échaudage ; (C) Séchage au soleil ; (D) Séchoir solaire trapézoïdal ; (E) Séchoir tente solaire ; (F) Fruits secs non échaudés ; (G) Fruits secs échaudés ; (H) Poivre à queue rouge non-échaudé ; (I) Poivre à queue noir échaudé (Source : Razafimandimby H. et al., sous-pressé)

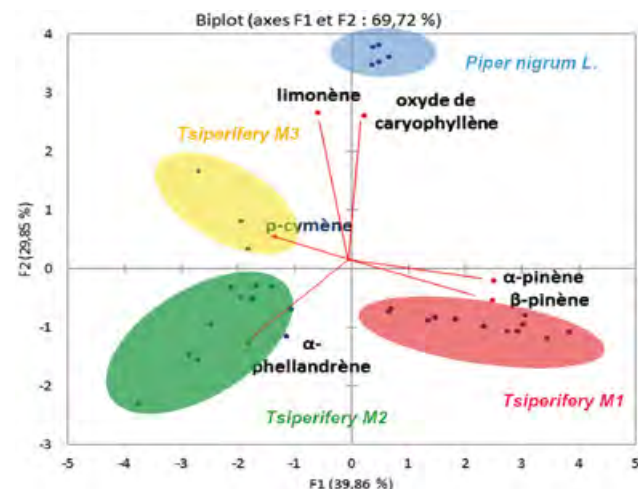


Figure 5 : Les différents groupes de poivres sauvages et de poivres classiques *Piper nigrum* obtenus après traitement statistique des données chimiques des HE extraites

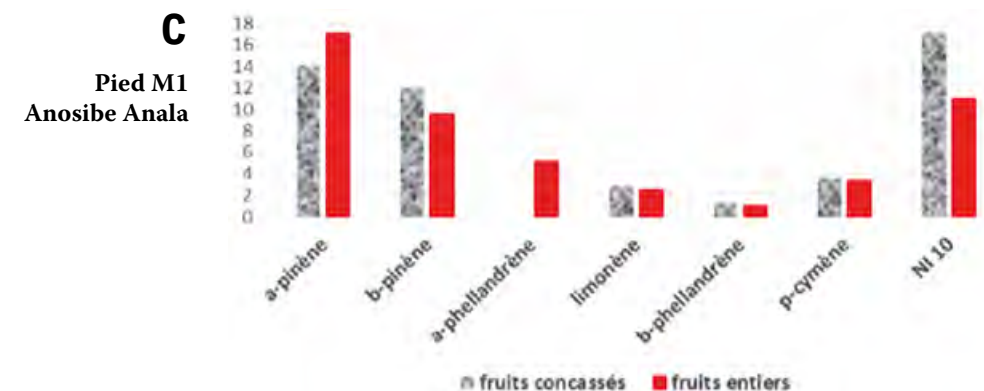
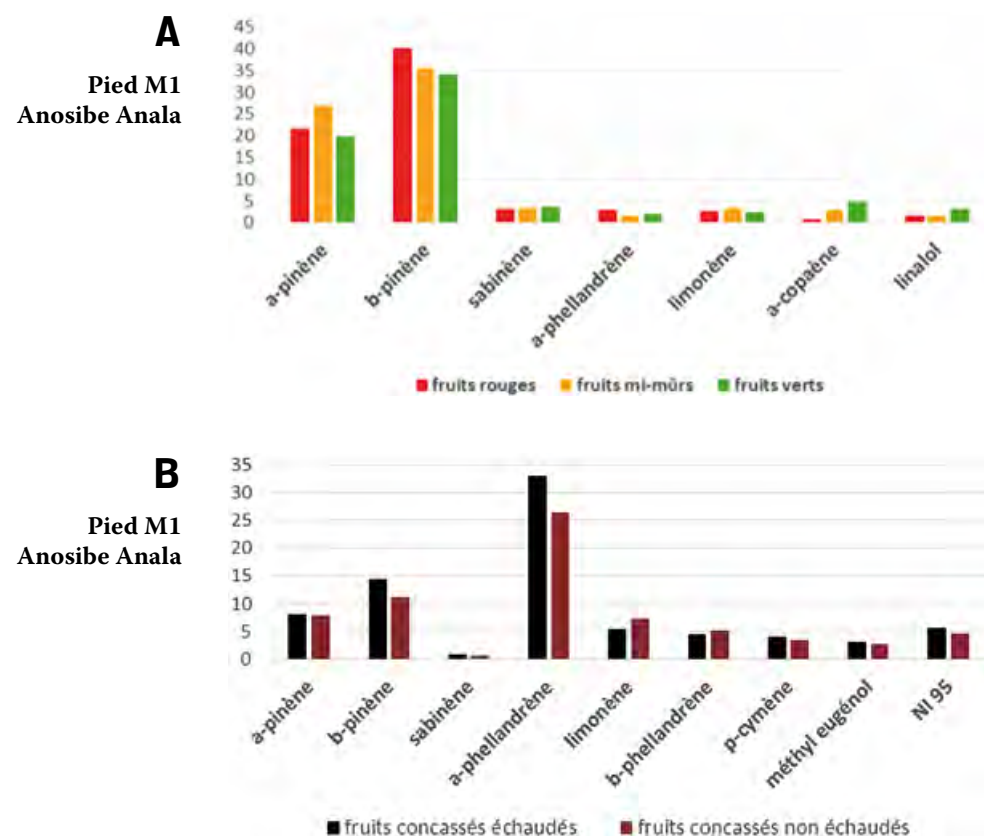


Figure 6 : Composition chimique des HE du Tsiperifery
(A) Effet du degré de maturité des fruits M1; (B) Effet de l'échaudage des fruits M2 ;
(C) Effet du concassage des fruits M1

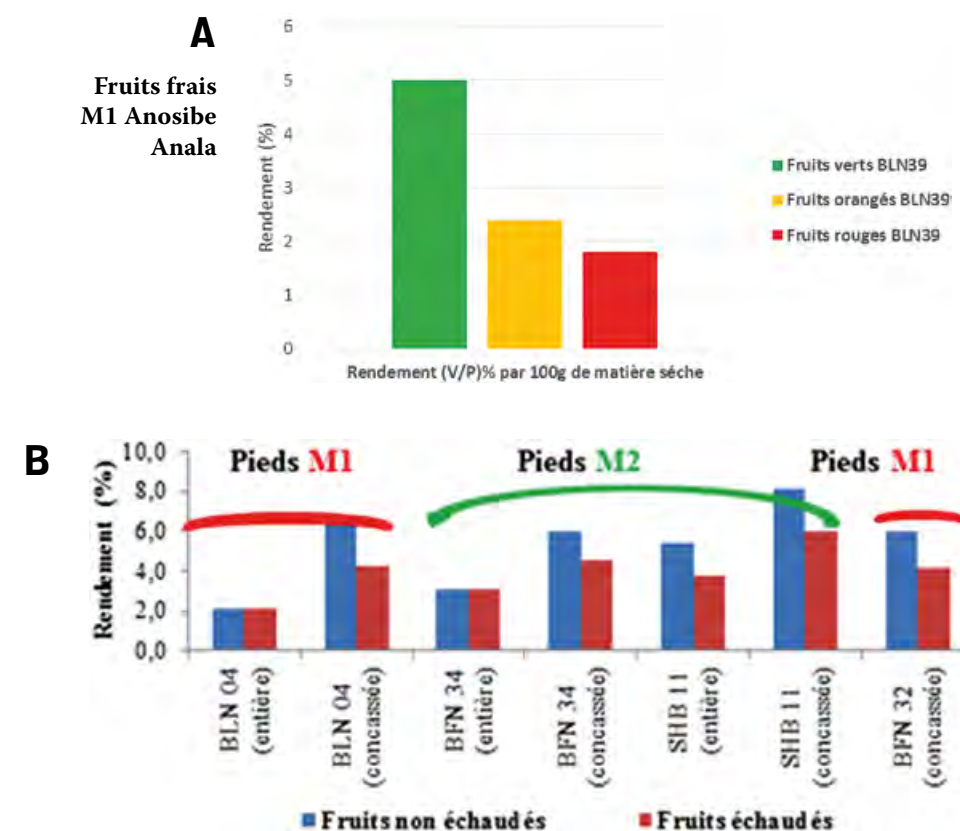


Figure 7 : Rendement en HE du Tsiperifery
(A) Effet du degré de maturité des fruits M1; (B) Effet de l'échaudage et du concassage des fruits M1 et M2 d'Anosibe Analà (BLN, SHB) et de Beforona (BFN)

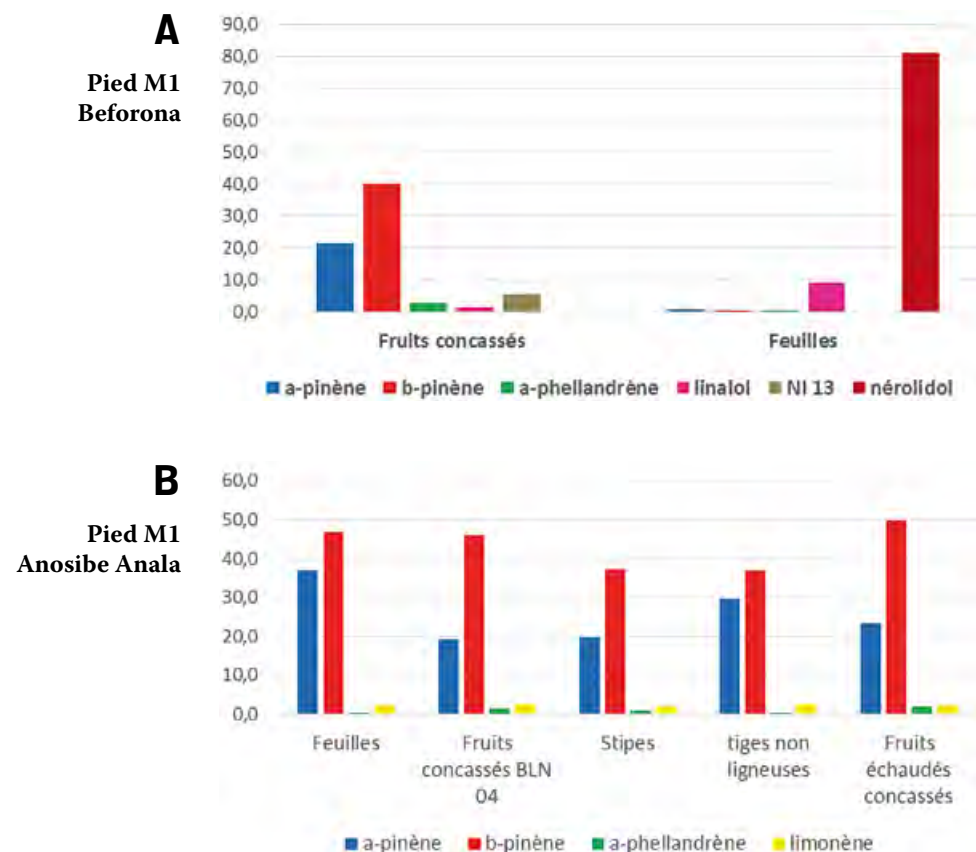


Figure 8 : Teneur relative (%) des constituants majoritaires des HE de pieds de morphotype M1
(A) Fruits et feuilles d'un pied M1 de Beforona ; (B) Fruits concassés échaudés et non échaudés, stipes, feuilles et tiges non ligneuses

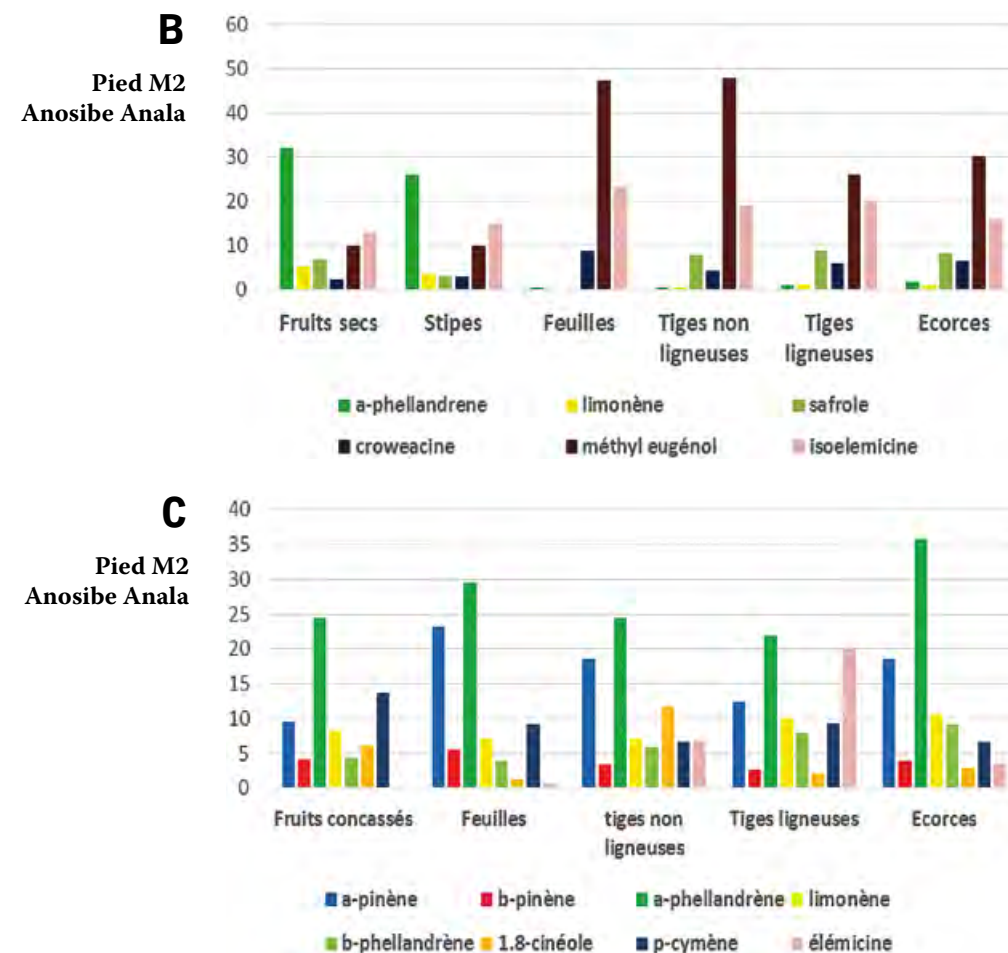


Figure 9 : Teneur relative (%) des constituants majoritaires des HE de pieds de morphotype M2
(A) Fruits concassés et feuilles d'un pied M2 de Beforona
(B) Fruits secs, stipes, feuilles, tiges ligneuses et non ligneuses, écorces d'un pied M2 d'Anosibe Anala
(C) Fruits concassés, feuilles, tiges ligneuses et non ligneuses, écorces d'un pied M2 d'Anosibe Anala

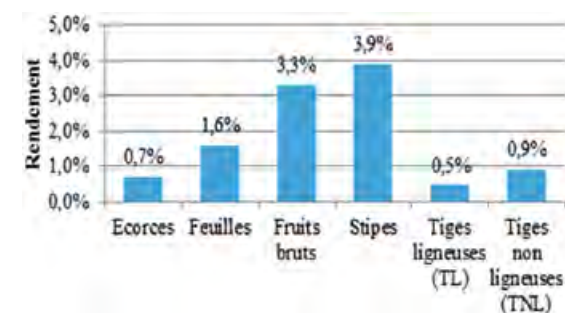
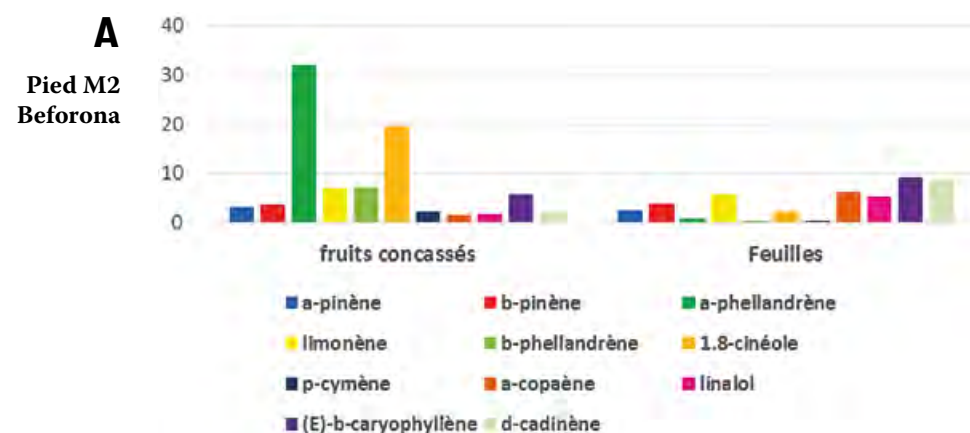


Figure 10 : Rendement moyen en HE extraites des différents organes de Tsiperifery

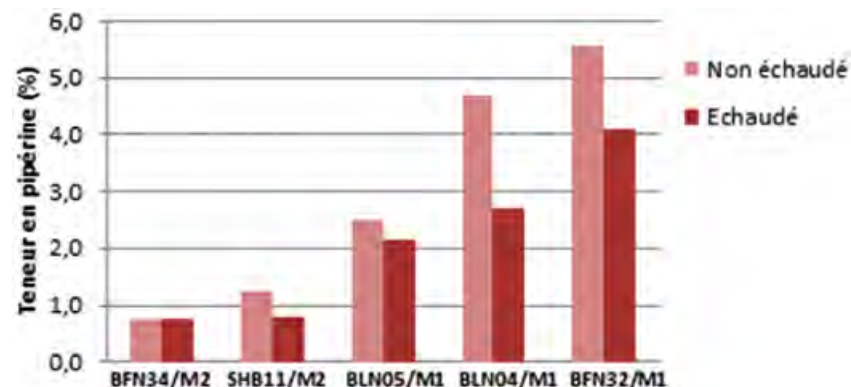


Figure 11 : Effet de l'échaudage sur le rendement en pipérine des fruits de Tsiperifery M2 de Beforona (BFN) et Anosibe Anala (SHB) ; BLN) et ceux de Tsiperifery M1 d'Anosibe Anala (BLN ; SHB) et de Beforona (BFN)

Les contraintes à l'intensification de la productivité et de la mise en marché des produits agricoles

*Lutter contre les maladies du riz et de la pomme de terre
Améliorer l'efficacité des Systèmes d'Information de Marché (SIM)*

A Madagascar, le riz occupe une place importante dans l'alimentation et l'économie. Avec un rendement moyen de 2,8 T/ha, il constitue l'aliment de base de la population malgache avec une consommation annuelle moyenne par habitant de 138 kg en milieu rural et 118 kg en milieu urbain, ce qui classe le pays parmi les plus gros consommateurs de riz au monde (UPDR/FAO, 2001). Sur les Hautes Terres peuplées de Madagascar, les paysans cultivent le riz irrigué partout où l'eau est disponible et l'aménagement des rizières possible : plaines irriguées, bas-fonds ou terrasses à flanc de colline. Pourtant, la production nationale n'arrive pas à satisfaire les besoins puisque le pays est contraint depuis 2009 à importer régulièrement du riz : 2012 est l'année record pour l'importation de riz avec près de 204 000 tonnes.

La pomme de terre occupe quant à elle, une place stratégique dans la politique de sécurité alimentaire à Madagascar, arrivant en quatrième position au niveau national en termes de production après le riz, le manioc et la patate douce (MAEP/UPDR, 2002). Elle contribue à la diversification alimentaire en zone urbaine, et assure à la population rurale, le rôle de complément ou de substitut du riz notamment en période de soudure.

La production agricole et sa mise en marché font pourtant face à des problèmes sanitaire et économique qui ne permettent pas d'assurer convenablement la sécurité alimentaire.

La production nationale rizicole est confrontée à la fois, à des attaques d'épidémie de pyriculariose, et sur le plan économique à la faiblesse de la circulation des informations sur le marché. Ces deux principales contraintes ne contribuent pas à stabiliser et rentabiliser la production : le revenu paysan diminue et les producteurs sont contraints à chercher d'autres sources de production ou de revenu.

La pomme de terre est un produit qui peut contribuer à la diversification alimentaire mais elle est aussi confrontée à un problème de flétrissement dû à la bactérie phytopathogène *Ralstonia solanacearum* qui inhibe l'intensification de sa production.

Plusieurs projets de recherche sont menés dans le cadre du programme PARRUR pour répondre à ces préoccupations :

- Le collectif « GIPYRI » **« Gestion Intégrée de la Pyriculariose du Riz pluvial »** tente d'optimiser l'utilisation de la diversité génétique des résistances du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose sur les Hautes Terres de Madagascar. Les résultats prometteurs récoltés par l'équipe SPAD¹ permettraient de réguler l'infestation de cette maladie qui représente une menace et un frein à la diffusion des systèmes de culture à base de riziculture pluviale à Madagascar ;
- Le collectif « RALSTONIA » contribue également au développement d'une stratégie de lutte génétique contre le flétrissement bactérien. Cette maladie majeure de la pomme de terre est à l'origine de baisses significatives du rendement et de la qualité de la production alors qu'aucune méthode de lutte chimique n'est disponible. Les mesures préventives préconisées s'appuient donc sur le maintien ou le renforcement de la propriété de résistance de la plante hôte ;
- Enfin, l'enjeu du collectif « INFORIZ » est d'améliorer la circulation de l'information au niveau des acteurs de la filière riz selon une démarche itérative : (i) comprendre la place de l'information dans les contraintes d'accès au marché des riziculteurs et dans le fonctionnement de l'aval de la filière, (ii) améliorer la capacité de l'Observatoire du Riz à répondre aux besoins en information des producteurs en testant différentes formes de diffusion et, (iii) évaluer ces différentes formes de diffusion.

Les résultats de ces trois projets permettent de dresser des pistes de solution qui pourraient s'avérer bénéfiques pour le paysannat malgache :

« Gestion de la diversité variétale du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose » : Les résultats de recherche montrent que l'effet des mélanges de variétés sur la diminution des épidémies de pyriculariose (maladie qui affecte surtout le riz pluvial) est bien confirmé aussi bien en conditions contrôlées qu'en conditions paysannes. L'utilisation d'une variété tolérante a un effet comparable à celui d'une variété résistante dans un mélange binaire avec une variété sensible. De même, une association interspécifique « riz et haricot » peut avoir au moins un effet aussi fort sur la diminution de la pyriculariose qu'un mélange de variétés de riz pour un niveau de dilution identique de la variété sensible.

« Contrôle intégré du flétrissement bactérien (*Ralstonia solanacearum*) de la pomme de terre dans la région du Vakinankaratra » : L'étude de la biodiversité de l'agent pathogène est une étape fondamentale et indispensable à la sélection variétale orientée vers une résistance spécifique. Des souches de microorganismes rhizosphériques et endophytes (Actinomycètes et *Pseudomonas*) de pomme de terre présentent, in-vitro, une activité inhibitrice à l'égard des souches de *R. solanacearum* testées. L'inoculation en serre de plant de pomme de terre avec les 4 souches sélectionnées permet de réduire l'incidence de la maladie du flétrissement jusqu'à 19 % et d'augmenter l'efficacité du biocontrôle à plus de 70 % pour la souche d'Actinomycète endophyte E7.

« Amélioration de l'efficacité des Systèmes d'Information de marché : Le cas des producteurs de riz à Madagascar » : La politique rizicole a toujours tenu une place privilégiée dans les choix de politiques économiques développées par les responsables du pays. Mais les prix du riz sont cependant marqués par une forte instabilité qui pénalise tant les producteurs que les consommateurs. L'amplitude des fluctuations saisonnières, particulièrement marquées dans les bassins de production enclavés, s'élève à près de 70 %, entraînant des coûts de transactions élevés et un marché du crédit déficient. Les faibles performances du marché se traduisent également par une faible intégration spatiale à l'échelle inter-régionale, attribuée aux coûts de transport élevés, à l'insécurité et à un environnement peu concurrentiel dans les échanges inter-régionaux, favorisant les comportements de rente. Le diagnostic global de la filière fait ressortir la compartimentation spatiale des marchés et la faible circulation de l'information et recommande donc la mise en place d'un Système d'Information équitable.

¹ Dispositif de recherche et de formation en partenariat sur les « Systèmes de Productions d'Altitude et Durabilité » (FOFIFA, Antsirabe).

Gestion de la diversité variétale du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose

Management of upland rice varietal diversity to control blast



H. RAVELOSON¹
A. RAFENOMANJATO¹
A. RAMANANTSOANIRINA¹
M. SESTER²
L. M. RABOIN³

(1) Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA)
Centre Régional de Recherche Antsirabe - Tsivatrinikamo - BP 230 - Antsirabe 110 Madagascar
(2) Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) - Département Systèmes de Production
d'Altitude et Durabilité (SPAD), BP 230 - Antsirabe 110 - Madagascar
(3) Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier - Languedoc - Roussillon France

Résumé

Le riz constitue l'aliment de base de la population à Madagascar. La culture du riz pluvial s'est développée sur les versants des collines des Hautes Terres malgaches, pour répondre à une forte demande et faire face à la saturation des terres inondées permettant la riziculture irriguée. Actuellement, le riz pluvial fait partie intégrante du paysage et devient même par endroit dominant dans les systèmes de culture pluviaux. Cette rapide extension de la riziculture pluviale est le résultat de la diffusion de variétés adaptées à l'altitude, développées dans le cadre du programme d'amélioration génétique mené en partenariat par le Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural malgache (FOFIFA) et le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) depuis le milieu des années 1980. Malheureusement, la plupart de ces premières variétés se sont révélées sensibles à la pyriculariose entraînant des épidémies importantes dès le début des années 2000. La pyriculariose, causée par *Magnaporthe oryzae* est la maladie fongique la plus dévastatrice du riz, en particulier pour la riziculture pluviale. Cette maladie représente une menace et un frein à la diffusion des systèmes de culture à base de riziculture pluviale à Madagascar. La principale méthode de lutte contre la pyriculariose est la sélection et l'utilisation de variétés résistantes. Cependant les échecs des variétés résistantes, du fait du contournement des résistances par les populations de l'agent pathogène, sont très nombreux. Dans le contexte d'une agriculture de subsistance et de petit paysannat sur les Hautes Terres centrales, il est crucial de développer des méthodes de lutte pouvant réduire la pression de la maladie sans recourir aux pesticides et améliorer la durée de l'efficacité des résistances variétales. Les associations ou mélanges de variétés de riz pourraient permettre de réduire les épidémies de pyriculariose.



Le projet GIPYri (Gestion Intégrée de la Pyriculariose du Riz pluvial) mis en œuvre dans le cadre de PArtenariat et Recherche dans le secteur RURal (PARRUR), financé par le Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) du Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France, a pour objectif d'optimiser l'utilisation de la diversité génétique des résistances du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose sur les Hautes Terres de Madagascar. Ce projet comporte trois volets :

- L'étude des populations de l'agent pathogène et la caractérisation des résistances du riz vis-à-vis de ces différentes populations nécessitant la mise au point d'une technique d'inoculation artificielle au sein de laboratoire de phytopathologie de la station régionale de recherche du FOFIFA Antsirabe. Des analyses des réactions de variétés différentielles et de variétés du riz pluvial par inoculation avec des souches collectées dans la région du Vakinankaratra, ont été menées. Les résultats ont permis d'identifier les gènes de résistance qui pourraient être contournés et de voir les réponses de variétés du riz pluvial vis-à-vis des souches testées. Les informations obtenues aideront beaucoup à l'amélioration des stratégies de lutte contre la pyriculariose.
- La construction de stratégies de déploiement des résistances à la pyriculariose à l'échelle de la parcelle cultivée : étude et optimisation de l'effet des mélanges variétaux sur le contrôle des épidémies de pyriculariose. Plusieurs tests de mélanges variétaux ont été conduits durant les trois campagnes de 2011-2014 en associant des variétés sensibles avec des variétés tolérantes ou des variétés résistantes à la maladie. Les résultats de tous les essais montrent l'atténuation de l'attaque de pyriculariose dans les parcelles cultivées en mélange par rapport aux parcelles cultivées en pure.
- La validation de l'efficacité des mélanges de variétés en conditions paysannes avec l'aide de partenaires intervenant dans le développement agricole. Durant les campagnes 2011-2013, l'efficacité de mélange variétal comparé à la culture pure, a été confirmée dans les dispositifs mis en place en milieu paysan.

Les mélanges variétaux pourraient permettre de continuer à cultiver des variétés devenues sensibles par leur utilisation en mélange avec des variétés résistantes ou dans des mélanges constitués de variétés possédant des gènes de résistance différents. Ils constituent un des moyens pour réduire le risque d'une épidémie forte engendrée par le déploiement massif d'une variété tolérante par les agriculteurs en cas de contournement de sa résistance par des souches plus virulentes

Mots clés : riz pluvial, pyriculariose

Abstract

Rice is the staple food of the population in Madagascar. In the central highland of Madagascar, upland rice culture has developed on the hillsides to meet a strong demand of rice and to cope with the saturation of flooded land prone to irrigated rice. Nowadays, upland rice is a part of the landscape and becomes even dominant in rainfed cropping systems in some areas. This rapid expansion of upland rainfed rice is the result of the diffusion of adapted varieties, developed by the breeding program conducted in partnership by the National Applied Research in Madagascar Rural Development Centre (FOFIFA) and Centre for International Cooperation in Agronomic Research for Development (CIRAD) since mid 1980. Unfortunately, most of these early varieties were sensitive to blast causing large outbreaks in the early 2000s.

The GIPYri project (Integrated Management of the blast in Upland Rice) implemented within the framework of a partnership and research in rural sector (PARRUR) and funded by the Priority Solidarity Fund (FSP) of the Cooperation and Cultural Action of the France Embassy, was intended to optimize the use of resistant upland rice genetic diversity to control blast in the highlands of Madagascar. The project had three components:

- The study of populations of the pathogen and characterization of upland rice resistance face to these populations that requires the development of an artificial inoculation technique in plant pathology laboratory of the regional research station of FOFIFA in Antsirabe. Analysis of the reactions of the differential varieties and upland rice varieties by inoculation with strains collected in the Vakinankaratra region were conducted. The results have identified resistance genes that could be bypassed and the upland rice varieties' responses to the strains. These informations will help a lot in the improvement of strategies against blast.
- Construction of deployment strategies of resistance to blast on the farm level: to study and optimize the effect of varietal mixtures to control rice blast epidemics. Several varietal mixtures tests were conducted during three seasons of 2011-2014 involving susceptible varieties with resistant varieties resistant to the disease. The results of all tests show the attenuation of the blast attack in the plots cultivated with mixture compared to pure cultivated plots.
- The validation of the effectiveness of mixtures of varieties in farmers' conditions with the help of partners involved in agricultural development. During the 2011-2013 campaign, the varietal mixtures efficiency compared to pure culture was confirmed in the systems implemented at farm level.

The varietal mixtures allow continuing to grow susceptible varieties when used in a mixture with resistant varieties or mixtures of varieties with different resistance genes. They are means to reduce the risk of a major epidemic caused by the massive deployment of a tolerant variety by farmers in cases when the resistance is bypassed by more virulent strains.

Keywords: upland rice, blast disease

Introduction

A Madagascar, le riz occupe une place importante au point de vue alimentaire et économique. Il constitue l'aliment de base de la population malgache avec une consommation annuelle moyenne par habitant de 138 kg en milieu rural et 118 kg en milieu urbain, ce qui classe le pays parmi les plus gros consommateurs de riz au monde (UPDR/FAO, 2001). Pourtant, la production nationale n'arrive pas à satisfaire les besoins, ce qui amène le pays à importer régulièrement du riz. Sur les Hautes Terres de Madagascar, très peuplées, les paysans cultivent le riz irrigué partout où l'eau est disponible et où il a été possible d'aménager des rizières (plaines irriguées, bas-fonds ou terrasses à flanc de colline). Désormais, les possibilités de développement de nouvelles surfaces en riz irrigué y sont très limitées. Pour répondre à l'augmentation de la demande en riz, il est donc nécessaire d'intensifier la culture du riz irrigué et de développer de nouveaux systèmes de production de riz, tels que la riziculture pluviale.



La riziculture pluviale d'altitude a connu un essor important au-dessus de 1300 m d'altitude avec la création et la diffusion de variétés résistantes au froid. Toutefois, le riz pluvial fait face à des nombreuses contraintes biotiques et abiotiques dont en particulier la pyriculariose, maladie fongique causée par *Magnaporthe oryzae*. C'est la maladie fongique la plus importante du riz à travers le monde (Ou, 1985). Elle sévit dans tous les types de riziculture, mais s'avère plus préjudiciable en riziculture pluviale (Lai *et al.*, 1999). En l'absence de stratégies de protection, les pertes annuelles causées par cette maladie varient entre 10 % et 30 % de la production (Skamnioti et Gurr, 2009) et dans certains cas, les pertes de récolte peuvent atteindre 100 % pour des variétés très sensibles. Au champ, les méthodes de lutte contre la maladie sont généralement centrées sur la lutte chimique et l'amélioration variétale (Pennisi, 2010). L'utilisation de variétés résistantes constitue un moyen de lutte efficace et économique contre la pyriculariose. Toutefois, les phénomènes de contournement des résistances du riz par les souches de *M. oryzae* sont fréquents. Ce problème a déjà été rencontré dans le cas de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres de Madagascar où les premières variétés diffusées adaptées à la haute altitude ont dû être abandonnées et remplacées par des variétés tolérantes parce qu'elles étaient devenues trop sensibles à la pyriculariose.

À l'heure actuelle, une variété de riz pluvial tolérante à la pyriculariose domine très largement le paysage agricole dans les zones d'altitude. Une telle situation présente beaucoup de risque en cas d'adaptation de l'agent pathogène responsable de la pyriculariose. Il est donc indispensable, pour assurer la durabilité de la riziculture pluviale, d'intégrer différentes stratégies de lutte contre la pyriculariose impliquant l'amélioration génétique, la mise au point de stratégies de déploiement des résistances disponibles au niveau des parcelles ou des terroirs ou encore la gestion agronomique des systèmes de culture (Sester *et al.*, 2008 ; Sester *et al.*, 2014).

L'utilisation extensive de variétés uniformes possédant des gènes de résistances très spécifiques vis-à-vis des agents pathogènes expose inévitablement, à terme, à de fortes épidémies dès lors que les résistances déployées sont contournées. À l'inverse, la diversité génétique de la plante hôte semble être un mécanisme efficace pour réduire l'impact des maladies dans les écosystèmes naturels ou dans les systèmes paysans traditionnels où des écotypes très diversifiés sont utilisés.

La diversification génétique qui peut être mise en œuvre au niveau des espèces cultivées, des variétés d'une espèce cultivée ou des gènes de résistance de cette espèce, peut être un outil pour contrôler les maladies (Wolfe, 1985). Les associations de variétés ont déjà montré leur potentiel pour ralentir les épidémies dans le cas de maladies fongiques à dispersion éolienne telles que les rouilles ou l'oïdium des céréales (Finckh *et al.*, 2000).

Des résultats spectaculaires ont aussi été obtenus récemment à grande échelle dans le Yunnan (Chine) pour le contrôle de la pyriculariose du riz par l'utilisation de mélanges de différentes variétés de riz en culture irriguée (Zhu *et al.*, 2000). En revanche cette stratégie est peu documentée pour le riz pluvial.

Dans notre équipe, nous avons obtenu un certain nombre de résultats prometteurs en utilisant des mélanges variétaux binaires (une variété sensible diluée dans une variété résistante ; Raboin *et al.*, 2012). Néanmoins, cette stratégie doit encore faire l'objet de recherches pour être optimisée.

Le projet GIPyri (« Gestion Intégrée de la Pyriculariose », financé sur Fonds FSP PARRUR) se propose donc d'évaluer en conditions expérimentales contrôlées ainsi qu'en milieu paysan les potentialités des mélanges variétaux pour limiter les épidémies de pyriculariose.

Contexte de l'étude

LE RIZ PLUVIAL D'ALTITUDE DANS LA RÉGION DU Vakinankaratra

Selon le mode d'alimentation hydrique, la riziculture malgache peut être subdivisée en trois types : 1) la riziculture irriguée englobant toute culture de riz dans les bas-fonds et les plaines, faite sous lame d'eau durant le cycle cultural ; 2) la riziculture pluviale englobant toute culture pratiquée sur sol exondé des versants ou des parties sommitales des collines et dont l'alimentation hydrique est totalement assurée par la pluie ; et 3) la riziculture de *tavy* qui est une riziculture pluviale itinérante sur l'abattis-brûlis de la végétation préexistante. La pratique de la riziculture pluviale dans les zones d'altitude supérieure à 1300 m ne date que du milieu des années 1990.

Un programme de création variétale spécifique a été initié au milieu des années 1980 dans le cadre d'un partenariat entre le Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural malgache (FOFIFA) et le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Depuis, une quinzaine de variétés de riz pluvial tolérantes au froid ont été sélectionnées et proposées à la diffusion. Elles ont permis de repousser la frontière de la culture du riz pluvial au-delà de 1800 m d'altitude.

Grâce à ces variétés, la riziculture pluviale a connu un développement extrêmement rapide, en particulier dans la région du Vakinankaratra, entre les villes d'Antsirabe et d'Ambatolampy (70 km au nord), où les efforts de recherche et de diffusion se sont concentrés. Désormais, le riz pluvial fait partie intégrante du paysage et devient même par endroit dominant dans les systèmes de culture pluviaux (Raboin *et al.*, 2013).

Le riz pluvial fait cependant face à de nombreuses contraintes : i) climatiques incluant le froid et la grêle qui peuvent entraîner des pertes de rendement importantes, et ii) biotiques incluant les formes larvaires de Coléoptères *Scarabeoidea* appelées communément « vers blancs » ou leurs formes adultes comme dans le cas de *Heteronychus sp.* (Randriamanantsoa *et al.*, 2010) et la pyriculariose qui peuvent détruire la culture si les infestations sont sévères. Cette dernière est une maladie fongique qui représente une menace permanente pour le développement de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres.

LA PYRICULARIOSE DU RIZ

La pyriculariose, causée par *Magnaporthe oryzae*, est une contrainte majeure pour la production du riz. Elle est décrite dans tous les pays rizicoles (Ou, 1985). Cette maladie est présente à tous les stades de développement de la culture et peut attaquer aussi bien les feuilles que les tiges paniculaires (Figures 3A et 3B). La pyriculariose foliaire se caractérise par des lésions fusiformes ou ovales typiques sur les feuilles. En cas d'attaque sévère sur des individus sensibles, ces lésions peuvent fusionner et aboutir au dessèchement complet des feuilles. Les lésions sont constituées de taches à centre gris blanchâtre, à bord brun noir avec une zone extérieure jaune. La pyriculariose paniculaire se présente sous forme de nécroses de la tige paniculaire à la base de la panicule (pyriculariose du cou) ou sur les rachis de l'inflorescence, entraînant le dessèchement complet ou partiel de la panicule. L'agent pathogène est également capable d'infecter les racines (Sesma et Osbourne, 2004).



Cette maladie peut avoir des conséquences graves sur le rendement. Selon Skamnioti et Gurr (2009), en l'absence de stratégies de protection, les pertes annuelles causées par cette maladie varient entre 10 % et 30 % de la production et dans certains cas, les pertes de récolte peuvent atteindre 100 % pour des variétés très sensibles. Le développement des épidémies de pyriculariose résulte d'interactions complexes entre l'agent pathogène, la plante, et les facteurs environnementaux favorables à la maladie. L'impact de cette maladie sur la production en a fait un modèle pour les recherches sur les relations entre une plante et un champignon phytopathogène (Valent, 1990). Il a été étudié à la fois sous l'angle de la plante avec la caractérisation de nombreux gènes de résistance (Ballini *et al.*, 2008 ; Roy Chowdhury *et al.*, 2012) et sous l'angle de l'agent pathogène avec l'étude de ses gènes d'avirulence, de la diversité des populations et de la compréhension de son cycle de vie (Saleh *et al.*, 2013 ; Ebbola, 2007).

La pyriculariose est une maladie polycyclique c'est-à-dire que l'agent pathogène peut réaliser plusieurs cycles d'infection pendant une période de croissance de la plante infectée. Le cycle de la maladie commence par l'arrivée des spores sur les plants de riz assurant l'infection primaire. L'inoculum primaire peut provenir des semences ou des résidus infectés présents à proximité des parcelles ou de conidies venant d'autres parcelles infectées. Les conidies se fixent et adhèrent sur la surface de l'organe cible de la plante hôte à l'aide d'un mucilage. Elles germent ensuite en produisant un tube germinatif qui s'allonge jusqu'à former une nouvelle cellule, l'appressorium, qui forme à son tour un tube capable de percer la cuticule et la paroi de la cellule hôte épidermique.

Après la pénétration dans la cellule hôte, un réseau d'hyphes va se développer qui envahit et colonise les tissus attaqués produisant les symptômes après 4 ou 5 jours. Les lésions sporulent et donnent naissance à de nouvelles conidies qui constituent l'inoculum secondaire et le cycle recommence (Figure1).

En général, le temps entre le début de l'infection et la sporulation est d'environ 7 à 10 jours (Ebbola, 2007 ; Ribot *et al.*, 2008). Cette rapide production de nouvelles conidies assure la propagation de la maladie sur la plante attaquée elle-même, sur des plantes situées aux alentours dans la même parcelle ou même à plus grande distance vers des parcelles voisines. Dans les régions où les épidémies de pyriculariose sont régulières, la rapidité de leur développement et l'importance des pertes que provoque une attaque sur le cou des panicules, en font la maladie qui fait courir les plus grands risques à la riziculture.

Les méthodes de lutte contre cette maladie sont essentiellement prophylactiques, chimiques et génétiques avec l'utilisation de variété résistante. Les méthodes prophylactiques correspondent à l'utilisation de semences saines, l'enlèvement des résidus infectés et la bonne gestion des systèmes de culture (rotation culturale, apport raisonné des engrais azotés) afin de réduire l'initiation et la propagation de la maladie (Pennisi, 2010 ; Raveloson *et al.*, 2013). La lutte chimique constitue un des moyens pour contrôler cette maladie et les fongicides développés contre la pyriculariose représentent un des plus gros marchés mondiaux car cette maladie fait partie des cibles des grandes sociétés phytosanitaires. Ces fongicides ont été utilisés de plus en plus fréquemment dans de nombreux pays développés mais la lutte chimique n'est réalisable à Madagascar que dans des situations exceptionnelles, étant donné que la majorité des producteurs malgaches n'ont pas les moyens économiques nécessaires pour pouvoir recourir à des traitements fongicides. L'utilisation de variétés résistantes est sans doute la méthode la plus efficace et la moins coûteuse pour lutter contre la pyriculariose, mais les risques de contournement des résistances par adaptation de l'agent pathogène sont importants (Ballini *et al.*, 2008).

La pyriculariose sévit dans tous les types de riziculture, mais s'avère plus préjudiciable en riziculture pluviale (Lai *et al.*, 1999). Cette maladie représente donc une menace pour le développement de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres centrales malgaches. Ainsi, les premières variétés créées (qui

ont été diffusées dès le milieu des années 1990 et ont permis le démarrage de la culture du riz pluvial dans les zones d'altitude du Vakinankaratra) ont subi des épidémies importantes dès le début des années 2000. La résistance à la pyriculariose a été rapidement surmontée chez la plupart de ces premières variétés, à base génétique étroite (Raboin *et al.*, 2013).

Des propositions de stratégies de lutte pour minimiser l'impact de la pyriculariose, abordables dans le contexte d'agriculture de subsistance de Madagascar, sont indispensables.

LES MÉLANGES VARIÉTAUX COMME MOYEN DE LUTTE CONTRE LA PYRICULARIOSE

La diversité génétique de la plante hôte semble être un mécanisme efficace pour réduire l'impact des maladies dans les écosystèmes naturels ou dans les systèmes paysans traditionnels où des écotypes très diversifiés sont utilisés (Mundt, 2002). Les plantes ont plusieurs formes de résistance pour bloquer ou réduire les attaques des agents pathogènes. La plupart des agents pathogènes présentent plutôt un haut degré de spécificité de l'hôte. D'après Agrios (2005), des espèces de plantes sont résistantes à certains pathogènes parce qu'elles appartiennent à des groupes taxonomiques qui sont en dehors de la gamme d'hôtes de ces agents pathogènes. Cette forme de résistance est appelée non hôte. Les plantes dites non hôtes sont totalement résistantes aux pathogènes d'autres plantes, même dans les conditions les plus favorables pour le développement de la maladie. Mais dans le cas où une espèce de plante est hôte d'un pathogène particulier, la sensibilité envers différentes races de l'agent pathogène est très variable au sein de cette espèce. On parle de « résistance hôte », lorsqu'une espèce de plante est sensible à un pathogène mais que certaines plantes (variétés) de cette espèce végétale résistent à certaines souches du pathogène. Il existe alors deux types de résistance: la résistance partielle, quantitative, polygénique ou horizontale et la résistance complète, qualitative, monogénique, race spécifique, ou verticale. La résistance complète à un agent pathogène donné repose sur un déterminisme monogénique, qui conditionne la compatibilité de l'interaction entre l'hôte et l'agent pathogène selon une relation gène pour gène (Flor, 1971). Lorsqu'un gène de résistance permet à la plante de détecter les souches de l'agent pathogène portant le gène d'avirulence correspondant, cela amène la plante à réagir pour bloquer l'attaque de l'agent pathogène. En l'absence du gène de résistance ou du gène d'avirulence, la maladie se développe. Au contraire, la résistance partielle présente un déterminisme polygénique. Ce type de résistance variétale limite l'impact des agents pathogènes sur les cultures, en diminuant la sévérité des symptômes et en ralentissant la progression des épidémies.

L'utilisation extensive de variétés uniformes possédant des gènes de résistances très spécifiques vis-à-vis des agents pathogènes expose inévitablement, à terme, à de fortes épidémies dès lors que les résistances déployées sont contournées par adaptation de l'agent pathogène. A l'inverse, la diversité génétique de la plante hôte semble être un mécanisme efficace pour réduire l'impact des maladies dans les écosystèmes naturels ou dans les systèmes paysans traditionnels où des écotypes très diversifiés sont utilisés.

La diversification génétique qui peut être mise en œuvre au niveau des espèces cultivées, des variétés d'une espèce cultivée ou des gènes de résistance de cette espèce peut être un outil pour contrôler les maladies. L'utilisation de mélanges variétaux pour limiter l'impact de maladies a déjà fait la preuve de son efficacité dans de nombreux cas, en particulier pour certaines maladies des céréales (Finckh *et al.*, 2000). Les principaux mécanismes de réduction de la sévérité des épidémies dans les mélanges sont l'effet de dilution, les effets de barrière, et la résistance induite (Wolfe, 1985 ; Mundt, 2002).



L'effet de dilution repose sur la diminution de la probabilité pour une spore de produire une nouvelle infection du fait de la diminution de la densité de plantes sensibles dans les mélanges. Plus la densité de plantes sensibles est faible, plus la propagation de l'épidémie est réduite.

Les effets de barrière sont expliqués par la présence de plantes résistantes entre les plantes sensibles. Les plantes résistantes agissent comme une barrière physique en bloquant le passage des spores d'une plante sensible à une autre.

La résistance induite par prémunition est l'effet de résistance attribuable à des mécanismes de défense déclenchés par un stimulus avant l'infection par une souche et s'exprimant contre cette dernière. Ce stimulus est provoqué par une autre souche incompatible. En d'autres termes, lorsqu'une spore avirulente se dépose sur une plante résistante, elle active les mécanismes de défense de la plante qui la protègent contre une infection ultérieure par une spore virulente.

Les mélanges de variétés de riz ont déjà été utilisés avec succès pour limiter les épidémies de pyriculariose.

Des mélanges de riz sont cultivés en Chine dans la province de Yunnan, où le climat est favorable au développement de la maladie. Ces mélanges variétaux sont constitués entre une variété de riz gluant, de haute valeur gustative mais très sensible à la maladie, et des variétés hybrides plus résistantes. La sévérité de maladie, qui était de 20 % en culture monovariétale de riz gluant, n'est que de 1 % dans les mélanges. Le rendement des mélanges a augmenté de 10 % par rapport aux cultures monovariétales. Les mélanges ont été rapidement adoptés et leur superficie est passée de 800 ha en 1998 à 40 000 ha en 2000. La récolte manuelle des cultures en ligne a permis de séparer les variétés de différentes qualités (Zhu *et al.*, 2000). L'efficacité du mélange à réduire l'impact de pyriculariose a été spectaculaire et a en partie été expliquée par le fait que la variété sensible était plus haute que la variété résistante ce qui aurait eu pour effet de limiter l'humidité et donc la sévérité de l'attaque (Zhu *et al.*, 2005).

Les mélanges variétaux ont également été récemment étudiés pour la lutte contre la pyriculariose sur le riz pluvial (Castilla *et al.*, 2010) et ont été évalués dans le cadre de la riziculture pluviale d'altitude sur les Hautes-Terres de Madagascar (Raboin *et al.*, 2012).

OBJECTIFS DU PROJET GIPYRI/PARRUR

L'objectif général du projet est d'optimiser l'utilisation de la diversité génétique des résistances du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose sur les Hautes Terres de Madagascar. Il se décline en trois volets :

- L'étude des populations de l'agent pathogène *M. Oryzae* et la caractérisation des résistances du riz vis-à-vis de ces différentes populations;
- La construction de stratégies de déploiement des résistances à la pyriculariose à l'échelle de la parcelle cultivée : étude et optimisation de l'effet des mélanges variétaux sur le contrôle des épidémies de pyriculariose;
- La validation de l'efficacité des mélanges de variétés en conditions paysannes avec l'aide de partenaires intervenant dans le développement agricole.

Le projet est construit pour répondre à la fois à la demande des paysans malgaches en matière de lutte contre la pyriculariose mais aussi pour mieux comprendre comment gérer la diversité pour lutter durablement contre cette maladie.

La pyriculariose étant la maladie fongique du riz la plus répandue dans le monde, les connaissances acquises sur les Hautes Terres malgaches intéresseront aussi les autres régions rizicoles du Monde.

Caractérisation des populations de la pyriculariose et des résistances du riz à la pyriculariose

OBJECTIFS

Le programme de sélection du CIRAD-FOFIFA dispose de ressources génétiques importantes régulièrement enrichies par de nouvelles introductions qu'il est nécessaire de caractériser pour leur résistance à la pyriculariose.

Cette caractérisation repose sur une analyse fine des réactions des variétés de riz lorsqu'elles sont confrontées à un panel de souches du champignon au cours d'inoculations contrôlées. Le panel de souches utilisé et son spectre de virulence doivent être représentatifs des différentes populations de l'agent pathogène dans les zones ciblées par le programme de sélection ce qui implique un travail permanent de caractérisation des populations : diversité et structure génétique des populations et caractérisation du pouvoir pathogène (agressivité et virulence) des souches collectées.

Ce travail est indispensable à une gestion optimale de la diversité des résistances disponibles pour la recombinaison grâce au travail de sélection ou pour la déployer efficacement et durablement sur le terrain par exemple sous forme de mélanges de variétés (McDonald and Linde, 2002).

RENFORCEMENT DES CAPACITÉS DU LABORATOIRE DE PHYTOPATHOLOGIE DU FOFIFA À Antsirabe

Une nouvelle infrastructure destinée aux travaux de phytopathologie a été construite dans le cadre de GIPYri à la Station Régionale de Recherche du FOFIFA Antsirabe qui comprend :

- Une salle de laboratoire, destinée à l'isolement, à la conservation des souches de pyriculariose, à la préparation d'inoculum pour les tests de compatibilité agent pathogène/variété.
- Une chambre d'inoculation et une chambre d'incubation (obscurité, hygrométrie élevée) où les plants sont placés 24 heures après inoculation.
- Une serre à deux compartiments : un compartiment pour les plantes avant inoculation, un autre pour les plantes après inoculation et incubation.

Cette structure est opérationnelle depuis septembre 2013 et permet de conduire les tests de pathogénie par inoculation artificielle qui permettent de caractériser les réponses des variétés de riz vis-à-vis des souches de *M. oryzae* collectées dans la région du Vakinankaratra.



MÉTHODE D'INOCULATION ARTIFICIELLE DU RIZ AVEC LES SOUCHES DE *M. ORYZAE*

Le test de pathogénie par l'inoculation artificielle est un moyen pour caractériser la variabilité du pouvoir pathogène des souches de *M. oryzae* et les réactions des variétés testées. La conduite de ce test comporte plusieurs étapes (Figure 4). Des suivis d'attaques de pyriculariose sur le terrain ont été réalisés et des échantillons de feuilles et de panicules ont été collectés sur des dispositifs expérimentaux et des parcelles paysannes infectés par la maladie. Chaque échantillon est identifié par la date de collecte, le lieu (nom de l'endroit, longitude, latitude et altitude), la plante (riz ou autres plantes hôtes), le nom de la variété et le type de culture (riziculture irriguée ou pluviale). L'isolement monospore commence par la mise en sporulation de ces échantillons. Une des spores produites est transférée sur un milieu farine de riz pour avoir une souche pure. La bonne sporulation de cette souche est un élément requis pour sa conservation. La souche nouvellement conservée sera nommée et numérotée selon son entrée dans la liste de collection des souches. Les plants de riz sont cultivés pour être prêts à l'inoculation après 21 jours. Les souches conservées sont remises en culture sur un milieu de farine du riz pendant 8 à 12 jours. Durant les 4 derniers jours, la culture de champignon est exposée en permanence sous une lumière fluorescente afin d'obtenir beaucoup de conidies pour la préparation de l'inoculum. Le milieu de culture avec le champignon est mis en suspension avec ajout d'eau distillée puis la solution est filtrée pour séparer les mycéliums et les conidies. Le comptage de concentration de conidies se fait à l'aide de cellule de Malassez pour avoir la concentration d'inoculum requise pour l'inoculation (100 000 spores/ml). La pulvérisation des souches préparées sur les plants de riz constitue l'étape d'inoculation artificielle, ensuite ces plants de riz sont mis dans une salle d'incubation à 100 % d'humidité relative et à l'obscurité pendant 24 heures. Après ils sont transférés dans le compartiment de serre post inoculation. Enfin la notation de symptômes sur les plants de riz est réalisée entre 7 à 10 jours après l'inoculation, suivant une échelle permettant d'évaluer la sensibilité de la variété à la souche de pyriculariose testée (Figure 2).

PREMIERS RÉSULTATS

Spectre de virulence de 8 souches

Cent cinquante échantillons de feuilles ou de panicules infectés par la pyriculariose ont été collectés dans différentes zones de la région du Vakinankaratra à la fois sur le riz pluvial et sur le riz irrigué pour constituer une collection de souches représentative de la région. A partir de ces échantillons, une trentaine de souches de *M. oryzae* ont pu être isolées et conservées durant les campagnes 2012-2013 et 2013-2014.

Pour conduire les tests d'inoculation, 30 variétés ont été utilisées : 18 variétés différentielles (leurs gènes de résistance sont connus), 8 variétés de riz pluvial (6 variétés d'altitude et 2 variétés de moyenne altitude) et 4 autres variétés irriguées. Huit souches collectées dans différentes zones de la région du Vakinankaratra ont été utilisées pour réaliser les inoculations artificielles. La réaction des variétés après les inoculations est présentée dans le tableau 1.

Les réactions des variétés différentielles vis-à-vis de ces souches montrent que 11 d'entre elles présentent des réponses sensibles en combinant la capacité de ces souches à attaquer les variétés. Les gènes de résistances suivants sont contournés par au moins une des souches testées : CO 39 (témoin sensible), ZenithAcc 32558 (Pia+z), K60 (Pikp), K59 (Pit), C 104 Lac (Pi1), K3 (Pikh), Kanto 51 (Pik), Fujisaka n°5 (Pi1+ks), K2 (Pikp+a), Fukunishiki (Pish+z), K1 (Pita). En revanche, les gènes de résistance ou les combinaisons de gènes de résistance contenus dans les variétés C101 A 51 (Pi2=Pi25), IR 1529 (Pi33), C101 Lac (Pi1+1b+33), CT 13432-3R (Pi1+2+33), Pi n°4 (Pita2), Toride 1 (Pizt) et 75-1-127 (Pi9) restent

efficaces face aux 8 souches testées. Selon les suivis de ces variétés durant les campagnes 2012-2013 et 2013-2014 sur les dispositifs de sélection à Andranomanelatra, les réponses au champ de ces variétés différentielles sont cohérentes avec celles observées lors des inoculations artificielles.

La réponse aux inoculations des variétés de riz pluvial et des 4 autres variétés irriguées confirme en général les observations sur le terrain, sauf pour la variété B 22 qui est sensible sur le terrain alors qu'elle n'est sensible qu'avec la souche collectée sur elle-même et de réponse intermédiaire ou résistante vis-à-vis des autres souches.

L'objectif de ce travail est de constituer un panel de souches représentatif de la région du Vakinankaratra. La connaissance de la capacité de chaque souche à attaquer les variétés testées permet de constituer une collection de souches qui ont des spectres de virulence différents et d'identifier des souches qui ont des spectres de virulence très larges. Ces souches seront utilisées pour tester la résistance des variétés utilisées dans le programme de sélection et des nouvelles variétés à diffuser.

Résultats obtenus sur la variété Chhomrong Dhan

Chhomrong Dhan est utilisée dans plus de 89 % des exploitations qui pratiquent la riziculture pluviale sur les Hautes Terres, loin devant toutes les autres variétés pluviales d'altitude qui ont été diffusées (Raboin *et al.*, 2014).

Les résultats des inoculations artificielles indiquent que cette variété est sensible vis-à-vis des souches MAD 19, 22 et 32. Ce résultat incite à renforcer la surveillance au champ de l'évolution de la pyriculariose sur cette variété.

Étude et optimisation de l'effet des mélanges variétaux pour le contrôle des épidémies de pyriculariose

MESURES DE LA SÉVÉRITÉ DE LA PYRICULARIOSE

L'évaluation de l'efficacité du mélange consiste à comparer la sévérité de la maladie sur une même variété cultivée en mélange et en culture pure. Le principe de suivi de la pyriculariose est basé sur l'observation des symptômes et l'évaluation de l'intensité de la maladie présente sur les terrains. La notation des symptômes foliaires a été effectuée sur 10 poquets de chaque parcelle. Pour chaque poquet, le nombre total de talles et le nombre de talles infectées ont été comptés. Pour trois talles malades, le pourcentage de surface foliaire attaquée a été estimé sur les 4 feuilles les plus hautes. La sévérité foliaire est alors calculée :

Sévérité foliaire = Moyenne parcellaire [moyenne des % de surface attaquée sur les talles malades * nombre de talles malades / nombre total de talles].

Pour la pyriculariose paniculaire, sur chacun des 10 poquets, le nombre total de panicules et le nombre de panicules malades ont été également comptés. Pour 5 panicules malades, le pourcentage de grains atteints a été évalué. La sévérité paniculaire à l'échelle de la parcelle est alors estimée :

Sévérité paniculaire = Moyenne parcellaire [moyenne des % de grains attaqués sur les panicules malades * nombre de panicules malades / nombre total de panicules].

Tableau 1 : Réponses de variétés vis à vis des souches collectées dans le Vakinankaratra

Lieu de collecte		Hautes Terres RP						Moyen Ouest RP				Hautes Terres RI	
Année de collecte		2013	2013	2014	2014	2014	2014	2013	2013	2014	2014	2014	2014
Variétés	Gène de résistance	Site d'évaluation	MAD 19	MAD 20	MAD 32	MAD 23	MAD 16	MAD 12	MAD 22	MAD 29			
CO 39	Témoin					S	S	S	S	MS	S		
Zenith Acc32558	Pi(a+z)					R	S	S	S	S	S		
K60	Pikp		MS	S	MS	S	S	S	S	S	S	MR	
K59	Pit		S	S	S	S	S	S	MS	MS	S	S	
C 104 Lac	Pi 1		S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	
K3	Pikh		S	MS	S	S	MR	S	S	S	R	R	
Kanto 51	Pik		MS	MS	S	S	MR	MS	S	S	MR		
Fujisaka n° 5	pi1+ks		MR	R	MS	S	MR	MR	S	S	R		
K2	Pikp+a		MR	MS	MS	S	MS	MS	S	S	MR		
Fukunishiki	Pish+z		S	MS	MR	MS	MR	MS	S	S	MR		
K1	Pita		MR	R	S	MR	R	MS	MS	MS			
C 101 A 51	Pi2=Piz5		R	MS	R	R	R	R	R	R	R		
IR 1529	Pi33		R	R	R	R	R	R	R	R	R		
C 101 Lac	Pi(1+1b+33)		R	R	R	R	R	R	R	R	R		
CT 13432-3R	Pi(1+2+33)		R	R	R	R	R	R	R	R	R		
Pi n°4	Pita2		R	R	R	R	R	R	R	R	R		
Toride 1	Pizt		R	R	R	R	R	R	R	R	R		
75-1-127	Pi 9		R	R	R	R	R	R	R	R	R		
FOFIFA 154	Très sensible	Andranomanelatra	S	S	S	S	S	S	S	S	R		
FOFIFA 152	sensible	Andrano.	S	S	S	S	S	S	S	S	R		
B22	sensible	Ivory	MR	MR	R	R	MS	S	MS	S	R		
FOFIFA 161	tolérante	Andranomanelatra	MR	R	R	MR	MS	MS	MS	MS	R		
Chhomrong Dhan	tolérante	Andranomanelatra	S	MS	S	MS	MS	MS	S	S	R		
FOFIFA 173	Tolérante	Andranomanelatra	MR	R	S	R	MR	MR	R	R	R		
Nerica 4	Tolérante	Ivory	R	MR	R	R	R	R	R	R	R		
FOFIFA 172	Résistante	Andranomanelatra	R	R	R	R	R	R	R	R	R		
Kasalath	Sensible	Ivory	S	S	S	S	S	S	S	S	S		
Nipponbarre	Résistante	Andranomanelatra	MS	MS	S	S	MS	MS	S	S	MR		
Moroberekan	Résistante	Andranomanelatra	R	R	R	R	R	R	R	R	R		
IR 64	Résistante	Andranomanelatra	R	R	R	R	R	R	R	R	R		

MAD 12 : souche collectée sur la variété B 22 à Ivory : dispositif expérimental
MAD 16 : souche collectée sur la variété Nerica 4 à Ivory : dispositif expérimental
MAD 19 : souche collectée sur la variété Chhomrong Dhan à Andalamahitsy : parcelle paysanne
MAD 20 : souche collectée sur la variété Chhomrong Dhan à Imerimandroso : parcelle paysanne
MAD 22 : souche collectée sur la variété Kasalath à Ivory : dispositif expérimental
MAD 23 : souche collectée sur FOFIFA 152 à Andranomanelatra : dispositif expérimental
MAD 29 : souche collectée sur la variété locale Vary botakely à Andranomanelatra : parcelle paysanne
MAD 32 : souche collectée sur la variété Chhomrong Dhan sur le dispositif matrice à Andranomanelatra

RP : riz pluvial
RI : riz irrigué

S : Sensible
MS : Moyennement sensible
MR : Moyennement résistante
R : résistante

ARRANGEMENT ET PROPORTION DES VARIÉTÉS À ASSOCIER

Le nombre de composantes (variétés), la proportion des différentes composantes et l'arrangement spatial des composantes d'un mélange variétal doivent être optimisés. Dans une expérience réalisée en 2007 et déjà publiée en 2012 (Raboin *et al.*, 2012), trois arrangements de mélanges à deux composantes (associant une variété très sensible et une variété résistante) ont été comparés à la culture pure de la variété très sensible. Il s'agissait d'un mélange en ligne alternant une ligne d'une variété résistante (F 172) et une ligne d'une variété très sensible (F 154), d'un mélange en ligne alternant un rang de la variété très sensible avec 5 rangs de la variété résistante et d'un mélange aléatoire mélangeant 1 poquet de la variété très sensible pour 5 poquets de la variété résistante (Figure 3 et 5). Il est à noter que dans le mélange aléatoire toutes les graines semées dans un même poquet étaient de la même variété. L'essai comprenait 4 répétitions et les parcelles élémentaires de 6 x 6 m étaient séparées entre elles par une bande de 4 m de la variété résistante pour limiter les risques d'interaction entre parcelles par transfert d'inoculum.

Dans cet essai, le niveau de pyriculariose a été particulièrement élevé car il était mené dans la station de sélection où nous utilisons des bordures infestantes de variétés sensibles pour exercer une pression de sélection pour la résistance à la pyriculariose. Néanmoins, les mélanges ont permis de réduire significativement la sévérité de la pyriculariose sur la variété sensible (Figure 6). Le niveau de dilution le plus fort, à savoir 1S:5R, semble plus efficace pour réduire la pyriculariose que ce soit dans le mélange en ligne ou le mélange aléatoire que la dilution 1S:1R. En revanche, aucune différence claire n'a été mise en évidence entre le mélange en ligne et le mélange aléatoire pour la dilution 1S:5R.

Dans un mélange variétal dans lequel une des variétés est résistante à toutes les souches de l'agent pathogène, les principaux mécanismes permettant de réduire l'impact de maladie sont l'effet de dilution par la distance entre les plantes sensibles et l'effet de barrière créé par cette variété résistante.

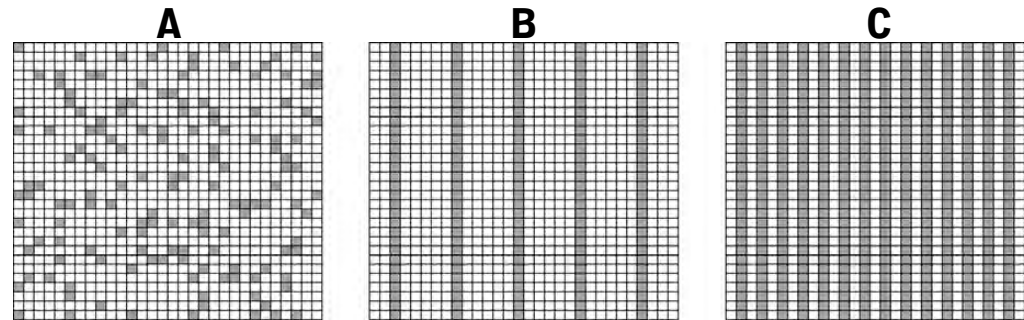


Figure 5 : Différentes modalités de mélange testées

- (A) mélange aléatoire de 1 poquet de variété Sensible pour 5 poquets de variété Résistante (1S:5R)
 (B) mélange en ligne avec 1 ligne de la variété Sensible pour 5 lignes de la variété Résistante (1S:5R)
 (C) mélange en ligne avec 1 ligne de la variété Sensible pour 1 ligne de la variété Résistante (1S:1R)

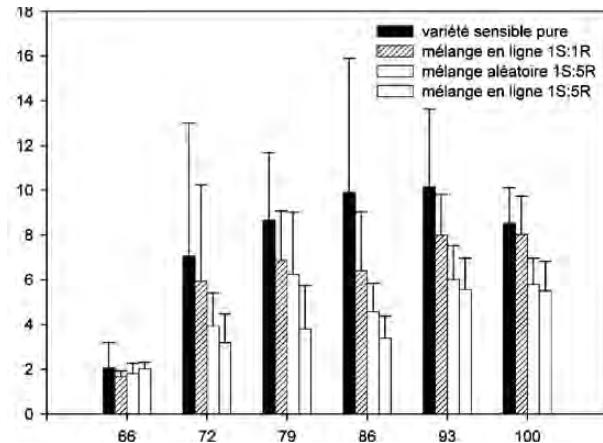


Figure 6 : Évolution de la sévérité de la pyriculariose sur feuille en fonction des différentes modalités de mélange (Raboin *et al.*, 2012)

COMPARAISON DE L'IMPACT SUR LA PYRICULARIOSE DE MÉLANGES VARIÉTAUX A DEUX COMPOSANTES (1S:4R) IMPLIQUANT DIFFÉRENTES COMBINAISONS DE VARIÉTÉS

En 2011-2012, deux variétés sensibles (F154 très sensible et F152 sensible) ont été testées en combinaison soit avec une variété résistante (F172), soit avec une variété tolérante (Chhomrong Dhan = ChhD), une ligne de riz de la variété sensible étant intercalée toutes les 4 lignes de résistant. Chacune des quatre variétés a aussi été cultivée en culture pure. Sur la combinaison très sensible x résistant, un test d'orientation des lignes a été réalisé : la disposition avec des lignes perpendiculaires au vent dominant a été comparée avec celle constituée de lignes parallèles au vent dominant.

L'essai comprenait donc 9 traitements : F154/F172, F152/ChhD, F154/F172 « perpendiculaire au vent », F152/F172, F154 pure, F152 pure, ChhD pure, F172 pure et F154/F172 « sens du vent ».

Les Figures 7 et 8 résument les résultats des suivis de pyriculariose dans la culture pure, dans les mélanges avec F172 et dans les mélanges avec ChhD pour les deux variétés sensibles testées, F154 et F152 durant la campagne 2011-2012.

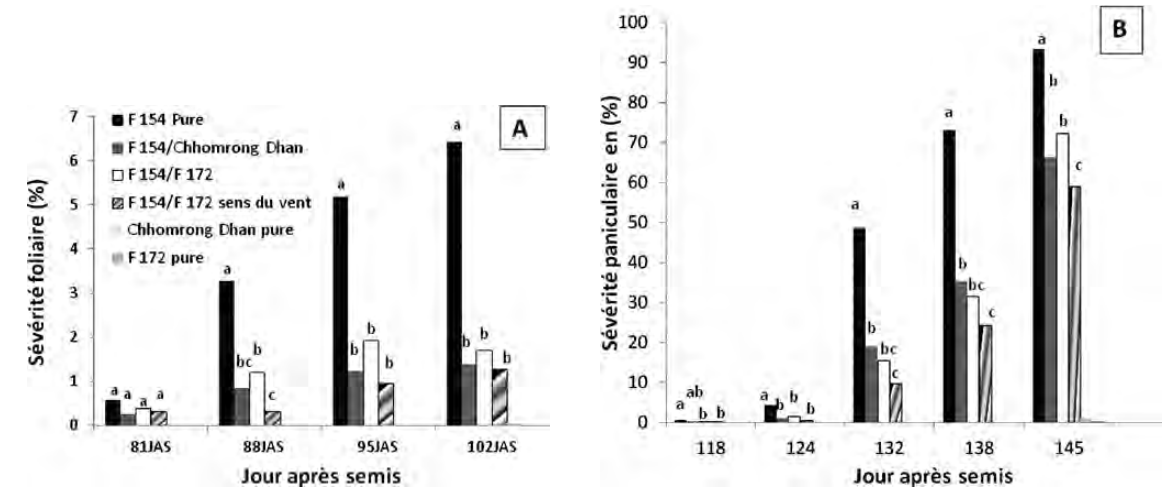


Figure 7 : Évolution de la pyriculariose foliaire (A) et paniculaire (B) sur la variété F154 en mélange ou en pure et sur les variétés Chhomrong Dhan et F172 pures
 A chaque date, les traitements portant la même lettre ne sont pas significativement différents (Rakotonandrasana, 2012)

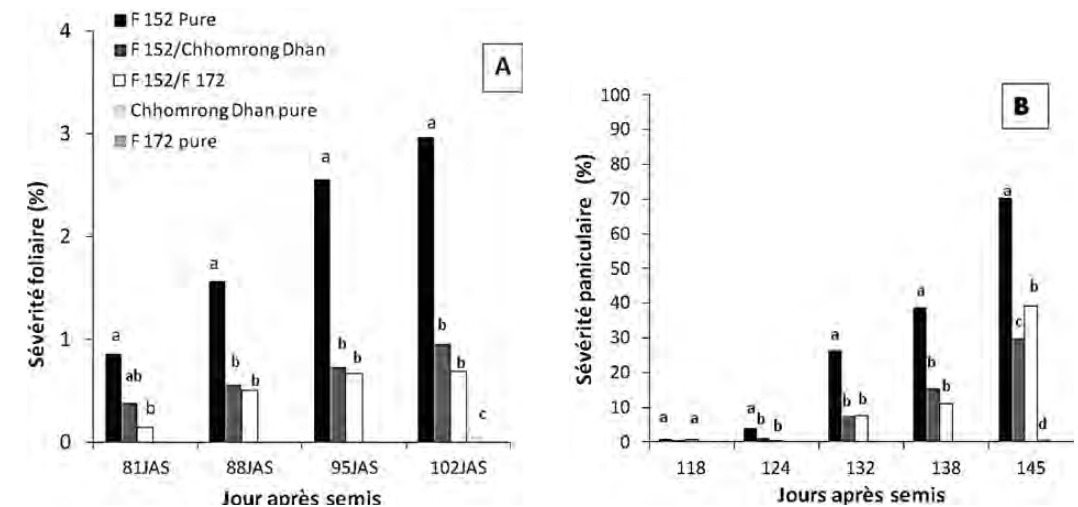


Figure 8 : Évolution de la pyriculariose foliaire (A) et paniculaire (B) sur la variété F152 en mélange ou en pure et sur les variétés Chhomrong Dhan et F172 pures
 A chaque date, les traitements portant la même lettre ne sont pas significativement différents (Rakotonandrasana, 2012)



La diminution de la sévérité est particulièrement spectaculaire pour la pyriculariose foliaire, pour les deux variétés sensibles, dans les mélanges par rapport à leur culture pure (réduction de 60 %). La diminution de la sévérité pour la pyriculariose paniculaire est également significative et très importante de la deuxième à l'avant-dernière date de notation (réduction de 50 à 60 % à 138 jours après semis). Pour la dernière date, si les différences semblent un peu s'atténuer, une attaque aussi tardive de pyriculariose aura un faible impact sur le rendement car les grains sont déjà en grande partie remplis. Le niveau de pyriculariose foliaire ou paniculaire n'est pas différent sur la variété sensible que ce soit en mélange avec F172 qui est totalement résistante ou en mélange avec ChhD qui est seulement tolérante (elle présente un faible niveau de maladie). En revanche, et c'était attendu, le niveau de pyriculariose est beaucoup plus élevé sur F 154 (très sensible) que sur F 152 (sensible) quels que soient les traitements observés.

Pour l'effet du sens des lignes, contrairement à nos attentes, il semble que les mélanges avec les lignes dans le même sens que le vent dominant ne sont pas particulièrement désavantagés par rapport aux mélanges classiques perpendiculaires au vent dominant. Cela peut-être dû au fait que le vent est très variable dans la zone donc la notion de vent dominant n'est pas particulièrement importante pour le choix de l'orientation des lignes.

Tableau 2 : Rendements en t/ha des variétés sensibles en mélange variétal et en pure campagne 2011-2012

Variété	Rendement
F 152 pure	0,7576 b
F 152/F 172	1,9875 a
F 152/Chhomrong Dhan	1,2785 ab
F 154 pure	0,1465 c
F 154/F 172	0,7379 a
F 154/Chhomrong Dhan	0,4841 b

Tableau 3 : Le rendement en t/ha des variétés résistantes en mélange variétal et en pure campagne 2011-2012

Variété	Rendement
F 172 pure	3,8565 a
F 152/F 172	4,2857 a
F 154/F 172	4,2401 a
ChhomrongDhan pure	4.1572 a
F 152/Chhomrong Dhan	5,0531 a
F 154/Chhomrong Dhan	4,5856 a

L'effet du mélange est significatif sur le rendement de chaque variété sensible : un meilleur rendement est obtenu sur les parcelles mélanges que sur les parcelles avec la variété sensible cultivée en pure (tableau 2). Pour F152, les mélanges (F152/F172 et F152/ChhD) ont des rendements équivalents mais significativement supérieurs à F152 pure. Pour F154, les trois modalités de traitement sont toutes différentes du point de vue rendement : la variété en pure a le rendement le plus médiocre (0.1465 t/ha) en relation avec la forte pression de pyriculariose, suivi de F154/ChhD (0.4841 t/ha) et le meilleur rendement est observé sur F154 en mélange avec F172 (0.7379 t/ha) (tableau 2). Ces classements reflètent la combinaison de l'effet de protection vis-à-vis de la pyriculariose dû au mélange qui est sensiblement du même ordre avec Chhomrong Dhan ou avec F 172 comme on l'a vu précédemment et de l'effet défavorable de la compétition qui est plus fort avec la variété Chhomrong Dhan qu'avec la variété F 172.

D'après le tableau 3, on constate que les rendements de la variété résistante F 172 et de la variété tolérante Chhomrong Dhan n'étaient pas significativement différents entre les parcelles en pure et en mélange. Néanmoins il faut relever que les rendements les plus faibles sont toujours dans les parcelles pures ce qui semble indiquer que la composante résistante bénéficie des relations de compétition avec la composante sensible des mélanges.

COMPARAISON DE L'IMPACT SUR LA PYRICULARIOSE D'UN MÉLANGE DE DEUX VARIÉTÉS DE RIZ (1S:4R) ET D'UNE ASSOCIATION INTERSPÉCIFIQUE RIZ-HARICOT

En 2012-2013, seule la variété très sensible a été conservée (F 154) et testée en mélange avec soit une variété résistante (F 172), soit une variété tolérante (F 173), mais aussi en association avec du haricot, afin d'évaluer la part de l'effet barrière exercé par la variété résistante de riz et le dissocier du simple effet d'éloignement des sensibles entre eux. Ces 4 traitements (F 154 pure, F154/F 172, F 154/173 et F 154/haricot) ont été testés dans deux conditions de fertilisation : fumier seul (Fu, Figure 7), proche des conditions paysannes, ou fumier + fertilisation minérale (fertilisation habituelle (FM, Figure 9). Des notations dynamiques de pyriculariose ont été réalisées sur feuilles et sur panicules. Les composantes du rendement à la récolte ont aussi été évaluées.

D'après la Figure 9, l'effet du mélange sur l'évolution des épidémies de pyriculariose a de nouveau été très important en 2012-2013. La pyriculariose foliaire est réduite d'environ 60 % à la dernière date de notation alors que la pyriculariose paniculaire est réduite d'environ 50 % à l'avant dernière date. Les différences entre les modalités de mélange sont toujours très minimes, même si la variété F 173 n'est pas complètement

résistante à la pyriculariose. En revanche le niveau de pyriculariose était significativement plus faible sur F 154 en association avec le haricot à la dernière date d'évaluation sur panicules. Il faut remarquer que les conditions microclimatiques sont probablement différentes dans l'association et dans le mélange. Le riz étant plus haut que le haricot. Les panicules de la variété sensible de riz sont donc plus exposées au vent et au soleil dans l'association que dans le mélange ce qui doit diminuer le niveau d'humidité et pourrait contribuer à diminuer l'impact de la pyriculariose.

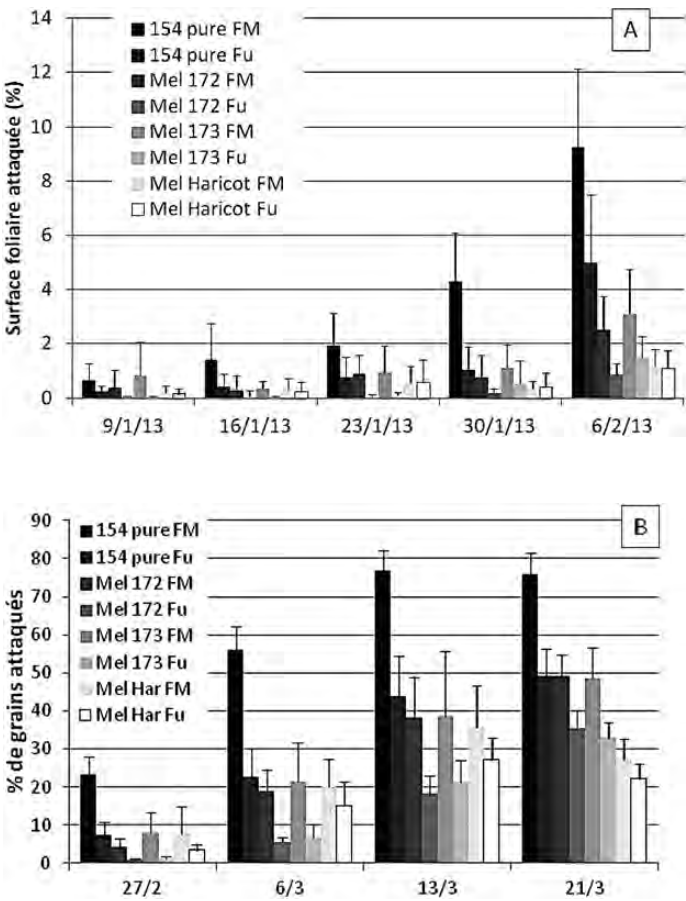


Figure 9 : résultats des suivis dynamiques de la pyriculariose foliaire (A) et paniculaire (B) pour la variété F154 cultivée en pure ou en mélange avec F172, F173 ou en association avec du haricot

Les barres représentent l'erreur standard

Fu : Fumier seul
FM : Fumier + fumure Minérale

Tableau 4 : Résultats des analyses statistiques de la sévérité paniculaire de la pyriculariose et des composantes du rendement mesurées à la récolte sur la variété F154 en fonction des conditions de sa croissance en 2012-2013

	Nombre de parcelles	Rendement F154 (sensible)	Classement des moyennes	Severité au niveau parcelle	Nb plants (10 poquets)	Nb talles (10 poquets)	Nb talles fertiles (10 poquets)	Nb epillets par m²	Taux de fertilité	Poids de mille grains	Nb grains par panicule	Rendement autre composante
Moyennes par type de mélange												
F 154/F 172	9	1186	a	41	53	211	136	12571	44,3	26.0	36.8	3521
F 154/Haricot	9	1142	a	25	53	227	181	17260	34,8	25.6	37.7	1374
F 154/F 173	9	958	a	39	43	178	117	10933	44,8	25.1	38.5	5960
F 154 pure	9	256	b	60	55	230	144	11446	19,2	19.1	32.5	-
Moyennes par type de fumure												
Avec fumure minérale	811	50	53	224	149	50	12741	30.7	24.3	34.3	-	
Sans fumure minérale	945	35	49	201	141	35	13302	39.8	24.2	38.0	-	
Test des facteurs évalués												
Effet du mélange	****	****	*	**	****	*	****	*	****	*	ns	-
Effet de la fumure	ns	****	ns	**	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	-
Interaction	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-

****, ***, ** et * respectivement significatifs aux seuils de 0.0001, 0.001, 0.01 et 0.05.
ns : nonsignificatif.

D’après le Tableau 4, le mélange a un effet hautement significatif sur le rendement de la variété F 154 qui passe d’une moyenne de 256 kg/ha en culture pure à 1186 kg/ha en mélange avec F 172. L’association avec le haricot a les mêmes conséquences sur le rendement que la culture en mélange de variétés. Cet effet est lié à la fertilité qui est nettement améliorée en mélange (de 19,2 % de grains pleins à 44,3 % en mélange avec F 172) mais aussi par un meilleur remplissage des grains visibles (augmentation du PMG = poids de mille grains). Si l’on compare les deux variétés de riz pluvial qui ont été associées à F 154, on constate qu’elles ont le même effet bénéfique sur F 154 mais F 173 est nettement plus productive que F 172. Dans les associations avec le haricot, la variété sensible se développe mieux car il y a moins de compétition. A l’inverse dans le mélange avec F173 la compétition est défavorable à F154 (en nb de talles et nb épillets par m²).

Contrairement à ce que l’on aurait pu attendre du fait de la moindre sévérité de la pyriculariose et du meilleur développement du riz dans l’association avec le haricot, le rendement obtenu sur la variété sensible n’est pas meilleur que dans les mélanges avec F173 et F172. Ce résultat est sûrement dû à un

changement du microclimat autour de la ligne sensible qui est plus exposée, ce qui est probablement défavorable au développement de la pyriculariose comme on l’a évoqué plus haut mais peut provoquer une augmentation de la stérilité liée au froid (10 points de fertilité en moins de F154 en association avec le haricot par rapport à cette même variété en mélange avec F173 et F172 alors qu’il y a moins de pyriculariose).

Biodiversité et pyriculariose en milieu réel

ÉTAT DE LA DIVERSITÉ VARIÉTALE
DU RIZ PLUVIAL SUR LES HAUTES TERRES

La riziculture pluviale d’altitude a connu un développement extrêmement rapide, en particulier dans la région du Vakinankaratra, entre les villes d’Antsirabe et d’Ambatolampy (70 km au Nord), où les efforts de recherche et de diffusion se sont concentrés. Deux enquêtes réalisées à 6 ans d’intervalle dans seize villages du Vakinankaratra situés au dessus de 1250 m, ont permis de mesurer cette progression. En 2011, 71 % des paysans pratiquaient la riziculture pluviale alors qu’ils n’étaient que 32 % en 2005 (Raboin *et al.*, 2014). Avant la diffusion des premières variétés tolérantes au froid en 1995, la culture du riz pluvial était même inexistante à ces altitudes.

L’absence de variétés de riz pluvial suffisamment tolérantes au froid pour être cultivées à des altitudes supérieures à 1 250 m, a conduit au milieu des années 80 au lancement d’un programme de création variétale ciblant cette écologie. Le partenariat qui s’est développé entre le centre national de recherche appliqué au développement rural (FOFIFA) et le centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) pour atteindre cet objectif, se poursuit encore aujourd’hui.

Une quinzaine de variétés de riz pluvial tolérantes au froid ont ainsi été sélectionnées et proposées à la diffusion (Tableau 4). Elles ont permis de repousser la frontière de la culture du riz pluvial au-delà de 1800 m d’altitude (Raboin *et al.*, 2013).

Les premières variétés issues du programme de sélection ont permis le démarrage de la culture du riz pluvial en altitude. Mais le paysage des variétés utilisées par les paysans a été complètement bouleversé entre 2005 et 2011 (Tableau 5). En 2005, les variétés les plus cultivées étaient FOFIFA 154 (53 % d’utilisateur), FOFIFA 133 (21 % d’utilisateur), FOFIFA 134 (10 % d’utilisateurs) et FOFIFA 152 (7 % d’utilisateurs). En 2011, la variété Chhomrong Dhan était devenue de loin la plus cultivée avec 88.4 % d’utilisateurs et 82,5 % des surfaces consacrées à la riziculture pluviale.

Les premières variétés FOFIFA 152, FOFIFA 154, FOFIFA 133 et FOFIFA 134 n’étaient plus utilisées que par 15.4 %, 7.6 %, 2.6 % et 0.3 % des utilisateurs, respectivement. Ces premières variétés sont toutes devenues sensibles à la pyriculariose. FOFIFA 152, qui reste utilisée par les paysans, est la moins sensible d’entre elles. Le renouvellement variétal s’est fait au profit presque exclusif de la variété Chhomrong Dhan qui devient hégémonique dans le paysage. Chhomrong Dhan est une variété irriguée d’origine népalaise introduite à Madagascar comme parent pour réaliser des croisements dans le cadre du programme de création variétale mais qui a montré une très bonne adaptation à la culture pluviale en altitude. Elle a donc été sélectionnée et diffusée à partir de 2006.



Tableau 5 : Pourcentage des paysans qui utilisent chacune des variétés de riz et pourcentage de la surface totale en riz pluvial de chaque variété selon les enquêtes conduites en 2005-2006 et 2011-2012. (Raboin *et al.*, 2014)

Nom de la variété	Début diffusion	% des paysans enquêtés en 2005-2006	% des paysans en 2011-2012	% des surfaces en 2011-2012
FOFIFA 133	1994	21	2.6	1.9
FOFIFA 134	1994	10	0.3	0.5
FOFIFA 151	1995	0	0	0
FOFIFA 152	1995	7	15.4	8.5
FOFIFA 153	1995	0	0	0
FOFIFA 154	1995	53	7.6	3.7
FOFIFA 157	2000	0	0	0
FOFIFA 158	2000	0	0	0
FOFIFA 159	2000	0	1.5	0.5
FOFIFA 161	2003	0	2.6	1.2
FOFIFA 167	2005	-	0	0
FOFIFA 168	2005	-	0	0
FOFIFA 169	2005	-	0	0
FOFIFA 171	2006	-	0	0
FOFIFA 172	2006	-	0.3	0.1
Chhomrong Dhan	2006	-	88.4	82.5

L'expansion de la riziculture pluviale repose donc maintenant sur la culture d'une variété ultra dominante. Cette faible diversité génétique augmente la vulnérabilité de la riziculture pluviale aux maladies, agresseurs et même aux stress abiotiques. Il est donc indispensable de diversifier l'offre de variétés et de proposer de nouvelles stratégies pour optimiser l'utilisation de cette diversité à l'échelle des parcelles ou du paysage.

ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES POPULATIONS DE PYRICULARIOSE À Madagascar

L'amélioration variétale dépend largement de la connaissance de la variabilité du pouvoir pathogène et de la diversité génétique des populations de *M. oryzae*. Les populations de *M. oryzae* de Madagascar ont déjà fait l'objet de différentes études. Notteghem (1983) a utilisé quelques souches collectées sur la riziculture à Madagascar pour différents tests de maîtrise de la culture de *M. oryzae* et d'inoculation artificielle du riz. Deux populations collectées à Andranomanelatra en 2004 et en 2005, composées de 67 et 88 isolats de *M. oryzae*, ont été caractérisées avec 18 marqueurs moléculaires microsatellites (Adreit *et al.*, 2007). Andriantsimalona et Tharreau (2008) ont comparé des souches de *M. oryzae* provenant de riz irrigués et de riz pluviaux et collectées dans le Vakinankaratra. Leurs résultats montrent que les souches de riz pluvial semblent résulter d'une adaptation génétique des souches de riz irrigué.

Saleh *et al.*, (2013) ont étudié la diversité génétique de 55 populations de *M. oryzae* venant de 15 pays dans le monde. Leurs résultats montrent que les populations de *M. oryzae* de Madagascar sont plus proches des populations d'Indonésie.

Les suivis de réponse de variétés différentielles vis-à-vis de populations naturelles de pyriculariose ont été effectués durant les campagnes 2012-2013 et 2013-2014. Les réactions de ces variétés sont présentées dans le Tableau 6 et montrent que 10 sur les 18 variétés différentielles en 2013 et 8 sur les 18 variétés différentielles en 2014, ont des réponses sensibles vis-à-vis des populations de souches existantes aux alentours du dispositif, ce qui montre qu'un grand nombre de gènes de résistance à la pyriculariose sont déjà contournés par les souches de *Magnaporthe* présentes à Madagascar.

Tableau 6 : Réaction des variétés différentielles vis-à-vis des populations naturelles de pyriculariose

Lieu de suivi		Andranomanelatra	
Année de suivi		2013	2014
Variété	Gène de résistance	Sensibilité à la pyriculariose	
Co 39	<i>Témoin</i>	S	S
C104 lac	<i>Pi 1</i>	S	S
Zenith Acc32558	<i>Pi(a + z)</i>	S	S
Kanto 51	<i>pik</i>	S	S
K3	<i>Pikh</i>	S	S
K60	<i>Pikp</i>	S	S
K2	<i>Pikp + a</i>	S	S
K59	<i>Pit</i>	S	S
Fukunishiki	<i>Pish + z</i>	S	R
K1	<i>Pita</i>	S	R
C101 A51	<i>Pi2 = Piz5</i>	R	R
Fujisaka N°5	<i>Pi1 + ks</i>	R	R
IR 1529	<i>Pi33</i>	R	R
Pi n°4	<i>Pita2</i>	R	R
Toride 1	<i>Pizt</i>	R	R
75-1-127	<i>Pi 9</i>	R	R
C101 lac	<i>Pi(1 + 1b + 33)</i>	R	R
CT 13432-3R	<i>Pi(1 + 2 + 33)</i>	R	R

IMPACT DE LA PYRICULARIOSE SUR LA VARIÉTÉ CHHOMRONG DHAN EN MILIEU PAYSAN

Chhomrong Dhan est la variété la plus cultivée par les paysans en riziculture pluviale sur les Hautes Terres de la région du Vakinankaratra. Cependant, cette variété n'est pas complètement résistante à la pyriculariose. La présence de symptômes sur cette variété durant la campagne 2011-2012 sur les essais expérimentaux, nous a conduit à faire des suivis de niveau d'attaque de pyriculariose sur cette variété en milieu réel.

Durant la campagne 2012-2013, 82 parcelles paysannes cultivées avec la variété Chhomrong Dhan ont été suivies pour la pyriculariose foliaire. Les observations ont montré que des symptômes ont été relevés dans 12 parcelles sur les 82 visitées mais avec des sévérités très faibles en général. Concernant la pyriculariose paniculaire, en focalisant sur les sites où la présence d'attaque foliaire est importante, 21 parcelles paysannes ont été suivies. Seulement 5 parcelles paysannes présentaient une attaque de pyriculariose paniculaire. Une de ces parcelles paysannes présentait une sévérité paniculaire de 7,87 % ce qui est un niveau d'attaque important pour cette variété.

Toutes ces parcelles sont réparties dans 16 sites dans la région du Vakinankaratra, la Figure 10 présente la présence d'attaque de pyriculariose sur la variété Chhomrong Dhan dans ces sites. Des attaques de pyriculariose plus ou moins élevées ont été recensées sur 3 sites suivis. Six sites présentaient des symptômes de la maladie mais les nombres de lésions relevés étaient très faibles ; la sévérité était donc pratiquement nulle. Sur le reste des sites, aucune attaque de pyriculariose n'a été observée. Globalement, le niveau d'attaque de pyriculariose sur cette variété reste faible mais il faudra surveiller l'évolution de la sévérité en milieu paysan sur cette variété au cours du temps.

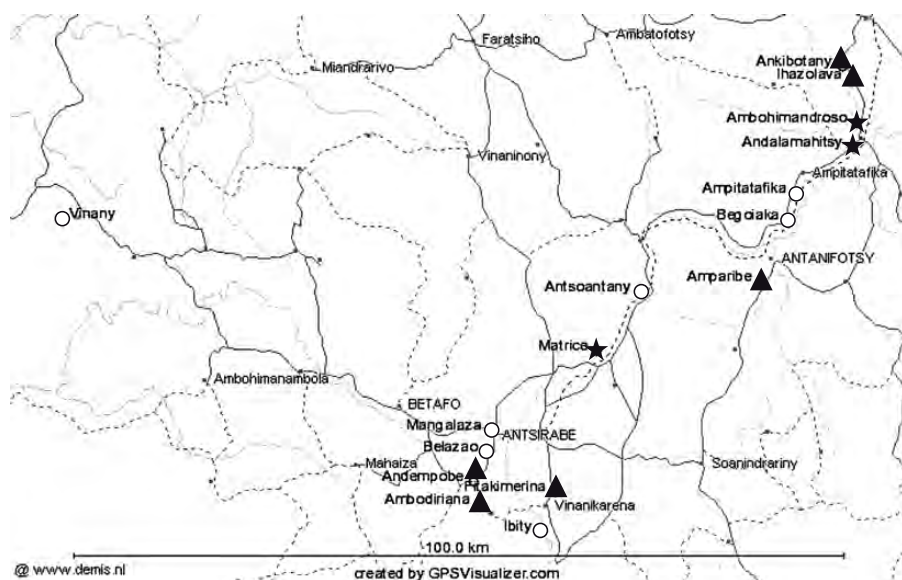


Figure 10 : Pyriculariose sur la variété Chhomrong Dhan dans les 16 sites suivis en milieu réel campagne 2012-2013

Sites ○ : absence d'attaque de pyriculariose sur les parcelles suivies, sites ▲ : présence de symptômes de pyriculariose au moins sur une de parcelle suivie sur la variété mais sans notation, et sites ★ : parcelles infectées avec notation de sévérité de la pyriculariose

EFFET DES MÉLANGES VARIÉTAUX EN MILIEU PAYSAN

Résultats de la campagne 2011-2012

Durant la campagne 2011-2012, des tests en milieu réel du mélange variétal (1S:4R) de F 154 (sensible) et de F 172 (résistante) comparé avec F 154 pure ont été conduits. 20 dispositifs ont été mis en place dans la région du Vakinankaratra. Des notations de pyriculariose foliaire et paniculaire ont été faites en suivant le même principe de mesure que celui effectué en dispositif expérimental. D'après les suivis, 10 dispositifs

installés en milieu paysan ont montré des symptômes de pyriculariose. Les attaques variaient de 0,001 % à 3,15 % de surface foliaire nécrosée, et de 0,09 % à 75,80 % de grains malades. Ces niveaux d'infestation sont généralement beaucoup plus faibles que ceux observés en milieu contrôlé. Ceci peut s'expliquer par la faible utilisation d'intrants en milieu paysan, notamment l'azote, qui est connu pour favoriser la maladie. En présence d'attaque de pyriculariose, il a été trouvé que les parcelles cultivées en pure sont plus touchées par la maladie que les parcelles cultivées en mélange (Figure 11). Le niveau de sévérités foliaire et paniculaire dans le dispositif 7 le plus attaqué illustre bien cette différence. Dans ce dispositif, la sévérité de la pyriculariose foliaire sur F 154 est de 3,15 % pour la parcelle cultivée en pure et 1,21 % pour la parcelle cultivée en mélange. La sévérité de la pyriculariose paniculaire sur F 154 est de 75,80 % pour la parcelle cultivée en pure et 34,93 % pour la parcelle cultivée en mélange. La même tendance de réduction d'attaque de la pyriculariose dans les parcelles en mélange est observée dans tous les dispositifs touchés par la maladie.

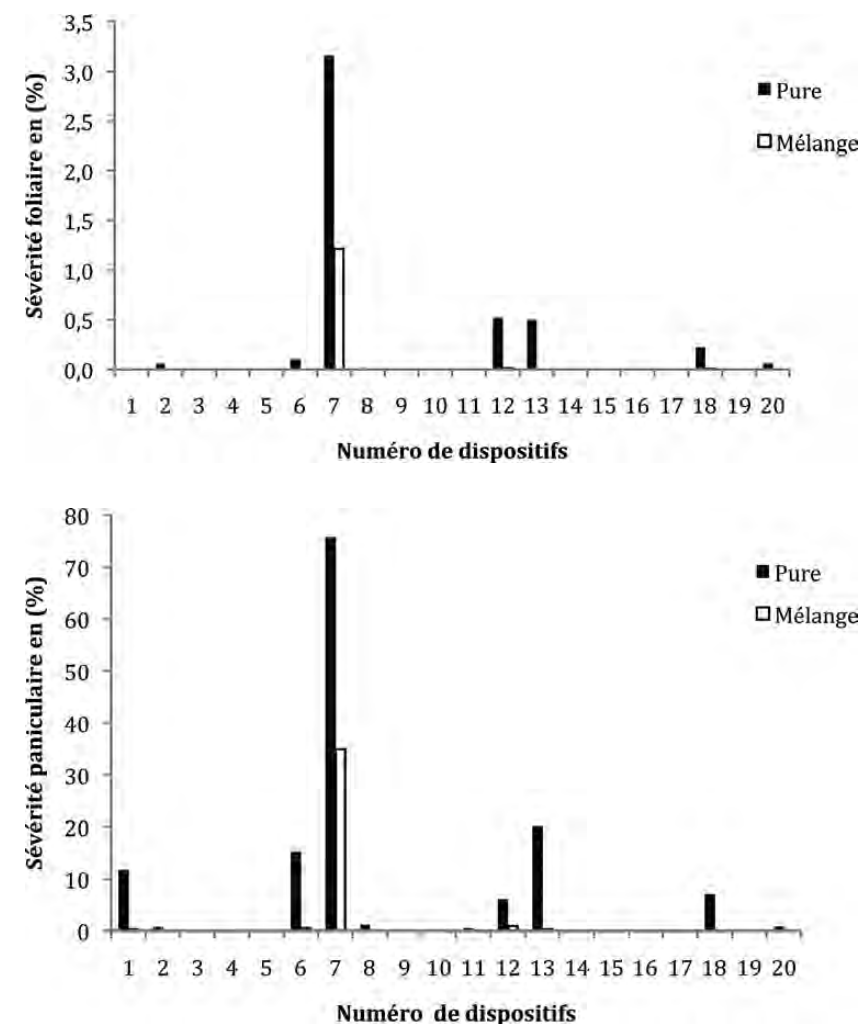


Figure 11 : Sévérité de la pyriculariose foliaire (haut) et paniculaire (bas) sur F 154 cultivé pure ou en mélange F 154/F 172 dans les dispositifs en milieu paysan en 2011-2012



Mélange variétal en milieu paysan campagne 2012-2013T

Durant la campagne 2012-2013, des tests du mélange variétal (1S:4R) de F 154 (très sensible) et de F 173 (tolérante) comparé avec F 154 pure ont été conduits en milieu réel. Vingt dispositifs ont été mis en place dans la région du Vakinankaratra mais l'un d'entre eux n'a pas été suivi. Des notations de pyriculariose foliaire et paniculaire ont été faites dans les 19 dispositifs. Les résultats de sévérité de la maladie sont représentés dans la Figure 12. Parmi les 19 dispositifs suivis, 9 ont montré de symptômes de pyriculariose foliaire et 8 ont montré de symptômes de pyriculariose paniculaire. L'efficacité de mélange variétal a été confirmée durant cette campagne même en utilisant une variété tolérante. Les parcelles cultivées en pure présentaient toujours un niveau d'attaque de pyriculariose plus élevé par rapport aux parcelles cultivées en mélange sur la variété sensible.

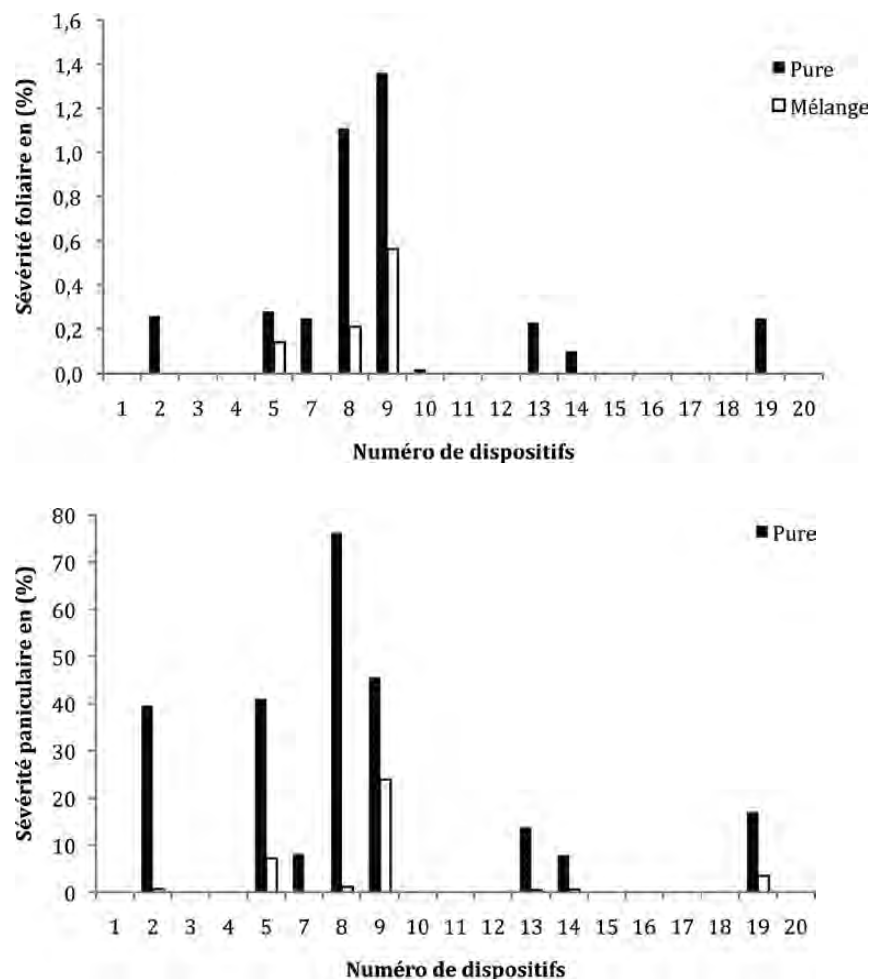


Figure 12 : Sévérité de la pyriculariose foliaire (haut) et paniculaire (bas) sur F 154 cultivé pure ou en mélange F 154/F 173 dans les dispositifs en milieu paysan en 2012-2013

La pyriculariose se trouve un peu partout dans les zones rizicoles de la région du Vakinankaratra mais avec un taux d'infestation relativement faible ce qui confirme l'enquête réalisée sur Chhomrong Dhan (ci-dessus).

Les résultats ont montré clairement que le mélange variétal réduit le niveau de maladie sur la variété sensible mélangée avec une variété résistante dans les conditions paysannes. Toutefois, cet effet du mélange sur la maladie ne s'est pas traduit par un effet mesurable sur les rendements à cause de la grande variabilité des conditions en milieu paysan.

APPRÉCIATION DES PAYSANS SUR LES MÉLANGES VARIÉTAUX

Une enquête post-récolte a été menée pour connaître l'avis des paysans sur ces expérimentations. Les résultats sont très intéressants car l'expérimentation a permis de valider que le mélange variétal diminue la sévérité foliaire et paniculaire de la pyriculariose sur une variété sensible dans les conditions des petites exploitations paysannes.

Cependant son adoption en milieu réel se trouve encore confrontée à plusieurs obstacles. D'une part, l'impact de l'atténuation de l'épidémie par le mélange variétal ne se reflète pas sur le rendement, alors que le rendement est le principal souci des paysans. D'autre part, le mélange variétal rencontre quelques problèmes pratiques, notamment à cause de la différence de longueur de cycle entre les variétés du mélange (cas de F154 précoce et F173 tardive) ce qui complique la récolte selon les paysans enquêtés.

La concurrence éventuelle entre les deux variétés a aussi été évoquée. Par ailleurs, dans les enquêtes post-récoltes il a aussi été constaté que les paysans apprécient plus la variété tolérante FOFIFA 173 (100 % des paysans enquêtés) que la variété sensible FOFIFA 154 (44 % des paysans enquêtés). La variété tolérante a donné un rendement significativement meilleur que la variété sensible. Les paysans se demandaient alors pourquoi cultiver une variété moins productive et sensible à la pyriculariose. Le concept de « diversification génétique pour une résistance plus durable » est encore assez difficile à comprendre pour les paysans.

Conclusion et perspectives

Le développement et l'extension rapide de la riziculture pluviale dans certaines régions de Madagascar permettraient de contribuer à l'augmentation de la production du riz. Cependant, la pyriculariose, maladie fongique causée par un champignon appelé *Magnaporthe oryzae*, est une menace permanente pour le riz pluvial. Le projet GIPYRI/PARRUR a apporté de nouveaux éléments qui devraient contribuer à améliorer les stratégies de lutte contre cette maladie.

La construction et la mise en œuvre d'un nouveau laboratoire de phytopathologie à la Station Régionale de Recherche d'Antsirabe a permis de mettre au point la technique d'inoculation artificielle qui permettra à la fois d'étudier la diversité des populations de l'agent pathogène de la pyriculariose et de mieux caractériser la résistance de variétés. Ces informations seront précieuses à l'avenir pour le programme d'amélioration génétique du riz pluvial et pour optimiser les choix de variétés à associer dans les mélanges.



L'effet des mélanges de variétés sur la diminution des épidémies de pyriculariose a été bien confirmé au cours de ce projet aussi bien en conditions contrôlées qu'en conditions paysannes. Il a été montré que l'utilisation d'une variété tolérante a un effet comparable à celui d'une variété résistante dans un mélange binaire avec une variété sensible. Il a été aussi montré qu'une association interspécifique (riz et haricot) peut avoir un effet au moins aussi fort sur la diminution de la pyriculariose qu'un mélange de variétés de riz pour un niveau de dilution identique de la variété sensible. Néanmoins, pour le moment les modèles expérimentaux que nous avons testés étaient des mélanges simples à deux variétés (une résistante ou tolérante avec une sensible). Les variétés sensibles utilisées (F 152 ou F 154) bien qu'ayant été appréciées par le passé pour leur type de grain et leur goût sont désormais beaucoup moins performantes (indépendamment de leur sensibilité à la pyriculariose) que les variétés nouvelles tolérantes à la pyriculariose proposées aux paysans. Les paysans des Hautes Terres ne voient donc pas vraiment l'intérêt d'utiliser ces variétés anciennes y compris dans un mélange, le rendement restant leur objectif numéro et, visent avant tout l'autosuffisance en riz. Le concept et l'approche restent toutefois pertinents et doivent être explorés dans le cadre de mélanges plus complexes avec des variétés ayant toutes un niveau agronomique élevé et bien caractérisées sur le plan de leur résistance. Les mélanges variétaux pourraient permettre de sécuriser la culture du riz pluvial en stabilisant les rendements face aux aléas climatiques et à la pression des pathogènes. Toutefois, toutes les associations de variétés ne sont pas nécessairement bénéfiques ; il existe des phénomènes de concurrence et d'incompatibilité qui peuvent conduire à des interactions défavorables entre les variétés. Ces questions doivent aussi être abordées par la recherche. Enfin, les mélanges variétaux devraient être assez faciles à mettre en œuvre dans le cas d'une petite agriculture familiale où la plupart des opérations culturales sont manuelles.

Remerciements

Ce projet « gestion Intégrée de la pyriculariose du riz pluvial sur les Hautes Terres de Madagascar » est entièrement financé par le Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) Partenariat et Recherche dans le secteur RURAL (PARRUR), géré par le service de coopération et d'action culturelle de l'Ambassade de France à Madagascar.

Ce projet a été mené par différents acteurs : sélectionneurs, phytopathologistes, épidémiologistes et des ingénieurs en collaboration avec des paysans. Il comportait cinq équipes complémentaires permettant de mettre en œuvre les travaux de recherche et de développement proposés et d'assurer un encadrement scientifique :

- Equipe Systèmes de Culture et Rizicultures Durables (SCRiD) CIRAD-FOFIFA à Antsirabe, Madagascar, coordinatrice du projet, a conduit les recherches sur le terrain en s'appuyant sur son dispositif d'expérimentation agronomique au champ basé à Andranomanelatra. Elle a assuré les suivis épidémiologiques et la caractérisation des résistances des variétés et des populations de l'agent pathogène. L'équipe a fourni les variétés de riz pluvial adaptées à la haute altitude et utilisées dans ce projet.
- Unité Mixte de Recherche Biologie et Génétique des Interactions Plantes-Parasites (UMR-BGPI) à Montpellier, France, a assuré l'encadrement scientifique et l'accueil en formation sur l'inoculation artificielle du riz par l'agent pathogène de la pyriculariose ;
- Unité Mixte de Recherche BIOlogie et GEstion des Risques en Agriculture-Champignons Pathogènes des plantes (UMR BIOGER-CPP) à Grignon, France, a assuré l'encadrement scientifique ;

- Projet Bassins Versants et Périmètres Irrigués dans le Sud-Est et sur les Hauts Plateaux (Projet BVPI SE/HP) à Antsirabe, Madagascar, a conduit la mise en place et le suivi des essais de mélanges variétaux multi-locaux en conditions paysannes ;
- Département de diffusion Fiompiana Fambolena Malagasy Norveziana (FIFAMANOR) à Andranomanelatra, Madagascar, a conduit la mise en place et le suivi des essais de mélanges variétaux multi-locaux en conditions paysannes.

Références bibliographiques

- Adreit H., Santoso, Andriantsimalona R.D., Utami D.W., Notteghem J-L., Lebrun M.H. and Tharreau D. 2007 : Microsatellite markers for population studies of the rice blast fungus, *Magnaporthe grisea*. *Molecular Ecology Notes*. doi: 10-1111/j.1471-8286.2006.01672.x.
- Agrios G.N. 2005 : Genetics of plant diseases (Plant Pathology 5th edition), *Elsevier Academic press*. pp: 124-174.
- Andriantsimalona R.D. and Tharreau D. 2008 : Evolution of *Magnaporthe grisea* populations and adaptation to upland rice in the Vakinankaratra region of Madagascar. ENDURE International Conference 2008 *Diversifying crop protection*, 12-15 october 2008. La Grande-Motte, France.
- Ballini E., Morel J-B., Droc G., Price A., Courtois B., Notteghem J-L. and Tharreau D. 2008 : A genome-wide meta-analysis of rice blast resistance genes and QTLs provides new insights into partial and complete resistance. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 21: 859-868.
- Castilla N.P., Willocquet L., Suwarno S., Santoso S., Nasution A., Sulaeman Y., Savary S. and Vera Cruz C.M. 2010 : Assessing the effect of resistant-susceptible associations and determining thresholds for associations in suppressing leaf and neck blast of rice. *Crop protection* 29: 390-400.
- DPV., GTZ., 1990 : Pyriculariose du riz/ Menalavitra, *Fiche technique de la protection des cultures*, Fiche N°2. 5p.
- Ebbola D.J. 2007 : *Magnaporthe* as a model for understanding host-pathogen interactions. *Annual Review of Phytopathology*. 45: 437-456.
- Finckh M.R., Gacek E.S., Goyeau H., Lannou C., Merz U., Mundt C.C., Munk L., Nadziak J., Newton A.C., De Vallavieille-Pope C., Wolfe M.S. 2000 : Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie* 20: 813-837.
- Flor H.H. 1971 : Current status of the gene-for-gene concept. *Annual Review of Phytopathology*, 9, 21.
- Lai X.H., Marchetti M.A. and Petersen H.D. 1999 : Comparative slow-blasting in rice grown under upland and flooded blast nursery culture. *Plant Disease* 83: 681-684.
- McDonald B.A. and Linde C. 2002 : Pathogen population genetics, evolutionary potential, and durable resistance. *Annual Review of Phytopathology*. 40: 349-379.
- Mundt C. C. 2002 : Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annual Review of Phytopathology* 40: 381-410.
- Notteghem J-L. 1983 : *Définition d'une stratégie d'utilisation de la résistance par analyse génétique des relations hôte-parasite*. Cas du couple riz-*Pyricularia oryzae*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay.
- Ou S.H. 1985 : « Blast ». In : S.H. Ou, *Rice Diseases* 2nd edition. Commonwealth Agricultural Bureaux., Slough, UK. p 109-201
- Pennisi E. 2010 : Armed and dangerous. *Science* 327: 804-805.

Raboin L-M., Randriambololona T., Radanielina T., Ramanantsoanirina A., Ahmadi N. and Dusserre J. 2014 ;Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands. *Field Crops Research*, 169: 11-20.

Raboin L-M., Ramanantsoanirina A., Dusserre J., Razasolofonahary F., Tharreau D., Lannou C. and Sester M., 2012 : Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. *Plant Pathology* 61 (6): 1103-1111.

Raboin L-M., Randriambololona T., Radanielina T., Ramanantsoanirina A., Ahmadi N. and Dusserre J. 2014 ;Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands. *Field Crops Research*, 169: 11-20.

Rakotonandrasana, O. M. 2012 : *Impact des mélanges variétaux sur la pyriculariose du riz pluvial cas de la région du Vakinankaratra*. Mémoire de fin d'étude du second cycle. Institut Supérieur Polytechnique de Madagascar. 82 p.

Randriamanantsoa R., Aberlenc H.P., Ralisoa O.B., Ratnadass A. et Vercambre B., 2010 : Les larves des Scarabaeoidea (*Insecta, Coleoptera*) en riziculture pluviale des régions de haute et moyenne altitudes du Centre de Madagascar. *Zoosystema* 32 : 19-72.

Raveloson H., Tharreau D. et Sester M. 2013 : *Les sources d'inoculum primaire de la pyriculariose. Rôle des semences et des pailles infectées dans le développement des épidémies*. 3^e Congrès du riz en Afrique du 21 au 24 octobre 2013 Yaoundé, Cameroun. 9 p.

Ribot C., Hirsch J., Balzergue S., Tharreau D., Nottéghem J.L., Lebrun M.H. and Morel J.B. 2008 : Susceptibility of rice to the blast fungus, *Magnaporthe oryzae*. *Plant Physiology*. 165 (1): 114-24.

Roy Chowdhury M., Jia Y., Jia M. H., Fjellstrom R. and Cartwright R. D. 2012 : Identification of the rice blast resistance gene Pib in the National Small Grains Collection. *Phytopathology* 102: 700-706.

Saleh D., Milazzo J., Adreit H., Fournier E., and Tharreau D., 2013 : South-East Asia is the center of origin, diversity and dispersion of the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae*. *New Phytologist*.

Sesma A. and Osbourne A.E. 2004 : The rice leaf blast pathogen undergoes developmental processes typical of root infecting fungi. *Nature* 431: 582-586.

Sester M., Raboin L.M., Ramanantsoanirina A. and Tharreau D. 2008 : Toward an integrated strategy to limit blast disease in upland rice. *Endure international conference*. Diversifying crop protection. 12-15 October 2008. La Grande Motte, France. 4p.

Sester M., Raveloson H., Tharreau D. and Dusserre J. 2014 : Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice. *Plant Pathology* 63: 373-381.

Skamnioti P. and Gurr S.J. 2009 : Against the grain : safeguarding rice from rice blast disease. *Trends in Biotechnology* 27 (3): 141-150.

UPDR/FAO, 2001 : *Diagnostic et perspectives de développement de la filière riz Madagascar*. FAO/RAFP, Antananarivo.

Valent, B., 1990 : Rice blast as a model system for plant pathology. *Phytopathology*, 80(1), 33-36.

Wolfe M S. 1985 : The Current Status and Prospects of Multiline Cultivars and Variety Mixtures for Disease Resistance. *Annual Review of Phytopathology* 23: 251-273.

Zhu Y., Chen H., Fan J., Wang Y., Li Y., Chen J. et al., 2000 : Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* 406: 718-722.

Zhu Y., Fang H., Wang Y.Y., Fan J.X., Yang S.S., Mew T.W., Mundt C.C. 2005 : Panicle blast and canopy moisture in rice cultivar mixtures. *Phytopathology* 95 : 433-438.

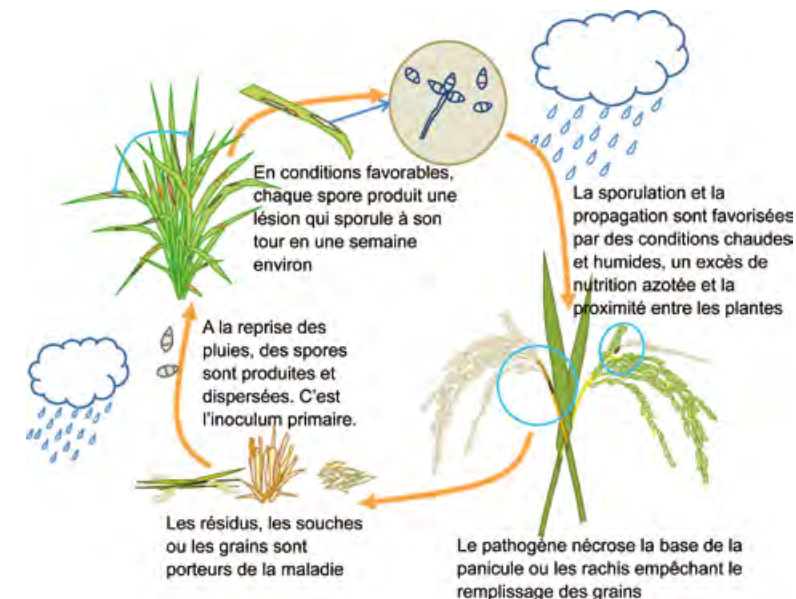


Figure 1 : Cycle épidémique de la pyriculariose (Source : DPV-GTZ)

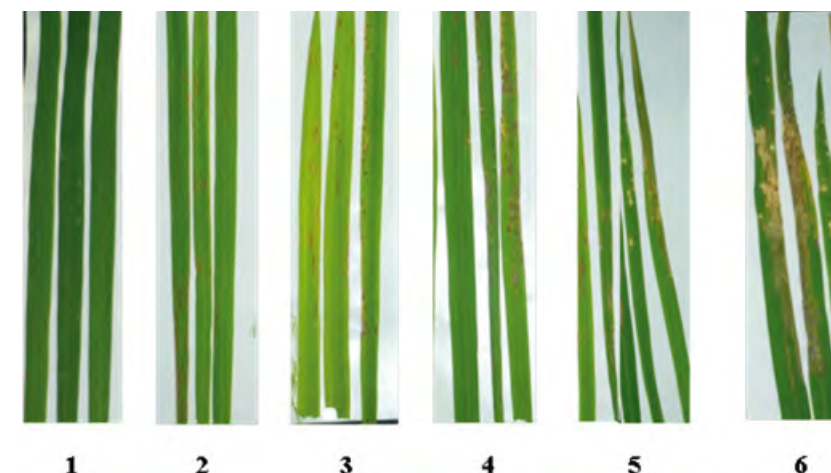


Figure 2 : Echelle de notation des symptômes 7 à 10 jours après l'inoculation en utilisant une échelle de 1 à 6

- 1 : Pas de symptôme ou apparition de décolorations ponctuelles
 - 2 : Présence de nombreuses ponctuations brunes
 - 3 : Présence de lésions à centre différencié de moins de 1 mm de diamètre
 - 4 : Présence de lésions à centre différencié de moins de 2 mm de diamètre
 - 5 : Présence de lésions à centre différencié de plus de 2 mm de diamètre
 - 6 : Apparition de grandes lésions à contour non délimité par une bordure brune.
- (1 à 2 : Variété résistante ; 3 à 4 : Variété moyennement résistante ou sensible ; 5 à 6 : Variété sensible).



(A) Symptômes caractéristiques de la pyriculariose foliaire du riz : lésions fusiformes à centre gris et bord marron foncé



(B) Symptôme caractéristique de la pyriculariose paniculaire avec une nécrose à la base de la panicule qui se dessèche

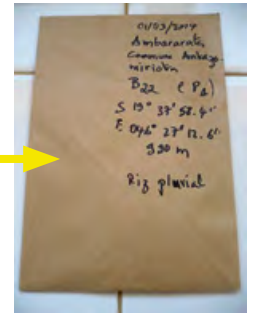


(C) Dispositif expérimental permettant de comparer le développement de la maladie sur une variété sensible cultivée en mélange (au premier plan, 1 ligne de sensible avec 4 lignes de résistant) à la maladie dans les parcelles en sensible pure (à l'arrière-plan)

Figure 3 : Gestion de la diversité variétale du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose



Suivis des épidémies : collectes d'échantillons de feuilles et de panicules malades ; informations sur leur provenance



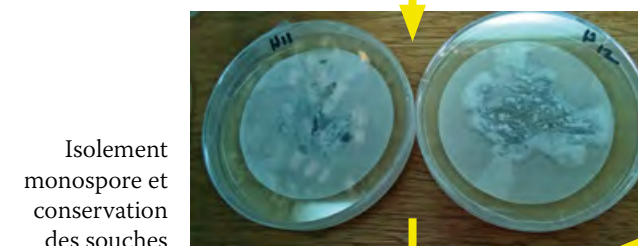
Conservation des échantillons



Mise en sporulation des échantillons



Culture des plantes des variétés à tester



Isolement monospore et conservation des souches



Pulvérisation de l'inoculum



Remise en culture des souches et productions d'inoculum



Incubation à l'obscurité et à très forte humidité relative



Lecture des symptômes sur feuilles 7 à 10 jours après inoculation

Figure 4 : Principales étapes de l'inoculation artificielle du riz en laboratoire pour tester la compatibilité entre souche de *M. Oryzae* et variété de riz

© H. Raveloson



Contrôle intégré du flétrissement bactérien (*Ralstonia solanacearum*) de la pomme de terre dans la région du Vakinankaratra

Integrated control of bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) of potato in the Vakinankaratra region

V.B. RAHETLAH¹
S. H. RAVELOMANANTSOA^{2,4,1}

P. PRIOR^{2,3}

R. RASOLOMAMPIANINA⁵

N. RAKOTOARIMANGA⁵

A.A.B. ANDRIANARISOA⁵

O. ANDRIAMBELOSON⁵

L.H. RAVELOSON RAVELOMANARIVO⁶

H.A. RAZAFINDRALEVA⁶

N. RALISOA¹

B. ANDRIANARISOA⁷

(1) FIFAMANOR, Andranomanelatra, Antsirabe, Madagascar

(2) CIRAD UMR PVBMT, Pôle de Protection des Plantes, Saint-Pierre, La Réunion, France

(3) INRA, Département Santé des Plantes et Environnement, Paris, France

(4) Université de la Réunion, Faculté des Sciences et Technologies, Département de Biologie, UMR PVBMT, Saint-Denis, La Réunion, France

(5) Centre National de Recherches sur l'Environnement, Antananarivo, Madagascar

(6) Département d'Entomologie, Faculté des Sciences, Antananarivo, Madagascar

(7) Département de Biochimie Fondamentale et Appliquée, Faculté des Sciences, Antananarivo, Madagascar

Résumé

Le flétrissement bactérien dû à la bactérie phytopathogène *Ralstonia solanacearum* est une maladie majeure de la pomme de terre dans la région Vakinankaratra, le principal bassin de production. Au cours de ces dernières années, cette maladie est à l'origine de baisses significatives du rendement et de la qualité de la production. Aucune méthode de lutte chimique n'est disponible et les mesures préventives préconisées s'appuient notamment sur le maintien ou le renforcement de la propriété de résistance de la plante hôte. Dans ce cadre, l'étude de la diversité des souches



de *R. solanacearum* présentes dans les zones de production de la pomme de terre de cette région, prérequis pour toute stratégie de lutte génétique a été initiée. La potentialité des microorganismes rhizosphériques et endophytes des pommes de terre à limiter le développement de cette bactérie phytopathogène a également été explorée en vue de la mise au point d'agent de lutte biologique. En outre, l'impact de la diversité entomofaunique des plantations de pomme de terre dans la transmission de *R. solanacearum* a été évalué. La caractérisation moléculaire des souches a révélé que 735 isolats bactériens sont bien assignés à l'espèce *Ralstonia solanacearum*, dont 604 souches tombant dans le Phylotype II et 131 dans le phylotype III. Aucune souche de phylotype I n'a été décrite dans cette étude bien que leur existence soit signalée à Madagascar. L'étude plus poussée des caractéristiques biochimiques a montré que 24 isolats de *R. solanacearum* obtenus à partir de 6 échantillons de sols rhizosphériques de pommes de terre malades appartiennent au biovar 2. Une collection de 77 souches a été constituée à partir de 6 échantillons de sols rhizosphériques et 6 échantillons de matériel végétal de pommes de terre saines dans le district d'Antsirabe II dont 40 Actinomycètes telluriques, 25 Actinomycètes endophytes et 12 *Pseudomonas fluorescents*. L'antagonisme in vitro des isolats d'Actinomycètes et de *Pseudomonas* vis-à-vis des souches de *R. solanacearum* a été mis en évidence par la technique de diffusion sur gélose. Parmi les 77 souches isolées, 12 ont présenté une activité inhibitrice à l'égard de souches de *R. solanacearum* testées. L'inoculation en serre de plant de pomme de terre avec les 4 souches sélectionnées a permis de réduire l'incidence de la maladie jusqu'à 19 % et d'augmenter l'efficacité du biocontrôle (plus de 70 %) pour la souche d'Actinomycète endophyte E7. Cette expérience a permis également d'obtenir une augmentation significative de plus de 45 % de la croissance des plantes. Par ailleurs, de larges groupes d'insectes évoluant dans les plantations de pommes de terre ont été observés dont les lépidoptères en tant que défoliateurs, des hémiptères en tant que piqueur-suceurs et de coléoptères comme foreurs. Les variétés de pomme de terre présentant les plus fortes incidences de la bactériose ainsi que le maximum de nombre de familles d'insectes, dont notamment les coléoptères sont Spunta, Bandy akama et Meva.

Abstract

Bacterial fading due to the bacterium phytopathogene *Ralstonia solanacearum* is a major disease of potato in the area Vakinankaratra, the principal coalfield. During these last years, this disease is at the origin of significant decreases of the output and the quality of the production. No method of chemical fight is available and the recommended preventive measures are based in particular on the maintenance or the reinforcement of the property of resistance of the plant host. Within this framework, the study of the diversity of the stocks of *R. solanacearum* present in the production zones of potato of this area, prerequisite for any genetic fight plan was initiated. The potentiality of the micro-organisms rhizospheric and endophytes of potatoes to limit the development of this bacterium phytopathogene was also explored for the clarification of agent of biological fight. Moreover, the impact of the entomofaunic diversity of the potato plantations in the transmission of *R. solanacearum* was evaluated. The molecular characterization of the stocks revealed that 735 bacterial isolates are well assigned with the species *Ralstonia solanacearum*, from including 604 stocks falling into Phylotype II and 131 in the phylotype III. No stock of phylotype I was described in this study although their existence is announced to Madagascar. More pushed study of the biochemical characteristics showed than 24 isolates of *R. solanacearum* obtained starting from 6 samples of sick potato grounds rhizospheric belong to the biovar 2. A collection of 77 stocks was made up starting from 6 samples of grounds rhizospheric and 6 samples of vegetable healthy potato equipment in the district of Antsirabe II including 40 Actinomycètes telluric, 25 Actinomycètes endophytes and 12 *Pseudomonas fluorescent*. The in vitro antagonism of the isolates of Actinomycètes and *Pseudomonas* with respect

to the stocks of *R. solanacearum* was highlighted by the technique of diffusion on agar. Among the 77 isolated stocks, 12 presented an inhibiting activity with regard to stocks of *R. solanacearum* tested. The inoculation in greenhouse of potato seedling with the 4 selected stocks made it possible to reduce the incidence of the disease up to 19 % and to increase the effectiveness of the biocontrôle (more than 70 %) for the stock of Actinomycète endophyte E7. This experiment also made it possible to obtain a significant increase of more than 45 % of the growth of the plants. In addition, broad groups of insects evolving in the potato plantations were observed of which lepidopterans as défoliateurs, of the hémiptères as stitcher-nozzles and coleopters as borers. Varieties of potato presenting the strongest incidences of the bactériose like the maximum of number of families of insects, whose in particular coleopters are Spunta, Bandy akama and Meva.

Contexte

LA POMME DE TERRE : UNE RESSOURCE STRATÉGIQUE

La pomme de terre occupe une place stratégique dans la politique de sécurité alimentaire à Madagascar, arrivant en quatrième position au niveau national en termes de production après le riz, le manioc et la patate douce (MAEP/UPDR, 2002). Elle contribue, au niveau urbain, à la diversification alimentaire et assure au niveau rural le rôle de complément ou de substitut du riz notamment en période de soudure. La Région Vakinankaratra est la première zone de production où la filière pomme de terre a été identifiée comme « porteuse » et réellement exportée (Rabezandrina, 2007). Malgré les potentialités agricoles de la région Vakinankaratra, des baisses significatives du rendement en pomme de terre ont été enregistrées au cours de ces dernières années dans les différentes régions de production. Cette diminution est attribuée essentiellement à l'incidence particulièrement accentuée des principales maladies dont le mildiou causé par l'oomycète *Phytophthora infestans*, le flétrissement bactérien dû à la bactérie phytopathogène *Ralstonia solanacearum* et la virose de l'enroulement due au virus dénommé Potato Leaf Roll Virus (MAEP/UPDR, 2002).

LE FLÉTRISSEMENT BACTÉRIEN DE LA POMME DE TERRE

Répartition géographique et symptômes

Le flétrissement bactérien dû à la bactérie *R. solanacearum* est quasiment présent dans toutes les zones de production de la pomme de terre de la région Vakinankaratra et sévit surtout pendant la principale saison de culture (saison chaude et pluvieuse). L'incidence du flétrissement bactérien diminue fortement le rendement aussi bien par le flétrissement et la mort brusque du plant de pomme de terre en végétation, que par la détérioration d'une bonne partie de la production, destinée à l'exportation, par le pourrissement des tubercules dans le sol ou pendant le stockage. Les premiers symptômes se manifestent par l'enroulement de quelques folioles, le plus souvent de façon unilatérale, suivi d'un flétrissement du plant entier et d'un rabougrissement. Aux stades plus avancés, la maladie détermine un brunissement des vaisseaux du xylème et un pourrissement des tubercules, caractérisé par la présence d'un anneau vasculaire brunâtre exsudant des amas bactériens (Photo 1).

L'agent pathogène : la bactérie *Ralstonia solanacearum*

Le flétrissement causé par les différents sous-groupes de *R. solanacearum* est une principale maladie de cultures d'importance économique (tomate, pomme de terre, aubergine, géranium...) dans les pays tropicaux, subtropicaux et quelques pays tempérés chauds. *R. solanacearum* constitue un complexe d'espèce qui est



génétiquement structuré en 4 phylotypes correspondant aux souches originaires de l'Asie (phylotype I), du continent américain (phylotype II), de l'Afrique incluant Madagascar et la Réunion (phylotype III) et de l'Indonésie, Japon et Australie (IV) (Fegan et Prior, 2005). *R. solanacearum*, présente un large spectre de plantes hôtes comprenant plus de 200 espèces cultivées ou spontanées appartenant à plus de 50 familles botaniques. Sur la base de la spécificité d'hôtes, les souches de *R. solanacearum* sont historiquement subdivisées en 5 races et sur la base de leurs caractéristiques biochimiques, en 6 biovars (Figures 1 et 2). Les souches de *R. solanacearum* reportées à Madagascar appartiennent au phylotype III, biovar 1 (Lallmahomed *et al.*, 1988).

Dissémination

Le flétrissement bactérien se transmet principalement par la semence, le sol, le plant infecté, les blessures naturelles ou artificielles, les matériels et outillages agricoles contaminés, l'eau de ruissellement et l'eau d'irrigation (Prior *et al.*, 1998).

Moyens de lutte

Puisqu'il n'existe pas de méthode de lutte chimique adaptée l'utilisation de variétés résistantes et la rotation culturale constituent donc pour l'instant les seules mesures préventives de contrôle du flétrissement bactérien généralement utilisées à Madagascar (comme dans le reste du monde). Toutefois, la propriété de résistance des variétés de pomme de terre peut fluctuer. La résistance variétale est généralement spécifique des souches de *R. solanacearum* et son expression est sous l'influence des conditions agro-pédo-climatiques. En outre, la rotation culturale est peu efficace d'autant que les souches de *R. solanacearum* peuvent se conserver longtemps dans les profondeurs des sols ou sur les systèmes racinaires de nombreuses mauvaises herbes. Actuellement, les voies de recherche s'orientent en partie vers les procédés de lutte visant à préserver et/ou renforcer les propriétés de résistance des plantes hôtes et à réduire le potentiel infectieux dans le sol (Prior et Béramis, 1990). Des résultats promoteurs ont notamment été observés aussi bien pour les traitements de sol à base d'amendement organique à haute teneur en azote tels que les engrais verts et les composts (Lemaga *et al.*, 2001 ; Cardoso *et al.*, 2006 ; Rahetlah *et al.*, 2008). Les méthodes alternatives, tels que les agents de lutte biologique, se sont montrées efficaces et ont donc été de plus en plus appliquées dans le domaine (Aliye *et al.*, 2008 ; Xue *et al.*, 2009). La bioprotection conférée par les agents microbiens est basée sur la compétition pour les nutriments essentiels, sur l'activité antagoniste vis-à-vis de la croissance des pathogènes via la production d'antibiotiques ou d'enzymes et/ou sur leur capacité à stimuler des systèmes de défense chez l'hôte végétal. Parmi ces microorganismes antagonistes, les *Actinomycètes* sont les plus connus et classés parmi les plus actifs (Crawford *et al.*, 1993). Par surcroît, les bactéries du genre *Pseudomonas* se sont montrées également capables d'initier l'expression des mécanismes de défense dans tous les organes de la plante, lui permettant de mieux se défendre vis-à-vis d'une agression ultérieure (Curl et Truelove, 1986). En milieu naturel, la rhizosphère des plantes saines abrite des *Pseudomonas* et/ou des *Actinomycètes* capables, de façon durable, d'assurer la défense de ces plantes contre les agents bactériens et/ou fongiques phytopathogènes.

La mise au point d'une méthode intégrée de contrôle associant la lutte génétique ou la sélection variétale orientée vers une résistance spécifique aux souches de *R. solanacearum* avec des pratiques culturales raisonnées semble ainsi être impérative pour lutter efficacement contre le flétrissement bactérien de la pomme de terre à Madagascar. La présente étude avait pour objectifs de (i) identifier le(s) phylotype(s) au(x) quel(s) appartient(ent) les souches de *R. solanacearum* présentes dans les zones de production de pomme de terre de la région Vakinankaratra, (ii) décrire la potentialité des microorganismes rhizosphériques et endophytes des pommes de terre à limiter le développement de l'agent pathogène du flétrissement bactérien et (iii) d'étudier l'impact de la diversité entomofaunique dans la transmission de *R. solanacearum*.

Méthodologie

DIAGNOSTIC ET CARACTÉRISATION MOLÉCULAIRE DES SOUCHES DE *RALSTONIA SOLANACEARUM*

Site d'étude et échantillonnage

L'isolement des souches a été réalisé à partir d'échantillons de portions de tige ou de tubercules infectés ou d'échantillons de sols rhizosphériques de plants de pomme de terre présentant des symptômes de flétrissement bactérien. Deux périodes d'échantillonnage ont été choisies : la culture de contre saison sur rizière et la culture de saison intermédiaire sur tanety et terrain irrigué. L'échantillonnage sur culture de pomme de terre a concerné les 5 districts de la région Vakinankaratra et les principales zones de production de la pomme de terre (échantillonnage de type stratifié). Les sites d'échantillonnage sont historiquement reconnus pour présenter des foyers de maladie. Ils sont géoréférencés et représentatifs de chaque zone de production (échantillonnage par quotas) (Figure 3). Vingt échantillons de portions de tige (environ 10 cm à partir du collet) ou éventuellement de tubercules infectés sont prélevés par site, au hasard, et sur des plants de pomme de terre présentant des symptômes de flétrissement bactérien. Les échantillons de sol ont été prélevés dans la rhizosphère de deux variétés de pommes de terre (Meva et Diamondra) dans 2 sites (Antanetibe et Ankotrabe ambony) du district d'Antsirabe II de la région Vakinankaratra. Au total 6 échantillons ont été prélevés dans deux sites à raison de trois échantillons par site. Ces sols ont été conditionnés dans des sachets de 15 x 16 cm sous température ambiante durant le transport et jusqu'à l'utilisation.

Isolement et identification des souches de *Ralstonia solanacearum*

Chaque échantillon de tige ou de tubercule de pomme de terre est lavé à l'eau du robinet, séché et décontaminé en surface. L'exsudat bactérien est récupéré à partir de portions de tiges ou de tissu de l'anneau vasculaire dilacérées et immergées dans un milieu Tris. L'ensemencement-culture se fait par épuisement en trois secteurs sur milieu Sequeira. Les boîtes sont incubées à 28 °C pendant 48 h. Sur le milieu tetrazolium, les colonies caractéristiques et virulentes sont muqueuses et de couleur blanc laiteux, plates, de forme irrégulière et fluide. Après 3 jours d'incubation, les colonies prennent une coloration rouge sang au centre, présentant des stries internes ou des verticilles. Les variantes spontanées non virulentes forment de petites colonies arrondies non fluides, butyreuses, de couleur uniforme rouge sombre. Les colonies muqueuses obtenues sont ensuite réensemencées sur milieu Kelman pour obtenir des cultures pures. L'isolement des souches de *R. solanacearum* à partir d'échantillons de sols rhizosphériques a été réalisé par la méthode de microbiologie classique utilisant les techniques de dilution en cascade, puis étalement sur milieu Kelman solide additionné de 1 % d'extrait de levure (Kelman, 1954). Les souches ont été ensuite identifiées phénotypiquement par l'étude de leurs caractéristiques morphologiques et culturelles selon Zubeda et Hamid (2011). L'aspect macroscopique (couleur, forme, consistance...) des colonies est observé après 48 heures d'incubation à 30 °C. L'étude des caractéristiques morphologiques est effectuée par examen sous microscope optique (grossissement x100) des frottis préparés et colorés de colonies répondant aux caractéristiques macroscopiques des *R. solanacearum*.

Caractérisation moléculaire

La caractérisation moléculaire est un outil plus fiable dans la détection et l'identification des agents pathogènes. Elle fournit des renseignements génétiques uniques permettant de différencier des individus d'une même espèce sur des caractéristiques stables et indépendantes des conditions environnementales. La caractérisation moléculaire des souches présumées *R. solanacearum* est réalisée par la méthode

d'amplification en chaîne par polymérase de type multiplexe ou « PCR multiplexe » (Figure 4). Le protocole permet d'amplifier plusieurs amplicons à la fois, par l'utilisation de couples d'amorces oligonucleotidiques spécifiques à l'espèce, au phylotype (Tableau 1). Des marqueurs de poids moléculaire (DNA-Ladder) de 1 kb et de 100 pb permettent d'estimer la taille des fragments d'ADN amplifiés (Photo 2). Ces derniers sont séparés par électrophorèse sur gel d'agarose à 1,5 %. La coloration au bromure d'éthidium suivi d'une révélation du profil électrophorétique sous une lumière UV permet de différencier les fragments d'ADN par la taille des bandes. Le gel est ensuite photographié.

Tableau 1 : Caractéristique du PCR pour le diagnostic et le phylotypage (Source : Cellier, 2010)

Primer Mix 10x		[Cid] pmol	Taille du fragment	
Nmult:21:1F (I)		6	Phylotype I	144 bp
Nmult:21:2F (II)		6	Phylotype II	372 bp
Nmult:22:InF (IV)		6	Phylotype IV	91 bp
Nmult:23:AF (III)		18	Phylotype III	213 bp
Nmult:22:RR (reverse)		6		
759R		4	<i>Ralstonia solanacearum</i>	280 bp
760F		4		

Réactifs		Programme PCR		
Eau		Dénaturation	96 °C 6 mn	
Buffer	1	Hybridation	94 °C 15 s	30 cycles
MgCl2	1,5		59 °C 30 s	
dNTPs	0,2		72 °C 30 s	
Primer Mix	1	Elongation	72 °C 10 mn	
GoTaq Flexi	0,625	Pause	12 °C	
ADN	2			

Détermination du type de biovar

Les souches de *R. solanacearum* peuvent être différenciées en biovars en fonction de leur capacité à utiliser deux types de sucres (disaccharides et sucres alcools) (Denny, 2006). Une solution de 10 ml de sucres à 1 % est préparée puis versée dans des tubes à vis stériles. Les solutions sont chauffées à 100 °C pendant 20 minutes, puis mélangées avec 90 ml de milieu de base refroidi à 60 °C. Cinq (5 ml) du mélange sont alors versés dans des tubes stériles prévus pour le test et refroidis à température ambiante. Un mélange composé de milieu de base et d'eau stérile est réalisé et utilisé en tant que témoin négatif. Une suspension de culture bactérienne âgée de 48 heures est préparée dans de l'eau distillée stérile à raison de 108 UFC/ml ou 4 ml de suspension avec une densité optique égale à 0,1 à 600 nm. Deux gouttes de l'inoculum sont ensuite ajoutées dans chaque tube test (2 répétitions sont réalisées pour chaque traitement). Les tubes sont incubés à 30 °C et observées après 2, 7 et 14 jours. Un changement de couleur du vert olive au jaune peut être observé à la surface dans les 72 heures, ce qui indique un résultat de test positif.

Test de pathogénicité

Ce test permet de vérifier la virulence des souches isolées. Des tubes contenant le milieu SMSA liquide sont ensemencés par des jeunes cultures de *R. solanacearum* puis incubés à 30 °C pendant 48 heures. Pour chaque souche, l'inoculum est préparé de manière à obtenir une densité optique égale à 0,1 à 660 nm correspondant à 105 UFC/ml. Des graines de tomate (*Solanum lycopersicum*) ont été stérilisées superficiellement avec de l'alcool éthylique à 95 % pendant une minute puis rincées 5 fois à l'eau distillée stérilisée. Les graines sont ensuite trempées dans l'hypochlorite de sodium dilué à 30 % pendant 5 minutes, puis rincées abondamment à l'eau distillée stérile afin d'en éliminer les traces de fongicides de conservation. Les graines sont séchées sur compresse de gaze stérilisée préalablement à l'autoclave à la température 121 °C pendant 20 minutes. Le sol de semis (tourbe), préalablement stérilisé, est distribué dans des pots de 1 litre et arrosé à l'eau de robinet. Des graines de tomate sont ensuite semées à raison de trois plantules par pot et cinq pots par traitement. L'inoculation a été effectuée après l'apparition de la troisième vraie feuille en injectant 100 µl de l'inoculum dans les tiges de la plante juste au-dessus des cotylédons. Les cultures ont été placées sous serre et arrosées deux à trois fois par semaine jusqu'à l'expression maximale de la maladie.

ACTIVITÉ ANTAGONISTE DES SOUCHES D'ACTINOMYCÈTE ET DE PSEUDOMONAS VIS-A-VIS DE RALSTONIA SOLANACEARUM

Isolement des souches antagonistes

Le sol utilisé pour l'isolement des souches telluriques a été prélevé sous deux variétés des plantes de pomme de terre saines. Trois prélèvements de matériel végétal sain (feuilles, tiges et racines) ont été réalisés pour l'isolement d'*Actinomycètes endophytes*. Au total, 6 échantillons de sol ont été prélevés dans deux sites à raison de trois échantillons par site dont trois échantillons sous variété Diamondra et trois sous Meva.

La même méthode que celle pour l'isolement de *R. solanacearum* a été utilisée pour l'isolement des souches de Pseudomonas et d'Actinomycètes telluriques. L'isolement du Pseudomonas a été fait, sur milieu King B permettant d'observer sous lumière ultra-violet la fluorescence de certains représentants du genre Pseudomonas. Le milieu Amidon Caséine Agar supplémenté avec de l'acide nalidixique et 25 µg/ml de cycloheximide 50 µg/ml (Oskay *et al.*, 2004) sur lequel les Actinomycètes se développent en formant des colonies de formes spécifiques a été utilisé pour observer les actinomèdes. Les souches d'*Actinomycètes endophytes* ont été isolées selon la méthode de Fischer *et al.*, (1992) et Kuster et Williams, (1964). Le matériel végétal a été d'abord trempé dans de l'eau de javel 3 % pendant 6 min, puis rincé trois fois dans de l'eau distillée stérile. Deux préparations ont été ainsi effectuées : certains matériels sont découpés en morceaux plats de 1 cm² et d'autres sont broyés dans un mortier stérile contenant 10 ml de MRD (Maximum Recovery Diluant) stérile. Les morceaux de matériel végétal sont placés directement sur les boîtes de Pétri contenant le milieu Amidon de caséine.

Pour la seconde préparation, le broyat obtenu a été dilué. Pour cela, trois tubes à essais contenant chacun 9 ml de MRD stérile ont été préparés. Un millilitre du broyat a été prélevé et dilué dans le premier tube. Cette série de dilution a été continuée jusqu'à 10-3. Une quantité de 0,1 ml des dilutions 10-2 et 10-3 a été ensuite déposée sur les boîtes de Pétri contenant du milieu Amidon de caséine additionné de nistatine (25 mg/ml), de cyclohexamide (50 mg/ml) et de l'acide nalidixique (25 mg/ml), puis étalée à l'aide d'un étaleur stérile. Les boîtes de Pétri sont ensuite parafilées et incubées à 30 °C pendant une semaine à 30 jours.

Test in vitro

Cette étape vise à sélectionner le ou les isolats d'Actinomycètes et de Pseudomonas capables d'inhiber la croissance des souches de *Ralstonia* en utilisant la technique d'Almoneafy (2012). Les souches de *Ralstonia* ont été cultivées pendant une nuit dans un bouillon nutritif, puis centrifugé. Les culots cellulaires ont été remis en suspension avec une solution saline stérile (0,85 % de NaCl). Dix (10 ml) de suspension de *Ralstonia* (108 UFC/ml) ont été mélangés avec un litre de milieu YPGA fondu additionné de 5 ml de 2, 3,5-chlorure de triphénil tétrazolium (TTC), versé dans des boîtes stériles. Par la suite, chaque isolat testé a été transféré à la surface de la gélose à l'aide des cure-dents stériles. L'inhibition de la croissance de *Ralstonia* a été révélée par la présence des halos clairs sans coloration rose autour des isolats testés (Adesina *et al.*, 2007).

Test in vivo

Pour pouvoir exploiter ces souches en milieu naturel, il est fondamental de vérifier sous d'autres conditions d'expérimentation, l'efficacité des isolats d'Actinomycètes et de Pseudomonas, révélés antagonistes in vitro de *R. solanacearum*.

L'expérimentation a été réalisée sur sol préalablement stérilisé (140 °C pendant 40 °C) sous les conditions de la serre du LME/CNRE [photopériode de 12 heures, température du jour 25 °C, arrosage régulier]. Trois souches d'Actinomycètes et une souche de Pseudomonas les plus actives lors de test in vitro sont sélectionnées dans cette étude. La souche de *Ralstonia* la plus virulente (codée R15) lors de test biologique sur la plante de tomate a été utilisée comme agent pathogène. Des boutures désinfectées de pomme de terre de la variété « Spunta » (sensible à l'infection par *R. solanacearum*) sont trempées dans la suspension des inocula de Pseudomonas et d'Actinomycètes pendant 30 min. Deux (2) traitements de contrôle sont effectués : contrôle C1 où les boutures ont été traitées uniquement avec l'agent pathogène et le contrôle C2 où les boutures ont été plantées sans agent pathogène ou les isolats tests. Les pots sont arrangés au hasard avec quatre répétitions pour chaque traitement et cinq plantes pour chaque pot. Le développement de la maladie sur une période d'un mois après le traitement a été suivi et la maladie a été évaluée à l'aide de l'index suivant : 0 = aucun flétrissement ; 1 = 1-25 % de symptôme de flétrissement ; 2 = 26-50 % de symptôme de flétrissement ; 3 = 51-75 % de symptôme de flétrissement ; 4 = 76-100 % de symptôme de flétrissement ou mort (Park *et al.*, 2007). En se basant sur les données collectées dans l'index maladie, deux paramètres (incidence de la maladie et efficacité du biocontrôle des isolats antagonistes) sont estimés (Xue *et al.*, 2009). Après deux mois de culture, le développement de la plante (hauteur en cm), le poids frais et le poids sec (65 °C pendant 3 jours) de la biomasse aérienne ont été évalués ; l'efficacité de la promotion de la croissance a été calculée selon la formule suivante :

EPC = $\frac{PCA-PGT}{PGT}$ X 100

EPC : Efficacité de la promotion de la croissance de plantes
PCA : Paramètre de la croissance du groupe de plantes traité avec les isolats antagonistes
PGT : Paramètre de la croissance du groupe de plantes témoins

ÉTUDE DE L'IMPACT DE LA DIVERSITÉ ENTOMOFAUNIQUE
DANS LA TRANSMISSION DE *RALSTONIA SOLANACEARUM*

Collecte des insectes épigés et endogés

Les insectes évoluant dans les plantations de différentes variétés de pomme de terre des sites d'échantillonnage ont été collectés. Les différentes parties des plants ont été scrutées, notamment les parties végétatives (feuilles, tiges) mais également la partie racinaire qui peut être en contact avec les insectes endogés. Les insectes dans les strates herbeuses environnantes sont également collectés. La collecte d'insectes épigés a été réalisée selon les méthodes de capture classiques et simples utilisées en entomologie : utilisation de filet à papillon, de fauchoir pour les insectes volants et d'aspirateurs à bouche pour les insectes sessiles au niveau des feuilles et tiges. Pour les insectes endogés, des excavations du sol dans un rayon de 20 cm autour des pieds de pomme de terre présentant des symptômes de flétrissement ont été réalisées afin de les déterrer. Parallèlement, une évaluation du niveau d'infestation de la culture par le flétrissement bactérien a été effectuée. Les insectes collectés ont été placés dans des piluliers et ramenés au laboratoire en vue de l'identification. Le transport vers le laboratoire des insectes endogés a été assuré par des bocaux contenant du sol issu du leur milieu de récolte.

Résultats et discussion

DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DES SOUCHES
DE *RALSTONIA SOLANACEARUM*

Données sur l'échantillonnage

Deux prospections-prélèvements, en période de culture de contre saison et en saison intermédiaire, sont réalisées dans les zones de production de pomme de terre de la région Vakinankaratra. Les échantillonnages sont effectués dans 53 sites de cultures situés en moyenne et haute altitude (1350 m - 2217 m), sur différentes variétés de pomme de terre cultivées sur tanety, rizière et terrain irrigués. Egalement, des prélèvements sont faits sur d'autres plantes (haricot, tomate), différentes catégories de semences (vitroplants, souches, pré-base, de culture G1) et de l'eau d'irrigation dans la zone de production de semences d'Andraokavato. Un total de 918 prélèvements a été effectué (Tableau 2).

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des données d'échantillonnage

Période	23, 24 octobre 2012	04 au 13 avril 2013
Zone d'échantillonnage	Antsirabe II	Zone de production (5 Districts)
Altitude	1350 m - 1750 m	1350 m - 2217 m
Site	12	41
Echantillons prélevés par site	6	20
Variétés	Meva, Diamondra1, Diamondra2, Bandy akama, Bemanga, Chair jaune, Jengy, Maharevo, Mangamaso, Marotia, Mevarena, Spunta, Menamaso, Maneva, Marevaka	
Strate écologique	Rizière, terrain en terrasse irriguée	Tanety (colline), baiboho, terrain en terrasse irriguée

Période	23, 24 octobre 2012	04 au 13 avril 2013
Nature de l'échantillon	Différentes variétés cultivées de pomme de terre	• Différentes variétés cultivées de pomme de terre • Plante adventice : <i>Bidens pilosa</i> (anan-tsipolitra) • Tomate, haricot • Eau d'irrigation • Vitroplants • Semences souches • Semences de pré-base • Semences de culture (G1)
Saison de culture	Contre saison	Saison intermédiaire
Nombre d'échantillons	42	876
Nombre d'isolats	91	763

Caractéristiques culturelles des souches bactériennes

Nous avons pu recueillir 854 isolats à partir des 918 échantillons que nous avons ramenés au laboratoire dont 30 isolés à partir des 6 échantillons de sol rhizosphérique de pomme de terre malades (13 souches à partir de la variété Diamondra et 17 de la variété Meva). Du point de vue morphologie et couleur des colonies, 785 isolats dont 24 issus des échantillons de sol rhizosphériques sont supposés être comme des souches de *R. solanacearum* : les colonies sont en majorité des colonies fluides, irrégulières, présentant une couleur allant de rose à rouge sang au centre, entouré de couleur blanc (Photo 3). Entre autres, nous avons pu obtenir deux isolats sur l'échantillon de tige de haricot, un isolat sur le *Bidens pilosa*, trois isolats sur la tomate.

Caractéristiques moléculaires des souches de *Ralstonia solanacearum*

Après amplification par PCR-multiplexe, le profil électrophorétique montre que 735 isolats bactériens sont assignés comme étant bien le *R. solanacearum*, dont 604 souches tombant dans le Phylotype II et 131 dans le phylotype III (Photos 4 et 5). Ainsi, nos résultats montrent que le phylotype III et le phylotype II sont présents à Madagascar et notamment dans la région du Vakinankaratra (Figure 5). Nous savons que les souches de phylotype III sont endémiques (Lallmahomed et al., 1988). En revanche, les souches de phylotype II n'ont jamais été décrite à Madagascar et leur statut devra être clarifié : endémiques ou introduites.

Type de biovar des souches de *Ralstonia solanacearum*

Les 24 isolats de *R. solanacearum* isolés à partir d'échantillons de sols rhizosphériques ont fait l'objet d'une étude de la détermination du biovar. Les résultats ont montré que ces isolats sont tous groupés au biovar 2 et différents de ceux rapportés dans une étude concernant le flétrissement bactérien de plantes de pomme de terre malgaches par Prunier (1967) et Lallmahomed et al. (1988) où les souches de *R. solanacearum* isolées appartiennent à biovar 1. A notre connaissance, c'est la première fois que le biovar 2 a été recensé à Madagascar.

Pathogénicité des souches de *Ralstonia solanacearum*

Les colonies virulentes de *R. solanacearum* testées ont provoqué le flétrissement systématique de tous les plants de tomate inoculés au bout de 24 jours. Ceci permet de confirmer la virulence de ces souches.

ACTIVITÉ ANTAGONISTE DES SOUCHES ISOLÉES
VIS-A-VIS DE *RALSTONIA SOLANACEARUM*

Au total, 77 souches ont été obtenues à partir 6 échantillons de sol dont 40 Actinomycètes telluriques et 25 Actinomycètes endophytes et 12 Pseudomonas fluorescents. Parmi les 77 isolats, 12 sont actifs dont 4 Actinomycètes endophytes, 6 Actinomycètes telluriques et 2 Pseudomonas fluorescents. Le diamètre d'inhibition (mm) des souches antagonistes sur les isolats de *R. solanacearum* est donné par la Figure 6.

Par ailleurs, les 4 isolats (2 souches d'Actinomycètes endophytes codées E7 et E13, une souche d'Actinomycète tellurique codée S25 et une souche de Pseudomonas fluorescent P7) ont révélé une très forte activité antagoniste vis-à-vis de *R. solanacearum*. Le diamètre d'inhibition le plus élevé (40 mm) a été obtenu avec la souche endophyte E7. Ces données corroborent celles des autres auteurs (El Albyad et al., 1996 ; Guo et al., 2001 ; Götz et al., 2006) rapportant l'activité antagoniste des souches d'Actinomycètes et de Pseudomonas contre les bactéries et les champignons pathogènes de plantes. La capacité des isolats à inhiber la croissance de la bactériose peut être due au métabolite secondaire sécrété par les Actinomycètes. Tel que cité par Trejo-Estrada et al., (1998), les Actinomycètes endophytes ont été trouvés pour produire au moins trois sortes de substances antagonistes dans les tissus végétaux, y compris des antibiotiques, des enzymes et des sidérophores¹.

Influence de l'inoculation par les souches antagonistes sur la réduction de l'incidence de la maladie, sur l'efficacité du biocontrôle et sur le développement de la plante

Après un mois de culture, la plus faible valeur de l'incidence de la maladie ainsi que la plus grande valeur de l'efficacité de biocontrôle ont été enregistrées pour les plantules traitées avec la souche endophyte E7 avec 20,08 et 72,04 % respectivement. Cependant, la souche de Pseudomonas P7 présente la plus grande valeur de l'incidence de la maladie et la plus faible valeur de l'efficacité du biocontrôle avec 68,98 et 4,53 % respectivement malgré l'activité antagoniste de cet isolat vis-à-vis de *Ralstonia* in vitro (Tableau 3).

Tableau 3 : Réduction de l'incidence de la maladie bactérienne de la pomme de terre et l'efficacité du biocontrôle de 4 souches antagonistes de *Ralstonia solanacearum*

Traitement	Incidence maladie (%)	Efficacité du biocontrôle (%)
E7+R.s	20,08 ± 1,46c	72,04 ± 1,13a
E13+R.s	50,37 ± 1,62b	30,60 ± 1,56c
S25+R.s	47,26 ± 0,98b	34,41 ± 2,12b
P7+R.s	68,98 ± 1,27a	4,53 ± 0,91d
R.s	71,06 ± 0,90a	-

Les données dans la même colonne suivie par les mêmes lettres n'ont pas de différence significative selon le test LDS (P < 0,05).
Abréviations : E7 et E13 : Actinomycètes endophytes ; S25 : Actinomycètes telluriques ; P7 : Pseudomonas fluorescent ; R.s : *Ralstonia solanacearum*

¹ Les sidérophores sont des chélateurs de fer synthétisés et sécrétés notamment par les micro-organismes pour leur permettre de puiser le fer essentiel à leur développement.

Après 2 mois de culture, le meilleur développement des plantules de pomme de terre a été obtenu avec les souches d'Actinomycètes E13 et S25. Par contre, l'inoculation des plantules par la souche de Pseudomonas fluorescent P7 n'a eu aucun effet significatif sur le développement des plants par rapport à celle de la souche pathogène de *Ralstonia* (Tableau 1). L'amélioration de la croissance des plantes peut être due à des facteurs de croissance produits par des souches efficaces. Plusieurs espèces de Streptomyces², produisent de l'acide indole acétique (IAA) en présence du L-tryptophane ; permettant d'améliorer le développement des plantes (Manulis *et al.*, 1994). Il a été également démontré que certains Actinomycètes endophytes produisent des facteurs de croissance de plante ayant une activité analogue à celle de l'auxine. Ces composés se sont révélés accélérer la formation des racines adventives végétales (Igarashi *et al.*, 2002).

IMPACT DE LA DIVERSITÉ ENTOMOFAUNIQUE
DANS LA TRANSMISSION DE *RALSTONIA SOLANACEARUM*

De larges groupes d'insectes évoluant dans les plantations des différentes variétés de pommes de terre des sites d'échantillonnage ont été observés. Ce sont les lépidoptères en tant que défoliateurs, les hémiptères en tant que piqueur-suceurs et les coléoptères comme foreurs (Tableau 4). La présence des pucerons sur de nombreux pieds de plante a été les premières observations les plus significatives. Des hémiptères dont l'identification est en cours au laboratoire, ont aussi été capturés sur les tiges et feuilles des plantes. Ces hémiptères du fait de leur biologie peuvent jouer un rôle de vecteur dans la transmission de la bactériose, soit mécaniquement ou systématiquement à la plante lors de leur prise de nourriture. En effet, de nombreuses espèces d'hémiptères, particulièrement les *aphididae*, sont connues être des vecteurs de maladies variés chez de nombreuses plantes hôtes. La transmission de la *Ralstonia* pourrait ainsi être favorisée directement ou indirectement par les moeurs alimentaires de ces aphididae.

Dans le sol, la présence de vers blancs (cétoines) a aussi été remarquée dans la partie racinaire de deux variétés de plantes de pomme de terre sur les sept visitées. L'identification spécifique de ces cétoines ainsi que les pucerons sont actuellement en cours. La présence de cétoines dans le sol suppose un rôle possible de ces insectes soit en tant que réservoir de la bactériose, soit en tant que vecteurs mécaniques dans la transmission de la maladie à la plante. Le développement larvaire des cétoines dans le sol s'étend en effet sur une assez longue période et pourrait offrir a la souche bactérienne présente, un milieu d'évolution et de réservoir dans le maintien de la souche dans le milieu. Il est connu que la transmission de la bactériose peut se faire par la contamination du sol où ces macrofaunes peuvent jouer un rôle important dans cette dynamique.

La première descente effectuée sur les plantations de pommes de terre a mis en exergue la présence des pucerons (*Aphididae*) sur de nombreux pieds de plante. Lors de la seconde descente, les niveaux d'infestation apparente des différentes variétés de pomme de terre et la présence des prédateurs de pucerons qui sont les coccinellidés, semblent confirmer les premières observations faites. Selon le décalage des périodes de captures, le système proies/prédateurs peut servir d'indicateur dans la dynamique des deux acteurs de ce système. En outre, ces groupes d'insectes prédateurs, du fait de leur biologie, jouent probablement un rôle important dans la transmission de la bactériose, soit mécaniquement ou par voie systémique à la plante lors de leur prise de nourriture, soit en tant que réservoir de la bactériose.

² Le genre Streptomyces désigne des bactéries filamenteuses Gram-positif non pathogènes appartenant à l'ordre des Actinomycètes

Tableau 4 : Groupes d'insectes collectés dans les écosystèmes de plants de pomme de terre

Variétés	Groupes	Famille	Genres espèces	Stade de développement	Types
Maharevo	COLEO	LAGRIDAE	Lagria villosa	ADULTE	
	COLEO	CURCULIONIDAE	-	ADULTE	broyeur
	HEMI	-	-	NYMPHE	sueur
	LEPIDO	GEOMETRIDAE	-	CHENILLE	défoliateur
	DIPTERE	-	-	ADULTE	lécheur
Bandy akama	COLEO	COCCINELIDAE	Cheilomenes sulphurea	ADULTE	prédateur
	COLEO	CARABIDAE	Scarites Madagascariensis	ADULTE	prédateur
	COLEO	DYNASTIDAE	Heteronychus bituberculatus	LARVE	endogée
	COLEO	TENEBRIONIDAE	Gonocephalum simplex	ADULTE	terrestre
	COLEO	-	-	ADULTE	??
	COLEO	MELOLONTHIDAE	-	LARVE	endogée
	COLEO	COCCINELIDAE	-	LARVE	endogée
	COLEO	-	-	LARVE	endogée
	HEMI	PENTATOMIDAE	Dysdercus	ADULTE	sueur
	LEPIDO	GEOMETRIDAE	-	LARVE	défoliateur
	LEPIDO	-	-	LARVE	défoliateur
	LEPIDO	-	-	LARVE	défoliateur
Meva	COLEO	COCCINELIDAE	Cheilomenes sulphurea	ADULTE	prédateur
	COLEO	TENEBRIONIDAE	Gonocephalum simplex	ADULTE	terrestre
	COLEO	DYNASTIDAE	Heteronychus bituberculatus	LARVE	endogée
	COLEO	MELOLONTHIDAE	-	LARVE	endogée
	COLEO	CURCULIONIDAE	Apoderus humeralis	ADULTE	broyeur
	HEMI	PENTATOMIDAE	Dysdercus	ADULTE	sueur
Diamondra	COLEO	COCCINELIDAE	Cheilomenes sulphurea	ADULTE	prédateur
	COLEO	CETONIDAE	Celidota parvula	ADULTE	endogée
	COLEO	-	-	ADULTE	endogée
	ORTHO	GRYLIDAE	-	LARVE	broyeur endogée
Spunta	DIPTERE	-	-	ADULTE	lécheur
	HEMI	PENTATOMIDAE	Dysdercus	ADULTE	sueur
	COLEO	TENEBRIONIDAE	Gonocephalum simplex	ADULTE	terrestre
	COLEO	CETONIDAE	Celidota parvula	LARVE	endogée
	COLEO	DYNASTIDAE	-	LARVE	endogée
	LEPIDO	-	-	CHRYSLIDE	défoliateur
	ORTHO	GRYLIDAE	-	LARVE	broyeur endogée
	LEPIDO	GEOMETRIDAE	-	LARVE	défoliateur
	LEPIDO	-	-	LARVE	défoliateur



Des études microbiologiques et biochimiques complémentaires devront être développées pour confirmer et préciser les compétences et le rôle spécifique des hémiptères et des vers blancs dans la transmission de la bactériose à la plante. Les identifications de certains groupes capturés sur les tiges et feuilles des plants de pomme de terre se poursuivent au laboratoire. Par ailleurs, les observations faites sur les niveaux d'infestation apparente révèlent que les variétés de pomme de terre présentant les plus fortes incidences du flétrissement bactérien sont Spunta, suivi par Bandy akama et Meva (Figure 7). Ces variétés semblent présenter également le maximum de familles d'insectes dont notamment les coléoptères (Figure 8), ce qui laisse supposer leur action indirecte ou directe de la dissémination du flétrissement bactérien dans les écosystèmes de la pomme de terre.

Conclusion

Ces travaux préliminaires sur la diversité génétique des souches de *Ralstonia solanacearum* présentes dans les zones de production de la pomme de terre de la région Vakinankaratra a démontré la présence à la fois du phylotype III et du phylotype II. Les souches Solanées de phylotype I n'ont pas été échantillonnées dans le cadre des travaux PARRUR mais nous anticipons leur présence car elles ont déjà été décrites à Madagascar. Les relations phylogénétiques des souches de phylotype II devront être précisées au sein du complexe d'espèce, en particulier de manière à comprendre s'il s'agit là de souches cryptiques (endémiques) ou bien de souches introduites (exotiques). Ces travaux sont engagés dans le cadre d'une thèse financée par la Région Réunion et en partenariat avec le FIFAMANOR. Cette étude de la biodiversité de l'agent pathogène est une étape fondamentale et indispensable à la sélection variétale orientée vers une résistance spécifique. Douze souches de microorganismes rhizosphériques et endophytes (Actinomycètes et Pseudomonas) de pomme de terre ont présenté, in-vitro, une activité inhibitrice à l'égard des souches de *R. solanacearum* testées. L'inoculation en serre de plants de pomme de terre avec les 4 souches sélectionnées a permis de réduire l'incidence de la maladie du flétrissement jusqu'à 19 % et d'augmenter l'efficacité du biocontrôle (plus de 70 %) pour la souche d'Actinomycète endophyte E7. Une augmentation significative de plus de 45 % de la croissance des plantes est également observée. Les variétés de pomme de terre (Spunta, Bandy akama et Meva) présentant les plus fortes incidences du flétrissement bactérien semblent abriter le maximum de nombre de familles d'insectes.

Références bibliographiques

Aliye N., Fininsa C., Hiskias Y., 2008 : « Evaluation of rhizosphere bacterial antagonists for their potential to bio - protect potato (*Solanum tuberosum*) against bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) », *Biol Control*, 47, p 282-288.

Almoneafy A.A., Xie G.L., Tian W.X., Xu L.H., Zhang G.Q., Muhammad I., 2012 : « Characterization and evaluation of Bacillus isolates for their potential plant growth and biocontrol activities against tomato bacterial wilt », *Afr J Biotechnol*, vol.11, 28, p 7193-7201.

Álvarez B., Elena G., Biosca., López M.M., 2010 : *On the life of Ralstonia solanacearum, a destructive bacterial plant pathogen*.

Berga L., Siriri D., Ebayant P., 2001 : « Effect of Soil Amendments on Bacterial Wilt Incidence and Yield of Potatoes in Southwestern Uganda », *African Crop Science Journal*, vol.9, 1, p 267-276.

Cardoso S.C., Soares A.C.F., Brito A dos S., Laranjeira F.F., Ledo C.A.S., Santos A.P., 2006 : « Control of tomato bacterial wilt through the incorporation of aerial part of pigeon pea and crotalaria to soil », *Summa Phytopathologica*, vol.32, p 27-33.

Crawford D.L., Lynch J.M., Ousley M.A., 1993 : « Isolation and characterization of actinomycetes antagonists of a fungal root pathogen », *Appl Environ Microbiol*, vol.59, 11, p 3899-3905.

Curl E.A., Truelove B., 1986 : *The rhizosphere, Advanced Series in Agriculture Sciences*, 15, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 288p.

Denny T. P., Hayward A.C., 2001 : « *Ralstonia* », dans N.W. Schaad et al., *Laboratory guide for the identification of plant pathogenic bacteria*, APS Press, St. Paul, vol 3, p 151-174.

Denny T.P., 2006 : « Plant pathogenic *Ralstonia* species », dans S. S. Gnanamanickam, *Plant-Associated Bacteria*, (The Netherlands), ed. Springer Publishing, Dordrecht, p 573-644.

El Albyad M.S., el Sayed M.A., el Shanshoury A.R., 1996 : « Effect of culture conditions on the antimicrobial activities of UV-mutants of *Streptomyces corchorusii* and *S. spiroverticillatus* against bean and banana wilt pathogens », *Microbiol Res*, vol.151, p 201-211.

Fegan M., Prior P., 2005 : « How complex is the *Ralstonia solanacearum* species complex », dans C. Allen, P. Prior, A.C. Hayward, *Bacterial wilt disease and the Ralstonia solanacearum species complex*, APS Press, Madison, (WI), p 449-462.

Fisher P.J., Petrini O., HM Lappin-Scott., 1992 : « The distribution of some fungal and bacteria endophytes in maize (*Zea mays* L.) », *New. Phytol*, 122, p 299- 305.

Götz M., Gomes N.C.M., Dratwinski A., Costa R., Berg G., Peixoto R., Mendonça-Hagler L., Smalla K., 2006 : « Survival of gfp-tagged antagonistic bacteria in the rhizosphere of tomato plants and their effects on the indigenous bacterial community », *FEMS Microbiol Ecol*, 56, p 207-218.

Guo J.H., Guo Y.H., Zhang L.X., Qi, H.Y., Fang, Z.D., 2001 : « Screening for biocontrol agents against cayenne pepper bacterial wilt », *China J Biol Control*, 17, p 101-106.

Igarashi Y., T Iida R., Yoshida., Furumai T., 2002 : « Pteridic acids A and B, novel plant growth promoters with auxin-like activity from *Streptomyces hygroscopicus* TP-A0451 », *J. Antibiot*, 55, p 764 -767.

Kelman A., 1954 : « The relationship of pathogenicity in *Pseudomonas solanacearum* to colony appearance on *tetrazolium* medium », *Phytopathology*, 44, p 693-695.

Kuster E., Williams S.T., 1964 : « Selection of media for isolation of Streptomycetes », *Nat*, 202, p 928- 929.

Lallmahomed G.M., Rakotobe R., Rakotondramanana., 1988 : « Biovars and races of *Pseudomonas solanacearum* in Madagascar - a preliminary study », *FAO Plant Prot. Bull*, vol.36, 2, p 54-59.

MAEP/UPDR., 2002 : *Diagnostic approfondi de la filière pomme de terre à Madagascar; Antananarivo*.

Manulis S., Shafrir H., Epetein E., Lichter A., Barash I., 1994 : « Biosynthesis of indole-3-acetic acid via indole-3-acetamide pathway in *Streptomyces* spp », *Microbiol*, 140, p 1045-1050.

Opina, N., Tavner F., Hollway G., Wang J.F., Li T.H., Maghirang R., Fegan M., Hayward A.C., Krishnapillai V., Hong W.F., Holloway B.W., Timmis J., 1997 : « A novel method for development of species and strain-specific DNA probes and PCR primers for identifying *Burkholderia solanacearum* (formerly *Pseudomonas solanacearum*) », *Asia Pac. J. Mol. Biol. Biotechnol*, 5, p 19-30.

Oskay M., Usume A., Azeri C., 2004 : « Antibacterial activity of some actinomycetes isolated from farming soils of Turkey », *Afr. J. Biotechnol.*, 3, p 441-446.

Park E.J., Lee S.D., Chung E.J., Lee M.H., Um H.Y., Murugaiyan S., Moon B.J., Lee S.W., 2007 : « Microtom a Model Plant System to Study Bacterial Wilt by *Ralstonia solanacearum* », *Plant Pathol J*, vol.23, 4, p 239-244.



Pereira J. O., Carneiro-Vieira M. L., Azevedo J. L., 1999 : « Endophytic fungi from *Musa acuminata* and their reintroduction in axenic plants », *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 15, p 47-51.

Prior P., Beramis M., 1990 : « Induction de la résistance au flétrissement bactérien dû à *Pseudomonas solanacearum* E F Smith chez un cultivar de tomate réputé sensible », *Agron.*, 10, p 391-401.

Prior P., Allen C., Elphinston J., 1998 : *Bacterial wilt disease: Molecular and Ecological aspects*, Springer-Verlag (Berlin).

Prior P., Fegan M., 2005 : « Diversity and molecular detection of *Ralstonia solanacearum* race 2 strains by multiplex PCR », dans C. Allen, P. Prior, A.C. Hayward, *Bacterial wilt disease and the Ralstonia solanacearum species complex*. APS Press, Madison, (WI), p 405-414.

Prior P., Fegan M., 2005 : « Recent development in the phylogeny and classification of *Ralstonia solanacearum* », dans T. Momol, P. Ji, J.B. Jones, *Proceedings of the First International Symposium on tomato diseases*, vol. 695. International Society for Horticultural Science, Brugge, (Belgium), p 127-136.

Prunier J.P., 1967 : « Différenciation en types biochimiques de souches de *Pseudomonas solanacearum* (Smith) Smith. *Phitiatrie-Phytopharmacie* », 16, p 199-204.

Rabezandrina., 2007 : *Rapport technique final*, MAEP/PSDR.

Rahetlah V.B., Arison F., Andrianarisoa B., 2008 : « Prospects for control of bacterial wilt of potato (*Ralstonia solanacearum*) through soil incorporation of aerial part of comfrey (*Symphytum officinale uplandicum*) » *Afric. J. Food. Agri. Nut. Dev.*, vol. 8, 2, p 1-3.

Singleton P., 1999 : *Bactériologie 2ecycle*. 4e ed, Dunod (Paris), 414p.

Trejo-Estrada S.R., Rivas S.I., Crawford D.L., 1998 : « In vitro and In vivo Antagonism of *Streptomyces violaceusniger* YCED9 against Fungal Pathogens of Turfgrass », *World J Microbiol Biotechnol*, 14, p 865-827.

USDA/APHIS/PPQ., 2003 : *Pest Data Sheet Ralstonia solanacearum race 3 biovar 2*.

Xue Q.Y., Chen Y., Li S.M., Chen L.F., Ding G.C., Guo D.W., Guo J.H., 2009 : « Evaluation of the strains of *Acinetobacter* and *Enterobacter* as potential biocontrol agents against *Ralstonia* wilt of tomato », *Biol Contro.*, 48, p 252-258.

Yabuuchi E., Kosako Y., Yano I., Hotta H., Nishiuchi Y., 1996 : « Transfer of two *Burkholderia* and an *Alcaligenes* species to *Ralstonia* gen. nov.: proposal of *Ralstonia picketti* (Ralston, Palleroni and Douderoff 1973) comb. nov., *Ralstonia solanacearum* (Smith 1896) comb. nov. and *Ralstonia eutropha* (Davis 1969) comb. Nov. », *Microbiol Immunol*, 39, p 897-904.

Zubeda C., Hamid R., 2011 : « Isolation and characterization of *Ralstonia solanacearum* from infected tomato plants of Soan Skesar Valley of Punjab », *Pak J Bot*, vol., 43, 6, p 2979-2985.



© G. Cellier,
S. Ravelomanantsoa

Photo 1 : Symptômes du flétrissement bactérien

Espèce	<i>Ralstonia solanacearum</i>														
Phylotype	I				II				III			IV			
					A		B								
Origine	Division 1 Asie et Océanie				Division 2 Amérique				Afrique			Indonésie et Asie			
Biovar	3	4	5	2T	1		2	2T	1	2T		1	2	2T	ROB
Race	1	4	5		1	2	3								
Sequevar	12 - 18				1-7, 38	28, 46	24, 25	26, 27, 34	29-31, 33, 26-37, 39	19-23			11	8	10

Figure 1 : Correspondance entre les différents systèmes de classification utilisés pour typer les souches de *R. solanacearum* avec un éclairage sur le récent schéma de classification hiérarchique en phylotype qui a pour intérêt de rendre compte du passé évolutif de l'ensemble du génome

(Source : adapté Fegan & Prior, 2005 ; Villa, Tsuchiya, et al., 2005 ; Poussier, Trigalet-Demery et al., 2000 ; Taghavi, Hayward, et al., 1996)

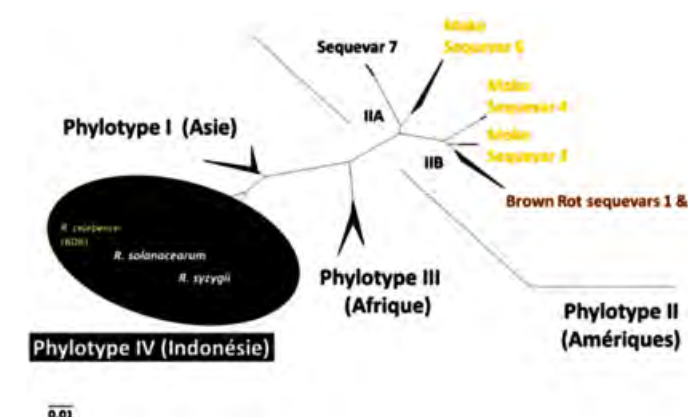


Figure 2 : Arbre phylogénétique schématisé du complexe d'espèce *R. solanacearum*

(Source : adapté de Fegan & Prior, 2005 ; Villa, Tsuchiya, et al., 2005)



Figure 3 : Sites d'échantillonnage dans la région Vakinankaratra

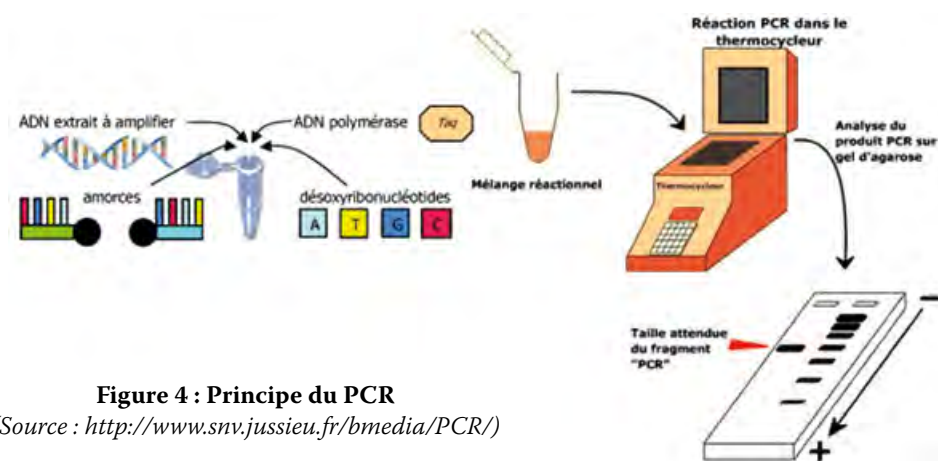


Figure 4 : Principe du PCR

(Source : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/PCR/>)

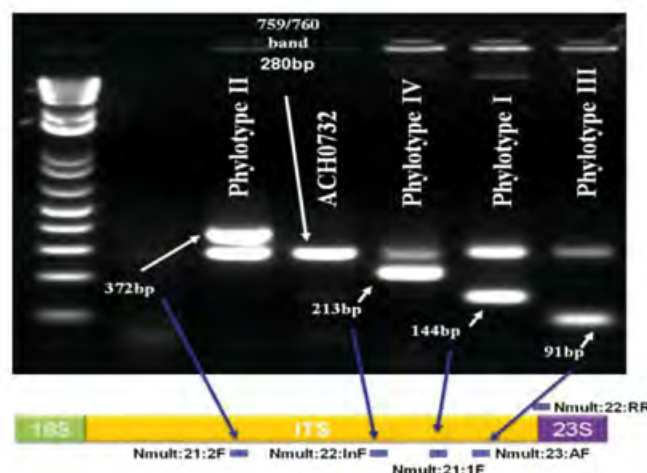
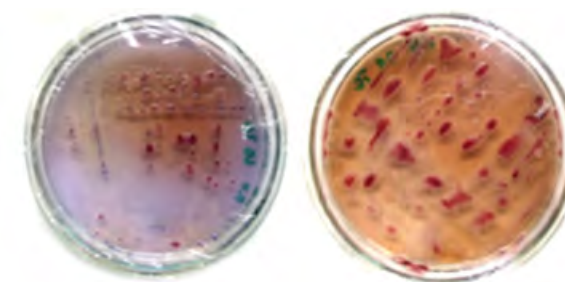


Photo 2 : Profil électrophorétique de la PCR multiplexe pour diagnostic et phylotypage

(Source : Cellier, 2010)



© S. Ravelomanantsoa

Photo 3 : Colonie de *R.solanacearum* sur milieu Sequeira

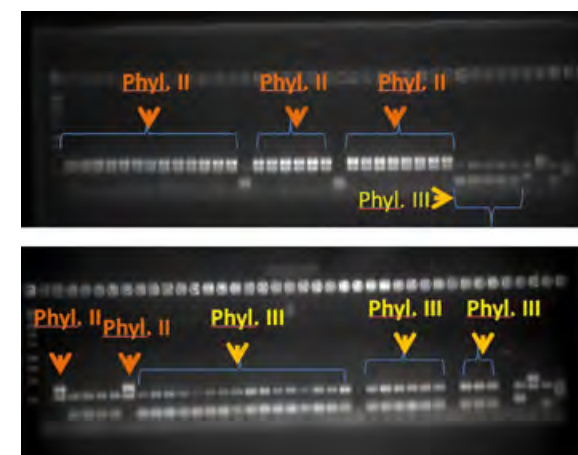


Photo 4 : Profil des bandes d'ADN amplifiées sur gel d'agarose 1,5 %

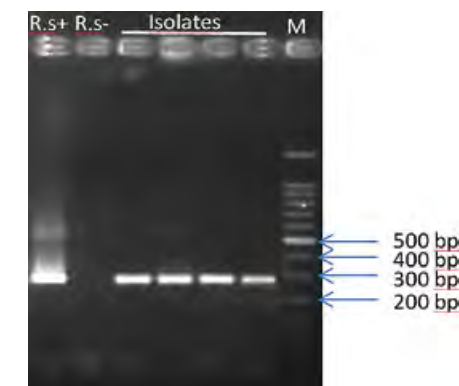


Photo 5 : Taille approximative de l'amplifiat de souches de *Ralstonia* attendu (280 pb)

Abréviations :
M : marqueur de poids moléculaire (1kb) ;
R. S+ : souche de référence de *Ralstonia* (GMI 1000) ; R.S- : contrôle négatif

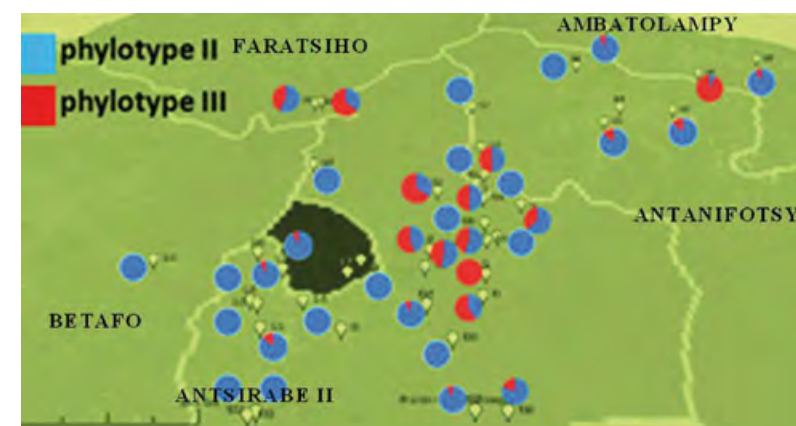


Figure 5 : Répartition géographique du phylotype II et III dans la région Vakinankaratra

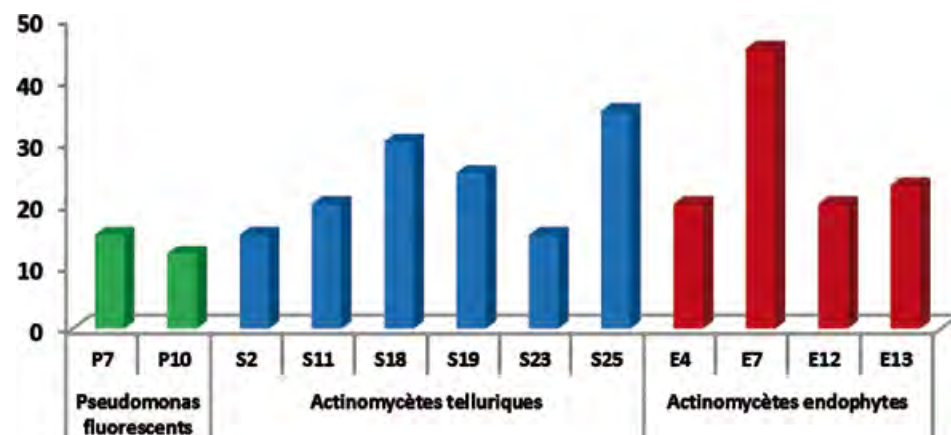


Figure 6 : Effet d'inhibition des souches d'Actinomycètes et Pseudomonas sur la croissance de *R. solanacearum*

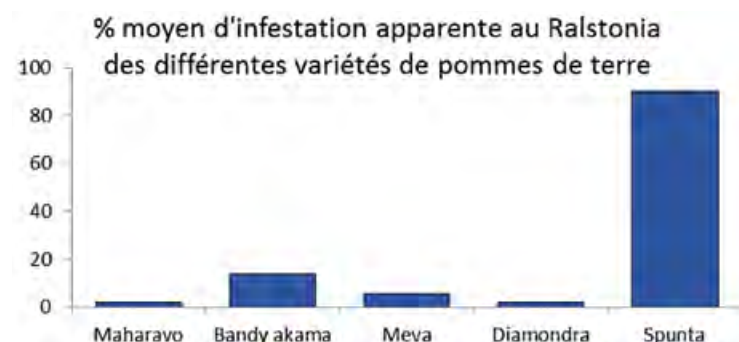


Figure 7 : Niveau d'infestation apparente du flétrissement bactérien sur variétés de pomme de terre

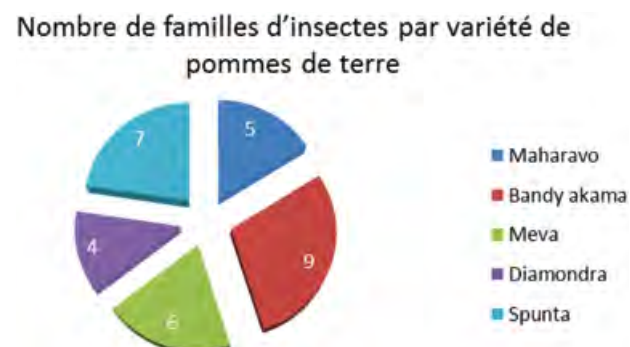


Figure 8 : Nombre de familles d'insectes par variété de pomme de terre

Comprendre les déterminants de l'accès au marché des producteurs pour améliorer les Systèmes d'Information de Marché. Le cas des producteurs de riz à Madagascar

Understanding the determinants of farmers' access to market to improve Market Information Systems.
The case of rice farmers in Madagascar

H. DAVID-BENZ⁽¹⁾
N. ANDRIANDRALAMBO⁽²⁾
C. CHIMIRRI⁽³⁾
H. SOANJARA⁽⁴⁾
N. RAHELIZATOVO⁽⁵⁾
B. RIVOLALA⁽⁶⁾
T. RAZAFIMANANTSOA⁽⁷⁾
C. RAKOTONARIVO⁽⁸⁾
H. ABEL-RATOVO⁽⁹⁾

- (1) CIRAD, UMR MOISA, TA 60/15, 73 rue J.-F. Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France. benz@cirad.fr
(2) Lot A 139 Ambodiriana Nord, Ambatolampy 104, Madagascar, norontsoaannie@gmail.com
(3) Via di Ripoli 207/g, Florence 50126, Italy, chiara.chimirri@gmail.com (4) Logt 150 A LE, Lazaret Prefet Sud, Antsiranana 201, Madagascar, elginass@yahoo.fr
(5) Univ. Antananarivo, ESSA, Ankatso, 101, Antananarivo, Madagascar, nraheli@hotmail.com
(6) OdR, PADR, Enciente ex-Microhydraulique, Nanisana, Antananarivo, Madagascar, padr.resprorodr@moov.mg
(7) Lot VS 52 HK Ter Avaratrankatso, Antananarivo 101, ntsoadamase@gmail.com
(8) Lot III N 37 Bis Fiadanana, Antananarivo 101 christinarivo01@gmail.com
(9) FOFIFA, BP 1690, Ampandrianomby, Antananarivo, Madagascar, abelratovo@yahoo.fr

Résumé

La circulation de l'information est considérée par la littérature économique comme un facteur de performance du marché. L'asymétrie d'information est fréquemment citée comme limitant l'efficacité des marchés agricoles dans les pays en développement. Le marché du riz à Madagascar, caractérisé par une forte instabilité et une faible intégration spatiale, en est une illustration. Les SIM (Systèmes d'information de marché) visent en ce sens à améliorer les performances de marché, en diffusant de l'information aux producteurs et aux acteurs de la commercialisation. Toutefois, leur efficacité reste souvent limitée, faute d'une réelle prise en compte des pratiques et des contraintes des acteurs ciblés, en particulier celles des petits producteurs. Une analyse des moyens d'existence, des pratiques de commercialisation et des conditions d'accès à l'information a été menée auprès de 582 producteurs de deux bassins de production de riz à Madagascar.

L'information de marché est perçue comme nécessaire mais insuffisante par la majorité des producteurs (même si la capacité de production, la faiblesse des prix à la récolte et l'enclavement sont le plus souvent cités en premier lieu comme contraintes). La demande en information est différenciée en fonction des types de producteurs et de leur degré d'enclavement. Plus ils sont insérés dans le marché (excédents commercialisables ou collecte), plus ils sont demandeurs de modes de diffusion précis et personnalisés (via la téléphonie mobile) et enclins à payer cette information. Mais la capacité de la grande majorité des producteurs s'avère limitante pour adopter des systèmes basés sur la téléphonie mobile. Pour pallier le risque d'accentuer les inégalités en développant des SIM purement tirés par la « demande » des producteurs les mieux lotis, une diversité de supports de diffusion semble nécessaire (téléphone mobile, radio, affichage), ainsi qu'un accompagnement par de la communication directe via les agents de vulgarisation.

Mots-clés : accès au marché, systèmes d'information de marché, agriculture familiale, prix, riz.

Abstract

Information access is pointed out by the economic literature as a factor of market performance. The existence of asymmetric information is frequently mentioned as limiting the effectiveness of agricultural markets in developing countries. Rice market in Madagascar, characterized by a great instability and a poor spatial integration, is an illustration of such situation. Market Information Systems (MIS) aim at improving market performance, through the dissemination of information to producers and actors involved in market activities. However, their effectiveness often remains limited by a lack of consideration of the targeted actors' practices and constraints, especially those of smallholder farmers. An analysis of livelihoods, commercialization practices and conditions of information access is performed on a sample of 582 producers from two rice production areas in Madagascar.

Market information is perceived as necessary but insufficient by the majority of producers (even if the production ability, the low price during harvest time and remoteness are often cited as first position constraints). Demand for information is differentiated according to producers' types and the degree of remoteness. The more the actors are involved with market activities (marketable surplus or collect), the more they expect precise and personalized diffusion modes (via mobile phone) and are willing to pay the information. Yet, the capacity of the majority of producers is limiting

the adoption of MIS based on mobile phone. To alleviate the risk of increasing inequalities while developing MIS designed according to the healthiest producers' demand, it appears critical to diversify the means of diffusion (mobile phone, radio, bulletin board) along with direct communication through the outreach agents.

Keywords : market access, market information systems, family farming, price, rice.
JEL : Q12, Q13

Introduction

La transparence de l'information constitue pour la théorie économique standard l'un des piliers de la concurrence pure et parfaite, censée permettre l'équilibre des marchés. Or dans les pays en développement, la défaillance en termes d'information prévaut dans les marchés agricoles, entraînant des coûts de transaction élevés, notamment pour la recherche des produits, leur négociation et leur transport (Fafchamps & Gabre-Madhin, Agricultural markets in Benin and Malawi, 2006). Ces coûts de transaction élevés pèsent sur les prix d'achat aux producteurs, ces derniers étant pénalisés par une forte asymétrie d'information, notamment du fait de leur enclavement.

L'enjeu de performance est particulièrement stratégique pour le marché du riz à Madagascar. En effet, non seulement le riz constitue l'aliment de base de la population, mais sa production occupe une très large majorité des ménages agricoles (85 % en 2005, d'après le recensement agricole ; MAEP, 2007). Aussi la politique rizicole a-t-elle toujours tenu une place privilégiée dans les choix de politiques économiques développées par les responsables du pays (Randrianarisoa, 2003). Cependant, les prix du riz sont marqués par une forte instabilité, qui pénalise tant les producteurs que les consommateurs. L'amplitude des fluctuations saisonnières, particulièrement marquées dans les zones enclavées, s'élève à près de 70 %, ce qui peut être associé à des coûts de transactions élevés et à un marché du crédit déficient (Stifel & Randrianarisoa, 2006). Les faibles performances du marché se traduisent également par une faible intégration spatiale à l'échelle inter-régionale, attribuée aux coûts de transport élevés, à l'insécurité et à un environnement peu concurrentiel dans les échanges inter-régionaux, favorisant les comportements de rente (Moser, et *al.*, 2009). Le diagnostic global de la filière fait ressortir la compartimentation spatiale des marchés et la faible circulation de l'information (FAO/UPDR, 2001) et recommande la mise en place d'un système d'information. Cette recommandation est mise en œuvre en 2005 suite à une crise majeure sur le marché intérieur et à une violente flambée des prix, avec la mise en place de l'Observatoire du Riz (OdR).

Comme nombre de Systèmes d'Information sur le Marché (SIM) promus dans les pays en développement, l'OdR vise d'une part à informer les décideurs, pour améliorer la prise de décision en matière de politiques rizicoles et de sécurité alimentaire, d'autre part à assurer un meilleur accès à l'information des acteurs directs, pour améliorer les performances du marché. Mais, du fait des modes de diffusion utilisés (bulletins électroniques, présentations et débats à l'échelle nationale), l'audience de l'OdR est principalement institutionnelle (David-Benz, et *al.*, 2014). L'enjeu d'améliorer la circulation de l'information au niveau des acteurs du marché demeure essentiel. Aussi, un projet de recherche-développement, intitulé InfoRiz, a-t-il été initié en 2003 avec pour objectifs : (i) de comprendre la place de l'information dans les contraintes d'accès au marché des riziculteurs et dans le fonctionnement de l'aval de la filière, (ii) d'améliorer la capacité de l'Observatoire du Riz à répondre aux besoins en information des producteurs en testant différentes formes de diffusion, (iii) d'évaluer ces différentes formes de diffusion.

La présente communication s'appuie sur les premiers résultats du projet InfoRiz, relatifs aux pratiques de commercialisation. Elle est structurée en 4 parties : (i) un état des réflexions sur l'évolution des SIM dans les pays en développement ; (ii) la problématique du marché du riz à Madagascar ; (iii) la méthodologie développée par le projet InfoRiz ; (iv) les résultats et la discussion concernant la caractérisation des producteurs, leurs stratégies de commercialisation et leurs pratiques et attentes en matière d'informations.

Les SIM, pour améliorer l'efficacité des marchés

Les systèmes d'information de marché (SIM) agricoles sont des dispositifs visant à collecter, traiter et diffuser de l'information sur la situation et la dynamique des marchés agricoles. Dans les pays en développement, ils se sont multipliés dans les années 80, mis en place dans le cadre des programmes d'accompagnement de la libéralisation des marchés agricoles et du retrait des Etats de l'intervention directe dans la commercialisation (Shepherd, 1997 ; Egg & Galtier, 1998). Leur objectif est double : (1) améliorer la circulation de l'information entre les acteurs du marché, afin d'optimiser leurs arbitrages dans le temps et l'espace et de favoriser une distribution équitable de la valeur entre les différents acteurs ; (2) fournir aux décideurs publics des informations permettant d'orienter l'élaboration des politiques et d'apprécier l'impact de leur mise en œuvre, notamment dans le domaine de la sécurité alimentaire (David-Benz, et *al.*, 2012 ; Galtier, et *al.*, 2014).

Rapidement l'efficacité des SIM en matière de fourniture de services aux acteurs de la commercialisation est apparue limitée (Shepherd, 1997 ; Egg & Galtier, 1998 ; Robbins, 2000 ; Tollens, 2002). Les défaillances identifiées relèvent d'une part de faiblesses techniques (fiabilité insuffisante des données, retards de transmission, qualité des produits non prise en compte...), de faiblesses institutionnelles (lourdeurs et manque de réactivité liés au rattachement à l'administration publique), d'autre part de problèmes plus fondamentaux relatifs à l'insuffisante prise en compte du fonctionnement réel des marchés (circulation de l'information entre les acteurs et formes de coordination). Toutefois, à partir de la fin des années 90, la rapide pénétration de la téléphonie mobile dans les PED, le renforcement des politiques d'intégration régionale, la montée en puissance des organisations paysannes et leur sensibilité aux enjeux de maîtrise de la commercialisation par les producteurs, ont suscité un regain d'intérêt pour les SIM. Des innovations apparaissent, sur le plan technique comme organisationnel, de nouveaux systèmes se multiplient, les SIM plus anciens évoluent : une seconde génération de SIM émerge (David-Benz, et *al.*, 2012 ; Egg, et *al.*, 2013).

Les innovations développées sur la base de la téléphonie mobile ont apporté de réelles améliorations d'un point de vue technique¹. Elles ont permis d'élargir la gamme de produits et de marchés couverts, ainsi que les types d'information disponibles. Elles offrent la possibilité de traçabilité de la diffusion. Ces différentes améliorations vont dans le sens d'une meilleure prise en compte des besoins des acteurs du marché. Toutefois, le recours à la téléphonie mobile a augmenté les contraintes d'accessibilité pour les plus défavorisés (couverture incomplète des réseaux, difficulté de la maîtrise de l'outil pour les illettrés, coût, absence d'électricité pour recharger les batteries). Ainsi, les SIM qui se basent uniquement sur ce mode de diffusion présentent le risque de renforcer les inégalités plutôt que d'améliorer l'accès au marché des plus démunis (Galtier, Subervie, et *al.*, 2014). La diffusion par radio permet de toucher un public plus large, mais son succès est fortement lié à l'implication des communautés locales dans la définition du contenu des programmes (Sulaiman, et *al.*, 2011). Par ailleurs, Gakuru et *al.*, (2009) mettent en avant le fait que les

producteurs agricoles ne peuvent être considérés comme de simples consommateurs d'information. Des communautés d'apprentissage sont nécessaires, tant pour définir les besoins en information spécifiques aux zones considérées que pour favoriser un apprentissage sur la base du dialogue et de l'échange. De surcroît, plus les modes de communication sont performants (et sophistiqués), plus les besoins d'accompagnement des utilisateurs pour comprendre les informations et l'usage qu'ils peuvent en faire est nécessaire. Cette dimension est pour l'instant insuffisamment prise en compte par les SIM (David-Benz, et *al.*, 2012).

La mesure de leur impact de ces systèmes sur les acteurs du marché, notamment sur les producteurs, a fait l'objet de plusieurs travaux récents au niveau international. Plusieurs auteurs mettent en évidence un impact significatif sur les prix de vente des producteurs et sur les volumes vendus (Svensson & Yanagizawa, 2009 ; Goyal, 2010 ; Kizito, et *al.*, 2012 ; Nakasone, 2013 ; Courtois & Subervie, 2014). Dans d'autres cas, l'impact est beaucoup moins perceptible ou non significatif (Fafchamps & Minten, 2012 ; Mitra, et *al.*, 2013). Mais l'analyse de l'utilisation des SIM souffre encore de lacunes importantes : d'une part les conditions d'adoption et les facteurs de non-adoption sont encore peu explorés et d'autre part, l'appréciation des utilisateurs et l'évaluation *in curso* a été encore très peu mobilisée pour orienter et ajuster les informations diffusées. L'objectif du projet InfoRiz a donc été de s'attacher à mieux comprendre les stratégies et les besoins en information des utilisateurs, de chercher à caractériser les différents types d'acteurs enclins à utiliser ces systèmes d'information (et ceux qui ont peu de chances de se l'approprier), ainsi que de cerner les raisons de leur adoption et les facteurs de leur rejet.

Le marché du riz à Madagascar et l'Observatoire du Riz

Le riz constitue à Madagascar la base de l'alimentation dans la plupart des régions, avec une moyenne de 97 kg/pers./an (INSTAT/DSM, 2011). Il demeure la principale source de revenus agricoles (Photo 1), avec 48 % du total des revenus agricoles générés (INSTAT/DSM, 2011). 85 % des exploitations agricoles produisent du riz (Banque Mondiale, 2011, d'après les données du recensement de l'Agriculture 2004-05), mais la production est avant tout destinée à l'autoconsommation (les estimations vont de 72 % du volume, d'après le Recensement de l'agriculture², à 57 % de la valeur, d'après l'Enquête périodique auprès des ménages³). L'accès au marché reste fortement contraint par des questions d'enclavement et de faible efficacité des réseaux de commercialisation. Les travaux réalisés à partir des enquêtes ILO en 2000-2001 (Cornell Univ. et FOFIFA) ont montré que si le marché du riz est relativement bien intégré au niveau local, le degré d'intégration est bien moindre à l'échelle régionale et devient très faible à l'échelle nationale (Moser, et *al.*, 2009). L'insécurité, les coûts de transport et la structure peu concurrentielle des échanges sont pointés par les auteurs comme étant des contraintes fortes à l'intégration des marchés. Une décennie plus tard, l'enjeu de l'amélioration de l'intégration des marchés demeure crucial en termes de sécurité alimentaire. En effet, certaines zones excédentaires sont insuffisamment valorisées du fait de leur trop faible connexion au marché ; des bassins excédentaires qui avoisinent des zones déficitaires chroniques présentent des niveaux très élevés d'instabilité des prix, attestant d'un net dysfonctionnement de la commercialisation (Andriambelona, 2012). Cette instabilité est préjudiciable tant aux producteurs (qu'ils soient vendeurs nets ou acheteurs nets) qu'aux consommateurs.

¹ Raccourcissement des délais de la collecte à la diffusion, amélioration du contrôle de la qualité des données.

² Calculé par Carimentrand et *al.*, (2011) à partir des données du Recensement de l'agriculture de 2004-2005 (MAEP, 2007).

³ INSTAT/DSM (2011).

Depuis fin 2005 l'Observatoire du Riz (OdR) assure un suivi hebdomadaire des prix du riz (ainsi que, depuis 2009, des principaux produits vivriers et des Produits de Première Nécessité). Il vise d'une part à fournir une information régulière sur le marché aux acteurs des filières, d'autre part à apporter aux décideurs politiques des éléments d'aide à la décision et de suivi des politiques relatives à la filière riz (David-Benz, et *al.*, 2014). Un bulletin sur les prix est diffusé chaque semaine par courrier électronique (InfoHebdo), un bulletin d'analyse plus approfondi sur le marché national et le marché international (Horizon) est élaboré tous les deux mois et diffusé par le même canal (Photo 2). L'OdR produit également des notes de conjoncture ponctuelles destinées aux décideurs, à leur demande ou lorsque la conjoncture est particulièrement délicate. De par ces formes de diffusion (courrier électronique et publications en français), l'OdR touche jusqu'à présent essentiellement un public institutionnel (administrations, bailleurs de fonds, projets, recherche et enseignement supérieur...) mais très peu les acteurs directs de la filière et particulièrement peu de producteurs. Pourtant, le déficit en information est identifié comme l'un des facteurs qui limite la fluidité des échanges et l'accès au marché pour les riziculteurs malgaches (Minten & Dorosh, 2006). L'enjeu est ainsi de développer des outils de diffusion adaptés à des utilisateurs de faible niveau de formation, à faibles revenus, de les accompagner de dispositifs d'apprentissage permettant d'avoir une compréhension plus globale du fonctionnement du marché, et d'en apprécier l'efficacité.

Méthodologie d'ensemble du projet InfoRiz

InfoRiz, financé par le Ministère français des Affaires Etrangères, a été mené en partenariat entre des institutions de recherche et d'enseignement supérieur, des projets de développement, des organisations professionnelles et le secteur privé⁴. Afin d'identifier les modes de diffusion les plus adaptés aux différentes catégories d'acteurs et au contexte local, une approche itérative d'identification des pratiques et des besoins des acteurs en matière d'information, puis d'ajustement du dispositif de collecte et de diffusion, puis d'évaluation par les bénéficiaires et de réajustement du dispositif été privilégiée (Figure 1).

DIAGNOSTIC : ENQUÊTES AUPRÈS DES PRODUCTEURS ET DES ACTEURS DE L'AVAL

La première étape visait à appréhender les liens entre les dotations et le fonctionnement des acteurs de la filière (producteurs, transformateurs et commerçants), selon une approche basée sur les Moyens d'Existence Durable (DFID, 1999) : caractéristiques structurelles, stratégies et contraintes de commercialisation, accès à l'information et enfin, perceptions et attentes vis-à-vis des SIM.

Deux bassins importants de production de riz, contrastés en termes d'accès au marché, ont été ciblés (Tableau 1) :

- Les districts mitoyens de Soavinandriana et Miarinarivo dans la Région Itasy (8 % de la production nationale) (Photo 3), qui bénéficient d'un accès relativement privilégié à la capitale⁵ (Andriandralambo, 2014) ;

⁴ Cirad, Fofifa, ESSA, Chambres d'Agriculture, projet PROSPERER, projet OSDRM (Fondation Aga Khan), Orange Madagascar.
⁵ Région traversée par l'axe goudronné de la RN1. Le principal marché de collecte (Analavory) est à 100 km à l'ouest de l'entrée de Tananarive.

- Le district de Bealanana dans la Région Sofia (7 % de la production nationale) entravé par un niveau d'enclavement très important⁶ (Soanjara, 2014) (Photo 4).

Tableau 1 : Caractérisation des deux zones d'enquête

	Districts Miarinarivo et Soavinandrianta (Itasy)	District de Bealanana (Sofia)
Production de paddy ⁽¹⁾	147 000 t + 124 000 t	96 000 t
Prix du paddy moyen à la récolte ⁽²⁾	610 Ar/kg	432 Ar/kg
Hausse de prix moyenne entre récolte et soudure ⁽³⁾	+ 53 %	+ 90 %
Principal marché de collecte (éloignement de la route goudronnée)	Analavory (0 km)	Bealanana (100 km)
Distance du principal marché de collecte à Antananarivo	100 km	690 km

⁽¹⁾ Moyenne 2011-2013, source Ministère de l'Agriculture.
⁽²⁾ Prix en juin en juin 2011 à 2013, source OdR.
⁽³⁾ Ecart moyen entre le prix minimum et le prix maximum : (min-max)/min ; années 2011/12 à 2013/4, source OdR.

Un échantillon raisonné de 582 producteurs

Dans chacune des deux zones de production, l'échantillonnage a été réalisé de façon raisonnée à deux niveaux (choix des sites d'enquête, choix des individus), en collaboration avec les responsables locaux de projets et autres personnes ressources ayant une bonne connaissance du terrain.

Les sites d'enquêtes (Fokontany) présentent tous un niveau de production en riz important pour la zone mais un degré d'enclavement variable et une présence plus ou moins marquée d'institutions d'appui au secteur agricole.

Ces critères de choix sont issus de deux hypothèses sous-jacentes :

- D'une part, celle de l'ambivalence du rôle de l'enclavement dans la capacité de l'information à améliorer les conditions d'accès au marché. Dans le cas d'un enclavement extrême, les contraintes physiques prédominent (accessibilité, coût de transport) et une meilleure connaissance du marché ne permet pas d'améliorer les arbitrages des producteurs. Dans le cas d'un accès physique aisé aux marchés de consommation, la concurrence est forte et l'information circule « naturellement ». Dans ce cas un SIM ne présente plus d'intérêt.
- D'autre part, l'information seule ne peut permettre d'améliorer les arbitrages des producteurs et leurs capacités de négociation en l'absence de marché du crédit, de possibilités de stockage ou d'action collective pour regrouper leur offre. De plus, l'information de marché diffusée par les SIM est difficile à comprendre par des producteurs peu ou pas alphabétisés, en l'absence d'accompagnement ou de formation spécifique. La présence d'une structure d'appui et d'institutions de microfinance améliorerait donc la capacité des producteurs à tirer profit des SIM.

⁽⁶⁾ 100 km de route au revêtement quasi inexistant entre le chef-lieu de district (Bealanana) et la RN4, puis 415 km de route goudronnée pour Antsiranana (principal centre urbain du nord de l'île) ou 690 km vers Tananarive.

Seuls des producteurs produisant des volumes supérieurs aux besoins de consommation de leur propre famille ont été retenus (exploitations disposant d'au moins 0,5 ha de riz, soit environ 50 % des exploitations dans les districts enquêtés⁷). En effet, les plus petits producteurs disposent de trop peu d'excédents commercialisables et ils sont soumis à de trop fortes contraintes structurelles ; ne disposant pas de la marge de manœuvre dans leurs décisions de commercialisation, ils ne sont pas à même de valoriser un meilleur accès à l'information.

Ainsi, dans le district de Bealanana, 280 exploitations agricoles ont été enquêtées sur 5 sites (Photo 5) et dans l'Itasy 302 exploitations ont été enquêtées sur 7 sites (Figure 2).

Echantillon raisonné de 185 acteurs de l'aval
Les principaux marchés de destination du riz de l'Itasy et de Bealanana ont été identifiés à partir de sources bibliographiques (Perry & Randriambololona, 2010 ; Arimoto, et *al.*, 2013). Un total de 47 commerçants et transformateurs ont été enquêtés pour la Sofia⁸ et 80 pour l'Itasy⁹ (Rakotonarivo, 2014) (Razafimanantsoa, 2014). Des entretiens ont également été réalisés auprès de responsables d'organisations paysannes, techniciens et institution d'encadrement (9 dans la Sofia et 49 dans l'Itasy).

AMÉLIORATION DES MÉTHODES DE COLLECTE ET DE DIFFUSION DE L'OBSERVATOIRE DU RIZ

L'Observatoire du Riz (OdR) collecte les prix du riz, du maïs, du manioc, de la patate douce, ainsi que de cinq produits de première nécessité dans les 119 districts de Madagascar. Ces prix sont relevés hebdomadairement par des agents commissionnés par l'OdR. Jusqu'en 2014, les informations étaient communiquées via courrier électronique ou par téléphone à l'administrateur de la base de données, par l'intermédiaire d'un responsable par Région qui en assurait le relai. Une fois saisie par l'administrateur, les données sont utilisées pour rédiger les bulletins hebdomadaires et bimensuels diffusés par courrier électronique.

Par le biais du projet InfoRiz, l'OdR a été équipé d'un serveur et une application a été développée en collaboration avec Orange Madagascar et Tranoben'ny Tantsaha, afin de permettre une transmission directe entre les agents de collecte et la base de données centrale, via l'envoi de SMS. Les agents de collecte de 17 districts des zones de production et des principaux marchés de destination ont été formés à l'envoi des données collectées par SMS. Une application a également été développée pour composer les SMS de diffusion et les envoyer à des groupes de destinataires définis.

TEST DE DIFFÉRENTES FORMES DE DIFFUSION DES INFORMATIONS

La diffusion par courrier électronique de bulletins, rédigés en français, ne peut à l'évidence toucher les producteurs ni la plupart des acteurs de l'aval de la filière (à l'exception des quelques grands opérateurs, qui interviennent dans la transformation, la distribution de gros et les importations). Deux formes plus adaptées à un public peu lettré et à faibles revenus ont été testées : l'envoi de SMS (Photo 6) et les communiqués radios.

Pour chacune des deux zones d'enquête, une sélection des marchés¹⁰ et des principaux types de riz commercialisés dans la zone a été réalisée. La bibliographie et les premiers résultats d'enquête ont permis d'effectuer cette sélection. Chaque semaine, un SMS composé de cette sélection de prix a été envoyé à un sous échantillon de 100 destinataires par zone, sélectionnés parmi les personnes enquêtées¹¹. De fin avril à juin 2014, un premier format de SMS contenant 12 prix a été envoyé. Une première enquête rapide auprès des utilisateurs a permis d'identifier les difficultés de compréhension des destinataires, tant sur la forme que sur le contenu des messages (Chimirri, 2014). Les messages ont alors été simplifiés en réduisant le nombre de prix de 12 à 8, en rendant les noms de marchés et de types de riz plus explicites et en identifiant l'OdR comme expéditeur. En plus, des fiches présentant brièvement l'OdR et expliquant la signification des abréviations utilisées ont été distribuées à tous les destinataires.

Les radios locales les plus écoutées et les heures d'écoute privilégiées ont été identifiées au cours des enquêtes diagnostic : 1 dans l'Itasy et 2 pour le district de Bealanana. Des communiqués hebdomadaires d'environ cinq minutes ont été élaborés par l'OdR pour chacune des deux zones, pour la même sélection de marchés et de types de riz que pour les envois de SMS. Ils ont été diffusés hebdomadairement d'avril à décembre 2014. Ces communiqués ne se limitent pas à lister les prix de la semaine ; ils présentent également la tendance par rapport aux semaines précédentes et apportent quelques éléments d'explication ou de contextualisation.

ACCOMPAGNEMENT PÉDAGOGIQUE DES PRODUCTEURS

L'une des hypothèses du projet était qu'une information élémentaire sur les prix est insuffisante pour aider à la décision et que des acteurs de faible niveau d'éducation peuvent être rebutés par des messages leur parvenant de façon impersonnelle et unilatérale. L'efficacité d'un SIM serait renforcée par un apport de connaissances plus générales et conjoncturelles sur le marché, dans un cadre où la discussion et l'échange sont possibles. Quatre modules pédagogiques visant une meilleure compréhension du fonctionnement du marché ont ainsi été conçus en collaboration avec les équipes des institutions de développement partenaires¹².

Des techniciens formateurs ont été formés dans chacune des deux zones (Photo 7), puis ils ont à leur tour formé la moitié des producteurs destinataires de SMS.

COLLECTE DES FEEDBACKS DES DESTINATAIRES D'INFORMATIONS SUR LE MARCHÉ

L'impact des diffusions d'information sur le marché (par SMS et par radios) ainsi que l'appréciation des modules pédagogiques (pour ceux qui ont été formés) ont fait l'objet d'un double passage d'enquêtes de *feedback*¹³ auprès des producteurs et techniciens recevant les SMS (avec ou sans formation additionnelle). Sous forme d'enquêtes rapides et d'entretiens, ce recueil des appréciations des utilisateurs s'est inscrit dans un processus itératif d'amélioration des formes de diffusion et des modules pédagogiques.

⁷ D'après les données du Recensement de l'Agriculture 2015.
⁸ Ambatoriha, Bealanana, Ambanja, Antsiranana, Mahajanga, Antananarivo.
⁹ Analavory, Anosibe Ifanja, Miarinarivo, Soavinandriana, Imerintsiatosika, Fenoarivo, Antananarivo.

¹⁰ Marchés de collecte et de regroupement de la zone, marchés des bassins de production concurrents et principaux marchés de destination du riz de la zone.
¹¹ 70 producteurs et 30 techniciens et responsables d'institutions de développement local.
¹² (a) Les différents acteurs de la filière riz, leurs fonctions et la formation des prix de long de la filière ; (b) L'intérêt et la rentabilité du stockage et les conditions de son succès ; (c) L'enregistrement technico-économique des activités de l'exploitation, le calcul des coûts de production, les seuils de rentabilité, les choix de production, les choix d'autoconsommation ou de vente ; (d) La compréhension des fluctuations saisonnières des prix du riz et les facteurs d'instabilité.

Caractéristiques structurelles et stratégies de mise en marché des producteurs

CARACTÉRISATION DES PRODUCTEURS

La caractérisation des producteurs vise ici à comprendre leurs stratégies de commercialisation et, dans un deuxième temps, leurs prédispositions à l'utilisation de systèmes d'information de marché. La typologie a été établie en fonction des périodes de commercialisation. Les prix augmentent progressivement lorsque l'on s'éloigne de la récolte et ces périodes de vente peuvent être considérées comme des indicateurs de performance commerciale. Lorsque les producteurs vendent après la récolte, à bas prix, c'est généralement sous la contrainte de besoins de trésorerie (pour des dépenses courantes, rembourser un crédit, mettre en place une culture de contre-saison...). Ils n'ont pas la possibilité d'attendre, l'offre est alors abondante et leur pouvoir de négociation est faible ; on peut s'attendre à ce que l'information d'un SIM ne leur soit pas d'une grande utilité. Les producteurs qui attendent que les prix aient augmenté pour vendre sont a priori soumis à des contraintes moindres et disposent de davantage de choix dans leurs décisions de vente ; on peut s'attendre à ce qu'ils prennent en compte l'état du marché et puissent s'intéresser à de l'information diffusée par un SIM.

Itasy. Les 302 producteurs de l'Itasy se répartissent en quatre types. Une première différenciation a été établie entre les producteurs qui vendent davantage de riz qu'ils n'en produisent et les autres. Qualifiés de producteurs-collecteurs, ils achètent aux producteurs de proximité pour revendre le plus souvent dans les marchés de collecte et de transformation, directement ou après avoir stocké le paddy. Ils se distinguent ainsi nettement des simples producteurs par des stratégies plus commerciales. Les trois autres types ont été définis en fonction de la période principale de vente : précoces (majorité des volumes vendus entre avril et septembre), tardifs (majorité des volumes vendus entre octobre et décembre) et étalés (pas de période de vente dominante¹⁴). Ces 4 groupes se différencient assez clairement par leurs caractéristiques structurelles (Tableau 2 et Figure 3).

Les producteurs qui vendent le plus précocement sont globalement moins bien dotés que les autres, alors que les producteurs-collecteurs constituent le type de plus favorisé. Les types « tardifs » et « étalés » sont en situation intermédiaire ; selon les types de capitaux, l'un ou l'autre se situe en meilleure position. Les caractéristiques du chef de ménage sont assez similaires pour les 4 types. En revanche, la présence de main-d'œuvre extérieure les différencie nettement. Cette force de travail additionnelle est à mettre en parallèle avec les surfaces cultivées et la production de riz. Il est à souligner que les « étalés » sont en ce sens mieux lotis que les « tardifs ». Ces « tardifs » apparaissent ainsi comme des producteurs disposant d'une surface relativement limitée (mais d'excédents commercialisables significatifs), cherchent à optimiser leurs revenus en vendant leur récolte au meilleur prix (le plus tardivement possible). Un nombre d'animaux plus élevé que chez les « étalés » et un recours plus fréquent au crédit de stockage peuvent contribuer à couvrir leurs besoins de trésorerie en attendant de vendre. Les « étalés » disposent des surfaces rizicoles et d'une production plus importante, ce qui leur permet de vendre en plusieurs fois, en fonction des besoins. Les « précoces », qui sont les moins bien dotés en surface rizicole, cherchent

des revenus additionnels à travers la diversification agricole et l'élevage. Ils ont peu recours au crédit de stockage et vendent leur riz rapidement après la récolte pour financer la mise en place de contre-saison en maraîchage ou l'élevage porcin. Le warrantage (GCV¹⁵) bénéficie principalement aux producteurs collecteurs et dans une moindre mesure aux « tardifs ».

Tableau 2 : Typologie des producteurs de l'Itasy - Variables stucturelles

	VARIABLES	Précoces (27 %)	Étalés (20 %)	Tardifs (37 %)	Producteurs- collecteurs (16 %)	Total
Capital humain	Niveau d'éducation du chef de ménage ¹	5,4	6,4	6,3	6,9	6,2
	Age du chef de ménage	48	42	49	42	46
	Présence de main-d'œuvre permanente ²	12 %	34 %	26 %	55 %	29 %
Capital social	Membre d'OP	16 %	44 %	28 %	33 %	29 %
	Bénéficie d'encadrement (%)	34 %	54 %	55 %	55 %	49 %
Capital naturel	Surface riz emblavée (ha)	1,28	2,39	1,77	3,14	1,99
	Rendement riz (tonnes de paddy/ha)	2,7	3,0	2,9	3,1	2,9
	Production (tonnes de paddy)	3,5	6,5	4,8	8,9	5,4
	Volume vendu (tonnes de paddy)	1,6	4,5	2,9	56	11,5
	Diversification agricole ³ (%)	27 %	23 %	22 %	21 %	24 %
Capital physique	Nombre d'animaux (UBT)	2,8	1,9	3,1	4,1	2,9
	Moto ou voiture (%)	1 %	5 %	2 %	16 %	5 %
	Téléphone portable (%)	59 %	59 %	65 %	69 %	63 %
Capital financier	Recours aux emprunts (%)	13 %	28 %	25 %	47 %	26 %
	Participation au GCV ⁴ (%)	9 %	20 %	31 %	43 %	25 %

¹ Nombre d'années d'études.
² Pourcentage d'exploitations disposant d'au moins 1 personne en main-d'œuvre extérieure permanente.
³ Valeur des productions agricoles autres que le riz/valeur totale de la production agricole.
⁴ Grenier commun villageois (crédit de stockage).

Bealanana. Les producteurs-collecteurs sont beaucoup plus rares dans le district de Bealanana que dans l'Itasy. Un seul cas a été rencontré ; il s'apparente au type « étalés » et été inclus dans ce groupe. Trois types ont donc été constitués, sur la base des périodes dominantes de commercialisation (Tableau 3 et Figure 4). La différenciation entre ces trois types apparait nettement moins marquée que dans l'Itasy. Les « étalés » sont, comme dans l'Itasy, ceux qui bénéficient des surfaces et de la production en riz la plus importante ; leur excédent commercialisable leur donne la souplesse du choix des périodes de vente, pour répondre à leurs besoins monétaires durant les mois qui suivent la récolte, tout en vendant une part de leur production au meilleur prix. Mieux dotés en foncier, les « étalés » et les « tardifs » sont également plus nombreux à mobiliser de la main-d'œuvre permanente que les « précoces ». De la diversification par du maraîchage est pratiquée en contre-saison (en particulier de l'ail en zone Ouest), mais la part qu'elle représente dans le produit agricole est très faible et similaire d'un groupe à l'autre. L'élevage est en revanche

¹³ En mai/juin (juste après les premiers tests de diffusion et de formations) ainsi qu'en novembre/décembre/janvier (à la fin des tests de diffusion et de formations).
¹⁴ Le type « étalé » comprend des producteurs de riz pluvial ou de riz précoce, qui récoltent de décembre à mars.

¹⁵ GCV : Grenier commun villageois.

plus important que dans l'Itasy, en particulier chez les « étalés » et les « tardifs ». Le capital financier distingue les 3 types : les « étalés » sont ceux qui ont le plus fréquemment recours à des emprunts et les « précoces » les moins nombreux à participer à un GCV. Il faut sur ce point noter la pratique beaucoup plus marginale du GCV dans la Sofia que dans l'Itasy (respectivement 10 % et 25 % de l'échantillon).

Une typologie basée sur le calendrier de commercialisation apparaît globalement moins pertinente dans la Sofia que dans l'Itasy. En effet, une forte différenciation géographique caractérise le district de Bealanana ; elle a une incidence sur les caractéristiques structurelles des exploitations, mais également sur leurs marges de manœuvre en termes de commercialisation. L'ensemble du district est marqué par son éloignement des grands centres de consommation et son enclavement (cf. supra). Mais au sein même du district, une distinction est à faire entre l'Ouest (où se trouve le chef-lieu de district, à 100 km de mauvaise route avant d'atteindre la 1^{re} route goudronnée) et l'Est (grande cuvette alluviale entourée de montagnes, dont le massif du Tsaratanana point culminant de l'île, reliée au chef-lieu par 30 km de route extrêmement dégradée et totalement impraticable par les camions à partir de l'arrivée des premières pluies - fin novembre à début décembre ; puis par encore 100 km de mauvaise route avant le goudron). La pression foncière est plus faible dans la partie Est que dans la partie Ouest (ce qui est vraisemblablement lié à l'accès particulièrement difficile de cette zone), mais les conditions topographiques et agro-climatiques sont plus favorables à la production rizicole. Les surfaces et les rendements y sont ainsi plus élevés, et de ce fait les volumes vendus beaucoup plus importants (plus du double ; cf. Figure 5). La mobilisation de main-d'œuvre permanente, le recours au crédit et la pratique de GCV vont dans le même sens.

Tableau 3 : Typologie des producteurs de Bealanana - Variables stucturelles

VARIABLES		Précoces (50 %)	Étalés (25 %)	Tardifs (25 %)	Est (38 %)	Ouest (63 %)	Total
Capital humain	Age du chef de ménage	43	48	43	41	46	44
	Niveau d'éducation du chef de ménage ¹	6,1	4,9	5,5	6,1	5,4	5,6
	Présence de main-d'œuvre permanente ²	24 %	34 %	32 %	49 %	17 %	29 %
Capital social	Membres d'organisations paysannes	56 %	64 %	59 %	57 %	60 %	59 %
	Bénéficie d'encadrement (%)	64 %	69 %	63 %	67 %	64 %	0,65
Capital naturel	Surface riz emblavée (ha)	196	220	194	241	177	201
	Rendement en paddy (kg/ha)	2,5	2,7	2,8	3,2	2,3	2,7
	Production (tonnes de paddy)	4 662	5 905	5 071	7 232	3 784	5 077
	Volume vendu (tonnes de paddy)	2 482	3 532	2 580	4 070	1 974	2 769
	Diversification agricole ³ (%)	7 %	6 %	15 %	2 %	13 %	9 %
Capital physique	Nombre d'animaux (UBT)	4,4	6,5	7,3	4,6	6,2	5,6
	Velo ou moto (%)	37 %	37 %	49 %	40 %	40 %	40 %
	Téléphone portable (%)	47 %	40 %	52 %	61 %	38 %	46 %
Capital financier	Recours aux emprunts (%)	24 %	34 %	20 %	30 %	23 %	25 %
	Participation à GCV (%)	6 %	14 %	13 %	17 %	5 %	10 %

¹ Nombre d'années d'études.
² Pourcentage d'exploitations disposant d'au moins 1 personne en main-d'œuvre extérieure permanente.
³ Valeur des productions agricoles autres que le riz/valeur totale de la production agricole.

La diversification agricole est plus marquée dans la zone Ouest (cultures d'ail et d'oignon), pour compenser de moindres surfaces rizicoles. Du fait de leur forte insertion dans le marché, mais peut-être également de leur moyenne d'âge inférieure et de leur niveau d'étude légèrement plus élevé, les exploitants de la zone Est sont très majoritairement pourvus de téléphones portables (tout comme dans l'Itasy), alors que moins d'un tiers de ceux de la zone Ouest en dispose.

STRATÉGIES ET CONTRAINTES DE COMMERCIALISATION

Itasy

Les producteurs de l'Itasy vendent très majoritairement du paddy (85 % des transactions pour l'ensemble de l'échantillon) et particulièrement les producteurs collecteurs (94 % des transactions) - Figure 5. Seuls les vendeurs du type « étalés » vendent plus fréquemment en riz. Cette faible pratique de la transformation par les producteurs peut être liée au fait que les grandes unités de transformations ne sont pas situées à proximité immédiate de la zone d'enquête mais principalement à Imerintsiatosika, une agglomération située à mi-chemin d'Antananarivo, le long de l'axe routier. Même à Analavory, le plus grand marché rural de la zone, le nombre de décortiqueuses et leur capacité de transformation est limitée. Une part de la valeur ajoutée est donc transférée hors de la zone de production.

Quatre-vingt-dix pour cent des ventes se font à la ferme ; celles qui ont lieu dans les grands marchés concernent surtout les producteurs-collecteurs (Tableau 4). Les principaux acheteurs sont les collecteurs et plus particulièrement les résidents (qui sont souvent des producteurs-collecteurs). Seuls les producteurs-collecteurs vendent aux grossistes et/ou riziers (pour 38 % d'entre eux). Les relations fidélisées entre les producteurs et les acheteurs sont dominantes (environ 60 % des enquêtés). Elles concernent plus particulièrement les producteurs qui vendent de façon étalée ; à l'inverse, les précoces sont les moins enclins aux relations fidélisées.

La grande majorité des producteurs contacte les acheteurs avant la vente, en particulier les producteurs-collecteurs et les « étalés ». Mais, bien que la majorité des producteurs soient équipés de téléphones portables, leur utilisation reste très marginale pour ces contacts commerciaux. Seuls certains producteurs-collecteurs (pour environ 1/3 d'entre eux), utilisent le téléphone de façon plus ou moins systématique.

Les contraintes d'accès au marché perçues par les producteurs concernent principalement (pour 98 % de l'échantillon) le marché et leur capacité à répondre à la demande (en quantité et en qualité). Suivent les contraintes de ressources (facteurs de production, moyens financiers, coûts de transports), pour 88 % des producteurs. Les contraintes physiques (enclavement, état des routes, accidents climatiques) sont mentionnées par 59 % des producteurs. Le manque d'information n'apparaît que comme secondaire : il n'est perçu que par 24 % des enquêtés.

Les types établis découlent ainsi des stratégies de vente : à un extrême, des producteurs relativement faiblement insérés dans le marché, qui vendent précocement - éventuellement avant la récolte, souvent sur les marchés de proximité. A l'autre extrême, les producteurs qui assurent des fonctions de collecte et sont de ce fait fortement insérés dans les réseaux de commercialisation, avec les liens avec les grands acheteurs du marché de regroupement et de transformation de la zone. Mais même pour les producteurs de l'Itasy qui vendent à la ferme, les grands marchés ruraux sont relativement proches (Photo 8) et connectés à la capitale par une bonne route (Imerintsiatosika, le centre de collecte et de transformation le plus dynamique du pays à environ 1 h de route et l'entrée de Tananarive à environ 2 h).

Tableau 4 : Stratégies de commercialisation - Itasy

	Précoces (27 %)	Etalés (20 %)	Tardifs (37 %)	Producteurs- collecteurs	Total
Lieux de vente dominants	A la ferme (88 %), au marché local (10 %)	A la ferme (90%)	A la ferme (93 %)	A la ferme (86 %), au grand marché (14 %)	A la ferme (90 %)
Type d'acheteurs	Collecteurs résidents (62 %) ou non-résidents (25 %)	Collecteurs résidents (56 %) ou non-résidents (25 %)	Collecteurs résidents (62 %) ou non-résidents (19 %)	Grossistes/ riziers non-résidents (38 %), collecteurs non-résidents (34 %)	Collecteurs résidents (49 %) collecteurs non-résidents (26 %) grossistes/rizier non-résidents (10 %) Grossistes/rizier locaux (7 %)
Fidélisation de la vente (%)	54 %	72 %	58 %	61 %	60 %
Contacte clients pour proposer offre (%)	70 %	77 %	61 %	80 %	70 %
Contacte clients pour savoir prix (%)	70 %	79 %	64 %	86 %	72 %

Bealanana

Les producteurs de la région Sofia vendent leur produit sous forme de paddy ou de riz blanc. Dans la zone Est, la vente est réalisée presque exclusivement en riz (Photo 9) ; dans la zone Ouest, c'est au contraire les ventes en paddy qui sont très largement dominantes (Figure 7).

Tableau 5 : Stratégies de commercialisation - Bealanana

	Est (38 %)	Ouest (63 %)	Total
Lieux de vente dominants	à la ferme ou au marché communal	presque exclusivement à la ferme	
Type d'acheteurs	collecteurs externes (50 %) ou du village (1/3)	collecteurs externes (60 %) ou du village (1/3)	
Fidélisation de la vente (%)	12 %	8 %	10 %
Contacte clients pour proposer offre (%)	50 %	42 %	45 %
Contacte clients pour savoir prix (%)	75 %	56 %	63 %

Les stratégies et contraintes de commercialisation se différencient davantage par la zone de production que par type de producteurs. Aussi, seuls les résultats par zone sont-ils présentés ici (Tableau 5). Dans la zone Est, la presque totalité des ventes ont lieu avant la fin novembre, avant que la route reliant au chef-lieu de district ne devienne impraticable. Les producteurs de cette zone vendent à la ferme (2/3 d'entre eux) ou au marché communal (1/3 d'entre eux). Pour compenser leurs contraintes d'enclavement, leurs stratégies de commercialisation apparaissent ainsi comme plus offensives que dans la zone Ouest : ils transforment avant de vendre, vont à la rencontre des acheteurs sur le grand marché de la zone, sont plus nombreux à prendre des contacts commerciaux en préalable à la vente. Dans la zone Ouest, les producteurs peuvent vendre plus tardivement (jusqu'à fin décembre). Ceci est toutefois l'apanage de ceux qui possèdent les surfaces les plus importantes (> 4 ha), alors que les plus petits (< 1 ha) sont contraints de vendre. L'accès des villages étant facile pour les collecteurs, les producteurs de cette zone vendent presque exclusivement à la ferme.

Pour les producteurs de la zone Est, les contraintes d'accessibilité sont dominantes (citées par 85 % des enquêtés). La route qui dessert cette zone est en effet dans un état de dégradation extrême. Gros vendeurs, mais contraints de vendre avant l'arrivée des grosses pluies, ils se préoccupent particulièrement de l'état du marché : près de 4/5° d'entre eux perçoivent le déficit d'information comme une contrainte. Cette contrainte est également perçue par plus des deux-tiers des producteurs de la zone Ouest. Mais la première difficulté rencontrée par ces derniers (qui vendent surtout sous forme de paddy) est la pratique d'unités de mesures non standardisées utilisées par les collecteurs, qui jouent en leur défaveur¹⁶.

- Dans la zone Est : malgré leur forte capacité de production, les producteurs sont contraints par l'isolement saisonnier, qui limite leur possibilité de stockage. Seuls les plus gros sont en mesure d'amener leur paddy jusqu'à Bealanana, le stockent sur place et le vendent plus tardivement. Les contraintes d'accessibilité sont bien perçues comme étant les plus fortes. L'essentiel des ventes ont lieu avant décembre (avant que la route devienne impraticable). 2/3 de producteurs dans la zone Est vendent à la ferme et 1/3 au marché communal le plus proche.
- Dans la zone Ouest, les surfaces et volume de production sont moindres et les marges de manœuvre pour le calendrier de commercialisation sont plus importantes. Si la majorité stocke (mis à part les plus petits), la facilité d'accès pour les collecteurs ne les incite pas se déplacer : ils vendent à la ferme. Ils se sentent pénalisés par le « jeu » des collecteurs sur les unités de mesures.

Dans une zone comme dans l'autre, le manque d'information sur les marchés est situé au 2° rang des contraintes de commercialisation perçues.

ACCÈS AUX MOYENS DE COMMUNICATION ET BESOINS EN INFORMATION

La généralisation du téléphone portable est encore loin d'être systématique chez les producteurs, notamment dans la zone de Bealanana, où la couverture du réseau reste très déficiente. Dans l'Itasy 60 % de l'échantillon possède un téléphone portable ; à Bealanana 62 % en possède dans la zone Est, mais seulement 35 % dans la zone Ouest (Tableaux 6 et 7). De plus, l'usage du téléphone reste essentiellement vocal et la pratique des SMS est limitée, surtout à Bealanana (48 % des cas à Bealanana et 70 % dans l'Itasy).

¹⁶ Les prix du paddy sont définis en unités de mesures locales (des bidons dénommés « daba »). Mais les rabatteurs et les collecteurs utilisent des « daba-be » (grands daba) d'environ 18 kg lorsqu'ils achètent au village, puis ils revendent en « daba » d'environ 15-16 kg à aval.

Les acteurs de l'aval sont beaucoup plus systématiquement équipés de téléphones portables (Photo 10) que les producteurs ; dans l'Itasy 97 % des transformateurs et 92 % des commerçants possèdent au moins un téléphone portable, dans la Sofia 80 % des transformateurs et 92 % des commerçants. L'usage des SMS reste toutefois très limité dans la Sofia (5 % des transformateurs et 15 % des commerçants) alors qu'il est plus fréquent dans l'Itasy (81 % des transformateurs et 71% des commerçants).

Tableau 6 : Accès à l'information et besoins en information exprimés - Itasy

	Précoces (27 %)	Etalés (20 %)	Tardifs (37 %)	Producteurs-collecteurs (16 %)	Total
Possède téléphone portable	59 %	59 %	65 %	69 %	63 %
Maîtrise SMS ¹	67 %	66 %	71 %	76 %	70 %
Type d'information demandé	Prix marchés de consommation (33 %) Contacts d'acheteurs (28 %) Préférences des consommateurs (22 %)			Prix marchés consommation (20 %) Prix zones production (19 %) Contacts d'acheteurs (17 %)	-
Canaux de diffusion souhaités	Radio SMS push	Radio Tél/SMS à la demande	SMS push Radio	Appel/SMS à la demande Radio	-
Fréquence de diffusion souhaitée	Semaine (mois, saison)	Semaine (à la demande, mois)	Semaine (à la demande, saison)	Semaine (à la demande)	-
Prêts à dépenser pour un SIM (%)	80 %	97 %	80 %	90 %	85 %
Dépenses envisagées pour un SIM ² (Ar/an)	31 888	26 263	39 114	93 718	43 656

¹ Au moins 1 membre du ménage sait utiliser les SMS.
² Moyennes pour les agriculteurs prêts à dépenser de pour avoir accès à un SIM.

Le type d'information demandé par les producteurs reflète leurs besoins de mieux connaître la demande (prix sur les marchés de consommation et préférences des consommateurs), mais également de développer des liens directs avec des acheteurs. Les producteurs-collecteurs, parce qu'ils sont également des acheteurs, s'intéressent également aux prix dans les zones de production.

La radio est davantage demandée dans l'Itasy que dans le district de Bealanana, ce qui s'explique par une meilleure couverture géographique des radios locales et de la radio nationale. Dans l'Itasy on observe un gradient de « complexification » et de précisions des différentes formes de diffusion, entre les producteurs les moins insérés dans le marché (qui sont également les moins dotés en divers types de capitaux) et les producteurs collecteurs. A Bealanana, les producteurs de la zone Est, plus gros vendeurs, sont de même demandeurs de modes de diffusion et des fréquences de diffusion plus personnalisés (SMS à la demande) que ceux de la zone Ouest, qui préfèrent des formes de communication orales et à moindre fréquence.

Tableau 7 : Accès à l'information et besoins en information exprimés – Bealanana

	Est (38 %)	Ouest (63 %)	Total
Possède téléphone portable	61 %	38 %	46 %
Maîtrise SMS ¹	58 %	42 %	48 %
Type d'information demandé	Contacts des acheteurs, prix dans les zones de production, prix dans les marchés de consommation, quantités disponibles dans les marchés de consommation	Contacts des acheteurs, prix dans les zones de production, quantité disponibles dans les zones de production, préférences des consommateurs	-
Canaux de diffusion souhaités	SMS à la demande, radios locales	Séances d'information, radios locale	-
Fréquence de diffusion souhaitée	Mois, à la demande	Mois, saison	-
Prêts à dépenser pour un SIM (%)	81 %	49 %	61%
Dépenses envisagées pour un SIM ² (Ar/an)	72 000	52 000	64 800

¹ Au moins 1 membre du ménage sait utiliser les SMS.
² Moyennes pour les agriculteurs prêts à dépenser de pour avoir accès à un SIM.

Une analyse factorielle réalisée sur l'échantillon de Bealanana a par ailleurs fait ressortir l'âge et le niveau d'éducation comme discriminants pour la possession de téléphones portables et l'intérêt porté à ce mode de communication pour être informé sur la situation du marché. A moyen terme, on peut donc s'attendre, avec le renouvellement des générations, à une pénétration de plus importante du téléphone et une pertinence plus marquée de cet outil comme support de communication pour les SIM.

Pour les acteurs de l'aval, les types d'information les plus demandés sont les prix (dans les zones de production et les zones de consommations), les quantités disponibles dans les zones de production et les préférences des consommateurs. Le téléphone (SMS ou message vocal) est le mode de diffusion souhaité par les deux-tiers des commerçants et transformateurs (notamment ceux dont le volume d'activité est important), suivi de la radio, souhaitée pour les informations moins éphémères que les prix.

Discussion et conclusion

Les résultats des enquêtes mettent en évidence une différenciation importante des pratiques et stratégies de commercialisation de producteurs de riz, en fonction des volumes commercialisés (liés à des dotations foncières et au niveau technique), associés à des caractéristiques individuelles du chef de ménage (éducation, âge). Dans l'Itasy, les producteurs les mieux dotés assurent également de la collecte : ils stockent et revendent tout au long de la campagne à des grossistes, des riziers ou de grands collecteurs. A l'autre extrême, ceux qui sont moins bien dotés vendent précocement, à plus bas prix, à des collecteurs locaux.

Dans le cas d'extrême délabrement des axes routiers et d'éloignement des lieux de consommation qui caractérise le district de Bealanana, le degré d'enclavement devient un déterminant majeur des stratégies de commercialisation. Quel que soit leurs moyens d'existence, les producteurs de la zone la plus enclavée sont contraints de vendre avant l'arrivée des pluies. On observe ainsi un effet antagoniste entre les facteurs individuels (dotations) et l'environnement (enclavement) dans le cas de Bealanana : ce sont les producteurs dont l'accès au marché est le plus contraint qui bénéficient des surfaces les plus importantes et des meilleurs rendements, induisant de ce fait des stratégies plus « offensives » d'insertion dans le marché (transformation avant la vente, recherche d'acheteurs, vente au grand marché de la zone), pour valoriser des volumes commercialisés importants. En termes de développement local, cette situation paradoxale de la riziculture de la grande cuvette de production de l'est de Bealanana (l'Ankaizina) met en lumière l'enjeu économique majeur du désenclavement de la zone (en matière d'infrastructures routières mais également de couverture des réseaux téléphoniques et de la radio). Au-delà du bien-être de la population locale, cet enjeu concerne également l'approvisionnement du nord du pays, pénalisé par des prix particulièrement élevés et plus instables.

Le déficit d'information est cité par un nombre significatif de producteurs, même s'il n'apparaît pas en tout premier rang des contraintes de commercialisation (plus des deux-tiers dans la Sofia et un quart dans l'Itasy). Cette contrainte est perçue comme particulièrement prégnante par les producteurs de la zone enclavée de l'est de Bealanana, qui disposent d'importants volumes d'excédents commercialisables. Ceci justifie pleinement la préoccupation des SIM de chercher à mieux toucher les producteurs, y compris lorsqu'il s'agit, comme le riz, de produits destinés en premiers lieu à l'autoconsommation.

Mais les formes de diffusion doivent être mixtes. Le seul recours à de la diffusion par SMS exclurait une part importante de producteurs, qui n'ont pas encore accès au téléphone ou ne sont pas familiarisés avec la pratique des SMS. Les SIM peuvent être des moteurs de diffusion de ces outils, mais cela implique un effort important de vulgarisation pour leur maîtrise.

Les premiers résultats des enquêtes de feedback montrent qu'au-delà de la maîtrise de l'outil, les besoins en accompagnement sont également importants pour permettre aux producteurs de comprendre le sens de l'information diffusée par SMS et son utilité (d'où l'intérêt d'associer différentes formes de communication : apprentissage, collaboration entre SIM et acteurs locaux du développement).

Il faut toutefois rappeler que les producteurs enquêtés ne sont pas représentatifs de l'ensemble de la population agricole ; seuls ceux disposant d'un excédent significatif ont été ciblés. Ils représentent environ la moitié supérieure des exploitations de chacune des deux régions d'enquêtes. Pour les producteurs disposant de surfaces moindres (< 0,5 ha), la production est avant tout destinée à l'autoconsommation ; leurs ventes de riz ne sont que très limitées et contraintes par des besoins de trésorerie. Un meilleur accès à l'information n'est pas pour eux une priorité, mais une amélioration de la gestion de la mise en marché et du stockage par les producteurs plus importants peut contribuer à réduire l'instabilité des prix locaux, ce qui serait profitable à tous.

Toutefois, l'information ne constitue nulle part la principale contrainte. En premier lieu, viennent les contraintes d'enclavement et d'unités de mesure (Photo 11) pour le District de Bealanana ; la faiblesse des prix à la récolte, les facteurs limitants les volumes ou la qualité de la production, l'enclavement, les accidents climatiques pour l'Itasy. Ceci conforte l'idée qu'un meilleur accès à l'information ne permet pas à lui seul de lever le faisceau de contraintes auxquels sont soumis les producteurs (Galtier *et al.*, 2014). Améliorer l'accès des petits producteurs au marché doit être abordé de façon plus globale (Arias *et al.*, 2013).

Références bibliographiques

- Anderson, J., Ward, C., Koontz, S., Peel, D., & Trapp, J. (1998). Experimental simulation of public information impacts on price discovery and marketing efficiency in the fed cattle market. *Journal of Agricultural and Resource Economics* (23), 262-278.
- Andriambelona, A. A. (2012). Assessing spacial and inter-temporal integration: rice market in Madagascar. Université d'Auvergne: Master, CERDI, CIRAD.
- Andriandralambo, N. (2014). *Systèmes d'informations de marché et stratégies de commercialisation des riziculteurs de la région Itasy*. Antananarivo: ESSA.
- Arimoto, Y., Sakurai, T., Tanaka, M., & Ralandison, T. (2013). *Rice trading in Madagascar: Report on rice trader survey*. PRIMCED Discussion Papers Series N°38.
- Banque Mondiale. (2011). *Marchés agricoles à Madagascar : contraintes et opportunités. Rapport No. 66028-MG*. Banque Mondiale. Agricultural and Rural Development Unit (AFTAR).
- Carimentrand, A. (2011). *Marché agricole à Madagascar Contraintes et Opportunités-Filière Riz*. Banque mondiale, Cirad.
- Chimirri, C. (2014). *Madagascar rice market. Market Information Systems and availability of information. The case of Sofia and Itasy region*. Univ.Firenze.
- Courtois, P., & Subervie, J. (2014). Farmer bargaining power and market information services. *Amer. J. Agr. Econ.*, pp. 1-25.
- D-Benz, H., Egg, J., Galtier, F., Rakotoson, J., Shen, Y., & Kizito, A. (2012). *Les systèmes d'information sur les marchés agricoles en Afrique subsaharienne: de la première à la deuxième génération*. (AFD, Ed.) Paris: Focales 14.
- David-Benz, H., Rasolofo, P., & Andriamparany, S. (2014). La régulation des prix du riz à Madagascar: l'action conjointe de l'information et de la concertation. *Cahiers Agricultures*, 23, pp. 295-303.
- DFID. (1999). *Sustainable livelihoods guidance sheets*.
- Egg, J., & Galtier, F. (1998). *Des dispositifs de diffusion de prix à des systèmes d'information de marché (SIM) à géométrie variable*.
- Egg, J., Galtier, F., & David-Benz, H. (2013). Les TIC et les SIM: Une nouvelle génération de systèmes d'information sur les marchés agricoles. (J. Ledjou, & H. Randrianasolo-Rakotobe, Eds.) *Des réseaux et des hommes, Les Suds à l'heure des technologies de l'information et de la communication*.
- Fafchamps, M., & Gabre-Madhin, E. (2006). Agricultural markets in Benin and Malawi. *Afr. J. Ag. Res.*(1), 67-94.
- Fafchamps, M., & Minten, B. (2012). Impact of SMS-Based Agricultural Information on Indian Farmers. *The World Bank Economic Review*.
- FAO/UPDR. (2001). *Diagnostic et perspectives de développement de la filière riz à Madagascar. Rapport final*. Antananarivo: Projet FAO TCP/MAG/8821.
- Galtier, F., Subervie, J., David-Benz, H., & Egg, J. (2014). Les systèmes d'information sur les marchés agricoles dans les pays en développement : nouveaux modèles, nouveaux impacts. *Cahiers Agricultures*, 23, pp. 245-258.
- Garuku, M., Winters, K., & Stepman, F. (2009). *Inventaire des services d'Information agricoles novateurs utilisant les TIC*. Accra, Ghana: FARA: Forum pour la Recherche Agricole en Afrique.
- Goyal, A. (2010). Information, Direct Access to Farmers, and Rural Market Performance in Central India. *American Economic Journal : Applied Economics*(2(3)), pp. 22-45.

INSTAT/DSM. (2011). *Enquête Périodique auprès des Ménages 2010, Rapport principal*. Antananarivo: Ministère d'Etat chargé de l'Economie et de l'Industrie, PNUD, INSTAT.

Kizito, A., Donovan, C., & Staatz, J. (2012). Impact of Agricultural Market Information Systems Activities on Market performance in Mozambique. *Working Paper 124*, 60 p. MSU/AEC.

MAEP. (2007). *Recensement de l'Agriculture (RA): Campagne agricole 2004-2005*. Repoblikan'i Madagasikara, Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche, Direction du marketing et des études économiques, Service des statistiques agricoles. Antananarivo: MAEP.

Minten, B., & Dorosh, P. (2006). Rice Markets in Madagascar in Disarray: Policy Options for Increased Efficiency and Price Stabilization. *Africa Region Working Paper Series (No. 101)*, 1-73.

Mitra, S., Mookherjee, D., Torero, M., & Visaria, S. (2013). *Asymmetric Information and Middleman Margins: An Experiment with West Bengal Potato Farmers*. Mimeo. Boston, MA: Boston University.

Moser, C. M., Barrett, C. B., & Minten, B. (2009, May). Spatial Integration at Multiple Scales: Rice Markets in Madagascar. *Volume 40, Issue 3*, pp. 281-294.

Nakasone, E. (2013). *The role of Price Information in Agricultural Markets: Experimental Evidence from Rural Peru*. University of Maryland.

Perry, & Randriambololona. (2010). *The Sofia Region's integrated rural support program : Study of the rice value chain*. Aga Khan Foundation, Antananarivo.

Rakotonarivo, C. (2014). *Place de l'information de marché pour les acteurs de la commercialisation du riz : cas du District de Bealanana*. Antananarivo: ESSA.

Randrianarisoa, J.-C. (2003). Analyse spatiale de la production rizicole malgache. *Conférence «Agriculture et pauvreté»*. Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural.

Razafimanantsoa, T. (2014). *Systèmes d'information de marché et dynamique de la commercialisation du riz dans la région Itasy : logiques et stratégies des acteurs*. Antananarivo: ESSA.

Robbins, P. (2000). *Review of Market Information Systems in Botswana, Ethiopia, Ghana, and Zimbabwe*. Wageningen: CTA.

Scoones, I. (1999). *Sustainable rural livelihoods, a framework for analysis*. Retrieved from IDS Environment Group web site: <http://www.ids.ac.uk/ids/research/env/index.html>

Shepherd, A. W. (1997). *Les services d'information sur les marchés: théorie et pratiques*. Rome: FAO.

Soanjara, H. (2014). *Place de l'information dans les pratiques et stratégies de commercialisation des riziculteurs. Cas du District de Bealanana dans la Région Sofia*. Antananarivo: ESSA.

Stifel, D., & Randrianarisoa, J. (2006). Agricultural policy in Madagascar: A seasonal multi-market model. *Journal of Policy Modeling*(28), pp. 1023-1027.

Sulaiman, R., Hall, A., Kalaivani, N., Dorai, K., & Reddy, V. (2011). *Necessary but not sufficient : information and communication technology and its role in putting research into use*. RIU, LINK.

Svensson, J., & Yanagizawa, D. (2009). Getting Prices Right: The Impact of the Market Information Service in Uganda. *JEEA, vol. 7 (2-3)*, pp. pp. 435-445.

Tollens, E. (2002). Market Information Systems in Liberalized African Export Commodity Markets: The Case of Cocoa and Coffee in Côte d'Ivoire, Nigeria, and Cameroon. *Working Paper*. Leuven: Katholieke Universiteit.



Photo 1 : Riz, principale ressource des ménages agricoles (Analamanga)



Photo 2 : Diversité des qualités de riz et des prix au détail (Antananarivo)

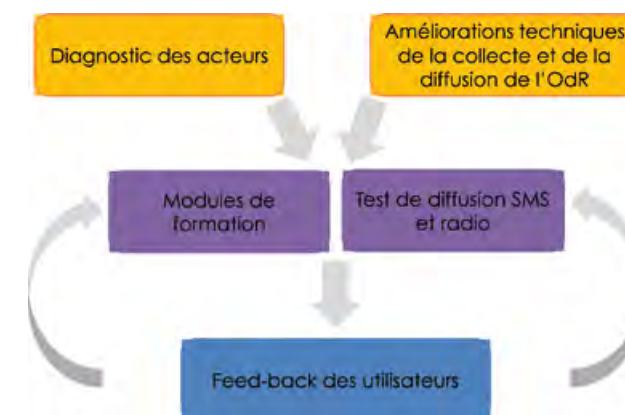


Figure 1 : La démarche itérative d'InfoRiz



Photo 3 : Récolte de paddy (Itasy)



Photo 4 : De Bealanana à la RN 4 - Une route très dégradée (Sofia)

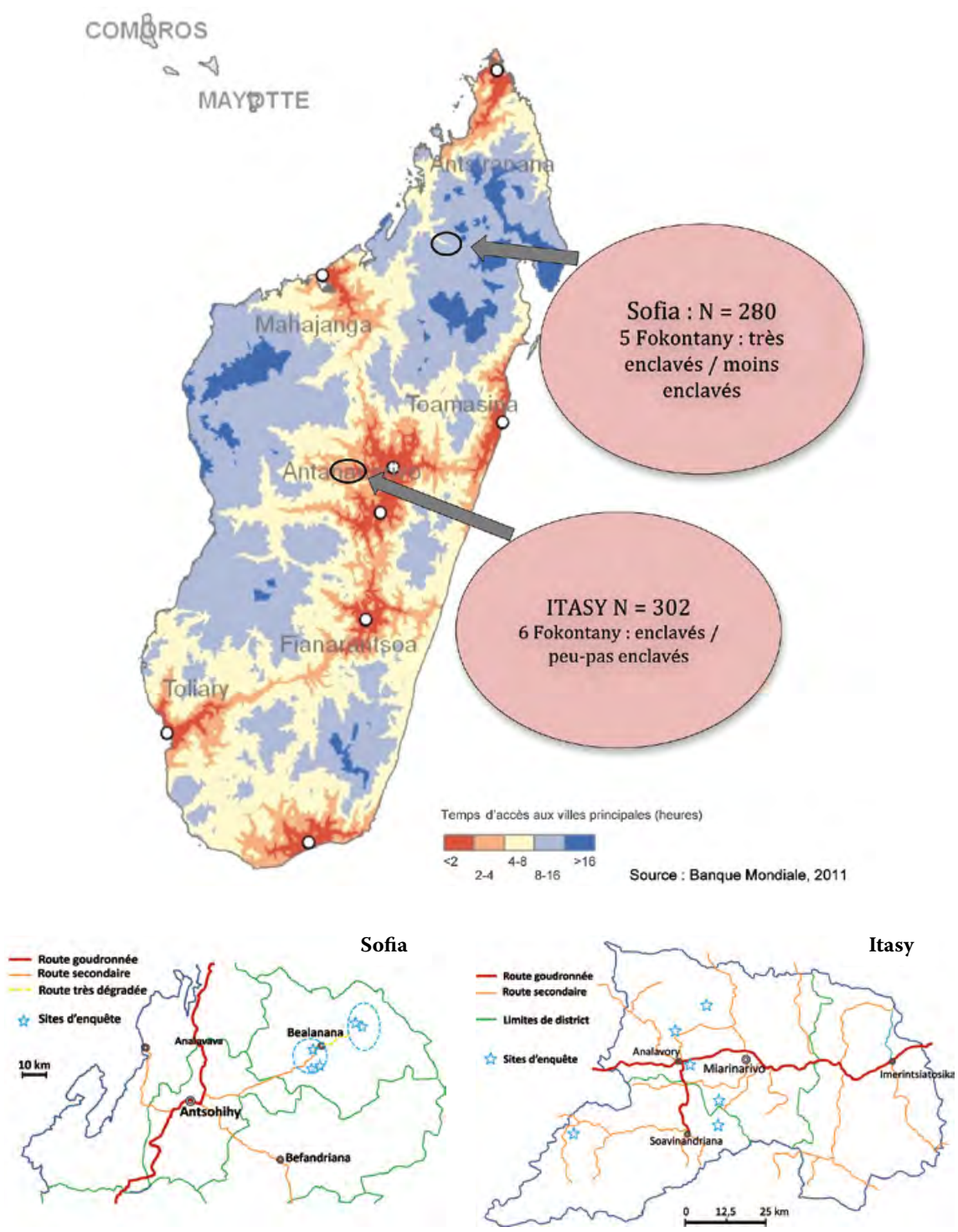


Figure 2 : Localisation des deux sites d'étude (Sofia et Itasy) et des lieux enquêtés



Photo 5 : Enquête auprès des producteurs (Ambovononby-Sofia)



Photo 6 : Les technologies de l'information présentes jusque dans les marchés ruraux (marché rural proche d'Antsohihy - Sofia)



Photo 7 : Test des modules pédagogiques InfoRiz avec les techniciens (CRFPA, Itasy)



Photo 8 : Vente de riz au détail (Analavory, Itasy)

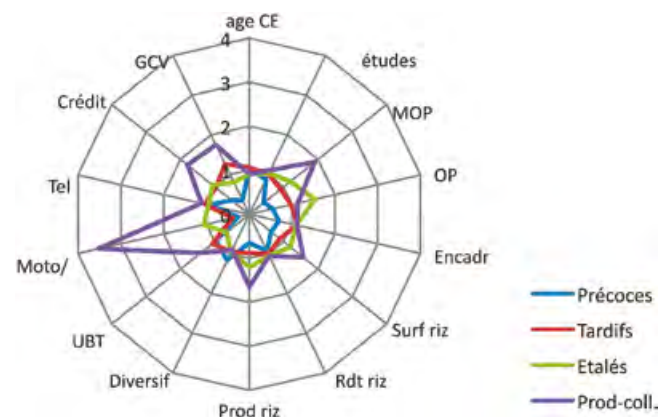


Figure 3 : Moyens d'existence par type - Itasy

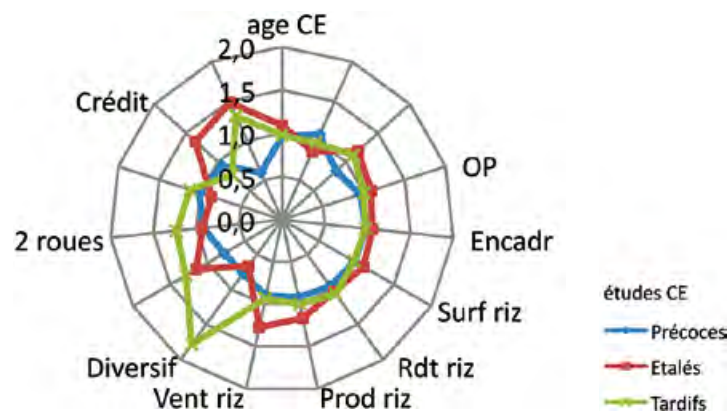


Figure 4 : Moyens d'existence par type - Bealanana

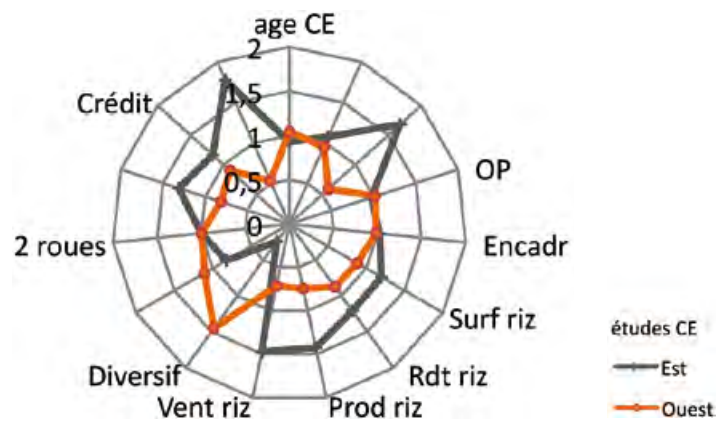


Figure 5 : Moyens d'existence par zone - Bealanana

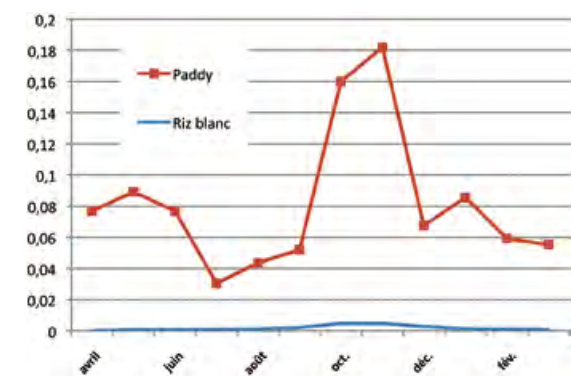


Figure 6 : Saisonnalité des ventes en paddy et en riz dans l'Itasy
(% du volume total - équiv. paddy)

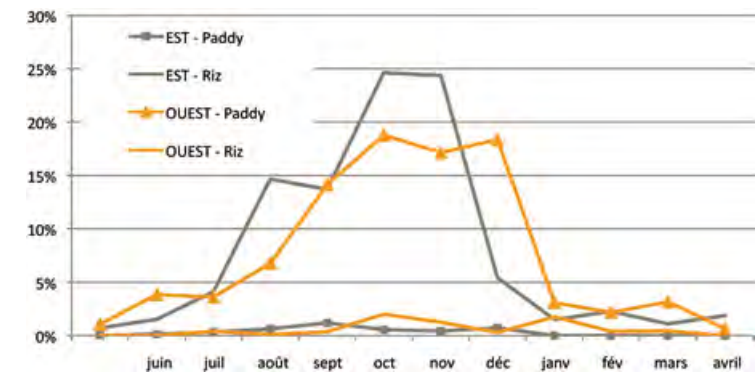


Figure 7 : Saisonnalité des ventes en paddy et en riz dans le district de Bealanana
(% du volume total par zone - en équiv. paddy)



Photo 9 : Décortiqueuse mobile à Ambatoriha (zone d'enquête Est, Itasy)



Photo 10 : Un usage régulier du téléphone chez les collecteurs de riz (zone d'enquête Est, Sofia)



Photo 11 : Unités de mesures et pesée, un enjeu de transparence du marché (Analavory, Itasy)

Vers une politique nationale de lutte contre les maladies animales

*Améliorer la performance des élevages de la carpe et du tilapia par une meilleure connaissance de leur origine génétique
Mettre en place des mesures adaptées contre la maladie de Newcastle et la cysticercose*

Les ressources zoogénétiques tiennent une importance capitale aussi bien au niveau de la biodiversité malgache qu'au niveau économique.

Les trois chapitres qui vont suivre, décrivent l'évolution des filières piscicole, avicole et porcine, chacune ayant un rôle prépondérant dans le système de l'économie malgache. Une des problématiques communes de ces filières est liée aux modes de conduite des élevages paysans qui sont la cause de maladies chez les animaux (à l'exemple de l'herpès virose de la Carpe, la Maladie de Newcastle et la Cysticercose porcine). Certaines sont par ailleurs transmissibles à l'homme.

La pisciculture est un secteur de production relativement ancien puisqu'elle a été introduite à Madagascar au début des années 1910. Elle a connu au fil des années, l'appui de différents organismes étatiques (DRPRH¹) et internationaux (FAO, APDRA²) pour se développer et satisfaire une demande croissante liée à l'accroissement démographique. Dans ce contexte de développement de système de production aquacole à but alimentaire, les lacs constituent une ressource à potentiel important et peuvent être mis en valeur par la pisciculture en cage. Cette dernière, lorsqu'elle est conduite de manière semi-intensive ou intensive, améliore le revenu des exploitations piscicoles.

A Madagascar, l'introduction d'espèces exotiques a déjà contribué à améliorer la valeur des systèmes agro-piscicoles (le tilapia dans les lacs et la carpe en rizière). Pour que l'aquaculture continentale atteigne son potentiel de production alimentaire, le collectif « MADAPISCI » : « **Appui à la pisciculture continentale malgache** » a opéré un certain nombre d'études relatives à l'environnement physique, biologique, économique et social. Les enquêtes réalisées auprès de plusieurs sites d'élevage, analysent le contexte de la filière aquacole et évaluent les effets des différents paramètres sur la réussite de cette entreprise, notamment par le recours intensif d'intrants de qualité comme les aliments et les alevins. Les résultats de ces études préliminaires ont permis d'établir une typologie des producteurs d'alevins sur la base de la conduite des cycles d'élevage (production d'alevins, sélection et reproduction, grossissement, entretien des stocks) gérés dans les différents milieux de six Régions de Madagascar.

¹ Direction Régionale de la Pêche et des Ressources Halieutiques.

² Association Pisciculture et Développement Rural en Afrique

L'ensemble des résultats obtenus montre que le principal problème repose sur l'aspect génétique des espèces. Dans le cadre des travaux du collectif, les chercheurs se sont intéressés sur le recensement et diagnostic génétique de populations de la Carpe et du Tilapia en s'interrogeant sur les dynamiques d'évolution de ces populations à partir des souches existantes, ceci après plusieurs décennies de pratiques d'élevages en étang et en rizière. Une étude comparative avec les populations existantes en milieu naturel a montré que le système mis en place a permis de maintenir une qualité et variabilité génétique suffisante de la carpe grâce à une contribution des petits éleveurs.

A Madagascar, les volailles dépasse actuellement les 35 millions de têtes. L'aviculture villageoise, constituée de petites exploitations familiales à faible niveau d'intrant, représente 86 % de ce cheptel (FAOStat, 2014). La maladie de Newcastle (MN), représente la principale contrainte économique (+ 40 % des mortalités) en l'absence de vaccination généralisée des volailles domestiques. Elle constitue, avec l'influenza aviaire (IA), le complexe des pestes aviaires qui figurent dans la liste des maladies infectieuses à notifier à l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE). Ces maladies représentent également une contrainte économique importante dans les échanges internationaux.

Les recherches consacrées à la MN ont été menées par le collectif « Newcastle ». Leurs travaux ont permis d'apprécier la diversité des virus présents dans l'avifaune domestique et sauvage et de comprendre le déroulement des cycles épidémiologiques. La transmission du virus dans les élevages familiaux des hauts plateaux malgaches et les filières aviaires associées, est également traitée afin i) d'appréhender sa diffusion à travers les circuits de commercialisation et ii) d'utiliser les résultats sérologiques et virologiques pour tracer le passage du virus chez les différents acteurs du réseau : éleveurs, collecteurs de volailles, marchés. De ces constats, il en découle une série de recommandations de conduite d'élevage destinées aux éleveurs et autres intervenants de la filière.

Les premiers résultats obtenus à partir d'échantillons prélevés dans des foyers de MN ou lors de suivis longitudinaux (surveillance) ont montré l'existence de souches virales pathogènes, d'un génotype jusqu'alors inconnu : le génotype XI. Cela suggère une dérive génétique originale du virus de la MN durant les dernières décennies à Madagascar et pose la question de l'efficacité des vaccins utilisés. D'autre part, des souches virales de pathogénicité variable (génotypes I, III) ont été identifiées, notamment chez la faune sauvage.

Enfin, les systèmes d'élevage familiaux sont caractérisées par la présence simultanée de plusieurs espèces d'oiseaux : poulets *gasy* (race locale), oies et canards en particulier. Ces espèces sont réceptives, mais de sensibilité variable au virus de la MN. Dans les élevages, les animaux de ces différentes espèces ont de nombreux contacts directs et indirects entre eux. Selon leur réceptivité et sensibilité d'espèce, ils pourraient jouer des rôles divers en termes de réservoir et de maintenance virale. La dynamique de circulation des génotypes viraux identifiés chez les espèces sensibles, la diversité de leur virulence et l'influence du génotype viral sur la protection vaccinale sont mal connues. Des travaux théoriques suggèrent que dans cette situation, une vaccination partielle peut aboutir à augmenter la taille finale de l'épidémie et prolonger la persistance du virus dans les populations en présence.

L'objectif est de contribuer à modéliser la dynamique de diffusion des virus dans les foyers de MN en systèmes d'élevage multi-espèces afin de proposer des mesures de lutte ciblées, notamment vaccinale (espèces, période...) faisant appel à un vaccin adapté, permettant de bloquer cette diffusion et les pertes économiques. Le modèle développé sera utilisé pour rendre compte du rôle des différentes espèces aviaires dans l'épidémiologie de la MN et tester des stratégies de lutte, notamment la vaccination partielle ou totale, mono ou plurispécifique.

Le dernier sujet attrait aux maladies animales est consacré à la cysticercose porcine, maladie réputée grave. Il s'agit d'une zoonose, maladie commune à l'homme et à l'animal. Sa connaissance s'est précisée depuis le développement des méthodes de diagnostic de pointe, notamment chez l'homme. L'OMS, dans sa classification, l'a répertorié parmi les maladies négligées. A Madagascar, cette maladie semble connaître de l'ampleur. Les scientifiques du collectif « CYSTICERCOSE » : **« une maladie négligée »**, se proposent donc de donner plus de précision sur l'épidémiologie, sur les méthodes de diagnostic et les traitements possibles et existants. Ils suggèrent également des méthodes de conduite pour l'élevage de porcs afin de rompre le cycle biologique du parasite au niveau de la filière. De bonnes conduites d'hygiène sur les plans alimentaire et sanitaire, et la qualité de produit proposée à la consommation, s'avèrent primordiales pour tout modèle de lutte contre cette maladie. Là encore, des recommandations traduites sous formes de différents supports de communication, notamment sur le péril fécal et les conduites des élevages, ont été élaborées par les chercheurs de l'Institut Pasteur de Madagascar pour prévenir les populations rurales (enfants et parents) des risques encourus de la téniose chez l'homme liés à ce problème émergeant de la cysticercose porcine à Madagascar.



Croiser une approche comprehensive des systèmes d'élevage piscicole et leur diagnostic génétique - de l'ambition aux résultats

Combining a comprehensive approach to fish-farming systems with assessment of their genetics - from planning to realization

M. R. OSWALD^{1,7}
 M. RAVAKARIVELO²
 O. MIKOLASEK^{3,7}
 H. RASAMOELINA^{2,4}
 H. de VERDAL³
 B. BENTZ⁷
 E. PEPEY³
 F. COUSSEAU⁵
 M. VANDEPUTTE⁶

(1) ISTOM, 95 094 Cergy, France

(2) DRZV-FOFIFA, 101 Antananarivo, Madagascar

(3) UR Aquaculture et Gestion des Ressources Aquatiques, Dép PerSyst CIRAD-TA B-20/01 Montpellier

(4) COI, Réseau SEGA, Maurice

(5) APDRA, Pisciculture Paysanne, Antsirabe, Madagascar

(6) INRA-Ifremer, 34 250 Palavas les Flots, France

(7) APDRA Pisciculture Paysanne, 91300 Massy, France

Résumé

La carpe est le premier poisson de pisciculture à Madagascar ; sa population est issue d'introductions dont la première date de 1912. Partant d'un souci de recenser les ressources génétiques actuelles de cette espèce d'élevage au niveau national, des poissons de plusieurs bassins versants du milieu naturel et d'éleveurs variés ont été analysés. En parallèle, les producteurs d'alevins ont été enquêtés afin de comprendre si leurs pratiques étaient susceptibles d'avoir conservé des populations avec des caractéristiques spécifiques.

Ce travail montre que la présentation habituelle des différentes variétés ne résiste pas à l'analyse génétique. Un réseau très actif d'écloseries incluant de nombreux producteurs de taille variable et donc un très grand nombre de géniteurs s'est montré en capacité d'entretenir une souche avec une bonne potentialité. Ce vaste réseau de producteurs d'alevins, de tailles différentes, constitue une ressource précieuse pour le développement de cet élevage qu'il convient de mettre en valeur.

Les résultats obtenus sur le tilapia sont présentés en parallèle soulignant l'intérêt de s'interroger sur les ressources génétiques présentes.

Abstract

Carp is the first fish reared in aquaculture in Madagascar; its population is coming from introductions since 1912. With a concern to identify the actual genetic resources of carps at the national level, fish from different watersheds from different natural and reared habitats were analysed. Simultaneously, fry producers inquiries were done to understand if their practices were susceptible to preserve populations with specific characteristics.

This work showed that the classical presentation of the different variety was not supported by the genetic analyses. An active network of hatcheries including different size producers involving a high number of breeders had the capability to maintain a strain with an interesting potential. This broad network of fry producers constitutes a valuable resource for the development of the carp aquaculture, which requires special emphasis.

The results obtained on tilapia are shown in parallel highlighting the interest to consider the available genetic resources.

Contexte dans lequel s'inscrit le projet

Une rizipisciculture déjà ancienne ayant bénéficié de nombreux projets

A Madagascar, des sources citent l'étude de l'intégration de la pisciculture à l'agriculture sous le règne d'Andrianampoinimerina (1794-1810 ; FAO, 2004). Cette hypothèse est plausible au vu des connexions supposées entre l'Indonésie et Madagascar, qui seraient à l'origine du développement précoce de la riziculture irriguée associée à l'émergence du pouvoir méridien (Raison-Jourde et Randrianja, 2002). La pisciculture d'espèces introduites n'est cependant confirmée qu'à partir du début du XX^e siècle. Pour le carassin (*Carassius auratus*), les premières introductions sont datées de 1861 et pour la carpe miroir (*Cyprinus carpio*) de 1912

(Kiener et Therezien, 1958). Sous le régime colonial, la pisciculture a connu un certain essor et, entre 1926 et 1930, le Service des Eaux et Forêts s'est chargé de promouvoir la dispersion de la carpe sur les Hauts Plateaux en procédant, notamment, à l'empoissonnement de la plupart des cours d'eau et retenues (Kiener, 1963). Ce service a aussi établi un premier réseau de stations piscicoles fournissant des alevins. La carpe et le carassin ont alors proliféré dans le milieu naturel et constitué la plus grande partie des pêches. Dès 1954, de premières pratiques de rizipisciculture, maîtrisées spontanément, sont décrites ; certaines témoigneraient d'une pratique de la reproduction de la carpe en étangs et en rizières (Lemasson, 1954).

Dans les années 1950, des tilapias sont introduits, en particulier *Tilapia zillii* en 1953 (Lemasson, 1957) et *Oreochromis niloticus* en 1956 (Kiener, 1963). Une seconde prolifération de ces nouvelles espèces est observée et a dépassé, dans les pêches, la précédente, engendrée par l'introduction des cyprinidés. Cette expansion est venue limiter l'abondance des carpes et de leurs alevins dans de nombreux milieux naturels. La vulgarisation de la pisciculture familiale et la construction de stations piscicoles d'Etat battaient par ailleurs leur plein : 18 000 étangs familiaux produisant du tilapia étaient recensés fin 1956 par Lemasson (1960), puis leur nombre atteignait 40 000 en 1958 (Kiener et Therezien, 1958) et enfin 72 000 en 1959 d'après Lemasson (1964). Le service des Eaux et Forêts faisait une promotion active de la pisciculture, il y aurait même eu des primes distribuées pour la construction d'étangs. La fourniture des alevins était en théorie gratuite mais faisait aussi l'objet d'une redistribution parallèle monnayée (Kiener et Therezien, 1958). Les infrastructures dont disposait le service des Eaux et Forêts étaient conséquentes : 4 stations piscicoles principales, 8 stations secondaires et une cinquantaine de centres d'alevinage (Lemasson, 1964).

Suite à l'Indépendance du pays en 1960, le soutien aux stations publiques va cependant progressivement devenir extrêmement limité et la pisciculture commence à régresser au milieu des années 1960. La politique de l'Etat a visé à renforcer la production agricole par un encadrement technique dense et des schémas largement imposés. Des «chefs de zone» ont ainsi été détachés dans les régions afin de promouvoir le développement de techniques de productions améliorées (Pierre Bernard *et al.*, 2007). Un gros effort de recherche a aussi été fait pour relancer la rizipisciculture, financé notamment par la FAO (Organisation Mondiale de l'Agriculture), mais les résultats sont décrits comme médiocres. Ainsi, en 1985, la pisciculture et la rizipisciculture végétaient et la plupart des stations piscicoles avaient cessé de fonctionner (Kiriloff, 1989).

Dans un objectif d'autosuffisance alimentaire et d'augmentation de la disponibilité en protéines, l'Etat malgache va décider de relancer le secteur avec l'appui du PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) et de la FAO. De 1985 à 1989, plusieurs projets se sont alors succédé pour vulgariser, auprès des agriculteurs, le grossissement de carpes en rizières puis, à partir de 1989, la FAO a réorienté totalement sa politique de développement de la pisciculture. Face aux mauvais résultats obtenus par les stations gouvernementales à la base de l'approvisionnement en alevins (Ranaivoarijaona, 1992), cette fonction a été transférée à des exploitants privés, mieux à même de rentabiliser l'activité. Ce modèle a rapidement été repris à l'échelle nationale et par la plupart des opérateurs de développement (Andrianaijoana *et al.*, 1992). Cette révision de la stratégie s'inscrivait plus largement dans une nouvelle mouvance tendant à promouvoir l'entrepreneuriat privé, corollaire du cadre des politiques d'ajustement structurel. La FAO a alors promu un nombre restreint de producteurs piscicoles spécialisés, qualifiés de Producteurs Privés d'Alevins (PPA), disposant d'un système technique de référence et encadrés par les services techniques afin de produire des alevins en étang pour approvisionner l'ensemble des pisciculteurs et rizipisciculteurs (Ministère de l'Elevage et des Ressources Halieutiques, 1992 et Van den Berg et Janssen, 1994).

Toutes ces actions de la FAO sont à la base du modèle de pisciculture et rizipisciculture largement connu et diffusé sur l'ensemble du territoire malgache. De façon officielle, les PPA sont aujourd'hui les fournisseurs d'alevins de carpe. Tout au long de cette phase, cette politique sectorielle de la pisciculture vers des opérateurs privés spécialisés s'est accentuée sans qu'elle n'induisse cependant une croissance de la production piscicole continentale. Le prix de l'alevin fourni a eu tendance à s'envoler entre 1992 et 2002 et les quantités livrées par les PPA ont en fait diminué sur cette période (Bentz et Oswald, 2010).

Il y a quelques années, la politique piscicole malgache a été à nouveau revue afin de « privilégier l'aquaculture commerciale orientée vers le marché ». L'objectif clairement annoncé est, à terme, que « la filière de type familial cède petit à petit la place à celle de type commercial » (Refaliarison, 2005).

En 2004, l'APDRA a été surprise de découvrir la maîtrise de la reproduction des carpes par des paysans, en particulier dans la région de Betafo. La réalité de ce système d'élevage, différent et novateur, était alors tue dans les documents officiels concernant la pisciculture. Ces pratiques de reproduction de la carpe au sein même des rizières ne nécessitent pas d'intrant et assurent l'autonomie de chacun pour son approvisionnement en alevins. De plus, les bénéfices de la vente des alevins produits tombent au moment de la soudure. L'intérêt de ce système pour les agriculteurs de Betafo n'est aujourd'hui plus à démontrer (Kollros, 2004). Intéressée par la capacité de cette technique à diversifier les revenus et améliorer la sécurité alimentaire des paysans des Hauts-Plateaux, cette ONG s'est lancée dans sa promotion et s'est intéressée aux raisons de sa faible diffusion. L'étude de la genèse de cette technique a révélé la mise en œuvre d'un processus complexe.

L'innovation rizipiscicole

Cette partie reprend les faits saillants recueillis sur l'innovation piscicole par Bentz et Oswald (2010). Cet article décrit la genèse de la mise au point de la reproduction des carpes en rizières et analyse son processus de diffusion en s'intéressant sur un plan diachronique aux rôles joués respectivement par les producteurs locaux et les institutions de développement nationales et internationales (Figure 1).

Les entretiens semi-directifs réalisés avec des agriculteurs, des pisciculteurs, des techniciens piscicoles, des anciens chargés de projet et l'étude de la bibliographie disponible ont rapidement infirmé l'hypothèse initiale de l'APDRA qui supposait que ce système avait émergé en réaction à la disponibilité de plus en plus faible d'alevins de carpe. Il s'est aussi avéré assez rapidement que les institutions de développement en place avaient participé et soutenu cette innovation. Elle pourrait d'ailleurs être qualifiée de réussite au regard des préoccupations du développement agricole (lutte contre la pauvreté, diversification pérenne des revenus...), bénéficiant d'une forte adhésion de petits producteurs ; curieusement, ce système de rizipisciculture paysanne n'est pourtant pas revendiqué par les institutions officielles du développement, il fait même souvent l'objet d'un rejet.

Histoire particulière de cette innovation sur Betafo

La zone de Betafo est située dans la région du Vakinankaratra, à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest de la capitale régionale, Antsirabe. A 1 400 m d'altitude, elle bénéficie d'un climat tropical d'altitude avec deux saisons fortement marquées : une saison froide et sèche d'avril à septembre et une saison chaude et pluvieuse d'octobre à mars. Le peuplement humain est dense et ancien. L'agriculture, basée sur la riziculture irriguée, est très productive et développée de longue date (Bouayad-Agha *et al.*, 1995), elle est restée très dynamique.

Cette zone fait partie des toutes premières repérées pour le développement précoce de l'activité de grossissement de carpes. Kiener (1963) cite Betafo comme l'un des trois premiers lieux d'apparition de la rizipisciculture de la carpe. Dans la zone de Betafo, l'ensemencement en carpes des cours d'eau a été

un succès et de nombreux agriculteurs s'approvisionnaient en alevins du milieu naturel qu'ils mettaient à grossir dans leurs rizières. Ceci était permis par les spécificités du milieu naturel : la régularité des approvisionnements en eau au fil de l'année et une amplitude thermique annuelle importante.

Il est probable qu'à cette époque, l'élevage de la carpe ait été mené conjointement à celui du carassin qui, pour l'ensemble des personnes interrogées, est perçu comme étant « depuis toujours » dans le milieu naturel. Dans la zone de Betafo, Lemasson (1954) évalue à une quinzaine d'hectares la rizipisciculture de la carpe, chiffres voisins des 18 ha de Rabelahatra en 1953 (cité par Dural, 1994) - ce dernier précise qu'ils sont empoissonnés à la fois en carpes et carassins.

La plupart des personnes interrogées font état d'une activité piscicole « traditionnelle » relativement développée dans les années 1950, concernant de petites quantités de poisson destinées uniquement à l'autoconsommation. La pisciculture était alors pratiquée comme suit :

- Au repiquage du riz, les poissons (carpes et/ou carassins, tilapias) étaient introduits dans les rizières mises en eau. Dans la plupart des cas, ces poissons étaient issus de pêches en milieu naturel et un marché existait déjà pour ces alevins ; d'après certaines personnes, des carpes se reproduisaient parfois dans les rizières mais le nombre d'alevins obtenu était très faible ;
- Les poissons étaient mis en grossissement dans les rizières jusqu'à la récolte du riz (mars-avril), voire au-delà. En effet, lorsque l'alimentation en eau des rizières le permettait, la lame d'eau était maintenue dans les parcelles après la récolte, jusqu'au mois de juillet, afin de rendre la terre plus fertile ; les poissons étaient alors eux aussi laissés dans les rizières ;
- Après l'assèchement de la rizière, les poissons qui n'avaient pas été consommés étaient placés dans de petits bassins en terre possédés par les exploitants. Ce stockage durait plusieurs mois, jusqu'au démarrage de la campagne rizicole suivante.

Par ailleurs, depuis la fin des années 1950, un centre d'alevinage fonctionnait à Andepombe, en périphérie de la zone de Betafo, et distribuait des alevins de tilapias et de carpes aux agriculteurs intéressés (Arrignon, 1963). D'après les données disponibles auprès du Service Régional de la Pêche et des Ressources Halieutiques (SRPRH), ce centre était devenu en 1961, une station des Eaux et Forêts comptant 22 étangs. A côté de son activité forestière largement prédominante, il mettait à disposition des alevins de carpe et était un lieu de formation piscicole.

Pour l'activité piscicole, les œufs permettant d'obtenir les carpes étaient produits à Ambatolampy (station piscicole située à environ 130 km de Betafo) et acheminés à Andepombe avant leur éclosion. Les alevins obtenus étaient ensuite vendus aux agriculteurs locaux désireux de pratiquer le grossissement d'une nouvelle variété de carpe, la variété « royale » (Kiener, 1963), dans leurs rizières. D'après certains informateurs, les quantités d'alevins disponibles étaient faibles et cette variété était différente de celles capturées en rivière.

L'ouverture de la station d'Andepombe puis la mise en place des chefs de zone ont conduit les techniciens de la station et les chefs de zone à expliquer aux agriculteurs qui en faisaient la demande, les techniques pouvant leur permettre de produire leurs propres alevins. Le nombre d'apprenants est resté limité du fait de techniques « améliorées » jugées inadaptées par certains, (nécessité de bassins cimentés et d'une maîtrise totale de l'eau, coût élevé de l'aliment préconisé, etc.). De plus, beaucoup vivaient la volonté de l'Etat de moderniser l'agriculture comme une contrainte et la rejetaient. L'accès à l'information et à la formation paraissait aussi réservé à une élite en contact avec les techniciens : familles de notables,

fonctionnaires retraités, proches de techniciens agricoles, etc. Ces personnes disposaient d'un accès privilégié à la connaissance et d'un bon accès au foncier et à l'eau d'irrigation. La volonté de s'afficher comme agriculteur modèle est une raison souvent évoquée pour l'acquisition de ces pratiques d'élevage.

Ces premiers producteurs d'alevins obtenaient avec plus ou moins de succès leurs propres carpes - en rizière ou dans des bassins en terre -, ils n'ont pas été suivis par les autres agriculteurs pratiquant le grossissement de carpes en rizière. A cette même période, les quantités d'alevins de carpe disponibles dans le milieu naturel ont fortement diminué, la cause la plus probable de cet effondrement du stock étant la prolifération des tilapias.

L'apport déterminant de la FAO dans le Vakinankaratra

Vers le début des années 1980, la station d'Andepombe a cessé de fonctionner (Pichon, 1986), ce qui a entraîné la fin de la distribution d'alevins. Ce nouvel environnement modifiait les enjeux liés à la maîtrise de la reproduction de la carpe.

A partir de 1985, pour Kiriloff (1989), la mise en œuvre d'un projet de la FAO (projet MAG/82/014) visant la vulgarisation de la pisciculture a contribué largement à la diffusion de la rizipisciculture auprès des agriculteurs de cette région : 30 vulgarisateurs formés pour la région, 6 000 agriculteurs encadrés et surtout mise en place d'un réseau de distribution d'alevins avec la création de 65 points de vente. Les témoignages recueillis sur le terrain vont même plus loin : dans la zone de Betafo, au vu du niveau élevé en rizipisciculture atteint par certains agriculteurs, les vulgarisateurs et responsables du projet ne se sont pas limités à la diffusion des techniques de grossissement d'alevins - contrairement à ce qui s'est fait dans le reste de la région. Les conseils et démonstrations sur la reproduction des carpes en rizière d'après les techniques mises au point par la FAO - très proches de celles transmises auparavant par les techniciens de la station d'Andepombe - ont été enseignés à des noyaux de pisciculteurs-relais volontaires, chargés de les diffuser. Ces pisciculteurs-relais, tout comme les producteurs d'alevins plus anciens, ont mis ces techniques en pratique en commercialisant leurs propres alevins pour répondre à la demande. Ils ont aussi transmis leur savoir-faire. Le milieu des années 1980 a ainsi été la principale période de diffusion de la pratique de la reproduction de la carpe en rizière. L'innovation s'est largement diffusée dans les sites où l'alimentation en eau des rizières la rendait possible. Le *fokontany*¹ d'Andriamasoandro par exemple a constitué une étape dans l'histoire de cette diffusion avant d'être relayée vers d'autres hameaux. Des dynamiques similaires semblent aussi avoir eu lieu dans les *fokontany* de Vakinifasina, Ambohambo et Miaramamindra ainsi que dans la commune voisine de Mandritsara. Si les innovateurs de cette période étaient toujours des agriculteurs plutôt aisés, disposant d'un bon accès à la terre et à l'eau d'irrigation (nécessité d'un accès à l'eau permanent pour pouvoir effectuer la reproduction dans de bonnes conditions), à la différence de l'époque précédente ces derniers ne faisaient pas partie des élites locales et étaient motivés par les intérêts économiques de l'activité.

Des actions de la FAO puis de l'administration réorientées vers la mise en place des producteurs privés d'alevins (PPA)

La FAO a poursuivi son action à travers un nouveau projet visant à mettre en place des producteurs privés d'alevins de carpe censés remplacer les stations piscicoles pour l'approvisionnement en poisson des rizipisciculteurs (Lardinois, 1992). Dans la zone de Betafo, malgré le fait que la production d'alevins ait été déjà bien développée par les rizipisciculteurs, les justifications étaient une qualité des poissons meilleure avec l'emploi d'une nouvelle variété de carpe miroir originaire de Hongrie, génétiquement « plus

performante » que la carpe locale. Mais le projet s'est achevé en 1992 sans avoir d'impact réel : les producteurs d'alevins en rizière n'ont pas reçu d'appui technique durant ce projet et les PPA mis en place n'ont pas poursuivi longtemps leur activité du fait de la concurrence locale. La FAO a par la suite cessé d'intervenir directement à Betafo.

Après les projets de la FAO, des techniciens du SRPRH² ont entrepris de réinstaller quelques PPA dans la zone de Betafo, toujours sans succès. A lieu de s'intéresser à la dynamique des quelques deux cents producteurs d'alevins de Betafo, les services de l'administration ont alors plutôt entrepris de la discréditer en mettant en avant deux arguments :

- la mauvaise qualité des alevins produits (faible viabilité et faible capacité de croissance liées notamment à une dégénérescence des géniteurs utilisés) ;
- l'interdiction légale de vendre des alevins sans être « agréé » par l'Etat.

Les travaux que l'APDRA a entrepris dans la zone à partir de 2006 ont permis de montrer que ces thèses étaient injustifiées : la qualité des alevins est bonne et les carpes de Betafo présentent une variabilité génétique tout à fait correcte (Guyomard *et al.*, 2008) ; la production d'alevins dans les piscicultures familiales est d'ailleurs légale, la diversification des activités agricoles est en effet l'une des priorités nationales et, au niveau de la région du Vakinankaratra, la pisciculture est envisagée comme une filière porteuse (EPP/PADR, 2006 et Anonyme, 2006).

Cependant, les accusations portées par des agents de l'Etat pendant presque une dizaine d'années ont poussé les producteurs de Betafo à poursuivre leur activité de façon relativement cachée et ont fortement entravé les échanges et l'amélioration des savoir-faire. Les dynamiques faites de tous petits producteurs d'alevins, surtout intégrées à la rizipisciculture, n'ont plus été prises en compte dans les documents officiels. Quelques actions, dont certaines menées par l'APDRA, essayent de réhabiliter ces producteurs auprès des services techniques. Elles y ont fait naître un débat : ceux qui y voient des pisciculteurs à part entière, produisant un poisson dont Madagascar a besoin, s'opposent aux détracteurs de cette réhabilitation.

UNE SITUATION CONFUSE, SOURCE DE QUESTIONS

La situation des pisciculteurs de Betafo illustre bien une certaine confusion autour de la réalité de la pratique de la rizipisciculture et surtout de son approvisionnement en alevins. Certes, les spécificités agricoles de Betafo et la propagation naturelle de la carpe localement sont deux éléments de l'environnement qui ont facilité le développement d'une pisciculture dite « traditionnelle » basée au départ sur l'empoissonnement des rizières au moyen d'alevins capturés dans le milieu naturel. Cette technique s'est ensuite sophistiquée en intégrant la maîtrise de la production d'alevins de carpe par les agriculteurs dans des rizières ou de tout petits étangs. Mais ce processus ne s'est jamais arrêté et son évolution n'est pas décrite avec précision, tout comme sa diffusion spatiale puisque certains villages enclavés ne maîtrisent pas ces techniques. D'autres évolutions similaires à celle de Betafo ont pu exister. Cependant, ces réalités ont été masquées par l'activité des PPA qui sont les interlocuteurs principaux des Directions Régionales de la Pêche et des Ressources Halieutiques (DRPRH) et qui affichent la mise à disposition d'une souche de carpes de qualité supérieure à celles produites en dehors de leur réseau. Les services de la pêche les voyaient comme le seul vecteur d'amélioration de la rizipisciculture.

¹ Subdivision administrative de base, correspondant ici à un ensemble de hameaux ou villages.

² Service Régional de la Pêche et des Ressources Halieutiques.

Cette variété d'élevages allant des écloséries paysannes aux PPA les plus en vue a engendré des perceptions différentes : un rizipisciculteur vantera la qualité des alevins qu'il produit, tandis que le PPA va la décrier préférant mettre en avant la spécificité de sa propre production. Pourtant, nombre de pratiques piscicoles astucieuses ont émergé dans les écloséries paysannes, combinées parfois à des pratiques surprenantes (comme l'attrait du phénotype cuir³). Confrontée à cette situation, l'APDRA a tenté des premiers tests visant à clarifier le débat (comparaison en rizière de carpes issues de PPA ou d'écloséries paysannes) qui n'ont pas apporté d'informations tangibles. Dans un second temps, le travail demandé par l'APDRA à l'INRA⁴ (cf. supra, Guyomard *et al.*, 2008) a en revanche donné des résultats inattendus : les carpes de Betafo présentent une variabilité génétique globalement satisfaisante et constituent une ressource potentielle pour Madagascar. Cette surprise était d'autant plus grande que seules les écloséries paysannes avaient été retenues dans ce premier échantillon.

Dans ce contexte, la première question fondatrice du projet PARRUR a été : quel est le niveau de la ressource génétique présente chez les carpes dans les différents élevages et dans le milieu naturel à Madagascar ? Sa réponse demandait une investigation physique - la nécessité de prélever une grande quantité d'échantillons de nageoires de carpes dans les endroits les plus variés possibles -, mais aussi une investigation plus humaine - comment les pratiques de gestion de la reproduction des carpes et d'entretien des lots de poissons élevés participent-elles à l'entretien de cette variabilité ? Ce premier questionnaire devait conduire à la formulation d'informations plus pratiques : quelles étaient les qualités de la ressource génétique de la carpe commune liée à sa présence à Madagascar et que pouvait-on dire de son devenir ? Cette interrogation a renvoyé à un questionnaire pluridisciplinaire. Dans le champ du social et de la zootechnie, il fallait identifier et comprendre les modalités de la gestion de la reproduction et de l'entretien des stocks de poissons d'élevage, notamment au travers des pratiques effectives, afin de caractériser leurs effets sur la génétique des poissons élevés ; cette analyse a de plus bénéficié de la caractérisation génétique des populations présentes sur Madagascar en élevage et en milieu naturel menée parallèlement.

L'ambition du projet MADAPISCI était donc de répondre aux trois questions qui suivent, à la fois sur la carpe et sur le tilapia :

- Quelle utilisation possible de la ressource constituée par les souches présentes à l'échelle nationale ?
- Quelles recommandations formuler ?
- Sur un plan plus méthodologique, comment l'approche visant à comprendre la gestion des carpes dans des élevages s'enrichit-elle d'une inscription dans une étude approfondie de la génétique des animaux élevés et vice-versa ?

Dans un deuxième temps, des expérimentations étaient envisagées pour préciser ou invalider certaines recommandations possibles.

Pour bien répondre à ce défi, le projet s'est efforcé de fédérer l'ensemble des acteurs impliqués sur ces questions, à savoir le FOFIFA⁵, la DRPRH, le Département de Biologie Animale de l'Université d'Antananarivo, le CIRAD⁶, l'INRA et l'APDRA. Cet article se focalise sur la carpe, des pendants seront établis au moyen d'encadrés pour faire la correspondance avec ce qui se passe sur le tilapia.

³ Pour plus de précision sur le phénotype cuir, se reporter à la figure 13 et au § sur la performance des carpes « cuir » (ci-après).

⁴ Institut National de la Recherche Agronomique, basé en France.

⁵ Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural, basé à Madagascar.

⁶ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, basé en France.

Revue des systèmes de production d'alevins sur les hauts plateaux

ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

L'objectif de ce volet de l'étude, était de caractériser les pratiques d'un grand nombre d'éleveurs pour comprendre quels étaient les effets de leurs méthodes de gestion de la carpe sur sa génétique en élevage. Cette formulation claire est cependant d'une extrême complexité. Quelles pratiques peut-on observer, mesurer et quels liens peut-on établir entre pratiques et gestion de la génétique ?

« Quelles pratiques peut-on observer ? » est un objectif se heurtant d'emblée à une grande difficulté face au pisciculteur : il est inenvisageable d'observer directement les poissons. L'observation de la pratique de la reproduction serait chronophage : lors de chaque mise en pose, il faudrait pouvoir observer le choix effectif des géniteurs, il resterait ensuite à vérifier lesquels se sont effectivement reproduits puis quelle a été par la suite la carrière des alevins issus de cette (ou ces) reproduction(s) ; si ces alevins sont après mélangés avec ceux d'autres origines, il faudrait alors identifier si ce sont eux qui font partie des survivants, question pas si facile à résoudre... La réalisation d'une vidange, qui serait vraisemblablement très mal acceptée par le pisciculteur, n'est pas toujours faisable et ne constitue pas un mode de recueil des données qui garantit la fourniture de suffisamment d'informations pour comprendre les modalités de gestion de la population de carpes du pisciculteur (en particulier s'il y a eu des empoisonnements à différentes dates et des pêches intermédiaires). De plus, toutes les manipulations sur les poissons génèrent des stress, engendrent de nombreux risques et induisent fréquemment des retards de croissance. Une gestion d'un lot de poissons ou d'un cycle d'étang avec une part d'incertitude peut donc témoigner d'un bon compromis de gestion et d'un réel savoir-faire.

« Quels liens peut-on établir entre pratiques et gestion de la génétique ? » renvoie à des aspects théoriques et pratiques. Dès que les producteurs reproduisent des carpes dans un milieu qui n'est pas le milieu « naturel » et les élèvent, ils participent à l'entretien de populations a priori différentes de celles du milieu naturel (à moins que la souche élevée ne supplante la souche naturelle, ce qui n'est pas le cas ici, cf. *infra*) et à une diminution potentielle de la variabilité de la souche initiale, du fait de l'usage d'un nombre limité de géniteurs. Si le milieu d'élevage participe à la conservation de lignées potentiellement différentes de celles du milieu naturel, les pratiques des pisciculteurs jouent un rôle majeur dans ce processus de conservation d'une diversité. Ces pratiques participent de fait à une sélection sur des critères différents : les poissons choisis pour la vente ou l'autoconsommation ne participeront plus au devenir de la population élevée, tout comme ceux qui ne grossissent pas assez et qui sont écartés lors de l'empoisonnement des cycles de production ; enfin les individus qui ne supporteront pas la manipulation et les conditions précaires du transport, ne participeront pas davantage au devenir de la génétique de la carpe d'élevage. Dans l'ensemble des pratiques à étudier, celles autour de la reproduction sont cruciales. Notamment, comment sélectionne-t-on les géniteurs appelés à se reproduire et quels sont les géniteurs qui vont effectivement se reproduire et transmettre leurs gènes aux futurs poissons élevés ? La seule connaissance des critères de sélection des géniteurs est nécessaire mais elle reste insuffisante puisque tous les géniteurs ne se reproduisent pas forcément, de plus, toutes les reproductions ne sont pas toujours utilisées. Les intentions de choix de critères déclarées par les pisciculteurs correspondent-elles effectivement au processus réel ? Des écarts sont forcés : des femelles non retenues intentionnellement peuvent être jugées plus aptes au moment de la mise en pose car présentant à ce moment là de meilleurs critères de maturité et exceptionnellement substituées à celles initialement choisies. Il ne faut pas non plus oublier les quelques poissons qui sautent

du seau ou glissent entre des mains et rejoignent un lot qui ne leur était pas destiné. Toutes ces réalités soulignent la nécessité, au-delà du recueil des pratiques, de leur analyse. De nombreuses interactions « pratiques - conditions de l'élevage » vont aboutir à une sélection de qualités particulières pour les souches élevées. A une autre échelle, un pisciculteur peut très bien préférer les poissons produits par son voisin ou, à son insu, des poissons d'un élevage voisin - voire du milieu naturel - peuvent aussi s'introduire dans ses lots de poissons. Il y a donc aussi nécessité de s'intéresser à la circulation des poissons au-delà de l'exploitation.

Nous cherchons donc à comprendre les modalités de gestion des carpes dans ces piscicultures en se focalisant sur les pratiques participant à la sélection des carpes élevées. Ceci conduit à la caractérisation des systèmes d'élevage de leurs poissons, question difficile qui offre une grande proximité avec celle du diagnostic des systèmes agropastoraux, particulièrement débattue dans le tournant des années 1990. Landais (1994) définit le système d'élevage comme « un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé par l'homme en vue de valoriser des ressources par l'intermédiaire d'animaux domestiques et pour en tirer des productions variées ou pour un autre objectif. » Landais *et al.* (1987) et Landais (1994) insistent sur la nécessité de comprendre le fonctionnement du troupeau ; c'est-à-dire l'ensemble des animaux élevés à l'échelle de l'exploitation, répartis en lots - sous-unités fonctionnelles avec des objectifs variés au fil des saisons et qui peuvent être élevés sur des sites différents - en vue d'un objectif global unifié. Ils soulignent simultanément la nécessité d'identifier et de « distinguer des niveaux décisionnels hiérarchisés et emboîtés, correspondant à des systèmes d'élevage eux-mêmes définis à des niveaux divers : systèmes d'élevage familiaux, villageois, régionaux ». Ceci a le mérite de donner un angle d'étude complémentaire pour analyser la circulation du poisson à une échelle supérieure de celle de la pisciculture, ici pris dans le sens de l'ensemble des installations du producteur pour produire son poisson... Les différents papiers cités proposent d'identifier les pratiques à la base de la gestion des élevages, en les regroupant en pratiques d'agrégation, d'exploitation, de conduite, auxquelles Landais (1994) ajoute celles de renouvellement, dans lesquelles figurent celles de reproduction, et celles de valorisation. Mais les pratiques sont aussi le plus souvent liées, interdépendantes et l'identification de « systèmes de pratiques », c'est-à-dire les liens rationnels et fonctionnels entre elles, s'avèrent souvent plus précieux que leurs simples descriptions. Ces différents auteurs s'accordent donc sur l'utilité de la compréhension de la représentation de ces pratiques par l'éleveur et donc par le pisciculteur. Ils s'accordent aussi sur la nécessaire prise en compte des cycles d'élevage, qui doit être associée à la description de la carrière du poisson, pour notre propos dans la pisciculture. Enfin, ils considèrent que l'analyse historique avec, en conséquence, les aspirations de changements proposées par les éleveurs est une entrée très utile. Ces auteurs insistent simultanément sur la nécessité de se centrer sur les modalités de la gestion de leur système d'élevage, compte tenu de la maîtrise limitée qu'ils peuvent exercer au vu des caractéristiques de l'environnement. Au final, le diagnostic consiste à recueillir les relations entre les pratiques des acteurs pour piloter les systèmes étudiés. Landais (1994) insiste sur la nécessité de prendre en compte le système dans sa globalité ; à cette fin, il propose de faire ressortir les caractéristiques des interactions du système qu'il lie au pilotage de ce dernier en notant la différence entre les pratiques et les représentations, ces deuxièmes étant des schémas explicatifs de la rationalité de la conduite des premières. Accessoirement, il note qu'une somme de variables de ces systèmes n'a que peu de chance de constituer une base fiable pour élaborer une typologie fonctionnelle de ces systèmes⁷... et donc de leurs modes de gestion.

⁷ « Le problème majeur est de maîtriser les passages d'un niveau à un autre en évitant l'écueil du réductionnisme, qui consiste à penser que les propriétés d'un système peuvent se déduire de celles de ses composants » (Landais, 1994).

Ce diagnostic, enfin, bénéficie d'une relecture qui consiste à analyser la place de l'activité d'élevage au sein de l'ensemble des activités du pisciculteur. La présente étude s'inscrit tout à fait dans l'objectif de ces démarches qui, en s'intéressant aux acteurs, aux animaux et à leur ressources, en comprenant les interrelations entre ces éléments découlant de leurs exigences et de leur gestion, visent à formuler des recommandations pratiques d'amélioration (Landais, 1992). Les auteurs précédemment cités soulignent le besoin d'identifier des indicateurs de leur fonctionnement.

L'étude a donc classiquement opté pour une posture compréhensive où, couplé aux quelques observations de terrain recueillies, il était demandé à chaque pisciculteur enquêté de présenter : sa façon de conduire ses cycles d'élevage dans les différents milieux gérés au fil de l'année (étangs, rizières), sa gestion de son élevage et son appréciation des résultats atteints.

Le choix méthodologique a été celui d'une approche légère, par enquêtes cherchant à couvrir le plus grand nombre de situations différentes possibles : seules des données produites lors d'entretiens où le pisciculteur construit une représentation de son activité répondant aux attentes de l'enquêteur ont donc été recueillies. Au fil des entretiens, s'est posée la question de la posture de l'enquêteur et du producteur : en effet, les mêmes producteurs ont produit des discours différents selon qu'on leur demandait : « Quelle est votre gestion de la génétique de la carpe ? » ou « Où sont passés les géniteurs de l'année précédente ? Combien ont été stockés ? Comment s'est opéré, à cette étape, le choix ? ». La première formulation conduisait à une restitution des discours normés et adaptés de la FAO - relayés par les DRPRH principalement - ou de l'APDRA. La seconde formulation révélait une réalité plus complexe, et, au fil du déroulement du travail, elle a été préférée.

Le terrain d'enquête couvrait les régions initialement présentes dans le projet MADAPISCI (Analamanga, Itasy, Haute Matsiatra, Vakinankaratra), auxquelles ont été rajoutées l'Analanjiroro et l'Amoron'i Mania. L'étude s'est déroulée de mi-juin à mi-août 2012. Au total, 207 exploitations piscicoles ont été visitées, 131 producteurs d'alevins, 52 grossisseurs de carpes et 4 pêcheurs ont été enquêtés. Si, parfois, certains entretiens se sont déroulés en plusieurs étapes, la plupart ont eu lieu en un seul passage. L'équipe d'enquête était toujours à minima constituée d'un binôme français-malgache (Teriipaia *et al.*, 2013). La carte de la Figure 2 montre l'étendue couverte, chaque point correspondant aux positions GPS recueillies et vérifiées où un entretien avec un pisciculteur a été conduit en même temps qu'un prélèvement des échantillons de nageoires de ses géniteurs. Afin de restituer la diversité des 131 producteurs d'alevins rencontrés, les résultats ont été organisés en une typologie basée sur les objectifs et les modalités de gestion des producteurs, ceux-ci pouvant être influencés par leur environnement ou celui de leur production.

RÉSULTATS : TYPOLOGIE DES PRODUCTEURS D'ALEVINS

Comme attendu, les enquêtes ont vérifié une très grande diversité de situations. Nous avons donc choisi de représenter la diversité analysée par un exposé de types regroupant des élevages piscicoles avec des organisations similaires et des modalités de gestion voisines. Le souci de cette typologie est de présenter quelques fonctionnements cohérents au sein d'une grande diversité de situations. Si l'on tient compte de leur dynamique, toutes les exploitations ne correspondent pas forcément à un type mais ces types expliquent le fonctionnement de la plupart des exploitations rencontrées. Deux éléments paraissent, au premier abord, surdéterminants : le processus d'installation de la pisciculture et le degré d'enclavement. Ces deux éléments font écho à deux voies d'installation des pisciculteurs : le plus fréquent correspond à un souci de diversifier son exploitation agricole : on se débrouille en fonction des conseils glanés, des ressources locales pour

élever ses poissons ; le second traduit le souci d'appliquer un système technique préconisé par des projets ou des administrations, voire de reprendre un site déjà installé dans ce cadre. Le processus d'installation et le niveau d'enclavement ont servi de fil conducteur à Teriipaia *et al.*, (2013) pour la construction de la typologie qui est reprise ici. Nous verrons cependant que ces deux éléments renseignent au final assez peu sur les modalités de gestion effective de ces exploitations et leurs logiques de fonctionnement.

Type 1 : PPA en étroite collaboration avec les agents des DRPRH (10 producteurs rencontrés)

Ils correspondent aux PPA modèles, tels qu'ils sont présentés dans les documents officiels ou de la FAO. Ils bénéficient de la caution de la DRPRH qui donne une certaine renommée à leurs produits. Ces producteurs sont parfois issus du milieu non agricole, on trouve pas mal de fonctionnaires parmi lesquels beaucoup ont eu une expérience antérieure de techniciens dans les anciennes piscicultures étatiques. La pisciculture de carpes est leur première source de revenus même si, lorsqu'ils sont agriculteurs, leur exploitation est souvent diversifiée (élevage bovin, porcs, maraîchage, arbres fruitiers, etc.). Beaucoup sont âgés et les modalités de leur renouvellement sont difficiles à envisager.

Ces producteurs sont à l'origine des plus gros volumes de production d'alevins : plus de 100 000 par an et par exploitation. La gamme des produits commercialisés est différenciée : alevins, pré-géniteurs, géniteurs. Ils élèvent d'autres poissons comme le tilapia. Le nombre d'alevins vendus les poussent à avoir recours à l'achat d'alevins auprès d'autres PPA - voire auprès de petits producteurs - lorsque leur production est insuffisante. Ils entretiennent des liens avec d'autres producteurs d'alevins de tous types qu'ils ont parfois encouragés à s'installer. Certains développent aussi des activités de formation, des prestations de services (conseil pour la reproduction, le grossissement, l'aménagement de bassins) valorisant leurs savoir-faire reconnus. Ce sont aussi les premiers mobilisés pour l'envoi ou la réception de poissons avec les autres régions et ils sont donc souvent impliqués dans des échanges de poissons sur de longues distances. Ils travaillent le plus souvent sur commande.

Ces producteurs ont des étangs de qualité, la surface en eau est parmi les plus importantes (beaucoup de fermes ont plus de 40 ares d'étangs en eau, les plus gros PPA peuvent avoir plus d'un hectare de petits étangs). Pour la reproduction, à la fin de la saison des pluies, les géniteurs des deux sexes sont stockés séparément jusqu'à la période de reproduction ou de « mise en pose » ; celle-ci est réalisée au début du retour de la mousson entre fin septembre et octobre ; les kakabans (supports de ponte artificiels) garnis d'œufs sont ensuite placés dans les étangs dits « d'alevinage » où les alevins sont mis à grossir pendant 1 à 2 mois. Ils sont commercialisés dès que possible, leur poids moyen a tendance à augmenter au fil du temps. Le nombre d'alevins produits par carpe femelle mise en pose est élevé, il est parfois estimé par la quantité d'ovules pondus par femelle ou par l'application de ratios standards.

Ces producteurs ont de l'expérience et une technicité élevée : ils réussissent à étaler la production dans le temps grâce à la maîtrise des pontes précoces et tardives. Ils sont réputés disposer de souches « pures » et en tirent parti, notamment en Itasy où ils sont réputés détenir les souches originelles de carpes. Cependant, le détail des pratiques recueillies montrait une situation où ils pratiquaient en routine des croisements de phénotypes différents. Par exemple, un producteur renommé nous expliquait que pour obtenir des « hongroises » (réputées à bosse et relativement plus écaillées que les royales) pour les clients qui en voulait, il croisait des hongroises avec des « royales » (réputées avec beaucoup moins d'écaillés et plus allongées) ; et, pour obtenir des royales, il croisait des royales avec des royales ou des cuirs (réputées avec très peu d'écaillés). Périodiquement (tous les 4-5 ans au plus), ces producteurs vont chercher des géniteurs à l'extérieur de leurs exploitations. Soucieux de développer l'offre d'alevins de carpes après la période des fortes pluies (en février-mars), plusieurs se montrent très intéressés par la production issue de pontes décalées. Certains déclarent la réussir en jouant sur la température de l'eau ou l'oxygène.

Nombre d'entre eux se sont équipés d'aérateurs à piles, ce qui facilite le transport des poissons vivants sur de longues distances. Ces producteurs ont souvent besoin de main d'œuvre extérieure. Pour leurs poissons, ils utilisent les aliments les plus chers parmi l'ensemble des pisciculteurs.

Type 2 : PPA disposant d'un agrément vis-à-vis de la DRPRH (11 producteurs rencontrés)

Très similaires au groupe précédent, ils ont généralement suivi des parcours équivalents de formation. Ils restent connus de la DRPRH et disposent d'un agrément en bonne et due forme mais ils n'ont pas de caution particulière, ce qui fait que les alevins qu'ils commercialisent sont perçus comme ordinaires (contrairement à ceux du type 1). Leur appartenance au « réseau DRPRH » facilite cependant la commercialisation de leur production, tout particulièrement lors de la mise en place de projets ou dans les zones en manque de débouchés (cas de certains PPA d'Analamanga).

Ces producteurs déclarent généralement aller rechercher quelques géniteurs à l'extérieur au moins tous les 2 ou 3 ans et se mettent, à cette occasion, en relation avec des producteurs des alentours. Ils privilégient alors souvent des phénotypes différents de ceux qu'ils détiennent. Ils ont des échanges réguliers avec les producteurs voisins qui, eux, ne sont pas tous déclarés.

Disposant aussi d'une très bonne technicité, ils réussissent à étaler les pontes. Ils se déclarent eux aussi intéressés par la production d'alevins en dehors de la saison de reproduction. Chez ces producteurs, l'activité de grossissement est plus importante que chez ceux du type 1, même si les recettes de la vente d'alevins restent les plus importantes.

Type 3 : PPA hors « club DRPRH » (13 producteurs rencontrés)

Ces producteurs formés via des projets de développement (FAO, Union européenne) ou comme ceux des types précédents, n'ont jamais été agréés. D'ailleurs, ils n'utilisent pas le réseau DRPRH. Certains s'en sont affranchis, d'autres n'en ont jamais fait partie. Une caractéristique forte est qu'ils sont tous très enclavés géographiquement. Ils sont à l'origine de dynamiques locales de pisciculture qui leur offre un réseau de proximité d'achat-vente. Ce réseau est, pour eux, plus intéressant que celui de la DRPRH, et ils y sont souvent de plus en situation de monopole. L'alevin y est généralement moins cher que dans les réseaux nationaux ; d'autres formes d'échange existent et sont importantes : empoissonnement en rizière avec partage de la récolte par exemple. Ces producteurs entretiennent aussi des relations particulières avec d'autres producteurs d'alevins : formation, échanges de géniteurs. Cependant, du fait de leur isolement fort, plusieurs exploitations enquêtées de ce type n'avaient pas échangé de géniteurs depuis une dizaine d'années.

La technicité et l'expérience de ces producteurs sont comparables à celles des autres PPA, cependant une part importante de l'alevinage se déroule en rizière. Ces producteurs marquent un intérêt grandissant pour le poisson marchand, notamment lorsque l'alevin est moins rentable comme à Fianarantsoa où le marché de l'alevin est dense. La trésorerie requise pour faire fonctionner ce système piscicole est relativement élevée.

Type 4 : Eclosérie Paysanne (EP) à vocation marchande (17 producteurs concernés)

La trajectoire d'installation de ces exploitations est souvent hybride entre la référence PPA et le côté débrouillard des exploitations piscicoles familiales. Si ces producteurs ont souvent reçu une formation conséquente à l'occasion de relations avec des PPA ou avec d'autres professionnels de la pisciculture (anciens fonctionnaires de station étatique, acteurs de la recherche piscicole, etc.), ils ont aussi bénéficié de

formations dispensées par des projets. Leurs schémas techniques peuvent s'éloigner beaucoup de ceux de la FAO, conséquence de leur souci de s'adapter dans les conditions où ils se trouvent et avec les ressources dont ils disposent. Ils font preuve d'une technicité intéressante, parfois comparables à celle des PPA (maîtrise des pontes précoces et tardives, etc.), et d'une bonne expérience surtout pour les plus anciens.

Chez ces producteurs, la part des revenus piscicoles est importante dans le revenu global. Ils sont spécialisés dans la vente d'alevins. Les quantités vendues sont comparables à celles commercialisées par le type 2. Parfois, ces alevins sont vendus sur de grandes distances grâce à des collecteurs qui assurent le transport, l'achat et la revente entre des acheteurs d'une région et des vendeurs d'une autre. Leurs objectifs sont très voisins de ceux des PPA, certains alignent leurs prix sur les leurs comme à Fianarantsoa. Lorsque le marché de l'alevin est limité ou saturé, certains optent pour les faire grossir dans les rizières voisines, en échange de services (gestion de l'irrigation de la parcelle empoissonnée, par exemple). Le système d'élevage se déroule à la fois en étang et en rizière : la reproduction se fait en étang et l'alevinage principalement en rizière. L'alimentation, provenant essentiellement des déchets de cuisine, est plus irrégulière en qualité et quantité. Tous souhaitent intensifier ou agrandir leurs piscicultures.

Leur préoccupation pour la qualité des alevins les conduit périodiquement à s'approvisionner en géniteurs chez des PPA reconnus ou, au moins, à introduire des carpes d'autres élevages, jugées « belles ». Nombre d'entre eux expriment le souhait de s'intégrer au réseau des DRPRH qui, selon les régions, les reconnaissent ou les ignorent. Dans un futur proche, leur contribution au sein des PPA pourrait devenir majeure.

Type 5 : EP inscrites dans un réseau de proximité (14 producteurs rencontrés)

Ces producteurs étaient tous grossisseurs de carpes avant de se lancer dans la production d'alevins. Contrairement au type précédent, il n'y a pas de réelle vocation marchande ni de spécialisation piscicole au niveau de l'exploitation agricole : l'activité piscicole est un moyen d'intensifier globalement les rizières. La trésorerie mobilisée est très limitée. Socialement, ils diffèrent des types précédents, ce sont d'abord des exploitants agricoles qui ont opéré une diversification grâce à une pisciculture non spécialisée produisant des alevins et des poissons de consommation pour les besoins de l'exploitation ou pour être vendus ou échangés. Le volume d'alevins produit est nettement plus faible que pour les types précédents mais la production est relativement stable et entretient des dynamiques locales. Les gérants ont le plus souvent bénéficié d'une formation et de conseils de voisins pisciculteurs.

Chacun de ces producteurs est au cœur d'un réseau de proximité constitué par des parents, des voisins proches, voire des résidents d'un même ensemble géographique (riziculteurs d'un même bas-fond, par exemple) où circulent les poissons. Des conventions d'échanges peuvent porter sur des journées de travail, un paiement différé, une mise en commun de moyens de production, un échange ou une compensation de catégories de poissons par d'autres, etc. Elles sont de précieux outils de la régulation de cette circulation des poissons. Les échanges de lots de poisson à différents stades paraissent planifiés, le système d'élevage dépasse donc le cadre physique de l'exploitation et la circulation des poissons passe aussi par des étangs et des rizières n'appartenant pas au gérant. Cette organisation de l'élevage sur quelques exploitations et bénéficiant de l'implication de plusieurs producteurs lui confère une certaine robustesse. Les schémas techniques sont variés. Le cycle, dont l'alevinage, se déroule surtout en rizière : on observe même des cas de mise en pose en rizière.

Ces exploitations sont assez récentes, certaines sont reconnues par la DRPRH de par leur influence au niveau local (comme à Fianarantsoa). Elles complètent les autres voies de production d'alevins et leur prospérité est liée aux ressources et aux opportunités de leur environnement proche. Quand ces producteurs sont très enclavés, ils peuvent se retrouver en situation de monopole.

Type 6 : Petites EP intégrées (36 producteurs rencontrés)

L'origine de ces systèmes est la suivante : des paysans grossisseurs se lancent dans la production d'alevins en conservant quelques poissons. Ils ont parfois reçu des conseils d'un voisin ou une petite formation d'un projet (type APDRA). Ils ne sont pas forcément inscrits dans des réseaux, certains sont isolés. Dans les zones enclavées, quelques-uns ont pu générer des dynamiques de production localisées en formant eux-mêmes d'autres producteurs, ils rejoignent alors le type 5 précédent.

La pisciculture est pour eux une diversification assez secondaire, elle est associée à la riziculture. Les surfaces empoissonnées sont faibles. Occasionnellement, cette production améliore la satisfaction des besoins en protéines de la famille ou procure un revenu sans mobilisation importante de temps ou de trésorerie. Elle n'est pas conduite avec une réelle vocation marchande et, même pour l'écoulement des alevins, ces producteurs sont peu soucieux de se positionner sur le marché de l'alevin. Lorsque des ventes sont possibles, elles sont très appréciées car elles coïncident avec le moment de la soudure. Un atout essentiel du système est d'être flexible : les proportions d'alevins vendus / mis en grossissement et de poissons autoconsommés / vendus s'ajustent au gré des besoins. La production d'alevins est menée dans les rizières, les effectifs produits sont faibles et certaines années la reproduction échoue. La première raison invoquée est le manque de géniteurs suite à des vols ou à des conditions climatiques particulières. Il n'est pas rare que ces pisciculteurs mettent la totalité des alevins qu'ils ont produits, en grossissement. Si, parfois, le stock global de géniteurs paraît pléthorique, le nombre de géniteurs effectivement impliqués dans la reproduction est généralement très faible : moins de 10 femelles - voire très souvent une seule. Des cas ont été rapportés où les géniteurs sont simplement stockés ensemble dans une même structure, le producteur récoltant les alevins au fur et à mesure des pontes spontanées. Classiquement, les producteurs disposant d'une certaine expérience ont de meilleurs résultats que les débutants.

Les trois types suivants ne jouent pas aujourd'hui un rôle important dans la production d'alevins mais pourraient en jouer un demain ou, à l'inverse, en ont joué un rôle significatif par le passé.

Type 7 : Producteurs d'alevins en devenir (13 producteurs rencontrés)

Ces exploitants agricoles qui pratiquent le grossissement de carpes en rizière ou en étang, affichent un intérêt pour la production d'alevins. Le plus souvent, l'objectif annoncé est de garantir leur besoin et être autosuffisant, ce qui a pour mérite de diminuer les coûts de production et/ou les difficultés d'accès à l'alevin. Ils peuvent aussi afficher un souci de se positionner sur le marché de l'alevin qui leur paraît rémunérateur. Dans des situations marginales ou particulières (périphérie du lac Itasy, par exemple), des approvisionnements en géniteurs ou en alevins à partir du milieu naturel sont évoqués. Les grossisseurs appuyés par l'APDRA qui suivent des formations pour la reproduction ont été rattachés à ce type.

Type 8 : Producteurs d'alevins originaux (8 producteurs rencontrés)

Le fonctionnement et les objectifs de production de ces systèmes leur donnent leur originalité : portés par des institutions religieuses, des organisations de producteurs ou/et de pêcheurs avec une gestion communautaire, leur fonction paraît plus de soutenir la production piscicole que d'en tirer un véritable revenu. Si la plupart affichent des productions peu élevées et sont peu intégrés dans des réseaux, quelques

uns peuvent avoir localement une certaine influence (cas des sœurs bénédictines en Amoron'i Mania). Le cas particulier du sanctuaire des espèces géré par le FOFIFA à Kianjasoa a été associé à ce groupe - à noter que, lors de l'enquête réalisée dans ce sanctuaire, l'effectif de géniteurs pour l'entretien de la souche hongroise paraissait trop faible pour assurer le maintien de sa variabilité génétique⁸.

Type 9 : Production d'alevins en voie probable de délaissement (9 producteurs rencontrés)

Ces pisciculteurs produisent des alevins depuis au moins 10 ans mais la pisciculture ne satisfait pas ou plus leurs objectifs. Les raisons divergent selon les situations individuelles : conditions naturelles défavorables (cyclone, inondation), difficulté chronique d'écoulement des alevins, contraintes techniques (carpes peu connues), etc. De ce fait, ces producteurs se tournent vers d'autres activités correspondant mieux à leurs contraintes individuelles et abandonnent la production d'alevins, voire même la pisciculture. Il n'y a pas d'investissement prévu dans l'activité et les structures et cheptels de géniteurs sont sous exploités.

Limites de l'étude sur les producteurs d'alevins de carpe

La diversité des situations décrites ne concerne que les régions de PARRUR, elles correspondent à celles où intervient l'APDRA. Si le risque d'accorder trop d'importance au réseau des PPA ou à celui des actions de projets est réel, le mérite de cette étude est néanmoins de présenter une diversité bien supérieure à celle précédemment évoquée.

L'objectif d'identifier des indicateurs d'efficience de ces systèmes d'élevage n'a pas pu être atteint. La première raison est qu'il n'a pas été possible de produire des indicateurs globaux.

Par exemple, le nombre d'alevins produit par femelle, initialement retenu, a révélé des réalités très différentes : parfois calculé à partir de la variation de poids des femelles lors de la mise en pose (on estime alors la quantité d'ovules émise par femelle, 54 000 ovules/kg d'après un PPA de Haute Matsiatra) ou par l'application de ratios standards (un kilogramme de femelle donne tant d'alevins, des chiffres variés oscillaient entre 2000 et 8000/kg de femelle), il représente aussi dans d'autres cas le dénombrement, par des producteurs, des alevins effectivement vendus ou encore une estimation de l'effectif obtenu à la fin du premier cycle d'alevinage lorsqu'il y a une vidange au bout d'un mois. D'autres situations étaient présentes avec des cycles de durée variable, la comptabilisation ou non des alevins auto-empoissonnés. On le voit bien, la portée explicative de cet indicateur, tel quel, est à relativiser. Le ratio « géniteurs mis en pose sur géniteurs stockés » est intéressant mais il est aussi très difficile à collecter. En particulier, sur les grosses exploitations où des effectifs importants de poissons marchands ou de pré-géniteurs sont parfois retenus, la limite entre pré-géniteurs et géniteurs n'étant pas stricte. Certains producteurs affichaient de plus le souci de réutiliser le même géniteur (femelle souvent, mais aussi mâle) plusieurs fois durant une même campagne. Le nombre de mises en pose pratiquées mais aussi leur calendrier font enfin apparaître une très grande hétérogénéité. Les producteurs d'alevins de types 1, 2, 4 et, dans une moindre mesure, 5 sont très intéressés par des étalements des pontes pour mieux répondre aux besoins. A l'inverse, les petites EP du type 6 ne pratiquent pas forcément un suivi long de leurs géniteurs et déclarent parfois rater les fenêtres de maturité.

Point sur les producteurs d'alevins de tilapias

Les enquêtes conduites dans le cadre du projet Madapisci dans 7 régions malgaches auprès de 12 agents de la DRPH, 14 techniciens d'ONG et 45 pisciculteurs (Figure 6) ont permis d'identifier 3 grands types de producteurs d'alevins de tilapia.

A ces types s'ajoutent des élevages qui se déroulent dans le cadre de projets et dont la viabilité ne peut être connue à ce jour. Cet encadré présente les trois types rencontrés puis les modèles actuellement promus par des projets listés.

Type 1 : Les producteurs d'alevins disposant d'un seul étang pour la reproduction et le grossissement

Ce type concerne la majorité des producteurs de tilapia de toutes les régions enquêtées. Ces exploitants agricoles familiaux entretiennent un ou plusieurs petits étangs pour une production de poissons principalement destinée à la consommation familiale. Le peuplement est souvent constitué de plusieurs espèces (carpes, tilapias) et, pour les tilapias, de différentes classes d'âge.

L'étang est exploité de manière continue et rarement vidangé. Lors des vidanges, le ré-empoissonnement se fait avec le reliquat de petits poissons. Certains de ces élevages sont dans des situations très isolées. Dans ce système, la maîtrise de la population de poissons est faible et l'empoissonnement ne peut garantir l'atteinte de la taille désirée. Les revenus financiers sont quasiment nuls, ce qui ne permet pas une spécialisation accrue de l'exploitation vers cette production. Les échanges de poissons entre producteurs ou avec le milieu extérieur paraissent peu fréquents.

Type 2 : Les producteurs d'alevins disposant d'étangs différents pour la reproduction et le grossissement

Ce sont surtout les producteurs d'alevins privés (PPA) agréés par la DRPH qui constituent ce type. Les alevins destinés à la vente sont produits en continu dans un étang durant la saison chaude. A la saison froide, les géniteurs sont retirés et stockés par sexe séparé. Les quantités d'alevins produits demeurent limitées.

Type 3 : Les producteurs d'alevins spécialisés

Constitués d'exploitants agricoles aisés ou d'entrepreneurs issus d'autres secteurs d'activités, notamment des commerçants, ils ont disposé d'un agrément de la DRPH pour la production de populations monosexes mâles d'*Oreochromis niloticus* par inversion hormonale et produisent des poissons marchands. Le plus grand nombre de ces piscicultures, d'une importante superficie, est localisé dans la Région Analamanga et regroupé initialement dans l'APAM ((Association Professionnelle des Aquaculteurs de Madagascar) qui a bénéficié au début des années 2000 d'un appui du FOFIFA et de l'ARDA⁹, dans le cadre d'un financement du SCAC¹⁰. Les infrastructures sont souvent de qualité. Ces entreprises ont recours à de la main d'œuvre salariée et mobilisent des intrants et du matériel produits sur leur propre exploitation ou achetés à l'extérieur. Leur besoin en trésorerie est important. Malgré certaines difficultés liées à la qualité de l'eau, l'enclavement ou le vol, ce sont elles qui produisent les effectifs d'alevins les plus importants par exploitation. Ces derniers sont transportés et commercialisés sur de longues distances. Depuis la constitution du stock de géniteurs, ces producteurs ont procédé à 1 ou 2 nouvelles introductions de poissons.

⁸ Au moment de l'entretien, pour les Hongroises, il y aurait seulement eu 2 femelles et 1 mâle adultes, ainsi que des pré-géniteurs

⁹ ARDA : Association Régionale de Développement Aquacole.

¹⁰ SCAC : Service de Coopération et d'Action Culturelle français.

NB : ces producteurs fournissent des alevins à des grossisseurs de tilapias en cages flottantes (dans le Lac Itasy et dans le Canal des Pangalanes) ou en étang qui utilisent des aliments composés. Ces systèmes nécessitent une trésorerie élevée et des alevins de tilapias monosexes le plus souvent achetés à l'extérieur. Les promoteurs des piscicultures en cages sont des investisseurs qui ne sont pas issus du secteur agricole et ont bénéficié d'un accompagnement du FOFIFA. Celles en étangs sont pour la plupart d'entre elles liées au MIDEM ou au PATIMA, présentés ci-dessous.

En plus de ces trois types de producteurs d'alevins, des institutions de l'Etat ou de la société civile fournissent des alevins d'*Oreochromis niloticus* à des pisciculteurs regroupés ou individuels. Les alevins peuvent être cédés à titre gratuit, à crédit ou cash, selon les cas. Toutes ces institutions proposent leurs propres référentiels techniques.

Lors des enquêtes, 5 institutions ont été identifiées, les trois premières diffusent leur propre souche :

1. La station de Kainjasoa du FOFIFA diffuse la souche dite de Kianjasoa qui aurait été constituée en 1994 à partir de la population de la station piscicole d'Ambatofotsy-Ambatolampy, d'après Rakotoambinina (2011). Elle vend aussi des alevins monosexes mâles.
2. Le Projet PATIMA dans la région de Boeny¹¹ dit diffuser la souche Nilojica introduite du Japon en 2011. Il vend aussi des alevins monosexes mâles.
3. L'ONG MIDEM¹² dans la région Antsinanana diffuse une souche introduite en 2013 depuis la Thaïlande (Gift et/ou Big Nin) et propose aussi des alevins monosexés.

Les pisciculteurs qu'elle encadre bénéficient de crédits d'investissement et de campagne afin de rendre accessible la très importante trésorerie nécessaire à l'achat des aliments composés.

4. Dans le cadre des projets PADPP (2010-2014) et PPMCE (2012-2016) dans deux régions de la Côte Est (Atsinanana et Analanjirofo), l'ONG APDRA a installé des pisciculteurs qui produisent eux-mêmes leurs alevins de tilapias. Chaque pisciculteur a aménagé au moins un étang de grossissement et un étang dit de service. Dans cet étang de service, le pisciculteur peut assurer ses besoins en alevins de tilapia. La méthode utilisée prévoit une mise en reproduction des géniteurs pendant 21 jours, puis le retrait des géniteurs et poursuite du grossissement des alevins jusqu'à la taille de fingerlings où la différence de sexe est visible à l'œil nu. A une taille voisine de 25 g, les plus gros mâles servent à empoissonner l'étang de grossissement et les femelles sont consommées ou vendues. Parmi les plus gros retenus, le nombre nécessaire de fingerlings est conservé pour relancer le futur cycle de reproduction, des échanges sont encouragés entre producteurs. L'ONG APDRA assure un approvisionnement initial des groupes locaux de pisciculteurs en pré-géniteurs.
5. La communauté religieuse de Saint-Benoît travaille aussi avec les souches locales et distribue gratuitement des alevins aux petits pisciculteurs des zones enclavées en Analanjirofo. Cette communauté a reçu un appui du projet PRADRA (financement FIDA¹³) dirigé par l'IHSM¹⁴.

DISCUSSION

Cette analyse actualise la compréhension des réalités de la production des alevins de la carpe à Madagascar en 2012 en s'ouvrant à l'ensemble de la diversité des producteurs, ce qui n'avait jamais été fait depuis les années 1970.

Les éléments de différenciation des types

Les principaux éléments de différenciation des systèmes d'élevage sont : le niveau du contrôle des étapes de la reproduction, l'intégration plus ou moins grande dans des flux de poissons au-delà de l'exploitation piscicole, les structures utilisées et la place de la production d'alevins de carpes au sein de l'élevage de poisson et du système d'activité du gérant.

Le contrôle des étapes de la reproduction renvoie à une large gamme de pratiques. Celles de préparation des géniteurs regroupent la sélection et le tri, la gestion des lieux de stockage, l'éventuelle alimentation (parfois les rations distribuées sont assez chères avec néanmoins jamais de farine de poisson ou d'aliments industriels). Ensuite vient la préparation et la mise en pose, cette étape comprend le choix des géniteurs associé parfois à un suivi pour anticiper la fin de leur maturation, la préparation de l'étang pour la mise en pose, son suivi, le contrôle des kakabans et des femelles après la ponte - voire leur pesée. Enfin viennent toutes celles associées au cycle d'alevinage, choix de la durée, évaluation de l'effectif, récolte ou évacuation passive vers d'autres milieux pour le grossissement. Les producteurs pratiquant les dispositifs de suivi les plus complets se déclaraient intéressés par un recours à la reproduction artificielle pour l'entretien de croisements ou la pratique de reproductions hors saison.

L'importance relative accordée au marché officiel ou national des alevins ou aux échanges de proximité est un élément structurant de cette typologie. Ses liens avec l'échelle d'approvisionnement pour le renouvellement des géniteurs sont intéressants : se côtoient, en effet, des pisciculteurs exigeant les souches de meilleure réputation sur un plan national, d'autres recherchant simplement celles a priori de bonne qualité, d'autres tirant partie de la disponibilité dans les environs immédiats et enfin certains producteurs peu soucieux d'un quelconque renouvellement de leurs géniteurs.

Les structures d'élevage restent très variées. La mise en pose peut se faire en rizière comme en étang mais les producteurs développant leur activité ont tendance à compléter leurs structures avec des étangs. Pour le grossissement, deux tendances sont constatées : les surfaces d'étangs sont complétées par des rizières ou, à l'inverse, l'intensification du grossissement pousse à la construction d'étangs. Les géniteurs sont stockés dans des mares, des étangs, voire de simples trous d'eau.

Les résultats montrent par ailleurs que des éléments explicatifs du système d'élevage de la carpe sont à rechercher au-delà des limites de l'exploitation agricole : associations de différentes espèces de poissons, intégration au riz et échanges de services entre exploitations (système d'élevage à cheval sur plusieurs exploitations).

Les principaux enseignements au niveau de la génétique de la carpe

Ici sont présentées les conclusions de ce travail d'enquête sur l'existence de différentes souches élevées et leur plus ou moins grande variabilité. Ces conclusions seront à croiser et à réinterroger avec celles de l'analyse génétique présentée dans la partie suivante. Le descriptif des phénotypes écaillé, miroir et cuir y est détaillé (Figure 13).

¹¹ http://www.jica.go.jp/Madagascar/french/office/others/pdf/publications01_12.pdf

¹² MIDEM : <http://kalapia.com/>

¹³ Fonds International de Développement Agricole.

¹⁴ Institut Halieutique et des Sciences Marines de l'Université de Toliara.

Dans la pratique, aucun PPA enquêté n'entretient les souches originelles promues (royale et hongroise) dans la durée. Seul le sanctuaire de Kianjasoa semble les avoir conservées. Les PPA choisissent eux-mêmes les modalités de renouvellement de leurs géniteurs, parfois en accord avec la DRPRH, et le schéma théorique proposé n'est pas suivi. Leurs pratiques ne permettent pas l'entretien de quelconques souches introduites. Par contre, ils entretiennent un brassage assez intense à l'échelle nationale, tout particulièrement dans le cas des types 1 et 2 et, dans une moindre mesure, pour les autres types à l'exception du type 6. Les principaux flux ont lieu entre l'Analamanga (Antananarivo), l'Itasy (Miarinarivo), le Vakinankaratra (Antsirabe, Betafo, Ambatolampy) et la Haute Matsiatra (autour de Fianarantsoa). Les carpes élevées dans les régions non traversées par ces flux sont susceptibles de disposer d'une plus faible variabilité à la condition que l'effectif de géniteurs soit faible et le temps d'isolement suffisamment long.

Certaines connexions ont été mises en évidence avec le milieu naturel dans des situations tout à fait enclavées (par exemple, celles de grossisseurs s'approvisionnant exclusivement avec des pêcheurs d'Amoron'i Mania pratiquant une reproduction naturelle aménagée dans des cuvettes inondables) ou comme alternative à une offre jugée peu attractive (cas de producteurs autour du lac Itasy). L'effet de ces pratiques est difficile à prévoir mais il devrait amoindrir la différence entre les souches du milieu naturel et celles d'élevage, d'autant plus qu'une politique d'empoissonnement des milieux naturels a été longuement pratiquée. Néanmoins, ses effets ne sont pas connus et l'effectivité de ces empoissonnements est parfois remise en cause. Quoiqu'il en soit, l'utilisation des carpes issues du milieu naturel est une pratique qui existe dans les milieux les plus périphériques et les plus enclavés. Des dynamiques particulières d'entretien des souches élevées pourraient y être présentes. Bien que ces poissons soient écaillés et moins prisés (voir paragraphe suivant) ce processus devrait participer à un enrichissement de la variabilité des souches élevées. Ceci rejoint les conclusions d'Andriambelomanana (2012) : dans les environs du lac Andranobe (Vakinankaratra), la variabilité des populations de carpes élevées par les petits producteurs de l'échantillon témoigne d'une utilisation passée de géniteurs issus du lac, à la différence de celle présente chez un PPA voisin où aucune trace antérieure d'utilisation de carpes « sauvages » n'a été décelée.

Y a-t-il une différence de qualité génétique entre les souches utilisées par les PPA et par les EP ? Un fait marquant est qu'il n'existe pas de frontière à la circulation des poissons entre les différents types de producteurs, un certain opportunisme pragmatique prédomine : des PPA s'approvisionnent parfois en géniteurs ou en pré-géniteurs au niveau de petits producteurs et/ou complètent leur commandes d'alevins avec des approvisionnements d'autres origines, et vice-versa. Cependant, des risques de consanguinité sont présents dans le type 3 des PPA ou pour d'autres producteurs d'alevins du fait de leur situation d'enclavement et de l'inexistence d'échanges de poissons avec l'extérieur.

Le phénotype est la seule qualité utilisée dans les échanges pour prétexter d'une différence génétique. Il est aussi utilisé pour l'entretien de certains stocks de géniteurs importants qui sont alors regroupés en trois catégories : « royale » (carpe miroir avec peu d'écaïlles), « cuir » (carpe sans écaïlles) et « hongrois ». Ce critère du phénotype présente des limites évidentes : dans certains élevages, des carpes dites royales avaient les mêmes parents que les cuirs ! L'étude s'est insuffisamment attachée à identifier les éléments permettant de caractériser les différents phénotypes du point de vue des éleveurs et il est apparu que, dans certains cas, la même terminologie pouvait recouvrir des réalités assez différentes : le qualificatif royal, initialement attaché à une carpe miroir, est parfois utilisé pour qualifier une carpe linéaire (Figure 13). La carpe royale, avec toutes les limites que ce terme véhicule, correspond à une carpe miroir avec peu d'écaïlles et le dos juste après la tête peu bombé, elle serait la plus appréciée. Une surprise a été l'engouement pour les carpes cuirs qui, aux dires des producteurs, grossissent vite et ont moins d'arêtes (voir l'analyse de leurs performances réelles). L'étude montre que les pisciculteurs recherchent des poissons disposant de peu d'écaïlles.

L'importance accordée au phénotype cuir contre l'avis des institutions de développement révèle une autre complexité : d'autres croyances circulent et sont des arguments de vente. Les cuirs ne sont écartées par aucun des types de producteurs d'alevins. Par exemple, des EP, contrairement aux recommandations de l'APDRA avec qui elles travaillent, conservent volontairement des cuirs dans leur cheptel. L'engouement pour les nouvelles souches est aussi très fort : des carpes Koï récemment introduites, associées à une autre variété écaillée, qualifiée de « Magoï », ont simultanément été retrouvées dans le district d'Anjozorobe à la périphérie d'Antananarivo et dans le district d'Isandra à une bonne distance de Fianarantsoa, à plus de 300 km de la capitale. Disposer de variétés nouvelles reste un argument commercial et les mécanismes de diffusion sont rapides. Sur un autre plan, ces introductions récentes témoignent de la porosité des frontières. Accessoirement, les vendeurs de Magoï, bien que ce soit un phénotype écaillé, vantent leur forte capacité de croissance et leur maturité précoce (« femelle mûre dès la première année »).

Dans les pratiques recueillies, certaines sont-elles susceptibles de sélectionner ou d'entretenir des qualités particulières des souches élevées par rapport à celles du milieu naturel ? La plupart des producteurs entretiennent des effectifs importants de géniteurs mais, au final, les poissons choisis sont ceux qui se retrouvent matures au moment de la mise en pose. Ceci a peut-être tendance à favoriser la sélection de géniteurs conservant les critères de maturation sur un pas de temps assez long ou susceptible de retrouver souvent ces qualités. Aucune pratique de sélection sur la croissance avec une identification claire de l'âge de la reproduction n'a été rencontrée, même si parfois ce sont les plus gros poissons qui sont choisis ; mais le fréquent mélange de lots de poissons ne veut pas dire que le plus gros est celui qui grossit le plus vite. Dans de nombreuses situations, ce n'est pas forcément l'efficacité reproductive de la carpe qui est récompensée mais la capacité des alevins à survivre dans des environnements où les ressources trophiques ne semblent pas abonder (pas de nourriture enrichie en protéines, peu de fertilisation, etc.). Ainsi, une proportion sensible de pontes n'aboutit pas à la production d'alevins. Enfin, le fait que la plupart des rizières et de nombreux étangs soient aussi souvent sujets aux crues signifie peut-être que la capacité de la carpe à ne pas dévaler est aussi importante.

Pour conclure cette partie sur les pratiques liées à la génétique, il faut souligner l'effectif très important de géniteurs participant à l'entretien de la variabilité globale à Madagascar, lié principalement au fait qu'il existe de très nombreux éclosoirs, ainsi que des connexions avec le milieu naturel. Ce nombre important reste un facteur extrêmement positif de l'entretien et du maintien à disposition des pisciculteurs d'une bonne variabilité de la souche d'élevage au niveau national. Cette étude a aussi mis en évidence des flux importants de « gènes » à l'échelle nationale et l'inexistence de véritable clivage dans la circulation des géniteurs. Tout semble indiquer que l'on est donc face à une métapopulation où, de façon continue, participent de très nombreux géniteurs se reproduisant dans des systèmes d'élevage très différents et gardant quelques liens avec le milieu naturel. Enfin, les services régionaux semblent jouer un rôle important dans l'organisation de cette circulation des poissons mais sur des bases très différentes de celles décrites¹⁵.

Les principaux enseignements sur le développement de la pisciculture

Cette grande enquête confirme certains résultats déjà connus. Les projets de la FAO restent à la base de l'organisation actuelle du réseau des PPA et des schémas techniques promus. Les PPA sont les acteurs majeurs du marché de l'alevin en ville et à longue distance. L'alevin issu des PPA arrive cependant peu dans les zones marginales. D'ailleurs, dans certaines zones, il n'y a toujours pas (ou très peu) de carpes

¹⁵ Cf. le dernier paragraphe sur les performances d'élevage des souches Royale, Hongroise et Sauvage (ci-après).

d'élevage pour deux grandes raisons : le tilapia est plus adapté, en particulier dans les milieux les plus chauds, et/ou la carpe reste peu connue même lorsqu'un bon potentiel de développement semble exister. Dans ce dernier cas, les rares producteurs d'alevins présents se retrouvent en situation de monopole.

Les entretiens ont mis à jour l'existence d'un double discours tant chez les PPA que les EP. Les producteurs commencent systématiquement par afficher leur connaissance d'un schéma technique mais ne l'appliquent que très partiellement. Face à cette situation connue de tous, il n'y a pas de remise en cause de l'unique modèle technique promu, aucune recherche-développement n'est entreprise : les questionnements des producteurs sont peu écoutés et leurs contraintes n'influent pas sur les orientations de la politique sectorielle. Par exemple, celles autour de l'alimentation ne conduisent pas à des tests ou à des propositions de nouvelles solutions.

Dans les zones de production d'alevins, deux logiques d'intensification des élevages de carpes existent : soit l'augmentation des productions de l'agrosystème exploité en améliorant l'intégration de la pisciculture, soit une plus grande spécialisation marchande sur l'alevin. Cette deuxième logique est la seule à conduire occasionnellement à l'achat d'aliments.

La compréhension des dynamiques de production et de leurs interdépendances a souligné la nécessité d'une prise en compte de l'ensemble des éleveurs. Des synergies variables entre PPA et EP existent : leurs relations peuvent prendre la forme d'échanges de géniteurs, d'achats d'alevins en complément de ceux produits, d'échanges d'autres services (formation, conseil et suivi, appui à la commercialisation). Certains PPA déclarent avoir besoin d'EP et en installer pour pouvoir répondre aux fréquentes demandes imprévues du marché. Ils les utilisent parfois aussi comme revendeurs ou y évacuent les invendus pour les valoriser lors du grossissement. De ce fait, le développement d'EP se fait par les PPA comme par les EP, de proche en proche. Les EP tiennent ainsi un rôle important, qui varie en fonction de leurs relations avec les PPA. A proximité, elles sont soit des compléments des PPA, soit de mauvais concurrents ; dans des relations plus distantes, elles sont de précieux relais pour certains marchés ; enfin, elles sont souvent un indispensable substitut dans les zones où l'alevin des PPA n'est pas accessible. Les EP, celles du type 4 tout particulièrement, se positionnent sur le secteur de l'alevin marchand, imitant d'une certaine façon les PPA ; dans certaines régions, elles ont acquis un statut équivalent à celui des PPA. C'est seulement sur le marché inter-villes que de vives concurrence sont observées entre toutes les sortes de producteurs.

Ceci conduit à s'interroger sur la pertinence des appellations PPA et EP. Classiquement, un PPA a une autorisation officielle provenant de la DRPRH et est sensé appliquer le schéma technique de la FAO. Cela dit, certaines EP peuvent être qualifiées de PPA : quoique n'ayant pas d'autorisation officielle, elles ont cependant reçu des formations sur le schéma technique de la FAO et appliquent un schéma similaire aux PPA, d'où des systèmes d'élevage de même type (même trajectoire, mêmes contraintes). A l'inverse, certains PPA se détachent de la DRPRH et des préconisations techniques, tout en conservant leur autorisation officielle. Enfin, la notion de PPA diffère selon la région et les EP sont associées de différentes façons selon la politique régionale sectorielle. En Itasy, par exemple, il n'y a pas eu de nouvelles intégrations depuis les projets de la FAO. De ce fait, les PPA disposent d'une caution et donc d'un statut qui les différencient clairement des autres producteurs. Par contre, à Fianarantsoa, des EP (avec des schémas techniques et des surfaces parfois différents des PPA) ont été officialisées postérieurement aux projets, ce qui fait que dans cet endroit la notion de PPA signifie être en possession d'une autorisation de la DRPRH. Ainsi, la différence PPA/EP est peu fonctionnelle à l'échelle du pays et revêt des réalités différentes.

Les intérêts de se mettre en règle vis-à-vis de la DRPRH sont multiples : obtenir l'autorisation pour vendre (dans les environnements les plus « renommés »), assurer les débouchés, bénéficier de la caution des services officiels, profiter de la mise en place de certains projets, etc. Cependant selon leur fonctionnement, leur environnement et leur stratégie de production, ces intérêts restent trop limités pour certains producteurs qui n'y souscrivent pas.

En parallèle des structures d'appui à la pisciculture, de nouveaux opérateurs privés participent, dans toutes les régions, au développement de la pisciculture. Dans certains cas, ils ont constitué un pôle de production et/ou de fourniture de services (conseil, suivi, formation). Ils diffusent activement des nouveautés, qu'elles soient techniques ou organisationnelles : promotion de nouvelles souches (Koï, Maggoï), vente de matériel de transport d'alevins, établissement de convention d'empoissonnement avec indicateurs de suivi, conseil à la reproduction, etc. Ils ne sont pas forcément en lien avec la DRPRH mais sont reconnus dès qu'ils sont influents. Parmi eux, il y a des anciens fonctionnaires, d'autres sont adossés à des institutions religieuses. Leur rôle dans la promotion de la pisciculture et dans la production serait aussi davantage à prendre en compte ; leur implication dans le développement pourrait être accompagnée.

L'augmentation de la production d'alevins amène un intérêt supérieur pour le poisson marchand. Dès que l'alevin produit devient moins rémunérateur, des producteurs préfèrent mettre une certaine quantité d'alevins en grossissement plutôt que de les vendre. La mise en place d'accords tels que la vente à crédit ou l'empoissonnement de rizières voisines témoigne d'une offre d'alevins moins chers. Ces pratiques innovantes, tout en accompagnant la baisse du prix de l'alevin, améliorent et sécurisent la production grâce à une mutualisation des risques de la production de poissons marchands et à une extension des surfaces empoissonnées ; elles améliorent le rôle de la pisciculture de la carpe dans le développement rural, particulièrement dans les régions enclavées disposant de potentialités pour cet élevage. Ces pratiques permettent de contourner les blocages liés aux monopoles créés de fait par les rares producteurs d'alevins qui arrivent à maintenir une offre d'alevins dans ces environnements enclavés ; ces derniers, au vu des objectifs affiliés à leur production, ne sont pas toujours intéressés pour améliorer leur technicité. De nombreux paysans en situation précaire étaient satisfaits de la rizipisciculture et ont témoigné une volonté de la maintenir ou de l'étendre. Cette réalité confirme l'intérêt de l'amélioration de l'offre en alevins dans ces zones ; cette offre bénéficierait beaucoup d'être associée à la mise en place des pratiques innovantes décrites ci-dessus et qui méritent davantage de considération.

Structuration et variabilité des populations de carpe à Madagascar

La carpe, espèce introduite à Madagascar en 1912, s'est largement répandue dans le milieu naturel et les élevages, et est aujourd'hui une espèce importante à la fois pour la pêche et pour l'aquaculture. Les éleveurs de carpe malgaches sont attentifs à la qualité des alevins qu'ils utilisent et se posent depuis plusieurs années des questions sur la qualité génétique des animaux dont ils disposent, que l'on peut résumer par les questionnements suivants :

- Y a-t-il une variabilité génétique suffisante des souches de carpes présentes à Madagascar ?
- Faut-il en conséquence importer de nouvelles souches de carpe ?
- Les souches ont-elles des performances suffisantes ?

- Les performances sont-elles diminuées par la consanguinité ?
- Les carpes « cuir » ont-elles des performances intéressantes ?

Pour répondre à ces questions, nous les avons reformulées et placées dans un cadre plus général, avant de conduire une série d'expérimentations. La première question à se poser était de savoir s'il existait des souches différentes de carpe à Madagascar, du point de vue génétique. Pour cela, nous avons mis en place un protocole de collecte d'informations et d'échantillons, afin de pouvoir analyser, par l'étude de marqueurs génétiques, la structuration et la variabilité des populations de carpes malgaches par des méthodes de génétique des populations.

Pour ce qui est des performances, la génétique des populations ne permet pas d'apporter de réponses et il faut mettre en place des expérimentations de terrain utilisant les principes de la génétique quantitative. Cependant, l'évaluation de la valeur génétique de populations de poissons est délicate, car il faut, d'une part, avoir des animaux représentatifs des différentes souches à tester et, d'autre part, il est très difficile d'obtenir des performances fiables dans un milieu très variable comme le milieu d'étang ou de rizière. Nous avons donc tout d'abord mis en place un protocole visant à valider une méthode de testage par utilisation d'un témoin interne (Vandeputte *et al.*, 2002). Ensuite, nous avons pu mettre en testage différents génotypes afin d'étudier leurs performances relatives. Cet ensemble d'actions de recherche entrepris dans le cadre du projet MADAPISCI est relativement unique par son ampleur et par les approches utilisées, allant d'une recherche assez fondamentale à des applications très pratiques.

Historique des populations de carpes malgaches

La carpe commune (*Cyprinus carpio* L.) est une espèce normalement inféodée à l'Eurasie, dont la domestication en Europe remonte au Moyen-Age, si ce n'est à l'Antiquité (Balon, 1995). A Madagascar, cette espèce est introduite pour la première fois en 1912¹⁶ par le professeur Legendre, qui stocke des carpes de type « miroir » dans un bassin de l'Institut Pasteur jusqu'à la fin de la Première Guerre Mondiale (Kiener, 1958 - Figure 4). Cette première introduction est d'origine française. Le Docteur Legendre crée alors une petite station dans les années 1920 à Antanimena ; en 1926 une station est créée à Sisaony par le service des Eaux et Forêts sur la route d'Antsirabe, à 24 km d'Antananarivo pour produire des alevins utilisés pour empoissonner les lacs Alaotra, Itasy et Mantasoa, ainsi que des étangs des régions d'Antsirabe, Antananarivo et Fianarantsoa. En 1927, la carpe pullule déjà dans le lac Andranobe, près d'Antsirabe, et on la trouve en abondance dans le lac Alaotra dès 1935 (elle y représente 80 % des captures au milieu des années 1950 - Lemasson 1957). L'espèce s'est dispersée naturellement, après 1940, pour atteindre les zones chaudes de la côte Ouest (Majunga, Marovoay, Belo sur Tsiribihina), mais curieusement pas celles de la côte Est, où elle aurait pu dévaler du lac Alaotra (Kiener, 1958). Elle devient réellement très abondante dans la basse Betsiboaka et la Tsiribihina à partir des années 1947-1949. En 1958, elle occupe la moitié du pays (Figure 3). A cette époque, Kiener note que la carpe, dans le milieu naturel, retourne à une forme « écailleuse », particulièrement sur la côte Ouest où la forme miroir semble avoir quasiment disparu (< 5 % des sujets), alors qu'elle semble persister sur les hauts plateaux (environ 30 % des sujets sur les marchés d'Antananarivo et Fianarantsoa, 15 % dans le lac Alaotra - Kiener, 1963). Un point intéressant sur la dynamique des populations, est que l'arrivée d'une espèce nouvelle entraîne souvent une véritable pullulation, les populations revenant ensuite à un niveau plus raisonnable, comme attesté dans les lacs Itasy et Alaotra (Moreau *et al.*, 1988).

¹⁶ Dans les écrits de Kiener de 1958, c'est bien l'année 1912 qui est évoquée alors que dans ses écrits de 1963, la date devient 1914 ; nous supposons qu'il fait une différence entre la date d'introduction de la carpe à Madagascar et la date de sa diffusion dans le milieu naturel.

Suite à ce constat, une souche de carpe « royale » (qui n'est autre qu'une souche de carpe miroir particulière - Figure 4), a été importée à nouveau de France (Sologne selon Hanitrynyony, 1999) par le service des Forêts en 1959 (Kiener, 1963), non pour le repeuplement des milieux naturels mais bien pour la production de pisciculture (Moreau *et al.*, 1988).

En 1979, dans le cadre du projet MDR/PNUD/FAO-MAG/76/002 : « Développement de la pêche continentale et de l'aquaculture », de nouveaux géniteurs de carpe d'origine hongroise ont été importés par le Pr. Elek Woynarowitch, alors expert pour la FAO. Il a introduit 50 carpes miroir de souche Szarvas 215 qui est un hybride entre une mère Szarvas 22 et un père Szarvas 15, ainsi que 50 carpes écaillées de lignée pure Szarvas P33¹⁷, qui devaient servir comme géniteurs dans le cadre du projet (Figure 4). Ces animaux provenaient de la station TEHAG de Százhalombatta (Hongrie), qui utilisait des géniteurs issus du conservatoire de souches de carpe du HAKI à Szarvas (Andras Woynarowitch & Janos Bakos, comm. pers.).

Par la suite, il est possible que d'autres carpes de souche hongroise aient été introduites. Il est mentionné une introduction en 1992 par la FAO des souches hongroises P3, 02 et 15, qui sont de fait les souches parentales¹⁸ des introductions documentées par Woynarowitch en 1979 (Hanitrynyony, 1999). On peut se demander s'il s'agit bien d'une introduction ou juste d'une propagation des individus introduits en 1979. Quoi qu'il en soit, ces introductions sont liées à la question de la « dégénérescence génétique¹⁹ » des stocks qui se pose régulièrement - on peut y voir une manière d'expliquer des baisses de performances par une cause extérieure (l'incapacité à maintenir les qualités initiales de la souche introduite). Pour autant, une telle dégénérescence n'a jamais été prouvée avant toutes ces introductions qui se sont déroulées autour des années quatre-vingts, le seul point tangible d'un changement génétique dans les populations étant l'apparition de carpes écaillées « retournées à la forme sauvage » dans les milieux naturels, attestée par Kiener au plus tard à la fin des années 1950.

Pour ce qui est des introductions ultérieures, on parle en particulier d'introductions postérieures à 1988 par le projet MAG/88/005 « Promotion de l'aquaculture et privatisation de la production d'alevins »²⁰, sans pour autant parvenir à les documenter. De même, on peut observer aujourd'hui dans la région Analamanga, des carpes colorées de type « koï », qui sont nécessairement issues d'introductions complémentaires, dont l'origine n'est pas connue.

Aujourd'hui, cette question de l'introduction est particulièrement importante, car depuis 1996, un nouveau virus, le KHV²¹, provoquant des mortalités très importantes dans les populations de carpe, a émergé au niveau mondial (Haenen *et al.*, 2004), et il est donc aujourd'hui très risqué d'importer de nouvelles populations de carpe sans contrôles sanitaires très stricts.

¹⁷ Des détails sur ces souches hongroises sont disponibles à <http://www.fao.org/docrep/005/y2406e/y2406e03.htm>

¹⁸ C'est-à-dire les souches dont les croisements donnent Szarvas 215 et P33.

¹⁹ Le risque (réel) de consanguinité dans une population de taille limitée n'est pas mesurable sans outils précis (pedigree, marqueurs génétiques), mais est toujours invoqué (souvent à tort) en cas de baisses inexplicables de performances, l'introduction de « sang neuf » étant alors une solution facile censée résoudre d'un coup tous les problèmes.

²⁰ Cité par <http://www.fao.org/docrep/008/v4050b/V4050B08.htm#ch3.2.1.1>.

²¹ FAO, consulté le 15/04/2015 : <http://www.fao.org/fishery/facp/MDG/en#pageSection2>

A propos de l'introduction des tilapias

Les premières introductions de tilapias ont eu lieu au cours des années 50 (Moreau *et al*, 1988, Moreau, 1988 ; Kiener, 1963 ; Therezien, 1960). En provenance du Congo, le *Tilapia rendalli* (introduit sous le nom *T. melanopleura*) a été introduit en 1951 et l'*Oreochromis macrochir* en 1955, le *Tilapia zillii* du Kenya en 1955, l'*Oreochromis niloticus* d'Égypte et de l'Île Maurice en 1956 et l'*O. mossambicus* du Mozambique en 1956.

Ces introductions ont eu un important impact sur le peuplement ichtyologique comme en témoigne l'évolution des captures du Lac Alaotra (Moreau, 1980) : en 1925, les captures étaient constituées essentiellement de deux espèces, l'une native *Paratilapia polleni* (75 %) et l'autre exotique *Carassius auratus* (20 %) ; en 1954, *Cyprinus carpio* représentait 80 % des captures principalement au détriment du *P. polleni* (5 %). Au fur et à mesure des introductions de tilapias, ceux-ci ont proliféré et sont entrés davantage en compétition avec les espèces précédentes : en 1975, les captures décrites sont composées de 50 % d'*O. macrochir*, de 21 % de *C. carpio*, de 16 % de *T. rendalli* et de 7 % d'*O. niloticus*. Aujourd'hui, au niveau national,

les tilapias représentent plus de la moitié des captures de poissons d'eau douce, les quantités issues de la pisciculture ne seraient que de quelques dizaines de tonnes en 2012²². Même si ces valeurs semblent sous-estimées, elles reflètent la faible importance de la pisciculture du tilapia.

Dès l'introduction des tilapias, les services des Eaux et Forêts ont élaboré des itinéraires techniques. Ainsi, la méthode mixte des classes d'âge séparées, mise au point au Katanga (Bont, 1950) à des altitudes comparables à celles des hautes terres malgaches, a été adaptée à Madagascar ; appliquée au *T. rendalli* (Moreau, 1980), le rendement potentiel est de l'ordre de 3 t/ha/an (Kiener, 1956). En matière de vulgarisation, le tilapia du Nil (*O. niloticus*) supplante les autres espèces de tilapia : les premiers essais d'élevage en cages dans le lac Itasy se déroulent en 1988 (Rakotoambinina, 1989).

Tout récemment deux souches d'*Oreochromis* ont été introduites dans le cadre de projets : la souche Nilojica venant du Japon et une souche Gift de Thaïlande.

Cas de l'échantillonnage pour les populations de tilapias

L'échantillonnage a été effectué chez les principaux producteurs de tilapia et dans les quelques lacs pour lesquels des actions de repeuplement ou de diffusion des tilapias ont été réalisées. Au total, 379 spécimens d'*Oreochromis niloticus* ont été prélevés. La collecte des échantillons a eu lieu aussi bien dans les piscicultures que dans les milieux naturels couvrant 8 régions de l'île. Il s'agissait ici aussi de prélever un fragment de nageoire dorsale sur chaque poisson et de le conserver dans de l'éthanol à 70 % jusqu'à l'extraction de l'ADN génomique (Figure 7).

Les effectifs prélevés ont varié en fonction du nombre d'adultes disponibles au moment du prélèvement qui était parfois très faible mais aussi de l'absence d'amplification de l'ADN de certains individus lors de la PCR. Au final, 316 échantillons ont été analysés pour mesurer la diversité génétique et la structuration de la population.

²² Koi Herpès Virus.

STRUCTURATION ET VARIABILITÉ GÉNÉTIQUE DES POPULATIONS ACTUELLES DE CARPE À Madagascar

Un plan d'échantillonnage de grande ampleur

Pour mieux cerner la structuration et la diversité génétique des carpes malgaches, il était important d'échantillonner le plus de sites possibles et de collecter le maximum d'échantillons dans chaque site. Au total, environ 1600 échantillons de nageoires ont été prélevés en milieu naturel et en élevage dans 10 régions de l'île. Cela a permis de couvrir la grande majorité des principales zones de production et les sites de pêche les plus importants.

La répartition géographique des sites de prélèvement est présentée dans la Figure 5.

Certains sites n'ont pu être échantillonnés à cause du faible effectif en élevage au moment du passage des équipes et/ou de l'accessibilité des élevages. Les échantillons sont prélevés au niveau de la nageoire caudale, ils provenaient de poissons vivants, en général adultes. Ils étaient ensuite conservés dans de l'alcool à 90 °C.

Au final, 782 échantillons ont été exploités pour l'analyse de la structuration et de la variabilité génétique des populations de carpes malgaches. Des populations de référence d'origine française et hongroise ont été intégrées pour servir d'éléments de comparaison avec les carpes malgaches.

Structure génétique des populations de carpes

L'objectif de l'analyse de la structuration génétique est de pouvoir mettre en exergue d'éventuelles différenciations ou de ressemblances génétiques au sein des populations. A Madagascar, le nombre exact de populations de carpes présentes sur l'île n'est pas véritablement connu, mais comme vu précédemment, les dénominations « sauvage », « royale », « hongroise », « koï » et « Maggoï » sont utilisées. Ce travail de recherche a permis de clarifier cette situation et apporte une précision sur les populations qui existent réellement à Madagascar et leur niveau d'introgression²³. Si l'on compare les carpes malgaches avec des carpes de populations de référence asiatiques et européennes (Figure 8), on peut constater qu'elles se rattachent sans équivoque au rameau européen, et que la population la plus proche est une population française du Forez. Les carpes malgaches ne se distinguent pas entre elles, mais sont distinctes des autres carpes européennes (à l'exception de la population du Forez).

Globalement, les analyses montrent que les carpes malgaches sont composées de 2 populations. La première population, majoritaire (en vert dans la Figure 10) est probablement issue de la population ancestrale introduite en 1914, puisqu'elle se retrouve pure dans tous les prélèvements du milieu naturel. Dans certaines populations d'élevage, on identifie une introgression de carpes hongroises dans 19 populations sur 48 populations d'élevage ; cependant, aucune population actuelle sur Madagascar ne peut être considérée comme purement hongroise. Par ailleurs, aucune trace de la carpe royale n'a été détectée, vraisemblablement du fait de la proximité génétique entre la population ancestrale et la carpe royale, qui proviennent toutes deux de France.

La présence de ces 2 populations ancestrales et hongroises pourrait s'expliquer par les vastes programmes de diffusion effectués par l'Etat et la FAO pour ces espèces à travers l'île. Concernant la carpe royale, le plus grand stock ayant été conservé en grande partie dans une station piscicole en Itasy, l'arrivée de la carpe

²³ Ce terme signifie qu'une souche a réussi à capter quelques gènes d'une autre souche.

hongroise, réputée pour sa forte croissance, a conduit les acteurs à éliminer les carpes royales et les remplacer avec les carpes hongroises. En complément de sa proximité génétique probable avec la carpe ancestrale, ceci justifierait en partie sa disparition ou du moins la difficulté de détecter son génotype à l'heure actuelle. Il faut par ailleurs noter que la carpe ancestrale est bien implantée et est celle qui domine parmi les populations d'élevage malgaches.

En résumé, 2 populations de carpes sont présentes à Madagascar, une d'origine ancestrale et une d'origine hongroise plus ou moins introgressée dans la précédente, mais jamais présente à l'état « pur ».

Variabilité génétique des populations d'élevage

Maintenir une grande diversité génétique au sein des populations revient à préserver le potentiel d'adaptation de l'espèce pour faire face à de nouvelles conditions dans son milieu. Plusieurs facteurs peuvent affecter cette diversité génétique, mais les principales en élevage sont la dérive génétique (liée à l'utilisation de faibles effectifs de reproducteurs) et l'introggression de souches d'origine différente.

La connaissance de la variabilité est, de ce fait, importante car une baisse de la variabilité génétique chez le poisson pourrait se traduire notamment par la détérioration du taux de survie, la perte de la capacité de lutte contre les prédateurs et l'altération de capacité d'adaptation lors d'un changement brutal des conditions environnementales.

Cas de la structure génétique des populations de tilapia

Pour pouvoir gérer au mieux les ressources disponibles, il est primordial de commencer par comprendre la structuration des populations existantes. Plusieurs interrogations se posent par rapport à la structure actuelle des populations. Quel est le nombre exact de populations actuellement ? Y-a-t-il eu des introgressions ou des hybridations ? Quelle est l'origine probable de chaque individu ? Autant de questions auxquelles nous allons essayer d'apporter des éléments de réponse dans cet ouvrage.

Les analyses ont révélé la présence de 3 groupes populationnels distincts. Chaque groupe populationnel est constitué d'individus proches génétiquement.

L'analyse génétique montre 2 groupes proches et majoritaires (85,7% des individus). Cette structuration de la population présente assez peu d'introggression.

De façon concrète, le premier groupe est constitué des populations naturelles d'Atsimo Andrefana, de Miandrivazo, de Vakinankaratra et d'Itasy, la population d'élevage d'Analamanga et près de 69% des géniteurs échantillonnés de la station Kianjasoa dans la région de Bongolava. Le 2^e groupe populationnel est constitué de la population du lac Alaotra et de 81,4% d'individus de l'élevage en Itasy. Devant la difficulté de reconstituer ce qui s'est passé entre 1956 et aujourd'hui, il n'est pas possible de connaître la contribution respective des introductions en provenance de l'Égypte et de l'île Maurice à la génétique des deux groupes identifiés.

La 3^e population identifiée est la population nouvellement importée du Japon, la Nilo-jica, qui se distingue nettement des 2 populations ancestrales.

La diversité génétique est généralement appréciée à partir des estimations de l'hétérozygotie. L'hétérozygotie peut être calculée à partir de la fréquence mesurée des hétérozygotes (nombre des individus hétérozygotes divisé par le nombre total des individus de l'échantillon). Une population avec plus d'individus hétérozygotes détient plus de variabilité qu'une population avec plus d'homozygotes.

A ce jour, il existe peu de données sur ce sujet. La première étude a été réalisée en 2008 sur la carpe commune malgache et camerounaise (Guyomard *et al.*, 2008) et la deuxième en 2012 sur la carpe malgache (Andriambelomanana, 2012). Dans les 2 cas, les résultats ont montré une bonne variabilité des populations locales. Mais cela ne permet pas de conclure sur le statut génétique des populations malgaches. C'est la raison pour laquelle, une étude de plus grande envergure a été menée pour avoir un meilleur aperçu de la diversité génétique existante des populations pour l'ensemble du territoire malgache.

Parmi les 47 populations d'élevage qui ont été analysées, 7 présentent un déficit en hétérozygotie. Ce déficit a été observé dans 2 exploitations piscicoles en Itasy, 4 en Haute Matsiatra et une en Analamanga. Ces résultats montrent que la variabilité génétique des populations de carpes malgaches est globalement bonne avec des pertes de diversité ponctuelles au niveau de quelques rares producteurs.

L'hypothèse principale serait que ces écarts pourraient être attribués à la consanguinité, une des premières raisons évoquées par les acteurs de la filière comme étant à l'origine des faibles productions en élevage. Les analyses ont cependant révélé que les populations d'élevage d'Itasy et de Haute Matsiatra qui sont en déficit, sont en fait constituées de 2 sous populations chacune, ce qui peut faire chuter l'hétérozygotie apparente sans pour autant qu'il y ait réellement perte de variabilité (effet « Wahlund »).

Pour l'exploitation en Analamanga, le faible effectif du stock fondateur ainsi que la gestion des géniteurs semble contribuer à ce déficit. En effet, ces carpes koï, introduites à Madagascar pour l'aquariophilie, ont été utilisées pour l'aquaculture par quelques pisciculteurs qui ont élargi leur stock à partir d'un faible nombre d'individus.

Par conséquent, cette variabilité génétique doit être gérée de manière raisonnée et durable. Cela implique une action sur les systèmes d'élevage notamment la gestion des reproducteurs et sur les flux de géniteurs.

Impact des pratiques d'élevage sur la variabilité et la structure des populations d'élevage

Il est important de connaître s'il y a un impact éventuel des pratiques d'élevage sur la variabilité génétique.

Pour ce faire, 47 exploitations piscicoles ont été analysées. Il y avait aussi bien des PPA, des EP que des producteurs d'alevins qualifiés de PA, et avec une situation intermédiaire entre les formes typiques du PPA et de l'EP. En termes de pratiques, les principales différences concernaient le nombre de femelles par ponte, le nombre total de géniteurs, l'origine des géniteurs en termes de distance, le taux de renouvellement des géniteurs.

Les résultats de variabilité génétique montrent 7 exploitations en déficit. Parmi ces 7 exploitations, 4 étaient des PPA, 2 PA et 1 EP. Plusieurs pratiques peuvent expliquer ce déficit en hétérozygotie notamment :

- 100 % des exploitations ont sélectionné leurs futurs géniteurs à partir de leurs propres descendants ou ont réutilisé les mêmes géniteurs pour la reproduction ;
- Pour une exploitation, bien que les origines des géniteurs étaient diverses, la sélection des géniteurs a été effectuée sur la descendance ;

- Dans la majorité des cas, les pisciculteurs pratiquent peu ou pas de renouvellement du stock de géniteurs ;
- Pour 4 exploitations, l'effectif du stock fondateur est très faible ;
- Pour 2 exploitations, la sélection de géniteurs basée sur le phénotype (couleur) a conduit les pisciculteurs à effectuer la reproduction à partir d'un nombre limité d'individus exprimant ce phénotype, accroissant ainsi le déficit en hétérozygotie.

On peut donc en conclure que globalement la variabilité génétique des différents élevages échantillonnés est bonne. Les déficits observés sont plutôt liés à des problèmes individuels qu'au statut ou type d'élevage. Il est important de remarquer aussi que la multiplicité des producteurs d'alevins avec leurs pratiques diverses (en particulier d'échanges ou de renouvellement de géniteurs) est favorable à l'entretien d'une variabilité génétique satisfaisante.

Les carpes néo-écaillées du milieu naturel

Les carpes actuellement présentes dans le milieu naturel à Madagascar, présentent en général une couverture complète d'écaillures (Figure 11A), et ce fait était établi dès la fin des années 1940 (Kiener 1958). Cependant, ceci est surprenant, car avant 1979, les carpes introduites étaient toutes de type « miroir », et l'on sait que ce type d'écaillure implique qu'elles soient homozygotes pour un allèle *s* muté du gène *fgfr1a*, contrairement aux carpes écaillées qui sont normalement porteuses de l'allèle *S* non muté (Rohner *et al.*, 2009)²⁴. Nous avons analysé 240 carpes du milieu naturel pour la mutation de *fgfr1a*, dont 180 avaient le corps entièrement couvert d'écaillures (Figure 11A), alors que 60 étaient de type « miroir » (Figure 11B). La totalité de ces individus testés était homozygote *s/s* pour l'allèle muté, ce qui signifie qu'elles étaient génétiquement « miroir », et que ces carpes « néo-écaillées » sont de fait des carpes miroirs présentant un nombre important d'écaillures.

Nous avons pu trouver 22 carpes écaillées (Figure 11C) portant le gène *S* non muté à l'état hétérozygote (*n* = 16) ou homozygote (*n* = 6), mais uniquement dans des élevages. L'analyse de la distribution du nombre d'écaillures (Figure 12) nous montre bien que les carpes de génotype *s/s* sont miroir ou néo-écaillées selon qu'elles ont plus ou moins d'écaillures, mais qu'elles possèdent (sauf exception) moins d'écaillures que les carpes écaillées *S/s* ou *S/S*.

Pour tester cette hypothèse, nous avons croisé 4 mâles néo-écaillés avec des femelles miroirs, et en comptant les écaillures de leurs descendants identifiés par génotypage de marqueurs microsatellites, à l'âge de trois mois, nous avons pu montrer une influence génétique des parents sur le nombre d'écaillures de leurs descendants, ce qui montre que sélectionner des parents *s/s* pour leur nombre d'écaillures permet d'augmenter le nombre d'écaillures dans leur descendance. Dès lors, on peut faire l'hypothèse que les carpes « miroir » importées en 1912 et répandues à partir de 1920 se sont sélectionnées naturellement dans le milieu, pour avoir une couverture d'écaillures la plus complète possible. Comme le constatait Kiener en 1958, la forme « miroir » est dominante dans le milieu naturel des régions d'Analamanga (100 % des 16 échantillons génotypés) et de Haute Matsiatra (95,5 % des 66 échantillons génotypés). La forme néo-écaillée domine à Itasy (88,5 % des 26 échantillons génotypés), dans le Vakinankaratra (96 % des 25 échantillons génotypés), en Alaotra (93,3 % des 45 échantillons génotypés) et dans l'Ouest (Menabe et Boeny, 100 % des 13 échantillons génotypés). Cette diversité phénotypique (et génétique pour ce qui

concerne le gène d'écaillure *fgfr1a* ne se retrouve pas dans la structuration génétique des populations naturelles, puisque toutes appartiennent à la même population « ancestrale ». Donc, l'hypothèse la plus probable est qu'il existe des pressions de sélection différentes selon les milieux, aboutissant ou non à l'établissement de populations néo-écaillées. Le fait qu'on ne retrouve pas dans le milieu naturel d'animaux de type génétique hongrois peut aussi être interprété comme un signe d'une bonne adaptation de ces animaux à leur milieu naturel, induisant un faible succès des repeuplements avec des souches d'élevage.

Les carpes néo-écaillées sont donc une spécificité malgache. Elles sont issues d'une évolution rapide de carpes de génotype « miroir » introduites sur l'île en 1912.

PERFORMANCES DES CARPES MALGACHES EN ÉLEVAGE PAYSAN

Mise en place et validation d'un protocole de croisement et de testage

Pour pouvoir obtenir des performances caractéristiques de différentes souches qui permettent de les comparer objectivement, trois conditions essentielles doivent être remplies :

- Produire des échantillons de descendants à comparer représentatifs de chaque souche, c'est-à-dire issus d'un nombre suffisamment important de géniteurs de chaque souche ;
- Produire ces échantillons, le même jour, pour les différentes souches ;
- Pouvoir corriger l'extrême variabilité des conditions d'élevage en étangs.

Pour les deux premiers points, il faut une très bonne maîtrise du plan de croisement. La méthode de choix est l'utilisation de la fécondation artificielle, avec incubation en éclosérie, qui ne va pas de soi dans des conditions de terrain à Madagascar. En 2012 et 2013, nous avons expérimenté la possibilité de le faire au CRFPA d'Antanetimboahanghy. Pour cela, une éclosérie de campagne a été installée avec le soutien de l'APDRA. Des fécondations incluant une formation des acteurs ont été réalisées. En 2012, 30 pères ont été au total croisés avec 9 mères, et en 2013, 43 pères avec 15 mères.

La carpe « cuir », presque totalement dépourvue d'écaillures, est présente à Madagascar et est appréciée par les pisciculteurs et leurs clients pour sa facilité de préparation. Il est souvent dit qu'elle a des performances égales ou supérieures à celles de la carpe miroir, et qu'elle possède également moins d'arêtes intramusculaires. Pourtant, il est connu depuis longtemps en Europe et en Russie que la carpe « cuir » présente des performances de croissance et de survie inférieures à celles de la carpe miroir, et encore plus à celles de la carpe écaillée (Kirpichnikov 1999). De plus, le gène *N* responsable du phénotype cuir est létal à l'état homozygote (Figure 13). Cela a pour double conséquence, une perte systématique sur le taux d'éclosion des descendants de « cuir », ainsi qu'une impossibilité de maintenir une lignée pure de carpes cuir, qui produit aussi nécessairement des carpes miroir. Ceci fait que, depuis plusieurs décennies, les carpes cuir sont éliminées des souches d'élevage européennes. Cependant, étant donné leur attrait pour les pisciculteurs malgaches, il est important d'évaluer leurs performances réelles dans les conditions locales.

Pour comparer les performances, nous avons proposé d'utiliser la méthodologie du témoin interne écaillé (Vandeputte *et al.*, 2002), utilisant les gènes d'écaillure de la carpe (Figure 13) pour produire un lot écaillé, en croisant un père écaillé homozygote *SSnn* avec des femelles miroir *ssnn*, ce qui donne 100 % de *Ssnn* écaillés. Cependant, nous avons vu précédemment que le gène *S* est très rare à Madagascar (et présent uniquement dans les élevages), et du fait de l'impossibilité logistique de marquer et génotyper les

²⁴ Pour davantage d'explication, on pourra se reporter à la Figure 13.

animaux pour le gène *S* avant le croisement de 2012, nous avons choisi de tester le protocole en utilisant des géniteurs écaillés dont nous savions qu’une partie était hétérozygote, et donc qu’ils auraient aussi des descendants « miroir ». Nous avons donc produit en 2012 deux lots issus d’un mélange de géniteurs miroirs différents (MEL1 et MEL2), chacun mélangé avec une partie d’un même lot « témoin interne » partiellement écaillé. L’objectif est d’évaluer si les variations dues au milieu pouvaient être corrigées en mesurant les performances, non pas dans l’absolu, mais par rapport au témoin interne du même bassin.

La Figure 14 montre que les écarts environnementaux sont bien corrigés par le témoin interne. Cela permet d’estimer à 4 ou 5 le nombre de répliques d’élevage par souche et de mettre en évidence un écart de performance de 10 %, que l’on considère comme le minimum présentant un réel intérêt du point de vue du pisciculteur. Nous avons ainsi pu montrer que la technique de comparaison de souches combinant reproduction artificielle et usage du témoin interne écaillé permettait de mettre en place de façon effective un test de performances de souches chez des producteurs paysans.

Quelles performances pour les carpes « cuir » ?

Nous avons mis en place en 2012 un croisement entre 7 femelles miroir et 3 mâles cuir en s’attendant qu’il produise un nombre égal de descendants miroir et cuir sur un même fond génétique.

Etant élevés dans les même bassins, nous avons comparé la performance du miroir et du cuir. Pendant la phase d’élevage larvaire et de prégrossissement, seuls deux étangs sont disponibles pour calculer la survie, l’un étant contaminé par un lot écaillé. La survie des cuirs est inférieure dans chacun des étangs, mais cet écart n’est significatif que dans l’un des étangs. Pour la croissance, le poids moyen des miroirs est supérieur à celui des cuirs dans chacun des trois étangs, et cette différence (miroir : 4.3 g, cuir : 3.3 g) est significative. Sur la première année de grossissement, 4 étangs sont disponibles, et dans deux étangs la survie des cuirs est significativement inférieure à celle des miroirs, alors qu’elle est similaire dans deux autres étangs. En termes de croissance, les différences observées ne sont pas significatives.

Les animaux ont été conservés une année supplémentaire, avec également des carpes écaillées du même âge, puis 10 individus de chaque type ont été filetés, et leurs arêtes intramusculaires comptées. Il apparaît qu’il n’y a aucune différence entre le nombre d’arêtes intramusculaires des carpes cuir, miroir et écaillées (Tableau 1).

Tableau 1 : Poids et nombre d’arêtes intramusculaires (moyenne ± écart-type) de trois phénotypes de carpe (N = 10 par groupe) de même âge, élevés dans le même étang

Phénotype	Cuir	Miroir	Ecaillé
Poids (g)	101,2 ± 26,1	102,8 ± 10,8	141,2 ± 32,1
Arêtes	100,5 ± 2,7	100,3 ± 4,1	100,2 ± 3,6

Au final, on peut donc conclure que les performances de croissance et de survie des carpes cuir sont inférieures ou égales à celles des carpes miroir, cette différence pouvant être assez importante selon les conditions. Elles ne présentent aucun avantage en termes de nombre d’arêtes intramusculaires, le seul avantage restant, étant la facilité de préparation liée au manque d’écailles. Si l’on ne peut empêcher un pisciculteur d’élever ce type de poissons s’il le souhaite, il semble néanmoins nécessaire d’informer sur leurs performances réelles, et de ne pas encourager leur diffusion.

Performances d’élevage des souches Royale, Hongroise et Sauvage

Suite à la validation de la méthode de testage avec témoin interne en 2012, nous l’avons appliquée pour comparer trois populations de carpe en 2013. Les trois populations choisies étaient la carpe « ancestrale », la carpe « royale » et la carpe « hongroise ». Nous savons que les carpes du milieu naturel ne sont pas ou peu introgressées par des carpes d’élevage, et correspondent, sans doute, au plus près à la souche introduite en 1912. Pour ce qui est des carpes royales et hongroises, la différence est beaucoup moins nette. Elles peuvent de fait représenter une souche « moderne » d’élevage, mais aussi, comme on l’a vu lors des enquêtes, une simple description d’un type phénotypique. De plus, nous avons vu précédemment que nous n’arrivons pas à distinguer génétiquement la souche « royale » de la souche ancestrale. Pour sélectionner des géniteurs, compte tenu de la difficulté à les qualifier à l’avance, nous avons collecté des mâles chez trois pisciculteurs en Itasy, l’un revendiquant la possession de carpes « royales », les deux autres de carpes « hongroise ». Au total, 3 mâles «sauvages », 20 mâles « royale », et 20 mâles « hongrois » ont été croisés avec 15 femelles miroir, venant pour l’essentiel du Vakinkankaratra. Nous avons également un mâle écaillé homozygote *SSnn*, marqué individuellement en 2012 et génotypé comme homozygote *S*, qui a été croisé avec les mêmes femelles pour produire un lot de témoin interne, cette fois 100 % homozygote.

Au cours du prégrossissement, un acte de vandalisme ne nous a pas permis de disposer de tous les lots prévus, et l’analyse statistique manque de puissance. On observe une survie supérieure chez les descendants de sauvages par rapport aux descendants de « hongrois », mais cette différence n’est pas significative. Il n’y a presque aucun écart de croissance entre les lots, et cet écart n’est pas significatif. Sur la phase de croissance, nous avons pu obtenir des données sur les 15 lots prévus (50 miroirs et 50 témoins par lot). Les différences de survie sur la phase de grossissement sont faibles et non significatives. En revanche, la croissance des sauvages est plus faible, avec un poids en fin de grossissement inférieur de 11 % à celui des « hongroises » et de 16 % à celui des « royales », les « royales » et les « hongroises » n’étant pas significativement différentes. On peut observer que le témoin interne permet effectivement de bien éliminer la variabilité environnementale entre les étangs (Figure 15).

Pour les sauvages, la performance estimée est sujette à caution, car seuls trois mâles ont été utilisés, et il est donc possible que la moyenne des performances des descendants de ces trois mâles ne soit pas représentative de la moyenne de la population dans son ensemble. Par ailleurs, il convient de noter que les écarts mesurés ici sont établis en comparant des descendance de mâles différents croisés sur les mêmes femelles. La différence entre les lots de descendants, ne provenant que des mâles, ne représente de fait que la moitié des écarts que l’on observerait entre des croisements de souches pures. La croissance des sauvages est donc en réalité de 22 à 32 % plus faible que celle des souches « hongroise » et « royale ». Un autre élément à prendre en compte est que les performances observées peuvent être biaisées par des effets d’hétérosis (combinaisons entre souches). Cependant, les souches étant peu distantes génétiquement, il est probable que cet effet soit faible et que les performances reflètent bien la valeur génétique additive des souches.

Les analyses génétiques faites *a posteriori* montrent que le lot qualifié de « royale » est celui pour lequel on trouve une certaine introgression de souche hongroise (population 30, Figure 10) mais qu’il est majoritairement d’origine ancestrale, alors que le lot qualifié de « hongroise » (population 36, Figure 10) est exclusivement composé de carpe ancestrale. Ceci illustre bien la difficulté d’identification des « souches », et montre aussi que la souche ancestrale d’élevage est a priori plus performante que la souche ancestrale du milieu naturel. Il reste qu’il faudrait pouvoir effectuer une comparaison de performances avec une souche comportant plus de sang hongrois que la souche « royale » que nous avons testée, afin de voir si les géniteurs à forte proportion de sang hongrois produisent des descendance plus performantes.

Résultats/Recommandations

RELECTURE DE LA MÉTHODE

Ce travail permet de réinterroger de façon intéressante celui réalisé sur la description de l'innovation que constitue la maîtrise de la reproduction de la carpe en rizière. Force est de constater que la dynamique de sa diffusion reste compliquée à appréhender. Benz et Oswald (2010) envisageaient sur la région de Betafo (et plus précisément le fokotany de Andriamasoandro) une diffusion de cette pratique à large échelle à partir du milieu des années 1980 et qui aurait aussi bénéficié d'un cadre incitatif entre 85 et 87 par le projet (projet MAG/82/014). Il faut de plus signaler que Lemasson dès 1954 parle de paysans ayant réussi à maîtriser spontanément cette technique mais à une échelle très limitée, la plupart des pisciculteurs et des riziculteurs s'approvisionnant en alevins du milieu naturel offert par des pêcheurs. Une hypothèse soutenue était que la prolifération des tilapias de la fin des années 50 (Lemasson, 1960) aurait diminué la disponibilité d'alevins de carpe et aurait donc créé des conditions plus favorables pour l'adoption de cette nouvelle pratique de reproduction.

Si l'on retient l'hypothèse d'une faible introgression de la carpe malgache par la souche hongroise introduite à partir de 1979, l'un des facteurs explicatifs pourrait être ce niveau élevé d'écloseries paysannes qui constitue un frein à la diffusion de nouvelles souches car à moins d'avoir un système extrêmement bien organisé, le stock de géniteurs en place est forcément bien plus nombreux que le stock de nouveaux géniteurs de remplacement. Un autre facteur, non exclusif du précédent est que ces souches auraient été effectivement diffusées à large échelle plusieurs années après leur introduction et, en tout cas, après une diffusion à large échelle des pratiques de reproduction de la carpe chez les paysans. Il en découle vraisemblablement que le processus de diffusion dans sa globalité était concomitant de celui décrit sur Betafo et d'une ampleur bien plus importante que ce qui est habituellement décrit.

Cependant il convient de rappeler un certain nombre de limites à ces deux méthodes. Celles du diagnostic des systèmes d'élevage ont été évoquées précédemment. Sur le plan génétique, les analyses ne portent que sur un nombre assez limité de microsatellites (12) qui ne peuvent garantir une vision exhaustive de l'intégralité du génome, mais surtout manquent d'échantillons de référence pour ce qui est des souches ancestrale (1912) et royale (1959), ces souches n'étant aujourd'hui plus conservées en France. Ceci peut conduire à considérer comme une seule population « malgache » ce qui pourrait être un mélange de deux populations ancestrale et royale. Enfin, les gains supposés de la souche élevée par rapport à la souche sauvage reposent sur une comparaison non valide scientifiquement (le groupe sauvage n'était représenté que par 3 parents). De façon secondaire, les conséquences de critères ou de pratiques retenus par les éleveurs sur d'éventuelles améliorations de la valeur commerciale des carpes élevées ont peu été interrogées.

AUTRES RÉSULTATS

Les résultats des analyses génétiques montrent finalement une bonne diversité de l'ensemble des populations de carpes d'élevage, qui est comparable à la diversité des souches de référence européennes. Des points très localisés de perte de variabilité peuvent apparaître, mais ne sont absolument pas généralisés. Par ailleurs, il apparaît, de manière concordante avec les enquêtes, que les dénominations « royale » et

« hongroise » ont aujourd'hui peu de rapport avec l'origine génétique des souches, puisque nous n'avons pas pu différencier génétiquement les carpes royales, et que les « hongroises » sont au mieux des populations de carpes ancestrales malgaches introgressées à quelques dizaines de pourcents par des carpes hongroises. Il pourrait être intéressant de tester les performances d'animaux ayant une part significative de sang hongrois, mais cela nécessiterait un marquage préalable des individus et un génotypage pour identifier a priori et non a posteriori les géniteurs intéressants. On peut constater également que la très grande majorité des carpes élevées aujourd'hui à Madagascar dérive de l'introduction initiale de 1912, et que le taux de pénétration des souches hongroises est resté faible, probablement du fait de l'existence de nombreux producteurs d'alevins déjà au moment où elles ont été diffusées. Cependant, si ce nombre peut être un frein à la diffusion de souches potentiellement améliorées, il est aussi à l'évidence très positif pour maintenir une bonne diversité génétique des populations, ce qui est le cas à l'heure actuelle.

Nous avons pu aussi constater la présence de carpes « koï » dans certains élevages, ce qui montre une porosité des frontières. Ceci doit être pris en compte, car l'absence à ce jour de virus KHV sur Madagascar risque de n'être que temporaire si les introductions continuent. Enfin, l'absence de souches hongroises en milieu naturel montre de manière indirecte que les repeuplements de carpe sont peu efficaces, au moins pour permettre le développement d'animaux aptes à se reproduire ensuite dans le milieu naturel, probablement du fait de pressions de sélection très fortes, mises en évidence par ailleurs par l'apparition des carpes « néoécaillées ».

Un tout autre résultat de ce travail est qu'il a réussi à susciter un cadre de concertation entre les principaux acteurs institutionnels de la recherche et du développement. L'interrogation sur la génétique de la carpe d'élevage et sur le tilapia s'est montrée fédératrice et a permis une investigation à une échelle non explorée depuis des décennies. Les conclusions des analyses donnent un regard nouveau sur les réalités piscicoles décrites et apportent de précieuses informations pour l'élaboration des stratégies d'appui à ce secteur. Le prolongement de cette dynamique de concertation semble constituer un atout pour l'avenir de ce secteur.

QUELLES RECOMMANDATIONS POUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA PISCICULTURE ?

L'étude nous a montré de façon claire que le système actuel comprenant des centaines d'écloseries de tailles très diverses a de fait permis une bonne conservation de la variabilité génétique des carpes sur Madagascar, avec une population d'élevage essentiellement issue de l'introduction initiale de 1912. Nous avons par ailleurs observé très peu de signes de consanguinité au niveau des analyses génétiques. Cette homogénéité combinée à la bonne variabilité observée est en accord avec les pratiques observées, qui montrent d'une part l'existence d'un grand nombre d'écloseries, et d'autre part, à l'échelle de quelques années, des pratiques d'échanges de géniteurs assez systématiques, qui sont de nature à homogénéiser les populations et à permettre une conservation de la variabilité. L'efficacité et la résilience permises par ce système multi-acteurs doivent être reconnues, et les améliorations à apporter doivent se situer dans ce cadre préexistant pour pouvoir fonctionner. En particulier, pour limiter les quelques points de consanguinité observés, promouvoir des échanges de géniteurs plus systématiques à l'échelle locale pourrait être une action efficace. Pour protéger cette ressource génétique qu'est la carpe malgache d'une menace bien réelle qui est le virus KHV (bien plus grave qu'une supposée consanguinité qui n'existe pas dans les faits), il est aujourd'hui essentiel d'avoir aussi un contrôle beaucoup plus strict des importations, y compris sur le marché limité de l'ornement.

Les recommandations en matière de production d'alevins de tilapia

Une grande diversité de méthodes pour la production d'alevins de tilapia pourrait être proposée, mais le choix devra tenir compte de considérations techniques : la technique doit pouvoir facilement être reproduite, ce qui renvoie aussi à des éléments socio-économiques.

Bien que très répandus, les élevages en classes d'âges mélangées d'*O. niloticus* dans un étang unique pratiqués par le type 1, n'ont pas été caractérisés au cours de cette étude. Il est donc difficile de se positionner. Théoriquement, ces systèmes à un seul étang peuvent constituer un réservoir de variabilité génétique, ou, au contraire, un stock de poissons dégénérés si les flux de poissons entre fermes ou avec le milieu naturel ne sont pas suffisants. La pratique la plus fréquente est que le pisciculteur a tendance à consommer et vendre ses plus gros poissons et à ré-empoissonner le cycle suivant par les plus petits d'âge inconnu.

Pour certains auteurs (Brummett et Ponzoni, 2004) cette pratique encourage la sélection de poissons, disposant d'une faible croissance et doit être critiquée. Pour certains, ceci justifierait les introductions de souches de tilapias sélectionnées, mais il convient, cependant, de s'interroger sur les qualités des populations locales qui ne sont pas nécessairement mauvaises. Un certain amalgame est parfois entretenu car, le plus souvent, on ne différencie pas l'effet de l'âge - les alevins de même poids n'ayant pas du tout le même âge dans les différents systèmes - et l'effet d'une éventuelle différence de performances liée à la qualité génétique des souches. Les essais d'élevage conduits en cages dans le canal des Pangalanes (ARDA, 2006) ont montré que les populations utilisées avaient un potentiel de croissance. Il paraît donc utile de procéder à la caractérisation de la population ou des populations entretenues par l'ensemble de ces **éleveurs**.

conserver que les individus les plus performants pour les critères affectés par cette consanguinité en veillant toutefois à ne pas induire de perte de variabilité génétique, ou encore, si les structures d'élevage le permettent, d'entretenir 2 sous-populations indépendamment que l'on « croise » à chaque génération. Pratiquement, dans le cas du tilapia, il faut veiller à ce que l'effectif de géniteurs mis en reproduction, soit important avec un sexe ratio correct et, d'autre part, éliminer les poissons présentant des conformations anormales. Une récolte précoce des alevins destinés à être les futurs géniteurs limite la mise en place des rapports de dominance entre les géniteurs qui interdisent à une portion des géniteurs de participer à la reproduction.

Ces recommandations peuvent aussi être appliquées à un stock fermé c'est-à-dire un stock sur lequel on ne souhaite plus réaliser de nouvelles introductions. Le risque majeur affectant une gestion de ce type reste ici encore la dérive génétique entraînant une perte de variabilité génétique et une consanguinité. En théorie, cette perte de variabilité génétique peut être limitée par une gestion rationnelle des stocks en évitant tout goulot d'étranglement (faibles effectifs de géniteurs à un moment donné de la gestion). La perte de variabilité génétique

entre deux générations impliquant 40 géniteurs choisis dans de familles différentes et participant tous à la reproduction est de l'ordre de 1 %.

Pour la gestion des stocks ouverts, lorsque le pisciculteur est favorable à de nouvelles introductions, il est facile d'envisager une limitation de ces risques par des introductions régulières à partir de stocks naturels. Il a été démontré qu'un effectif relativement restreint d'individus, une dizaine, issus de la population naturelle et introduits dans la population captive (quelle qu'en soit la taille) suffisait à assurer une relative homogénéité génétique entre la population d'élevage et celle sauvage. Pratiquement, les techniques recommandées pour la truite (Chevassus, 1989), s'appliquent à la situation de ces élevages : pratiquer cette introduction en 2 temps, premièrement, croisement entre femelles domestiques et mâles sauvages aboutissant à la constitution d'un lot hybride ; dans un deuxième temps, intégration d'une partie de ces individus (mâles et femelles) hybrides dans le stock de géniteurs de la population domestique. Cette opération, complexe mais sûre, peut n'être réalisée que de manière espacée, la population étant entre-temps gérée comme une population fermée.

Tableau 2 : Performance de quelques techniques de production d'alevins d'*Oreochromis niloticus*.

Techniques utilisées	Durée du cycle de reproduction (jours)	Nombre d'alevins	Auteur
al./m²/mois	+/- 300	0.46 à 1.23	Liétar (1984)
Classes d'âge séparées (étangs de reproduction...)	90	45	Lazard <i>et al.</i> (1990)
	40	218 à 532	Mélard <i>et al.</i> (1994), Mahaman <i>et al.</i> (1997)

Les systèmes d'élevages des types 2 et 3 reposent sur une séparation de la phase de reproduction des phases de (pré-)grossissement. Ceci suppose de disposer d'au moins un deuxième étang ou d'acheter des tilapias pré grossis auprès d'autres producteurs. Ici aussi, la prise en compte des moyens et attentes du pisciculteur reste capitale. Le tableau 2 présente à titre indicatif, les performances de quelques méthodes utilisées dans différents contextes.

Quelque soit la méthode retenue, une gestion appropriée des stocks de géniteurs reste indispensable pour la conservation de la variabilité génétique des alevins produits. L'augmentation de consanguinité et la perte de la variabilité génétique se traduisent généralement par une baisse notable des performances des individus. Pour pallier à ce risque à l'échelle d'une ferme isolée, les principales mesures préconisées consistent à augmenter l'effectif efficace de géniteurs : ne

En ayant montré la bonne performance des souches d'élevage actuelle, nous pouvons affirmer qu'il n'est aucunement indispensable aujourd'hui de chercher à tout prix à introduire des souches plus « performantes ». L'expérience de la souche hongroise montre une pénétration relativement faible (sans être du tout négligeable). Elle montre surtout l'incapacité du système à conserver une traçabilité assurant la pureté des souches, puisqu'aucun des élevages échantillonnés ne possédait de carpe hongroise pure, mais au mieux des hybrides possédant une moitié de sang hongrois. Si le système est résilient, ce qui fait sa force, il est donc par ailleurs difficile de penser pouvoir mettre en place un système de sélection - diffusion centralisée de poissons « améliorés ». Il pourrait cependant être intéressant d'identifier des géniteurs ayant une proportion sensible de sang hongrois afin de tester leurs performances par rapport à la souche « malgache », avec les méthodes de testage que nous avons adaptées au contexte local, afin de voir s'il serait intéressant ou non de chercher à augmenter la proportion d'origine hongroise dans les populations d'élevage actuelles.

Au final, on se retrouve dans la situation curieuse où la souche prétendue, en fait, n'a pas de réalité génétique et où seule l'apparence du poisson donnée par des points de forme ou de type d'écaillure donne ses qualités commerciales à la « souche ». Il est intéressant de noter que des pisciculteurs qui pensaient avoir des hongroises ont des royales et vice versa, des carpes qualifiées de royales ont davantage d'introggression de la souche hongroise. Ces caractères de forme et d'écaillure sont néanmoins observables et héréditaires,

et relativement peu influencés par le milieu. Il est aussi à rappeler que les mêmes noms de variétés ne désignent pas les mêmes phénotypes selon les régions et les types de pisciculteurs²⁵. Ce travail souligne qu'une promotion d'une souche prétendue meilleure, est de nature à stimuler des réactions déjà rencontrées chez des acteurs : la recherche des plus belles carpes, la promotion de belles carpes (qui deviennent celles du pisciculteur). Ceci induit une déviation entre une souche dont les qualités seraient garanties et qui nécessite des soins particuliers pour être entretenue et un dérapage vers la vente de géniteurs dont l'unique qualité serait une apparence attrayante sans aucune garantie sur la rigueur de la gestion génétique sous-jacente. L'irruption des Koï est une autre illustration de cette recherche de « belles variétés » et montre bien que cette motivation ne s'accompagne pas d'une amélioration des conditions de production et de sélection des géniteurs. La notion de belle carpe, pour être pleinement efficace, doit être partagée au sein d'une communauté disposant d'un réseau suffisamment vaste d'écloseries interconnectées.

Il est malgré tout probablement possible de produire des souches améliorées, mais il faudra pour cela cibler des caractères phénotypiques simples, tels que quantité d'écaillés, couleur ou forme, et mettre en place ces programmes de façon participative dans des réseaux d'éleveurs locaux ayant un accord sur des objectifs de qualité « visuelle » du poisson, qui peuvent être demandés par le marché. Ceci est bien montré par l'exemple des carpes « cuir » qui continuent d'être élevées malgré leurs défauts de survie et de croissance. Par contre, dans ce type de conditions, vouloir améliorer des caractères quantitatifs très influencés par le milieu comme croissance et survie, serait à l'évidence beaucoup plus difficile et d'un intérêt commercial peut-être moins évident.

Pour ce qui est des carpes « cuirs », on constate qu'il s'agit d'un phénotype recherché, mais nous avons montré que les défauts de croissance et de survie connus dans les systèmes d'élevage européens existaient aussi à Madagascar. Un objectif de sélection intéressant, à tester dans un réseau participatif comme évoqué plus haut, pourrait être de sélectionner des carpes miroirs présentant le moins d'écaillés possibles, tout en évitant le gène « cuir » qui possède des effets pléiotropiques²⁶ néfastes sur la survie et la croissance. Une telle souche pourrait être bien adaptée au marché malgache.

Enfin, c'est plus un constat qu'une recommandation, l'absence totale de sang « hongrois » dans les carpes du milieu naturel, montre que les repeuplements tels qu'ils ont été pratiqués, ont peu d'impact de long terme, même si l'on ne peut exclure un effet transitoire de courte durée. Cette pratique mérite, à tout le moins, d'être interrogée au regard de son coût. Cette inefficacité des repeuplements n'est pas une spécificité malgache, l'efficacité du repeuplement des milieux aquatiques est largement contestée pour de multiples raisons (Araki et Schmid, 2010).

Comme dit précédemment, toute approche ne tenant pas compte de la diversité et de l'étendue réelle du réseau des producteurs d'alevins de carpe court le risque de ne pas réussir, si elle ne prend pas en compte les dynamiques effectivement en place. En montrant que les dynamiques en marge des PPA conservent un rôle déterminant dans l'entretien de la génétique des populations des carpes élevées, cette étude rappelle qu'il ne paraît pas raisonnable de concevoir des programmes d'amélioration excluant une partie des acteurs. Pour avoir des chances d'atteindre ses objectifs, tout projet devra tenir compte de la globalité et du dynamisme de ce secteur qui constitue l'un des résultats tout à fait majeur de cette étude. Ceci n'était pas le cas des approches précédentes de l'amélioration de la génétique de la carpe d'élevage se restreignant aux PPA ou aux écloseries paysannes. Au vu de la structure de la population, un service centralisé n'a pas les ressorts

²⁵ Les résultats d'un quiz indiquaient un rattachement aléatoire des individus aux grandes souches censées être présentes dans les élevages de Madagascar. Malheureusement la suite du travail a remis en cause les critères d'identification génétiques des souches dans ce test. Nous pensons cependant que les résultats seraient similaires avec les bons critères.

²⁶ Se dit lorsqu'un même gène a des effets sur plusieurs caractères.

pour entretenir cette diversité. De nouvelles modalités sont à trouver pour permettre la participation de l'ensemble des acteurs en fonction de leurs réseaux respectifs, des différents systèmes d'élevage mis en œuvre, des localisations des circuits d'échange. Force est de constater que ce genre d'approche ne fait pas partie des habitudes actuelles de travail des institutions en charge du développement de la pisciculture.

De façon plus technique, en termes d'entretien de la variabilité dans les élevages, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- Pour des élevages détenant un nombre important de géniteurs, l'entretien de la diversité génétique peut se faire par l'utilisation de géniteurs différents pour la reproduction, ceci impose cependant un suivi strict des descendance des différents géniteurs ;
- A partir d'un très faible nombre de géniteurs, il est impossible d'entretenir une diversité génétique suffisante, il est alors recommandé de favoriser les échanges de géniteurs entre les pisciculteurs. L'organisation de réseaux stables seraient un plus car ils permettraient de garantir une variabilité du fait de l'implication connue et systématique d'un nombre de géniteurs élevé. Des organisations sont possibles à mettre en place à l'échelle d'un bassin versant, d'un fokontany, d'un district, etc. ;
- De toute façon, il faut favoriser la multiplicité des producteurs d'alevins puisqu'elle permet de maintenir la variabilité et elle permet de plus, de faciliter l'accès des grossisseurs aux alevins. Elle rend aussi plus facile le renouvellement des géniteurs par ces derniers ;
- L'échange de géniteurs à des échelles variées est également à encourager. Ici, elle est peut-être d'abord tout simplement à reconnaître au vu de la forte intensité des échanges découverts.

Conclusion

Cette étude constitue un bon exemple d'enrichissement réciproque d'un objet d'étude commun, l'évolution de la pisciculture de la carpe à Madagascar, par deux approches disciplinaires très différentes. L'approche génétique qui se centre sur la dynamique d'évolution de la population de la carpe d'élevage, et le diagnostic des systèmes d'élevage de la carpe qui se focalise sur leur évolution, s'enrichissent ici mutuellement. L'approche génétique donne des clés quantitatives à la description des pratiques et des trajectoires des pisciculteurs qui constituent l'un des éléments essentiels de la caractérisation des systèmes d'élevage. Sur le processus de diffusion, elle souligne une ampleur bien plus importante que celle constatée mais qui aurait été extrêmement difficile à quantifier à travers des entretiens visant à recueillir l'historique des pisciculteurs. L'approche génétique, en retour, a pu bénéficier de la description de nombreuses pratiques d'échange de poissons permettant de contextualiser les résultats de l'analyse globale.

Grâce à ce projet, l'étude menée marque donc une étape importante d'actualisation des questions du développement piscicole en général et de la carpe en particulier. Le système planifié de diffusion d'une « meilleure » souche par un réseau de PPA, n'a pas permis d'entretenir des souches de hongroises ou royales pures, et les PPA ne proposent pas de poissons différents du stock disponible dans d'autres élevages. Cependant, il faut aussi reconnaître que ce système a malgré tout fonctionné, d'une manière différente de celle qui était attendue. En ce sens, on retrouve tout de même des gènes hongrois dans la population élevée. Il y a eu vraisemblablement introduction d'une plus grande variabilité suite à l'introduction des souches hongroises (et peut-être royales). Au final, le système a donc permis de maintenir une variabilité suffisante. Le système en place, non formalisé, incluant un grand nombre de petites écloseries a abouti à une souche

élevée avec une introgression de « sang » royal et hongrois. La situation de la carpe à Madagascar est originale en ce sens que les qualités génétiques des carpes élevées reposent sur une contribution importante des petits éleveurs à l'entretien de la variabilité des espèces élevées. S'ils veulent participer à la promotion de la pisciculture de ce poisson, les politiques et projet de développement devront intégrer cette réalité.

Références bibliographiques

- Andriambelomanana F., 2012 : *Etude biométrique et génétique de trois populations de Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758) *dans la région de Vakinankaratra-Madagascar*. Mémoire de DEA. Université d'Antananarivo-Madagascar, 80p.
- Andrianajoana C., Kasprzyk Z.W. et Dasyva G., 1992 : *Pêches et aquaculture à Madagascar : bilan diagnostic*, Antananarivo. FAO, 153 p.
- Araki H., Schmid C., 2010 : Is hatchery stocking a help or harm? Evidence, limitations and future directions in ecological and genetic surveys. *Aquaculture* 308 (2010) S2-S11.
- ARDA, 2006 : *Projet pilote d'élevage du tilapia Oreochromis niloticus en cage flottante dans le Canal des Pangalanes à Madagascar*. Rapport technique final - ARDA, La Réunion, 29 p.
- Arrignon J., 1963 : *Hydrobiologie appliquée et pisciculture. Publications du Service des Eaux et Forêts - Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire*, Alger, Imprimeries la Thipo-Lytho et Carbonnel réunies, 101 p.
- Balon E., 1995 : Origin and domestication of the wild carp, *Cyprinus carpio*: from Roman gourmets to the swimming flowers. *Aquaculture*, 129(1-4), pp.3-48. Available at : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/004484869400227F>.
- Bentz B., & Oswald M., 2010 : *Respective roles of national institutions and farmers groups in the implementation of an innovation enabling smallholders to reproduce carp inside their rice fields in Betafo* (Madagascar). Colloque IDSA, 28 juin-1^{er} juillet 2010, Montpellier, France. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00522795/fr/>
- Bont A.F. De, 1950 : *Culture des Tilapia*. Comptes rendus de la conférence piscicole anglo-belge. Elisabethville 1949. Ministère des Colonies, Bruxelles 1950, pp. 322-334.
- Bouayad-Agha M., Clément J., & Guillaume J., 1995 : *Gestion sociale de l'eau sur les réseaux d'irrigation traditionnels - Région de Betafo - Vakinankaratra - Madagascar*, Mémoire de fin d'étude, Montpellier, ENS/CNEARC, 165 p.
- Brummett R. E. et R. Ponzoni, 2004 : Genetic quality of domesticated African tilapia populations. *Journal of Fish Biology*, 65, 315-315.
- Chevassus B., 1989 : Aspects génétiques de la constitution de population d'élevage destinées au repeuplement. *Bull. Fr Pêche Piscic.* (1989) 314 : 146-168. www.kmae-journal.org/articles/kmae/pdf/1989/03/kmae198931407.pdf
- Dural D., 1994 : *Le développement de la (rizi)pisciculture en milieu rural sur les hautes plateaux malgaches - Mythe ou réalité ?*. Montpellier, CNEARC, 59 p.
- EPP/PADR, 2006 : PRDR - *Programme Régional de Développement Durable - Région du Vakinankaratra*. Antananarivo, Primature, 138 p.
- FAO, 2004 : *Fisheries Aquaculture extension in sub-Saharan Africa*. FAO Fisheries Circular N° 1002, Department, Inland Water Resources and Aquaculture Service, FAO, Rome, p.55.
- Guyomard R., Launay A. et Vandeputte M., 2008 : *Analyse de la variabilité et de la structure génétique de populations de carpe commune de Madagascar et du Cameroun*. Etude APDRA-F-INRA, 2007-2008, APDRA-F, Massy, 13 p.
- Haenen O.L.M. et al., 2004 : The emergence of koi herpesvirus and its significance to European aquaculture. *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists*, 24, pp.293-307.

- Hanitriony M.V., 1999 : *Contribution à l'étude de la performance des carpes hongroises*. Antananarivo : Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- Kestemont P., Micha, J.C. & Falter U., 1989 : *Les Méthodes de Production d'Alevins de Tilapia Nilotica*, ADCP/REP/89/46, Département des pêches, Archives de la FAO, 132.p. <http://www.fao.org/docrep/t8655f/t8655f00.htm#Contents>
- Kiener A., 1956 : Kiener, Elevage du tilapia à Madagascar. *Bull Madagascar*, (124), pp.762-784.
- Kiener A., 1958 : Intérêt et perspectives de la pisciculture de la carpe à Madagascar. *Bull Madagascar*, (147), pp. 693-702.
- Kiener A. & Therezien Y., 1958 : Développement et orientation de la pisciculture à Madagascar. *Bull. Fr. Piscic.* (1958) 191 pp. 75-85. <http://dx.doi.org/10.1051/kmae:1958004>
- Kiener A., 1963 : Poissons, pêche et pisciculture à Madagascar. *Publication n° 24 du Centre technique forestier tropical*, 198 p. + annexes. Nogent sur Marne, France : Editions du CTFT.
- Kiriloff M., 1989 : *Gestion des stations piscicoles*, Antananarivo, FAO Project Reports, 49 p.
- Kirpichnikov V.S., 1981 : *Genetic bases of fish selection*, Berlin: Springer-Verlag.
- Kirpichnikov V.S., 1999 : *Genetics and breeding of common carp*. INRA Editions, Paris, p.97.
- Kollros J., 2004 : *Etude de la place de la (rizi) Pisciculture dans une petite région du Vakinankaratra*. Mémoire de fin d'étude Istom, Cergy, Istom, 85 p.
- Lemasson L., 1954 : Pisciculture en rizière à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 35, pp. 42-43.
- Landais E., Lhoste P. et Milleville P., 1987 : Points de vue sur la zootechnie et les systèmes d'élevage tropicaux. *Cah. Sci. Hum.* 23 (3-4) 1987 : 421-437.
- Landais E., 1992 : Tendances actuelles des recherches sur les systèmes d'élevage : exemples de travaux du département « Systèmes Agraires et Développement » de l'INRA ». *Cahiers Agricultures* n° 1 : 55-65.
- Landais E., 1994 : *Système d'élevage - D'une intuition holiste à une méthode de recherche, le cheminement d'un concept*. Chapitre d'ouvrage p 15- 49, dans « Dynamique des systèmes agraires - A la croisée des parcours – Pasteurs, éleveurs, cultivateurs. »
- Lardinois P.F., 1992 : *Développement d'une nouvelle approche de développement piscicole - expérience de la région-pilote du Vakinankaratra*. Rapport final d'activités, Antsirabe, FAO Project Reports, 16 p.
- Lazard J., Morissens P., Parrel, P., Aglinglo C., Ali I. et Roche P., 1990 : *Méthodes artisanales d'aquaculture du Tilapia en Afrique*. CTFT. Départ. du CIRAD, Montpellier, 82 p.
- Lemasson L., 1957 : Chronique piscicole : réflexions sur la pêche et la pisciculture à Madagascar, pp. 57-61. *Bois et Forêts des Tropiques*, 52, pp. 57-61.
- Lemasson L., 1960 : Nouvelles réflexions sur la pêche et la pisciculture à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 69, pp. 54-57.
- Lemasson L. & Bard J., 1964 : Bilan de la pisciculture dans neuf états d'Afrique Tropicale, *Notes et documents sur la pêche et la pisciculture*, Décembre 1964 Série DG22. Centre Technique Forestier, Paris, 32.p.
- Liétar C., 1984 : Rentabilité d'une ferme piscicole commerciale en République Centrafricaine. FAO Document technique n° 18. <http://www.fao.org/docrep/field/003/AB625F/AB625F00.htm>
- Mahaman A., Mikolasek O., Lazard J. et Baroiller J.F., 1997 : *Intensification of nile tilapia (Oreochromis niloticus) fry production in the African Sahel - Example of Niger*. Fitzsimons, K. (Ed.), Fourth International Symposium on Tilapia in Aquaculture, Orlando, USA.

Méland C., Desprez D., et Philippart JC., 1994 : Le contrôle du sexe chez les tilapias : bilan et perspectives de recherche à la station aquacole de Tihange. *Cahiers d'Ethologie*, 13 (4) : 421-434.

Ministère de l'Élevage et des Ressources Halieutiques de Madagascar, 1992 : *Manuel pour le développement de la pisciculture à Madagascar*. Document technique n°4, Projet MAG/88/005, Antsirabe, FAO, 223 p. <http://www.fao.org/3/contents/688b9039-0eeb-5d1d-a4f3-8c2e4fdafbd4/AB847F00.htm#TOC>

Moreau J., 1980 : Le lac Alaotra à Madagascar, 50 ans d'aménagement des pêches. Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol., 13, 171-179. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes /cahiers/hydrobio/00205.pdf

Moreau J., Arrignon J. & Jubb R.A., 1988 : Les introductions d'espèces étrangères dans les eaux continentales africaines : intérêt et limites. In C. Lévêque & M. N. Bruton, eds. *Biologie et écologie des poissons d'eau douce africains*. Paris, France, pp. 329-425.

Moreau J., 1988 : The Status of Wild and Cultured Tilapia Genetic Resources in Various Countries, Madagascar. In R.S.V. Pullin, ed. *Tilapia Genetic Resources for Aquaculture*. Proceedings of the Workshop on Tilapia Genetic Resources for Aquaculture 23-24. March 1987 Bangkok, Thailand. ICLARM Conference Proceedings 16. Philippines.

Pichon J., 1986: *Réalisation d'un projet de station piscicole à Andepombe. Madagascar*, Rome, FAO, 67 p.

Pierre Bernard A., Ramboarizo R., Randrianarison L. et Rondro-Harisoa L., 2007 : *Les implications structurelles de la libéralisation sur l'agriculture et le développement rural* - Première phase : synthèse nationale. Madagascar, Banque Mondiale / Coopération Française / APB consulting, 226 p.

Raison-Jourde F. et Randrianja S., 2002 : *La nation malgache au défi de l'ethnicité*. Editions Karthala. Paris, 448 p.

Rakotoambinina S., 1989 : *Étude de faisabilité socio-technico-économique de la pisciculture en cage au Lac Itasy*. Mémoire de fin d'Étude UFSH ; Projet PNUD/FAO/MAG 84002 ; Université de Toliara-Madagascar, 145 p.

Rakotoambinina S., Desprez D., David G., Bosc P., Le Roux Y., 2009 : Caractérisation des environnements écologiques et socio-économiques de la production piscicole continentale à Madagascar. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, n° 248, p. 471-488.

Rakotoambinina S., 2011 : *Contexte socio-économique de la production halieutique et perspective de développement de la pisciculture continentale à Madagascar* : Le cas du lac Itasy. Thèse de Doctorat à l'IHSM - Université de Toliara, 157 p.

Ranaivoarisoana D.J.B., 1992 : *Les producteurs privés d'alevins en milieu rural dans la région pilote du Vakinankaratra (Madagascar)*, Antsirabe. Madagascar, Rome, FAO, 72 p.

Refaliarison J., 2005 : Vue générale du secteur aquacole national - Madagascar. Département des pêches et de l'aquaculture de la FAO. Rome. Mis à jour 1 february 2005. http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_Madagascar/fr consulté le 9 /12/2014.

Rohner N. et al., 2009 : Duplication of fgfr1 permits Fgf signaling to serve as a target for selection during domestication. *Current biology*, 19(19), pp.1642-7. Available at : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19733072> [Accessed november 17, 2014].

Teriipaia A., Odru M. et Oswald M., 2013 : *Etat des lieux des producteurs d'alevins de carpe à Madagascar, une approche par le système d'élevage*. Document présenté à l'atelier au FIAP de l'APDRA le 22/2/2013, 13 p. APDRA, Massy.

Therezien Y., 1960 : L'introduction de poissons d'eau douce à Madagascar, leur influence sur la modification du biotope. *Bull. Fr Pêche Piscic.* (1960) 15 : 61-199. <http://www.kmae-journal.org> or <http://dx.doi.org/10.1051/kmae:1960001>

Van den Berg F. et Janssen J., 1994 : *Manuel pour le développement de la pisciculture a Madagascar. v. 2 : Marketing et gestion financière d'une micro-entreprise de production d'alevins en milieu rural*, Antananarivo, FAO, 88 p.

Vandeputte M. et al., 2002 : Comparison of growth performances of three French strains of common carp (*Cyprinus carpio*) using hemi-isogenic scaly carp as internal control. *Aquaculture*, 205 (1-2), pp. 19-36. Available at : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0044848601006615>.

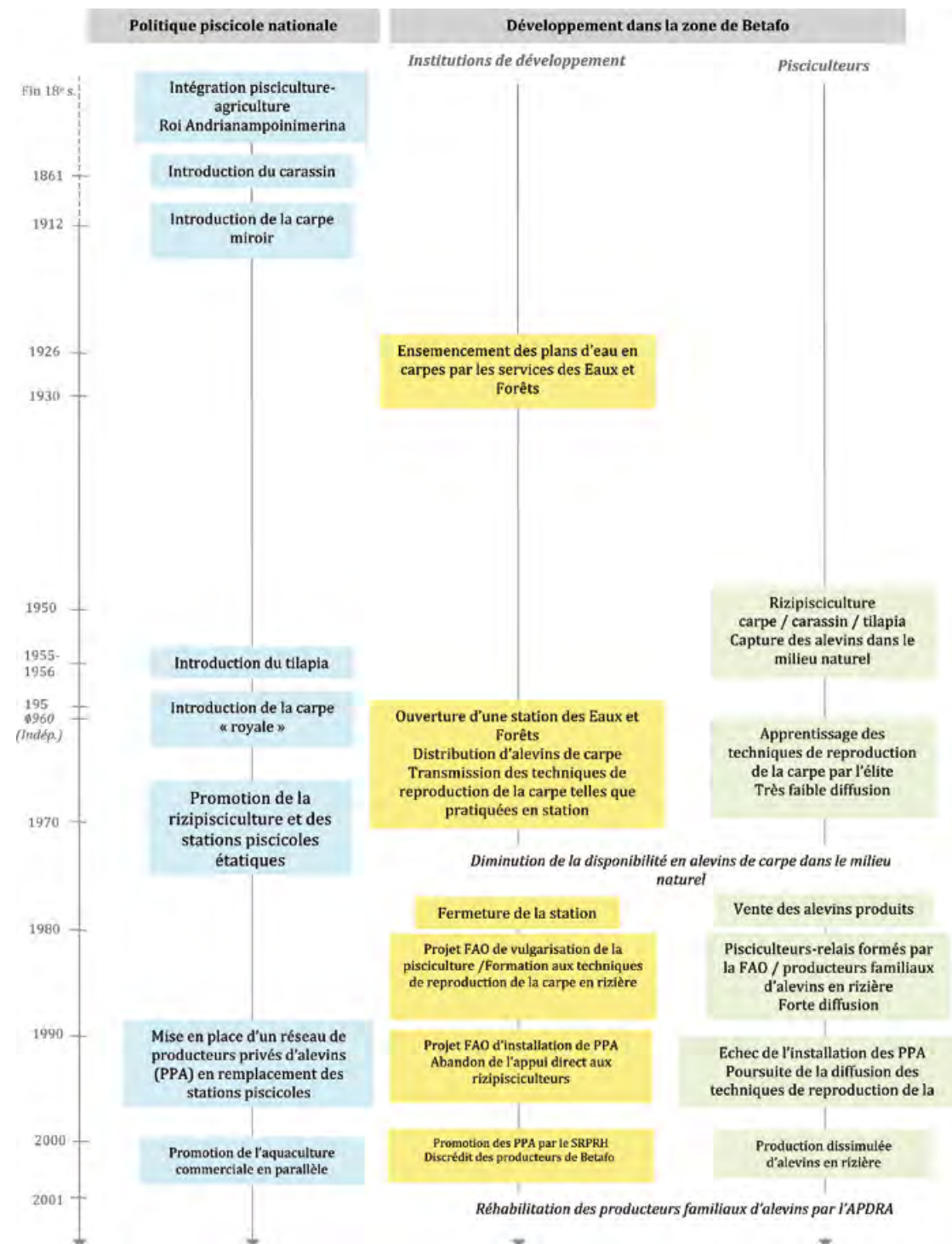


Figure 1 : Chronogramme synoptique de la diffusion de l'innovation

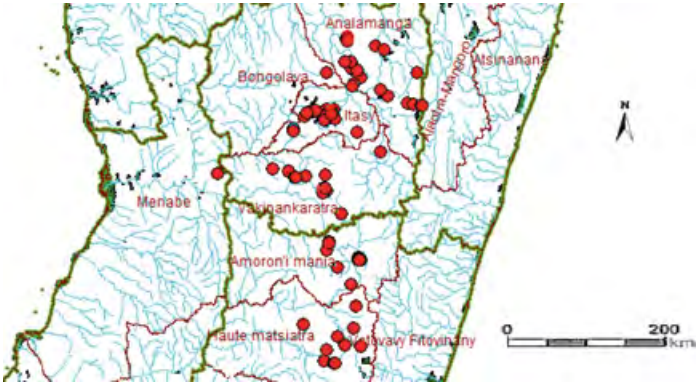


Figure 2 : localisation des producteurs de carpes enquêtés
(Seules figurent les exploitations dont les coordonnées GPS ont pu être vérifiées)



(A) Miroir 1912 (carpe du lac Alaotra)



(B) « Royale » 1959



Figure 3 : Aire de répartition de la carpe à Madagascar en 1958. Reproduit de Kiener(1958)



(C) Hongroise miroir SZ215



(D) Hongroise écaillée SZ33

Figure 4 : Types de carpes introduits à Madagascar

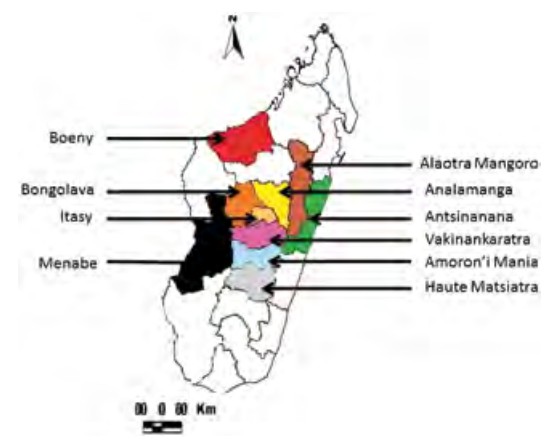


Figure 5 : Les 10 régions de l'île ayant fait l'objet de prélèvements génétiques de carpes communes

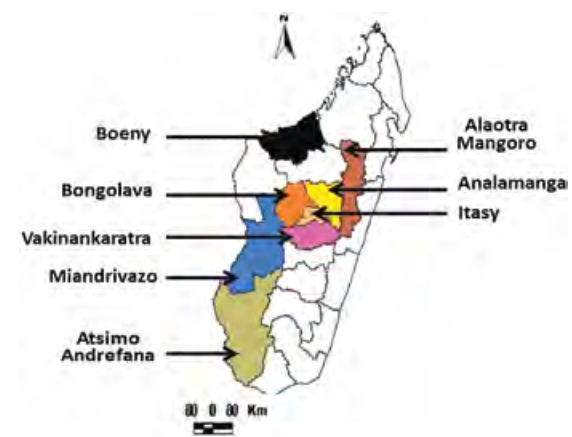


Figure 6 : Carte représentant les différents sites de prélèvements des échantillons de tilapia



Figure 7 : Prélèvement de nageoires de tilapia

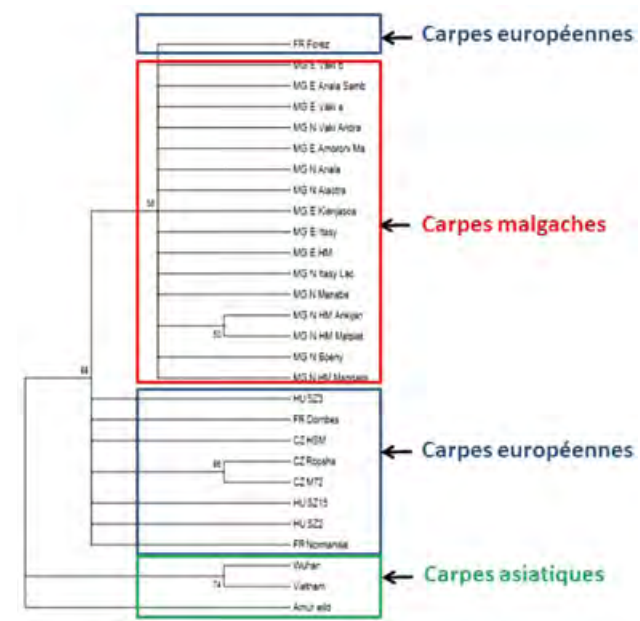


Figure 8 : Phylogénie (Neighbor-joining) de l'espèce *Cyprinus carpio* de Madagascar, d'Europe et d'Asie

Figure 9 : Analyse factorielle des correspondances des populations de carpes malgaches, françaises et hongroises basée sur 10 marqueurs

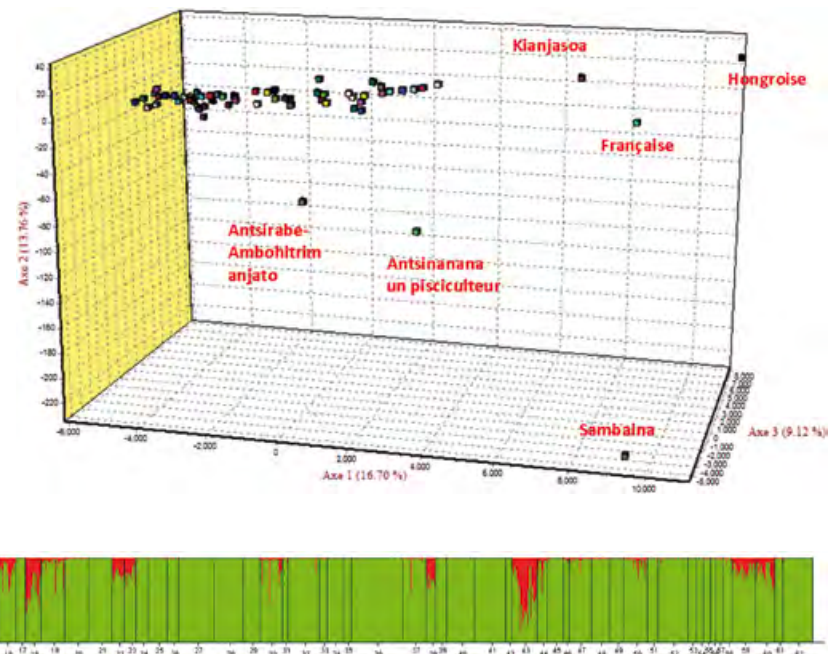


Figure 10 : Assignment des carpes malgaches à deux populations. Encadré rouge : populations de référence française (1) et hongroises (2, 3, 4). Encadré vert : populations malgaches. Les populations malgaches prélevées dans le milieu naturel sont toutes majoritairement issues de la même population (barres vertes), et une introgression de carpes hongroises (en rouge) significative est visible dans 19 populations (toutes d'élevage) sur 57. Les populations du milieu naturel malgache (5, 15, 17, 27, 28, 29, 41, 42, 62) sont toutes composées à plus de 98 % de la population ancestrale malgache (barres vertes)

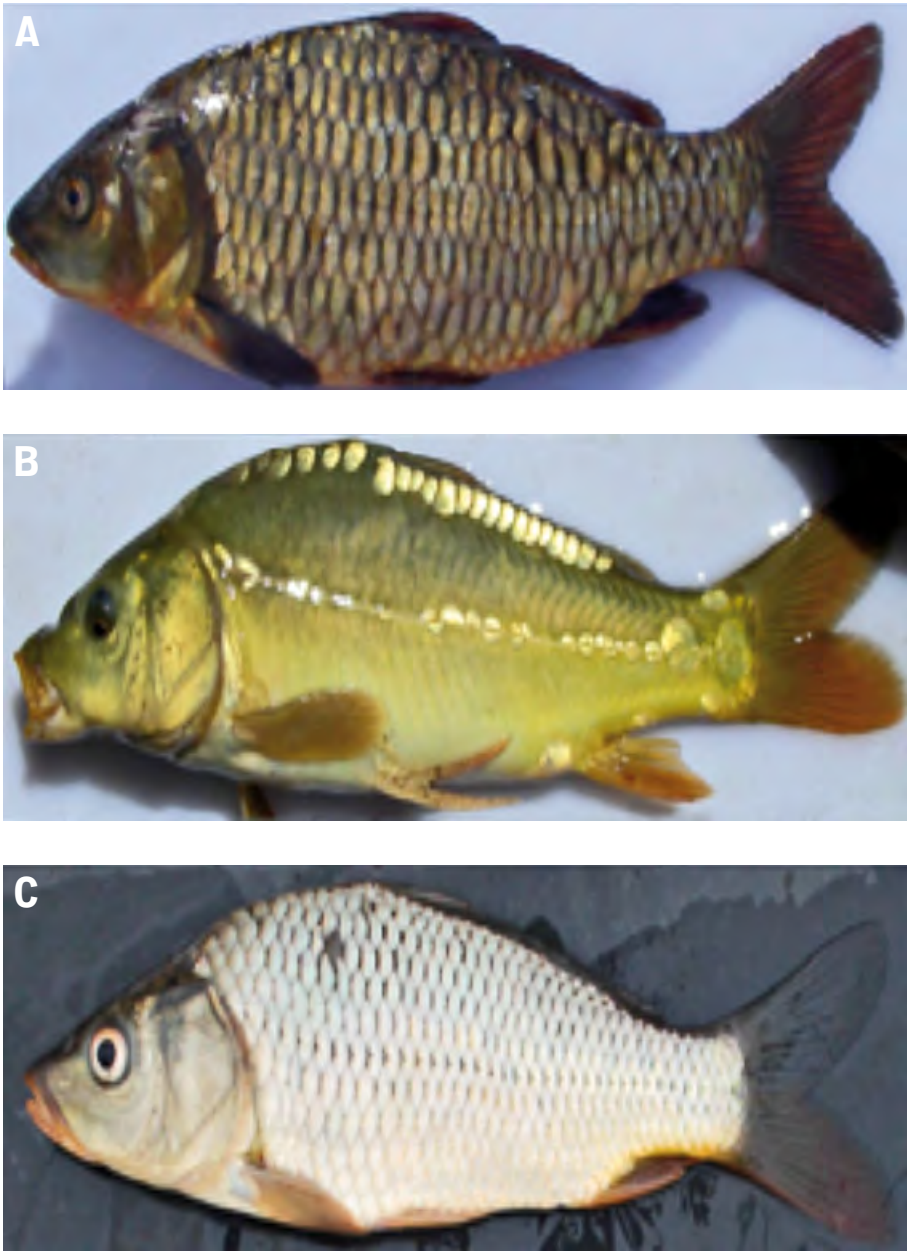


Figure 11 : Types d'écaillure rencontrés chez la carpe à Madagascar
(A) « Néo-écaillée » du milieu naturel ; (B) miroir ; (C) Ecaillée d'élevage

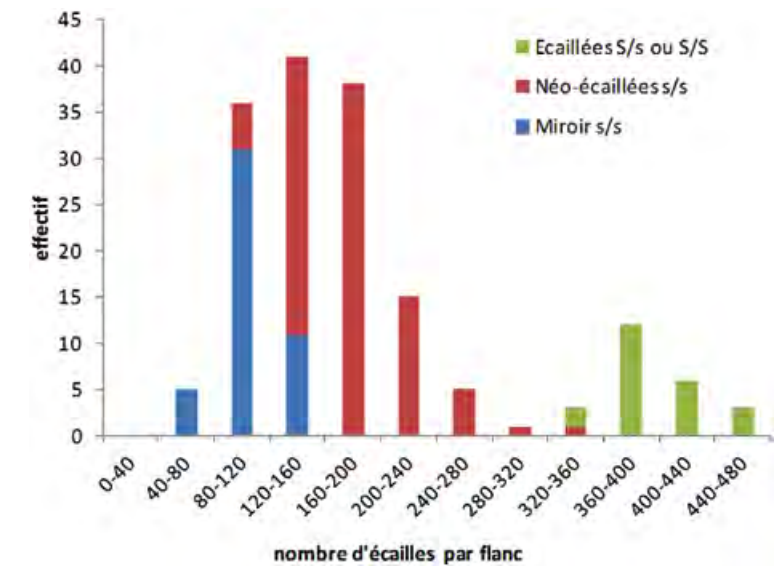


Figure 12 : Distribution du nombre d'écailles chez 165 carpes malgaches de différents phénotypes (écaillées, néo-écaillées et miroir) et génotypes (s/s, S/s et S/S)

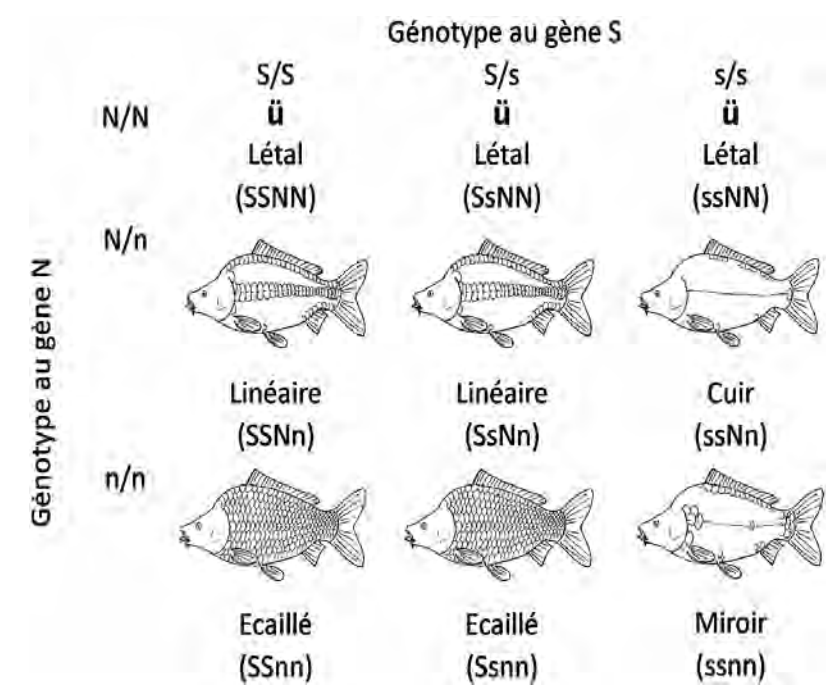


Figure 13 : Génotypes et phénotypes pour les différentes combinaisons alléliques des gènes d'écaillure de la carpe, Nu (N/n) et Scaly (S/s) - d'après Kirpichnikov (1981)

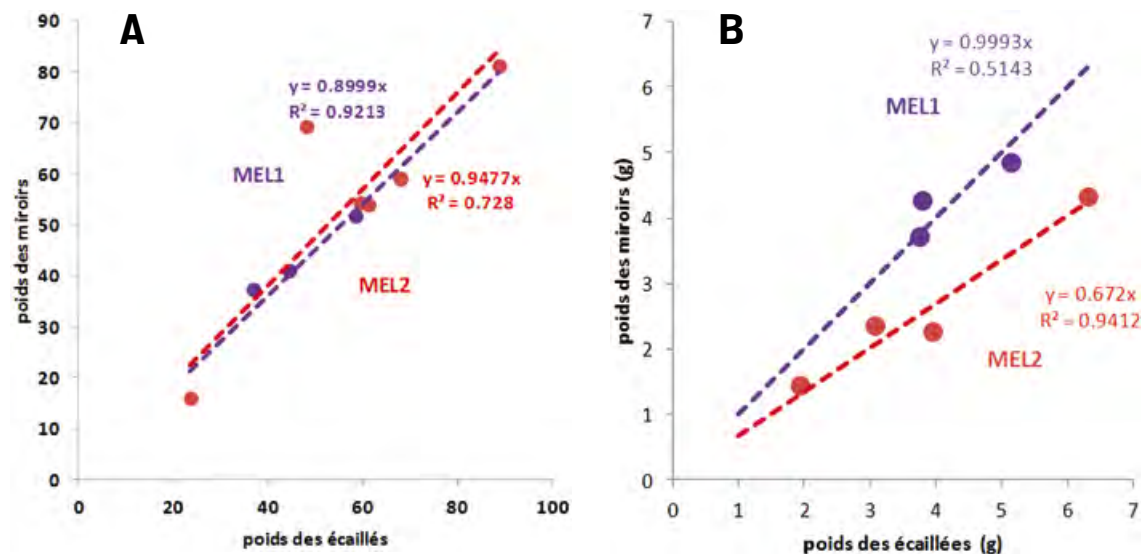


Figure 14 : Poids des lots « miroir » en fonction du poids des témoins écaillés du même étang
(A) en pré-grossissement dans 3 et 4 environnements différents pour, respectivement, MEL1 et MEL2 et
(B) en grossissement, dans 3 et 5 environnements différents pour, respectivement, MEL1 et MEL2. Durant le pré-grossissement le MEL 1 présente ici une performance meilleure que le MEL2 car comparativement au témoin interne écaillé, il est systématiquement plus gros que MEL 2, par contre ses performances sont équivalentes à l'autre mélange lors du grossissement

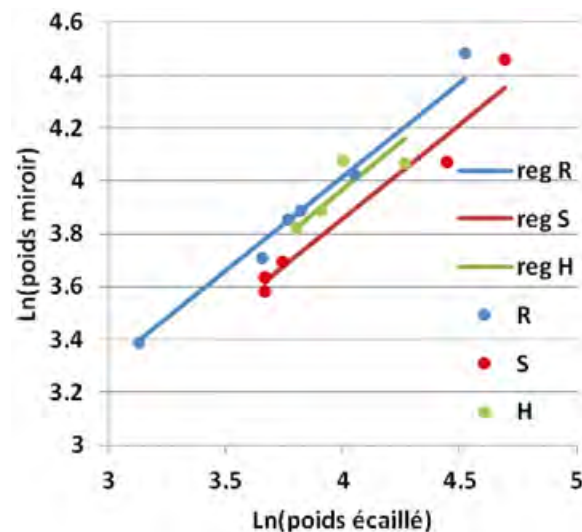


Figure 15 : Comparaison des poids en fin de grossissement (échelle logarithmique) de trois souches de carpes malgaches élevées en rizières et étangs
Les droites de régression montrent la performance attendue de chacune des souches en fonction de la performance du témoin

La maladie de Newcastle

The Newcastle Disease

A.H. RASAMOELINA^{1,2}
S. MOLIA³
N.P. RAZAFINDRAIBE²
D.E. ANDRIA-MANANJARA²
O.D. RAKOTOMANANA²
V. CHEVALIER³

(1) Département de Recherches Zootechniques et Vétérinaires, FOFIFA/CENRADERU, 101 Antananarivo, Madagascar
(2) Département Vétérinaire, Faculté de Médecine, Université d'Antananarivo, Madagascar
(3) UR AGIRs, Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier France

Résumé

La maladie de Newcastle est une maladie virale des oiseaux, très contagieuse et présente partout dans le monde. Sa présentation clinique est variable. Elle se manifeste généralement par des signes respiratoires mais le tableau clinique peut être dominé par un abattement, des symptômes nerveux ou des diarrhées.

Historiquement, la maladie a été découverte en Indonésie en 1926 (Kranefeld, 1926). Mais elle a tiré son nom de la ville de Newcastle-on-Tyne en Angleterre, où elle est apparue en 1927 (Doyle, 1927). Cette maladie constatée dans le monde entier, est actuellement maîtrisée au Canada, aux États-Unis d'Amérique et dans certains pays de l'Europe occidentale. Elle persiste dans différentes régions d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud. Toutefois, étant donné que les oiseaux sauvages peuvent parfois être porteurs du virus sans contracter la maladie, des foyers peuvent apparaître partout où existent des élevages de volailles (OIE, 2016).

A Madagascar, elle constitue la cause la plus importante des mortalités aviaires, notamment chez les animaux non vaccinés. De nombreuses mesures de lutte s'imposent pour une meilleure production avicole.

Abstract

The Newcastle disease is a viral disease of birds, highly contagious and presents worldwide. Its clinical presentation is variable. It usually presents with respiratory signs but the clinical picture may be dominated by a depression, nervous symptoms or diarrhea.

Historically, the disease was discovered in Indonesia in 1926 (Kraneveld, 1926). But it took its name from the city of Newcastle-on-Tyne in England, where she appeared in 1927 (Doyle, 1927). This disease found worldwide, is currently under control in Canada, the United States of America and some countries of Western Europe. It persists in various parts of Africa, Asia and South America. However, given that wild birds can sometimes carry the virus without becoming ill, outbreaks can occur wherever there are poultry (OIE, 2016).

In Madagascar, it is the most important cause of bird mortality, particularly among unvaccinated animals. Numerous control measures are necessary to improve poultry production.

L'agent pathogène responsable de la maladie et les espèces affectées

La maladie de Newcastle (MN) est causée par des virus appartenant au paramyxovirus aviaire sérotype 1 APMV-1, de la famille des *Paramyxoviridae* (Cattoli *et al.*, 2011 ; Miller *et al.*, 2009). Selon la virulence de la souche d'APMV-1, on parle de souche lentogénique (faiblement virulente), mésogénique (moyennement virulente) ou vélogénique (très virulente). La maladie causée par les souches vélogéniques fait partie de la liste des maladies à notifier à l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE).

Les virus de la maladie de Newcastle (on utilisera ci-après la terminologie anglophone NDV pour « Newcastle Disease Virus ») se trouvent principalement chez les oiseaux, domestiques et sauvages, et près de 250 espèces différentes d'oiseaux ont déjà été trouvées infectées (Kaleta et Baldauf, 1988). La susceptibilité varie en fonction de l'espèce.

LES OISEAUX DOMESTIQUES

Les gallinacées

Les poulets et les dindes sont connus être les plus sensibles à la MN. La mortalité intra-élevage peut atteindre 90 % chez ces espèces (Alexander, 2003). L'intensification des élevages avec une densité élevée et l'optimisation des performances augmentent la sensibilité de ces élevages.

Les palmipèdes

L'infection est généralement asymptomatique chez les canards et les oies domestiques. Les foyers avec maladie clinique chez les palmipèdes domestiques sont aussi rares. Dans les années 1990, une souche vélogène de APMV-1 a été isolée en Chine chez des oies, causant une épidémie chez les poulets et chez les oies (Liu *et al.*, 2003 ; Jinding *et al.*, 2005).

Les Ratites

Les autruches sont également sensibles à la MN (Alexander, 2000c). Plusieurs foyers de MN chez les autruches sont répertoriés un peu partout : en Israël (Sameberg *et al.*, 1989), en Afrique du Sud en 1993 (Verwoerd *et al.*, 1995 ; Allwight, 1996). En Afrique du Sud, on a isolé une souche identique à la souche virulente qui circulait chez les poulets au même moment (Manvell *et al.*, 1996).

LES OISEAUX SAUVAGES

Les oiseaux d'eau sauvages

La majorité des oiseaux d'eau sont réceptifs à l'APMV-1. Cependant, ils sont généralement résistants et ne font pas ou font très peu de maladie clinique avec de l'apathie et de l'anorexie (Alexander, 2003), même avec les souches très pathogènes pour les poulets. Mais ils excrètent les virus. Les cas de maladie clinique rapportée chez l'avifaune sauvage sont très rares. En voici quelques exemple : chez des sarcelles (Bozorgmehri-Fard and Keyvanfar, 1979), chez des cygnes et des oies sauvages (Estudillon, 1972) ; chez les cormorans où des cas sont rapportés régulièrement en Amérique du Nord, avec isolement du virus de la maladie de Newcastle (Banerjee *et al.*, 1994 ; Glaser *et al.*, 1999 ; Heckert, 1993 ; Wobeser *et al.*, 1993), chez des pélicans et des mouettes (Wobeser *et al.*, 1993).

Les espèces relais ou espèces péri-domestiques

Les oiseaux péri-domestiques sont des oiseaux familiers qui se sont adaptés à l'exploitation des sources anthropiques de nourriture. Leur association étroite avec l'homme résulte souvent d'un contact étroit avec la volaille domestique. Ces espèces pourraient ainsi servir de liens entre les oiseaux sauvages dans les habitats naturels et la volaille domestique, d'où l'appellation « espèces relais ». On peut citer plusieurs espèces d'oiseaux chanteurs ou d'oiseaux percheurs (Passeriformes) telles que corbeaux (famille *Corvidae*), moineaux (famille de *Passeridae*), martins (famille de *Sturnidae*) et les pigeons (famille de *Columbidae*).

Pour le cas des pigeons, les premiers foyers importants ont commencé vers la fin des années 1970 et le début des années 1980 au Moyen-Orient (Kaleta *et al.*, 1985). Les études ont montré par la suite qu'il s'agit d'un APMV-1 et il a été baptisé PPMV-1 pour Pigeon Paramyxovirus sérotype 1 (Collins *et al.*, 1989). Les foyers se sont étendus et ont abouti à une panzootie¹ à PPMV-1 atteignant les pigeons domestiques, les pigeons sauvages et les colombes (Lister *et al.*, 1986 ; Johnston et Key, 1992.). Les études moléculaires ont montré que le PPMV-1 est une adaptation au pigeon de l'APMV-1 de poulet (Ujvári *et al.*, 2003 ; Aldous *et al.*, 2004), suggérant le passage du virus entre les 2 espèces. D'un autre côté, le pigeon peut aussi être porteur sain du virus. Une étude expérimentale a révélé que les pigeons, même infectés par l'APMV-1 sont résistants, mais excrètent cependant le virus pendant plus de 14 jours (Kapczynski *et al.*, 2006).

D'autres espèces péri-domestiques sont sensibles à la MN (perdreix, faisans, perroquet...). Plusieurs foyers de MN dans les espèces relais ont été décrits dans la littérature surtout en Europe : au Danemark chez des faisans (Jorgensen *et al.*, 1999), en France et en Angleterre (Alexander *et al.*, 1996) ; chez des perroquets en Malaisie (Alexander *et al.*, 1977). Dans les années 1970, une introduction de perroquets infectés a été à l'origine de foyers chez les volailles domestiques avec des impacts économiques importants aux Etats-Unis (Walker *et al.*, 1973).

¹ Maladie contagieuse qui se répand sur plusieurs continents.

L'HOMME

Les cas d'infection par des virus de la MN chez l'homme, sont très rares et se manifestent généralement par une conjonctivite transitoire ou des troubles respiratoires (Chang, 1981). Ces cas humains concernent avant tous des personnes exposées dans le cadre professionnel : éleveur, vétérinaire, personnel d'abattoir ou de laboratoire

Comment se manifeste la maladie ?

La durée d'incubation de la maladie est en moyenne d'une semaine, mais elle peut varier de 2 à 15 jours. La maladie se propage généralement rapidement au sein de l'élevage. Le type, la rapidité et la sévérité des symptômes varient en fonction de facteurs liés au virus (souche virale, tropisme pour tel ou tel organe, dose infectante), aux oiseaux infectés (espèce, âge, immunité préexistante, infections concomitantes) et à l'environnement (type de bâtiment, conditions de température et d'humidité, autres facteurs de stress). Cinq formes d'expression de la maladie sont classiquement distinguées :

- Une forme suraiguë dans laquelle les animaux décèdent très rapidement (en 24-48 heures) sans avoir eu le temps de présenter de symptômes ;
- Une forme aiguë avec une combinaison de symptômes. On peut citer une perte d'appétit, un abattement général, des œdèmes de la tête et du cou (notamment au niveau de la crête et des barbillons), des plumes ébouriffées, une chute ou un arrêt de la ponte des œufs, des œufs de mauvaise qualité, une diarrhée verdâtre ou blanchâtre, des signes respiratoires (toux, râle, halètement, éternuements, jetage, difficultés respiratoires), des signes neurologiques (tremblements, parésie, paralysie, torticolis, marche en cercle). On observe une forte mortalité qui peut atteindre 90 % voire 100 % du cheptel. Dans la forme aiguë, les volailles qui survivent à la maladie présentent souvent des séquelles, notamment au niveau neurologique ;
- Une forme moyennement sévère avec une chute de la production d'œufs, des œufs de mauvaise qualité (forme anormale, coquille molle et/ou de couleur anormale), des signes respiratoires et neurologiques marqués et une faible mortalité (généralement de l'ordre de 10 % bien qu'elle puisse être supérieure chez les jeunes volailles) ;
- Des formes chroniques peuvent aussi exister qui se manifestent généralement par des symptômes respiratoires et évoluent lentement ;
- Une forme asymptomatique ou avec de légers symptômes respiratoires.

Les sources de virus

Les sources de virus sont les oiseaux infectés vivants, les carcasses/cadavres de volailles infectées et l'environnement. Les oiseaux infectés vivants excrètent les virus de la MN principalement dans les fèces et dans les sécrétions respiratoires. Dans les fèces de poulets, les virus peuvent rester infectants jusqu'à 194 jours entre 20 et 30 °C. Les coquilles d'œuf contaminées peuvent aussi être source de virus puisqu'elles peuvent contenir du virus jusqu'à 44 h (Asplin, 1949).

Pour ce qui est des carcasses/cadavres d'oiseaux infectés, selon Asplin (1949), le virus reste actif sur la peau et au niveau de la moelle osseuse des poulets infectés pendant très longtemps surtout à basse température (134 jours à 1,7 °C). Cette durée s'allonge encore si les carcasses ne sont pas plumées (196 jours à 1,7 °C). Les plumes de volailles infectées peuvent rester infectantes pendant au maximum 14 jours.

Une fois excrété, la survie du virus dépend des conditions environnementales (température, humidité, exposition à la lumière). D'après les études expérimentales de Olesiuk (1951) pour vérifier l'effet de l'environnement sur la viabilité du NDV, cette durée de survie, dans un échantillon de sol est de 25 jours à 37 °C et de 71 jours à 20 °C - 30 °C. Selon Lancaster (1966), la durée de survie du NDV, dans un bâtiment d'élevage préalablement occupé par des volailles infectées, est variable en fonction des saisons : 7 jours en été, 14 jours au printemps et jusqu'à 30 jours en hiver. Une litière infectée peut rester infectante pendant 53 jours. Et enfin, selon Boyd et Hanson (1958), on peut retrouver du NDV dans de l'eau de lac contaminée pendant 11 à 19 jours en fonction de son pH, des matières organiques présentes, de l'aération et de sa salinité. De même, on retrouve le NDV dans un sol 8 à 22 jours, en fonction de l'humidité relative.

La contamination entre oiseaux

L'infection d'un oiseau se fait par inhalation ou ingestion des particules virales ou bien par contact au niveau des muqueuses, notamment de la conjonctive. Cette infection peut se faire à travers une transmission directe lors de contact ou proximité entre oiseau infecté et oiseau sain. C'est-ce qu'on appelle la transmission horizontale directe. L'autre mode de contamination est la transmission indirecte à travers différents supports qui peuvent être vivants ou non. L'homme peut transporter de façon passive après avoir été en contact avec de la matière infectieuse, que cela soit via ses chaussures (contact avec des fèces), ses mains (contact avec une carcasse ou un oiseau vivant infecté), ou encore ses vêtements (lors de passage dans un élevage infecté, des aérosols ou poussières contenant des matières infectieuses peuvent se déposer sur les vêtements). Les autres espèces animales qui peuvent avoir accès aux élevages (rats, chiens...) peuvent aussi véhiculer le virus mécaniquement. Enfin, les différents véhicules (voitures, moto, bicyclette,...) qui passent d'un élevage à un autre peuvent transporter les virus au niveau de leurs roues et les amener dans un autre élevage. Ces différents vecteurs mécaniques contaminent l'environnement, notamment les litières et les sols des élevages, et ceux-ci deviennent des sources de matières infectieuses pour les volailles.

Les facteurs de risque de la maladie

On appelle facteur de risque toute exposition ou caractéristique qui augmente la probabilité d'occurrence d'une maladie. En d'autres termes, il s'agit des facteurs favorisant l'infection. L'introduction, la persistance des virus de la MN et leur diffusion à grande distance dépendent des différents facteurs de risque.

La composition de la population aviaire

Les élevages familiaux caractérisés par une population aviaire hétérogène sont plus à risque que les autres élevages (Capua *et al.*, 2002). En effet, plusieurs études rapportent la présence continue de NDV dans ces élevages traditionnels (Bell *et al.*, 1990 ; McBride *et al.*, 1991 ; Awan *et al.*, 1994). En voici les explications avancées :

- La population aviaire du village constitue elle-même le réservoir, à cause de la dynamique des cheptels de volaille et l'hétérogénéité des souches de NDV. Les animaux malades, les infectés latents, une fraction des survivants sont tous des excréteurs de virus. Parmi les animaux excréteurs, on note également les poulets vaccinés. L'infection par des souches virulentes de poulets vaccinés résulte quelquefois par une infection peu sévère ou inapparente suivie d'une excrétion virale jusqu'à 5 semaines post-infection (Lancaster, 1966). A côté de cela, l'ensemble du cheptel n'est jamais infecté en même temps car il y a les nouvelles naissances et il y a les nouvelles introductions d'animaux. Ceci fait qu'il y a du virus en circulation et donc une population sensible. Njagi *et al.*, 2010, dans une étude réalisée au Kenya, confirment le rôle de la population aviaire. Il existe au sein de la population de volaille des individus apparemment sains qui hébergent des virus vélogènes.

- La mixité d'espèces d'oiseaux est favorable à une transmission inter-espèces de NDV. Les autres espèces présentes, plus particulièrement les canards et les oies, sont peu sensibles à la maladie même si des cas de maladies cliniques sont quelquefois rapportés. Mais elles hébergent et excrètent les virus. En Ouganda, OtimOnapa *et al.* (2006) ont démontré par une étude expérimentale, que les canards peuvent héberger le NDV sans faire de signe clinique et peuvent contaminer les poulets en cas de mixité d'espèces dans les élevages.

Le rôle des oiseaux sauvages

Les APMV-1 isolés chez les oiseaux migrateurs sont souvent des virus lentogènes (Mackenzie *et al.*, 1984 ; Rosenberger *et al.*, 1974 ; Stallknecht *et al.*, 1991 ; Jorgensen *et al.*, 2004 ; Hlinak *et al.*, 2006). Mais il y a toujours la possibilité d'évolution pour devenir vélogène après passage chez des volailles domestiques (Shengqing *et al.*, 2002). D'ailleurs, des études phylogénétiques ont montré des liens épidémiologiques entre des virus isolés chez l'avifaune sauvage et ceux isolés chez des volailles domestiques, notamment des poulets. Par exemple, les mêmes souches de NDV responsables de l'épizootie chez les poulets en Irlande en 1990 ont été isolées chez l'avifaune sauvage (Alexander *et al.*, 1992). Mais le cas le plus probant d'émergence de souche vélogène à partir de souche lentogène est le cas observé en Australie (Gould *et al.*, 2001 ; Gould *et al.*, 2003 ; Gould *et al.*, 2004). Les virus APMV-1 non pathogènes qui circulaient depuis longtemps ont évolué pour devenir pathogènes et causer les foyers observés de 1998 à 2000. Un passage de chez les réservoirs que sont les oiseaux sauvages, chez qui ces souches n'ont pas été pathogènes, vers les poulets, a créé les souches pathogènes chez les poulets.

Les autres espèces (non oiseaux)

Chats, chiens, renards, rongeurs excrètent le virus pendant un court moment (72 h) dans leurs fèces après ingestion de volaille contaminée. Ils peuvent jouer un rôle dans la dissémination lors des contacts avec les volailles ou par contamination de l'environnement.

Protection et hygiène de l'élevage

Lors des foyers de MN dans les fermes commerciales en Australie, entre 1998-2000, les élevages ayant une protection contre l'entrée des oiseaux sauvages et un bon niveau d'hygiène, avaient un risque plus faible d'être infecté (East *et al.*, 2006). L'isolement des élevages, notamment la distance par rapport à d'autres fermes, améliore la sécurité vis-à-vis de l'introduction de NDV. En Italie, en 2000, les fermes qui avaient dans un rayon de 700 mètres un autre élevage infecté, étaient plus à risque de contracter aussi la maladie (Capua *et al.*, 2002). L'application d'un bon nettoyage-désinfection et la mise en place d'un vide sanitaire suffisant permettent d'assainir les fermes par rapport au virus NDV (McCluskey *et al.*, 2006).

Les facteurs agro-environnementaux

Les facteurs agro-environnementaux influencent la dynamique et le risque de maladie de Newcastle. Au Kenya, Njagi *et al.* (2010) mettent en évidence que la saison chaude avec une pluviométrie faible, le milieu de type savane et la moyenne altitude (760 m) sont favorables au développement de la MN.

La littérature montre une différence en termes de variation saisonnière de la MN. En Thaïlande, le début des foyers sont associés au début de la saison humide (Thitisak *et al.* 1988 ; Jintana, 1987). Au Vietnam, les foyers apparaissent en saison froide (Dao and Pham, 1985), tandis qu'en Mauritanie, c'est plutôt, en saison chaude (Bell *et al.*, 1990). Au Kenya, Nyaga *et al.* (1985) rapportent que les foyers existent aussi bien en saison chaude qu'en saison froide. Kinde *et al.*, (2004) rapportent le rôle du climat chaud et sec en Californie, comme favorable à la rapide élimination des NDV dans les élevages.

Le commerce

Le NDV a été isolé plusieurs fois dans différents pays au niveau des marchés de volailles vivantes : King *et al.* (1997) et Seal *et al.* (2005) caractérisent les souches de NDV qui circulent sur les marchés de volailles vivantes en Amérique du Nord ; Kim *et al.*, (2007) caractérisent les souches de NDV qui circulent sur les marchés de volailles vivantes à Hong-Kong. Capua *et al.* (2002) rapportent que les commerçants de volailles ont été à l'origine de la dissémination des foyers de MN à l'intérieur de l'Italie en 2000.

Le diagnostic de la maladie

La maladie de Newcastle doit être suspectée, chez les volailles, quand il y a au sein du troupeau :

- Sur le plan clinique et lésionnel : de la prostration², de la difficulté respiratoire, une diarrhée blanche ou verte, des signes nerveux (notamment du torticolis), des lésions hémorragiques notamment au niveau du proventricule ;
- Sur le plan épidémiologique : une forte contagiosité et une forte mortalité.

D'autres maladies peuvent néanmoins présenter un tableau clinique similaire (telles que l'influenza aviaire hautement pathogène, le choléra aviaire, ou la laryngotrachéite infectieuse). Le diagnostic différentiel ne peut se faire qu'au moyen d'analyses de laboratoire.

Les analyses de laboratoire peuvent viser la détection des virus ou la détection des anticorps contre les virus de la MN. Pour la détection des virus, les échantillons à collecter incluent des écouvillons trachéaux ou cloacaux pour les oiseaux vivants, ou des organes (trachée, poumons, intestins, rate et cerveau) pour les oiseaux morts. Ces échantillons doivent être conservés à une température $\leq +4$ °C si les analyses vont se faire dans les 48 heures ; sinon il faut les congeler à -20 °C. Différentes techniques peuvent être utilisées : isolement viral suivi de tests d'inhibition d'hémagglutination³ ou bien par biologie moléculaire, notamment la PCR⁴ (qui permet d'obtenir les résultats plus rapidement).

Pour la détection des anticorps, l'échantillon à collecter est du sang, à partir duquel le sérum sera obtenu. Les techniques possibles incluent l'inhibition d'hémagglutination, les tests ELISA ou la neutralisation de virus. En cas de forme aiguë ou suraiguë, les techniques sérologiques présentent un intérêt plus limité car les oiseaux meurent souvent avant d'avoir pu produire des anticorps (les anticorps sont détectables à partir de 6 à 10 jours après l'infection). De même, si les animaux sont vaccinés, les tests sérologiques seront positifs vis-à-vis aussi bien des anticorps vaccinaux que des anticorps suite à une infection naturelle par le virus de la MN. Toutefois, en fonction du titre d'anticorps obtenu, on peut généralement distinguer une réponse vaccinale d'une infection sauvage. Et enfin, une sérologie positive indique que l'animal a été en contact avec le virus mais sans forcément contracté la maladie.

² Etat d'abattement et de fatigue.

³ Formation d'un agrégat de globules rouges provenant de la fixation d'anticorps spécifiques sur les antigènes présents à la surface de ces globules rouges.

⁴ Polymerase Chain Reaction ou Amplification en Chaîne de Polymérase. Cela consiste à amplifier par des procédures de biologie moléculaire, un fragment du génome d'un agent pathogène jusqu'à ce qu'il soit suffisamment grand et facilement détectable.

LES STRATÉGIES DE LUTTE CONTRE LA MALADIE DE Newcastle

La lutte contre la MN se décline en plusieurs niveaux en fonction du statut sanitaire du pays ou d'une zone donnée à l'intérieur d'un pays. Plusieurs modalités de lutte sont possibles et leur combinaison dépend de l'épidémiologie de la maladie dans le pays ainsi que du contexte socio-économique.

Le contrôle des importations

Le contrôle des importations a pour objectif de prévenir toute introduction du virus. Cela consiste à surveiller toute entrée de volailles ou de produits issus de volailles sur le territoire national pour détecter et refouler tout produit à risque. En pratique, toute importation de produits animaux ou d'origines animales dans un pays nécessite une autorisation de la part de services vétérinaires du pays importateurs. Cette autorisation découle d'une vérification du statut sanitaire du pays de provenance avec quelquefois, selon le pays et selon le type de produits, les résultats de dépistage de maladies par un laboratoire de référence. Une vérification de ces papiers suivie d'une vérification physique est réalisée au niveau des frontières, par les services vétérinaires.

Le contrôle des entrées peut aussi s'appliquer pour protéger une zone donnée à l'intérieur d'un même pays si les statuts sanitaires des différentes zones sont différents et que l'on veut préserver la zone en question comme indemne de la maladie.

La surveillance épidémiologique

La surveillance épidémiologique peut être définie comme la collecte, la remontée, l'analyse des données sanitaires et la diffusion d'informations sanitaires en vue d'orienter les actions de contrôle des maladies animales.

Par rapport à la MN, les objectifs de la surveillance épidémiologique sont de deux ordres : l'alerte précoce et le suivi de la dynamique de la maladie.

L'alerte précoce consiste à détecter le plus rapidement possible toute épidémie de maladie de Newcastle afin de prendre les dispositions nécessaires pour la contrôler. Elle est cruciale pour plusieurs raisons :

- La détection précoce d'un foyer permet de le circonscrire rapidement et d'éviter ainsi que la maladie se propage. Cette raison fait que l'alerte précoce est doublement plus importante dans un pays ou une zone indemne en cas d'introduction de la maladie ;
- Plus tôt le foyer sera détecté, moins il y aura d'élevages et d'animaux touchés et moins chers sera le coût du contrôle du foyer.

Le suivi de la dynamique de la maladie consiste à connaître l'évolution de la maladie dans le temps et dans l'espace. L'évolution dans le temps signifie les modifications des nombres de foyers et d'animaux affectés au fil des semaines, des mois voire des années. L'évolution dans l'espace consiste à connaître et suivre la répartition de la localisation des foyers de MN. Ce suivi est surtout important dans les pays comme Madagascar où la maladie est endémique. En effet, la connaissance des périodes et des lieux de concentration de la maladie permet de cibler la période et la zone d'intervention pour des mesures ciblées. Par ailleurs, le suivi de la dynamique de la maladie permet aussi d'évaluer l'efficacité globale de la lutte contre la maladie au niveau national en suivant sa tendance.

La vaccination

Par définition, un vaccin est une préparation à partir de microbe, qu'on introduit dans l'organisme afin de stimuler la production d'anticorps qui va protéger l'organisme contre toute nouvelle infection par la forme pathogène du même microbe. La préparation peut être obtenue en tuant le microbe (vaccins inactivés ou vaccins tués), ou en atténuant son pouvoir pathogène (vaccins atténués ou vaccins vivants). La vaccination est l'une des armes les plus efficaces pour contrôler la MN :

- Dans le cas des pays où la maladie est endémique, la vaccination est le moyen le plus efficace pour diminuer la prévalence de la maladie à un niveau suffisamment bas avant de pouvoir passer à des stratégies d'élimination du virus partout où il se trouve. Ceci a été la stratégie utilisée dans la majorité des pays du Nord, qui depuis ont réussi à devenir indemne de MN ;
- La vaccination en anneau autour des foyers permet aussi de limiter son extension.

Il existe plusieurs types de vaccins dont le choix d'utilisation dépend des contextes épidémiologiques et socio-économiques dans le pays ainsi que du système d'élevage.

Vaccins inactivés

Pour obtenir des vaccins inactivés, le virus est cultivé ou multiplié puis tué par du formol ou du bétapropiolactone. De l'adjuvant, surtout de l'huile minérale, est ajouté à ce composé pour améliorer le pouvoir immunogène du vaccin. Comme les virus sont tués, ils ne peuvent plus diffuser et se multiplier ; leur utilisation nécessite alors une injection individuelle des volailles. Ce type de vaccin confère une bonne et durable immunité contre la MN. Cependant, il est souvent trop cher pour les élevages de basse-cour avec quelque tête et il est difficile à utiliser surtout pour les élevages intensifs du fait de la nécessité de faire une injection individuelle.

Vaccins atténués

Les vaccins atténués sont les plus répandus. Il en existe plusieurs sortes :

- Les plus répandus sont les vaccins obtenus à partir de souches naturellement apathogènes ou lentogéniques (très faiblement pathogènes). Les souches Hitchner B1 (ou HB1) et La Sota en sont les représentants les plus utilisés de par le monde entier.
- Les vaccins issus de souches mésogènes (moyennement pathogènes) comme la souche Mukteswar (Alexander, 1997) et la souche Komarov (Saifuddin *et al.*, 1990).

Comme les vaccins atténués contiennent des virus vivants, ceux-ci peuvent continuer à se répliquer et à diffuser entre les volailles. L'avantage en est que même si la totalité du lot de volaille n'est pas vaccinée, il y a quand même une immunisation de l'ensemble du groupe. L'autre avantage de ce type de vaccin est la possibilité de faire l'administration via différents supports (aliments, eau de boisson).

L'inconvénient majeur des vaccins atténués vient aussi du fait qu'ils sont à base de virus vivants. En effet, ils peuvent quelquefois induire des réactions vaccinales chez les oiseaux vaccinés. Ces réactions vaccinales sont plus fréquentes et plus sévères avec les souches mésogéniques, se traduisant par des signes respiratoires et des signes nerveux occasionnels. Pour les souches lentogéniques, les réactions vaccinales se traduisent par des signes respiratoires mineures. La Sota produit plus fréquemment de réactions vaccinales que HB1. Il est préconisé d'utiliser les souches mésogéniques et la souche La Sota, uniquement sur des populations aviaires ayant un certain niveau d'immunité, soit à l'issue d'une précédente vaccination avec une autre souche entraînant moins de réaction vaccinale, soit parce qu'il s'agit d'une population dans

une zone endémique et que les volailles sont souvent en contact avec le virus, avec un niveau minimal d'anticorps protecteurs. Par ailleurs, un autre inconvénient des vaccins avec les souches lentogéniques, est que la plupart du temps, ils ont été fabriqués pour les élevages industriels avec des conditionnements pour 500 doses ou 1000 doses. De ce fait, ils deviennent peu accessibles pour les éleveurs de volailles villageoises qui ne possèdent qu'une à quelques dizaines de têtes.

Les vaccins thermotolérants

Il s'agit de vaccin vivant développé à partir de souche de virus de MN sélectionnée pour sa stabilité à la chaleur, dénommée souche V4. Il a été introduit spécifiquement pour répondre à la problématique des élevages villageois dans les pays en voie de développement. Ce type de vaccin peut être administré via l'aliment ou sous forme de collyre. Parmi les vaccins thermotolérants similaires à la souche V4, on peut noter le vaccin utilisant la souche I-2 (Bensink and Spradbrow, 1999) qui a été diffusé dans plusieurs pays africains et asiatiques (Vietnam, Tanzanie, Mozambique,...), pour une production locale à destination des élevages villageois. Les volailles vaccinées avec cette souche, ont bénéficié d'une bonne immunité (Amakye-Anim *et al.*, 2000 ; Dias *et al.*, 2001 ; Tu *et al.*, 1998 ; Wambura *et al.*, 2000) et d'une bonne innocuité (pas de réactions vaccinales).

Vaccins recombinants

La production de vaccins recombinants fait appel au génie génétique. Les gènes, qui codent pour certaines protéines du virus, sont insérés dans d'autres virus pour produire les vaccins. Par exemple, le gène qui code pour la protéine de fusion (F) du virus de la MN est inséré dans l'*herpesvirus* de la dinde pour produire un vaccin recombinant contre la MN. Cette procédure présente comme avantages d'induire une bonne protection contre la MN (Morgan *et al.*, 1993) mais aussi de pouvoir différencier lors des analyses sérologiques, les anticorps produits, suite à une vaccination et les anticorps induits par une infection par un virus sauvage (Makkay *et al.*, 1999). Le principal inconvénient est son accessibilité pour les pays en voie de développement du fait surtout de son coût élevé.

Les bonnes pratiques d'élevage

Les bonnes pratiques d'élevages constituent un moyen de prévention valable aussi bien dans les pays indemnes que dans les pays où la maladie est présente. En effet, même dans les pays où la vaccination est pratiquée, cette dernière ne suffit pas à elle-seule pour protéger les volailles. Il faut qu'elle soit accompagnée d'un certain niveau de biosécurité qui est apporté par les bonnes pratiques d'élevage.

Les bonnes pratiques d'élevage impliquent la mise en œuvre de mesures de biosécurité. On entend par biosécurité l'ensemble des outils, des mesures et des procédures qui visent à :

- à prévenir l'introduction d'agents pathogènes dans l'élevage ;
- à limiter leur dispersion à l'intérieur du troupeau ;
- à éviter leur persistance dans l'élevage ;
- à éviter leur diffusion à d'autres élevages, s'ils sont présents dans la ferme.

Ces mesures sont applicables pour tout type de maladies. Nous ne prétendons pas développer ici une liste exhaustive de toutes les mesures de protection sanitaire des élevages mais plutôt d'en lister les grandes lignes. Elles consistent en :

- L'isolement et la protection physique ;

- Le contrôle des entrées dans l'élevage ;
- La sectorisation et la maîtrise des circuits ;
- Le nettoyage-désinfection et le vide sanitaire.

L'isolement et la protection physique

Dès la mise en place de l'élevage, il faut éviter autant que possible la proximité avec d'autres élevages, avec les habitations humaines, avec les marchés, avec les routes. Plus l'élevage est isolé, moins il y aura de risque de transmission d'agents pathogènes due à la proximité de sources ou de vecteurs potentiels.

En termes de protection physique, il est important de délimiter les limites de l'exploitation et les limites de la zone d'élevage par des murs pour pouvoir maîtriser les entrées et les sorties.

Les limites de la zone d'élevage entourent les bâtiments d'élevage tandis que les limites de l'exploitation constituent une deuxième clôture à l'extérieur, en entourant en plus de la zone d'élevage, les dépendances, les bâtiments d'habitation et autres bâtiments utiles à l'exploitation.

Le passage de la zone extérieure à la clôture, que cela soit celle de l'exploitation ou celui de la zone d'élevage devrait se faire au travers d'une zone tampon ou SAS. Le SAS sépare un milieu contaminé (extérieur) d'un milieu propre (intérieur). En fonction du contexte, il existe différents niveaux de zone tampon. Pour passer de la zone contaminée à la zone propre, on peut passer du simple portail à un dispositif avec nettoyage-désinfection, douche et changement de vêtement et de chaussures.

Pour les exploitations à haut niveau de biosécurité, les véhicules, avant d'y entrer, passent par une désinfection, notamment des roues, à travers le dispositif appelé rotoluve (dépression du passage rempli de désinfectant) ou par simple pulvérisation des roues. Avant l'entrée dans la zone d'élevage, tout vêtement ou chaussures potentiellement vecteurs passifs sont changés. La plupart du temps, l'entrée dans la zone d'élevage et même dans chaque bâtiment d'élevage doit se faire au travers d'un pédiluve, un dispositif rempli de désinfectant et dans lequel la personne qui entre doit tremper ses chaussures.

En aviculture villageoise, ce type de dispositif représente un investissement trop important pour les éleveurs. Nous discuterons des propositions d'adaptation des bonnes pratiques d'élevage dans le contexte de Madagascar dans le chapitre correspondant.

Le contrôle des entrées

Le contrôle des entrées concerne les animaux, les personnes et tout autre intrant introduit dans l'élevage. Le contrôle des entrées consiste principalement à la vérification de l'origine.

La vérification de l'origine consiste à s'assurer que les volailles, les personnes et les intrants qui entrent dans l'élevage n'ont pas eu de contact au préalable avec le virus de la MN. Puisqu'il est difficile de connaître exactement là où il y a le virus et là où il n'y en a pas, il faut plutôt éviter les origines pour lesquelles les probabilités de contamination sont élevées. Pour les pays où la maladie existe, les filières de commercialisation de volailles vivantes avec des marchés et des collecteurs sont connues comme étant des concentrateurs de volailles malades ou période d'incubation. En effet, il y a souvent le comportement de vente d'urgence de la part des éleveurs en cas de menace ou de présence de la maladie dans les élevages. Introduire des volailles via ce circuit représenterait un risque élevé d'avoir la maladie dans son élevage.

Pour les personnes, il vaut mieux refuser l'entrée dans l'élevage ou exiger des mesures de décontamination (désinfection, changement de vêtements, chaussures, sur bottes) d'une personne qui a fait le tour de plusieurs élevages, notamment en période d'épidémie (agent de santé animale, collecteur...).

La sectorisation et maîtrise des circuits

La sectorisation et la maîtrise des circuits consistent à établir un système de fonctionnement de l'élevage selon les différents niveaux de risque en termes de microbisme⁵ et d'immunité des volailles. En effet, en fonction des catégories d'âge, les animaux les plus jeunes sont toujours plus sensibles aux maladies. De même, les niveaux d'immunité des différentes espèces par rapport aux différents agents pathogènes, incluant la MN, ne sont pas les mêmes. Par exemple, les palmipèdes (oies et canards) peuvent héberger le virus de la MN et il est assez rare qu'ils en présentent les signes cliniques.

En pratique, la sectorisation consiste à :

- Ne mettre dans les mêmes bâtiments que les volailles ayant le même statut (même catégorie d'âge, même état sanitaire) ;
- À ne jamais mélanger les différentes espèces dans les mêmes bâtiments. Idéalement, il vaut mieux ne jamais mélanger plusieurs espèces dans un même élevage.

Pour ce qui est de la maîtrise des circuits, il s'agit de toujours commencer les activités régulières de l'élevage (distribution d'aliment, visite, nettoyage...) par les groupes d'animaux les plus vulnérables et les plus fragiles et terminer par ceux qui peuvent présenter un risque en termes d'infection (les animaux malades...).

En termes de sectorisation et de maîtrise des circuits, la quarantaine et l'infirmerie sont deux locaux particuliers dans l'élevage. La quarantaine est le local où les nouveaux animaux sont gardés pendant un certain temps avant de les mélanger avec le reste des animaux de l'élevage. La quarantaine permet de vérifier s'ils ne sont pas en période d'incubation de la maladie, dans quel cas ils vont en manifester les signes pendant cette période d'observation. La quarantaine permet aussi de réaliser, si nécessaire, des prélèvements pour dépister toute infection éventuelle, mais aussi certaines mesures de prophylaxie médicale (déparasitage, vaccination...) en fonction du programme de prophylaxie de l'élevage. L'infirmerie est le local où les animaux malades sont isolés pour observation et traitement, mais aussi pour éviter qu'ils contaminent les autres animaux. Ces deux locaux sont des locaux à risque et doivent être traités en dernier dans le cadre des activités quotidiennes de l'élevage.

Le nettoyage-désinfection et le vide sanitaire

Le nettoyage-désinfection des bâtiments d'élevage se fait avant l'entrée et à la sortie des bandes de volailles, quand le bâtiment est vide. A la sortie d'une bande, et après le nettoyage-désinfection, le bâtiment est laissé vide pendant un certain temps, variable selon le rythme de l'élevage (au moins une semaine). On parle dans ce cas du vide sanitaire.

L'objectif du nettoyage désinfection et du vide sanitaire est de réduire au minimum le niveau de microbisme dans le bâtiment d'élevage pour que la nouvelle bande qui va entrer soit dans un environnement sain.

⁵ Niveau de contamination d'un milieu par un agent pathogène donné.

La gestion des foyers

Le code sanitaire pour les animaux terrestres de l'OIE, définit les mesures à prendre lorsqu'il y a un foyer de MN, une zone antérieurement indemne (OIE, 2015). Il s'agit d'établir une zone de confinement. Leur mise en œuvre présente surtout un intérêt commercial, notamment pour les pays exportateurs, pour délimiter la zone infectée et conserver le statut indemne en dehors de cette zone. Les mesures à prendre dans la zone de confinement sont :

- Isolement strict ou mise en quarantaine de la zone et contrôle des mouvements d'animaux ;
- Abattage sanitaire des oiseaux infectés et mais aussi des oiseaux exposés au virus, suivi d'une élimination appropriée des carcasses ;
- Nettoyage et désinfection des locaux, suivis d'un vide sanitaire ;
- Contrôle de l'accès et de la sortie de la zone pour éviter l'extension du foyer.

Les mesures prises à l'intérieur du foyer, dans les zones de confinement peuvent être adaptées par les services vétérinaires du pays concernés. Elles sont coûteuses et souvent difficiles à appliquer dans les pays en voie de développement pour des raisons d'ordre socio-économique. Pourtant, c'est dans ces pays qu'il y a surtout l'aviculture villageoise avec de multiples foyers de MN. Alders et Spradbrow (2000), proposent les mesures suivantes :

- Isoler toutes les poules malades ;
- Abattre les poules très malades. Ne pas transporter les poules malades ou mortes vers d'autres régions indemnes de la maladie ;
- Enterrer ou brûler toutes les poules mortes. Si, pour une raison ou une autre, ce n'est pas possible, toute partie de la poule qui n'a pas été utilisée doit être enterrée ou brûlée ;
- Ne pas vacciner les poules qui présentent des signes de la maladie.

La situation de la maladie de Newcastle à Madagascar

L'AVICULTURE À Madagascar

Madagascar est un grand pays d'aviculture. Selon les dernières estimations de la FAO datant de 2014, le cheptel de volailles domestiques à Madagascar est estimé à 37 millions de tête (FAOSTAT, 2015). On y rencontre plusieurs espèces de volailles domestiques et plusieurs types d'ateliers (poules locales ou poulets gasy, poules pondeuses, poulets de chair, oies, canards, canards gras, dindes...). La Figure 1 présente la répartition par espèce de ce cheptel, en considérant que les effectifs de pintades domestiques sont négligeables.

Pour les poulets, selon une estimation basée sur les productions nationales de poulets de chair et de poules pondeuses et les quantités importées pour l'année 2010 (Rakotondrabe, 2013), les poulets de chair et poules pondeuses représenteraient 19 % de la population de poulets. Cela représente environ 5 millions de têtes, si on considère la dernière estimation du cheptel de poulets.

Ces volailles sont élevées dans des systèmes très divers qu'on peut classer de façon simplifiée en élevages : villageois, artisanal et industriel (Rasamoelina-Andriamanivo, 2011) :

- L'aviculture villageoise, largement majoritaire, regroupe les élevages traditionnels de poulets, de canards, d'oies et de dindes. Selon une étude de filière réalisée en 2004 (Ocean consultant, 2004), l'aviculture villageoise occupe plus de 2/3 de la population rurale. La taille des élevages va de quelques têtes à une centaine de volailles. Les animaux divaguent pendant la journée pour se nourrir, puis sont logés dans des abris sommaires ou dans la maison de l'éleveur la nuit. Certains éleveurs donnent un peu de compléments, notamment des grains de riz ou de maïs chaque matin à la sortie des animaux. Les volailles sont destinées à l'autoconsommation ou vendues vivantes aux collecteurs ou dans des marchés.
- Les élevages artisanaux avec notamment les poulets de chair et les poules pondeuses en milieu périurbain, relèvent d'une logique purement commerciale de nature entrepreneuriale. La taille des élevages varie d'une cinquantaine à quelques milliers de volailles. On peut aussi associer à ce groupe, les élevages de coqs de combat et les élevages de canards gras, mais avec un effectif beaucoup moins important (une dizaine à une centaine de volailles). Par rapport à l'élevage traditionnel, beaucoup plus de soins sont apportés aux animaux en élevage artisanal avec notamment la présence de clôture, un bâtiment d'élevage, une alimentation systématique et une main d'œuvre plus importante.
- Enfin, il y a des élevages de type industriel représentés principalement par les accoueurs, avec une intégration verticale allant de la fabrication et vente d'aliment, vente de poussins, suivis d'élevages et vente de carcasses de poulets adultes. Les mesures de biosécurité sont importantes (clôture, bâtiments, nettoyage-désinfection, vide sanitaire, plan de prophylaxie...). Les entreprises qui font ce type d'élevage font appel à un personnel qualifié (vétérinaires, ingénieurs, techniciens supérieurs). Actuellement, il y a principalement 2 entreprises (AVITECH et AGRIFARM) qu'on peut classer dans cette catégorie.

Cette importance de l'aviculture villageoise et de l'aviculture artisanale est connue au niveau mondial, notamment dans les pays en voie de développement avec par exemple 85% de la production avicole en Afrique, 65 % au Vietnam et 85 % en Thaïlande (Renard, 2010). La place de ce type d'élevage dans ces pays (incluant Madagascar) est importante aussi bien en terme économique qu'en tant que source de protéines pour les populations. Le contexte économique, la densité de population et le nombre important de petits élevages familiaux font que ces derniers sont très importants et le resteront encore pour plusieurs années (Awan *et al.*, 1994).

Tableau 1 : Chiffres d'affaire de l'aviculture malgache
(Source : Rakotondrabe, 2013)

Type d'aviculture	Chiffre d'affaire	
	En milliards d'Ariary	En millions d'Euro
Poulets gasy et palmipèdes	106,5	30,4
Poulets de chair	33,5	9,6
Poules pondeuses	82,8	23,7
Total	222,8	63,7

Pour Madagascar, sur le plan économique, le Tableau 1 présente les chiffres d'affaire générés par l'aviculture, excluant l'élevage industriel. Le chiffre d'affaire total est de 222,8 milliards d'ariary. Le fait que l'ensemble poulets gasy et les palmipèdes génèrent plus de chiffre d'affaire que les poulets de chair ou les poules pondeuses, montre l'importance économique de l'aviculture villageoise.

Une maladie ancienne et connue des éleveurs

La MN a été signalée à Madagascar depuis 1946 (Rajaonarison, 1991) et elle est rapidement devenue enzootique⁶. Elle est connue des éleveurs. En fonction des localités, différentes dénominations lui sont attribuées : « barika », « ramoletaka akoho », « moafon'akoho », « ramibomogno » ou « pesta akoho ». Toutefois, les manifestations cliniques de la MN peuvent porter à confusion avec d'autres maladies, notamment le choléra aviaire, une autre maladie aviaire très meurtrière mais d'origine bactérienne. La considération des techniciens veut que le terme « barika » soit associée au choléra aviaire et le terme « pesta akoho » soit associé à la MN. Mais en réalité, les éleveurs utilisent de façon indifférenciée les 2 termes pour indiquer l'une ou l'autre des deux maladies dont ils ne font pas du tout ou très peu la différence. En général, ces appellations signalent la gravité et l'importance de la maladie aviculture villageoise (Maminiaina *et al.*, 2007). En effet, ces maladies aviaires sont à l'origine, chaque année de mortalités réduisant de plus de 90 % les cheptels aviaires des élevages atteints.

La circulation des souches de virus dans le pays

Les avancées technologiques en matière de biologie moléculaire permettent maintenant de réaliser des analyses poussées des génomes des virus et d'en différencier plusieurs types appelés génotypes. Dans le cadre de travaux sur la caractérisation des virus de la MN qui circulent sur les hautes terres de Madagascar, Maminiaina a mis en évidence en 2011, trois génotypes à partir de dix isolats de virus : le génotype I, le génotype III et le génotype XI.

Le génotype I, connu chez des oiseaux sauvages, a été effectivement isolé sur deux oiseaux sauvages. Le génotype III correspond à la souche vaccinale utilisée pour l'aviculture villageoise. Il a été isolé sur des volailles apparemment saines. Le génotype XI, spécifique à Madagascar, est celui qui circule le plus et qui est responsable des différents foyers de la maladie.

L'importance épidémiologique de la maladie

La description de l'importance épidémiologique peut se faire via sa fréquence, son importance médicale, c'est-à-dire la mortalité qu'elle entraîne, sa répartition géographique et sa répartition dans le temps.

Fréquence et importance médicale

Du fait de la ressemblance clinique et la confusion entre la MN et d'autres maladies aviaires, notamment le choléra aviaire, nous n'allons considérer ici que les études pour lesquelles il y a eu des confirmations de laboratoire. Parmi ces diagnostics de laboratoires, il y a les analyses sérologiques qui vont donner des prévalences sérologiques (proportion d'animaux positifs au test de laboratoire parmi les animaux testés). Ces prévalences sérologiques témoignent d'un contact avec le virus (infection sauvage ou vaccination).

Nous allons décrire la fréquence et l'importance médicale de la MN à travers quatre études.

⁶ Maladie contagieuse présente en permanence dans une zone géographique donnée.

Suivi de troupeaux à Ambohimangakely et à Moramanga en 1999-2000

Trente éleveurs de poulets ont été suivis de mai 1999 à juin 2000 (Koko *et al.*, 2000 ; Maminiana *et al.*, 2007). Plusieurs données dont la dynamique des troupeaux, les mortalités, les maladies, la vaccination, ont été relevées. Deux enquêtes sérologiques transversales, c'est à dire à un moment précis dans le temps, ont été réalisées en juin puis en octobre 1999. Les échantillons ont été analysés par inhibition de l'hémagglutination.

Ces enquêtes sérologiques ont donné une prévalence sérologique de 20,6 % (n=68) pour le mois de juin 1999 et de 72,2 % (n=74) pour le mois d'octobre 1999. La mortalité associée à la MN, pendant l'année de suivi était de 24 % (n=2236). Cela signifie que la MN a tué 24 % des 2 236 poulets présents, pendant la période d'étude. Par ailleurs, si on prend toutes les causes de mortalité de poulets (les écrasements par les voitures, les maladies, prédateurs...), la MN représentait 44 % des 1 220 mortalités enregistrées. Elle constituait ainsi la première cause de mortalité des poulets.

Enquête transversale dans 18 localités de Madagascar en 1999

Une enquête transversale a été réalisée par Porphyre en 1999. Les prélèvements ont été effectués de juin à septembre dans 18 localités réparties sur toute l'île (Figure 2). La prévalence sérologique était de 36,5 % (n=191). Toutes les zones géographiques sont infectées sans différences significatives.

Enquête transversale dans le Grand-Antananarivo et au Lac Alaotra en 2008

Rasamoelina-Andriamanivo *et al.*, (2012), ont effectué, en août 2008, une enquête transversale sur la MN dans la zone du Lac Alaotra (Ambatondrazaka et Amparafaravola) et dans le Grand-Antananarivo (rayon de 100 km autour de la capitale, allant d'Andramasina, Mahitsy jusque dans la région d'Itasy). Sur les 778 volailles non vaccinées prélevées et analysées par un test ELISA, la prévalence sérologique était de 60 %. La différence de prévalence entre les deux zones d'étude était statistiquement significative avec une prévalence plus élevée au Lac Alaotra par rapport à Antananarivo (73 % vs 56 %).

Surveillance épidémiologique au Lac Alaotra en 2010 et en 2012

Dans un cadre de recherche, une surveillance épidémiologique des maladies aviaires, principalement la MN, avait été mise en place dans la zone du Lac Alaotra (Ambatondrazaka et Amparafaravola). La période de surveillance s'était étalée pendant toute l'année 2010, dans le cadre du projet GRIPAVI, puis 6 mois supplémentaires ont été effectués dans le deuxième semestre 2012, dans le cadre du projet PARRUR Newcastle.

En 2010, plusieurs méthodes de surveillance ont été associées pour surveiller les 357 localités (Fokontany et points de collecte) de la zone d'étude :

- une surveillance participative qui incluait la participation des chefs de village. Ce type de surveillance permettait de détecter beaucoup de foyers mais surtout de façon rétrospective, donc après la survenue des foyers ;
- une surveillance événementielle, dans laquelle le dispositif de terrain permettait une alerte précoce et la descente d'une équipe mobile pour réaliser des prélèvements et faire une enquête épidémiologique sur les foyers ;
- une surveillance basée sur le risque, pour laquelle, seuls les trois plus grands marchés ont été surveillés. En cas d'alerte, c'est-à-dire de cas suspect de MN au niveau de ces marchés, une enquête de traçage des foyers en amont et en aval du marché était effectuée. Cette composante surveillance ciblée était à été réalisée seulement en 2012.

En termes de résultats, en 2010, la surveillance participative a permis de détecter 151 foyers dont 35 étaient aussi détectés via la surveillance événementielle et donc investigués. Parmi les 35 foyers investigués, seuls 31 ont fait l'objet de prélèvements biologiques et 84 % ont été confirmés par PCR, comme étant dus à la MN. Les composantes participative et événementielle étant réalisées par les mêmes acteurs de terrain, on peut supposer que les 84 % représentent la qualité ou plus précisément la spécificité de leur détection des foyers de MN. Le tableau 2 présente les indicateurs épidémiologiques associés aux foyers confirmés de MN.

Tableau 2 : Indicateurs épidémiologiques décrivant l'importance médicale de la maladie de Newcastle dans les foyers confirmés (n=26) au Lac Alaotra en 2010
(Source : Rasamoelina-Andriamanivo, 2011)

Indicateur épidémiologique	Moyenne [min - max]		
	Poulets	Canards	Oies
Mortalité	48 % [18-75]	14 % [0-86]	5 % [0-26]
Létalité	85 % [63-98]	64 % [0-100]	82 % [0-100]

Ces résultats nous indiquent que :

- la MN est la principale cause des foyers de maladies aviaires meurtrières au niveau des élevages villageois. En effet, elle représentait 84 % des foyers dans cette étude ;
- La MN est très fréquente puisqu'il y a eu 151 foyers suspects sur les 357 localités surveillées soit 42 % ;
- C'est une maladie meurtrière, notamment pour les poulets car elle a tué 48 % des poulets présentes dans le village au moment du foyer. De même 85 % des poulets malades sont morts par la suite ;
- Les palmipèdes sont concernés par la MN, même si cela est très rare dans la littérature. Les différences de chiffres entre la mortalité et la létalité indiquent que la maladie n'a concerné qu'une faible proportion de la population de palmipèdes (14 % et 5 % respectivement pour les canards et pour les oies). Cependant, la grande majorité de ceux qui sont tombés malades en sont morts, avec une létalité plus faible chez les canards comparés à l'oie (64 % vs 82 %). Selon les éleveurs, les palmipèdes mourraient très vite de la maladie. L'équipe d'investigation avait du mal à trouver des palmipèdes en pleine manifestation clinique pendant l'étude. Cependant, les analyses PCR ont montré 8 canards et 10 oies positifs, même s'ils étaient apparemment sains. Ce résultat montre aussi la possibilité d'un portage sain par les palmipèdes.

En 2012, il n'y a pas eu de composante investigation et description des foyers. Mais la surveillance participative a montré qu'il y a eu encore plus de foyers suspects pendant les 6 mois de surveillance. On est passé à 294 foyers suspects sur les 357 localités surveillées soit 82 %. La surveillance ciblée a permis de détecter 282 foyers suspects parmi les 294 sus-cités. (Rasamoelina-Andriamanivo *et al.*, In Prep).

Variation dans le temps

La variation dans le temps montre les différences de fréquence de la maladie entre les différents mois de l'année, et éventuellement sur plusieurs années.

Deux études nous permettent de faire cette description de l'évolution de la MN selon le temps : le suivi de troupeaux réalisé par Maminiana *et al.* en 1999-2000 (Maminiana *et al.*, 2007) et la surveillance épidémiologique réalisée au Lac Alaotra en 2010 et en 2012.

La Figure 3 montre l'évolution mensuelle de la survenue des cas de MN lors du suivi de troupeaux à Moramanga et à Ambohimangakely. L'incidence est l'indicateur épidémiologique montrant la proportion de nouveaux cas parmi la population exposée pendant la période d'étude.

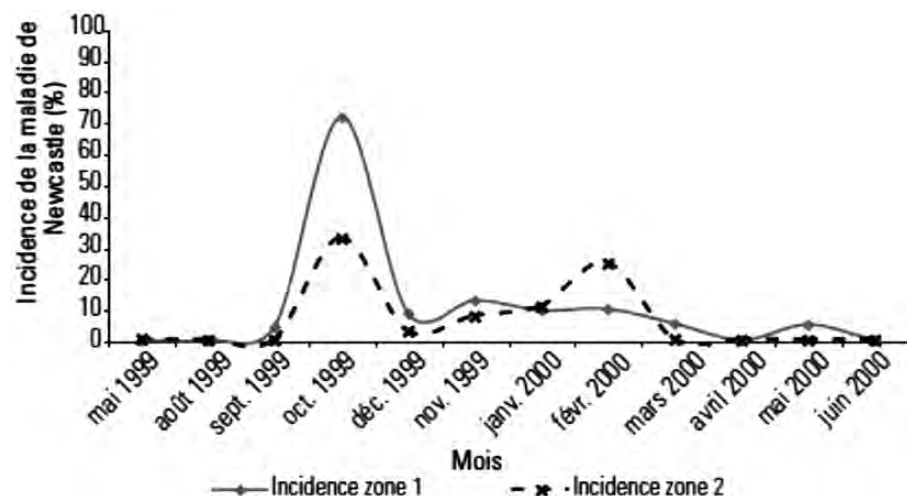


Figure 3 : Évolution intra-annuelle de l'incidence de la maladie de Newcastle lors du suivi de 30 élevages sis à Ambohimangakely (zone 1) et à Moramanga (zone 2), Madagascar, en 1999-2000
(Source : Maminiaina *et al.*, 2007)

La Figure 4 montre le résultat de la surveillance participative réalisée au Lac Alaotra en 2010 (Rasamoelina-Andriamanivo, 2011). L'histogramme a été construit à partir de la perception de fréquence de la maladie de Newcastle par les éleveurs. Chacune des 357 localités sous surveillance était représentée lors de ces ateliers participatifs.

Les résultats des deux études sont concordants. La MN survient toute l'année mais il y a une saisonnalité de l'occurrence de la maladie. La période d'occurrence maximale, ou le pic, a lieu en septembre et octobre, c'est-à-dire vers la fin de la saison sèche chaude.

En termes de variation interannuelle, on peut supposer qu'il existe. En effet, les résultats de la surveillance au Lac Alaotra en 2010 et en 2012, montrent déjà une différence significative. Le nombre de foyers suspects de MN est passé de 151 (42 %) à 294 (82 %). Toutefois, une surveillance à plus long termes sur une même population serait nécessaire pour mieux évaluer cette évolution interannuelle de cette maladie.

Variation dans l'espace

La MN est réputée exister sur tout le territoire malgache. Mais il n'y a pas de données suffisantes pour décrire les variations d'occurrence entre les différentes localités. Par contre, l'étude de prévalence réalisée en 2008 au Lac Alaotra et dans le Grand-Antananarivo (Rasamoelina-Andriamanivo *et al.*, 2012) a bien montré une différence significative entre ces deux zones. Ce résultat suggère donc que les prévalences de la MN peuvent varier entre les différentes localités. Si on veut identifier les zones et les localités les plus à risque en termes de foyers de MN, d'autres études de surveillance sur une couverture plus large seraient nécessaires.

Les facteurs de risque de la maladie de Newcastle à Madagascar

Facteurs associés à l'agro-écosystème

La différence significative des prévalences sérologiques au Lac Alaotra et à Antananarivo pourrait s'expliquer par les différences des deux zones sur le plan agro-écosystème (Rasamoelina-Andriamanivo, 2012). En effet, les différences majeures entre ces deux zones sont :

- La présence d'une surface très importante de rizières au Lac Alaotra, la première zone de production rizicole du pays ;
- La présence d'un plan d'eau important (le Lac Alaotra étant le plus grand lac du pays) ;
- La fréquentation du lac Alaotra par de multiples espèces d'oiseaux sauvages ;
- La densité de palmipèdes dans la région du lac Alaotra qui est la première zone de production d'ois du pays. Cette population importante de palmipèdes implique une mixité des élevages avec quelquefois les palmipèdes et les poulets qui sont logés dans un même bâtiment exigu, favorisant la transmission interspécifique du virus. En effet, même si les résultats de surveillance (Rasamoelina-Andriamanivo, 2011) ont montré la possibilité d'avoir des palmipèdes porteurs sains du virus.

Ces différents éléments sont déjà connus dans la littérature comme étant des facteurs de risque de la MN dans d'autres endroits (Alexander, 2003 ; Otim-Onapa *et al.*, 2006).

Facteurs associés à la commercialisation

Dans l'étude transversale réalisée en 2008 au Lac Alaotra et dans le Grand-Antananarivo, une typologie d'élevage avait été réalisée selon l'exposition aux facteurs de risque de MN. Les types d'élevage identifiés ont ensuite été comparés en termes de prévalence. Les résultats ont montré que les types d'élevage fréquentés par les collecteurs de volailles ou d'œufs avaient une prévalence plus élevée de la MN. D'ailleurs, les éleveurs et les rapports d'études (Maminiaina *et al.*, 2007 ; Rajaoherinirina, 2003) qui ont eu lieu jusque-là, rapportent tous cette suspicion par rapport au rôle joué par les intervenants des filières dans la dissémination de la MN.

Le rôle des marchés de volailles vivantes dans la concentration d'animaux infectés puis leur diffusion entre les différents villages, constituent une des hypothèses fortes de facteurs de risque. Ils sont connus des éleveurs comme un comportement à risque. En 2010, ce lien entre le réseau de commercialisation et la diffusion du virus de la MN a été établi au Lac Alaotra (Rasamoelina-Andriamanivo *et al.*, 2014). Plus un Fokontany avait des connexions commerciales avec les autres Fokontany et plus il était le carrefour en termes de commerces de volailles, plus le risque d'avoir un foyer de Newcastle était élevé.

La dynamique du cheptel et la saison

La dynamique intra-annuelle de la MN, avec le pic épidémique en septembre et octobre, amène à penser à l'impact de la saison. L'explication de ce pic relève en fait de plusieurs aspects (Maminiaina *et al.*, 2007 ; Rasamoelina-Andriamanivo, 2011) :

- L'augmentation de la taille du cheptel aviaire « naïf » dans les villages. En effet, les périodes de ponte des poules ont souvent lieu après les périodes de récolte de riz du fait de la disponibilité alimentaire. Cette période va d'avril à juillet. Ces jeunes volailles gardent leurs anticorps maternels jusqu'à 4 semaines d'âge au plus et deviennent ensuite complètement sensible au virus (Allan et Gough, 1974). Il y a alors une concentration importante de jeunes poulets de quelques mois en septembre et octobre ;
- La période de septembre-octobre correspond à une intersaison entre la saison sèche chaude et la saison pluvieuse. La forte chaleur et cet effet intersaison pourraient être une source de stress pour les volailles en les rendant plus fragiles ;
- C'est aussi la période de rentrée des classes, et il y a généralement une augmentation importante des ventes de volailles par les éleveurs pour subvenir au frais de scolarisation. L'augmentation du flux de volailles vendus et qui intègrent le circuit de commercialisation, pourrait aggraver la diffusion de virus entre les villages.

Un effet saison, combiné avec la dynamique du cheptel pourrait donc expliquer ce pic. La transmission serait ensuite favorisée par l'intensification de la commercialisation.

Les impacts socio-économiques de la maladie de Newcastle à Madagascar

L'étude économique basée sur les données de 2010 (Rakotondrabe, 2013) a estimé le chiffre d'affaire de l'aviculture malgache (Tableau 1) mais aussi les impacts socio-économiques annuels de la MN, notamment pour l'aviculture villageoise. Le coût annuel de la MN pour l'aviculture villageoise est évalué à 15,7 milliards d'Ariary (4,5 millions d'euros) soit 15 % du chiffre d'affaire de la filière. Ce coût se décompose en coût de mortalité (15,4 milliards d'Ariary) et en coût de vaccination (0,3 milliards d'Ariary). Les calculs de ces coûts étaient basés sur la fréquence et la mortalité dues à la MN, lors de la surveillance au Lac Alaotra en 2010. Cependant, on sait qu'en 2012, il y a eu une augmentation significative de la fréquence des foyers de maladie. Cela implique qu'en fonction des années, ce coût de la MN peut encore varier considérablement.

Pour les élevages de poulets de chair ou de poules pondeuses, nous n'avons pas de données sur la fréquence des maladies. Normalement, la vaccination devrait limiter l'impact de la maladie puisqu'elle y est normalement systématique. Cependant, on sait que tous les éleveurs ne vaccinent pas, soit par choix, soit par problème d'accès au vaccin (nombre de doses, coûts...) (Figuié et Rasamoelina-Andriamanivo, 2008). Pendant les différentes études effectuées, les éleveurs rapportaient la présence quelquefois de la maladie de Newcastle dans leurs élevages. Mais, il faudrait encore d'autres études pour pouvoir quantifier la fréquence et les impacts de la MN dans ce type d'élevage.

Les stratégies de lutte à déployer à Madagascar

Les services vétérinaires sont l'autorité compétente en matière de gestion de la lutte contre les maladies infectieuses animales comme la MN. Nous ne prétendons pas formuler le programme national de lutte contre cette maladie. Il s'agit d'une synthèse des résultats des travaux de recherche effectués sur la

MN dans le cadre des projets GRIPAVI et PARRUR Newcastle, tous deux financés par la Coopération française. A partir des expériences reçues via les différentes activités de recherche, nous formulons aussi quelques recommandations ou propositions en termes de stratégies de lutte.

LE RÔLE CLÉ DE LA SURVEILLANCE ÉPIDÉMIOLOGIQUE

Intérêts

Dans le contexte de Madagascar, il y a deux principales raisons qui justifient la surveillance épidémiologique de la MN :

- D'abord parce qu'il faut être capable de mesurer l'évolution de la fréquence de la maladie dans le temps et entre les différentes localités. Il est en effet important de suivre la progression de la maladie pour décider des mesures de contrôles adéquates (mettre en place, poursuivre ou encore réorienter les mesures de lutte).
- Ensuite, parce que seule la surveillance permet de mettre en place un système d'alerte précoce. Même s'il y a régulièrement des foyers de la maladie un peu partout sur le territoire, on sait que l'importance de ces foyers peut varier de façon considérable. Nous avons vu par exemple au Lac Alaotra, que le nombre de suspicions de foyers de MN est passé de 151 à 294 entre 2010 et 2012. Identifier précocement le départ des foyers permettrait d'en limiter l'expansion. Les mesures de contrôle qui vont dans ce sens seront développées dans une section ultérieure de ce document.

Comparaison de différentes méthodes de surveillance

Plusieurs méthodes de surveillance de la MN ont été comparées dans la zone du Lac Alaotra : surveillance passive, surveillance participative et surveillance ciblée.

La surveillance passive consistait en l'implication des chefs de Fokontany, des vétérinaires et de leurs réseaux de techniciens et d'agents communautaires de santé animale. Ces acteurs de terrain alertaient l'équipe d'animation en cas de foyer suspect de la maladie (équipe locale du FOFIFA/DRZV et du service vétérinaire régional). L'équipe descendait sur place pour faire des prélèvements et effectuer une enquête d'investigation de foyer.

La surveillance participative impliquait les mêmes acteurs que la surveillance passive. Mais l'équipe d'animation descendait sur le terrain, dans chaque commune, pour réaliser des ateliers participatifs avec ces acteurs de terrain. Ces ateliers permettaient de décrire tous les foyers de maladie aviaire qui se sont passés dans les différentes localités et de vérifier s'il y a eu la MN.

Pour ce qui est de la surveillance ciblée, elle a été possible grâce aux résultats préalables des projets de recherche sur la caractérisation du réseau de commercialisation de volailles et la circulation du virus de la MN en son sein. Les postes de surveillance étaient occupés par des commerçants au niveau des trois plus grands marchés de volailles du Lac Alaotra (Morarano Chrome, Madiotsifafana-Ambatondrazaka et Imerimandroso). En cas de suspicion de MN au niveau de ces marchés, ces commerçants avertissaient l'équipe d'animation. Une enquête téléphonique de traçage du foyer (Eames et Keeling, 2003 ; Keeling et Eames, 2005) via le circuit de commercialisation était effectuée pour vérifier s'il y a la maladie dans les Fokontany, en amont et en aval du marché.

La comparaison de ces différentes méthodes de surveillance a été basée sur les critères suivants :

- La sensibilité : c’est la capacité de détection de foyers de MN par la méthode de surveillance ;
- La spécificité : c’est la capacité de la méthode de surveillance à détecter de vrais foyers, ou en d’autres termes, d’éviter les fausses alertes ;
- Le coût de la mise en œuvre qui est toujours un critère primordial ;
- La promptitude : c’est la rapidité de la méthode pour détecter les foyers, ou en d’autres termes l’alerte précoce.

La surveillance passive avait l’avantage de permettre une alerte précoce, avec une possibilité de descente, d’investigation des foyers et d’intervention pour en limiter l’expansion. Les prélèvements et analyses biologiques étaient possibles et par conséquent, les diagnostics étaient bien établis. Mais cette méthode de surveillance coûtait cher et souffrait d’un manque de sensibilité. En tout, elle n’avait détecté qu’un tiers des foyers qui ont eu lieu pendant la période d’étude.

La surveillance participative avait comme principaux avantages un coût faible et une capacité de détection élevée. En effet, réalisée avec les mêmes acteurs que la surveillance passive, elle avait permis de détecter cinq fois plus de foyers que cette dernière. En termes de spécificité, on se base sur la connaissance des acteurs de terrain. Les résultats ont montré que 84 % des suspicions de ces acteurs de terrain étaient réellement des foyers de MN, ce qui représente une bonne spécificité. Mais l’inconvénient de cette méthode est qu’elle ne permet pas de faire de l’alerte précoce puisque la détection des foyers se fait de manière rétrospective pendant les ateliers participatifs. L’autre difficulté associée à cette méthode est sa dépendance vis-à-vis de la motivation des participants. Quelquefois, les acteurs de terrain ont demandé une compensation, comme avec les grands projets de développement, pour participer aux ateliers participatifs. Cette compensation, si elle était, impacterait sur le coût total.

La surveillance ciblée a permis une bonne détection (96 % des foyers ont été détectés). Le coût était faible puisque la surveillance sur le terrain ne concernait que trois endroits et que le reste était fait par téléphone. La spécificité est au moins la même que lors de la surveillance participative puisque c’était les mêmes acteurs de terrain. Mais la surveillance ciblée permettait aussi une alerte précoce voire même une prédiction de certains foyers. En effet, l’appel téléphonique des Fokontany à risque, permettait de vérifier s’il y avait déjà un foyer ou non, mais elle permettait aussi de prévenir les acteurs de terrain que la probabilité de survenue de foyer était élevée. Cette détection précoce des foyers pouvait permettre d’envoyer une équipe pour faire des prélèvements biologiques pour confirmer le diagnostic et améliorer ainsi la spécificité. Le principal inconvénient de cette méthode était qu’elle demandait une appropriation de l’outil développé spécifiquement pour identifier les Fokontany à risque à appeler en fonction de l’origine des volailles malades détectées au niveau des marchés.

Le Tableau 3 présente une synthèse de la comparaison de ces 3 méthodes de surveillance.

Ces méthodes de surveillance comparées étaient toutes de la surveillance locale, limitée à la zone du Lac Alaotra, leur mise à l’échelle au niveau national est une autre question. On peut supposer que les avantages et les inconvénients resteraient les mêmes pour la surveillance passive et la surveillance participative. Mais pour ce qui est de la surveillance ciblée, la caractérisation du risque est une étape préalable. Les résultats, pour le Lac Alaotra avait donné une possibilité d’application opérationnelle en termes de surveillance. Mais on ne sait pas ce qu’il pourrait en être pour les autres régions. En tout cas, la surveillance ciblée, telle qu’elle a été réalisée au Lac Alaotra n’est pas extrapolable en l’état à d’autres régions de Madagascar.

Tableau 3 : Synthèse de la comparaison de trois méthodes de surveillance de la maladie de Newcastle au Lac Alaotra, Madagascar en 2010 et en 2012

Types de surveillance	Sensibilité	Spécificité	Coût *	Alerte précoce
Surveillance passive	+	++++	+	++++
Surveillance participative	++++	++	+++	+
Surveillance ciblée	+++	+++	++	++++

* Coût : le nombre de + est faible si le coût est élevé (c’est-à-dire moins avantageux)

La surveillance sentinelle

Actuellement, avec l’appui de la Commission de l’Océan Indien et dans le cadre du réseau régional SEGA One health, la Direction des Services Vétérinaires (DSV) a mis en place en 2014 un nouveau système de surveillance (DSV, 2015). Il s’agit d’une surveillance sentinelle, basée actuellement sur 22 vétérinaires sanitaires répartis dans 18 régions de Madagascar (Figure 5). Cette couverture géographique est censée évoluer avec un plus grand nombre de vétérinaires sentinelles. La MN fait partie des maladies surveillées par ce nouveau système.

En termes de performances, ce nouveau système de surveillance est intéressant puisqu’il couvre les grandes zones d’élevage du pays. De même, la promptitude devrait être très bonne puisque la transmission des données se fait via une application sur smartphones vers une base de données en ligne et accessible en temps réel par la DSV. Les vétérinaires sentinelles bénéficient de formations continues régulières, ce qui devrait garantir un certain niveau de qualité des données et de spécificité des alertes transmises. Mais comme toute surveillance sentinelle, en termes de sensibilité, seuls les foyers dans les sites sentinelles peuvent être détectés. Pour donner un exemple, pour la période de juillet à octobre 2015, ce système de surveillance a détecté 107 foyers de MN.

Par rapport aux intérêts de la surveillance de la MN, ce système mis en place par la DSV répond bien à l’objectif de suivi de l’évolution de la MN. Il répond aussi à l’objectif d’alerte précoce pour les sites sentinelles qu’il couvre.

La vaccination à Madagascar

La situation de la vaccination anti-Newcastle

Plusieurs vaccins contre la MN sont commercialisés à Madagascar. Ils sont fabriqués essentiellement à partir de trois souches : La Sota, Hichthner B1 et Mukteswar. Les deux premières sont des souches lentogènes et la souche Mukteswar est une souche mésogène. Dans les élevages de poulets de chair et de poules pondeuses, les éleveurs utilisent principalement les vaccins à base des souches La Sota ou Hichthner B1. En revanche, les éleveurs villageois utilisent généralement le vaccin PESTAVIA® (souche Mukteswar) qui est produit par l’Institut malgache des vaccins vétérinaires (IMVAVET).

Les essais expérimentaux et en milieu réel effectués ont tous montré l’efficacité de ces différents vaccins sur les souches circulantes du virus de la MN (Andriamanalina, 2001 ; Koko *et al.*, 2006 ; Maminiaina, 2011).

La couverture vaccinale contre la MN en aviculture villageoise est faible. En vérifiant les déclarations à l'OIE sur le nombre de doses vendues et la littérature traitant du sujet, le taux de vaccination au niveau national est en deçà de 10 % (Maminiaina, 2011 ; Rakotondrabe, 2013). En revanche, pour ce qui est des élevages de poules pondeuses et de poulets de chair, la vaccination contre la MN fait partie du programme de prophylaxie proposé par les accoueurs. Normalement, pour ces types d'élevage, la couverture vaccinale devrait être de 100 %. Mais les études effectuées (Figuié et Rasamoelina, 2008) ont montré que certains éleveurs ne font pas ces vaccinations.

LES CONTRAINTES DE LA VACCINATION

La faible couverture vaccinale

Une couverture vaccinale inférieure à 10 % est faible. Pourtant, le vaccin utilisé en aviculture villageoise est abordable en termes de prix puisque le prix d'un flacon de vaccin est l'équivalent du prix d'un poulet. Le problème du nombre de doses souvent soulevé comme une limite pour les éleveurs villageois (Alders et Spradbrow, 2000) ne devrait pas se poser car le vaccin est vendu par flacon de 50 doses. L'efficacité du vaccin a été prouvée (Koko *et al.*, 2006 ; Maminiaina, 2011). La couverture sanitaire en termes de vétérinaires est de 150 vétérinaires sanitaires pour toute l'île, avec chacun un réseau de techniciens. Il y a aussi les agents communautaires de santé animale formés par les ONG, notamment par Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières (AVSF), qui sont localisés au niveau des Fokontany. Enfin, il y a les vaccinateurs villageois formés par l'IMVAVET même, sous différentes dénominations (paysans vaccinateurs, chrétiens vaccinateurs...). La question se pose alors : « pourquoi le taux de vaccination est faible alors que le vaccin existe, le coût est abordable, l'efficacité a été prouvée et surtout la maladie tue et les pertes économiques sont importantes ? ». Deux études ont été effectuées pour répondre à cette question, l'une dans le Grand-Antananarivo (Figuié et Rasamoelina-Andriamanivo, (2008) dans le cadre du projet GRIPAVI, et l'autre au Lac Alaotra (Razandrinampela, 2015) dans le cadre du projet PARRUR Newcastle.

L'étude sur la perception de la vaccination par les éleveurs, réalisée à Antananarivo en 2008, a montré la logique des éleveurs par rapport à la vaccination. Il a été démontré que le fait de vacciner ou non les volailles ne relève pas d'un manque de connaissance ou de volonté mais est lié à une logique sociotechnique et au système existant. Les mesures prises ne sont pas uniquement ou forcément préventives, comme la vaccination. Mais elles peuvent aussi être des mesures d'atténuation des pertes, comme vendre les malades ou les manger. Certains types d'élevages, comme les canards gras ou les élevages de basse-cours avec très peu d'animaux se désintéressent de la vaccination. Les canards gras, parce qu'ils sont peu sensibles à la maladie et les petits élevages de basse-cour, parce qu'ils consomment les poulets en cas de mortalité. L'ensemble de ces éléments contribue à expliquer le faible taux de vaccination en aviculture villageoise. Par ailleurs, pour les élevages de poules pondeuses, certains éleveurs artisanaux ayant un faible effectif (< 200 têtes) sont dépendants de grands éleveurs (> 500 têtes) pour avoir le vaccin. En effet, ce type d'élevage utilise principalement les vaccins importés, conditionnés sous forme de 500 ou 1000 doses. Pour ne pas perdre en achetant ces vaccins, ces éleveurs artisanaux préfèrent attendre le surplus de doses chez les grands éleveurs.

Les travaux réalisés au Lac Alaotra en 2013 sur les déterminants socio-économiques de la vaccination contre la maladie de Newcastle montrent que :

- Les éleveurs qui ne vaccinent pas, ont un petit cheptel. Leur résilience par rapport à la maladie est plus élevée. Ils ne connaissent ni les vaccins et leurs prix, ni les vaccinateurs car ils ne sont pas intéressés.

- Les femmes et les personnes âgées ayant un niveau d'étude basique constituent un profil qui ne vaccine pas. Pourtant, ce profil constitue une proportion importante des éleveurs en milieu rural. Ce sont donc des groupes cibles majeurs.

L'accès au vaccin n'a pas été identifié comme un facteur limitant au Lac Alaotra. En effet, c'est l'une des régions qui a la meilleure couverture sanitaire. On dénombre une dizaine de vétérinaires avec leurs réseaux de techniciens et de vaccinateurs. Il y a aussi une quarantaine d'ACSA⁷, affiliés aux vétérinaires, et dont la vaccination contre la MN constitue l'une des activités majeures. Par ailleurs, au vu de l'importance des foyers, la Direction Régionale de l'élevage (DIREL) a organisé, avec la contribution de plusieurs partenaires locaux (association des vétérinaires, les ACSA, le projet BV Lac, la Région...), une campagne de vaccination officielle. L'ensemble de ces facteurs explique que le taux de vaccination au Lac Alaotra soit beaucoup plus élevé par rapport aux autres régions de l'île. En 2013, selon une étude réalisée dans cette région dans le cadre de PARRUR Newcastle, le taux de vaccination des poulets était de 41 %.

Pour ce qui est du reste du pays, il faudrait aussi identifier les déterminants de l'adoption ou non de la vaccination pour comprendre les raisons du faible taux de vaccination et prendre les mesures pour l'améliorer. Cependant, un facteur limitant connu porte sur le problème de la chaîne du froid puisque les vaccins disponibles localement sont tous des vaccins thermosensibles. Comme dans beaucoup de pays en voie de développement, l'insuffisance de l'électrification rurale limite la mise en place de cette chaîne du froid. C'est l'une des raisons majeures qui ont amené au développement des vaccins thermotolérants. Des recherches sont en cours actuellement au niveau de l'IMVAVET et du FOFIFA/DRZV pour mettre au point un vaccin local utilisant la souche I-2.

L'excrétion virale

Les différents vaccins disponibles et utilisés à Madagascar sont efficaces pour protéger les volailles contre la maladie clinique. Mais les animaux vaccinés continuent à excréter le virus sauvage jusqu'à 2 semaines après l'infection (Maminiaina, 2011). De plus, la souche Mukteswar utilisée dans le vaccin vivant (PestaviaND), est excrétée par les volailles vaccinées. L'excrétion des souches sauvages malgré la vaccination suppose que la vaccination n'est pas une mesure suffisante pour arrêter la transmission des virus entre les oiseaux, même si elle la réduit (Alders et Spradbrow, 2000). Par ailleurs, le vaccin à base de la souche Mukteswar est celui qui est le plus utilisé en aviculture villageoise. Le fait qu'il soit excrété par les animaux vaccinés pourrait constituer un problème. En effet, les phénomènes de recombinaisons des virus vaccinaux avec des virus sauvages sont connus être à l'origine d'une plus grande diversité génétique de la population virale (Chong *et al.*, 2010).

Une plus grande diversité génétique implique toujours des questions par rapport à la protection conférée par les vaccins existants et augmente les risques d'excrétion virale post-infection malgré la vaccination (Miller *et al.*, 2009). Pour le moment, ces virus vaccinaux ont été isolés chez des animaux sains, mais le regain de virulence de la souche au bout de quelques temps n'est pas à écarter (Roy et Venugopalan, 1998). Par exemple des virus vaccinaux ont été suspectés être à l'origine de foyers de MN chez des canards en Chine (Higgins, 1971).

⁷ Agent Communautaire de Santé Animale.

La vaccination des palmipèdes

La présence de virus de la MN a été démontrée chez des oies et canards apparemment sains et il y a eu des mortalités de palmipèdes dans des foyers confirmés de MN (Rasamoelina-Andriamanivo, 2011). La question sur la vaccination des palmipèdes revêt un double intérêt : (i) premièrement pour les protéger contre la maladie, vu qu'elles ont une plus grande valeur économique que les poulets ; (ii) pour réduire leur rôle sur la transmission des virus. En effet, au vu des taux de mortalité et de morbidité pour les différentes espèces, les palmipèdes sont quand même beaucoup plus résistants que les poulets, malgré les mortalités constatées, et peuvent constituer un réservoir de virus.

Il serait nécessaire, de mettre en place des protocoles de vaccination adaptés aux palmipèdes puisque le vaccin PestaviaND a surtout été mis au point pour les poulets. Dans la littérature, des essais de vaccination de canards se sont révélés efficaces contre l'excrétion des virus de la MN (Nishizawa *et al.*, 2007). Mais pour lutter contre les foyers de cette maladie sur des oies en Chine, les protocoles vaccinaux utilisés consistent à multiplier par 5 la dose pour les poulets (Li *et al.*, 2001 ; Dai *et al.*, 2008). Toujours en Chine, cette dose élevée de souche mukteswar a entraîné la maladie chez certains animaux du fait de la pathogénicité résiduelle de la souche, ce qui a impliqué la mise en place de nouveau protocole de vaccination basé sur une association des souches La Sota et Mukteswar (Dai *et al.*, 2008).

A Madagascar, dans le cadre de PARRUR Newcastle, nous avons tenté de mettre en place un protocole de vaccination des palmipèdes basé sur le vaccin PestaviaND et la souche La Sota. Mais du fait de l'insuffisance du niveau de biosécurité des infrastructures et surtout l'insuffisance de connaissance des déterminants de la pathogénicité des souches du virus sur les palmipèdes, l'expérience n'a pas abouti. En effet, il y a eu contamination des animaux d'expérience par le virus. De plus, les souches de virus disponibles ne permettaient pas de faire les épreuves vaccinales (tester l'efficacité des vaccins), car elles n'étaient pas certaines de tuer 100 % des palmipèdes infectés. Cette mise au point de vaccin adapté aux palmipèdes reste un axe de recherche important à approfondir pour contribuer au contrôle de cette maladie à Madagascar.

Quelques pistes d'amélioration

Ces différentes contraintes de la vaccination limitent son efficacité dans le contrôle de la maladie de Newcastle. De plus, il est également connu que la dynamique d'effectif de populations avicoles villageoises fait en sorte qu'il y a toujours une fraction d'animaux non immunisée (Awan *et al.*, 1994, Lesnoff *et al.*, 2009). Toutefois, le contexte socio-économique du pays, et surtout le niveau de prévalence de la maladie, qui reste encore très élevé, font que la vaccination reste la méthode la plus importante pour réduire la fréquence des foyers et l'impact économique de la maladie. Nous présentons ici, sans prétendre d'être exhaustif, quelques pistes basées sur nos expériences de terrain pour améliorer la situation de la vaccination à Madagascar.

A l'exemple du Lac Alaotra, l'organisation de campagne de vaccination officielle, en privilégiant des partenariats publics-privés, peut améliorer de façon considérable le taux de vaccination. La DSV est en cours de réaliser la hiérarchisation des maladies prioritaires à Madagascar. Si la MN fait partie des maladies prioritaires, peut-être que les campagnes de vaccination contre celle-ci, seront organisées à une échelle plus large. La variation de la fréquence des foyers de MN, dans le temps, indique clairement un pic en septembre-octobre. Il est conseillé de réaliser les campagnes de vaccination un mois avant la période de pic (Alders et Spradbrow, 2000). Au lac Alaotra, une cession de sensibilisation était bien sûr organisée pour convaincre les éleveurs à participer à la campagne (Figure 6). Les études sur les déterminants socio-économiques de la vaccination ont montré qu'il existe des groupes cibles majeurs. Il serait aussi important de centrer les campagnes de sensibilisation sur ces groupes en privilégiant le potentiel de l'aviculture villageoise.

Les contraintes de la vaccination que nous avons identifiées soulèvent encore plusieurs questions ou axes de recherche. On peut citer les déterminants socio-économiques de la vaccination à plus large échelle, la question sur le vaccin adapté aux palmipèdes, la problématique de l'excrétion virale et enfin le développement de vaccins thermotolérants. Il est important de continuer ces recherches mais il est tout aussi important de garder le lien entre la recherche et les gestionnaires du risque (la DSV, les vétérinaires et les éleveurs) afin de faciliter l'appropriation et l'application des résultats.

Bonnes pratiques d'élevage

La vaccination est un outil indispensable pour réduire la prévalence et les impacts économiques de la maladie. Mais elle est insuffisante à elle seule pour contrôler la maladie. Les travaux de modélisation de Mraidi (2014) ont confirmé que l'importance des réservoirs de virus (milieu naturel, palmipèdes), l'excrétion virale par les poulets vaccinés et la dynamique naturelle de la population de volailles font que la vaccination seule, dans le contexte actuelle de Madagascar, ne suffirait pas à contrôler la MN.

Au vu des facteurs de risque identifiés, plusieurs recommandations pratiques peuvent être formulées directement aux éleveurs :

- La séparation des palmipèdes et des poulets au moins dans les bâtiments où ils sont logés la nuit (Figure 7) ;
- Le renouvellement, autant que possible, à partir d'autres exploitations au lieu d'acheter au marché ou aux collecteurs (Figure 8). Mais il faudrait s'assurer avant l'achat du statut sanitaire de l'élevage d'origine des volailles, au moins sur le plan clinique. Dans tous les cas, il faut éviter de faire toute introduction de nouveaux animaux pendant les périodes où la maladie sévit le plus. Il faut également éviter l'entrée des collecteurs de volailles dans l'exploitation lors des ventes de volaille ;
- La quarantaine simple des nouveaux animaux introduits : En pratique, elle pourrait être effectuée de différentes manières, l'objectif étant juste d'éviter le contact rapproché avec les volailles de l'exploitation. Les animaux peuvent par exemple rester dans des cagettes en bambou (ou « garaba ») très utilisées localement, et séparés des autres volailles (enclos à part, bâtiment) pour éviter tout contact le temps de la quarantaine (Figure 9). Cette recommandation est aussi valable pour les volailles invendues qui reviennent du marché ;
- L'application d'un bon nettoyage-désinfection et la mise en place d'un vide sanitaire suffisant permettent d'assainir les fermes après un passage de virus de MN.

Contrôle au niveau du circuit de commercialisation

Le rôle du circuit de commercialisation dans la transmission de la MN a été largement démontré. Il convient donc de proposer des mesures de contrôles à ce niveau. Dans le cadre de PARRUR Newcastle, nous avons évalué la perception des collecteurs et commerçants au niveau des marchés de volailles vivantes sur la possibilité d'application de plusieurs mesures de prévention. Ce sont des mesures qui ont fait, par ailleurs leurs preuves dans le cadre de contrôle d'autres maladies infectieuses et contagieuses au niveau des circuits de commercialisation (Kung *et al.*, 2003). Il s'agit de :

- Exiger que seules les volailles vaccinées puissent aller au marché.
- Séparer les espèces, notamment les palmipèdes et les poulets ;
- Faire un nettoyage-désinfection systématique des matériels utilisés et du marché ;
- L'établissement de jour de repos, notamment pour les marchés journaliers.

Les résultats de cette étude ont montré que la MN est une source de perte pour les commerçants. En effet, les volailles malades sont, soient invendables surtout en cas de mortalité, soient vendus à des prix modiques. Ils sont donc preneurs de propositions pour atténuer l'impact de cette maladie. Parmi les mesures proposées, la séparation des espèces est la seule mesure impossible à appliquer pour eux. En effet, cela impliquerait plus d'investissements en matériels de leur part pour répartir les différentes espèces. Mais surtout parce qu'il deviendrait impossible pour une seule personne de réaliser la vente de toutes des volailles si celles-ci sont à différents endroits. En revanche, les autres mesures ont été très bien perçues, notamment l'exigence d'un statut vacciné, éventuellement contrôlable via un carnet de vaccination. Le jour de repos du marché ont été très bien pris.

Gestion des foyers

Les foyers de MN sont courants. En aviculture villageoise, les éleveurs se sentent souvent démunis en termes de possibilité de lutte quand la maladie arrive. La vente d'urgence est souvent pratiquée pour atténuer les pertes. Par ailleurs les collecteurs évitent de passer dans les villages où la maladie sévit. On peut alors se poser la question comment faire pour atténuer l'impact de ces foyers de MN et limiter leur expansion ?

Voici quelques propositions de mesures qui devraient être à la portée des éleveurs, mais qui demandent aussi un certain niveau de solidarité et de responsabilité de la part de la communauté rurale dans les villages où il y a les foyers :

- Isoler toutes les poules malades : L'endroit utilisé pour la quarantaine des nouveaux animaux peut être valorisé pour cela. On pourrait même suggérer aux éleveurs d'abattre rapidement les premiers poulets malades pour éviter la contamination du reste du lot. Dans tous les cas, il faut au moins abattre les poulets très malades. Il faut éviter de transporter les poules malades ou mortes vers d'autres élevages indemnes de la maladie ou en dehors du village ;
- Conscientiser les éleveurs sur le rôle des cadavres d'animaux ou de tout autre déchet provenant des animaux malades, notamment les plumes, ainsi que sur la persistance et la diffusion du virus. Cela implique d'éliminer correctement ces produits en cas de mortalités de volailles due à la maladie. Il s'agit d'enterrer ou brûler toutes les poules mortes ainsi que tout autre déchet qui lui sont associés (plumes, fèces...) ;
- A l'intérieur des villages où la maladie sévit, les éleveurs négligent souvent la transmission passive du virus via le contact avec des personnes, des voitures, des animaux qui ont été en contact avec des volailles infectées. Les chiens et les chats font partie des vecteurs passifs ou mécaniques possibles, alors qu'il faudrait limiter leurs accès aux volailles et notamment aux cadavres de volailles. Les agents de santé animale (vétérinaires et leurs équipes), en période de maladie, sont souvent appelés et passent de village en village et d'élevage en élevage. Il doivent prendre les dispositions nécessaires de nettoyage, de changement de vêtements et de chaussures et de désinfection avant de changer de lieu d'intervention (élevage, village) ;
- La vaccination a encore toute sa place, même en cas de présence de la maladie dans le village. Il ne faut pas vacciner les poulets qui présentent déjà les signes de la maladie. Par contre, dès le signalement d'apparition de la maladie dans les villages voisins ou encore dans d'autres élevages à l'intérieur du village, il faut vacciner rapidement les volailles apparemment saines. On parle alors dans ce cas de vaccination d'urgence. Par ailleurs, les vétérinaires et leurs équipes et/ou les services vétérinaires régionaux peuvent aussi organiser une vaccination autour des foyers pour limiter les mortalités mais aussi pour éviter l'extension de ces foyers. On parle alors de vaccination en anneau.

Place de la communication

L'importance de la sensibilisation a déjà été évoquée pour la vaccination contre la MN. Mais en réalité, la communication est indispensable pour améliorer la perception des différents acteurs sur l'importance de l'aviculture, les impacts de MN sur les filières avicoles, mais aussi sur les mesures de lutte possible.

A titre d'exemple, certains éleveurs ne connaissent pas le potentiel économique de l'élevage des volailles et souvent les sous-exploitent ou les négligent. Cela est valable aussi pour certains décideurs. Les différents acteurs de l'aviculture villageoise ont l'habitude de voir régulièrement des foyers de MN avec les mortalités de volailles qu'ils entraînent mais sans avoir une idée sur le coût économique que ces mortalités représentent. Pour rappel, en reprenant l'étude de Rakotondrabe (2013), le chiffre d'affaire de l'aviculture traditionnelle est estimé à 106,5 milliards d'Ariary. Il est plus élevé que celui des élevages de poules pondeuses ou encore celui des élevages de poulets de chair. Les pertes dues à la MN représentent 15 % de ce chiffre d'affaire soit 15,7 milliards d'Ariary.

Les éleveurs et les autres acteurs du secteur se sentent limités en termes de possibilité d'intervention. Mais nous avons vu qu'il existe plusieurs mesures qui peuvent être prises au niveau des élevages, comme au niveau du circuit de commercialisation.

La nécessité d'une recherche d'accompagnement en parallèle aux interventions de lutte paraît évidente mais encore faut-il que les chercheurs et les gestionnaires du risque travaillent ensemble avec la même vision.

Dans le cadre de PARRUR Newcastle, il y a eu une campagne de sensibilisation des éleveurs à travers un spot télévisé, un publi-reportage télévisé, des émissions radio et des affiches et posters (Figures 9 et 10). Les zones cibles étaient le Lac Alaotra et l'Itasy. L'évaluation de l'impact de cette campagne de sensibilisation a été effectuée au mois de février 2016. L'analyse des données est encore en cours mais cette étude nous permettra de connaître les enjeux, les difficultés et l'efficacité d'une campagne de communication. Ces résultats sont importants pour préparer une mise à l'échelle éventuelle et pour de futures campagnes de communication sur la MN.

Conclusion

La MN est la première maladie aviaire en aviculture villageoise en termes de fréquence et d'impacts socio-économiques à Madagascar. Des méthodes de lutte adaptées au contexte du pays sont disponibles, incluant la surveillance, la vaccination, les bonnes pratiques d'élevage et de commercialisation et la gestion des foyers. Plusieurs questions restent posées et de nouveaux outils sont encore à développer (exemples : les vaccins thermotolérants, le vaccin pour les palmipèdes). Les capacités de recherche pour les réaliser sont disponibles. Mais la dimension socio-économique et la communication, souvent négligées par les techniciens, doivent faire l'objet d'attention particulière pour améliorer les chances de réussite des mesures de contrôle de cette maladie.

Références bibliographiques

- Alders RG. et Spradbrow PB., 2000 : *Newcastle disease in Village Chickens* : A Field Manual. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra ; 70 p.
- Alexander DJ., Campbell G., Manvell R.J., Collins MS., Parsons G. et McNulty MS., 1992 : Characterisation of an antigenically unusual virus responsible for two outbreaks of Newcastle disease in Republic Ireland in 1990. *Vet Rec.* 1992; 130: 65-68.
- Alexander DJ., Manvell R.J., Frost KM., Pollitt W.J., Welchman D. et Perry K., 1997 : An outbreak of Newcastle disease in pheasants in Great Britain in May 1996. *Vet Rec.*; 140: 20-22.
- Alexander DJ., 2000 : Newcastle disease and other avian paramyxoviruses. *Rev Sci Tech.* 19 (2): 443-462.
- Alexander DJ., 1997 : Newcastle disease and other paramyxoviridae infections. In: Diseases of poultry, 10th ed, Calnek BW., Barnes H.J., Beard CW, McDougald LR. et Saif YM. (eds). Iowa State University press, Ames, USA ; 541- 569.
- Allan WH. et Gough RE., 1974 : A standard haemagglutination-inhibition test for Newcastle disease. A comparison of macro and micro methods. *Vet Rec.*; 95: 120-123.
- Amakye-Anim J., Awuni J.A., Coleman T. et Sedor V., 2000 : *Ghanian trials with a rurally produced thermostable Newcastle disease vaccine (strain I2) in chickens*. 26th Animal Science Symposium Ghana, Animal Science Association Kumasi, University of Science and Technology.
- Andriamanalina H., 2002 : *Influence de la vaccination sur la maladie de Newcastle et la pasteurellose aviaire dans la Commune rurale d'Andina*. [Mémoire d'Ingéniorat en Agronomie]. Université d'Antananarivo/Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. 95 p.
- Asplin F., 1949 : Observations on the viability of Newcastle disease virus. *Vet Rec.* 61: 159-160.
- Awan MA., Otte M.J. et James AD., 1994 : The epidemiology of Newcastle disease in rural poultry: a review; *Avian Pathol.* 23: 405-423.
- Bell J.G., Kane M. et Le Jan. C. 1990 : An investigation of the disease status of village poultry in Mauritania. *Prev Vet Med.* 8:291-294.
- Bensink Z. et Spradbrow PB., 1999 : Newcastle disease virus strain I2, a prospective thermostable vaccine for use in developing countries. *Vet. Microbiol.* 68: 131- 139.
- Boyd R.J. et Hanson R.P., 1958 : Survival of Newcastle disease virus in nature. *Avian Dis.* 2: 82-93.
- Bozogrmehrfard M.H. et Keyvanfar H., 1979 : Isolation of Newcastle disease virus from teals (*Anas crecca*) in Iran. *J Wildl Dis.* 15 (2): 335-337.
- Capua I, Dallapozza M., Mutinelli F., Marangon S., Terregino C., 2002 : Newcastle disease outbreaks in Italy during 2000. *Vet. Rec.* 150 (18): 565-568.
- Cardinale E., Rasamoelina Andriamanivo H., Sutter C., Benard C., Biarmann M., E. Foex E., Meenowa D., Melanie J., Mérot P., Moutroifi Y., Razafimandimby H. et Flachet L., 2015 : *Bulletin d'information épidémiologique n°17. AnimalRisk et SEGA One health*. 11 p. [En ligne] http://www.animalrisk-oi.org/fr/2_10/5154/bulletins-d-informations-epidemiologiques.html consulté le 16/06/2016.
- Chaka H., Goutard F., Roger F., Bisschop S.P. et Thompson P.N., 2013 : Household-level risk factors for Newcastle disease seropositivity and incidence of Newcastle disease virus exposure in backyard chicken flocks in Eastern Shewa zone, Ethiopia. *Prev Vet Med.* 109 (3-4): 312-320.
- Chang P.W., 1981 : *Newcastle disease*. In: Beran GW, eds. CRC Handbook series in zoonoses, section B: viral zoonoses. Vol. II. Boca Raton, Fla: CRC Press Inc. 261-274.

- Chong Y.L., Padhi A., Hudson P.J. et Poss M., 2010 : The effect of vaccination on the evolution and population dynamics of avian paramyxovirus-1. *PLoS Pathog.* 6(4): e1000872.
- Collins MS., Alexander DJ., Brockman S., Kemp P.A. et Manvell R.J., 1989 : Evaluation of mouse monoclonal antibodies raised against an isolate of the variant avian paramyxovirus type 1 responsible for the current panzootic in pigeons. *Arch. Virol.* 104: 53-61.
- Dai Y., Liu M. et Li W., 2008 : Protective Efficacy of Commercial Newcastle Disease Vaccines Against Challenge of Goose Origin Virulent Newcastle Disease Virus in *Geese Avian Dis.* 52(3): 467-471.
- Dao TD. et Pham C., 1985 : *National overviews: Vietnam*. In: Della-Porta A J (editor) *Veterinary viral diseases: their significance in south-east Asia and the western Pacific*. Acad Press, Sydney. 246-250.
- Dias PT., Alders RG., Fringe R. et Mata BV., 2001: *Laboratory and Field Trials with Thermostable Live Newcastle Disease Vaccines in Mozambique*. In: Alders RG et Spradbrow PB. ed. SADC Planning Workshop on Newcastle Disease Control in Village Chickens. ACIAR Proceedings of an International Workshop, Maputo, Mozambique, 6-9 March 2000. 103: 91-96.
- Doyle T.M., 1927 : A hitherto unrecorded disease of fowls due to a filter- passing virus. *J. Comp. Pathol Ther.* 40:144-169.
- Eames KTD. et Keeling M.J., 2003 : *Contact tracing and disease control*. *Proc R Soc Lond B* 2003; 270: 2565-2571 doi: 10.1098/rspb.2003.2554.
- East I., Kite V., Daniels P. & Garner G., 2006 : A cross-sectional survey of Australian chicken farms to identify risk factors associated with seropositivity to Newcastle-disease virus, *Preventive Veterinary Medicine.* 77 (3-4): 199-214.
- Estudillo J., 1972 : *A Newcastle disease outbreak in captive exotic birds*. In *Proc. 21st West Poultry Dis. Conf.* University of California. 70-73.
- FAO. 2016 : *Statistics of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*. FAOSTAT Statistics division. 2016. [En ligne] <http://faostat3.fao.org/> consulté le 16/06/2016.
- Figuié M. et Rasamoelina Andriamanivo H., 2008 : *Perceptions et pratiques de vaccination contre la maladie de Newcastle (NCD) chez les éleveurs de volailles malgaches*. Rapport de mission, projet GRIPAVI. CIRAD Montpellier, France. 19 p.
- Gould A.R., Kattenbelt J.A., Selleck P., Hansson E., Della-Porta A.J. et Westbury H.A., 2001 : Virulent Newcastle disease in Australia: molecular epidemiological analysis of viruses isolated prior to and during the outbreaks of 1998-2000. *Virus Res.* 77: 7751-7760.
- Higgins D.A., 1971 : Nine disease outbreaks associated with myxovirus among ducks in Hong Kong. *Trop Anim Health Prod.* 3: 232-240.
- Hlinak A., Muhle R.U., Werner O., Globig A., Starick E., Schirrmeier H., Hoffmann B., Engelhardt, Hubner D., Conraths F.J., Wallschläger D., Kruckenberg H. et Müller T., 2006 : A virological survey in migrating waders and other waterfowl in one of the most important resting sites of Germany. *J Vet Med B.* 53: 105-110.
- Jintana D., 1987 : Thailand : Poultry production. In: Cupland J.W. (Eds). *Newcastle disease in poultry*. A new food pelleted. ACIAR monograph. N° 5. ACIAR, Canberra, 108-109.
- Johnston K.M. et Key D.W. 1992 : Paramyxovirus-1 in feral pigeons (*Columba livia*) in Ontario. *Can Vet J.* 1992; 33: 796-800.
- Jorgensen P.H., Handberg K.J., Ahrens P., Therkildsen O.R., Manvell R.J. et Alexander DJ., 2004 : Strains of avian paramyxovirus type 1 of low pathogenicity for chickens isolated from poultry and wild birds in Denmark. *Vet Rec.* 154: 497-500.
- Jorgensen P.H., Handberg K.J., Ahrens P., Hansen H.C., Manvell R.J. et Alexander DJ., 1999 : An outbreak of Newcastle disease in free-living pheasants (*Phasianus colchicus*). *J Vet Med B.* 46: 381-387.
- Kaleta E.F. et Baldauf C., 1988 : *Newcastle disease in free-living and pet birds*. Alexander DJ (Ed.), Newcastle Disease, Kluwer Academic Publishers, Boston. 197-246.

Kaleta EF., Alexander DJ. et Russel PH., 1985 : The first isolation of the avian PMV-1 virus responsible for the current panzootic in pigeons. *Avian Pathol.* 14: 553-557.

Kapczynski DR., Wise MG. et King DJ., 2006 : Susceptibility and protection of naïve and vaccinated racing pigeons (Columbia livia) against exotic Newcastle disease virus from the California 2002-2003 outbreak. *Avian Dis.* 50: 336-341.

Keeling MJ. et Eames KTD. 2005 : Networks and epidemic models. *J. R. Soc. Interface.* 2, 295-307. doi: 10.1098/rsif.2005.0051.

Kim LM., King DJ., Suarez DL., Wong CW. et Afonso CL., 2007 : Characterization of class I Newcastle disease virus isolates from Hong Kong live bird markets and detection using real-time reverse transcription-PCR. *J. Clin. Microbiol.* 2007; 45: 1310-1314.

Kinde H., Utterback W., Takeshita K. et McFarland M., 2004 : Survival of exotic Newcastle disease virus in commercial poultry environment following removal of infected chickens. *Avian Dis.* 48: 669-674.

King DJ. et Seal BS., 1997 : Biological and molecular characterization of Newcastle disease virus from surveillance of live bird markets in the northeastern United States. *Avian Dis.* 41: 683-689.

Koko M., Maminiana OF., Ravaomanana J. et Rakotonindrina S.J., 2006 : Aviculture villageoise à Madagascar : enquête épidémiologique. In Improving farmyard poultry production in Africa: interventions and their economic assessment. *Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)*, TECDOC-1489. AIEA, Vienne, 157-163.

Kraneveld FC., 1926: A poultry disease in the Dutch East Indies. *Nederlands-IndischeBladenvoorDiergeneeskunde.* 38: 448-450.

Kuiken T., 1999: Review of Newcastle Disease in Cormorants. *Waterbirds.* 22 (3): 333-347.

Kung NY., Guan Y., Perkins NR., Bissett L., Ellis T., Sims L., Morris RS., Shortridge KF. et Peiris JSM., 2003 : The impact of a monthly rest day on avian influenza virus isolation rates in retail live poultry markets in Hong Kong. *Avian Dis.* 47 (3): 1037-1041.

Lancaster JE., 1966 : Newcastle disease: A review (1926-1964). Monograph N°3. *Canada Department of Agriculture.* Ottawa. 188 p.

Lesnoff M., Peyre M., Duarte PC., Renard JF. et Mariner JC., 2009 : A simple model for simulating immunity rate dynamics in a tropical free-range poultry population after avian influenza vaccination. *Epidemiol Infect.* 137: 1405-1413.

Li WL., Bian RL., Feng TL., Wen JX. et Bai JM., 2001 : An immunization experiment for Newcastle disease-like (temporary name) in geese. *Chin J. Prev Vet Med.* 23: 149-150.

Lister S., Alexander DJ. et Hogg R., 1986 : Evidence for the presence of avian paramyxovirus Type 1 in feral pigeons in England and Wales. *Vet Rec.* 118: 476-479.

Liu XF., Wan HQ., Ni XX., Wu YT. et Liu WB., 2003 : Pathotypical and genotypical characterization of strains of Newcastle disease virus isolated from outbreaks in chicken and goose flocks in some regions of China during 1985-2001. *Arch. Virol.* 148(7): 1387-1403.

Mackenzie JS., Edwards EC., Holmes RM et Hinshaw VS., 1984 : Isolation of ortho- and paramyxoviruses from wild birds in Western Australia, and the characterization of novel influenza A viruses. *Aust J Exp Biol Med Sci.* 62: 89-99.

Makkay AM., Krell PJ. et Nagy., 1999 : Antibody detection-based differential ELISA for NDV-infected or vaccinated chickens versus NDV HN-subunit vaccinated chickens. *Vet. Microbiol.* 66 (3): 209-222.

Maminiana O., Koko M., Ravaomanana J., Rakotonindrina S., 2007 : Epidémiologie de la maladie de Newcastle en aviculture villageoise à Madagascar. *RevSci Tech.* 26: 691-700.

Maminiana OF., 2011 : *Caractérisation des virus de la maladie de Newcastle (APMV-1) circulant sur les hautes terres de Madagascar.* [Thèse de Doctorat d'Université]. Université d'Antananarivo/Faculté des Sciences 207 p.

Manvell RJ., Frost K. et Alexander DJ., 1996 : *Characteristics of Newcastle disease and avian influenza viruses from ratites submitted to the International Reference Laboratory.* In Proc. International Conference: improving our understanding of ratites in a farming environment, 27-29 March, University of Manchester, United Kingdom D.C. Deeming, Hangland Farm Ostriches Ltd, Banbury. 45-46.

McBride MD., Hird DW. et Carpenter TE., 1991 : Health survey of backyard poultry and other avian species located within one mile of commercial California meat - turkey flocks. *Avian Dis.* 35: 403-407.

McCluskey BJ., Burgess B., Glover J., Kinde H. et Hietala S., 2006 : Use of Sentinel Chickens to Evaluate the Effectiveness of Cleaning and Disinfection Procedures in Non commercial Poultry Operations Infected with Exotic Newcastle Disease Virus. *J Vet Diagn Invest.* 18 (3): 296-299.

Miller PJ., Kim LM., Ip HS, Afonso CL., 2009 : Evolutionary dynamics of Newcastle disease virus. *Virology.* 391: 64-72.

Morgan RW., Gelb JJ., Pope CR. et Sondermeijer PJA., 1993 : Efficacy in chickens of a herpesvirus of turkeys recombinant vaccine containing the fusion gene of Newcastle disease virus: onset of protection and effect of maternal antibodies. *Avian Dis.* 37: 1032-1040.

Mraidi R., 2014 : *Modélisation et contrôle de la transmission du virus de la maladie de Newcastle dans les élevages aviaires familiaux de Madagascar.* [Thèse de Doctorat d'Université]. École Doctorale Sciences Technologies Santé Université de La Réunion. 138 p.

Nishizawa M., Paulillo AC., Nakaghi LSO., Nunes AD., Campioni JM. et Doretto Júnior L., 2007 : Newcastle disease in white Pekin ducks: response to experimental vaccination and challenge. *Braz J Poul Sci.* 9 (2): 123-125.

Njagi LW, Nyaga PN., Mbuthia PG., Bebora LC., Michieka JN., Kibe JK. et Minga UM., 2001 : *Prevalence of Newcastle disease virus in village indigenous chickens in varied agro-ecological zones in Kenya.* Livestock Research for Rural Development 22 (95). [En ligne] <http://www.lrrd.org/lrrd22/5/njag22095.htm> consulté le 16/06/1995.

Nyaga JM., Nyaga PN. et Kariuki DP., 1985 : Epidemiology of Newcastle disease in Kenya, *Bulletin of Animal health and production in Africa.* 33: 249-251.

Ocean-Consultant, 2004 : *Filière aviculture traditionnelle, Filières de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche de Madagascar* (UPDR/MAEP), Antananarivo. 9 p.

OIE. Organisation Mondiale de la Santé Animale., 2016 : *Fiches d'information générale sur les maladies: Maladie de Newcastle.* [En ligne] http://www.oie.int/fileadmin/Home/fr/Media_Center/docs/pdf/Disease_cards/NEWCAS-FR.pdf consulté le 16/06/2016.

Olesiuk OM., 1951 : Influence of environmental factors on viability of Newcastle disease virus. *Am J Vet Res.* 12: 152-155.

OtimOnapa M., Christensen H., Mukiibi GM. et Bisgaard M., 2006 : A preliminary study of the role of the ducks in the transmission of Newcastle disease virus to in-contact rural free-range chickens. *Trop Anim Health Prod.* 38: 285-289.

Panigrahy B., Senne DA., Pearson JE., Mixson MA. et Cassidy DR., 1993 : Occurrence of velogenic viscerotropic Newcastle disease in pet and exotic birds in 1991. *Avian Dis.* 37 (1): 254-258

Porphyre V., 2000 : *Enquête séro-épidémiologique sur les principales maladies infectieuses des volailles à Madagascar.* [Mémoire de DESS Productions animales en régions chaudes]. (CIRAD EMVT), Montpellier.

Rajaoherinirina EM., 2003 : *La vaccination des volailles: Application dans la région péri-urbaine d'Antananarivo (Antananarivo Avaradrano et Atsimondrano, Ambohidratrimo).* [Mémoire d'Ingénierat en Agronomie]. Université d'Antananarivo/Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. 114 p.

Rajaonarison JJ., 1991 : Production de vaccin contre la maladie de Newcastle à Madagascar. *Newcastle Disease or Rural Africa, PANVAC, DebreZeit*, Addis Ababa, Ethiopia, 135-137.

Rakotondrabe N., 2013 : *Impacts socio-économiques des maladies aviaires prioritaires à Madagascar*. [Thèse de médecine vétérinaire]. Faculté de médecine. Université d'Antananarivo Madagascar. 153 p.

Rasamoelina Andriamanivo H., Duboz R., Lancelot R., Maminiaina OF., Jourdan M., Rakotondramaro TMC., Rakotonjanahary SN., Servan de Almeida R., Rakotondravao, Durand B. et Chevalier V., 2014 : Description and analysis of the poultry trading network in the Lake Alaotra region, Madagascar: Implications for the surveillance and control of Newcastle disease. *Acta Trop.* 135: 10-18.

Rasamoelina Andriamanivo H., Lancelot R., Maminiaina OF., Rakotondrafara TF, Jourdan M, Renard JF, Gil ., Servan de Almeida R, Albina E, Martinez D, Tillard E, Rakotondravao et Chevalier V., 2012 : Risk factors for avian influenza and Newcastle disease in smallholder farming systems, Madagascar highlands. *Prev Vet Med.* 104 (1-2): 114-124.

Rasamoelina Andriamanivo H., 2011 : *Diffusion des pestes aviaires dans les petits élevages des hautes terres malgaches*. [Thèse de Doctorat d'Université]. Université de Montpellier II. Ecole doctorale SIBAGHE / Epidémiologie. 125 p.

Rasamoelina Andriamanivo H., 2014 : *Mise en place et évaluation d'une surveillance ciblée de la maladie de Newcastle au Lac Alaotra à Madagascar*. Rapport final du projet Parrur Newcastle. FOFIFA/DRZV Antananarivo Madagascar. 35 p.

Razandrinapela MA., 2015 : *Déterminants socio-économiques de la pratique de la vaccination contre la maladie de Newcastle dans la zone du lac Alaotra*. [Thèse de médecine vétérinaire]. Faculté de médecine. Université d'Antananarivo Madagascar. 44p.

Renard F., 2010 : Analyses de filière et épidémiologie animale dans les pays du 684 Sud: l'exemple de la grippe aviaire. *Economies et Sociétés, Série Systèmes Agroalimentaires*. 39: 1627-1638.

Rosenberger JK., Krauss WC. et Slemons RD., 1974 : Isolation of Newcastle disease and type-A influenza viruses from migratory waterfowl in the Atlantic flyway. *Avian Dis.* 18: 610-613.

Roy P. et Venugopalan AT., 1998 : Virulence of Newcastle disease vaccine virus(es) in the field. *Trop Anim Health Prod.* 30: 41-44.

Saifuddin M., Chowdbury TI., Sarker AJ. et Amin MM., 1990 : Protection conferred by vaccination with Blackburg and Komarov strains of Newcastle disease virus against Newcastle disease in Bangladesh. *Trop Anim Hlth Prod.* 4: 263-272.

Samberg Y., Hadash DU., Perelman B. et Meroz M., 1989 : Newcastle disease in ostriches (*Struthiocamelus*): field case and experimental infection. *Avian Pathol.* 18 (2): 221-226.

Seal BS., Wise MG., Pedersen JC., Senne DA., Alvarez R., Scott MS., King DJ., Yu Q. et Kapczynski DR., 2005 : Genomic sequences of low-virulence avian paramyxovirus-1 (Newcastle disease virus) isolates obtained from live-bird markets in North America not related to commonly utilized commercial vaccine strains. *Vet Microbiol.* 106: 7-16.

Shengqing Y., Kishida N., Ito H., Kida H., Otsuki K., Kawaoka Y. et Ito T., 2002 : Generation of velogenic Newcastle disease viruses from a non pathogenic waterfowl isolate by passaging in chickens. *Virology* 301: 206-211.

Stallknecht DE., Senne DA., Zwank PJ., Shane SM. et Kearney MT., 1991 : Avian paramyxoviruses from migrating and resident ducks in coastal Louisiana. *J Wildl Dis.* 27: 123-128.

Thitisak W., Janviriyasopak O., Morris RS., Srihakim S. et Kruedener RV., 1988 : Causes of death found in an epidemiological study of native chickens in Thai villages. *Acta Veterinaria Scandinavica Supplement.* 84: 200-202.

Tu TD., Phuc KV., Dinh NTK., Quoc DN. et Spradbrow PB., 1998 : Vietnamese trials with a thermostable Newcastle disease vaccine (strain I2) in experimental and village chickens. *Prev Vet Med.* 34: 205- 214.

Ujvari D., Wehmann E., Kaleta EF., Werner O., Savic V., Nagy E., Czifra G. et Lomniczi B., 2003 : Phylogenetic analysis reveals extensive evolution of avian paramyxovirus type 1 strains of pigeons (*Columba livia*) and suggests multiple species transmission. *Virus Research.* 96: 63-73.

Verwoerd DJ., 1995: Velogenic Newcastle disease epidemic in South Africa. II - Ostriches, waterfowl, exotic bird collection and wild birds. *S Afr Vet Med.* 8: 44-49.

Walker JW., Heron BR. et Mixson MA., 1973 : Exotic Newcastle disease eradication programme in the United States. *Avian Dis.* 17: 486.

Wambura PN., Kapaga AM. et Hyera JMK., 2000 : Experimental Trials with Thermostable Newcastle Disease virus (strain I2) in commercial and Village chickens in Tanzania. *Prev Vet Med.* 43: 75-83.

Wobeser G., Leighton FA., Norman R., Myers DJ., Onderka D., Pybus MJ., Neufeld JL., Fox GA. et Alexander DJ., 1993 : Newcastle disease in wild water birds in western Canada, *Can Vet J.* 34: 353-359.

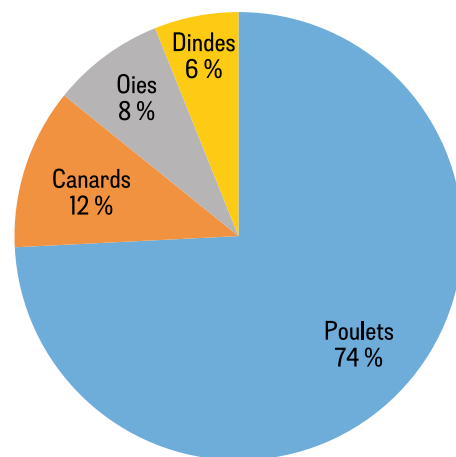


Figure 1 : Répartition par espèce du cheptel de volailles de Madagascar selon les estimations de la FAO en 2014

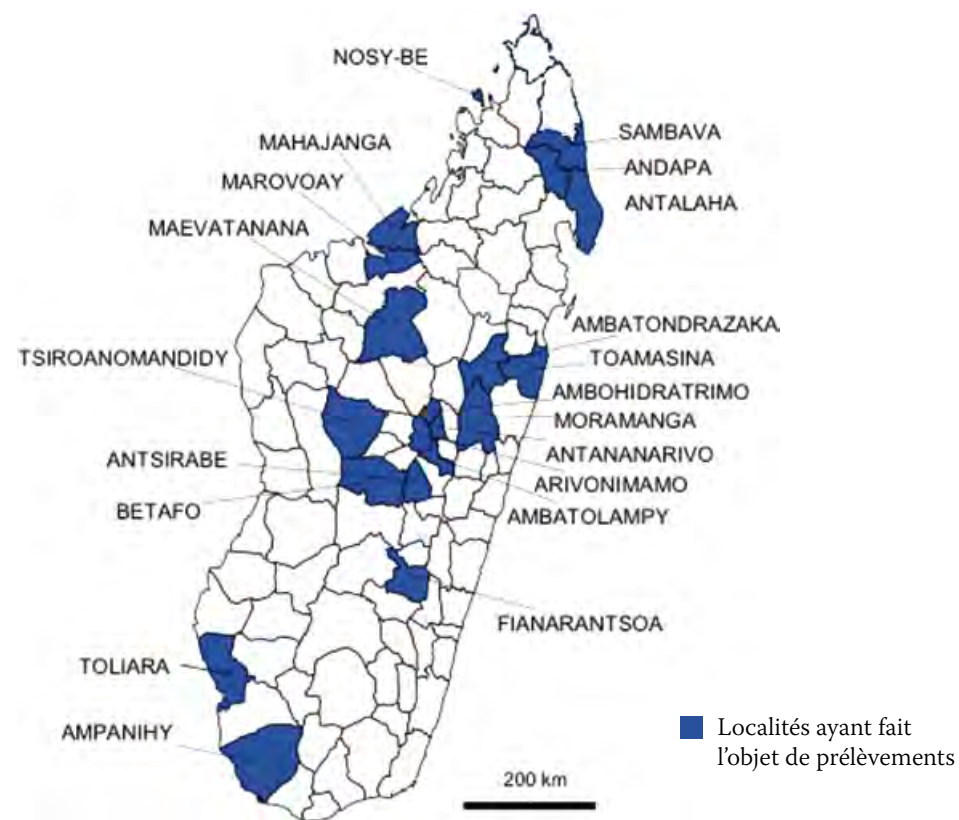


Figure 2 : Zones d'étude de l'enquête transversale sur les maladies aviaires (Source : Porphyre, 1999)

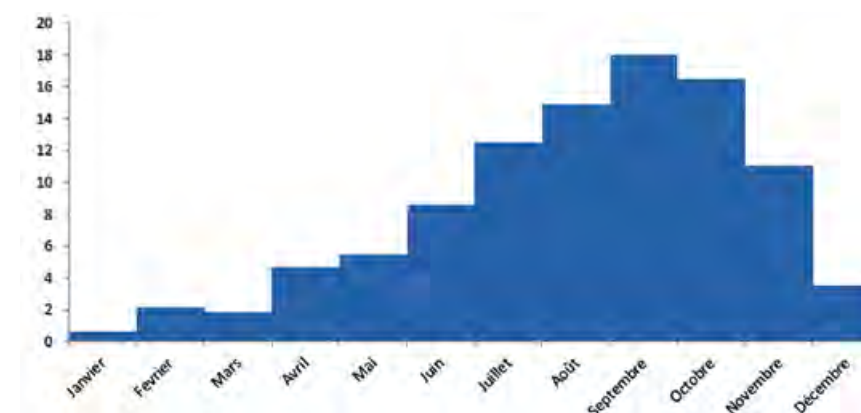


Figure 4 : Répartition intra-annuelle des foyers de maladie de Newcastle au Lac Alaotra selon la perception des éleveurs (Source : Rasamoelina-Andriamanivo, 2011)
* Proportion de foyer par mois par rapport au nombre total de foyer annuel

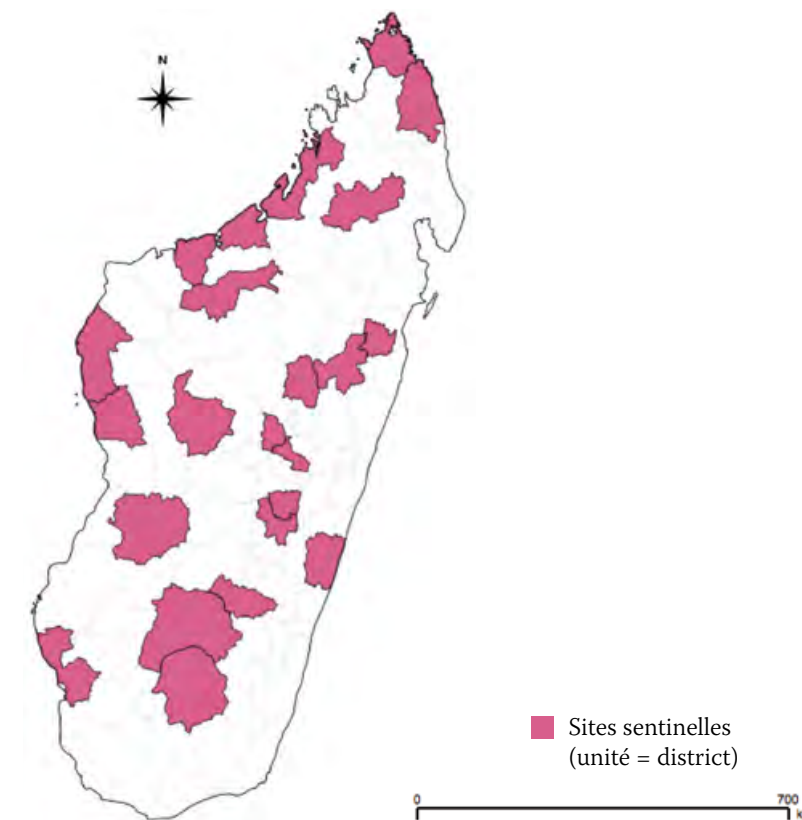


Figure 5 : Couverture géographique du système de surveillance sentinelle (unité = district) (Source : AnimalRisk-OI, 2016, Bulletin d'information épidémiologique n°17)



Dessin : Antso Andrianary

Figure 6 : Support de sensibilisation pour la vaccination



Dessin : Antso Andrianary

Figure 7 : Séparation des abris nocturnes des poulets et des palmipèdes



Dessin : Antso Andrianary

Figure 8 : Faire attention à la provenance des volailles à introduire dans l'élevage et éviter que les collecteurs entrent dans l'élevage lors de la vente des animaux



Dessin : Antso Andrianary

Figure 9 : Quarantaine des volailles à l'introduction



LA MALADIE DE NEWCASTLE: APPRENEZ A LA CONNAITRE



Qu'est-ce que c'est?

- La maladie de Newcastle est une maladie hautement contagieuse des volailles.
- C'est la maladie la plus meurtrière en aviculture familiale causant chaque année de lourdes pertes économiques notamment dans les pays en voie de développement.
- A Madagascar, les professionnels de la santé animale l'appelle "Pesta". Pour les éleveurs, en fonction des régions, il y a plusieurs dénominations de la maladie: « pesta, moafo, ramoretak'akoho, barika... »
- En cas de mortalité de volailles dans les villages, les éleveurs parlent souvent de « barika », une autre maladie des volailles appelée pasteurellose, alors qu'il s'agit la plupart du temps de la maladie de Newcastle.

Quand et comment se manifeste-t-elle?

- A Madagascar, des foyers de maladie de Newcastle surviennent toute l'année mais la période avec le plus de foyers est la saison sèche chaude, d'août à octobre.
- Les différents symptômes qu'on peut observer sur les volailles malades sont:
 - ✓ Abattement,
 - ✓ Difficulté à la respiration: bruyante, allongement du cou
 - ✓ Diarrhée (verte et/ou blanche)
 - ✓ Torticolis (déviation de la tête), mouvements incoordonnés de la tête et/ou du corps



Torticolis



Difficulté respiratoire

Quelles espèces d'oiseaux sont affectées?

- Elle atteint différentes espèces d'oiseaux domestiques et sauvages causant des mortalités variables selon les espèces et les souches du virus.
- Chez les volailles domestiques:
 - ✓ les poulets et les dindes sont les plus sensibles,
 - ✓ les palmipèdes (canards, oies) sont généralement résistants mais peuvent quelquefois faire la maladie,
 - ✓ les autres espèces, moins communes, sont aussi sensibles (pigeons, caille, pintade,...).




Quels sont les facteurs qui favorisent son introduction et/ou son maintien dans les villages et sa propagation ?

- L'achat de volailles vivantes au niveau de marché, ou auprès d'un collecteur en période d'épidémie.
- Le mélange de poulets ou dindes avec des palmipèdes (canards, oies) dans un même bâtiment ou abri nocturne
- Divagation des poulets/dindes autour des eaux des rivières et/ou dans les rizières qui sont souvent contaminés par les fèces des oies, canards ou oiseaux sauvages
- L'homme (éleveurs, visiteurs, vétérinaires) peut transporter de façon passive le virus par ses chaussures et ses vêtements quand il passe d'un élevage infecté à un autre
- Cadavres et plumes de volailles mortes de la maladie.
- La non vaccination des volailles ou le retard du rappel de vaccination.




Auteurs concepteurs: Rasamoelina Andriananivo H., Razafindrala N. P., Andria-Mananjara D. E., Rakotomanana O. D., Ranaivoson B.

Figure 10 : Affiche utilisée lors de la campagne de sensibilisation sur la maladie de Newcastle au Lac Alaotra et en Itasy.

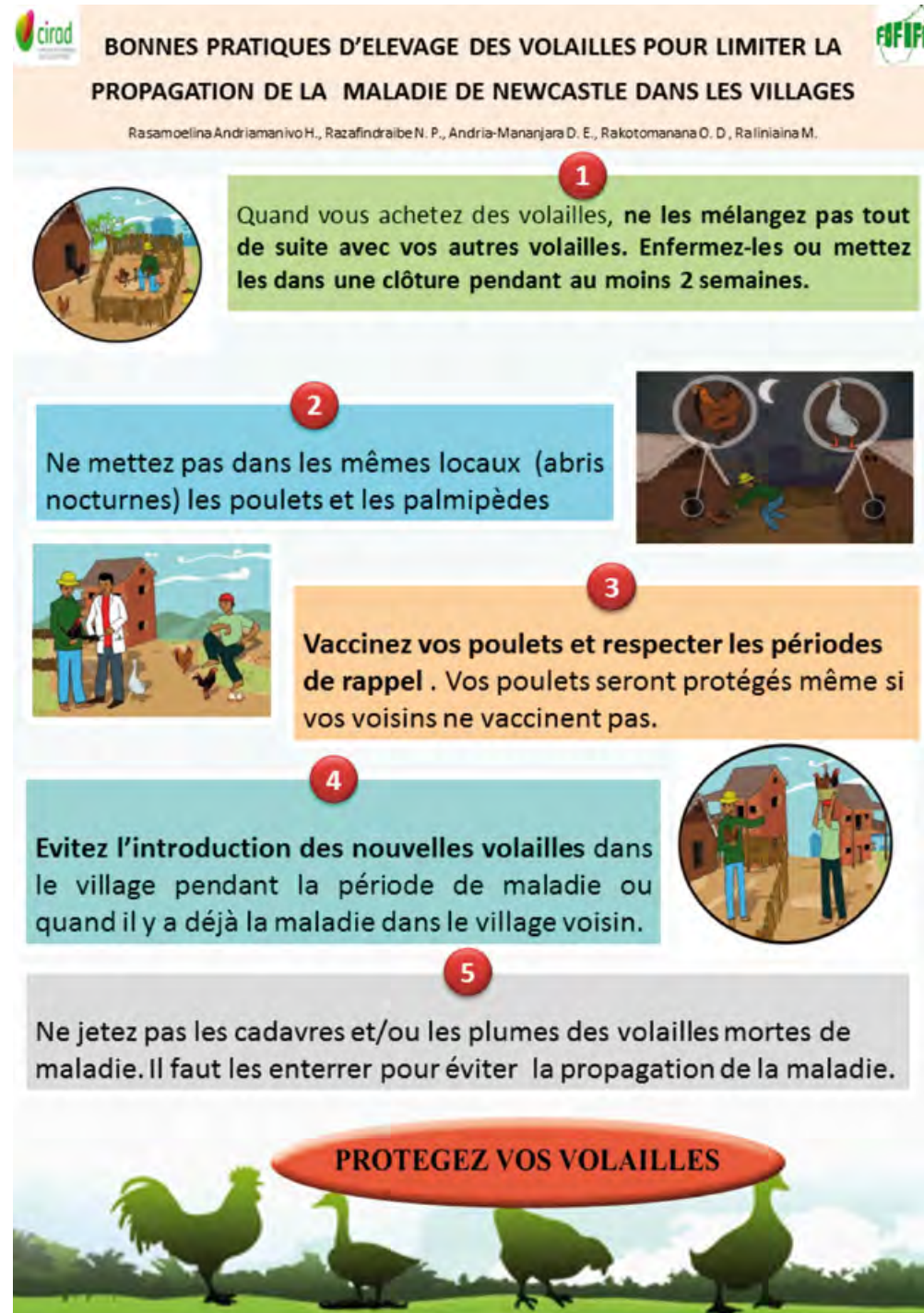


Figure 11 : Affiche utilisée sur les bonnes pratiques d'élevage lors de la campagne de sensibilisation sur la maladie de Newcastle au Lac Alaotra et en Itasy.

La cysticercose une maladie négligée

Cysticercosis a neglected disease

A. RAHANTAMALALA¹
V. PORPHYRE²
N. RABENINDRINA¹
J. RAZAFIMAHEFA³
H. RASAMOELINA-ANDRIAMANIVO⁴
R. JAMBOU⁵

(1) Unité d'Immunologie des maladies infectieuses, Institut Pasteur de Madagascar, Antananarivo, Madagascar
(2) CIRAD, UMR 112 SELMET, Saint Pierre, La Réunion, France
(3) Service de Neurologie, CHU, Befelatanana, Antananarivo, Madagascar, razjul@yahoo.fr
(4) COI, Réseau SEGA, Maurice
(5) Département des Parasites, Insectes vecteurs, Institut Pasteur, Paris

Contexte

La cysticercose est une cestodose larvaire due au développement chez l'homme (hôte intermédiaire) de *Cysticercus cellulosae*, la larve de *Taenia solium*, un plathelminthe de la famille des Taeniidae (Flisser, 1994). C'est l'une des infections les plus fréquentes du système nerveux central (Engels and others 2003 ; White 2000). L'Organisation Mondiale de la Santé estime que *T. solium* affecte plus de 50 millions de personnes dans le monde et entraîne plus de 50 000 décès chaque année (Murrell et al., 2005). Cette affection est largement répandue dans les pays en développement en Amérique latine, Asie et Afrique sub-saharienne. Actuellement, elle devient un problème émergent dans les pays développés de par la mondialisation et la migration des porteurs asymptomatiques de ténias adultes venant des zones d'endémies (Gabriël and others ; Román et al., 2000 ; Sciutto et al., 2000a ; Zammarchi et al., 2013). L'Homme et le porc entretiennent le cycle de vie du parasite. Ce dernier comme un hôte intermédiaire et le premier, comme hôte définitif hébergeant la forme adulte du ver. Dans certaines situations l'homme remplace le porc dans le cycle parasitaire (Garcia and Del Brutto, 2005 ; García et al., 2003) lorsqu'il ingère des œufs de *T. solium* qui éclosent dans l'intestin, libérant l'embryon hexacanthe ou oncosphère. Celui-ci passe alors dans la circulation sanguine et la larve cysticerque se fixe dans les tissus avec une prédilection pour le système nerveux central mais aussi muscles, œil, tissu cellulaire sous-cutané. L'homme est une impasse parasitaire (Robertson et al., 2013).

Context

Cysticercosis is a larval cestodosis resulting from the development in humans (intermediate host) of *Cysticercus cellulosae*, the larva of *Taenia solium*, a flatworm of the family Taeniidae (Flisser, 1994). This is one of the most common infections of the central nervous system (Engels and others 2003 ; White 2000). The World Health Organization estimates that *T. solium* affects more than 50 million people worldwide and causes over 50,000 deaths each year (Murrell *and al.*, 2005). This disease is widespread in developing countries in Latin America, Asia and sub-Saharan Africa. Currently, it becomes a problem emerging in developed countries by globalization and migration of asymptomatic carriers of adult tapeworms from endemic areas (Gabriël and others ; Román *and al.*, 2000. Sciutto *and al* 2000a; Zammarchi *and al.*, 2013). Man and pork maintain the life cycle of the parasite. The latter as an intermediate host and the first as definitive host that hosts the adult form of the worm. In some situations the man replaces the pork in the parasitic cycle (Garcia and Del Brutto 2005 ; Garcia *and al.*, 2003) when it ingests eggs of *T. solium* that hatch in the intestine, releasing hexacanth embryo or oncosphere. This last then goes into the bloodstream and the *cysticercus* larvae settle in tissues with a predilection for the central nervous system but also muscles, eye, subcutaneous cellular tissue. The man is a parasitic impasse (Robertson *and al.*, 2013).

Le parasite

Taenia et cysticerque

L'homme est l'hôte définitif de trois ténias : *Taenia solium*, *Taenia saginata*, *Taenia asiatica*. *T. solium* est plus fréquent en zone intertropicale (Amérique latine, Sud Est asiatique, Afrique). *T. asiatica* comme son nom l'indique se retrouve particulièrement à Taiwan, en Thaïlande, en Corée, en Chine, mais aussi en Ethiopie, en Indonésie et à Madagascar (Galán-Puchades et Fuentes 2008).

L'adulte

Parasite strictement humain, *T. solium* est un vers plat de couleur blanc/jaunâtre qui se présente comme un long ruban de deux à huit mètres (Figure 1.A). La tête encore appelée scolex est globulaire d'un diamètre d'un millimètre. Le système d'accrochage se compose de quatre ventouses arrondies et saillantes, et d'une double couronne de crochets lui valant son appellation de « ténia armé ». Il s'accroche à la muqueuse de la paroi de l'intestin grêle par le scolex (Figure 1.C).

Le corps ou strobile du *T. solium* est subdivisé en segments appelés proglottis (Figure 1.B). Il est formé de 80 à 800 proglottis. Les proglottis qui suivent immédiatement le cou sont plus larges que longs, petits et indifférenciés (proglottis immatures). En s'éloignant du cou, les proglottis mûrissent et deviennent plus longs que larges (Figure 2.A). La croissance du ver est de 16 anneaux par jour. Atteignant sa maturité, les proglottis se détachent du strobile et tombent dans les matières fécales. Ce détachement regroupe souvent plusieurs anneaux. Chaque proglottis renferme un système de reproduction hermaphrodite : 150 à 200 testicules, 3 lobes ovariens, une glande vitello-gène¹ et un utérus ramifié rempli d'œufs à maturité

¹ Un des composants de l'appareil génital femelle du vers ténia qui produit des cellules nourricières des œufs car elles renferment les réserves alimentaires.

(Figure 2.B). De chaque côté de l'axe central du proglottis, 7 à 13 ramifications utérines sont présentes pour *T. solium* et beaucoup plus atteignant 30 ramifications par proglottis chez *T. saginata* (Figure 2.C). Un proglottis peut contenir entre 30 000 à 50 000 œufs. Contrairement à *T. saginata* pour lequel les proglottis passent activement l'anus, une fois mature, le proglottis de *T. solium* se détache du corps et tombe dans les selles. L'homme atteint de taeniasis élimine dans sa matière fécale 5 à 6 anneaux gravidés² indépendamment ou associés quotidiennement ou deux à trois fois par semaine.

Les œufs

D'un diamètre de 30 à 50 microns, l'œuf de *T. solium* est indiscernable de ceux des autres espèces de *Taenia*. Il est composé de l'extérieur vers l'intérieur, de deux coques : l'une externe (membrane vitelline, translucide, et épaisse) rarement retrouvée car fragile et détruite dans le milieu extérieur ; l'autre interne (brun sombre, radiée, résistant) délimitant un embryophore de forme arrondie (Figure 3). A la surface, on peut voir en microscopie six crochets : on parle alors d'un embryon hexacanthe³. Ces œufs peuvent survivre dans le milieu extérieur pendant plusieurs mois et même en plusieurs années en restant infectants selon les conditions d'humidité et de température (Storey 1987 ; Storey et Phillips, 1985). Après ingestion, l'oncosphère⁴ est libéré de l'œuf par l'action de la trypsine de l'estomac ; il traverse la paroi digestive et entre dans la circulation sanguine. Ils se bloquent dans les vaisseaux capillaires distaux et s'enkystent sous forme de cysticerque.

Les cysticerques

Le cysticerque est une larve remplie de liquide qui contient un seul scolex armé (Figures 4.B et C). On la retrouve chez *Taenia solium*, *T. saginata*, *T. asiatica*, *T. crassiceps*, *T. ovis*, *T. taeniaeformis*, et *T. hydatigena*. Elle diffère des cœnures (*T. multiceps*, *T. serialis*, *T. brauni*) dont la vésicule contient plusieurs protoscolex inversés attachés à la membrane interne de la vésicule. Des vésicules filles peuvent être vues dans certains cœnures. Le cysticerque atteint sa taille finale (8 à 12 mm sur 5 à 6 mm) en 2 à 3 mois. Morphologiquement, on distingue quatre étapes de développement et de régression du cysticerque (Figure 5) :

- Le stade vésiculaire où le cysticerque est viable : il est rempli de liquide vésiculaire clair, entouré d'une paroi fine et transparente et contient un scolex opaque ;
- Le stade vésiculaire colloïdal : il correspond à la nécrose du parasite qui rejette des antigènes de lyse, associée à un processus inflammatoire ;
- Le stade nodulaire granulaire : le kyste se rétracte, son contenu se minéralise et tend à apparaître granulaire. Ce stade est particulièrement bien visible au scanner où une image en anneau est caractéristique ;
- Le stade nodulaire calcifié : le matériel granulaire du stade précédent devient complètement minéralisé et la larve est plus petite. À ce stade, l'œdème diminue.

L'aspect des larves de *T. asiatica* ne diffère pas de celles de *T. solium* mais leur localisation chez l'animal est différente. Pour *T. solium*, les larves se retrouvent plutôt dans les muscles bien vascularisés (Figure 4.A) mais aussi dans le tissu sous-cutané, les yeux et le cerveau. Pour *T. asiatica*, elles se trouvent particulièrement autour des viscères intestinaux foie, rate, épiploon et poumons (Galán-Puchades et Fuentes, 2000 ; Galán-Puchades et Fuentes, 2008).

² Anneaux ou segments portant un sac d'œufs.

³ Embryon du ver ténia pourvu de trois paires de crochets fixateurs (donc 6 au total).

⁴ Oncosphère est constitué par l'embryon hexacanthe encore entouré d'une enveloppe (embryophore).

Les étapes de développement et de régression de cysticerques :

- Stade vésiculaire où le cysticerque est viable : il est rempli de liquide vésiculaire clair, entouré d'une paroi fine et transparente et contient un scolex opaque (la pointe de la flèche indique le scolex visible en petit point blanc) ;
- Stade vésiculaire colloïdal : il correspond à la nécrose du parasite qui rejette des antigènes de lyse, associée à un processus inflammatoire ;
- Stade nodulaire granulaire : il est particulièrement bien visible au scanner où une image en anneau est caractéristique ;
- Stade nodulaire calcifié où le matériel granulaire précédent devient complètement minéralisé et la larve est plus petite.

Cycle

Le cycle des *taenias* s'établit classiquement entre un carnivore/omnivore porteur du vers adulte qui émet des œufs, et un hôte intermédiaire herbivore ou omnivore qui après ingestion des œufs développent des larves dans les muscles. Celui-ci sera alors mangé par le carnivore/omnivore.

Pour *T. solium*, l'homme se contamine par ingestion de viande de porc crue ou mal cuite (Flisser, 2006) et développe un taeniasis (Figure 6). Le vers atteint sa maturité après deux ou trois mois. Les œufs libérés par le porteur contaminent l'environnement. Le porc ingère les œufs, dont la coque est digérée dans l'estomac et qui libèrent des embryophores⁵. Ces derniers vont passer à travers la paroi stomacale et/ou intestinale et seront transportés par les vaisseaux sanguins. Ils vont se loger dans les muscles squelettiques (surtout les plus actifs et plus vascularisés), sous la peau, dans le cerveau ou les yeux et le cycle est bouclé. Chez le porc, le développement des kystes dure de deux à cinq mois et ceux-ci restent infectants pendant un an.

L'homme peut accidentellement devenir un hôte intermédiaire. Il développera ainsi une cysticerose comme le porc. Pour *T. solium* la contamination est donc interhumaine. Chez l'homme une fois dans la circulation sanguine, la migration de la larve se fera particulièrement vers le cerveau, les yeux, les muscles (DeGiorgio *et al.*, 2005 ; Garcia et Del Brutto, 2005). Deux modes de contamination ont été évoqués. La plus fréquente est sans doute la contamination par ingestion d'aliments ou d'eau contaminés par des œufs de *Taenia solium* disséminés dans la nature par un autre humain porteur du ver adulte (péril fécal). La présence du porteur dans l'entourage est un facteur de risque important de dissémination de la maladie. Les œufs étant très résistants, la contamination par les légumes peut se faire à l'inverse à très longue distance (Ilsøe *et al.*, 1990 ; Kozan *et al.*, 2005). La contamination par auto-infection est également possible que ce soit par voie exogène (souillure fécale, mains sales) ou endogène par digestion d'anneaux remontant de l'intestin grêle dans l'estomac suite à des mouvements intestinaux antipéristaltiques⁶.

⁵ Embryophore : en anatomie animale, désigne la poche incubatrice.

⁶ Antipéristaltique (Mouvements intestinaux antipéristaltique) : le péristaltisme correspond aux mouvements de contraction du tube digestif qui poussent les aliments le long de l'intestin et facilitent la progression du bol alimentaire de la bouche jusqu'à l'anus. L'antipéristaltisme correspond à des contractions musculaires anormales faisant remonter le contenu de l'intestin (grêle) vers l'estomac.

L'homme peut plus rarement être atteint par des cysticerques et des coenures⁷ d'origine animale notamment liées au chien et chat domestiques (*T. crassiceps*, *T. ovis*, *T. taeniaeformis* et *T. hydatigena*). Cependant ces espèces sont extrêmement rares chez l'homme. *T. pisiformis* est l'un des cestodes les plus fréquents chez les carnivores, notamment lorsque lapins et rongeurs leur servent de proies. L'adulte est fréquemment rencontré chez le chien aux Etats Unis et au Canada. Les lapins sont contaminés par les œufs. Le parasite transit par la circulation sanguine pour atteindre le foie, où il traverse de nouveau la paroi pour se loger dans la cavité abdominale. Il se fixe sur les différents organismes avant de se transformer en cysticerque. Les larves peuvent se localiser également dans le tissu sous-cutané. Le cycle est bouclé lorsque le lapin est mangé par un chien ou un carnivore réceptif.

Epidémiologie

L'OMS estime à 50 millions le nombre d'épileptiques dans le monde dont 80 % dans les pays en voie de développement (prévalence de 4-13/1000 en Afrique sub-saharienne (Edwards *et al.*, 2008 ; Winkler *et al.*, 2009). La contribution de la neurocysticerose à ces épilepsies est estimée 30 % des cas (Ndimubanzi *et al.*, 2010), soit une estimation entre 2.56-8.30 millions de NCC (Winkler, 2013) pour 50 000 morts par an (García *et al.*, 2003 ; Prasad *et al.*, 2008).

La cysticerose humaine est une parasitose cosmopolite (Figure 7). Elle est endémique dans de nombreux pays et particulièrement dans les pays en développement où est pratiqué l'élevage extensif du porc : Asie du Sud-Est, Chine, sous-continent indien, Amérique centrale et du Sud, Afrique sub-saharienne et pourtour de l'océan Indien. En Asie, *T. asiatica* a longtemps été confondu avec *T. solium*, modifiant ainsi les aires de répartition. Deux facteurs épidémiologiques majeurs peuvent expliquer la fréquence de la neurocysticerose : la promiscuité homme-porc, notamment dans les régions d'élevage de porcs qui favorisent le téniasis et la cysticerose porcine, et le péril fécal, lié à un défaut de mesures d'hygiène individuelle et collective, exposant la population à un contact avec les œufs de *T. solium*, comme par exemple les mères se contaminant avec les enfants. L'auto-infestation peut se voir également par défaut d'hygiène notamment chez les enfants.

La cysticerose porcine

Communément appelée ladrerie (« voavary » grain de riz en langue malagasy) où elle a été décrite pour la première fois à Madagascar en 1901. Sa transmission nécessite que les porcs aient accès à des matières fécales humaines (Copado *et al.*, 2004 ; García *et al.*, 2003 ; Sciutto *et al.*, 2000b). La prévalence de l'infestation à *T. solium* se superpose à la répartition géographique du téniasis (Michelet *et al.*, 2010 ; Nozais, 1998 ; Raghava *et al.*, 2010) et varie considérablement selon le niveau de l'assainissement (latrines artisanales s'écoulant dans les rizières, coutume de défécation en plein air...), les pratiques d'élevage des porcs (animaux en divagation) et des habitudes alimentaires de la région (viande insuffisamment cuite, charcuterie artisanale). Dans les villages, le cochon joue souvent le rôle d'éboueurs. D'autres sources de contaminations possibles sont l'eau de boisson et/ou les aliments infectées par des œufs de *T. solium* (Dorny *et al.*, 2009 ; Thompson et Conlan, 2011). Les autres facteurs de risque associés à la maladie porcine sont : le système de reproduction des porcs, le raccordement des latrines à des porcheries, l'utilisation des eaux grasses ou aliment contaminé par des matières fécales humaines, des humains porteurs de ténia impliqués aux soins des porcs dans l'élevage. L'augmentation de l'âge des porcs constitue un facteur de risque en cas d'exposition.

⁷ Cœnure ou cénure : nom scientifique des larves de certains téniases parasites chez l'homme et certains animaux (lapin, mouton). Les cénures contiennent plusieurs têtes de téniases contrairement aux cysticerques qui n'en ont qu'une.

Dans la majorité des cas, la maladie est asymptomatique⁸. En tout début d'infestation, le porc présente une légère diarrhée due à l'irritation de la muqueuse intestinale. Une fois les cysticerques installés, des signes de myosite⁹ peuvent s'observer se traduisant par des troubles de locomotion ou de la mastication. Une encéphalite et même des crises épileptiques sont décrites lorsque les cysticerques se localisent au niveau de l'encéphale. La mort peut survenir subitement lors d'une infestation massive du cœur (Figure 8).

Un porc de race locale, élevé en divagation, présentait une certaine agressivité et un assez petit poids même castré. Malgré ces nombreux cysticerques, plus d'une cinquantaine et huit respectivement au niveau du cœur et du cerveau, il a pu survivre jusqu'à 11 mois.

La maladie humaine

Le principal symptôme de cysticerose chez l'homme est la crise convulsive, alors que chez le porc, elle passe le plus souvent inaperçu mais entraîne une perte financière importante pour les éleveurs. La cysticerose est décrite chez les enfants (Raobijaona et Rakotoarimanitra, 2000) et les adultes avec un pic d'incidence chez les adultes d'âge moyen. Les manifestations cliniques sont très variables et vont de la forme complètement asymptomatique à des tableaux très sévères (Carabin *et al.*, 2011 ; Takayanagui et Odashima, 2006). Chez l'homme, les larves sont retrouvées préférentiellement dans les sites où le flux sanguin est élevé. Elles s'enkystent majoritairement dans le système nerveux central, les muscles striés, les tissus sous-cutanés et les yeux mais peuvent être retrouvées dans tout l'organisme. Le système nerveux central est atteint chez 60 à 90 % des malades diagnostiqués. La période d'apparition de la symptomatologie peut varier de quelques mois à plusieurs dizaines d'années.

La neurocysticerose (NCC) est une des affections les plus fréquentes du système nerveux central (Engels *et al.*, 2003 ; Garcia *et al.*, 2003 ; Prasad *et al.*, 2008). Les manifestations cliniques de la NCC sont polymorphes et dépendent du nombre, du type, de la taille, de la localisation, du stade de développement du kyste et l'intensité de la réaction immunitaire de l'hôte. Chez certains patients ou en cas de localisation intra-parenchymateuse¹⁰, l'infection peut rester asymptomatique (Garcia et Del Brutto 2005 ; Takayanagui et Odashima, 2006). Elle doit être suspectée chez tout patient présentant des symptômes neurologiques qui vit dans les zones d'endémie ou de retour de voyage de ces zones (García *et al.*, 2003 ; Quet *et al.*, 2010). Les crises épileptiques constituent le premier motif de consultation des patients. Plusieurs tableaux cliniques sont décrits, dominés par quatre symptômes évocateurs : des crises d'épilepsie d'apparition récente ; des céphalées invalidantes récentes et évolutives associées ou non à un syndrome d'hypertension intracrânienne ; des déficits neurologiques focaux et parfois des manifestations psychiatriques (Carabin *et al.*, 2011).

À côté des tableaux majeurs, le signe d'appel amenant la consultation comprend souvent des céphalées évolutives, inhabituelles, atypiques. Une forme particulière mais rare est la « cysticerose racémeuse ou méningo-basilaire ». Elle est caractérisée par une prolifération aberrante de kystes, *Cysticercus racemosus*, lobulés en « grappes de raisin ». A Madagascar, chez les enfants et les adolescents étudiés, une forme de neurocysticerose avec infestation massive est décrite, plus largement chez les filles (Raobijaona et Rakotoarimanitra, 2000). Il s'agit d'une « encéphalite aiguë » (Rangel *et al.*, 1987), qui fait suite à une inflammation aiguë en réponse à une infection cysticerquienne massive, entraînant un œdème cérébral diffus.

⁸ Une maladie pour laquelle la personne atteinte ne présente pas de symptômes ou manifestations cliniques.

⁹ Inflammation du tissu musculaire

¹⁰ Localisation se trouvant à l'intérieur des tissus fonctionnels du cerveau. Le cerveau possédant aussi des cavités remplies de liquides et des enveloppes. Ces structures sont dites extra-parenchymateuses.

D'autres localisations sont possibles. La présence du parasite dans la moelle épinière est rare (1-5 %) et donne des signes de compression (paraparésie¹¹ progressive ou une perturbation sphinctérienne (Ito *et al.*, 2003 ; Takayanagui et Odashima, 2006). La cysticerose oculaire peut se localiser dans toute la partie de l'œil. Les localisations sous-rétiniennes et vitreuses sont les plus fréquentes et peuvent entraîner une diminution progressive de l'acuité visuelle. Dans la chambre antérieure de l'œil et dans le corps vitré, le développement d'un cysticerque cause des troubles de la vision, comme tous corps étrangers. Les larves peuvent se développer dans les muscles striés, qui peuvent tous être envahis avec dans l'ordre de fréquence ceux des cuisses, des jambes, du bassin, des membres supérieurs. La cysticerose sous-cutanée se présente sous forme de nodules ou de tuméfactions multiples. Ils s'observent le plus souvent sur le thorax, le dos et les membres supérieurs.

Le Diagnostic

Compte tenu des manifestations cliniques non spécifiques de la neurocysticerose, et du délai très long d'apparition de signes après contamination, le diagnostic est difficile. Saran *et al.*, (1998) ont initialement montré l'utilisation de la biopsie ou *cytoponction* à l'aide de fines aiguilles pour le diagnostic de la cysticerose sous-cutanée et musculaire.

Un ensemble de critères diagnostiques a été proposé par Del Brutto *et al.*, (1996), et revisités en 2001 (Del Brutto *et al.*, 2001) et 2012 (Brutto, 2012). Ces critères sont basés sur des éléments cliniques, radiologiques, immunologiques et épidémiologiques (Tableau 1). La classification comporte quatre catégories de critères (absolus, majeurs, mineurs, épidémiologiques), et propose trois catégories diagnostiques :

- Absence de NCC ;
- Diagnostic probable de neurocysticerose ;
- Diagnostic définitif de neurocysticerose (Del Brutto *et al.*, 2001).

L'imagerie médicale

La neuro-imagerie (tomodensitométrie et imagerie par résonance magnétique) tient une place importante dans le diagnostic, en permettant la visualisation des différents stades parasitaires au sein du parenchyme cérébrale ou en dehors de celui-ci (Del Brutto *et al.*, 2001 ; Garcia et Del Brutto, 2003). Ses principales limites, en Santé Publique, sont leur disponibilité et leur coût dans les pays endémiques (Almeida *et al.*, 2006). Les images varient avec le stade évolutif et la réponse de l'hôte. Elles permettent de préciser : i) les diverses localisations, ii) le nombre et la taille des lésions et iii) leur stade de développement.

Elles ont permis de développer les classifications cliniques de la NCC basées sur la topographie, le stage d'évolution des lésions, l'œdème associé etc (García et Del Brutto, 2003 ; Julio Sotelo et Cora Marin, 1987 ; Lerner *et al.*, 2012). Dans les localisations musculaires, les cysticerques se présentent comme des corps opaques aux rayons X, dits « en grains de riz », longs de 5 à 8 mm et larges de 2 à 4 mm.

¹¹ La paraparésie est une paralysie légère des membres inférieurs. C'est une forme moins importante de la paraplégie, qui est une paralysie des membres inférieurs. Dans la paraparésie, l'atteinte motrice est moindre.

Tableau 1 : Les critères de diagnostic de la Neurocysticercose selon Del Brutto *et al.*, 2001

Catégories	Critères
Absolu	- Démonstration histologique du parasite par biopsie du cerveau ou par une lésion de la moelle épinière - Lésions kystiques montrant le scolex sur CT-Scan ou IRM - Visualisation directe des parasites sous-rétiniens par l'examen du fond d'œil
Majeur	- Lésions hautement suggestives de neurocysticercose sur neuroimagerie (kystes sans scolex visible, lésions annulaires ou nodulaires ou calcifications rondes intra-parenchymateuses ou lésions multiples d'âge différent sans scolex) - EITB sérique¹² positif pour la détection des anticorps anti-Cysticercus (selon la méthode de Tsang <i>et al.</i>, 1989) - Résolution des lésions kystiques intracrâniennes après traitement par albendazole et praziquantel - Disparition spontanée de lésion prenant le produit de contraste (lésion unique moins de 20 mm de diamètre chez les patients présentant des convulsions, un examen neurologique normal, et aucune preuve d'une maladie systémique actif)
Mineur	- Lésions compatibles (hydrocéphalies ou prises de contrastes anormales méningées) - Manifestations cliniques évocatrices de neurocysticercose (convulsions, signes focaux neurologiques, hypertension intracrânienne, et démence) - LCR¹³ positifs en ELISA pour la détection d'anticorps anti-Cysticercus ou des antigènes de Cysticercus - Cysticercose extérieure du SNC¹⁴ (cysticercose sous-cutanée ou musculaire confirmée, films à rayons X montrant des calcifications des tissus mous « en forme de cigare », ou la visualisation directe de cysticerques dans la chambre antérieure de l'œil)
Epidémiologique	- Preuve d'un contact familial avec une infection à <i>T. solium</i> - Personne en provenance ou vivant dans une région où la cysticercose est endémique - Voyage fréquent dans les zones d'endémie

Diagnostic de Neurocysticercose	Définition
Définitif	- Présence d'un critère absolu - Présence de deux critères majeurs, plus un mineur et un épidémiologique
Probable	- Présence d'un critère majeur, plus deux mineurs - Présence d'un critère majeur, plus un mineur et un épidémiologique - Présence de trois critères mineurs, plus un épidémiologique

N.B. : la présence de deux lésions hautement suggestives de neurocysticercose sur neuroimagerie est considérée comme deux critères majeurs.

¹² EITB ou enzyme-linked immunoelectrotransfer blot ou Western Blot en anglais ou transfert de protéines ou immunotransfert en français, est une méthode immunologique permettant la détection de la présence de protéines spécifiques (associées à une maladie par exemple) dans un échantillon sérique (ou de sérum, la partie liquide du sang), après séparation des protéines par un courant électrique (électrophorèse).

¹³ LCR : ou liquide céphalo-rachidien ou liquide cérébro-spinal est le liquide biologique contenu dans les cavités du cerveau. Il est présent également autour de lui ainsi que dans la moelle spinale humaine.

¹⁴ SNC : système nerveux central (contenu dans la boîte crânienne).

Dans les régions endémiques, les lésions calcifiées ou inactives sont retrouvées pour 50 à 95 % des patients présentant une NCC (Grazziotin, 2010 ; Lucato, 2007). Elles sont associées dans 30-50 % des cas à une histoire de crises convulsives ou des crises épileptiques vraies (Figure 5.D). Elles sont caractérisées par une image de calcification avec un œdème péri-lésionnelle et de rehaussement après injection d'un produit de contraste (Garcia et Del Brutto, 2005 ; Sanchez, 1999). L'image d'un kyste unique intra-parenchymateux pose souvent un problème de diagnostic différentiel avec la tuberculose, l'abcès du cerveau, la toxoplasmose, la tumeur cérébrale primaire ou métastatique, une infection candidosique¹⁵ ou une vascularite infectieuse. (Sinha, 2009 ; Mahanty, 2010). La mise en évidence du scolex sous forme de nodule brillant à l'intérieur du kyste constitue un diagnostic de certitude de l'infection et un critère de viabilité du kyste (Machado, 2010) (Figure 5.A).

Lorsque l'on suspecte une NCC, les lésions sont décrites selon i) leur localisation (lésions parenchymateuses et extra-parenchymateuse et ii) leur activité. On distingue ainsi parmi les lésions actives i) les vésicules (lésions arrondies hypodenses sans rehaussement annulaire) ii) les kystes granulaires (lésions hypodenses¹⁶ kystiques avec rehaussement annulaire péri-lésionnel, iii) les kystes nodulaires (lésions hypodenses avec rehaussement intra et péri-lésionnel) et lésions inactives (calcifications).

La conclusion diagnostic est déclinée en i) NCC certaines avec les vésicules ou les kystes granulaires avec le scolex visible comme critères majeurs, ii) lésions hautement suggestives : kystes sans scolex visible, lésions annulaires ou nodulaires, calcifications rondes intra-parenchymateuses ou les lésions multiples d'âge différent sans scolex. On note comme critères mineurs les lésions compatibles telles que les hydrocéphalies ou les prises de contrastes anormales méningées (Del Brutto *et al.*, 2001).

Diagnostic immunologique

Les sérologies sanguines à la recherche d'anticorps sont largement prescrites dans les pays d'endémie pour orienter le diagnostic. Leur résultat ne reflète cependant que l'exposition au parasite mais ne permet pas de démontrer une infection aiguë (Deckers, 2010). Les Ac¹⁷ peuvent être détectés dans le sérum et dans le LCR (Minelli et Takayanagui, 2005) ainsi que dans la salive ou dans l'urine (Malla *et al.*, 2005) et, dans le cas des cysticercoses ophtalmiques, dans les larmes (Sahu *et al.*, 2008). La sensibilité des méthodes d'immunodiagnostic dépend du stade de développement de la larve. Les cysticerques calcifiés ou parenchymateux induisent une faible réponse immune humorale. Par ailleurs, les Ac peuvent persister longtemps après l'élimination du parasite. Les faux positifs sont possibles par réaction croisée avec d'autres parasites comme *Echinococcus alveolaris* et l'hydatidose¹⁸. Des faux négatifs s'observent également par manque de sensibilité surtout en présence d'un ou deux kystes seulement (Del Brutto *et al.*, 2001). L'imprécision du diagnostic peut ainsi conduire à une sur-prescription de larvicides.

¹⁵ Infection candidosique appelée candidose est une infection dû à un champignon du genre Candida.

¹⁶ Lésions hypodenses : zones apparaissant gris clair sur un scanner et correspondant à un tissu chargé en liquide.

¹⁷ Anticorps.

¹⁸ Hydatidose : ou échinococcose hydatique ou encore kyste hydatique est une maladie humaine provoquée par l'ingestion accidentelle d'œufs d'*Echinococcus granulosus*, un très petit ténia se développant dans l'intestin grêle du chien, dont la larve va donner une volumineuse cavité (parfois 10-15 cm).

Actuellement deux tests sont d'utilisation courante, le test ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) et le Western Blot (WB) avec une grande spécificité et une bonne sensibilité. L'ELISA est le test quantitatif le plus utilisé pour le dépistage. Plusieurs kits commerciaux existent utilisant des antigènes totaux du parasite. Il existe de nombreuses réactions croisées dont les plus décrites sont la bilharziose et l'hydatidose. La détection des antigènes circulant est actuellement utilisée (Bobes *et al.*, 2006) ainsi que les méthodes moléculaires pour la détection de l'ADN du parasite.

La majorité ELISA des tests utilisent des fractions antigéniques extraites des parasites eux-mêmes (Garcia *et al.*, 2000). La méthode de référence reste celle proposée par Tsang en 1989, basée sur une fraction glycosylée¹⁹ extraite du cysticerque par chromatographie d'affinité sur colonne de lectine (Figure 9.A). Elle est largement utilisée à Madagascar depuis 20 ans. Sa sensibilité est 87 % pour une spécificité de 95 %. Cependant, la localisation intraparenchymateuse des kystes diminue la sensibilité de cette détection d'anticorps par ELISA. L'ELISA constitue la technique de screening avant d'effectuer d'autres tests comme le Western Blot, qui s'avère plus lourd et cher à réaliser pour confirmer.

Le WB est le test sérologique le plus spécifique pour la NCC. Comme pour l'ELISA, les différences entre laboratoires portent sur la source d'antigènes (extrait total, liquide vésiculaire...) ou sur la méthode de fractionnement utilisée (lentil-lectine columns, Sephadex G200...). L'antigène le plus utilisé reste la fraction glycosylée extraite selon la méthode de Tsang *et al.*, (1989). Sept bandes sont considérées comme spécifiques de la neurocysticercose ; elles ont des poids moléculaires de 13, 14, 18, 21, 24, 39-42 et 50 kDa (Figure 9.B). Le western blot a alors une spécificité de 100 % et une sensibilité de 98 % pour la détection des lésions multiples. Ces valeurs chutent (moins de 50 % des tests sont positifs) et les faux négatifs sont fréquents quand la lésion est unique ou si les lésions sont calcifiées. La technique manque de spécificité en cas d'une seule bande réactive à 50 kDa (Furrows *et al.*, 2006) (Figure 7.B, sujet sain (-)). Les gènes correspondant aux protéines des bandes GP13, GP14, GP24 et GP39-42 sont connues et clonées. Certains tests utilisent des protéines recombinantes comme la P24 brevetée par le CDC²⁰ mais avec une sensibilité plus faible, ou la P8 et la GP50 (Bueno *et al.*, 2005). La présence de bandes de faibles poids moléculaires (13-14) sur le WB semble indiquer une forme active de la maladie alors que les bandes de poids moléculaires élevés pourraient donner des résultats positifs en cas de filariose ou d'échinococcose. La sensibilité du Western Blot chute cependant à 30 % en cas de kyste unique ou calcifié.

La détection de l'antigène HP10 (Fleury *et al.*, 2007) et des antigènes sécrétés B158/B60 (Assane *et al.*, 2015 ; Mwanjali *et al.*, 2013 ; Mwape *et al.*, 2011 ; Mwape *et al.*, 2012) permettent de détecter des cysticerques vivants qui seuls excrètent l'antigène. La détection se fait par un test ELISA de capture dans le sérum et le LCR. La réponse est proportionnelle à la taille et au nombre de cysticerques. L'antigène B158/B6 peut être aussi détecté dans les urines. Une sensibilité similaire a été rapportée entre Ag-ELISA utilisant du sérum et de l'urine avec une spécificité plus élevée en sérum (Mwape *et al.*, 2011). Un test positif est fortement indicateur d'une neurocysticercose active multikystique. La réponse au traitement peut être évaluée par une diminution de l'Ag²¹ circulant mais la forme inflammatoire pourrait être associée à la sécrétion d'antigène (Fleury *et al.*, 2003), parfois détectable dans les urines (Parija *et al.*, 2004).

Le principal problème des sérologies actuelles repose sur leur dépendance à la collecte de parasites sur un porc contaminé et la préparation d'un nouveau lot d'antigène à chaque fois. Ceci implique des variations possibles de l'antigène produit dans le même laboratoire, et des variations certaines entre laboratoires.

Le second problème évoqué lors de la recherche d'anticorps est la possibilité de réactions croisées entre les métacestodes (*saginata*, *solium*, *hydatigena* et *asiatica*). La détection d'anticorps n'est donc pas forcément spécifique de *T. solium*. Enfin, la détection d'anticorps atteste l'exposition au parasite mais pas forcément la NCC car les anticorps peuvent être dû à une infection asymptomatique cutanée ou musculaire. Enfin, les anticorps vont persister après la mort du parasite posant un problème d'interprétation. Ce problème pourrait être limité en détectant spécifiquement l'IgG4 qui contrairement aux IgG totaux, semble associé à une infection active (Intapan *et al.* 2008 ; Short *et al.*, 1990). A l'inverse la symptomatologie peut apparaître à distance de la contamination, lorsque le parasite mort se calcifie, alors même que l'on ne détecte plus d'anticorps.

Pour la détection d'antigène, le problème majeur est la sensibilité de la méthode et également le décalage entre le début des symptômes par rapport à la survie du parasite. Les parasites morts ne secrètent pas d'antigènes alors qu'ils peuvent provoquer la symptomatologie.

Enfin le prélèvement sanguin et surtout du LCR constitue de méthode assez invasive, des études ont montré l'avantage de recueillir le sang par piqûre de doigt sur du papier filtre qui est à la fois pratique sur le terrain et plus accepté par la population (Elliott *et al.*, 2013 ; Ishida *et al.*, 2011).

Diagnostics moléculaires

La recherche d'ADN de *T. solium* dans le LCR n'est pas encore d'utilisation courante dans les laboratoires, mais plusieurs techniques de PCR²² ont été évaluées. Ces PCR portent sur des gènes différents mais présentent toutes les mêmes problèmes que la détection d'antigène en termes de sensibilité. Elles utilisent soit des approches conventionnelles (Almeida *et al.*, 2006 ; Michelet *et al.*, 2011) soit des méthodes en temps réel (Rottbeck *et al.*, 2013 ; Yera *et al.*, 2011), soit des techniques de PCR couplée à des méthodes RFLP (Restriction Fragment Length polymorphism).

Le traitement

Le schéma thérapeutique comporte un traitement symptomatique par des anticonvulsivants et antalgiques et un traitement étiologique par antiparasitaire, auquel on adjoint le plus souvent une corticothérapie²³ pour pallier les effets indésirables du traitement antiparasitaire (Nash, 2003). La présence de plusieurs kystes dans différentes localisations et à des stades différents complique la prise en charge. En générale, la chirurgie est indiquée quand le kyste entraîne une compression du cerveau et des nerfs crâniens, une pseudo-tumeur réfractaire au traitement médical, une hydrocéphalie, une cysticercose intra-ventriculaire, une hypertension intra-crânienne, une forme intra-médullaire et oculaire (Sinha, 2010).

¹⁹ Protéines sur lesquelles sont fixés des sucres (glucidique).

²⁰ CDC : Center for Disease Control.

²¹ Antigène.

²² PCR ou Polymerase Chain Reaction en anglais ou ACP pour Amplification en Chaîne par Polymérase en français mais rarement utilisé, est une technique de duplication (de copie) d'une partie de génome (ADN) ou d'un ARN in vitro (dans un tube) pour en obtenir en grande quantité à partir d'une très faible quantité.

²³ Traitement anti-inflammatoire à base de corticoïdes (hormones naturelles).

Les kystes, en impasse parasitaire dans le cerveau, peuvent dégénérer spontanément (Abba, 2010). L'utilisation des anti-inflammatoires est destinée à éviter le risque de symptômes neurologiques (crises convulsives, HTIC²⁴...) pouvant apparaître durant le traitement. Plusieurs études ont pu montrer que les anti-parasitaires accélèrent la destruction du cysticerque et la disparition des lésions, mais parfois aussi leur calcification. Cette évolution sous traitement fait partie des critères diagnostic de la neurocysticercose (Del Brutto *et al.*, 2001). La neuro-imagerie est importante pour suivre l'évolution de la maladie en confirmant la disparition ou non des lésions intra-cérébrales après traitement. Le plus souvent, durant la dégradation du kyste (avec ou sans anti-parasitaire), le rehaussement de contraste diminue alors que des lésions calcifiées peuvent apparaître.

Deux molécules sont aujourd'hui utilisées dans le traitement de la neurocysticercose : le praziquantel et l'albendazole qui présentent une bonne tolérance et un faible coût (en zone tropicale) (García *et al.*, 2003). Le traitement étiologique n'est jamais une urgence thérapeutique. La majorité des essais montre une plus grande régression des cysticerques avec l'albendazole, comparativement au praziquantel (Cruz *et al.*, 1991 ; Matthaiou *et al.*, 2008 ; Rajshekhar, 2008 ; Sotelo *et al.*, 1988 ; Thussu *et al.*, 2008). De plus, il bénéficierait également d'une meilleure diffusion au niveau cérébral (Jung *et al.*, 1990).

Le traitement doit donc être instauré en milieu hospitalier. Il est contre-indiqué dans la cysticercose oculaire, dans les encéphalites et en cas de charge parasitaire élevée (> 100 kystes), à cause du risque d'exacerbation de l'inflammation et d'œdème cérébral (Del Brutto et Sotelo, 1988). Les patients, ne présentant que des calcifications, ne requièrent pas de traitement antiparasitaire (le parasite est déjà mort) (García *et al.*, 2002 ; Nash *et al.*, 2006 ; Riley et White, 2003).

Une des complications majeures du traitement antiparasitaire est la survenue d'une réaction inflammatoire locale sévère. L'exacerbation des signes neurologiques survient entre le second et le cinquième jour de traitement. Le traitement antiparasitaire s'accompagne donc d'une courte corticothérapie (Fleury *et al.*, 2008) instaurée généralement deux jours avant le début du traitement et poursuivie quelques jours après. Certaines localisations sont plus à risques : sous-arachnoïdienne, intraventriculaire, spinale ou lorsque le patient présente de multiples lésions. L'inflammation peut conduire à un infarctus cérébral, une hydrocéphalie aiguë, une hypertension intracrânienne ou encore à un œdème massif. On utilise la dexaméthasone (0,2 à 0,5 mg/kg par jour), ou la prednisone (1 mg/kg par jour). Il est à noter que les stéroïdes diminuent les concentrations plasmatiques du praziquantel mais pas de l'albendazole (Vazquez *et al.*, 1987). Chez les patients atteints d'une encéphalite ou d'un œdème cérébral sévère, les corticoïdes peuvent être utilisés en association avec un diurétique osmotique comme le mannitol à la dose de 2 g/kg par jour.

Les crises d'épilepsie de la neurocysticercose répondent bien à la monothérapie par carbamazépine, valproate de sodium ou phénytoïne. Cependant, même après un traitement curatif, les larves calcifiées restent épileptogènes et le traitement anticonvulsivant doit être poursuivi jusqu'à deux ans après la dernière crise épileptique (Baranwal *et al.*, 2001). À l'inverse, un patient n'ayant jamais fait de crise ne doit pas recevoir de thérapie antiépileptique en prophylaxie.

L'efficacité du traitement est évaluée par l'examen radiologique (TDM ou IRM), réalisé à trois ou six mois après traitement pour suivre la régression des lésions. La réponse au traitement est très variable d'une forme à l'autre et d'un individu à l'autre. Aucun protocole thérapeutique optimal n'a encore été établi. Le suivi prolongé des patients montre des récides de crises notamment en cas de multiples lésions malgré les

schémas thérapeutiques classiques par albendazole ou praziquantel (cures de 15 jours). En cas de récide, des cures séquentielles prolongées d'albendazole et de praziquantel, sont nécessaires compte tenu d'une sensibilité différente de chaque kyste à chacun des médicaments, pour un même patient (García *et al.*, 2002).

Une prophylaxie basée sur la Santé publique dans une démarche « One-health »

Le contrôle de la cysticercose est basé sur les actions de santé publique pour stopper la transmission, d'une part en supprimant la contamination humaine et d'autre part, en organisant la surveillance des porcs (Gweba *et al.*, 2010 ; Mukaratirwa et Lekule, 2008). L'homme porteur de taenias est le seul transmetteur de la cysticercose que ce soit à l'homme ou au porc. Les mesures doivent donc inclure i) la lutte contre le péril fécal (éducation sanitaire, amélioration des systèmes de latrines...), ii) l'amélioration de la filière porcine (élevage en claustration, amélioration de l'alimentation, prophylaxie, hygiène et biosécurité, inspection des viandes) et iii) la réduction du réservoir de parasites (chez l'homme et chez le cochon). Malgré leur simplicité apparente, la mise en œuvre de ces mesures est souvent difficile et leur efficacité réduite. La réduction du réservoir de parasite adulte est ainsi difficile à obtenir car le coût-efficacité de cette mesure est difficile à évaluer. La sensibilisation à la salubrité alimentaire des producteurs et des consommateurs de viande de porc, constitue sans doute un levier important pour la lutte contre la cysticercose, passant par des encouragements économiques (Jayashi *et al.*, 2012 ; Mwanjili *et al.*, 2013).

Conséquences économique et sociale

Si la téniasis n'a qu'un faible impact clinique chez l'Homme, la cysticercose par contre est une maladie dont la gravité dépend surtout de la localisation des cysticerques dans l'organisme. La cysticercose, notamment sa forme neurologique, se révèle comme une maladie à l'origine de discriminations sévères au sein des communautés, ce qui compromet tous les aspects de la vie des personnes atteintes - éducation, vie professionnel, vie sociale (Andermann, 1995). Dans les pays d'Afrique, les patients épileptiques sont stigmatisés, l'épilepsie est considérée comme une maladie contagieuse et/ou honteuse dû à un sortilège ou aux mauvais esprits. Les patients épileptiques sont isolés afin de limiter le risque de contamination (Baskind et Birbeck, 2005 ; Eastman, 2005 ; Preux *et al.*, 2000 ; Stafford *et al.*, 2008). L'impact de la maladie sur la vie des malades est bien souvent plus important que les conséquences directes de la maladie, et ce d'autant plus que les crises sont fréquentes. A ce coût psychologique et social de la maladie, s'ajoutent les frais médicaux de traitement des malades.

Le coût global de la cysticercose est ainsi estimé à 2 à 5 millions de DALYs. Les DALYs (Disability Adjusted Life Year) quantifient en année les pertes d'activité professionnelle (Torgerson et Macpherson, 2011). A Madagascar en 2002, le coût de traitement de la cysticercose humaine s'élevait à 100 euros.

Chez l'animal l'impact clinique de la cysticercose est très faible. La productivité n'est pas affectée mais les moyens de lutte mis en place associés aux pertes économiques engendrée par les saisies, par la dévalorisation de la carcasse et par les moyens de décontamination engendrent des frais importants. La cysticercose porcine est aussi et surtout à l'origine de pertes économiques pour les éleveurs du fait de la dépréciation ou de la non commercialisation possible de la viande parasitée (Praet *et al.*, 2010). A Madagascar, une étude menée en 2008 a montré que la perte économique s'élevait à 10 millions d'euros (Andriamparany, 2012). Il est à noter que l'élevage porcin est souvent, comme à Madagascar, conduit par les petits paysans en zone rurale. La dépréciation d'une carcasse contaminée est variable. Elle est souvent commercialisée hors des circuits officiels et est vendue avec un manque à gagner allant de 25 à 50 % (Zoli *et al.*, 2003). Les conséquences sont particulièrement importantes pour les petits éleveurs de porcs qui subissent une triple perte : maladie humaine, pertes de production carnée, pertes de revenus (Carabin *et al.*, 2005). Cette perte a donc un impact majeur sur le niveau de vie de ces familles et leur accès aux soins ou à la scolarisation.

²⁴ HTIC : Hypertension intra-crânienne.

Appréhender la maladie chez l'homme

Explorer les épilepsies

Les malades présentant une épilepsie due à la cysticerose, ne sont pas des acteurs à proprement parlé du cycle épidémiologique de la maladie. Ils sont pourtant souvent indicateurs d'un foyer de contamination proche : que ce soit eux-mêmes (auto-infestation), l'entourage familial ou scolaire, ou les fournisseurs habituels de produits alimentaires (légumes, restauration...). La contamination peut aussi survenir lors d'un voyage. En zone de transmission, la cysticerose n'est pas encore un diagnostic fréquent dans les structures sanitaires périphériques faute de moyens diagnostiques. Mais l'autre obstacle est que souvent le malade ne consulte même pas. Le recours aux tradipraticiens, dans un contexte de croyance en une étiologie paranormale de la maladie, reste fréquent. L'amélioration de la surveillance et la déclaration conduira à une connaissance plus précise de l'étendue du problème et à l'identification des foyers de transmission (OMS, 2002). Les enquêtes de séroprévalence renseignent seules actuellement sur la prévalence de la maladie. Elles montrent souvent un regroupement des cas plus marqués que ne le laisse suspecter l'épidémiologie, faisant évoquer une composante génétique à la susceptibilité (Sciutto *et al.*, 2003).

Contrôler le taeniasis

La prévalence du taeniasis est rarement connue mais elle est souvent très faible. Améliorer le recueil des cas est difficile car le portage du vers est souvent asymptomatique et n'entraîne pas de consultation médicale. Seule des enquêtes par sondage incluant des effectifs importants permettraient de mieux connaître la prévalence du taeniasis chez l'homme. Chez l'homme, une politique de lutte contre la cysticerose devrait intégrer le traitement de masse des individus à risque de taeniasis (Cruz *et al.*, 1991). Lorsque ces programmes sont mis en œuvre, le traitement comprend le plus souvent une dose unique de niclosamide (2 g) ou de praziquantel (10 mg/kg) pour le déparasitage intestinal. Le niclosamide est le traitement de choix car, n'étant pas absorbé par l'intestin, il ne provoque pas d'effets indésirables neurologiques si le patient est atteint d'une neurocysticerose asymptomatique.

Cependant, ce déparasitage systématique par des traitements de masse répétés, cible le plus souvent les enfants dans les écoles, dans le cadre des programmes nationaux de contrôle des géohelminthes²⁵. Sur le plan logistique c'est souvent la seule option raisonnable que les gouvernements peuvent utiliser. Si ces stratégies sont efficaces contre les géohelminthes, elles sont d'une portée limitée en zone tropicale, car le taux d'enfants fréquentant l'école décroît rapidement avec l'âge (moins de 50 % à la fin du primaire, source UNICEF). De plus contrairement aux géohelminthes dont la prévalence diminue fortement après l'âge de 7 ans, il est possible que la majorité des porteurs de *tænia* soient des adultes qui voyagent en dehors de leur village. Enfin, les personnels de santé n'ont souvent à leur disposition pour ces campagnes que le praziquantel, qu'ils hésitent à utiliser en zone de forte transmission, au risque de déclencher des troubles neurologiques chez des porteurs de cysticerques. A l'inverse, en zone de transmission de la schistosomiase²⁶, le contrôle de la cysticerose est soutenu par les campagnes de traitement répété contre cette maladie.

²⁵ Ce sont des vers ronds, parasites intestinaux transmis principalement par le sol (exemple : ascaris).

²⁶ Schistosomiase ou bilharziose : maladie humaine parasitaire provoquée par les vers plats appelés *Schistosoma* qui sont transmis par l'intermédiaire des eaux contaminées.

L'éducation sanitaire reste donc une part essentielle de cette lutte. Elle repose sur la modification des habitudes alimentaires : i) une cuisson suffisante de la viande de porc (les cysticerques sont tués entre 45 à 50°C, ii) congélation (au moins quatre jours à une température de -10°C), iii) éviter de consommer des charcuteries crues ou fumées (la fumure et la salaison n'étant pas toujours suffisantes pour détruire les cysticerques).

Lutter contre le péril fécal

La prophylaxie est basée sur l'éducation à l'hygiène et sur le développement de l'assainissement destiné à interrompre ou à réduire le cycle de transmission directe interhumaine. La présence conjointe des cochons et des hommes infectés souligne ces facteurs de risques environnementaux (Lescano *et al.*, 2009 ; Morales *et al.*, 2008 ; Sarti *et al.*, 1992). Le rôle des déchets humains est très important dans ce cycle de contamination (Cabaret *et al.*, 2002 ; Kelvin *et al.*, 2012 ; Uga *et al.*, 2009). Les campagnes de prévention, qui visent à enseigner les modes de transmission du parasite, sont un bon exemple d'éducation pour la santé. Mais les mesures de contrôle de la cysticerose en zone de transmission, portent également sur la lutte contre le péril fécal et le renforcement de l'hygiène de l'eau et des aliments (Kozan *et al.*, 2005). Elles incluent l'aménagement de latrines, le lavage des mains ou encore le traitement des eaux usées afin de protéger les cultures, la neutralisation des excréments humains par de l'eau de Javel ou de la chaux, ou encore la réglementation voire l'interdiction de l'usage d'engrais humains en agriculture.

Ces stratégies dites WASH (Water Sanitation Hygiene) se développent actuellement partout, mais avec une contrainte récurrente liée à leur coût et à leur mode de prise en charge (financement par les villageois, les pouvoirs publics, les acteurs internationaux) qui hypothèquent le maintien au long cours des résultats obtenus. Ces programmes nécessitent également une longue phase d'analyse et d'exploration des pratiques et des perceptions locales pour adapter les messages et les outils utilisés. Tant la relation à l'hygiène corporelle et la défécation est soumise aux coutumes et interdits vernaculaires. Cette adaptation est indispensable pour espérer un impact. L'effet de masse critique est également très important car de nombreuses études ont montré que l'adoption des nouvelles pratiques ou même la constitution de latrines par seulement une partie de la population, avaient un effet extrêmement réduit sur la transmission globale, des maladies liées au péril fécal dans une région et même pour les familles adoptant les pratiques WASH.

Dans le cadre de la lutte contre le péril fécal, des supports d'information ont été rédigés grâce au financement du FSP PARRUR, en collaboration entre l'IPM et les ministères. Le volet « CVC-Capitalisation, Valorisation et Communication-Diffusion » concerne l'élaboration des différents supports thématiques de synthèse afin de mettre l'accent sur diverses formes et dimensions de valorisation des résultats des recherches effectuées dans le cadre des projets financés par FSP PARRUR. Concernant le projet « cysticerose », il a été initié à l'Institut Pasteur de Madagascar et implique différents partenaires nationaux (FOFIFA/DRZV, Département vétérinaire de la faculté de médecine) et internationaux (IPP, CIRAD). Divers supports²⁷ : spot, reportage, dépliants, affiches, posters bâchés et carnet de vulgarisation..., sont réalisés sous diverses thématiques telles que la cysticerose expliquée aux enfants et aux mamans, le péril fécal et les latrines, les bonnes pratiques en élevage porcin, l'organisation vétérinaire sur l'inspection de la viande à Madagascar, Comment éviter la cysticerose et le ténia ? Guide pour inspecteur de viande et Moyens de lutte contre la cysticerose porcine. Des croquis (Figure 12 entre autres) ont été réalisés afin de faciliter le transfert de messages au grand public. Ces supports ont fait l'objet d'une évaluation d'impact dans la commune d'Arivonimamo. Ce volet rentre dans le cadre d'un stage de fin de thèse vétérinaire d'une étudiante malgache. Son stage est également financé par FSP PARRUR.

²⁷ Illustrations insérées dans le CD-ROM de l'ouvrage et dans les ressources documentaires du site de la coopération universitaire franco-malgache : «<http://www.coopuniv-frmg.org/index.php/ressource-documentaires/>».

Les œufs de ténia contenus dans les déjections humaines d'un porteur de ver ténia vont contaminer l'eau. Cette dernière peut contaminer à son tour les légumes si elle est utilisée pour l'irrigation ou l'arrosage. Les légumes peuvent être contaminés directement si l'homme fait ses besoins autour du potager. L'eau souillée peut aussi contaminer directement d'autres personnes si elles l'utilisent comme source d'eau à la maison (cuisine, boisson...). Ces personnes peuvent développer la cysticercose humaine par ingestion des œufs de ténia. Les porcs, à proximité élevée en divagation, peuvent développer la cysticercose porcine de la même manière, en mangeant les déjections humaines contenant les œufs de ténia.

Contrôle de la maladie animale

Améliorer les pratiques d'élevage

Comme pour les stratégies WASH, l'étape fondamentale est l'analyse des pratiques locales liées à la conduite des élevages porcins. C'est lorsque les porcs sont élevés en totale liberté qu'ils se contaminent en mangeant des excréments humains. Pour améliorer le contrôle des élevages de porcs, il faut limiter la divagation des porcs et interdire l'abattage clandestin. Ces interventions ont permis une chute importante de la prévalence de la neurocysticercose dans les régions tropicales, comme à la Réunion, mais elles sont peu suivies en zones africaine et sud-américaine. La raison est à chercher dans l'organisation même de l'élevage porcin dans ces zones (Drucker *et al.*, 2006 ; Praet *et al.*, 2009). Pour beaucoup de pays, l'élevage porcin est mené à 80-90 % par des paysans possédant un à six cochons au maximum (Figure 13). C'est un complément de revenu pour ces paysans pauvres, et l'élevage est le plus souvent assuré par les femmes et les enfants. Ces animaux s'alimentent principalement des déchets de cuisine et au cours de leur divagation. La mise en enclos nécessite alors une réorganisation complète de la filière avec la production locale d'aliments à partir des résidus agricoles ou agroindustriels (pêche locale, etc.). Cette transformation du mode d'élevage ne sera possible qu'avec une incitation financière pour les éleveurs. Le prix d'une viande déclarée indemne de cysticercose devrait être incitatif pour ceux qui voudraient s'impliquer dans cette démarche. Cette démarche pourrait être à l'échelle d'un village, ce qui le rendrait attractif pour les clients. Les acteurs de la filière de la viande porcine et la grande distribution des zones urbaines, sont donc des éléments incontournables de la lutte contre la cysticercose.

Contrôler les élevages

Dans le contexte villageois, identifier les élevages contaminés, nécessite une approche individuelle extrêmement lente, à moins que celui-ci ne soit réalisée lors de la vente d'animaux. A Madagascar, par exemple, la détection de la cysticercose se fait traditionnellement sur les marchés ruraux par les grossistes venus acheter les animaux pour la consommation urbaine. Ils pratiquent pour cela le language qui s'effectue sur l'animal vivant en palpant la langue pour y chercher d'éventuels cysticerques. Ces derniers se traduisent par des boutons souvent sublinguaux, visibles à l'œil nu ou détectés à la palpation. Dans de nombreux pays d'endémie, le language est réalisé par la population elle-même, afin d'identifier les porcs atteints de cysticercose. La spécificité de cette technique est assez bonne (de l'ordre de 80 %), mais les lésions mécaniques ou dues aux actinobactéries peuvent prêter à confusion (Singh *et al.*, 2013). Cependant, des fraudes par perçage des vésicules avant examen, sont rapportées (Bussiéras, 1995).

La sensibilité de la technique, dépend du degré d'infection des animaux. Plusieurs études ont montré que pour une infection de moins de 80 kystes (infections expérimentales ou naturelles), l'inspection de la langue s'avère négative. Pour les animaux modérément à fortement infectés (> 80 kystes), la sensibilité reste inférieure à 50 %.

Le contrôle systématique des cheptels pourrait être mené avant la vente sous forme d'enquêtes épidémiologiques par les services vétérinaires, en utilisant des méthodes sérologiques. Le diagnostic sérologique permet une détection de la maladie chez les porcs vivants (Rushton, 2011). Les méthodes sont plus sensibles que le language, mais elles nécessitent un laboratoire car aucun test rapide utilisable sur le terrain n'existe actuellement.

Contrôler les viandes

Il s'agit d'un diagnostic post-mortem se pratiquant au niveau des abattoirs mais également au niveau des marchés (Goussanou *et al.*, 2013 ; Schulz et Randrianaivo, 1998). Les procédures pour la détection des cysticerques à l'inspection des viandes varient considérablement d'un pays à l'autre. C'est une méthode invasive et peu sensible dont la sensibilité est très corrélée aux compétences du manipulateur (Slifko, 2000). Dans certains pays, l'inspection visuelle est effectuée seulement sur un ou plusieurs sites dits de prédilection, comme le cœur, le diaphragme, les muscles masséters, la langue, le cou, les épaules, les muscles intercostaux et abdominaux. Dans d'autres pays, la réglementation exige l'incision de certains muscles : la langue, les masséters, l'échine, les muscles intercostaux et les cuisses. L'efficacité de cette inspection dépend également du degré d'infection des porcs alors qu'en zones rurales d'Afrique et d'Amérique du Sud, les infestations peuvent être légères. Une étude a néanmoins estimé que 10,6 % des kystes seraient mis en évidence par une méthode d'inspection conventionnelle (Boa *et al.*, 2002). De plus, la définition même de l'infestation varie avec les pays : à Madagascar par exemple, une viande est dite saine si l'on retrouve moins de cinq cysticerques pour la surface d'une main !!! L'inspection des viandes dans ces zones sous-estime donc la prévalence réelle de la cysticercose porcine. Des méthodes biologiques pourraient être utilisées, mais leur mise en place paraît difficile dans les pays en développement (Abuseir *et al.*, 2007 ; Joshi *et al.* 2003). De plus, le nombre très réduit de vétérinaires ou d'inspecteurs disponibles pour les abattoirs, compromet l'efficacité de ce contrôle. A Madagascar, on dénombre moins de cent vétérinaires se répartissant sur une zone de 600 000 km². Enfin, l'insuffisance d'abattoirs justifie l'abattage des animaux se faisant le plus souvent en dehors des circuits officiels, hors de toute inspection. Elles ne garantissent pas non plus l'élimination des carcasses de porcs ladres par les éleveurs.

Traiter les porcs

Pour contrôler la cysticercose, l'OMS propose la mise en œuvre d'une chimioprophylaxie pour les porcs en parallèle du traitement humain (Gonzalez *et al.*, 2012 ; Gonzalez *et al.*, 1998 ; Gonzalez *et al.*, 1997 ; Mkupasi *et al.*, 2013 ; Peniche-Cardena *et al.*, 2002 ; Pondja *et al.*, 2012a). L'Oxfendazole est le médicament le plus efficace avec une dose unique de 30 mg/kg (Gonzalez *et al.*, 1997), un taux de réussite de 80 %, sans aucun effet secondaire et en garantissant une viande consommable. Douze semaines après traitement, la viande apparaît saine avec parfois de petites cicatrices. Un traitement systématique par oxfendazole à 4 mois ou à 9 mois, a montré son efficacité à réduire le risque de contamination pendant une durée de trois mois après traitement (Pondja *et al.*, 2012b). Cependant, quatre semaines après traitement, des kystes viables sont retrouvés (Gonzalez *et al.*, 1998). La disparition des kystes peut nécessiter jusqu'à 26 semaines (Sikasunge *et al.*, 2008). Les études sur les résidus médicamenteux, montrent qu'une période de clearance minimale de 17 jours devrait être préservée avant que la viande ne soit mise à la consommation (Moreno *et al.*, 2012). L'ivermectine n'est pas efficace (Mkupasi *et al.*) alors que l'albendazole seul ou associé au praziquantel, réduit sensiblement le nombre de kystes dans les muscles et le cerveau (Gonzalez *et al.*, 2012).

Vacciner les animaux

La vaccination des porcs pourrait constituer un outil utile pour le contrôle de la cysticerose dans les élevages porcins (Flisser *et al.*, 2004 ; Lightowlers, 2003 ; Lightowlers, 2010). Un vaccin contre la cysticerose porcine est actuellement disponible avec une autorisation de mise sur le marché (Galvamed, 2015). Un autre vaccin, luttant à la fois contre la Peste Porcine Classique et la cysticerose porcine est en cours de développement au Pérou.

Cependant, les études actuelles montrent qu'un schéma efficace nécessite deux injections de vaccins à 2-3 mois d'intervalle associé à un traitement par oxfendazol. Une telle stratégie semble difficilement applicable sur le terrain, mais mériterait d'être testée dans les bassins de production à forte prévalence.

Remarques de conclusion : une approche coordonnée basée sur le marché

Le contrôle de la cysticerose est en apparence très simple, avec comme principe premier de séparer les cochons et les hommes. Pourtant l'endémie est présente pratiquement partout dans les pays en développement et même en Europe de l'Est, en Asie ou en Amérique latine. Il faut donc trouver les leviers pour obtenir un contrôle de l'infestation, considérant que la divagation des animaux reste le facteur de risque majeur. Les législations sanitaires sont en apparence conformes aux recommandations internationales. Mais leur application est entravée par un manque chronique de ressources de financement et/ou de formation.

En ce qui concerne le volet humain, le traitement des porteurs de ténias est difficile car leur nombre est réduit et ils ne constituent pas un groupe homogène facilement identifiable. Les stratégies globales ciblant soit les enfants dans le cadre de la lutte contre les géohelminthes, soit la population générale dans celui de la lutte contre la schistosomiase sont les seules actions actuellement menées à large échelle. Ces stratégies donnent un bon impact sur l'infestation par le ténias, mais nécessitent des financements récurrents importants. L'amélioration de l'hygiène au travers des stratégies WASH, ou de l'éducation pour la santé a un impact évident sur la transmission. Mais là encore les moyens financiers conditionnent la mise en œuvre des « bonnes résolutions ».

La lutte contre la cysticerose chez le porc, nécessite une parfaite connaissance des circuits locaux de productions et de vente. Conduits dans un même village, le suivi des troupeaux, l'inspection des carcasses dans les abattoirs, et de la viande sur les marchés, ainsi que la mise en place d'une traçabilité de cette viande, formeraient un ensemble très efficace de mesures (Gonzalez *et al.*, 2002 ; Joshi *et al.*, 2003 ; Perry et Randolph, 1999 ; Roberts, 1994 ; Smith, 1997). Cependant là encore les moyens disponibles sont insuffisants.

Enfin, des éléments positifs existent, car la perte de valeur marchande de la viande occasionnée par la cysticerose poussent les éleveurs à s'intéresser à la maladie. Ils demandent alors des tests diagnostiques et des traitements pour leurs animaux. Le traitement par l'oxfendazole est simple et peu coûteux (Gonzalez *et al.*, 2012). Il répond bien à cette demande, contrairement à la vaccination qui demeure un objectif opérationnel lointain. Ce produit n'est malheureusement pas disponible dans la majorité des pays de transmission dont Madagascar. La surveillance de la cysticerose dans les élevages nécessite, quant à elle, de disposer de test utilisables directement dans les villages ou sur les marchés. Ces tests sont à développer car les éleveurs sont prêts à les financer (Gonzalez *et al.*, 2002).

De même, la demande de viande de qualité est soutenue par les campagnes d'information menées auprès des consommateurs. Ceux-ci (notamment en zone urbaine) deviennent plus exigeants sur le contrôle des viandes. Dans cette optique, une démarche « cysti-free » valorisant les éleveurs garantissant une viande porcine indemne de cysticerose et menée au niveau d'un village entier, représenterait un argument de vente important en rétablissant une relation de confiance entre vendeurs et acheteurs (Conteh *et al.*, 2010 ; Verbeke, 2001). Cette sensibilisation des consommateurs serait sans doute le moteur le plus fort, en vue de la mise en place de structures villageoises pour une meilleure pratique de l'élevage des porcs.

Références bibliographiques

- Abraham R., Pardini AX., Vaz AJ., Livramento JA., Machado LdR.. 2004 : *Taenia* antigens detection in the cerebrospinal fluid of patients with neurocysticercosis and its relationship with clinical activity of the disease. *Arquivos de neuro-psiquiatria* 62 (3B): 756-760.
- Abuseir S., Kühne M., Schnieder T., Klein G., Epe C.. 2007 : Evaluation of a serological method for the detection of *Taenia saginata* cysticercosis using serum and meat juice samples. *Parasitology Research* 101 (1): 131-137.
- Almeida CR., Ojopi EP., Nunes CM., Machado LR., Takayanagui OM., Livramento JA., Abraham R., Gattaz WF., Vaz AJ., Dias-Neto E. 2006 : *Taenia solium* DNA is present in the cerebrospinal fluid of neurocysticercosis patients and can be used for diagnosis. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci* 256 (5): 307-10.
- Andermann LF., 1995 : Epilepsy in Developing Countries. *Transcultural Psychiatry* 32(4): 351- D, Ratsitorahina M, Rabarijaona LP, Ramarokoto CE . 2003. Situation épidémiologique actuelle de la cysticerose à Madagascar. *Arch Inst Pasteur de Madagascar* 69: 46-51.
- Arruda G., Da Silva A., Quagliato E., Maretti M., Rossi C., 2005 : Evaluation of *Taenia solium* and *Taenia crassiceps* cysticercal antigens for the serodiagnosis of neurocysticercosis. *Tropical Medicine & International Health* 10 (10): 1005-1012.
- Assana E., Kanobana K., Tume C., Zoli P., Geerts S., Berkvens D., Dorny P., 2007 : Isolation of a 14kDa antigen from *Taenia solium* cyst fluid by HPLC and its evaluation in enzyme linked immunosorbent assay for diagnosis of porcine cysticercosis. *Research in veterinary science* 82 (3): 370-376.
- Assane YA., Trevisan C., Schutte CM., Noormahomed EV., Johansen MV., Magnussen P., 2015 : Neurocysticercosis in a rural population with extensive pig production in Angónia district, Tete Province, Mozambique. *Acta tropica*.
- Ayala-Sulca E., Miranda-Ulloa E., 2015 : Evaluation of enzyme-linked immunoelectrotransfer blot test using purified native antigen mix from cisticercus fluid of *Taenia solium* for diagnosis of human cysticercosis. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 32 (3): 485-491.
- Baranwal AK., Singhi PD., Singhi SC., Khandelwal N., 2001 : Seizure recurrence in children with focal seizures and single small enhancing computed tomographic lesions: prognostic factors on long-term follow-up. *Journal of child neurology* 16 (6): 443-445.
- Baskind R., Birbeck GL., 2005 : Epilepsy-associated stigma in sub-Saharan Africa: The social landscape of a disease. *Epilepsy & Behavior* 7 (1): 68-73.
- Bittencourt P., Gracia C., Martins R., Fernandes A., Diekmann H., Jung W., 1992 : Phenytoin and carbamazepine decrease oral bioavailability of praziquantel. *Neurology* 42 (3): 492-492.
- Boa ME., Kassuku AA., Willingham Iii AL., Keyyu JD., Phiri IK., Nansen P., 2002 : Distribution and density of cysticerci of *Taenia solium* by muscle groups and organs in naturally infected local nished pigs in Tanzania. *Veterinary Parasitology* 106: 155-164.

Bobes RJ., Hernandez M., Marquez C., Fragoso G., Garcia E., Parkhouse RM., Harrison LJ., Sciutto E., Fleury A., 2006 : Subarachnoidal and intraventricular human neurocysticercosis: application of an antigen detection assay for the diagnosis and follow-up. *Trop Med Int Health* 11(6): 943-50.

Brutto OHD., 2012 : Diagnostic criteria for neurocysticercosis, revisited. *Pathogens and Global Health* 106(5): 299-304.

Bueno EC., Scheel CM., Vaz AJ., Machado LR., Livramento JA., Takayanagui OM., Tsang VC., Hancock K., 2005 : Application of synthetic 8-kD and recombinant GP50 antigens in the diagnosis of neurocysticercosis by enzyme-linked immunosorbent assay. *The American journal of tropical medicine and hygiene* 72(3): 278-283.

Cabaret J., Geerts S., Madeline M., Ballandonne C., Barbier D., 2002 : The use of urban sewage sludge on pastures: the cysticercosis threat. *Vet. Res.* 33(5): 575-597.

Carabin H., Budke CM., Cowan LD., Willingham Iii AL., Torgerson PR., 2005 : Methods for assessing the burden of parasitic zoonoses: echinococcosis and cysticercosis. *Trends in Parasitology* 21 (7): 327-333.

Carabin H., Ndimubanzi PC., Budke CM., Nguyen H., Qian Y., Cowan LD., Stoner JA., Rainwater E., Dickey M., 2011 : Clinical manifestations associated with neurocysticercosis: a systematic review. *PLoS Negl Trop Dis* 5 (5): e1152.

Chung J-Y., Bahk YY., Huh S., Kang S-Y., Kong Y., Cho S-Y., 1999 : A recombinant 10-kDa protein of *Taenia solium* metacestodes specific to active neurocysticercosis. *Journal of Infectious Diseases* 180 (4): 1307-1315.

Conteh L., Engels T., Molyneux DH., 2010 : Neglected Tropical Diseases 4 Socioeconomic aspects of neglected tropical diseases. *Lancet* 375 (9710): 239-247.

Copado F., de Aluja AS., Mayagoitia L., Galindo F., 2004 : The behaviour of free ranging pigs in the Mexican tropics and its relationships with human faeces consumption. *Applied Animal Behaviour Science* 88 (3-4): 243-252.

Corona T., Lugo R., Medina R., Sotelo J., 1996 : Single-day praziquantel therapy for neurocysticercosis. *New England Journal of Medicine* 334 (2): 125-125.

Cruz M., Cruz I., Horton J., 1991 : Albendazole versus praziquantel in the treatment of cerebral cysticercosis: clinical evaluation. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 85 (2): 244-247.

Da Gama CN., Kobayashi E., Li LM., Cendes F., 2005 : Hippocampal atrophy and neurocysticercosis calcifications. *Seizure* 14 (2): 85-88.

Deckers N., Kanobana K., Silva M., Gonzalez AE., Garcia HH., Gilman RH., Dorny P., 2008 : Serological responses in porcine cysticercosis: A link with the parasitological outcome of infection. *International Journal for Parasitology* 38 (10): 1191-1198.

De Giorgio C., Pietsch-Escueta S., Tsang VC., Corral-Leyva G., Ng L., Medina MT., Astudillo S., Padilla N., Leyva P., Martinez L. et al., 2005 : Sero-prevalence of *Taenia solium* cysticercosis and *Taenia solium* taeniasis in California, USA. *Acta Neurol Scand* 111 (2): 84-8.

Del Brutto OH., Rajshekhar V., White AC., Jr., Tsang VC., Nash TE., Takayanagui OM., Schantz PM., Evans CA., Flisser A., Correa D. et al., 2001 : Proposed diagnostic criteria for neurocysticercosis. *Neurology* 57 (2): 177-83.

Del Brutto OH., Roos KL., Coffey CS., García HcH., 2006 : Meta-analysis: cysticidal drugs for neurocysticercosis: albendazole and praziquantel. *Annals of Internal Medicine* 145(1): 43-51.

Del Brutto OH., Sotelo J., 1988 : Neurocysticercosis: an update. *Review of Infectious Diseases* 10 (6): 1075-1087.

Del Brutto OH., Wadia NH., Dumas M., Cruz M., Tsang VCW., Schantz PM., 1996 : Proposal of diagnostic criteria for human cysticercosis and neurocysticercosis. *Journal of the Neurological Sciences* 142 (1-2): 1-6.

Ding J., Zheng Y., Wang Y., Dou Y., Chen X., Zhu X., Wang S., Zhang S., Liu Z., Hou J. et al., 2013 : Immune responses to a recombinant attenuated *Salmonella typhimurium* strain expressing a *Taenia solium* oncosphere antigen TSOL18. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases* 36 (1): 17-23.

Dorny P., Praet N., Deckers N., Gabriel S., 2009 : Emerging food-borne parasites. *Veterinary Parasitology* 163 (3): 196-206.

Drucker AG., Bergeron E., Lemke U., Thuy LT., Zárate AV., 2006 : Identification and quantification of subsidies relevant to the production of local and imported pig breeds in Vietnam. *Tropical Animal Health and Production* 38 (4): 305-322.

Eamsobhana P., Yoolek A., Punthuprapasa P., Suvouttho S., 2004 : A dot-blot ELISA comparable to immunoblot for the specific diagnosis of human parastrongyliasis. *Journal of helminthology* 78 (04): 287-291.

Eastman R., 2005 : Epilepsy in South Africa. *Acta Neurologica Scandinavica* 112 (s181): 8-11.

Edia-Asuke AU., Inabo HI., Mukaratirwa S., Umoh VJ., Whong CM., Asuke S., Ella EE., 2015 : Seroprevalence of human cysticercosis and its associated risk factors among humans in areas of Kaduna metropolis, Nigeria. *The Journal of Infection in Developing Countries* 9 (08): 799-805.

Edwards T., Scott AG., Munyoki G., Odera VM., Chengo E., Bauni E., Kwasia T., Sander LW., Neville BG., Newton C., 2008 : Active convulsive epilepsy in a rural district of Kenya: a study of prevalence and possible risk factors. *Lancet Neurol* 7: 50-6.

Elliott I., Jerome A., Angwafor SA., Smith ML., Takougang I., Noh J., Tsang V., Wilkins P., Cockburn L., Keystone J., 2013 : Epilepsy and cysticercosis in North-West Cameroon: A serological study. *Seizure* 22 (4): 283-286.

Engels D., Urbani C., Belotto A., Meslin F., Savioli L., 2003 : The control of human (neuro)cysticercosis: which way forward? *Acta Tropica* 87 (1): 177-182.

Espíndola NM., Iha AH., Fernandes I., Takayanagui OM., dos Ramos Machado L., Livramento JA., Maia AAM., Peralta JM., Vaz AJ., 2005 : Cysticercosis immunodiagnosis using 18-and 14-kilodalton proteins from *Taenia crassiceps cysticercus* antigens obtained by immunoaffinity chromatography. *Journal of clinical microbiology* 43 (7): 3178-3184.

Fleury A., Dessein A., Preux PM., Dumas M., Tapia G., Larralde C., Sciutto E. 2000 : Symptomatic human neurocysticercosis. *Journal of Neurology* 251 (7): 830-837.

Fleury A., Hernandez M., Avila M., Cardenas G., Bobes R., Huerta M., Fragoso G., Uribe-Campero L., Harrison L., Parkhouse R. 2007 : Detection of HP10 antigen in serum for diagnosis and follow-up of subarachnoidal and intraventricular human neurocysticercosis. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 78 (9): 970-974.

Fleury A., Hernandez M., Fragoso G., Parkhouse R., Harrison L., Sciutto E., 2003 : Detection of secreted cysticercal antigen: a useful tool in the diagnosis of inflammatory neurocysticercosis. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 97 (5): 542-546.

Fleury A., Jung H., Cardenas G., Sciutto E., 2008 : Medical treatment for neurocysticercosis: drugs, indications and perspectives. *Current topics in medicinal chemistry* 8 (5): 424-433.

Flisser A., 2006 : Where are the tapeworms? *Parasitology International* 55, Supplement (0): S117-S120.

Flisser A., Gauci CG., Zoli A., Martinez-Ocaña J., Garza-Rodriguez A., Dominguez-Alpizar JL., Maravilla P., Rodriguez-Canul R., Avila G., Aguilar-Vega L. et al., 2004 : Induction of Protection against Porcine Cysticercosis by Vaccination with Recombinant Oncosphere Antigens. *Infection and Immunity* 72 (9): 5292-5297.

Forlenza OV., Filho AH., Nobrega JP., dos Ramos Machado L., de Barros NG., de Camargo CH., da Silva MF., 1997 : Psychiatric manifestations of neurocysticercosis: a study of 38 patients from a neurology clinic in Brazil. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 62 (6): 612-616.

Freeman RS., 1962 : Studies on the biology of *Taenia crassiceps* (Zeder, 1800) Rudolphi, 1810 (Cestoda). *Canadian Journal of Zoology* 40 (6): 969-990.

Furrows S., McCroddan J., Bligh W., Chiodini P., 2006 : Lack of specificity of a single positive 50 kDa band in the electroimmunotransfer blot (EITB) assay for cysticercosis. *Clinical microbiology and infection* 12 (5): 459-462.

Gabriël S., Johansen MV., Pozio E., Smit GSA., Devleeschauwer B., Allepuz A., Papadopoulos E., van der Giessen J., Dorny P. : Human migration and pig/pork import in the European Union: What are the implications for *Taenia solium* infections? *Veterinary Parasitology* in press.

Galán-Puchades MT., Fuentes MV., 2000 : Human cysticercosis and larval tropism of *Taenia asiatica*. *Parasitology Today* 16 (4): 174.

Galán-Puchades MT., Fuentes MV., 2008 : *Taenia asiatica* and pig cysticercosis. *Veterinary Parasitology* 157 (1-2): 160-161.

Ganaba R., Praet N., Carabin H., Millogo A., Tarnagda Z., Dorny P., Hounton S., Sow A., Nitiéma P., Cowan LD., 2011 : Factors associated with the prevalence of circulating antigens to porcine cysticercosis in three villages of Burkina Faso. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 5 (1): e927.

Garcia H., Gilman R., Horton J., Martinez M., Herrera G., Altamirano J., Cuba J., Rios-Saavedra N., Verastegui M., Boero J., 1997 : Albendazole therapy for neurocysticercosis A prospective double blind trial comparing 7 versus 14 days of treatment. *Neurology* 48 (5): 1421-1427.

Garcia HH., Del Brutto OH., 2003 : Imaging findings in neurocysticercosis. *Acta Trop* 87 (1): 71-8.

Garcia HH., Del Brutto OH., 2005 : Neurocysticercosis: updated concepts about an old disease. *Lancet Neurol* 4 (10): 653-61.

Garcia HH., Del Brutto OH., 2003 : Imaging findings in neurocysticercosis. *Acta Tropica* 87 (1): 71-78.

Garcia HH., Evans CA., Nash TE., Takayanagui OM., White AC., Botero D., Rajshekhar V., Tsang VC., Schantz PM., Allan JC., 2002 : Current consensus guidelines for treatment of neurocysticercosis. *Clinical Microbiology Reviews* 15 (4): 747-756.

Garcia HH., Gonzalez AE., Evans CAW., Gilman RH., 2003 : *Taenia solium* cysticercosis. *The Lancet* 362 (9383): 547-556.

Garcia HH., Parkhouse RM., Gilman RH., Montenegro T., Bernal T., Martinez SM., Gonzalez AE., Tsang VC., Harrison LJ., 2000 : Cysticercosis Working Group in P. 2000. Serum antigen detection in the diagnosis, treatment, and follow-up of neurocysticercosis patients. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 94 (6): 673-6.

Garcia HH., Pretell EJ., Gilman RH., Martinez SM., Moulton LH., Del Brutto OH., Herrera G., Evans CA., Gonzalez AE., 2004 : A trial of antiparasitic treatment to reduce the rate of seizures due to cerebral cysticercosis. *New England Journal of Medicine* 350 (3): 249-258.

Gauci CG., Jayashi CM., Gonzalez AE., Lackenby J., Lightowers MW., 2012 : Protection of pigs against *Taenia solium* cysticercosis by immunization with novel recombinant antigens. *Vaccine* 30 (26): 3824-8.

Ghimire PG., Ghimire P., Rana R., 2015 : Spectrum of Typical and Atypical Clinico-Histopathological and Radiological Presentation of Soft Tissue and Muscular Cysticercosis in Mid-Western and Far-Western Region of Nepal. *Journal of Clinical and Diagnostic Research* : JCDR 9 (9): EC01-EC03.

Gilman RH., Gonzalez AE., Llanos-Zavalaga F., Tsang VC., Garcia HH., 2012 : Prevention and control of *Taenia solium* taeniasis/ cysticercosis in Peru. *Pathog Glob Health* 106 (5): 312-8.

Gonzalez AE., Bustos JA., Jimenez JA., Rodriguez ML., Ramirez MG., Gilman RH., Garcia HH., 2012 : Efficacy of Diverse Antiparasitic Treatments for Cysticercosis in the Pig Model. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 87 (2): 292-296.

Gonzalez AE., Falcon N., Gavidia C., Garcia HH., Tsang VC., Bernal T., Romero M., Gilman RH., 1998 : Time-response curve of oxfendazole in the treatment of swine cysticercosis. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 59 (5): 832-6.

Gonzalez AE., Falcon N., Gavidia C., Garcia HH., Tsang VCW., Bernal T., Romero M., Gilman RH., 1997 : Treatment of porcine cysticercosis with oxfendazole: a dose-response trial. *Veterinary Record* 141 (16): 420-422.

Gonzalez AE., Gilman RH., Garcia HH., Lopez T., 2002 : Use of a simulation model to evaluate control programmes against *Taenia solium* cysticercosis. In: Prabhakar GSaS, editor. *Taenia solium Cysticercosis*. CAB International. p. 437-448.

González LM., Montero E., Harrison LJ., Parkhouse RME., Garate T., 2000 : Differential diagnosis of *Taenia saginata* and *Taenia solium* infection by PCR. *Journal of clinical microbiology* 38 (2): 737-744.

Goussanou S., Kpodekon T., Saegerman C., Azagoun E., Youssao A., Farougou S., Praet N., Gabriël S., Dorny P., Korsak Koulagenko N., 2013 : Spatial distribution and risks factors of porcine cysticercosis in southern Benin based meat inspection records. *International Research Journal of Microbiology* 4 (8): 188-196.

Grogl M., Estrada JJ., MacDonald G., Kuhn RE., 1985 : Antigen-antibody analyses in neurocysticercosis. *The Journal of parasitology*: 433-442.

Gweba M., Faleke OO., Junaidu AU., Fabiyi JP., Fajinmi AO., 2010 : Some risk factors for *Taenia solium* cysticercosis in semi-intensively raised pigs in Zuru, Nigeria. *Veterinaria Italiana* 46 (1): 57-67.

Hernández M., Gonzalez L., Fleury A., Saenz B., Parkhouse R., Harrison L., Garate T., Sciutto E., 2008 : Neurocysticercosis: detection of *Taenia solium* DNA in human cerebrospinal fluid using a semi-nested PCR based on HDP2. *Annals of tropical medicine and parasitology* 102 (4): 317-323.

Higuera-Calleja J., Góngora-Rivera F., Soto-Hernández JL., Del-Brutto OH., Moreno-Andrade T., Gutiérrez-Alvarado R., Rodríguez-Carbajal J., 2015 : Intrathecal gadodiamide for identifying subarachnoid and ventricular neurocysticercosis. *Tropical Medicine & International Health* 20 (7): 930-933.

Huang B., Li G., Jia F., Liu F., Ge L., Li W., Cheng Y., 2002 : Determination of specific IgG4 for diagnosis and therapeutic evaluation of cerebral cysticercosis. *Chinese medical journal* 115 (4): 580-583.

Ilsoe B., Kyvsgaard NC., Nansen P., Henriksen SA., 1990 : A study on the survival of *Taenia saginata* eggs on soil in Denmark. *Acta Vet Scand* 31 (2): 153-8.

Intapan PM., Khotsri P., Kanpittaya J., Chotmongkol V., Maleewong W., Morakote N., 2008. Evaluation of IgG4 and Total IgG Anti-bodies against Cysticerci and Peptide Antigens for the Diagnosis of Human Neurocysticercosis by ELISA. *Asian Pacific Journal of Allergy and Immunology* 26 (4): 237.

Ishida MMI., Almeida MSdS., Espíndola NM., Iha A., Pereira DA., Souza JGd., Varvakis TR., Vaz AJ., 2011 : Seroepidemiological study of human cysticercosis with blood samples collected on filter paper, in Lages, State of Santa Catarina, Brazil, 2004-2005. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical* 44 (3): 339-343.

Ito A., Yamasaki H., Nakao M., Sako Y., Okamoto M., Sato MO., Nakaya K., Margono SS., Ikejima T., Kassuku AA. et al., 2003 : Multiple genotypes of *Taenia solium*-ramifications for diagnosis, treatment and control. *Acta Tropica* 87 (1): 95-101.

Jayashi CM., Arroyo G., Lightowers MW., Garcia HH., Rodríguez S., Gonzalez AE., 2012 : Seroprevalence and Risk Factors for *Taenia solium* Cysticercosis in Rural Pigs of Northern Peru. *PLoS Negl Trop Dis* 6 (7): e1733.

Jayashi CM., Gonzalez AE., Castillo Neyra R., Kyngdon CT., Gauci CG., Lightowers MW., 2012 : Characterisation of antibody responses in pigs induced by recombinant oncosphere antigens from *Taenia solium*. *Vaccine* 30 (52): 7475-80.

Jeon H-K., Chai J-Y., Kong Y., Waikagul J., Insisiengmay B., Rim H-J., Eom KS., 2009 : Differential diagnosis of *Taenia asiatica* using multiplex PCR. *Experimental Parasitology* 121 (2): 151-156.

Jeon H-K., Eom KS., 2009 : Immunoblot Patterns of *Taenia asiatica* Taeniasis. *Korean J Parasitol* 47 (1): 73-77.

- Jeon H-K., Eom KS., 2013 : Molecular Approaches to *Taenia asiatica*. *Korean J Parasitol* 51 (1): 1-8.
- Joshi DD., Maharjan M., Johansen MV., Willingham AL., Sharma M., 2003 : Improving meat inspection and control in resource-poor communities: the Nepal example. *Acta Tropica* 87 (1): 119-127.
- Julio Sotelo, Cora Marin. 1987 : Hydrocephalus secondary to cysticercotic arachnoiditis. *Journal of Neurosurgery* 66 (5): 686-689.
- Jung H., Hurtado M., Sanchez M., Medina MT., Sotelo J., 1990 : Plasma and CSF levels of albendazole and praziquantel in patients with neurocysticercosis. *Clinical neuropharmacology* 13 (6): 559-564.
- Kala P., Khare P., 2014 : Fine-needle aspiration cytology as a diagnostic modality for cysticercosis: A clinicocytological study of 137 cases. *Journal of Cytology / Indian Academy of Cytologists* 31 (2): 68-72.
- Kaliaperumal S, Rao V, Parija S., 2005 : *Cysticercosis of the eye in south India* - A case series.
- Kelvin EA., Yung J., Fong MW., Carpio A., Bagiella E., Leslie D., Leon P., Andrews H., Allen Hauser W., 2012 : The association of living conditions and lifestyle factors with burden of cysts among neurocysticercosis patients in Ecuador. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 106 (12): 763-769.
- Kozan E., Gonenc B., Sarimehmetoglu O., Aycicek H., 2005 : Prevalence of helminth eggs on raw vegetables used for salads. *Food Control* 16(3): 239-242.
- Kramer LD., Locke G., Byrd S., Daryabagi J., 1989 : Cerebral cysticercosis: documentation of natural history with CT. *Radiology* 171 (2): 459-462.
- Larralde C., Sotelo J., Montoya R., Palencia G., Padilla A., Govezensky T., Diaz M., Sciutto E., 1990 : Immunodiagnosis of human cysticercosis in cerebrospinal fluid. Antigens from murine *Taenia crassiceps* cysticerci effectively substitute those from porcine *Taenia solium*. *Archives of pathology & laboratory medicine* 114 (9): 926-928.
- Lee E-G., Lee M-Y., Chung J-Y., Je E-Y., Bae Y-A., Na B-K., Kim T-S., Eom K-S., Cho S-Y., Kong Y., 2005 : Feasibility of baculovirus-expressed recombinant 10-kDa antigen in the serodiagnosis of *Taenia solium* neurocysticercosis. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 99 (12): 919-926.
- Lerner A., Shiroishi MS., Zee CS., Law M., Go JL., 2012 : Imaging of neurocysticercosis. *Neuroimaging clinics of North America* 22 (4): 659-676.
- Lescano AG., Garcia HH., Gilman RH., Gavidia CM., Tsang VCW., Rodriguez S., Moulton LH., Villaran MV., Montano SM., Gonzalez AE. et al., 2009 : *Taenia solium* Cysticercosis Hotspots Surrounding Tapeworm Carriers: Clustering on Human Seroprevalence but Not on Seizures. *PLoS Negl Trop Dis* 3(1): e371.
- Lightowlers MW. 2003 : Vaccines for prevention of cysticercosis. *Acta Tropica* 87 (1): 129-135.
- Lightowlers MW. 2010 : Eradication of *Taenia solium* cysticercosis: A role for vaccination of pigs. *International Journal for Parasitology* 40 (10): 1183-1192.
- Lopez J., Garcia E., Cortes I., Sotelo J., Tato P., Molinari J., 2004 : Neurocysticercosis: relationship between the developmental stage of metacestode present and the titre of specific IgG in the cerebrospinal fluid. *Annals of tropical medicine and parasitology* 98 (6): 569-579.
- Madec F., Hurnik D., Porphyre V., Cardinale E., 2010 : Good practices for biosecurity in the pig sector - Issues and options in developing and transition countries. *Rome*: FAO.
- Mafojane NA., Appleton CC., Krecek RC., Michael LM., Willingham AL., 2003 : The current status of neurocysticercosis in Eastern and Southern Africa. *Acta Tropica* 87 (1): 25-33.
- Malla N., Kaur R., Ganguly NK., Sawhney IM., Mahajan RC., 2005 : Utility of specific IgG4 response in saliva and serum samples for the diagnosis and follow up of human neurocysticercosis. *Nepal Med Coll J* 7 (1): 1-9.
- Manoutcharian K., Diaz-Orea A., Gevorkian G., Fragoso G., Acero G., González E., de Aluja A., Villalobos N., Gómez-Conde E., Sciutto E., 2004 : Recombinant bacteriophage-based multi-epitope vaccine against *Taenia solium* pig cysticercosis. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 99 (1-2): 11-24.
- Matthaiou DK., Panos G., Adamidi ES., Falagas ME., 2008 : Albendazole versus praziquantel in the treatment of neurocysticercosis: a meta-analysis of comparative trials. *PLoS Negl Trop Dis* 2 (3): e194.
- Mazumdar M., Pandharipande P., Poduri A., 2007 : Does albendazole affect seizure remission and computed tomography response in children with neurocysticercosis? A systematic review and meta-analysis. *Journal of child neurology* 22 (2): 135-142.
- Melo CSd., Vaz AJ., Nakamura PM., Silva MVd., Machado AdBB., 1997 : Human neurocysticercosis: IgE in cerebrospinal fluid. *Arquivos de neuro-psiquiatria* 55 (1): 8-11.
- Michelet L., Carod J-F., Rakotondrazaka M., Ma L., Gay F., Dauga C., 2010 : The pig tapeworm *Taenia solium*, the cause of cysticercosis: Biogeographic (temporal and spacial) origins in Madagascar. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 55: 744-750.
- Michelet L., Fleury A., Sciutto E., Kendjo E., Fragoso G., Paris L., Bouteille B., 2011 : Human neurocysticercosis: comparison of different diagnostic tests using cerebrospinal fluid. *Journal of clinical microbiology* 49 (1): 195-200.
- Minelli C., Takayanagui OM., 2005 : Evaluation of intrathecal synthesis of IgG in neurocysticercosis. *J Neurol Sci* 238 (1-2): 83-6.
- Mitchell WG., Crawford TO., 1988 : Intraparenchymal cerebral cysticercosis in children: diagnosis and treatment. *Pediatrics* 82 (1): 76-82.
- Mkupasi EM., Ngowi HA., Sikasunge CS., Leifsson PS., Johansen MV., 2013 : Efficacy of ivermectin and oxfendazole against *Taenia solium* cysticercosis and other parasitoses in naturally infected pigs. *Acta Tropica*(0).
- Mkupasi EM., Sikasunge CS., Ngowi HA., Johansen MV., 2013 : Efficacy and Safety of Anthelmintics Tested against *Taenia solium* Cysticercosis in Pigs. *PLoS Negl Trop Dis* 7 (7): e2200.
- Morales J., Martínez JJ., Rosetti M., Fleury A., Maza V., Hernandez M., Villalobos N., Fragoso G., de Aluja AS., Larralde C. et al., 2008 : Spatial distribution of *Taenia solium* porcine cysticercosis within a rural area of Mexico. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 2 (9): e284-e284.
- Moreno L., Lopez-Urbina MT., Farias C., Domingue G., Donadeu M., Dungu B., García HH., Gomez-Puerta LA., Lanusse C., González AE., 2012 : A high oxfendazole dose to control porcine cysticercosis: Pharmacokinetics and tissue residue profiles. *Food and Chemical Toxicology* 50 (10): 3819-3825.
- Mukaratirwa S., Lekule F., 2008 : Medical and veterinary doctors, social scientists and agricultural researchers meet to carry forward the fight against cysticercosis, a neglected and fatal disease of the poor: to the editor. *Journal of the South African Veterinary Association* 79 (1): 2.
- Murrell KD., 1991 : Economic losses resulting from food-borne parasitic zoonoses. *Southeast Asian J Trop Med Public Health* 22 (suppl): 377-81.
- Murrell KD., Dorny P., Flisser AP., 2005 : WHO/FAO/OIE Guidelines for the surveillance, prevention and control of taeniosis/cysticercosis. *Paris*: FAO, OIE, WHO.
- Mwanjali G., Kihamia C., Kakoko DVC., Lekule F., Ngowi H., Johansen MV., Thamsborg SM., Willingham AL., 2013 : Prevalence and risk factors associated with human *Taenia solium* infections in Mbozi District, Mbeya Region, Tanzania.

Mwape K., Praet N., Benitez-Ortiz W., Muma J., Zulu G., Celi-Erazo M., Phiri I., Rodriguez-Hidalgo R., Dorny P., Gabriël S., 2011: Field evaluation of urine antigen detection for diagnosis of *Taenia solium* cysticercosis. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 105 (10): 574-578.

Mwape KE., Phiri IK., Praet N., Muma JB., Zulu G., Van den Bossche P., De Deken R., Speybroeck N., Dorny P., Gabriël S., 2012: *Taenia solium* Infections in a rural area of Eastern Zambia-a community based study. *PLoS Negl Trop Dis* 6 (3): e1594.

Nash T., Singh G., White A., Rajshekhar V., Loeb J., Proano J., Takayanagui O., Gonzalez A., Butman J., DeGiorgio C., 2006: Treatment of Neurocysticercosis Current status and future research needs. *Neurology* 67 (7): 1120-1127.

Nash TE., 2003: Human case management and treatment of cysticercosis. *Acta Tropica* 87 (1): 61-69.

Nash TE., Pretell EJ., Lescano AG., Bustos JA., Gilman RH., Gonzalez AE., Garcia HH., 2008: Perilesional brain oedema and seizure activity in patients with calcified neurocysticercosis: a prospective cohort and nested case-control study. *The Lancet Neurology* 7 (12): 1099-1105.

Ndimubanzi PC., Carabin H., Budke CM., Nguyen HL., Qian YJ., Rainwater E., Dickey M., Reynolds S., Stoner JA., 2010: A systematic review of the frequency of neurocysticercosis with a focus on people with epilepsy. *PLoS Negl Trop Dis* 4 (11): e870.

Nhancupe N., Noormahomed E., Afonso S., Falk K., Lindh J., 2015: Performance of Tsol-p27 antigen for the serological diagnosis of cysticercosis in Mozambique. *J. of helminthology*: 1-4.

Nhancupe N., Salazar-Anton F., Noormahomed EV., Afonso S., Lindh J., 2013: Further characterization of Tsol-p27 as a diagnostic antigen in sub-Saharan Africa. *Experimental parasitology* 135 (3): 573-579.

Noormahomed EV., Nhacupe N., Mascaró-Lazcano C., Mauaie MN., Buene T., Funzamo CA., Benson CA., 2014: A Cross-sectional Serological Study of Cysticercosis, Schistosomiasis, Toxocariasis and Echinococcosis in HIV-1 Infected People in Beira, Mozambique. *PLoS Negl Trop Dis* 8 (9): e3121.

Noormahomed EV., Pividal JG., Azzouz S., Mascaró C., Delgado-Rodríguez M., Osuna A., 2003: Seroprevalence of anti-cysticercus antibodies among the children living in the urban environs of Maputo, Mozambique. *Ann Trop Med Parasitol* 97 (1): 31-5.

Nozais JP., 1998: Parasitic diseases and fecal hazards: diseases due to helminths. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* 91 (5 Pt 1-2): 416-422.

Nunes CM., Biondi GF., Heinemann MB., Richtzenhain LJ., 2000: Comparative evaluation of an indirect ELISA test for diagnosis of swine cysticercosis employing antigen from *Taenia solium* and *Taenia crassiceps* metacestodes. *Veterinary Parasitology* 93: 135-140.

Ochoa-Sánchez A., Jiménez L., Landa A., 2011: The hamster model for identification of specific antigens of *Taenia solium* tapeworms. *BioMed Research International* 2011.

Palomares-Alonso F., Hernández GP., Rojas-Tomé IS., Jung-Cook H., Pinzón-Estrada E., 2015: Murine cysticercosis model: Influence of the infection time and the time of treatment on the cysticidal efficacy of albendazole and praziquantel. *Experimental parasitology* 149: 1-6.

Parija M., Biswas R., Harish B., Parija S., 2004: Detection of specific *cysticercus* antigen in the urine for diagnosis of neurocysticercosis. *Acta tropica* 92(3): 253-260.

Parija SC., Raman GA., 2011: Anti-*Taenia solium* larval stage Ig G antibodies in patients with epileptic seizures. *Tropical parasitology* 1 (1): 20.

Peniche-Cardena A., Dominguez-Alpizar JL., Sima-Alvarez R., Argaez-Rodriguez F., Fraser A., Craig PS., Rodriguez-Canul R., 2002: Chemotherapy of porcine cysticercosis with albendazole sulphoxide. *Veterinary Parasitology* 108 (1): 63-73.

Perry BD., Randolph TF., 1999: Improving the assessment of the economic impact of parasitic diseases and of their control in production animals. *Veterinary Parasitology* 84 (3-4): 145-168.

Plancarte A., Hirota C., Martinez-Ocana J., Mendoza-Hernandez G., Zenteno E., Flisser A., 1999: Characterization of GP39-42 and GP24 antigens from *Taenia solium* cysticerci and of their antigenic GP10 subunit. *Parasitology research* 85 (8-9): 680-684.

Pondja A., Neves L., Mlangwa J., Afonso S., Fafetine J., Willingham AL., III, Thamsborg SM., Johansen MV., 2012a: Use of Oxfendazole to Control Porcine Cysticercosis in a High-Endemic Area of Mozambique. *PLoS Negl Trop Dis* 6 (5): e1651.

Pondja A., Neves L., Mlangwa J., Afonso S., Fafetine J., Willingham AL., III, Thamsborg SM., Johansen MV., 2012b: Use of oxfendazole to control porcine cysticercosis in a high-endemic area of Mozambique. *PLoS Negl Trop Dis* 6 (5): e1651.

Porphyre V., Betson M., Rabezanahary H., Mboussou Y., Zafindraibe NJ., Rasamoelina-Andriamanivo H., Costard S., Pfeiffer D., Michault A., 2015a: *Taenia solium* porcine cysticercosis in Madagascar: comparison of immuno-diagnostic techniques and estimation of the prevalence in pork carcasses traded in Antananarivo city. *Veterinary Parasitology* 219:77-83.

Porphyre V., Rasamoelina-Andriamanivo H., Rakotoarimanana A., Rasamoelina EO., Bernard C., Jambou R., Cardinale E., 2015b: Spatio-temporal prevalence of porcine cysticercosis in Madagascar based on meat inspection. *Parasites & Vectors* 8:391: 1-8.

Praet N., Kanobana K., Kabwe C., Maketa V., Lukanu P., Lutumba P., Polman K., Matondo P., Speybroeck N., Dorny P. et al., 2010: *Taenia solium* cysticercosis in the Democratic Republic of Congo: how does pork trade affect the transmission of the parasite? *PLoS Neglected Tropical Diseases* 4 (9): e817-e817.

Praet N., Speybroeck N., Manzanedo R., Berkvens D., Nsame Nforinwe D., Zoli A., Quet F., Preux P-M., Carabin H., Geerts S., 2009: The disease burden of *Taenia solium* cysticercosis in Cameroon. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 3 (3): e406-e406.

Prasad KN., Prasad A., Verma A., Singh AK., 2008: Human cysticercosis and Indian scenario: a review. *J Biosci* 33 (4): 571-82.

Preux PM., Tiemagni F., Fodzo L., Kandem P., Ngouafong P., Ndonko F., Macharia W., Dongmo L., Dumas M., 2000: Antiepileptic therapies in the Mifi Province in Cameroon. *Epilepsia* 41 (4): 432-439.

Quet F., Guerchet M., Pion SDS., Ngoungou EB., Nicoletti A., Preux P-M., 2010: Meta-analysis of the association between cysticercosis and epilepsy in Africa. *Epilepsia* 51 (5): 830-837.

Raghava MV., Prabhakaran V., Jayaraman T., Muliyl J., Oommen A., Dorny P., Vercruysse J., Rajshekhar V., 2010: Detecting spatial clusters of *Taenia solium* infections in a rural block in South India. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 104 (9): 601-612.

Rajshekhar V., 2008. Albendazole therapy in patients with solitary cerebral *cysticercus* granuloma. Is it effective? *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 79 (3): 238-239.

Rangel-Castilla L., Serpa JA., Gopinath SP., Graviss EA., Diaz-Marchan P., White AC., 2009: Contemporary neurosurgical approaches to neurocysticercosis. *The American journal of tropical medicine and hygiene* 80 (3): 373-378.

Rangel R., Torres B., Del Bruto O., Sotelo J., 1987: Cysticercotic encephalitis: a severe form in young females. *The American Journal of tropical medicine and Hygiene* 36 (2): 387-392.

Raobijaona H., Rakotoarimanitra W., 2000: Cysticercosis in hospitalized children: report of 28 cases at the National Children's Hospital in Antananarivo, Madagascar. *Médecine d'Afrique Noire* 47 (2): 88-91.

Riley T., White Jr A., 2003: Management of neurocysticercosis. *CNS drugs* 17 (8): 577-591.

Roberts MG., 1994: Modelling of parasitic populations: cestodes. *Veterinary Parasitology* 54 (1-3): 145-160.

Robertson LJ., van der Giessen JWB., Batz MB., Kojima M., Cahill S., 2013: Have foodborne parasites finally become a global concern? *Trends in Parasitology* 29 (3): 101-103.

Rocha SM., Suzuki LA., da SILVA AD., Arruda GC., Rossi CL., 2002 : A rapid latex agglutination test for the detection of anti-*cysticercus* antibodies in cerebrospinal fluid (CSF). *Revista do Instituto de Medicina Tropical de Sao Paulo* 44 (1): 57-58.

Román G., Sotelo J., Del Brutto OH., Flisser A., Dumas M., Wadia N., Botero D., Cruz M., Garcia H., de Bittencourt PR., 2000 : A proposal to declare neurocysticercosis an international reportable disease. *Bull WHO* 78: 399-406.

Rottbeck R., Nshimiyimana JF., Tugirimana P., Düll UE., Sattler J., Hategekimana J-C., Hitayezu J., Bruckmaier I., Borchert M., Gahutu JB. et al., 2013 : High Prevalence of Cysticercosis in People with Epilepsy in Southern Rwanda. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 7 (11): e2558.

Rushton J., 2011 : A Value Chain Approach to Animal Disease Risk Management Animal Production and Health Series. *Food and Agriculture Organisation*.

Sáenz B., Ruiz-García M., Jiménez E., Hernández-Aguilar J., Suastegui R., Larralde C., Sciutto E., Fleury A., 2006 : Neurocysticercosis: Clinical, Radiologic, and Inflammatory Differences Between Children and Adults. *The Pediatric Infectious Disease Journal* 25 (9): 801-803.

Sahu P., Parija S., Kumar D., Jayachandran S., Narayan S., 2014 : Comparative profile of circulating antigenic peptides in CSF, serum & urine from patients with neurocysticercosis diagnosed by immunoblotting. *Parasite immunology* 36 (10): 509-521.

Sahu PS., Parija SC., Sahu PK., 2008 : Tear IgA-ELISA: a novel and sensitive method for diagnosis of ophthalmic cysticercosis. *Acta Trop* 106 (3): 168-74.

Salazar-Anton F., Lindh J., 2011 : *Taenia solium*: a two-dimensional Western blotting method combined with the use of an EST-library for the identification of immunogenic proteins recognized by sera from neurocysticercosis patients. *Experimental parasitology* 128 (4):371-376.

Saran RK., Rattan V., Rajwanshi A., Nijkawan R., Gupta SK., 1998 : Cysticercosis of the oral cavity: report of five cases and a review of literature. *International Journal of Paediatric Dentistry* 8 (4): 273-278.

Sarti E., Schantz PM., Plancarte A., Wilson M., Gutierrez IO., Aguilera J., Roberts J., Flisser A., 1994 : Epidemiological investigation of *Taenia solium* taeniasis and cysticercosis in a rural village of Michoacan State, Mexico. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 88 (1): 49-52.

Sarti E., Schantz PM., Plancarte A., Wilson M., Gutierrez IO., Lopez AS., Roberts J., Flisser A., 1992. Prevalence and risk factors for *Taenia solium* taeniasis and cysticercosis in humans and pigs in a village in Morelos, Mexico. *The American journal of tropical medicine and hygiene* 46 (6): 677-685.

Sato MO., Yamasaki H., Sako Y., Nakao M., Nakaya K., Plancarte A., Kassuku AA., Dorny P., Geerts S., Benitez-Ortiz W. et al., 2003 : Evaluation of tongue inspection and serology for diagnosis of *Taenia solium* cysticercosis in swine: usefulness of ELISA using purified glycoproteins and recombinant antigen. *Veterinary Parasitology* 111 (4): 309-322.

Scheel CM., Khan A., Hancock K., Garcia HH., Gonzalez AE., Gilman RH., Tsang VC., Peru CWGi., 2005 : Serodiagnosis of neurocysticercosis using synthetic 8-kD proteins: comparison of assay formats. *The American journal of tropical medicine and hygiene* 73 (4): 771-776.

Schmidt V., Sikasunge C., Odongo-Aginya E., Simukoko C., Mwanjili G., Alarakol S., Ovuga E., Matuja W., Kihamia C., Löscher T., 2015 : *Taenia solium* metacestode preparation in rural areas of sub-Saharan Africa: a source for diagnosis and research on cysticercosis. *African health sciences* 15 (1): 58-67.

Schulz T., Randrianaiivo EM., 1998 : Filières et marchés du porc d'Antananarivo: Pratiques sociales et économiques des bouchers et autres collecteurs de la capitale. Antananarivo: *Maison du Petit Elevage*.

Sciutto E., Fragoso G., Fleury A., Laclette JP., Sotelo J., Aluja A., Vargas L., Larralde C., 2000a : *Taenia solium* disease in humans and pigs: an ancient parasitosis disease rooted in developing countries and emerging as a major health problem of global dimensions. *Microbes Infect* 2 (15): 1875-90.

Sciutto E., Fragoso G., Fleury A., Laclette JP., Sotelo J., Aluja A., Vargas L., Larralde C., 2000b : *Taenia solium* disease in humans and pigs: an ancient parasitosis disease rooted in developing countries and emerging as a major health problem of global dimensions. *Microbes and Infection* 2: 1875-1890.

Sciutto E., Fragoso G., Hernández M., Rosas G., Martínez J., Fleury A., Cervantes J., Aluja A., Larralde C., 2013 : Development of the S3Pvac vaccine against porcine *Taenia solium* cysticercosis: a historical review. *Journal of Parasitology* 99 (4): 686-92.

Sciutto E., Fragoso G., Larralde C., 2011 : *Taenia crassiceps* as a model for *Taenia solium* and the S3Pvac vaccine. *Parasite immunology* 33 (1): 79-80.

Sciutto E., Martinez JJ., Huerta M., Avila R., Fragoso G., Villalobos N., de Aluja A., Larralde C., 2003 : Familial clustering of *Taenia solium* cysticercosis in the rural pigs of Mexico: hints of genetic determinants in innate and acquired resistance to infection. *Veterinary Parasitology* 116 (3): 223-229.

Sharma M., Beke N., Khurana S., Bhatti H., Sehgal R., Malla N., 2015 : An ocular cysticercosis case: Caused by Asian genotype of *Taenia solium*.

Short J., Heiner D., Hsiao R., Andersen F., 1990 : Immunoglobulin E and G4 antibodies in cysticercosis. *Journal of clinical microbiology* 28 (7): 1635-1639.

Sikasunge CS., Johansen MV., Willingham lii AL., Leifsson PS., Phiri IK., 2008 : *Taenia solium* porcine cysticercosis: Viability of cysticerci and persistency of antibodies and cysticercal antigens after treatment with oxfendazole. *Veterinary Parasitology* 158 (1-2): 57-66.

Singh AK., Singh SK., Prasad KN., Singh A., Bajpai A., Rahman M., Rai RP., Gupta RK., Tripathi M., Husain N., 2013 : Evaluation of ELISA, neck muscle, tongue and eyelid examinations for the diagnosis of swine cysticercosis in a highly endemic area of north India. *Experimental Parasitology* 134 (3): 313-317.

Singh G., Sander J., 2004 : Anticysticercal treatment and seizures in neurocysticercosis. *The Lancet Neurology* 3 (4): 207-208.

Smith G., 1997 : The economics of parasite control: obstacles to creating reliable models *Veterinary Parasitology* 72: 437-449.

Šoba B., Beovic B., Luznik Z., Skvarc M., Logar J., 2014 : Evidence of human neurocysticercosis in Slovenia. *Parasitology* 141 (04): 547-553.

Sotelo J., Del Brutto O., Penagos P., Escobedo F., Torres B., Rodriguez-Carbajal J., Rubio-Donnadieu F., 1990 : Comparison of therapeutic regimen of anticysticercal drugs for parenchymal brain cysticercosis. *Journal of neurology* 237 (2): 69-72.

Sotelo J., Escobedo F., Penagos P., 1988 : Albendazole vs praziquantel for therapy for neurocysticercosis: a controlled trial. *Archives of neurology* 45 (5): 532.

Stafford GI., Pedersen ME., Van Staden J., Jäger AK., 2008 : Review on plants with CNS-effects used in traditional South African medicine against mental diseases. *Journal of Ethnopharmacology* 119 (3): 513-537.

Storey GW., 1987 : Survival of tapeworm eggs, free and in proglottids, during simulated sewage treatment processes. *Water research* 21 (2): 199-203.

Storey GW., Phillips RA., 1985 : The survival of parasite eggs throughout the soil profile. *Parasitology* 91(3): 585-590.

Takayanagui OM., Odashima NS., 2006 : Clinical aspects of neurocysticercosis. *Parasitology International* 55, Supplement: S111-S115.

Tejado LdA., Pozo KT., Palomino CB., de Dios de Vega JL., 2012 : Psychiatric manifestations of neurocysticercosis in paediatric patients. *BMJ Case Reports* 2012.

Thomas L., de Glanville W., Cook E., Fevre E., 2013 : The spatial ecology of free-ranging domestic pigs (*Sus scrofa*) in western Kenya. *BMC Veterinary Research* 9 (1): 46.

Thompson RCA., Conlan JV., 2011 : Emerging issues and parasite zoonoses in the SE Asian and Australasian region. *Veterinary Parasitology* 181 (1): 69-73.

Thussu A., Chattopadhyay A., Sawhney I., Khandelwal N., 2008 : Albendazole therapy for single small enhancing CT lesions (SSECTL) in the brain in epilepsy. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 79 (3): 272-275.

Torgerson PR., Macpherson CNL., 2011 : The socioeconomic burden of parasitic zoonoses: Global trends. *Veterinary Parasitology* 182 (1): 79-95.

Tsang VCW., Brand JA., Boyer AE., 1989 : An Enzyme-Linked Immunoelctrotransfer Blot Assay and Glycoprotein Antigens for Diagnosing Human Cysticercosis (*Taenia solium*). *Journal of Infectious Diseases* 159 (1): 50-59.

Tsang VCW., Pilcher JA., Zhou W., Boyer AE., Kamango-Sollo EIP., Rhoads ML., Murrell KD., Schantz PM., Gilman RH., 1991 : Efficacy of the immunoblot assay for cysticercosis in pigs and modulated expression of distinct IgM/ IgG activities to *Taenia solium* antigens in experimental infections. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 29 (1-2): 69-78.

Uga S., Hoa N., Noda S., Moji K., Cong L., Aoki Y., Rai S., Fujimaki Y., 2009 : Parasite egg contamination of vegetables from a suburban market in Hanoi, Vietnam. *Nepal Med Coll J.* 11 (2): 75-8.

Vazquez ML., Jung H., Sotelo J., 1987 : Plasma levels of praziquantel decrease when dexamethasone is given simultaneously. *Neurology* 37 (9): 1561-1561.

Verbeke W., 2001 : The emerging role of traceability and information in demand-oriented livestock production. *Outlook on Agriculture* 30 (4): 249-255.

Wallin MT., Kurtzke JF., 2004 : Neurocysticercosis in the United States: review of an important emerging infection. *Neurology* 63 (9): 1559-64.

White JA., 2000 : Neurocysticercosis: updates on epidemiology, pathogenesis, diagnosis, and management. *Annu Rev Med* 51: 187-206.

Winkler AS., 2013 : *Epilepsy and neurocysticercosis in sub-Saharan Africa*. INTECH Open Access Publisher.

Winkler AS., Willingham AL., Sikasunge CS., Schmutzhard E., 2009 : Epilepsy and neurocysticercosis in sub-Saharan Africa. *Wiener Klinische Wochenschrift* 121 (0): 3-12.

Yera H., Dupont D., Houze S., M'rad MB., Pilleux F., Sulahian A., Gatey C., Andrieu FG., Dupouy-Camet J., 2011 : Confirmation and follow-up of neurocysticercosis by real-time PCR in cerebrospinal fluid of patients living in France. *Journal of clinical microbiology: JCM.* 05839-11.

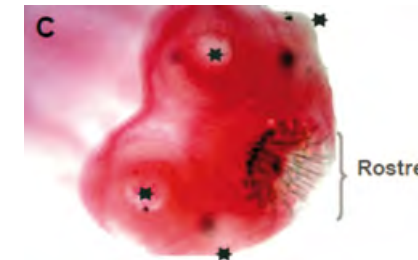
Zammarchi L., Strohmeyer M., Bartalesi F., Bruno E., Muñoz J., Buonfrate D., Nicoletti A., García HH., Pozio E., Bartoloni A. *et al.*, 2013 : Epidemiology and management of cysticercosis and *Taenia solium* taeniasis in Europe, systematic review 1990-2011. *PLoS ONE* 8 (7): e69537.

Zoli A., Shey-Njila O., Assana E., Nguekam J-P., Dorny P., Brandt J., Geerts S., 2003 : Regional status, epidemiology and impact of *Taenia solium* cysticercosis in Western and Central Africa. *Acta Tropica* 87 (1): 35-42.



(A) Ver adulte de *T. solium* à l'œil nu.
Le ver plat et segmenté est formé en moyenne par 1000 proglottis mesurant en moyenne 2 à 3 m de long mais peut atteindre 8 m.

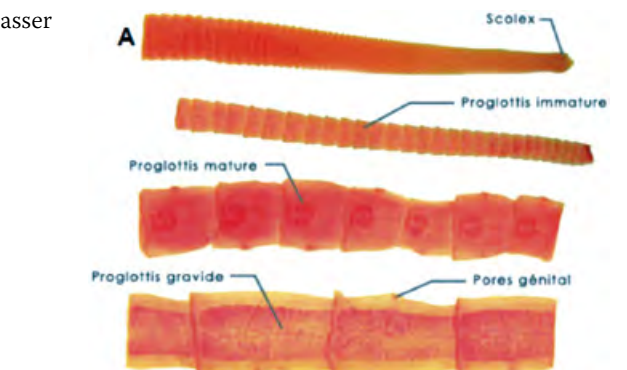
(B) Extrémité antérieure de *T. solium*.
Le parasite est formé par 3 parties distinctes : le scolex (tête), le cou et le strobile (corps).



(C) Détails du socle du ver *T. solium*.
Le scolex porte 4 ventouses (marqués par les étoiles grises) ou suçoirs circulaires et un rostre, muni d'une double couronne de crochets (au nombre de 22 à 32 avec alternance de gros et petits crochets servant d'organe de fixation du parasite aux muqueuses intestinales).

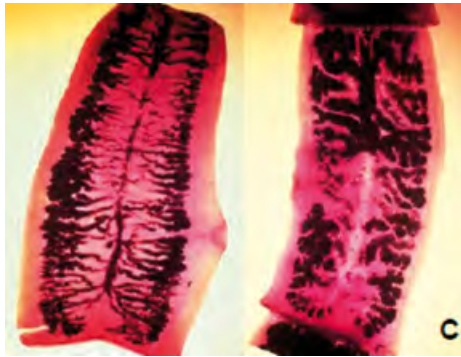
Figure 1 : La forme adulte du ver *Teania solium*
(Source : adapté de http://www.parasitologie.uhp-nancy.fr/cycles/diaporama.php?nom_fichier=taenia_solium/diaporama1/taenia_solium_1.xml)

(A) Evolution des proglottis de *T. solium* (colorés au carmin).
Les proglottis immatures plus larges que longs sont formés au niveau de la zone de prolifération faisant suite au cou en arrière du scolex. Ils deviennent ensuite matures et enfin gravides où leur forme est aussi longue que large. Ces proglottis gravides se détachent du corps du ténia, et migrent vers l'anus pour passer dans les selles (environ 6 par jour).



(B) Détail de proglottis matures d'un ver adulte de *T. solium* observé au microscope après coloration au carmin: les organes génitaux mâles et femelles sont bien différenciés et visibles.

(Source : http://www.parasitologie.uhp-nancy.fr/cycles/diaporama.php?nom_fichier=taenia_solium/diaporama1/taenia_solium_1.xml)



(C) Détail d'un proglottis mature d'un ver adulte de *T. saginata* (gauche) et *T. solium* (droit) observé au microscope après coloration au carmin.

Noter dans l'utérus, la présence de nombreuses ramifications (15 à 30) dichotomiques chez *T. saginata* et moins de ramifications latérales (7 à 10 branches) plus épaisses et dendritiques chez *T. solium*.

(Source : Parasitologie Mycologie. CHU Lille. E. Dutoit.)

Figure 2 : L'évolution de la forme adulte de *Taenia solium*



Coque externe (rarement présente)
Coque interne striée
Crochets (6 dont 4 visibles)
Globule graisseux

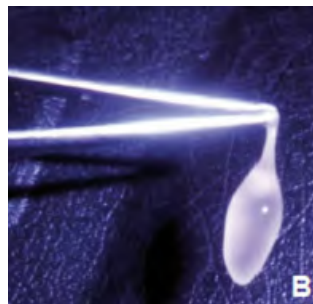
(Source : Adapté d'une photo présentée par Centers for Disease Control and Prevention. DPDx : Taeniasis. www.cdc.gov/dpdx/taeniasis/index.html)

Figure 3 : Observation microscopique sans coloration d'un œuf de *Taenia sp.*

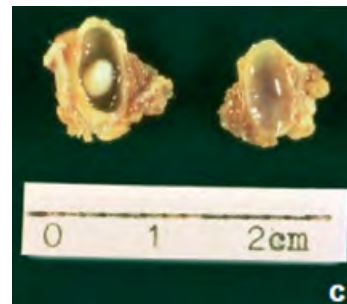
Les œufs de différentes espèces de *Taenia* sont indiscernables les uns des autres. L'embryophore contient l'embryon hexacanthe car il possède six crochets réfringents



(A) Photo d'un morceau de viande de porc ayant la cysticerose porcine. Quelques cysticercs sont indiqués par les flèches noires.



(B) Les cysticercs peuvent être isolés intacts à l'aide d'une pince. La vésicule transparente est remplie de liquide.



(C) Une fois vidée de son contenu liquide, le scolex bien individualisé est visible dans la vésicule de cysticercus (à gauche).

Figure 4 : La forme larvaire de *Taenia solium* ou cysticercus

Source : <http://umvf-osma.ru/cycles/campus-parasitologie-mycologie/cycle2/poly/2913ico.html>

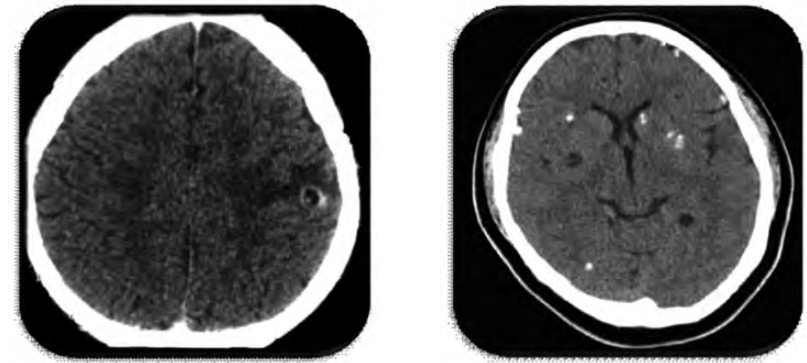


Figure 5 : Images scanographiques cérébrales illustrant les quatre (A, B, C et D) stades d'évolution de la neurocysticerose

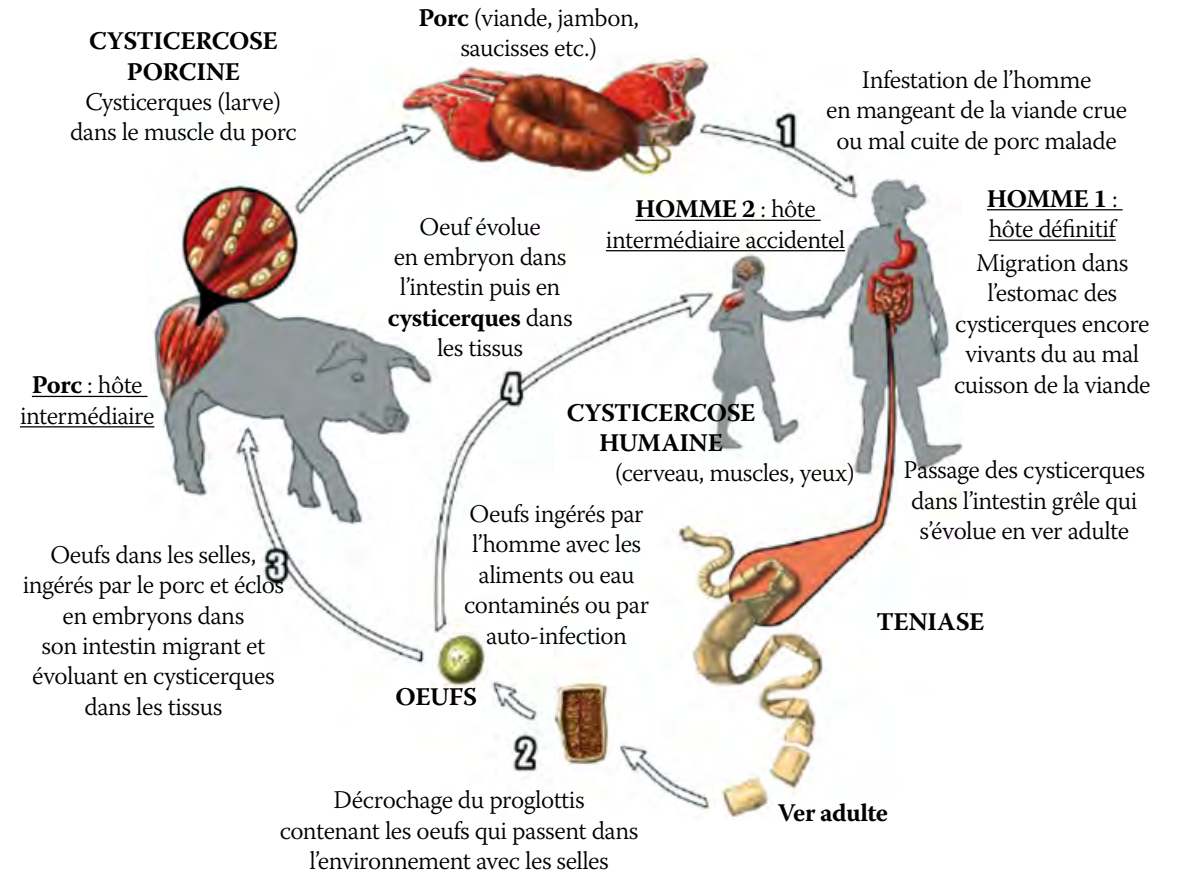


Figure 6 : Cycle de vie *Taenia solium*

Source : adapté de Rasamoelina-Andriamanivo et al., 2013,

« Control of cysticercosis in Madagascar: beware of the pitfalls ». Trends Parasitol 29, 538-547

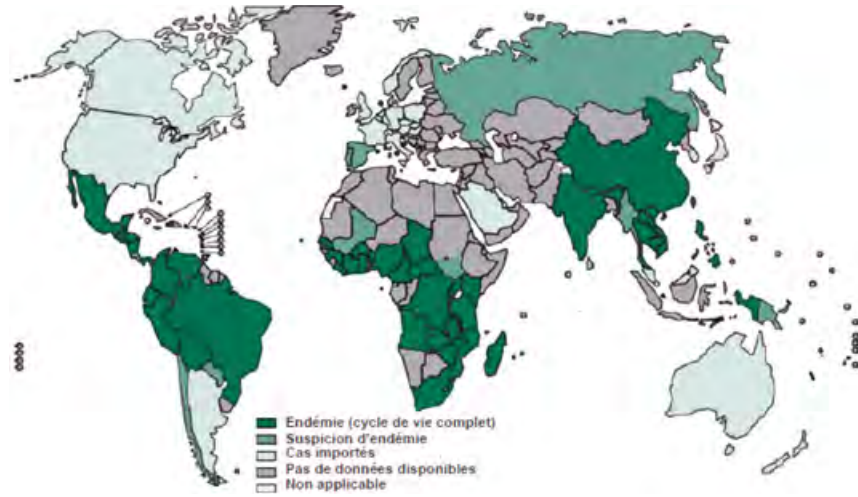
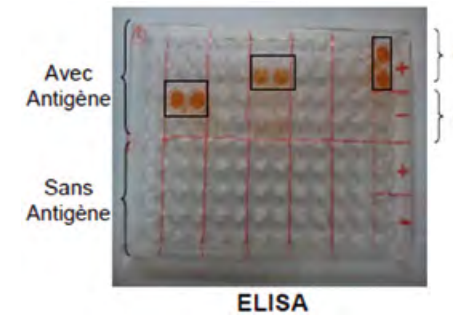


Figure 7 : Pays et zones exposés au Ténia et à la cysticerose, 2012. Source : Reproduction autorisée par l'éditeur, tirée de « *Neglected Tropical Diseases : a statistical update, latest data available* », page 25, OMS 2014



Figure 8 : Cœur d'un porc de race locale malgache massivement infesté



A : Plaque ELISA avec des antigènes fixés sur la moitié des puits. Dans le sérum d'une personne malade (+, encadré), l'interaction entre ces antigènes et les anticorps spécifiques de la cysticerose est révélée par une coloration dans le puits. Chez une personne saine (-) le puits reste incolore. Chaque sérum est testé deux fois (deux puits adjacents) aussi bien sur la partie avec des antigènes que sur la partie où rien n'est fixé.

B : Bandelettes de Western Blot montrant, sous forme de bandes, les protéines (antigènes) extraites de la membrane de cysticerque qui reconnaissent les anticorps spécifiques de la cysticerose dans le sérum d'une personne malade (+). Les bandes sont absentes (sérum sans anticorps) quand le sujet est sain (-). Les tailles des antigènes sont indiquées en kDaltons.

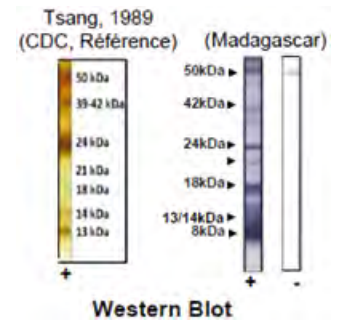


Figure 9 : Tests ELISA et Western Blot utilisant les antigènes membranaires extraits des cysticerques selon la méthode de Tsang, 1989



Figure 10 : L'élevage de porc

L'élevage en divagation (à gauche) constitue le principal type d'élevage de porc à Madagascar, avec lequel les facteurs de risque (déjections humaines, aliments et eaux contaminés etc.) se démultiplient. L'élevage fermé (à droite) constitue toujours un réservoir potentiel malgré que les animaux soient maintenus dans un élevage clos. La provenance originelle de leur alimentation à base de déchets de cuisine, est non vérifiée.

Ces types d'élevage sont une des causes qui font que la contamination persiste et qu'il est difficile de rompre le cycle à Madagascar.



Figure 11 : Quelques photos illustrant le problème de salubrité à Majunga, Madagascar



Dessin : Antso Andrianary

Figure 12 : Le péril fécal - Les principales sources de contamination sont l'eau et les aliments



Figure 13 : Vente de porc au marché d'Imeritsiatosika
Le marché d'Imeritsiatosika à 30 km de la capitale malgache est le principal carrefour d'approvisionnement et de vente de porc pour les bouchers et éleveurs d'Antananarivo

Pour la conservation de la biodiversité de Madagascar

Maintenir les services écosystémiques pour faire face au contexte environnemental changeant

Comprendre les interactions pour de meilleurs services écosystémiques

En raison de son insularité, Madagascar est un véritable sanctuaire de la biodiversité. Il possède une grande diversité d'habitats avec des espèces uniques qui ont évolué au sein de la flore et de la faune. Figurant parmi les 10 points chauds de la diversité biologique mondiale, il est parmi les rares pays qui présentent encore une très forte concentration d'espèces endémiques, à la fois animales et végétales, dont certaines sont emblématiques au niveau mondial, telles que les lémuriers et les baobabs. Cet endémisme se retrouve dans la plupart des écosystèmes comme la forêt, les jachères (arborées, arbustives, herbeuses), les steppes, les terres agricoles, les mangroves, les récifs coralliens, etc.

Cette biodiversité endémique rend plusieurs services écosystémiques qui profitent aux populations locales comme l'approvisionnement en nourriture et en eau, la régulation du climat et des maladies, le contrôle de la pollinisation des cultures, la procuration de bénéfices culturels et spirituels... A Madagascar, elle est considérée comme étant l'une des principales ressources pour le bien-être et la vie de la population locale. La littérature scientifique estime que 80 % des malgaches sont entièrement dépendants des ressources naturelles pour leur subsistance, d'où l'intérêt de bien les gérer et de les préserver.

Cette biodiversité est cependant menacée par les activités et pratiques humaines destructives. En effet, la déforestation et les pratiques de culture sur abattis-brûlis se font dans un objectif de développement d'espaces d'habitation et de nécessité pour survivre ; elles sont donc à fortiori, les principales causes de la perte de biodiversité. A ces menaces d'origine anthropique s'ajoutent les effets du changement climatique qui entraînent progressivement et inéluctablement une perturbation du fonctionnement de l'écosystème.

Les processus écologiques et la diversité biologique de Madagascar constituent pourtant des atouts économiques de première importance. A titre d'exemple, le baobab fait partie de ces plantes dont 6 espèces endémiques ont été recensées sur l'île sur les 9 existantes dans le monde. Certaines d'entre elles sont malheureusement menacées de disparition. Pour que la génération future puisse encore tirer bénéfice de ces écosystèmes, il est nécessaire de les gérer durablement. Le développement d'études interdisciplinaires y contribue car il permet de comprendre les interactions entre la société humaine et les différents éléments de l'écosystème et d'évaluer leurs impacts sur la dynamique et la production de ces écosystèmes. Ce thème de recherche : **« Les baobabs de Madagascar : vers une compréhension de leur multiplication et dispersion »**, traité par le collectif « ECOBAO », en apporte les premiers éléments de réponse.

Diverses options sont actuellement proposées pour conserver la biodiversité des écosystèmes naturels et essayer de réduire les pressions sur les ressources naturelles, notamment sur les écosystèmes forestiers. Parmi ces options, l'adoption de pratiques agricoles durables qui visent le maintien des fonctions écologiques primaires, peuvent être des alternatives pour réduire les pressions sur la forêt. De telles pratiques, comme l'agroforesterie qui concilie à la fois cultures annuelles et cultures pérennes avec des arbres, rendent des services écosystémiques analogues à ceux des écosystèmes forestiers. Elles procurent à la population de la nourriture, mais également bien d'autres bienfaits comme la régulation progressive et continue de l'eau, la fourniture du bois et le maintien d'une agro-biodiversité. Ces pratiques s'adaptent également au changement climatique de différentes manières : par le maintien de la matière organique dans le sol qui constitue une réserve de nutriments pour la plante ; par une couverture du sol via les différents étages de végétation et les restitutions de litière qu'ils procurent au sol lesquelles peuvent pallier aux variations d'humidité ; par la limitation des pertes par érosion et de dégradation des terres qui en découle en cas de fortes pluies... De plus, cette rétention de matière organique dans le sol, contribue à la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) par la séquestration du carbone atmosphérique dans le sol ou dans la plante. La quantification de ces services est toutefois nécessaire et fait ainsi l'objet d'études scientifiques effectuées dans le cadre de la REDD+ (Réduction des Emissions de gaz à effet de serre issus de la Déforestation et de la Dégradation des Forêts). Différents résultats sont présentés dans le chapitre du collectif « CARBONE » : **« A la recherche de systèmes durables et résilients : cas des systèmes agroécologiques de la région Est de Madagascar »**.

Espérons que les conclusions prometteuses de ces travaux de recherche trouveront leur application.



Vers une compréhension des relations entre les baobabs et quelques éléments des écosystèmes forestiers de l'ouest de Madagascar : pollinisateurs, disperseurs et prédateurs

Towards a better understanding of relations between baobabs and some forest ecosystem key elements of the West part of Madagascar: pollinators, dispersers and predators

S. ANDRIANTSALAZA^{1,2}

E. N. RASOAMANANA^{1,2}

O. RAZANAMARO^{1,2}

C. ELGOYEN³

J. M. LEONG POCK TSY²

P. RAMAVOVOLOLONA^{1,2}

B. RAKOUTH^{1,2}

E. ROGER¹

P. DANTHU^{2,4,5}

(1) Département de Biologie et Ecologie végétales, Université d'Antananarivo, BP 906, 101 Antananarivo, Madagascar

(2) DP Forêts et Biodiversité, BP 853, 101 Antananarivo, Madagascar

(3) Université Paris-Est Créteil, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil cedex, France

(4) CIRAD, DGDRS, Campus de Lavalette, 34398 Montpellier cedex 5, France

(5) CIRAD, Direction régionale à Madagascar, BP 853, 101 Antananarivo, Madagascar



Résumé

Pour compléter les connaissances scientifiques permettant de poser les bases d'une gestion durable des baobabs malgaches et des écosystèmes qui les abritent, le projet EcoBao (Ecosystème Baobab) a développé un ensemble d'études afin de préciser certaines interactions entre les baobabs et les autres éléments de leurs écosystèmes. Un focus a été fait sur les pollinisateurs, les disperseurs de graines et les prédateurs des jeunes plants. Nos résultats montrent que les baobabs sont pollinisés par les chauves-souris, les abeilles ou les microcèbes. Mais les principaux pollinisateurs sont des papillons de nuit de la famille des sphingidae. Les sphinx sont adaptés à chaque espèce de baobab : la cohorte des pollinisateurs visitant les baobabs de la section des Brevitubae est différente de celle visitant les Longitubae. Soixante-quatre composés, principalement aromatiques chez les Longitubae et aliphatiques chez les Brevitubae, ont été identifiés dans le parfum des fleurs des baobabs. Nos résultats portant sur la dispersion des graines montrent que la mégafaune disparue (tortues géantes) ou actuelle (grand bétail) a été (ou est) apte à assurer une dissémination des graines. La dispersion par hydrochorie des graines est également efficace, et peut expliquer la concentration spatiale à proximité des points d'eau de nombreux baobabs. L'importance des filtres environnementaux sur la distribution spatiale et sur la régénération naturelle des baobabs a également été mise en exergue. Enfin, des résultats préliminaires montrent que les achatines peuvent avoir une action prédatrice sur les jeunes plants de baobab et donc avoir un effet négatif sur leur régénération.

Abstract

Project EcoBao (Ecosystème Baobab) has developed a set of studies specifying a number of interacting factors between baobabs and other aspects of their ecosystems, thus complementing the scientific knowledge which enables the basis to be determined for the sustainable management of Malagasy baobabs and the ecosystems they occupy. These studies concentrate on the pollinators, the seed dispersers and the predators of young baobab plants. Our results show that baobabs are pollinated by bats, bees and mouse lemurs. However, the main pollinators are night moths of the Sphingidae family. Sphinx moths are adapted to each of the baobab species. The cohort of pollinators that visits baobabs of the Brevitubae section differ from that which visits the Longitubae. Sixty-four components have been identified in the floral fragrances of the baobab, predominately aromatic in the Longitubae section and aliphatic in the Brevitubae. Our results from studies of seed dispersal show that megafauna, such as the extinct giant tortoise, was capable, and in the case of large cattle, still is capable of ensuring the dissemination of seed. Dispersal of seed by hydrochory is also effective, which explains the spacial distribution of baobabs close to sites of water. The importance of environmental filters on the spacial distribution and on the natural regeneration of baobabs has also been highlighted. Finally, preliminary results show that land snails of the Achatinidae family may also exert a predatory action on young baobab plants, consequently impeding their regeneration.

Introduction

La conservation de la biodiversité et la gestion des ressources naturelles dans un contexte de changement global et en particulier climatique représentent un champ d'intervention où se développent les interactions entre politique et recherche. Ce dialogue doit être nourri des connaissances scientifiques.

Or, il existe à Madagascar, pourtant l'un des hotspots de la biodiversité mondiale (Myers *et al.*, 2000), un déficit de connaissances important sur l'état actuel de l'environnement, ses dynamiques, la place et l'impact des sociétés humaines dans et sur l'environnement. Malgré des travaux importants (Goodman & Benstead, 2005), le relatif vide scientifique concernant le fonctionnement des écosystèmes malgaches a pour conséquence le développement de controverses quant à l'état des ressources, aux conséquences des changements globaux (liés aux actions anthropiques, déforestation, changement d'affectation des terres, changement climatique) (Kull, 2004 ; Pollini, 2011) et aux modalités de gestion à mettre en place pour concilier durablement conservation et usages des populations (Marie *et al.*, 2009).

C'est dans ce contexte qu'un consortium de chercheurs appartenant à l'Université d'Antananarivo et au CIRAD a, dans le cadre du projet PARRUR, développé un projet de recherches en faisant un focus sur les baobabs et les écosystèmes à baobabs de Madagascar. Ce projet dont l'acronyme est EcoBao (Ecosystème Baobab) a pour intitulé « Pour une gestion durable des ressources naturelles et une conservation de la biodiversité à Madagascar : étude de l'impact des sociétés humaines sur la dynamique et la production des écosystèmes forestiers. Cas des écosystèmes à baobabs ». Il a pour objet d'étudier, selon une approche holistique, heuristique et interdisciplinaire, l'interface systèmes sociaux/systèmes écologiques dans un contexte en rapide mutation caractérisé par une grande vulnérabilité des sociétés et une forte diversité biologique. Il s'agit de proposer aux décideurs et aux gestionnaires de la biodiversité malgache des indicateurs et des modèles (représentations) permettant d'appréhender les changements sociétaux et environnementaux passés et d'anticiper, voire de piloter, les évolutions futures.

Les baobabs (genre *Adansonia*, famille des Malvaceae) représentent un patrimoine biologique non négligeable de Madagascar. Six espèces sur les neuf actuellement connues dans le monde étant endémiques de l'île. Trois sections taxonomiques ont été identifiées d'après les caractères morphologiques et les marqueurs moléculaires : la section Brevitubae, la section Longitubae et la section *Adansonia* (Baum, 1995, Pettigrew *et al.*, 2012, Leong Pock Tsy *et al.*, 2013). Les six espèces endémiques malgaches appartiennent aux deux sections : Brevitubae et Longitubae. Trois de ces espèces (*A. grandidieri*, *A. perrieri* et *A. suarezensis*) sont classées « En Danger » et les trois autres (*A. Madagascarensis*, *A. za* et *A. rubrostipa*) sont classées « Quasi Menacés » (IUCN, 2015). Plusieurs causes peuvent expliquer ce classement : le faible recrutement des jeunes individus (Baum, 1995) ; la disparition des disperseurs de graines (Andriantsaralaza *et al.*, 2013), le déficit de régénération naturelle liée à un défaut de la pollinisation ou encore les prédateurs subies par les jeunes plants.

Le projet ECOBAO a essentiellement abordé trois interactions entre les baobabs et les autres éléments des écosystèmes :

- La pollinisation des baobabs avec plusieurs candidats pollinisateurs (chauve-souris, sphinx ou papillons nocturnes, lémuriens) dont le rôle était mal connu ;
- La dispersion des graines avec de multiples candidats : des espèces autochtones et parfois disparues (tortues géantes, oiseau-éléphant du genre *Aepyornis*) ou introduites par l'Homme (zébu, chèvre) ;
- La prédation qui limite la régénération et le renouvellement des générations : le rôle des achatines qui semblent consommer et détruire des jeunes plants de baobab.



Pollinisation des baobabs malgaches

La pollinisation réalisée par les animaux est considérée comme une relation mutualiste entre la fleur et le pollinisateur (Castro *et al.*, 2013). Le pollinisateur visite la fleur pour satisfaire un besoin nutritionnel en prélevant du nectar et/ou du pollen. En retour, il offre à la plante la possibilité d'assurer sa reproduction en transportant le pollen sur le stigmate d'une autre fleur, assurant ainsi le brassage génétique et la fécondation. L'efficacité d'un pollinisateur dépend de sa capacité à déposer les pollens compatibles en quantité suffisante pour une fécondation (Spears, 1983).

Cette étude est focalisée sur la relation entre traits floraux, types des pollinisateurs et l'efficacité des pollinisateurs chez les baobabs malgaches.

Les objectifs sont de (i) identifier des traits morphologiques et biochimiques impliqués dans le mécanisme de la pollinisation ; (ii) déterminer la fréquence des visites des pollinisateurs et (iii) connaître la capacité des pollinisateurs, en particulier des sphinx à décharger les pollens en quantité suffisante sur le stigmate et ainsi permettre la fécondation des ovules et la production des graines.

PHÉNOLOGIE FLORALE DES ESPÈCES

La figure 1 montre que les périodes de floraison des six espèces de baobabs malgaches s'étalent généralement sur deux ou trois mois pour chaque espèce. Les quatre espèces de Longitubae fleurissent entre les mois d'octobre et avril (période qui inclut la saison des pluies). Un décalage de floraison est constaté entre les espèces même si certaines espèces ont des floraisons qui se chevauchent partiellement en particulier *A. perrieri* et *A. za*, *A. za* et *A. rubrostipa* et *A. za*, *A. rubrostipa* et *A. Madagascariensis*. Les deux espèces de la section des Brevitubae fleurissent de façon synchrone, entre mai et septembre, essentiellement durant la saison sèche.

L'anthèse, définie comme l'ouverture florale, est crépusculaire et nocturne chez les Brevitubae (17 h à 18 h 30) ; elle est nocturne chez les Longitubae (18 h 30 - 20 h). Sur un même arbre, les ouvertures florales s'étalent sur une période d'un mois environ. Chaque soir, en moyenne, une douzaine de fleurs s'épanouissent de façon synchrone : toutes les fleurs s'ouvrent dans un intervalle très réduit de temps, inférieur à trois minutes. Vingt-quatre heures après l'anthèse, les fleurs ne sont plus attractives pour les visiteurs. Les pétales commencent à changer de couleur. La chute de la corolle survient entre 2 et 6 jours après l'anthèse (Figure 2).

MORPHOLOGIE DES FLEURS DES BAOBABS

La couleur, la structure et la morphologie des fleurs donnent de bons critères de détermination des deux sections taxonomiques des baobabs. Les pétales chez les Brevitubae sont blancs alors qu'ils sont jaunes, rouges, orange chez les Longitubae.

La longueur du tube staminal (chez les baobabs, les filets des étamines sont en effet soudés à la base en un tube staminal plus ou moins long) est également différente entre les deux sections (Figures 3 et 4). Les Longitubae possèdent un long tube staminal (en moyenne 110 mm) et les Brevitubae possèdent un court tube staminal (en moyenne 15 mm). Les fleurs des Longitubae mesurent le double de celles des Brevitubae : les longueurs moyennes des sépales sont respectivement de $203,3 \pm 2,8$ mm et de $93,9 \pm 1,2$ mm ($P < 0,0001$).

La longueur du pistil (organe femelle) est supérieure à celle de l'étamine (organe mâle) avec une différence allant jusqu'à 25,7 mm chez *A. suarezensis* et 37,2 mm chez *A. perrieri*. Les fleurs de baobabs sont donc herchogames.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ODEUR FLORALE

Soixante-quatre composés appartenant à quatre classes chimiques dont 11 terpènes, 30 aromatiques, 17 aliphatiques et 7 tiglates ont été identifiés dans les parfums des fleurs des baobabs.

Parmi ces composés, 39 d'entre eux permettent de caractériser les deux sections (Figure 5), en particulier :

- Le 2-phénylacétonitrile à structure aromatique, avec une proportion moyenne de $58,3 \pm 22,2$ %, est identifié chez toutes les espèces de Longitubae alors qu'il est absent chez les Brevitubae ;
- L'heptadec-8-ène, composé à structure aliphatique, est en proportion élevée chez les Brevitubae alors qu'il est absent chez les Longitubae ;
- Le butanoate de (Z)-hex-3-ényle est spécifique de la section des Longitubae ;
- 6-méthyl-hept-5-èn-2-one, le farnésol, géranyl acétone, benzaldéhyde, l'alcool benzylique, le nonan-2-one, l'acide dodecanoïque et le dodecanoate d'éthyle sont spécifiques de la section des Brevitubae.

CARACTÉRISTIQUES DU NECTAR

Le volume moyen de nectar produit varie selon la section. Il est significativement plus élevé chez les Brevitubae comparé aux Longitubae : $423,5 \pm 29,02$ µl contre $105,6 \pm 7,3$ µl par fleur.

Les glucides majeurs identifiés dans le nectar de baobabs sont le glucose, le fructose et le saccharose. Le nectar est riche en saccharose avec un ratio hexose/saccharose de 1,2. Seule, la teneur en fructose est significativement différente entre les deux sections : $39,1 \pm 1,7$ g/l pour les Brevitubae et de $32,3 \pm 1,4$ g/l pour les Longitubae.

LES VISITEURS ET LES POLLINISATEURS DES FLEURS DE BAOBABS

Quatorze espèces de visiteurs floraux des fleurs de baobabs ont été identifiées grâce à des observations nocturnes et diurnes. Les pollinisateurs légitimes des baobabs sont essentiellement des sphinx, des chauves-souris, des microcèbes et des abeilles. Les sphinx (papillon de nuit) sont les visiteurs les plus importants par leur richesse taxonomique et par leur fréquence de visite (Tableau 1, Figure 6). Les chauves-souris ne visitent que les Brevitubae. D'autres espèces animales notamment les colibris visitent illégitimement les fleurs de baobabs sans toucher les organes reproducteurs : ce sont des « voleurs » de nectar.

EFFICACITÉ DES POLLINISATEURS

La Figure 7 montre que le nombre des grains de pollen déposés après une unique visite de sphinx est faible et n'est pas suffisant pour féconder les ovules chez *A. grandidieri* et entraîne un faible niveau de fécondation chez *A. Madagascariensis* et *A. rubrostipa*.

Cependant, le nombre d'ovules fécondés après une pollinisation libre n'est pas significativement différent de celui obtenu après une seule visite de sphinx dans les seuils statistiques fixés, même si tendanciellement, il apparait que la pollinisation libre aboutit à un nombre d'ovules fécondés globalement supérieur. Aucune fécondation n'est obtenue chez les témoins (individus émasculés et non visités).

Tableau 1 : Visiteurs floraux des baobabs malgaches, les récompenses qu'ils recherchent et le type d'interaction qu'ils entretiennent avec les baobabs

Groupes des visiteurs	Espèces visiteuses	Besoin alimentaire	Espèces visitées	Classification
Abeilles	<i>Apis mellifera</i>	Pollenivore	Longitubae, Brevitubae	Visiteur légitime
Chauves-souris	<i>Pteropus rufus</i>	Nectarivore, frugivore	Brevitubae	Visiteur légitime
Colibris	<i>Nectarina souimanga</i>	Nectarivore	Longitubae, Brevitubae	Voleur de nectar
	<i>Nectarinia notata</i>	Nectarivore	Longitubae, Brevitubae	Voleur de nectar
Lémuriens	<i>Eulemur fulvus</i>	Nectarivore	Longitubae	Voleur de nectar
	<i>Lepilemur</i>	Frugivore, nectarivore	Brevitubae	Prédateur
	<i>Microcebus griseorufus</i>	Nectarivore	Brevitubae	Visiteur légitime
	<i>Phaner furcifer</i>	Nectarivore	Longitubae	Visiteur légitime
Sphinx	<i>Agrius convoluli</i>	Nectarivore	Longitubae	Visiteur légitime
	<i>Coelonia solanii</i>	Nectarivore	Longitubae	Visiteur légitime
	<i>Hyppothion celerio</i>	Nectarivore	Longitubae, Brevitubae	Voleur de nectar
	<i>Nephele comma</i>	Nectarivore	Longitubae, Brevitubae	Visiteur légitime
	<i>Panogena jasmini</i>	Nectarivore	Longitubae, Brevitubae	Visiteur légitime
	<i>Xantopan morganii</i>	Nectarivore	Longitubae	Visiteur légitime

La Figure 8 montre que le nombre d'ovules fécondés augmente avec le nombre de pollen déposé sur le stigmate chez les trois espèces de baobabs étudiées. Elle montre qu'il faut un nombre minimal de grains de pollen pour déclencher la fécondation. En effet, le taux de fécondation est maximal après un dépôt d'environ 300 grains de pollens chez *A. grandidieri*, 200 chez *A. Madagascariensis* et 400 chez *A. rubrostipa*. La fécondation de la totalité des ovules est atteinte chez *A. rubrostipa* alors que seuls 80 % des ovules sont fécondés chez *A. grandidieri* et 65 % *A. Madagascariensis*.

CONCLUSION

Ce travail a permis de faire un état des lieux sur les différents aspects de la pollinisation des baobabs. Des différences significatives sont notées entre les deux sections sur la période de floraison, la morphologie florale, la composition de l'odeur florale et les caractéristiques du nectar qui déterminent le type de pollinisateur.

La plupart des visiteurs observés sont des animaux nocturnes ou crépusculaires. La disposition érigée des fleurs des baobabs et leur morphologie rendent difficiles l'accès aux récompenses (nectar) pour les pollinisateurs. Leurs odeurs, plus ou moins agréables, indiquent une pollinisation par des animaux de grande taille et/ou des papillons ayant une trompe suffisamment longue pour atteindre le nectar au fond des fleurs.

Plusieurs types de visiteurs ont été identifiés, des visiteurs légitimes qui entretiennent une relation mutualiste avec la fleur, des voleurs de nectar (notamment les colibris) et des prédateurs de fleurs (lémurien). Quatre groupes de pollinisateurs potentiels (légitimes) ont été observés : les chauves-souris, les Cheirogaleidae (petits primates lémuriformes), les abeilles et les sphinx.

Les pollinisateurs des baobabs appartenant à la section des Brevitubae sont différents de ceux des Longitubae. Les sphinx, par leur fréquence de visite élevée, pourraient réaliser la pollinisation des baobabs dont la réceptivité de la fleur est pourtant éphémère.

Un nombre minimal de grains de pollen doit être déposé pour permettre la fécondation des ovules et ultérieurement la production des graines.

Dispersion des semences de deux espèces de baobabs (*A. grandidieri* et *A. rubrostipa*) dans l'Ouest de Madagascar

Comprendre les processus biologiques qui interviennent dans la dispersion des graines de baobabs est essentiel afin d'en évaluer les conséquences sur la distribution spatiale des populations de baobabs.

Cette étude porte sur deux espèces, *A. grandidieri* et *A. rubrostipa* qui, comme toutes les espèces de baobabs, sont caractérisées par la production de fruits de grande taille. De ce fait, elles peuvent être sensibles à la disparition ou l'introduction de grands vertébrés dans leur écosystème.

La dispersion des semences des baobabs malgaches n'a jamais ou a été très peu étudiée. Les fruits de baobabs présentent une haute valeur nutritive pouvant attirer les animaux. L'hypothèse avancée par les auteurs est celle de l'implication des grands animaux éteints et des animaux introduits actuels, dans la dispersion des semences mais sans preuves expérimentales (Baum, 1995 ; Wickens, 2008). Razanameharizaka (2009) a noté un taux de régénération élevé chez l'espèce *A. grandidieri* dans le village de Tandila (Morondava). Cet auteur attribue ce résultat à l'implication des zébus dans la dispersion des graines. L'introduction des animaux domestiques peut alors avoir un impact sur la dispersion des graines des baobabs malgaches et remplacer ainsi les animaux disparus.

Nos recherches ont par conséquent évalué l'effet sur la dispersion des graines de baobab de (i) la disparition des grands vertébrés frugivores indigènes, dont la signature co-évolutive demeure sur les traits biologiques des plantes à gros fruits, et de (ii) l'introduction par l'homme d'animaux frugivores à des fins d'élevage ou de chasse.

Trois hypothèses ont été émises : (i) les vertébrés disperseurs actuels assurent une dispersion aussi efficace que leurs homologues disparus ; (ii) la taille actuelle des fruits, qui peut paraître étonnamment élevée, demeure en réalité compatible avec la mise en jeu des disperseurs actuels ; (iii) le grand bétail (zébus, chèvres) est impliqué dans les mécanismes de dispersion actuels.



EFFICACITÉ DES DISPERSEURS ACTUELS

L'analyse des processus de dispersion a été abordée par des expérimentations ex situ afin de préciser le rôle des animaux disperseurs pressentis sur la dissémination et la facilitation à la germination des graines.

Ce volet a mobilisé des vertébrés maintenus en captivité apparentés à des espèces éteintes afin de mimer le rôle des espèces disparues, en particulier les tortues géantes (*Aldabrachelys gigantea* / *A. abrupta*). Il a porté aussi sur des espèces liées à l'Homme comme les bovins et les caprins ou présents à l'état sauvage (les lémuriens) dans la zone étudiée.

Des essais de germination ont été entrepris sur des graines ingérées puis déféquées par les animaux afin de caractériser le rôle des animaux disperseurs dans la dissémination et la facilitation à la germination des graines de baobabs.

Ce travail a permis de préciser les relations de mutualisme au sein des écosystèmes permettant la dispersion et ainsi la régénération des baobabs. Nos résultats ont montré en particulier que (i) la mégafaune malgache disparue comme les tortues géantes a pu assurer une dissémination des graines (Figure 9A), (ii) le grand bétail peut remplacer la mégafaune malgache, le dépulpage des graines et la levée de la dormance tégumentaire étant facilités par le passage des graines dans le tractus digestif de ces animaux (Figure 9B), (iii) la taille élevée des fruits est compatible avec la mise en jeu des frugivores actuels comme les lémuriens et (iv) l'hydrochorie ou la dispersion par flottaison des diaspores peut se révéler être un mécanisme de dispersion efficace en l'absence des principaux animaux disperseurs.

DISTRIBUTION SPATIALE DES BAOBABS

L'analyse de la distribution spatiale a été abordée au niveau des populations de l'espèce *A. grandidieri*. L'étude vise à analyser les principaux déterminants de la distribution spatiale locale et l'effet des conditions environnementales du milieu sur les patrons spatiaux des populations d'*A. grandidieri*. Leur répartition actuelle est liée à la présence des points d'eau et des cours d'eau (Baum, 1995, Razanameharizaka, 2009). Cette distribution pourrait être la conséquence à long terme (il y a 1 000 ans) des changements de conditions environnementales, en particulier l'aridification du milieu. La question est de savoir dans quelle mesure la répartition spatiale des individus adultes peut donner des indications sur les conditions climatiques et écologiques passées des habitats de baobabs. Pour cela, le référencement spatial des individus adultes d'une population a été réalisé dans trois sites d'étude représentatifs de l'aire de distribution de l'espèce étudiée et sur la base d'un dénombrement des individus de baobabs visibles à partir des images à très haute résolution spatiale. Les données sont les classes de surface de couronnes de baobabs : A [100-200[m² ; B [200- 300[m² et C ≥ 300 m². Les baobabs de la classe A sont considérés comme étant les plus jeunes visibles sur les images satellites ; les baobabs de la classe C sont les plus vieux individus.

Cette étude démontre que la répartition spatiale des baobabs appartenant à ces trois classes d'âge est la résultante des modes de dispersion des semences et de l'action des filtres environnementaux. La dispersion des semences, assurée par l'eau ou par les animaux, permet aux baobabs d'occuper de nouveaux espaces. La dissémination des fruits par les eaux de ruissellement peut expliquer en effet la présence des baobabs dans des zones de basse altitude. Une fois la dispersion assurée, l'aridification du milieu ou les perturbations anthropiques peuvent entraîner la mortalité des individus. Ces facteurs environnementaux agissent donc comme un filtre. Les individus ayant pu franchir ces filtres sont ceux agrégés autour des points d'eau.

Cela explique la répartition spatiale agrégée des individus adultes de baobabs (Figure 10). Ces conditions jouent le rôle de filtre environnemental sélectionnant ou en contre-sélectionnant les individus de baobabs moins adaptés ou ceux éloignés des points d'eau.

CONCLUSION

L'approche utilisée ici a été axée sur l'étude des mécanismes biologiques intervenant dans les processus de dispersion des semences afin d'évaluer l'importance de la dispersion sur la structuration spatiale des baobabs adultes.

Les résultats ont montré que les animaux actuels (bovins) peuvent assurer le transport et la facilitation de la germination des graines au même titre que leurs homologues disparus (tortues géantes). La disparition des grands animaux disperseurs (Crowley *et al.*, 2011) potentiels n'entraîne donc pas nécessairement le déclin des baobabs. L'hydrochorie figure également parmi les modes de dispersion des semences de baobabs permettant aux individus d'occuper des milieux près des points d'eau. Cette proximité des points d'eau se caractérise par une agrégation spatiale des individus adultes à l'échelle locale, les conditions d'aridité ayant entraîné la mortalité des individus adultes trop éloignés des réseaux hydriques en surface. De manière complémentaire, l'étude de l'effet des facteurs environnementaux sur la distribution spatiale des populations de baobabs a mis en évidence les réponses spatiales et démographiques des individus de classes d'âge différents face à la variation des conditions environnementales. Les patrons spatiaux d'agrégation des individus adultes de baobabs résultent donc conjointement de la capacité de dispersion hydrochore des semences et de l'accès durable à un réseau hydrique dans un contexte d'aridification des habitats.

D'une manière générale, l'ensemble des résultats fait apparaître deux étapes majeures dans les mécanismes impliqués dans la répartition spatiale des baobabs. La première étape est la dispersion des semences qui peut être assurée par le grand bétail (zébus) ou par l'eau permettant l'établissement des juvéniles sous conditions d'une facilitation à la germination et d'un milieu favorable à l'installation des plantules. Les baobabs peuvent présenter un déficit de régénération si ces conditions ne sont pas remplies. Une fois la dispersion des semences assurée, les individus sont soumis à des filtres environnementaux. La deuxième étape est donc l'installation des individus ayant pu passer à travers ces filtres. Les habitats des individus adultes subissent des changements de conditions du milieu, ce qui détermine leur organisation spatiale à l'échelle locale.

Cette étude a permis de contribuer à la compréhension des processus de dispersion des semences de baobabs malgaches mais aussi de leur conséquence sur la dynamique et la distribution spatiale de leurs populations. Les connaissances de tels processus biologiques peuvent constituer un outil d'aide et d'orientation des programmes de conservation et de préservation des baobabs.

Les achatines, prédateurs des jeunes plants de baobab ?

Cette partie repose sur l'hypothèse que les baobabs pourraient subir un déficit de régénération du fait de prédateurs qui attaquent les jeunes plants (Figure 10). Les principaux prédateurs pourraient être les achatines, gastéropodes des régions tropicales qui comptent deux espèces très communes à Madagascar, *Achatina immaculata* et *A. fulica* (Raut & Barker, 2002, Goodman & Benstead, 2005).

Le présent travail tente d’apporter les premiers éléments de réponse à cette hypothèse. Les achatines sont considérés comme des herbivores, se nourrissant de matières végétales vivantes ou en décomposition. Chez *A. fulica*, il a été observé que les individus jeunes dont le diamètre de la coquille est compris entre 5 et 30 mm consomment de préférence les plantes vivantes alors que les individus matures sont plutôt détritivores voire opportunistes (carnivores et nécrophages) même s’ils continuent à consommer des plantes vivantes. Le calcium contenu dans le sol est un nutriment essentiel pour les achatines dont la quantité disponible influe sur la taille, le poids et la couleur de la coquille (Mead, 1979). Les besoins en minéraux nécessaires lors de la première année de vie de l’escargot sont très importants, vue la quantité de coquille à produire. Par exemple, chez l’adulte *A. achatin*, la coquille intervient pour un tiers du poids de l’escargot (Stievenart & Hardouin, 1990).

La prise de nourriture s’opère par le frottement de la langue chitineuse (radula) sur les végétaux. L’activité de recherche alimentaire est nocturne et se réalise comme suit : tout d’abord, l’escargot s’éloigne de son lieu de repos de la journée avant de commencer à se nourrir. Il peut être actif pendant plus d’une heure avant de localiser une plante hôte. La durée du temps de broutage dépend ensuite de la qualité et de la quantité des aliments. A l’approche de l’aube, l’animal stoppe son broutage et cherche un site de repos.

La distance parcourue par une achatine en une nuit est variable. Elle a été évaluée en Inde et est estimée entre 9 et 14 m suivant la saison et d’environ 1,5 m pour les escargots adultes recensés au Japon (Raut & Barker, 2002).

A ce jour, l’effet des achatines sur la flore malgache n’a, à notre connaissance, fait l’objet d’aucune étude. Cependant, les caractéristiques de ces espèces (fort potentiel reproductif, comportement dévastateur, augmentation des populations en milieux perturbés, préférence pour les jeunes plants et les plantules) laissent à penser que ces escargots pourraient être des prédateurs des jeunes baobabs et donc jouer un rôle dans le déficit de recrutement des espèces.

Notre étude a donc consisté à évaluer expérimentalement, en milieu contrôlé et sur le terrain, l’appétence des achatines pour les espèces du genre *Adansonia* et les dégâts qu’ils peuvent leur infliger. Ce travail a été mené selon trois modalités : des enquêtes auprès des populations locales, des observations in situ et des expérimentations en milieu contrôlé.

PERCEPTION À DIRE D’ACTEURS

Une enquête a été menée auprès des agriculteurs de la zone d’Andranomena, dans la région de Morondava, à l’Ouest de Madagascar. Elle a permis de recueillir leurs observations et de confirmer les points suivants :

- Les achatines se nourrissent principalement de feuilles en décomposition, de jeunes pousses d’herbes et des champignons (4 réponses/9) ;
- Les feuilles de baobabs (1/9) et la pulpe des fruits de baobabs ouverts après être tombés au sol (3/9) font aussi partie de leur alimentation ainsi que les plantules d’arbres sans distinction particulière d’espèces (2/9) ;
- Concernant les plantes cultivées, les achatines consomment les feuilles de riz (2/9), de maïs (2/9), d’arachide, et de cucurbitacées (4/9). Cependant, les agriculteurs ne semblent pas les considérer comme une menace car, d’après eux, ils préfèrent prospecter les zones de forêts où ils sont essentiellement présents.

SUIVI DE LA CONSOMMATION DES ACHATINES *IN SITU*

En saison des pluies, deux placettes comportant des jeunes plants d’*A. grandidieri* ont été délimitées en forêts dans le village d’Andranomena. Leur composition floristique est la suivante :

- Placette 1 : 2 jeunes plants d’*A. grandidieri*, 2 jeunes plants appartenant au genre *Diospyros* et 4 plantes de la famille des Poacées ;
- Placette 2 : 3 jeunes plants d’*A. grandidieri*, 4 plantes de la famille des Poacées.

Dans chaque placette, 24 jeunes achatines ont été introduites. Les dégradations (niveau de consommation des feuilles des plantules et la position des achatines par rapport aux plantes ont été relevées chaque matin pendant 5 jours.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Évaluation in situ des attaques par de jeunes achatines (*A. immaculata*) des jeunes plants (*Adansonia grandidieri* et *Diospyros sp.*, Poacées) dans la forêt d’Andranomena
Notation du niveau de consommation : 0 : feuille intacte ; 1 : feuille légèrement attaquée ; 2 : feuille moyennement attaquée ; 3 : feuille fortement attaquée ; 4 : feuille intégralement ou quasi intégralement consommée

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5
Placette 1					
Niveau d’attaque	Aucun	Aucun	<i>Diospyros</i> : 1 <i>A. grandidieri</i> : 1	<i>Diospyros</i> : 1 <i>A. grandidieri</i> : 2	<i>Diospyros</i> : 1 <i>A. grandidieri</i> : 3
Position des achatines	sous ou sur la litière	7 proches d’ <i>A. grandidieri</i>	-	2 proches d’ <i>A. grandidieri</i>	5 proches d’ <i>A. grandidieri</i> 4 proches de <i>Diospyros</i>
Placette 2					
Niveau d’attaque	Aucun	Aucun	Poacées : 1 <i>A. grandidieri</i> : 2	Poacées : 1 <i>A. grandidieri</i> : 3	Poacées : 1 <i>A. grandidieri</i> : 3
Position des achatines	sous ou sur la litière	sous ou sur la litière	sous ou sur la litière	1 proche de <i>A. grandidieri</i>	3 proches d’ <i>A. grandidieri</i> 3 proches des Poacées

Dans les deux placettes d’études, les jeunes plants d’*A. grandidieri* ont été attaqués. Les autres espèces présentes l’ont été également mais de façon apparemment moindre. Par ailleurs, les achatines semblent préférer les feuilles mortes de la litière même s’il est difficile d’évaluer cette dégradation car les feuilles été déjà dégradées avant le début de l’expérience.

EXPÉRIENCE EN MILIEU CONTRÔLÉ

Afin d’évaluer l’appétence des achatines pour les baobabs par rapport aux autres espèces naturelles ou cultivées dans l’Ouest de Madagascar, une expérience a été menée en milieu contrôlé. Cinq achatines adultes appartenant à l’espèce *A. immaculata*, originaires de Morondava ont été prélevés dans leur milieu naturel et placés dans des châssis de bois d’un mètre de côté, aux parois fermées par un film plastique afin d’empêcher l’intrusion d’éléments extérieurs et la fuite d’achatines. Dans chaque châssis, ont été déposées des feuilles fraîches de l’une des espèces végétales suivantes (représentatives de la flore sauvage ou cultivée ou des forêts caducifoliées de l’ouest malgache).

- Quatre espèces de baobabs : *A. Madagascarensis*, *A. digitata*, *A. rubrostipa*, *A. grandidieri*,
- Des espèces d’arbres présentes en forêt du Menabe : *Colvillea racemosa*, (« sarongaza » en malgache), *Grewia grevei* (« katepoky »), *Baudouinia Madagascarensis* (« mpanjakaben’ ny tany »), *Tamarindus indica* (« kily »).
- Des espèces cultivées : igname (*Dioscorea sp.*), maïs (*Zea mays*), pois du cap (*Phaseolus lunatus*), arachide (*Arachis hypogaea*).

L’intérieur du châssis est humidifié chaque jour à l’aide d’un pulvérisateur afin de garder des conditions d’humidité adéquates à l’activité des achatines, les conditions de lumière et de température ne sont pas contrôlées.

Les paramètres mesurés évaluent le niveau de consommation des feuilles de chaque espèce chaque matin durant trois jours, suivant le système de notation déjà décrit.

Tableau 3 : Niveau de consommation des feuilles de diverses espèces naturelles, introduites ou cultivées par des achatines (*A. immaculata*)

Notation du niveau de consommation : 0 : feuille intacte ;

1 : feuille légèrement attaquée ; 2 : feuille moyennement attaquée ; 3 : feuille fortement attaquée ;

4 : feuille intégralement ou quasi intégralement consommée. Moyenne de 3 répétitions.

	Espèces proposées aux achatines	Niveau de prédation de feuilles
Baobabs	<i>A. digitata</i>	1,3
	<i>A. Madagascarensis</i>	0,7
	<i>A. rubrostipa</i>	4,0
	<i>A. grandidieri</i>	2,3
Espèces ligneuses	<i>Colvillea racemosa</i>	3,3
	<i>Grewia sp.</i>	0,7
	<i>Baudouinia Madagascarensis</i>	0,7
	<i>Tamarindus indica</i>	0,3
Espèces cultivées	Igname	1,3
	Maïs	2,0
	Pois du cap	1,3
	Arachide	3,0

D’après le Tableau 3, cinq espèces présentent un indice de dégradation supérieur à 2 ce qui correspond à une dégradation moyenne des feuilles. L’espèce la plus consommée est *A. rubrostipa* (indice de 4 en moyenne), les feuilles ont totalement été consommées pour chaque réplication, la seconde espèce est forestière, il s’agit de *Colvillea racemosa* (indice de 3,3 en moyenne) et la troisième est l’arachide (*Arachis hypogaea*) (indice de 3,0 en moyenne). L’espèce *A. grandidieri*, quatrième espèce, a été moyennement consommée par les achatines (indice de 2,3) (Figure 12) de même que le maïs (indice de 2). Pour les autres espèces, l’indice est inférieur ou égale à 1,3 ce qui indique que ces espèces ont été faiblement consommées.

CONCLUSION

Les feuilles des espèces de baobabs présentes dans le Menabe ont été consommées par les achatines : *A. rubrostipa* est l’espèce la plus consommée avec un indice de dégradation de 4 en moyenne et *A. grandidieri* présente un indice de 2,3 en moyenne. Les feuilles d’*A. Madagascariensis* semblent moins appétantes pour les achatines.

Nos résultats, certes préliminaires, montrent que les achatines présentes dans les écosystèmes à baobabs peuvent avoir durant leur période d’activité, une action prédatrice sur les jeunes plants de baobab et un effet négatif sur la régénération des différentes espèces du genre *Adansonia*.

Conclusion générale

Les travaux entrepris dans le cadre du projet PARRUR ont permis d’apporter des connaissances nouvelles sur les relations que les baobabs malgaches entretiennent avec les autres éléments de la biocénose. Les résultats obtenus sont encore très préliminaires et incomplets.Ils mettent cependant en lumière ou précisent des informations sur les modalités de la pollinisation des baobabs, de la dispersion de leurs semences et renseignent sur les prédatations que peuvent subir les jeunes plants.

Ces résultats sont importants sur le plan de la connaissance des espèces et du fonctionnement des écosystèmes malgaches. Ils ouvrent des portes pour de nouvelles recherches qu’il serait important d’initier afin de mieux poser les bases scientifiques de la conservation et de la gestion de ces espèces emblématiques et du réseau de relations synécologiques qu’ils entretiennent au sein des biocénoses. A titre d’exemple, rien n’est encore connu sur le cycle de vie des principaux pollinisateurs des baobabs, les sphinx. On ignore l’impact de la déforestation sur les baobabs qui paraissent immuables et épargnés de leur méfaits, et les transforme en arbres « hors forêts ». D’autres champs d’investigation sont encore à explorer, en particulier ceux qui impliquent la faune ou la flore du sol en lien avec les systèmes racinaires.

Ainsi, ces quelques travaux, pionniers pour certains, ont ouvert des axes de recherches à investir pour assurer la conservation des baobabs et des écosystèmes qui les abritent. En espérant que d’autres équipes et d’autres bailleurs prendront le relais...

Références bibliographiques

Andriantsaralaza, S., Pedrono, M., Tassin, J., Roger, E., Rakouth, B. & Danthu, P. 2013 : The role of extinct giant tortoises in the germination of extant baobab *Adansonia rubrostipa* seeds in Madagascar , *African Journal of Ecology* 52: p. 1-4.

Baum, D. A. 1995 : A systematic revision of *Adansonia* (*Bombacaceae*). *Annals of the Missouri Botanical Garden* 82: p. 440-470.

Castro, S., Loureiro, J., Ferrero, V., Silveira, P. & Navarro, L. 2013 : So many visitors and so few pollinators: variation in insect frequency and effectiveness governs the reproductive success of an endemic milkwort. *Plant Ecology* 214: p. 1233-1245.

Crowley, B.E., Godfrey, L.R. & Irwin, M.T., 2011 : A glance to the past: subfossils, stable isotopes, seed dispersal, and lemur species loss in southern Madagascar. *American Journal of Primatology* 73 : p. 25-37.

Goodman, S. M. & Benstead, J. P. 2005 : Updated estimates of biotic diversity and endemism for Madagascar. *Oryx* 39: p. 73-77.

Kull, C. A. 2004 : *Isle of fire: the political ecology of landscape burning in Madagascar* (University of Chicago Press.).

Leong Pock Tsy, J.-M., Lumaret, R., Flaven-Noguier, E., Sauve, M., Dubois, M.-P. & Danthu, P. 2013 : Nuclear microsatellite variation in Malagasy baobabs (*Adansonia*, *Bombacoideae*, *Malvaceae*) reveals past hybridization and introgression. *Annals of botany* 112: p. 1759-1773.

Maloof, J. E. & Inouye, D. W. 2000 : Are nectar robbers cheaters or mutualists? *Ecology* 81: p. 2651-2661.

Marie, C. N., Sibelet, N., Dulcire, M., Rafalimaro, M., Danthu, P. & Carrière, S. M. 2009 : Taking into account local practices and indigenous knowledge in an emergency conservation context in Madagascar. *Biodiversity and Conservation* 18: p. 2759-2777.

Mead, A.R. 1979 : *Economic malacology with particular reference to Achatina fulica*. Pp. 28-43 in Fretter, V. & Peake, J. (ed.). The Pulmonates, Vol. 2B. Academic Press, New York.

Menzel, R., Gumbert, A., Kunze, J., Shmida, A. & Vorobyev, M. 1997 : Pollinators' strategies in finding flowers. *Israel Journal of Plant sciences* 45: p. 141-156.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. & Kent, J. 2000 : Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: p. 853-858.

Pettigrew, F. R. S., Jack, D., Bell, K. L., Bhagwandin, A., Grinan, E., Jillani, N., Meyer, J., Wabuye, E. & Vickers, C. E. 2012 : Morphology, ploidy and molecular phylogenetics reveal a new diploid species from Africa in the baobab genus *Adansonia* (*Malvaceae: Bombacoideae*). *Taxon* 61: p. 1240-1250.

Pollini, J. 2011. The difficult reconciliation of conservation and development objectives: The case of the Malagasy Environmental Action Plan. *Human Organization* 70: p. 74-87.

Raut, S. & Barker, G. 2002 : *Achatina fulica* Bowdich and other *Achatinidae* pest in tropical agriculture. Pp. 55-114 in Barker, G. (ed.). Molluscs as crop pest (CABI Publishing). New York.

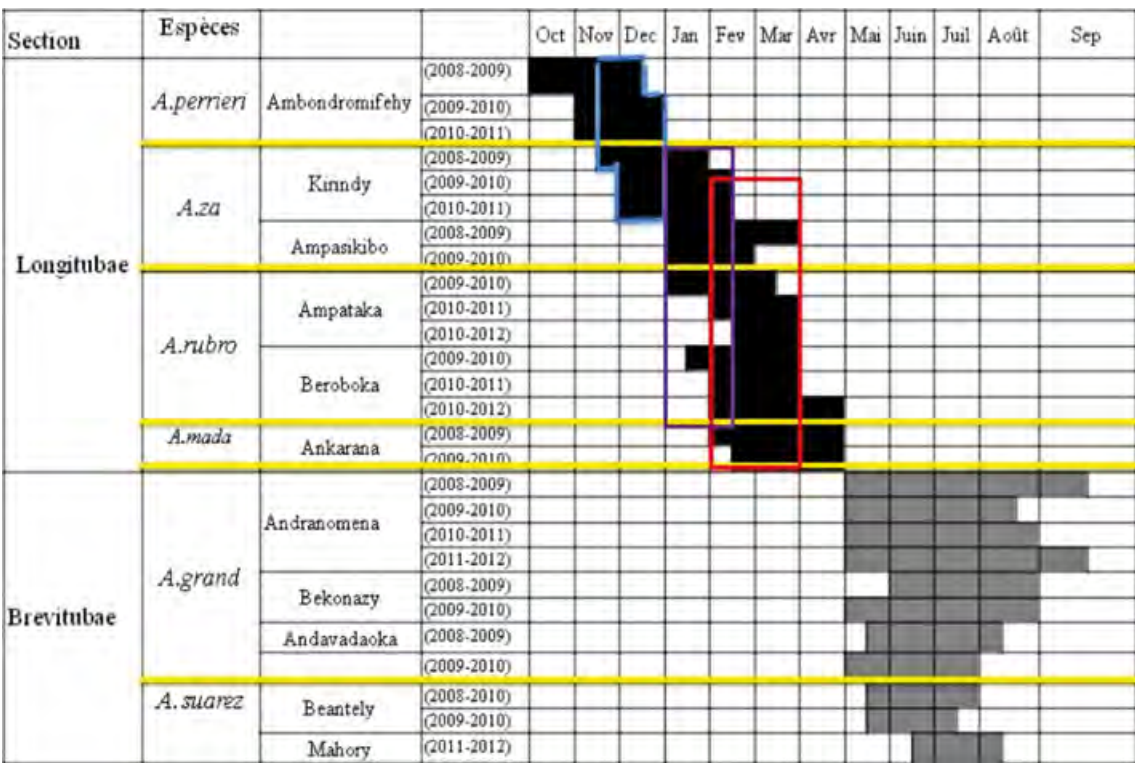
Razanameharizaka, J. H. H. 2009 : Régénération, démographie, physiologie de la graine et des plantules du genre *Adansonia* à Madagascar. Antananarivo. 170 pp.

Spears, E. E. J. 1983 : A direct measure of pollinator effectiveness. *Oecologia* 57: p. 196-199.

Stievenart, C. & Hardouin, J. 1990 : *Manuel d'élevage des escargots géants africains sous les tropiques* (Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA)). Wageningen. 40 pp.

The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2015-4. < www.iucnredlist.org >. Downloaded on 09 december 2015.

Wickens, G. E. 2008 : *The Baobabs: Pachycauls of Africa*, Madagascar and Australia. Berlin, New York: Springer Verlag. 498 pp.



A. rubro : A. rubrostipa A. mada : A. Madagascariensis A. grand : A. grandidieri A. suarez : A. suarezensis

■ Période de floraison des Longitubae ■ Période de floraison des Brevitubae ■ Chevauchement de floraison d'A. perrieri et A. za

■ Chevauchement de floraison d'A. za et A. rubrostipa ■ Chevauchement de floraison d'A. za, A. rubrostipa et A. Madagascariensis

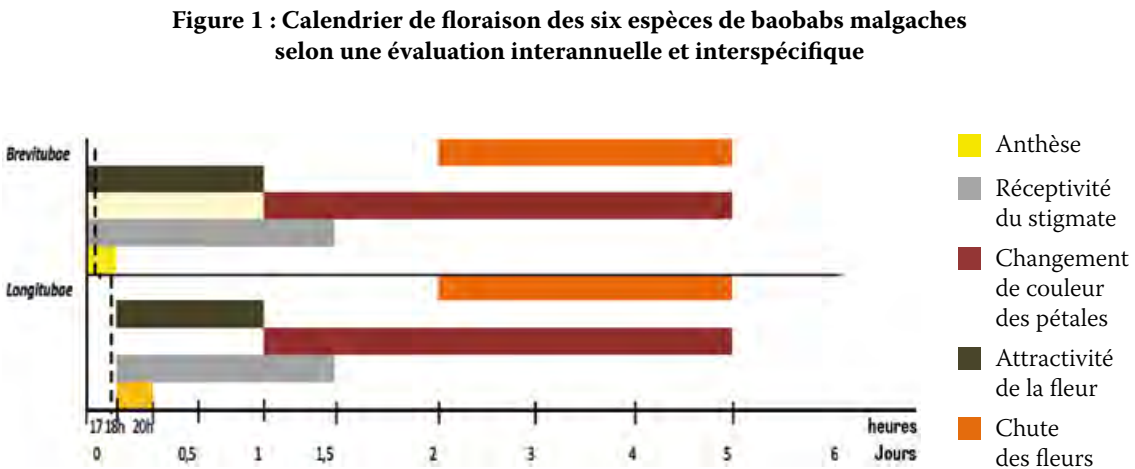


Figure 2 : Phénologie florale comparée des deux sections de baobabs malgaches

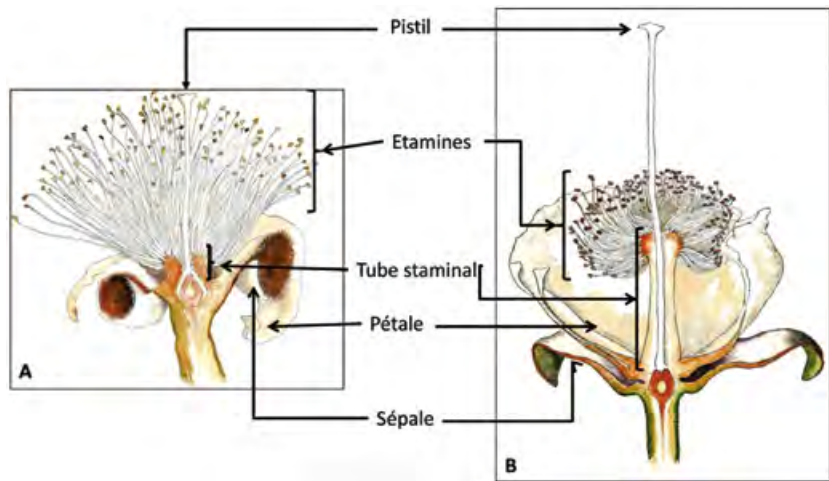


Figure 3 : Schéma d'une fleur de Brevitubae
(illustration de Grazyna Krecka-Duchaufour)

Figure 4 : Schéma d'une fleur de Longitubae
(illustration de Grazyna Krecka-Duchaufour)

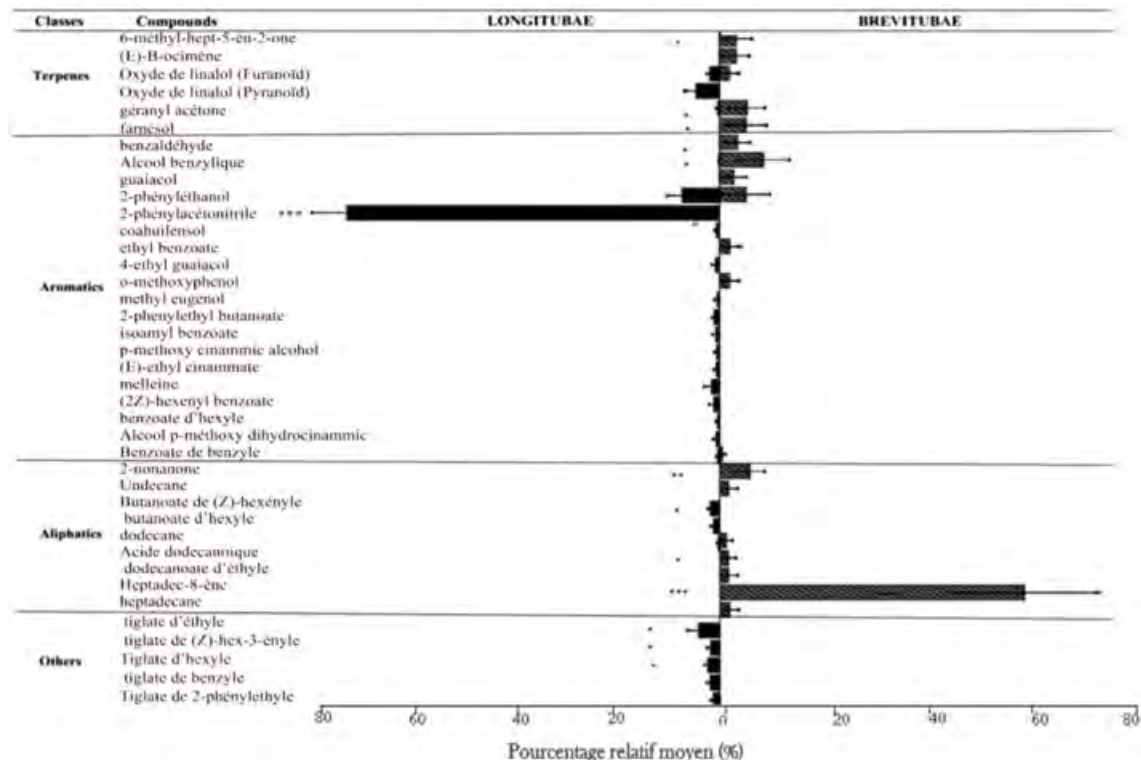


Figure 5 : Composition des parfums des fleurs des deux sections de baobabs
(pourcentage relatif supérieur ou égal à 5 % dans au moins un échantillon)

* : significatif $P < 0,05$; ** : très significatif $P < 0,001$; *** : fortement significatif $P < 0,0001$ (test de Mann Withney)

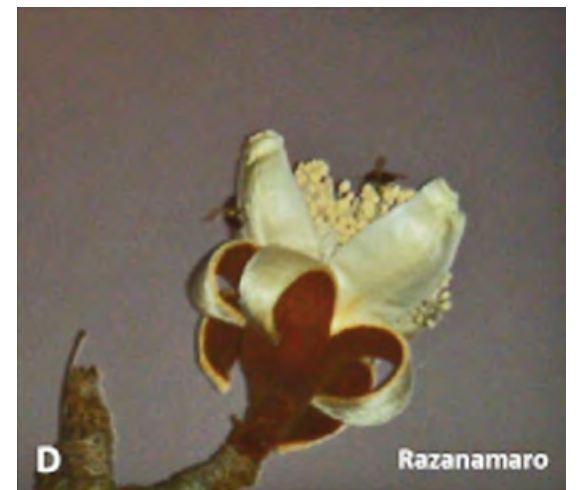


Figure 6 : Quelques visiteurs des fleurs des Brevitubae

A : *Nephele comma* (sphinx) visitant légitimement une fleur d'*A. grandidieri*

B : *Apis mellifera* (abeilles) récoltant les pollens des fleurs d'*A. grandidieri*

C : *Coelonia solanii* (sphinx) visitant une fleur d'*A. Madagascariensis*

D : *Hippotion celerio* (sphinx) récoltant le nectar à la base de la fleur d'*A. rubrostipa*

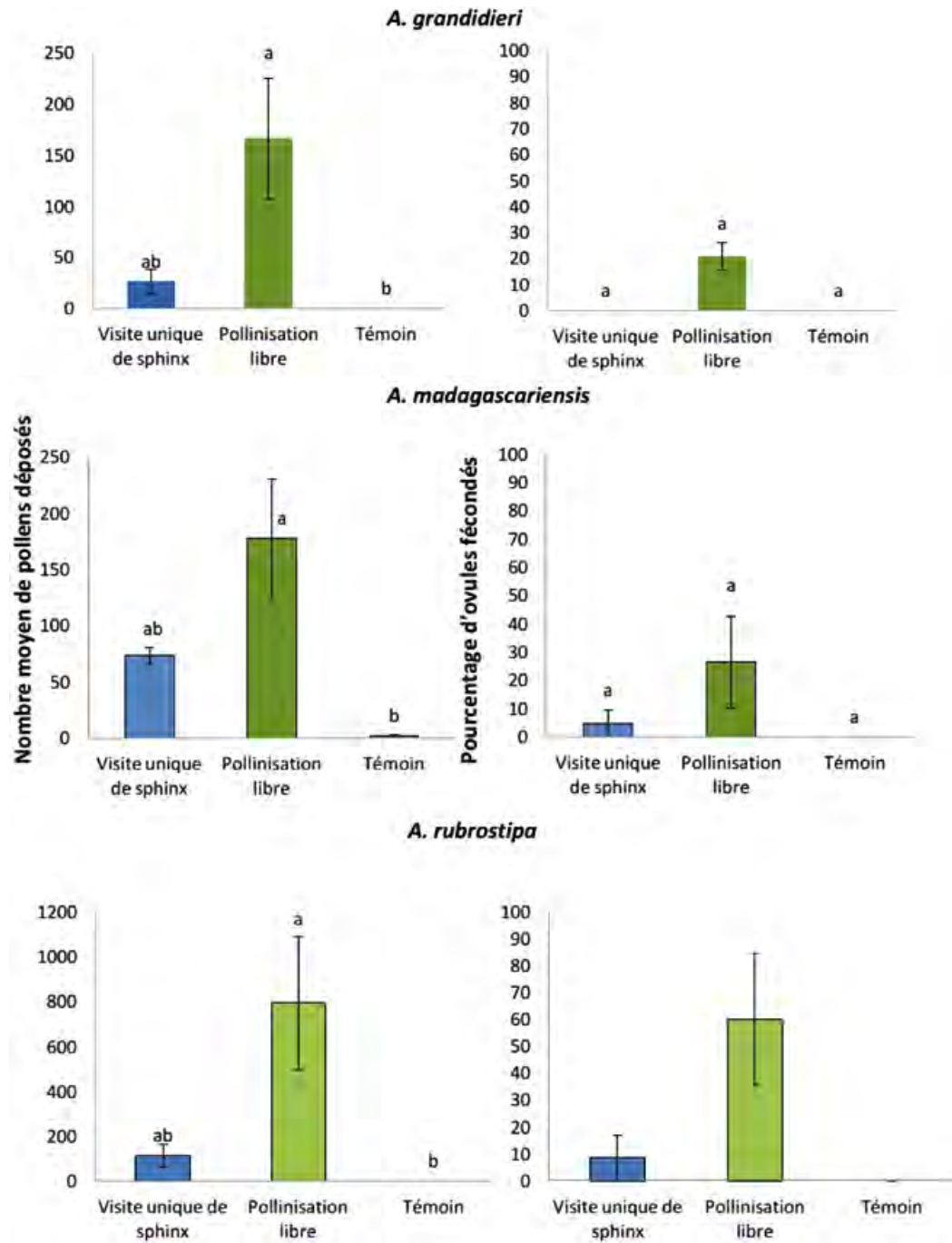


Figure 7 : Nombre moyen de grains de pollen déposés sur le stigmate et pourcentage d'ovules fécondés en fonction des modes de pollinisation
Les barres représentent l'erreur standard moyenne. Les lettres différentes indiquent les différences significatives entre les groupes d'après le test de Kruskal Wallis. $P < 0,05$

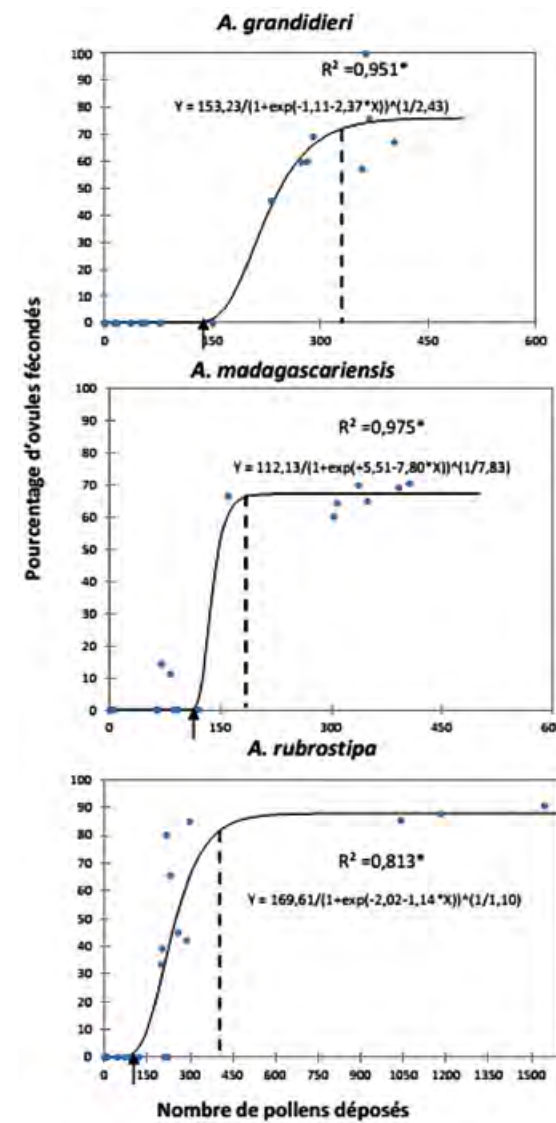


Figure 8 : Effet de la quantité de grains de pollens déposés sur le nombre d'ovules fécondés
La courbe représente la régression linéaire.
La barre verticale représente le seuil de nombre de pollens pour un maximum d'ovules fécondés
* : $P < 0,05$

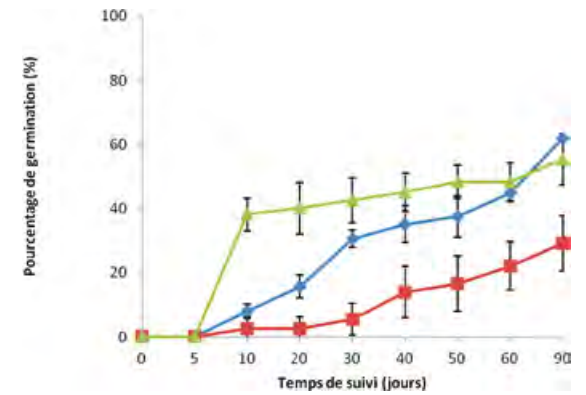


Figure 9A : Evolution des pourcentages de germination des graines d'*A. rubrostipa* après les trois traitements suivants
Rouge : graines intactes non ingérées
Vert : graines dépulpées non ingérées
Bleu : graines ingérées par les tortues

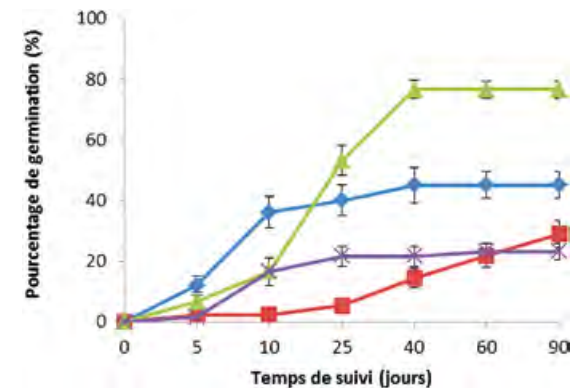
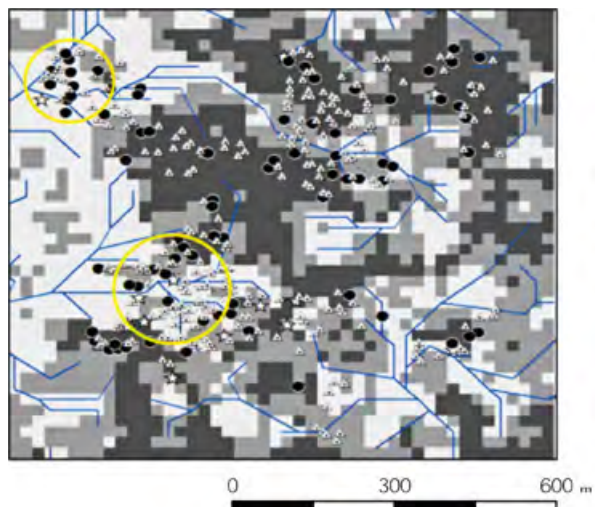


Figure 9B : Evolution des pourcentages de germination des graines d'*A. rubrostipa* après les quatre traitements suivants
Rouge : graines non ingérées, non dépulpées
Bleu : graines non ingérées mais dépulpées
Vert : graines ingérées par les bovins
Violet : graines ingérées par les caprins



Individus de baobabs

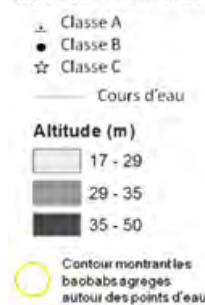


Figure 10 : Répartition spatiale des baobabs dans un des sites d'étude de l'Ouest de Madagascar

(Source : carte FTM, BD 500)

Les classes représentent des surfaces de couronnes de baobabs :
 A [100-200[m²
 B [200-300[m²
 et C ≥ 300 m²



Figure 12 : Dégâts d'une achatine (*A. immaculata*) sur un jeune plant d'*A. grandidieri*



Figure 11 : Jeune achatine sur un plant de baobab juvénile

Résilience de systèmes agroécologiques de la région Est de Madagascar

Cas de stockage de carbone et de fertilité du sol dans le cadre de la REDD+

Resilience of agroecological systems of Eastern Madagascar

Carbon storage and soil fertility within «REDD+» initiative



A. ANDRIAMANANJARA¹
 N. RAMIFEHIARIVO^{1,2}
 T. RAZAFIMBELO¹
 J. RANDRIANARISOA³
 N. N. RASOLO^{1,2}
 A. L. RAZAKAMAHEFA^{1,2}
 H. G. SANEHO⁴
 J. F. LEMARAINA⁴
 T. CHEVALLIER⁵
 M. BERNOUX⁵
 E. BLANCHART⁵
 T. BECQUER⁵
 T. RAFOLISY¹
 M.-P. RAZAFIMANANTSOA¹
 E. MIASA³
 J. MICHEL⁶
 L. RABEHARISOA^{1,2}
 H. RAZAKAMANARIVO¹

(1) Laboratoire des Radiosotopes, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Conservation International Madagascar, Villa Hajanirina, lot II W 27D, Rue Vittori Francois, Ankorahotra, 101 Antananarivo, Madagascar

(4) Institut Supérieur des Sciences, Environnement et Développement Durable (ISSEDD)-Université de Toamasina, Madagascar

(5) Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, Montpellier

(6) Centre Technique et Horticole de Tamatave (CTHT), Madagascar

Résumé

La déforestation est l'une des principales sources de gaz à effet de serre (GES) responsable du changement climatique (CC). Son importance a conduit à l'émergence de l'initiative « Réduction des Emissions de GES issues de la Déforestation et de la Dégénération des Forêts ou REDD+ » au niveau international et qui concerne principalement les pays tropicaux. Sensibilisé par cet enjeu planétaire, Madagascar a adopté cette initiative afin de diminuer les sources d'émission de carbone (C) issue des activités de la déforestation, de réduire la pratique de la culture sur brûlis (« tavy ») et de proposer des pratiques alternatives permettant une meilleure gestion de la fertilité du sol et un meilleur stockage de C. La recherche se propose ainsi de limiter la déforestation et de mettre en place des systèmes agricoles résilients au CC, i) permettant une meilleure séquestration du carbone (agriculture dite « climate-smart ») afin d'atténuer le CC et ii) assurant en même temps une meilleure production agricole par l'amélioration de la fertilité du sol via l'enrichissement en matière organique et en nutriments.

Des séries d'études en milieu rural et en laboratoire ont été menées afin d'étudier l'influence de la déforestation et des pratiques agricoles alternatives sur les stocks de C et les émissions de GES et d'identifier les systèmes agroécologiques qui émettent moins de C tout en maintenant ou en rehaussant les teneurs en nutriments (azote, N et phosphore, P) du sol.

Dans la région Alaotra Mangoro, District de Moramanga, l'évaluation des stocks de carbone ont permis de mettre en évidence une diminution du stock de C à partir de 20 ans de déforestation.

Dans l'écorégion Est de Madagascar, commune d'Ambodimanga II, District de Fenoarivo-Atsinanana, le système agroécologique, représenté par l'agroforesterie, a présenté des sols plus fertiles et plus riches en C. D'autres analyses ont montré, que face à un stress thermique, ce système conserve ses bonnes propriétés par rapport au sol sous brûlis qui perd sa matière organique par minéralisation.

Ainsi, dans le contexte actuel, l'agroforesterie est très prometteuse pour lutter contre le CC. Ce système pourrait être une alternative par excellence aux différentes pratiques traditionnelles pour valoriser les terroirs dans un objectif de sécurité alimentaire dans le respect de l'environnement.

Mots-clés : Séquestration de carbone, fertilité du sol, résilience, agroforesterie, tavy, changement climatique, Est de Madagascar

Abstract

Deforestation is among the main source of greenhouse gas (GHG) emission resulting to climate change (CC) phenomenon. The importance of deforestation generated the international program initiated by United Nations on Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (REDD) in developing countries. Convinced by this international challenge, Madagascar has adopted this REDD initiative to reduce the emission source of carbon (C)

from deforestation human activities and from traditional practice of «slash and burn» system («tavy») and to propose alternative practices allowing to better C storage, and consequently leading to fertile soils. Research activities intend to reduce the deforestation rate and to identify and implement resilient agricultural systems face to climate change, leading to a better C sequestration (climate smart agriculture) to mitigate CC and promoting the crop production by soil fertility improvement through soil enrichment in organic matter and nutrients. Linking scientific researches and development actions in fields allowed to implement research-project action reported here and focused on Eastern region of Madagascar. Case studies in field and in laboratory were carried out to study the influence of deforestation and alternative agricultural practices on C storage and GHG emission and to identify agroecological systems with less C emission by maintaining or increasing the nutrient contents (N and P) in soil.

In Alaotra Mangoro region, district of Moramanga, assessment of C stocks highlighted the decreasing C stock from 20 years of deforestation. In Eastern ecoregion of Madagascar, commune of Ambodimanga II, district of Fenoarivo-Atsinanana, agroecological system represented by agroforestry presented more fertile soils with high soil C. Furthermore, other analyses showed that face to heat stress, agroforestry maintain their good properties compared to soil under slash and burn system which loses their organic matter by mineralization process.

Thus, in the current context, agroforestry is highly promising to fight against climate change, and this could be an ideal alternative to traditional practices to valorize landscape in the objective of food security and in the respect of environment.

Keywords: Carbon sequestration, soil fertility, resilience, agroforestry, tavy, climate change, Eastern of Madagascar.

Contexte général

Les activités anthropiques marquées par la conversion des paysages naturels en paysage agricole (agriculture de subsistance), à travers le défrichement des forêts tropicales, ont transformé une grande proportion de surfaces terrestres en entraînant la dégradation des conditions environnementales (Foley *et al.*, 2005). L'agriculture présente un taux important d'émission globale de carbone (C) atmosphérique, de l'ordre de 1.5 Gt C/an, ce qui représente environ 36 % du taux d'émission globale de CO₂ d'origine anthropique entre 2000-2005 (Richter and Houghton, 2011), contribuant fortement au réchauffement climatique. La déforestation est la seconde source de gaz à effet de serre (GES) responsable du changement climatique (CC) avec une émission de CO₂ de l'ordre de 1.4 Gt C/an. Ces émissions correspondent à environ 20 % du taux d'émission globale de GES dans les années 1990 (Gullison *et al.*, 2007). L'action de déforestation réduit en effet considérablement les stocks de biomasse aérienne qui est un important compartiment puits de C (Woods *et al.*, 2010 ; Bondeau *et al.*, 2007). Par ailleurs, lors de la déforestation, la biomasse souterraine forestière est remplacée également par les systèmes racinaires fins des plantes herbacées réduisant ainsi la matière organique restituée au sol tout en accélérant le processus de décomposition et conduisant à l'augmentation des émissions de CO₂ et à la perte de C du sol (IPCC 2006 ; Woods *et al.*, 2010). L'influence du CC sur l'écosystème terrestre a été démontré par de nombreux chercheurs (Cooney, 2010 ; Corfee-Morlet *et al.*, 2007 ; IPCC 2007). L'augmentation de la température moyenne globale prévue se situe entre 1.1 et 6.4 °C entre 2000-2009, alors qu'elle a été de 1.8-4.8 °C calculée entre 1980-1999 (IPCC 2007).

De plus, les résultats de récentes études ont montré que le CC pouvait influencer les cycles de C, de phosphore (P) et d'azote (N) et affecter la fertilité du sol (Vincent *et al.*, 2014 ; Brevik, 2012). La pression anthropique sur les écosystèmes forestiers, qui se traduit par des changements d'usage des terres, affecte la dynamique du C et des nutriments.

De ces constats, le programme des Nations-Unies sur la Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts dans les pays en développement (Programme ONU-REDD) a vu le jour. Son objectif est d'aider les pays en développement, notamment les pays tropicaux dont Madagascar, à réduire les sources d'émission de C et de participer à un futur mécanisme REDD+ incluant la conservation, la gestion durable des forêts et l'accroissement des stocks de C forestiers. L'émergence de la REDD+ a permis le développement de stratégies à large vision intégrant toutes couvertures terrestres autour des terres forestières. Il s'agit entre autres, de l'agroforesterie, des plantations forestières ainsi que des pratiques agroécologiques de l'agriculture de conservation (Mathews *et al.*, 2014).

La région Est de Madagascar est caractérisée par un climat tropical humide avec une couverture forestière importante. A côté de la biomasse végétale, le sol, support de la productivité agricole, présente également un important réservoir de C. Ainsi, il est indispensable de développer des recherches sur le compartiment « sol » et de proposer des solutions pratiques pour les actions futures garantissant la durabilité de la fertilité du sol et la séquestration de C face au CC. Les innovations (agro)technologiques visent à augmenter la productivité des terres agricoles existantes, à diminuer les pertes en biodiversité et à recycler les nutriments. Elles peuvent atténuer la pression sur les zones forestières en réduisant les besoins de déforestation pour l'agriculture (Minang *et al.*, 2014 ; Mathews *et al.*, 2014). Dans le contexte du CC, des pratiques culturelles telles que les systèmes agroécologiques peuvent contribuer à la réduction des GES et à l'amélioration de la fertilité de sol. Ces systèmes intègrent l'agriculture de conservation, la gestion des mauvaises herbes, l'agroforesterie et d'autres pratiques pouvant modifier la gestion des cultures, du sol, de l'eau et des nutriments. En outre, ils permettent d'augmenter les activités biologiques dans les sols (Uphoff *et al.*, 2013) et améliorer ainsi la séquestration de C et la fertilité du sol. Pour Madagascar, les pratiques agroécologiques, telles que l'agroforesterie et le semis direct sous couverture végétal (SCV), sont préconisées pour leur contribution à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique ; ceci grâce à l'augmentation des stocks organiques des sols, l'augmentation durable de la productivité et du revenu, au renforcement de la résilience des agroécosystèmes au CC ainsi qu'à la réduction des émissions nettes de CO2 (Razafimbelo *et al.*, 2008). Néanmoins, il existe encore peu d'études quantitatives sur l'évaluation de ces différentes pratiques agroécologiques et sur l'augmentation effective des stocks de C des sols et de la biodisponibilité des nutriments. Il est donc indispensable de développer des recherches pour connaître les potentialités de ces usages des terres en termes de séquestration de C et de pérennisation de la fertilité du sol.

Un certain nombre de projets pilotes ont été menés à Madagascar dans le cadre de la REDD depuis 2004 (Busson *et al.*, 2009) mais jusqu'à maintenant, la mise en œuvre de cette initiative se heurte à plusieurs problèmes qui nécessiteraient une approche intersectorielle. Ces projets pilotes ont essentiellement considéré le compartiment végétal au détriment du compartiment édaphique. Ainsi les connaissances sur le sol et de leur évolution sous l'effet de la pression anthropique sur les forêts à travers la déforestation sont presque inexistantes. De même, plusieurs actions en faveur du développement des pratiques agroécologiques ont été réalisées mais généralement à petite échelle et il reste encore beaucoup à considérer pour répondre aux critères du concept« agriculture intelligente face au climat » (« Climate-smart agriculture » (FAO, 2013). D'un autre côté, les connaissances sur la réponse des diverses pratiques agricoles au CC restent aussi assez limitées, d'où le besoin de connaissances sur le devenir du C dans le domaine de l'agriculture de conservation.

Le présent chapitre cherche à analyser la potentialité et la résilience des différents systèmes/pratiques agricoles existants incluant notamment les systèmes agroécologiques (agroforesterie, SCV, forêts naturelles) et les systèmes traditionnels en termes de stockage de C en vue d'une part, d'atténuer le CC et d'autre part, d'augmenter la disponibilité des nutriments et donc la fertilité des sols. Les principales conclusions de ces études peuvent servir d'outils d'aide à la décision pour les décideurs.

Démarche pour la conduite de la Recherche-Action

Des séries d'études in situ et en mésocosmes ont été menées pour appréhender l'influence de la déforestation et des pratiques alternatives à la culture sur brûlis sur les stocks de C et les émissions de GES.

APPROCHE POUR L'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DU SOL SELON LES PRESSIONS ANTHROPIQUES SUR LES FORÊTS (ÉTUDE 1)

La zone d'investigation est délimitée par un rectangle de 8 km de long et 4 km de large dans la commune d'Ambohibary, District de Moramanga de la Région Alaotra Mangoro. La pratique culturelle traditionnelle qui prévaut dans cette zone est le système d'abattis-brûlis, qui consiste à défricher et incinérer la végétation sur une parcelle pouvant être une forêt naturelle, pour ensuite y installer une culture vivrière. La mise en jachère de la parcelle a lieu quelques années plus tard, lorsque les rendements agricoles commencent à baisser. La baisse des rendements au fil des années entraîne un raccourcissement de la jachère, contraignant ainsi les paysans à terme à défricher de nouvelles forêts pour assurer leur subsistance. On aboutit ainsi à un paysage formé par une mosaïque de forêts, de jachères plus ou moins arborées et de parcelles agricoles, résultant de la déforestation à différentes dates. Les espaces forestiers qui ont été défrichés pendant la même période, constituent une chronoséquence. Notre étude vise à mesurer les stocks de carbone dans des placettes correspondant à des parcelles résultant de déforestations effectuées à des dates différentes le long d'une chronoséquence. La détermination des chronoséquences a été faite par la comparaison de la couverture forestière sur deux images satellites espacées de cinq ou de dix ans. Ceci a permis d'établir les « âges de déforestation » de chaque chronoséquence (Tableau 1 et Carte 1).

Tableau 1 : Les stocks de C organique des différents âges de conversion
*Mg C/ha : Mégagrammes de C par hectare

Age de conversion	Moyenne (Mg C/ha)*	Ecartype	n
0	111,34	21,07	15
4	126,06	27,94	9
8	121,21	22,11	11
13	106,35	16,28	15
23	106,20	25,48	15
30	102,08	25,07	11
Tout âge	111,17	23,43	76

Une grille de points équidistants de 300 mètres a été superposée aux chronoséquences. Les centres des 25 placettes d'étude ont été par la suite sélectionnés au hasard dans chaque chronoséquence (Figure 1A).

Chaque placette est constituée de 4 sous-placettes distantes chacune de 12,5 m et au centre desquelles ont été creusées les fosses de prélèvement (Figure 1B).

Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un cylindre métallique creux et ce par couche de 10 cm jusqu'à une profondeur de 50 cm, puis hermétiquement mis en sachet avant leur acheminement au laboratoire (figure 1C, 1D, et 1E).

Une fois au laboratoire, la teneur en C des sols (g C.kg⁻¹ de sol) a été déterminée par la combinaison de l'analyse chimique Walkley & Black et l'analyse spectrale par la Spectrométrie dans le Moyen InfraRouge (SMIR). Les valeurs des stocks en Mégagrammes de C par hectare (Mg C.ha⁻¹) ont été obtenues à partir de la teneur en carbone du sol C, de la densité apparente du sol (Da en g. cm⁻³), de l'épaisseur de l'horizon prélevé (e en cm) et du pourcentage du refus (% refus) obtenus lors du tamisage à 2 mm, selon la formule ci-dessous :

Stock C = [C x (100 - % refus) Da x e]/10.

Par la suite, les variations du C organique du sol avec le temps ont été modélisées avec une régression mathématique. Des Analyses des Correspondances Multiples (ACM) ont été réalisées pour identifier les principaux déterminants des stocks de carbone organique du sol autres que le facteurs/déterminants «temps » (représenté par l'âge de la conversion de la forêt). La première analyse a été faite avec le modèle le plus saturé, c'est-à-dire avec toutes les variables. Puis, elle a été refaite après élimination des variables les moins importantes pour ne retenir in fine que le type de végétation, l'altitude, la position topographique et les valeurs des stocks de Carbone Organique (SCO).

INVENTAIRE DES AGROÉCOSYSTÈMES DE LA RÉGION EST DE Madagascar POUR APPRÉHENDER LA RÉSILIENCE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (ÉTUDE 2)

Les modes d'usage des terres caractérisés par différents agroécosystèmes ont été inventoriés et étudiés dans l'écorégion Est de Madagascar, commune d'Ambodimanga II, District de Fenoarivo-Atsinanana, Région Analanjanorofo, Province de Toamasina (Carte 2) afin d'évaluer la potentialité des pratiques agroécologiques dans un objectif de sécurité alimentaire et d'atténuation du CC.

Les caractéristiques des agroécosystèmes identifiés sur la base des enquêtes menées sur le terrain suivant le degré d'anthropisation sont (Tableau 2) :

- Système Agroforesterie (AGF) (Photo 1), caractérisé par la présence de cultures pérennes (plus de 10 pieds de giroflier dans une parcelle) associée à une culture annuelle (riz ou manioc). La culture annuelle est toujours précédée d'une jachère d'environ 1 an ;
- Système de culture Sous Couvert Végétal (SCV) marqué par un simple décapage de couverture herbacée suivi de culture de riz/manioc/maïs (Photo 1) ;

Tableau 2 : Caractérisation des modes d'usages

Système	Commune	Localité	Topographie	Age d'exploitation	Itinéraire technique	Occupation actuelle	Précédent culturel	Cycle cultural
AGF	Ambodimanga II	Sembontranobemalaza	faible-moyenne-forte	10-40 ans et 40-50 ans de girofle	Décapage culture giroflier/manioc ou riz ou vanillier	Girofle/manioc ou riz	girofle/manioc ou riz 1-4 ans ; 1-10 ans	Riz/manioc, jachère 2-10 ans ; Riz/manioc, sans jachère ou jachère 1-2 ans
		Antsirakely Ambodihaina						
SCV	Ambodimanga II	Antanimpiraisana Antsirakely Sembontranobemalaza	bas-fonds	1-5 ans	Décapage, jachère 2-5 ans, association riz/manioc ou maïs	riz/manioc ou maïs ; canne à sucre	association riz/manioc ou maïs environ 1-2 ans	jachère-culture associée riz/manioc ou maïs
CV	Ambodimanga II	Mananara Hely	moyenne-forte	environ 2-5 ans	Décapage et brûlis/rotation de culture de riz, manioc/jachère 2ans	riz et canne à sucre	manioc environ 10 mois	riz/jachère 2ans /culture de manioc

- Système de culture de type conventionnel (CV) (Photo 1) ou « tavy » caractérisé par le décapage de la végétation suivi d'un brûlis avant la culture de riz/maïs suivie de manioc. Les terrains sont laissés en jachère de 2 à 7 ans. La perception des agriculteurs rapporte que la fertilité du sol est régénérée lorsque la hauteur de la végétation de la jachère dépasse 2 m.

L'échantillonnage de sol sous AGE, SCV et CV a été effectué sur chaque agroécosystème avec quatre (4) parcelles de répétition. Pour chaque parcelle, le prélèvement a été réalisé à trois points suivant une disposition en triangle. Les sols ont été prélevés à l'aide d'un cylindre dans une fosse de 50 cm x 50 cm sur différents profondeurs (0-10, 10-20, et 20-30 cm) pour la détermination de la densité apparente. Un échantillon composite résultant des trois points de prélèvements a été collecté par profondeur à l'aide d'une tarière dans chaque parcelle. Les sols prélevés et mis en sachets ont été par la suite analysés au laboratoire afin de déterminer les propriétés suivantes : teneur en P disponible (méthode des membranes échangeuses d'anions - P résine), en N total (Ntot) (méthode Kjeldhal), et en C organique (C) (méthode de Walkley & Black, 1934).

EXPÉRIMENTATION DE LABORATOIRE EN MÉSOCOSMES POUR SIMULER LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE (ÉTUDE 3)

Une expérimentation en laboratoire a été réalisée afin de tester la sensibilité de la respiration du sol et de la biodisponibilité de nutriments (N et P) aux modifications de températures (Photo 2).

L'expérimentation d'incubation de sols en mésocosmes a été menée au sein du Laboratoire des Radiosotopes pendant environ deux mois en simulant la variabilité climatique ou stress climatique par des scénarii d'augmentation de la température de 10 °C. Deux niveaux de température (25 °C et 35 °C) ont ainsi été testés sur

les sols issus de deux modes d'usage : le système agroforestier AGF et le système conventionnel CV (voir-ci-dessus). Les échantillons de sol ont été prélevés à 0-10 cm de profondeur (en faisant l'hypothèse que c'est cette couche superficielle qui est la plus affectée par les stress de température) dans la zone de l'écorégion Est de Madagascar. La température de 25 °C correspond à la température moyenne de cette région. L'effet de l'augmentation de température de 10 °C a été testé sur la disponibilité des nutriments, particulièrement le P extrait par la membrane échangeuse d'anions (ou P résine), la teneur en ammonium NH_4^+ , ainsi que sur l'émission de CO_2 (résultant de la respiration des microorganismes impliqués dans la décomposition des matières organiques). Le P résine est considéré comme étant la fraction facilement disponible pour les plantes parce qu'il est le plus corrélé avec le P prélevé par les plantes (Sibbesen, 1978). Le NH_4^+ est une des formes de N directement assimilable par la plante. Ces deux formes de nutriments, directement disponibles pour les plantes sont des indicateurs de fertilité de sol et par extension de productivité agricole. L'apport de matière organique par les agriculteurs est connu pour renforcer la fertilité du sol. Dans cette étude, les apports de MO dans les mésocosmes correspondent à un apport équivalent à 10 tonnes de fumier par hectare *in situ* qui est la quantité moyenne utilisée par les agriculteurs.

Les différentes mesures ont été réalisées au 1^{er}, 3^e, 7^e, 10^e, 15^e, 21^e, 28^e, 42^e et 59^e jour d'incubation. La potentialité de ces deux modes d'usage face à la variation de température a été testée et analysée dans cette étude. Les sols de ces deux modes d'usage se différencient par leurs propriétés physico-chimiques (Tableau 3).

Tableau 3 : Propriétés physico-chimiques initiales des sols étudiés

Caractéristiques	AgFS	CV
P résine (mg P/kg)	2.3	1.5
N-NH4 (g/kg)	0.003	0.017
Da (g/cm³)	1.1	1.1
Carbone (g/kg)	41.3	36.4

Quelques résultats sur l'étude de la résilience des différents agroécosystèmes face aux pressions anthropiques et au stress climatique

ÉVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE SUIVANT LA PRESSION EXERCÉE SUR LA FORÊT (CONVERSION DE FORÊT A NON-FORÊT) (RÉSULTATS DE L'ÉTUDE 1)

Les analyses des résultats ont montré que les stocks moyens de C organique dans les sols forestiers ($111,34 \pm 21,07 \text{ Mg C.ha}^{-1}$, $n = 76$) et non-forestiers ($111,13 \pm 24,14 \text{ Mg C.ha}^{-1}$, $n = 76$) ne sont pas significativement différentes ($P = 0,975$ pour $n = 76$) pour la couche de 0 à 50 cm de profondeur. On note également une grande variabilité des valeurs des stocks de carbone dont les valeurs extrêmes sont de $48,38 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ et $167,05 \text{ Mg C.ha}^{-1}$. Cette variabilité s'observe également au sein d'une même chronoséquence. Grinand (2010) faisait état aussi d'une variabilité locale dans la partie Sud-Est de Madagascar. Par ailleurs une régression polynomiale d'ordre 4 (Equation 1) ajuste le mieux les variations des stocks de carbone organique du sol au cours du temps :

$$y = -0.0011x^4 + 0.070x^3 - 1.42x^2 + 8.64x + 111.29 \quad (1)$$

Où x représente l'âge de conversion de la forêt et y la valeur du SCO.

La diminution des stocks de C après déforestation s'observe à partir de 20 ans de déforestation. La répétition des feux du tavy et le raccourcissement de la durée de jachère appauvrissent le couvert végétal et augmentent les impacts de l'érosion. En l'absence de végétation, la couche superficielle du sol se trouve progressivement dépouillée des éléments minéraux et organiques incluant le C organique. Ceci peut expliquer la baisse continue des valeurs du C du sol jusqu'à sa stabilisation un peu au-dessus de 100 Mg C.ha^{-1} (Tableau 1 et Figure 2).

Toutefois, il convient de noter que l'âge de la conversion n'explique que 11 % des variations des SCO avec le temps ($R^2 = 0,11$). En effet, les graphes de l'ACM ont montré que le type de végétation influence les valeurs des stocks de C du sol au même titre que l'âge de conversion de la forêt (Figure 3).

Il est donc recommandé de le considérer lors de la stratification d'une zone de prélèvement d'échantillons de sols en vue de l'étude du C organique du sol. En conséquence, toute étude qui prévoit des prélèvements devra en tenir compte lors de la phase de stratification de la zone d'étude ou de prélèvement afin de déterminer convenablement le nombre d'échantillons par strates indispensables avec le niveau de précision désiré en matière de stock de C organique du sol. En outre, la relation « type de végétation » et stock de C organique du sol suggère la nécessité de la promotion des pratiques agricoles qui favorisent les végétations corrélées aux valeurs de stocks de C du sol élevé.

POTENTIALITÉ DES SYSTÈMES AGROÉCOLOGIQUES EN TERMES DE STOCKAGE DE CARBONE ET DE DISPONIBILITÉ DES NUTRIMENTS (RÉSULTATS DE L'ÉTUDE 2)

Les résultats préliminaires ont montré que le mode d'usage des terres a significativement affecté la disponibilité de nutriments et la teneur en C du sol pour toutes les profondeurs réunies. Les teneurs en P résine, en Ntot et en CO ont diminué significativement avec la profondeur ($P < 0.001$) (Figure 4).

Pour l'ensemble des données, le système agroforestier AGF présente le stock le plus élevé en P résine et CO, suivi du système SCV et du système CV. Cette différence est surtout très marquée pour les horizons de surface et tend à disparaître avec la profondeur. En effet, les sols de surface sont les plus exposés aux conditions extérieures (température, précipitation, dépôt de litière, érosion...). En outre, la forte biomasse racinaire de ces horizons représente une niche écologique très favorable au développement des activités biologiques du sol (soumis aux influences des ingénieurs du sol et des microorganismes). Cette différence n'est pas très marquée au niveau de Ntot (Figure 4). Les processus de nitrification et de dénitrification, étant les processus clés contrôlant la disponibilité de N dans les sols, peuvent être optimaux sous différentes conditions environnementales et conduire à la perte de N gazeux (Szukics *et al.*, 2010). En effet, une diminution significative de NO_3^- se produit dans des sols incubés à 25 °C en conditions humides (70 % de capacité de saturation de sol). Elle peut être attribuée à une dénitrification et libération de N_2O ou N_2 gazeux dans l'atmosphère (Davidson et Swank, 1986 ; Szukics *et al.*, 2010).

La pression anthropique sur l'environnement marquée par un changement d'usage des terres (de systèmes forestiers vers des systèmes agricoles) affecte la fertilité du sol et l'environnement (risques d'érosion, émissions de GES, etc.). Les pratiques culturelles actuelles caractérisées par le système de type traditionnel

CV appauvrissent progressivement la fertilité de sol tout en diminuant la capacité de sol à se régénérer. Les systèmes agroécologiques qui excluent l'utilisation du feu mais qui intègrent les pratiques de rotation ou d'association culturale (pérenne/annuelle, légumineuse/céréale) ou la présence d'une couverture végétale (vive ou morte) sur le sol, améliorent la disponibilité des nutriments et le stock en C organique du sol. Dans cette étude, le système agroforestier présente une potentialité élevée d'adaptation face aux conditions du milieu en termes de disponibilité de nutriments et de protection environnementale. L'agroforesterie se définit par les pratiques d'utilisation des terres dans lesquelles des plantes ligneuses pérennes sont délibérément cultivées sur des parcelles également exploitées pour des productions agricoles et/ou animales, qu'il s'agisse d'une association spatiale ou temporelle (Lungren et Raintree, 1982). Ainsi, les sols sous systèmes agroforestiers présentent des stocks élevés en matière organique grâce au renouvellement continu de la litière de sol par les tiges et feuilles ainsi qu'au développement des systèmes racinaires des arbustes et des plantes annuelles. Dans les sols ferrallitiques, en climat tropical humide (forte température et précipitations élevées), la décomposition et la minéralisation de la matière organique sont plus rapides, favorisant la mise à disposition des nutriments pour les plantes. Par ailleurs, la compétition entre le P minéral et les anions organiques libérés lors de la décomposition de la matière organique, sur les sites de fixation, peut réduire la capacité de sorption du P dans le sol et augmenter sa disponibilité (Hue, 1991 ; Haynes and Mokolobate, 2001, Guppy *et al.*, 2005).

La potentialité du système agroécologique (Agroforesterie) a été mise en évidence dans cette étude en termes de fertilité de sol et de stockage de C dans un contexte de changement climatique et de la REDD+ suivant le degré des pressions anthropiques de l'agroécosystème de l'écorégion Est de Madagascar.

RÉSILIENCE DU SYSTÈME AGROÉCOLOGIQUE FACE AU STRESS THERMIQUE (RÉSULTATS DE L'ÉTUDE 3)

Résilience en termes de disponibilité de nutriments

Les résultats montrent que l'augmentation de la température peut influencer la disponibilité de P et de N du sol selon le mode d'usage des terres (Figure 5).

L'augmentation de la température de 25 à 35 °C a augmenté significativement la teneur en P résine principalement sous système AGF (Figure 5). Ceci est en contraste avec la diminution de la teneur en P résine suite à l'augmentation de la température dans le système CV à partir du 15^e jour d'incubation dans le système d'apport organique (Figure 5).

La libération de P inorganique (P résine) dans un sol avec ou sans apport de MO se fait principalement par la minéralisation du P organique par les bactéries et les champignons (Cross and Schlesinger, 1995). Dans ce sens, la température s'avère être l'un des paramètres contrôlant l'activité enzymatique microbienne (Wallenstein *et al.*, 2009). Ainsi, la présente expérimentation sur le réchauffement du sol de 25 à 35 °C a permis d'augmenter la minéralisation du P organique marquée par des valeurs ΔP résine positives principalement dans le système AGF. Vincent *et al.*, (2014) ont également rapporté une augmentation de la disponibilité du P avec l'augmentation de la température. Les valeurs de ΔP résine observées dans le système AGF ont été significativement différentes de celles du système CV à partir de 40^e jour d'incubation avec ou sans apport de MO. L'écart entre les deux systèmes est plus marqué dans le système d'apport de MO. La température peut affecter la disponibilité du P directement par les effets sur la minéralisation microbienne ou indirectement en influençant des facteurs initiaux qui peuvent affecter les processus du sol tels que la végétation et la composition de la communauté microbienne (Vincent *et al.*, 2014). Les paramètres du sol des systèmes AGF et CV sont caractérisés par

différentes variables incluant le pH du sol, la concentration en N, le rapport C/N, la végétation, les compositions de la communauté microbienne et les rapports bactéries/champignons (Sundqvist *et al.*, 2011) ce qui peut expliquer les faibles ΔP résine observés pour le système CV comparés à ceux du système AGF.

Par ailleurs, la diminution de la teneur en P résine avec la durée d'incubation peut être expliquée par l'immobilisation de P dans la biomasse microbienne et/ou la fixation de P (inorganique ou organique) sur la phase solide des sols (Al et Fe). En effet, les teneurs en Fe et Al sont positivement corrélées avec la rétention de P dans les sols organiques (Giesler *et al.*, 2005 ; Dell'Olie *et al.*, 2008).

L'effet de l'augmentation de la température sur $\Delta N-NH_4$ n'est pas bien marqué dans le système CV caractérisé par une faible augmentation, voire nulle, au cours de l'incubation. Ces résultats sont différents de l'évolution de $\Delta N-NH_4$ dans le système AGF marqué par une forte pente. La stimulation de la disponibilité de N ($N-NH_4$) dans le sol suite à l'augmentation de température principalement dans AGF via le processus de minéralisation, a été rapportée par plusieurs chercheurs (Joshi *et al.*, 2006 ; Reich *et al.*, 2006). Les conditions de l'incubation, marquée par une augmentation de la température de 25 à 35 °C, ont augmenté la vitesse de dénitrification favorisant ainsi l'accumulation de NH_4 dans le sol (Szukics *et al.*, 2010). Toutefois, la minéralisation de N pourrait être limitée dans les sols à fort potentiel d'émission de CO_2 (Hungate *et al.*, 2003) comme ceux observés ici dans le système CV.

Résilience en termes d'émission de gaz carbonique (C- CO_2)

L'augmentation de l'émission de C- CO_2 observée avec l'augmentation de la température (Figure 6) confirme les résultats des études récentes selon lesquelles les sols peuvent basculer d'un réservoir net à une source nette de carbone atmosphérique (Brevik, 2012 ; Niklinska *et al.*, 1999).

En effet, l'activité et la vitesse de décomposition microbienne sont plus importantes lorsque les conditions de température sont plus élevées. L'augmentation de la minéralisation est plus importante pour le système CV que pour le système AGF laissant suggérer une meilleure résilience du système AGF au changement de température.

La différence de C- CO_2 émis entre les deux niveaux de températures (ΔCO_2) ne révèle aucune différence significative pour les deux systèmes AGF et CV quand on ajoute de la matière organique (Figure 6) avec une valeur de ΔCO_2 plus élevée sous CV par rapport à AGF. Ainsi, face à l'augmentation de la température, la respiration dans le système agroforestier (AGF) est toujours inférieure ou égale à celle du système CV. L'addition de matière organique permet ainsi d'augmenter la résilience du sol au CC.

L'émission de CO_2 , en tant que gaz à effet de serre, contribue au réchauffement de l'atmosphère terrestre (IPCC 2007). Ainsi, la réduction de l'émission de CO_2 sous l'effet de l'augmentation de température pour le système AGF (comparée à celle du système CV) montre le potentiel de résilience ou d'atténuation du système agroécologique face à la variation et au changement climatique. Cette capacité de séquestration de C dans le sol est ainsi affectée par les pratiques ou les modes d'usage des sols. Les pratiques ou modes de gestion qui permettent de restituer une quantité importante de matières organiques au sol, que cela soit sous forme de résidus organiques ou sous forme d'apport organiques, augmentent la séquestration de carbone dans le sol et sont plus résilientes aux variations et changements climatiques. Le C séquestré peut être retourné dans l'atmosphère par l'émission de C atmosphérique CO_2 si le mode de gestion qui conduit à leur séquestration est altéré.

Ainsi, le basculement d'un mode d'usage conventionnel vers des pratiques agroécologiques peut conduire non seulement à de plus faibles émissions de CO_2 mais également à une séquestration de C significative dans les sols (Post *et al.*, 2004 ; Post et Kwon, 2000).

Des pistes de recommandations pour les décideurs

La stratégie de développement agricole actuelle, focalisée sur l'augmentation de la production dans les zones à forte production agricole notamment les greniers à riz, est totalement déconnectée de la réalité de nombreux petits agriculteurs vivant aux abords des forêts où l'innovation et l'intensification sont quasiment inconnues et inaccessibles. Pourtant les dégâts qu'ils causent sont de portée étendue jusqu'au niveau mondial en terme de CC du fait de leurs émissions de gaz à effet de serre. Madagascar semble manquer d'une vision de développement durable où les stratégies de tous les secteurs de développement, forestier et agricole, sont en cohérence les unes envers les autres. Chaque secteur de développement est ainsi appelé à mettre en place les outils nécessaires pour encourager les pratiques qui maintiennent ou restaurent les services écosystémiques du sol.

Cette étude devrait conforter Madagascar dans l'application de son Plan National de Développement (PND, décembre 2014). Elle montre la convergence des intérêts des acteurs de conservation et ceux du développement. Les sols sous végétations contenant des espèces ligneuses présentent en effet des valeurs de carbone organique du sol et de nutriments plus élevées que ceux sous végétations herbacées. Ce constat soutient le système agroécologique représenté par l'Agroforesterie comme une alternative durable par excellence à la pratique actuelle de « tavy » et ce, à divers points de vue : i) environnemental avec un stock élevé de CO et une variation non significative d'émission de CO₂ face à la variabilité/changement climatique, ii) agronomique avec une meilleure fertilité de sol, et iii) économique avec la culture de rente (girofler) et vivrière (riz, maïs, manioc).

Toutefois, le système nécessite d'être adapté aux besoins et au contexte des communautés locales, futures bénéficiaires de ces techniques, afin que l'adoption se fasse de manière pérenne.

Conclusion

La présente Recherche-Action a permis d'acquérir de nouvelles connaissances sur le rôle incontournable du compartiment « sol » pour faire face au CC dans le contexte de la mise en œuvre de la REDD+ et aussi pour contribuer à la sécurisation alimentaire à Madagascar. Elle présente pour les bailleurs de fonds et organismes de développement et de conservation, deux résultats fondamentaux qui leur permettront d'orienter efficacement leurs activités en faveur d'un développement durable des espaces ruraux de l'Est de Madagascar :

- Mesurer et appréhender l'impact de la pression anthropique sur le stockage de carbone du sol suivant la trajectoire de déforestation et de défrichement des zones forestières de l'Est de Madagascar. Selon les pratiques humaines, le stock de C des sols peut soit augmenter, soit diminuer. Il a été montré ici que la conversion des forêts en systèmes cultivés diminue les stocks de C suivant l'âge de déforestation justifiant la mise en œuvre de l'initiative REDD+ à Madagascar.
- La résilience en termes de stockage de C et de disponibilité des nutriments (N et P) par les systèmes agroécologiques (dont l'agroforesterie) a été mise en évidence. Le système agroforestier contribue au stockage de carbone et à l'amélioration de la fertilité des sols si l'on se réfère aux stocks élevés en C et P résine. Par ailleurs, la capacité du système agroforestier à s'adapter à des CC telle qu'une augmentation de la température de 10 °C a également été démontrée dans cette étude. Ce système conserve de fortes teneurs en nutriments et limite les émissions de CO₂ vers l'atmosphère.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la réalisation du Projet Carbone PARRUR intitulé « Séquestration du carbone et disponibilité des nutriments (P et N) des sols des différents agroécosystèmes dans le cadre de la REDD+ à Madagascar ». Ce projet a été financé par le Service de Coopération et d'Action Culturelle SCAC de l'Ambassade de France dans le cadre du Fonds de Solidarité Prioritaire PARRUR (Partenariat et Recherche dans le secteur Rural).

Références bibliographiques

- Bondeau A., Smith P.C., Zaehle S., Schaphoff S., Lucht W., Cramer W., Gerten, D., 2007 : «Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance». *Global Change Biology*, 13: p 679-706.
- Brevik E.C., 2012 : «Soils and Climate Change: Gas Fluxes and Soil Processes». *Soil Horizons*, 53: p 12-23.
- Busson, F., Andriamiarinosy, M., Monteils, F., Randrianarison, M., 2009 : *REDD à Madagascar Etat des lieux et expériences en cours*, Green Synergy, Unpublished report to the Madagascar REDD, Technical Committee.
- Cooney C.M., 2010 : «The perception factor: Climate change gets personal. Environ». *Health Perspect*, 118: 11, p 484-489.
- Corfee-Morlot J., Maslin M., and Burgess J., 2007 : «Global warming in the public sphere». *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 365(1860): p 2741-2776.
- Cross A.F., Schlesinger W.H., 1995 : «A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems». *Geoderma*, 64: p 197-214.
- Davidson E.A., Swank W.T., 1986 : «Environmental parameters regulating gaseous nitrogen losses from two forested ecosystems via nitrification and denitrification». *Applied and Environmental Microbiology*, 52: p 1287-1292.
- Dell'Olio L.A., Maguire R.O., Osmond D.L., 2008 : «Influence of Mehlich-3 extractable aluminum on phosphorus retention in organic soils». *Soil Science*, 173 : p 119-129.
- FAO, 2013 : Climate-Smart Agriculture. Sourcebook. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 557 p.
- Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik C.J., Monfreda C., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K., 2005 : «Global Consequences of Land Use», *Science*, 309: p 570-574.
- Giesler R., Andersson T., Lovgren L., Persson P., 2005 : «Phosphate sorption in aluminum- and iron-rich humus soils». *Soil Science Society of America Journal*, 69: p 77-86.
- Grinand C., 2010 : « Développement d'une méthode de cartographie des stocks de carbone dans le sol : Application à un projet REDD+ à Madagascar ». *Rapport d'étude Mastère SILAT*, 35 p.
- Gullison RE, Frumhoff PC, Canadell JG, Field C.B, Nepstad D.C., Hayhoe K., Avissar R., Curran L.M., Friedlingstein P., Jones C.D., Nobre C., 2007 : Tropical forests and climate policy. *Science*, 316: p 985-986.
- Guppy C.N., Menzies N.W., Moody P.W., Blamey F.P., 2005 : «Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review». *Australian Journal of Soil Research*, 43: p 189-202.

Haynes R.J., Mokolobate M.S., 2001 : «Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved». *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59: p 47-63.

Hue N.V., 1991 : «Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies». *Soil Science*, 152: p 463-471.

Hungate B.A., Dukes J.S., Shaw M.R., Luo Y., Field C.B., 2003 : «Nitrogen and climate change». *Science*, 302: p 1512-1513.

IPCC, 2006 : «2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories», dans H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (eds). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Tokyo, Japan: IGES.

IPCC, 2007 : «Climate Change 2007 - The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», dans Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.

Joshi A.B., Vann D.R., Johnson A.H., 2006 : «Litter quality and climate decouple nitrogen mineralization and productivity in Chilean temperate rainforests». *Soil Science Society of America Journal*, 70: p 153-162.

Lundgren B.O., Raintree J.B., 1982 : «Sustained agroforestry», dans Nestel B., (ed). Agricultural Research for Development: Potentials and Challenges in Asia. ISNAR, The Hague, *The Netherlands*, p 37-49.

Matthews R.B., van Noordwijk M., Lambin E., Meyfroidt P., Gupta J., Verchot L., Hergoualc'h K., Veldkamp E., 2014 : Implementing REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Degradation): evidence on governance, evaluation and impacts from the REDD-ALERT project. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19: p 907-925.

Minang P.A., van Noordwijk M., Kahurani E., 2014 : «Partnership in the tropical forest margins: a 20-year journey in search of alternatives to slash-and-burn». World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, p 241.

Niklińska M., Maryański M., Laskowski R., 1999 : «Effect of temperature on humus respiration rate and nitrogen mineralization: Implications for global climate change». *Biogeochemistry*, 44: p 239-257.

Post W.M., Izaurralde R.C.R.C., Jastrow J.D., McCarl B.A., Amonette J.E., Bailey V.L., Jardine P.M., West T.O., Zhou J., 2004 : «Enhancement of Carbon Sequestration in US Soils». *Bioscience*, 54: p 895-908.

Post W.M., Kwon K.C., 2000 : «Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential». *Global Change Biology*, 6: p 317-328.

Razafimbelo T., Oliver R., Chevallier T., Chapuis-Lardy L., Feller C., 2008 : «Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems». *Soil and Tillage Research*, 98: p 140-149.

Reich P.B., Hungate B.A., Luo Y., 2006 : «Carbon-nitrogen interactions in terrestrial ecosystems in response to rising atmospheric carbon dioxide». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37: p 611-636.

Richter D.deB., Houghton R.A., 2011 : Gross CO₂ fluxes from land-use change: implications for reducing global emissions and increasing sinks. *Carbon Management*, 2: p 41-47.

Sibbesen E., 1978 : «An investigation of anion exchange resin method for soil phosphorus extraction». *Plant and Soil*, 50: p 305-321.

Sundqvist M.K., Giesler R., Graae B.J., Wallander H., Fogelberg E., et al., 2011 : «Interactive effects of vegetation type and elevation on aboveground and belowground properties in a subarctic tundra». *Oikos*, 120: p 128-142.

Szükics U., Abell G.C.J., Hödl V., Mitter B., Sessitsch A., Hackl E. Zechmeister-Boltenstern S., 2010 : «Nitrifiers and denitrifiers respond rapidly to changed moisture and increasing temperature in a pristine forest soil». *FEMS Microbiology Ecology*, 72: p 395-406.

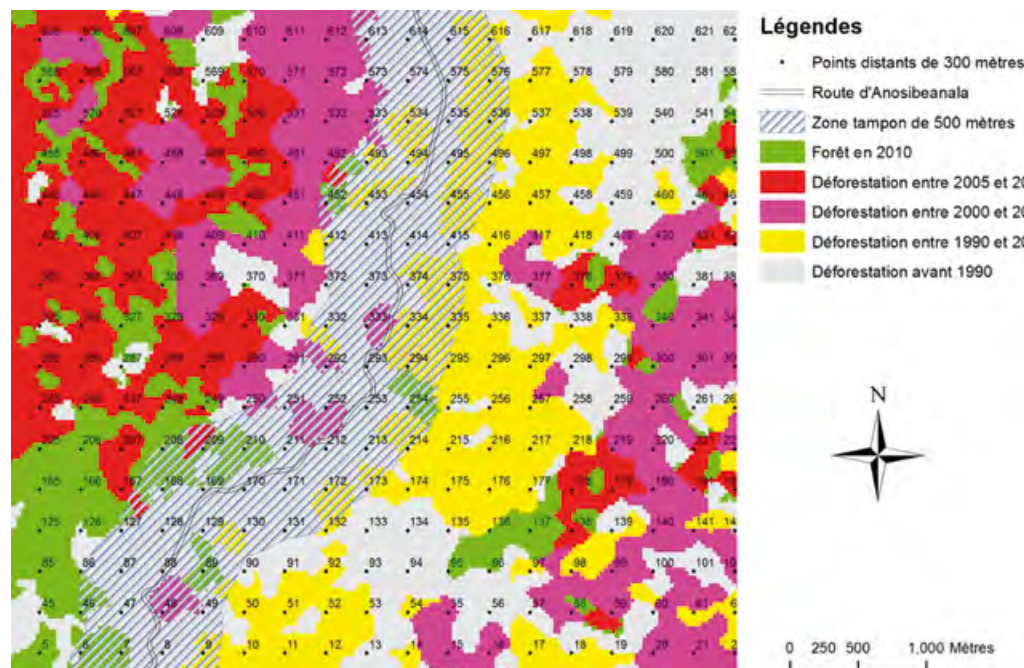
Uphoff N., Chi F., Dazzo F.B., Rodriguez R.J., 2013 : «Soil fertility as a contingent rather than inherent characteristic: Considering the contributions of crop-symbiotic soil biota», dans R. Lal and B. Stewart (eds), *Principles of Sustainable Soil Management in Agroecosystems*, Taylor & Francis, Boca Raton FL, p 141-166.

Wallenstein M.D., McMahon S.K., Schimel J.P., 2009 : «Seasonal variation in enzymes activities and temperatures sensitivities in Arctic tundra soils». *Global Change Biology*, 15: p 1631-1639.

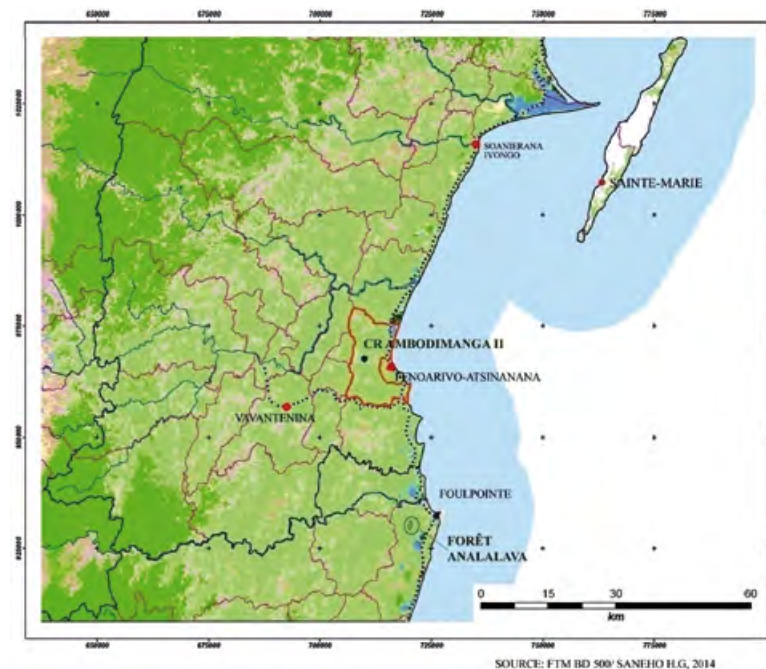
Walkley A., Black T.A., 1934 : «An examination of the Degrieff and method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration». *Soil Science*, 37: p 29-38.

Woods J., Williams A., Hughes J.K., Black M., Murphy R., 2010 : «Energy and the food system». *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365: p 2991-3006.

Vincent A.G., Sundqvist M.K., Wardle D.A., Giesler R., 2014 : «Bioavailable Soil Phosphorus Decreases with Increasing Elevation in a Subarctic Tundra Landscape». *PLoS ONE*, 9(3): e92942.



Carte 1 : Les chronoséquences et les centres potentiels des placettes



Carte 2 : Localisation des milieux d'études



Photo 1 : Les types de mode d'usage de terres : Agroforesterie (AGF), Système de culture sous couvert Végétal (SCV), Système de culture de type conventionnel (CV) (Source : auteur (2013))

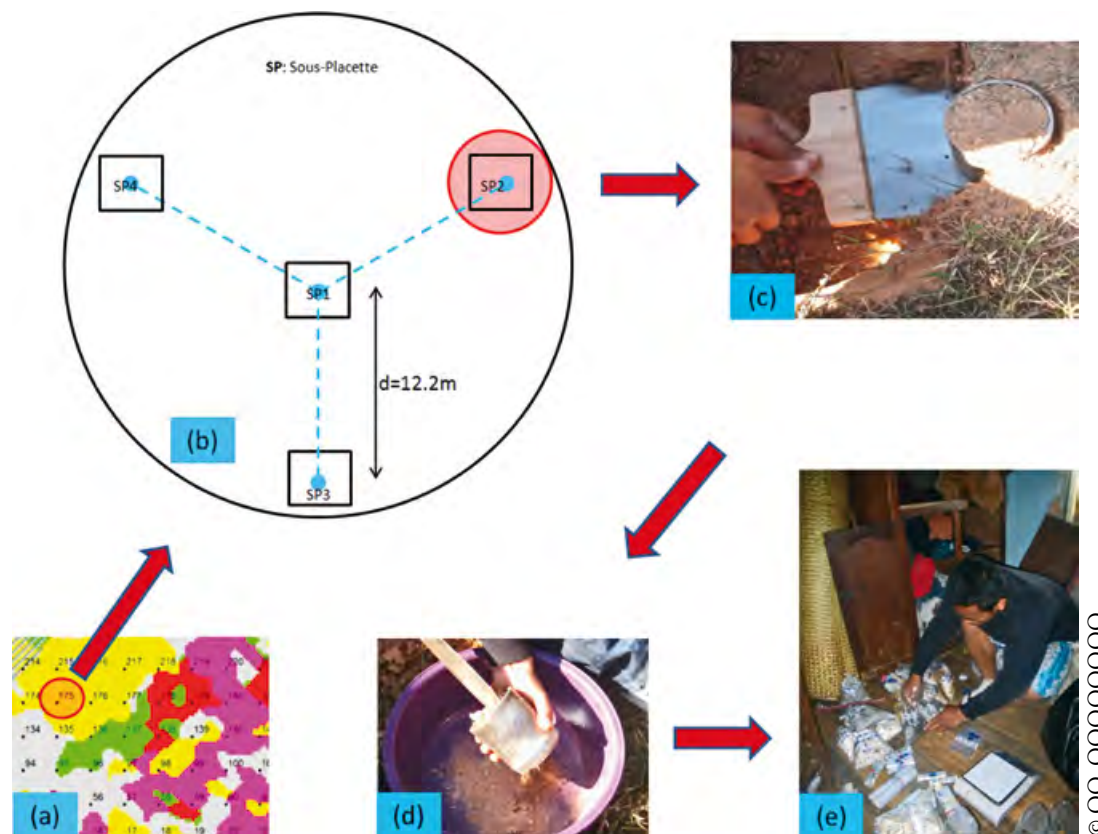


Figure 1 (a) : Centre de placette d'une chronoséquence. (b) : Les 4 sous-placettes constituant d'une placette. (c) et (d) : Prélèvement de l'échantillon de la profondeur 0-10 cm. (e) : Pesée des sachets préalablement étiquetés et remplis d'échantillons

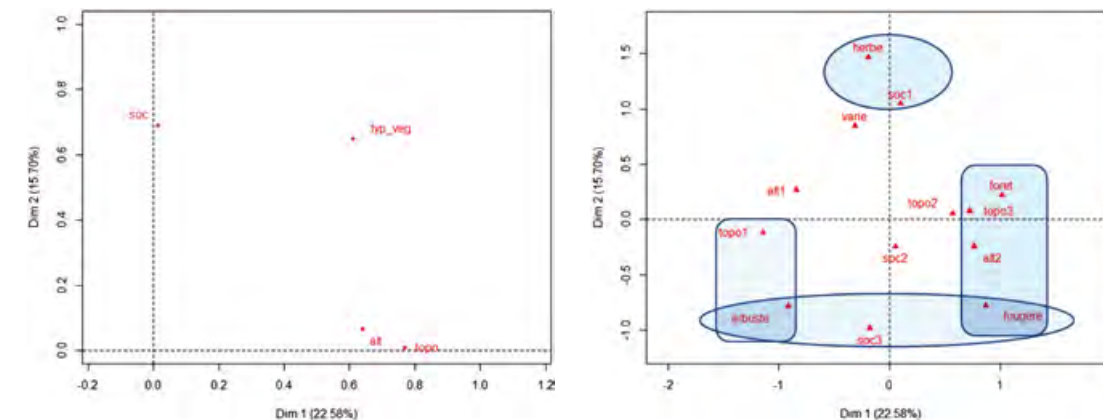
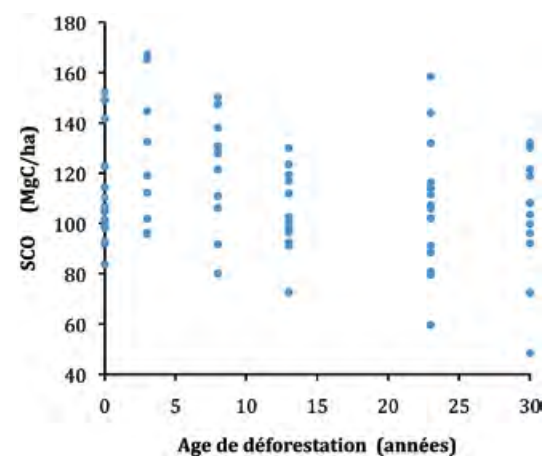


Figure 3 : Représentations graphiques des variables (gauche) et modalités (droite) par l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM)

- soc : carbone organique du sol**
- soc1 : le tiers des données avec les valeurs de soc la plus faible
 - soc2 : le tiers des données avec les valeurs de soc intermédiaires
 - soc3 : le tiers des données avec les valeurs de soc les plus haute
- typ_veg : Type de végétation**
- arbuste : végétation dominée par des arbustes
 - fougere : végétation dominée par des fougères
 - foret : forêt
 - herbe : végétation dominée par des herbacées
 - varie : végétation sans espèce ou type dominant
- alt : Altitude**
- alt1 : la moitié des données avec les altitudes les plus basses
 - alt2 : la moitié des données avec les altitudes les plus basses
- topo : Position topographique**
- topo1 : bas-versant et bas-fonds
 - topo2 : mi-versant
 - topo3 : haut versant et sommet

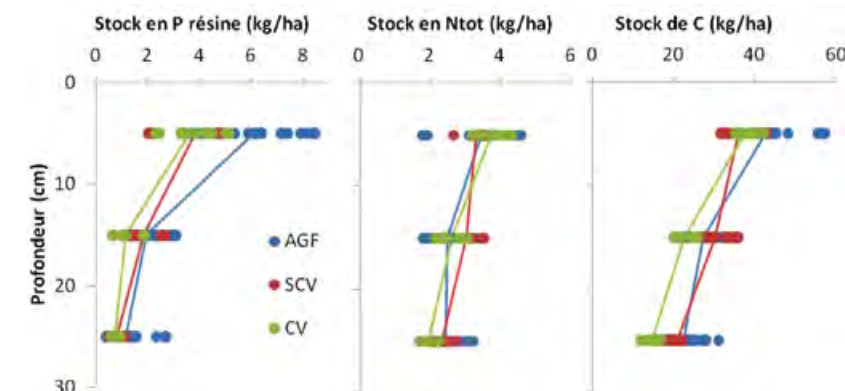


Figure 4 : Variation de stock en P résine, Ntot, et en CO affectée par les différents modes d'usage de terre suivant la profondeur

Les lignes continues représentent les moyennes des répétitions par profondeur pour chaque système étudié

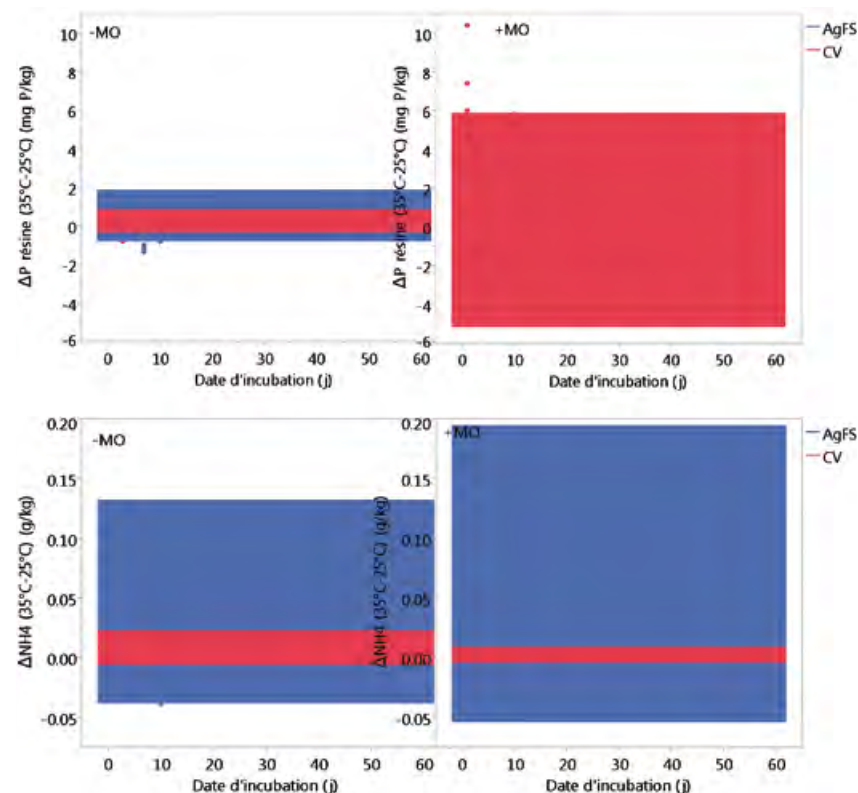


Figure 5 : Variation de ΔP résine et $\Delta N-NH_4$ suivant la date d'incubation entre les deux systèmes étudiés
 ΔP résine et $\Delta N-NH_4$ (35 °C - 25 °C) : différence de la teneur en P résine et N-NH4 entre les deux niveaux de température

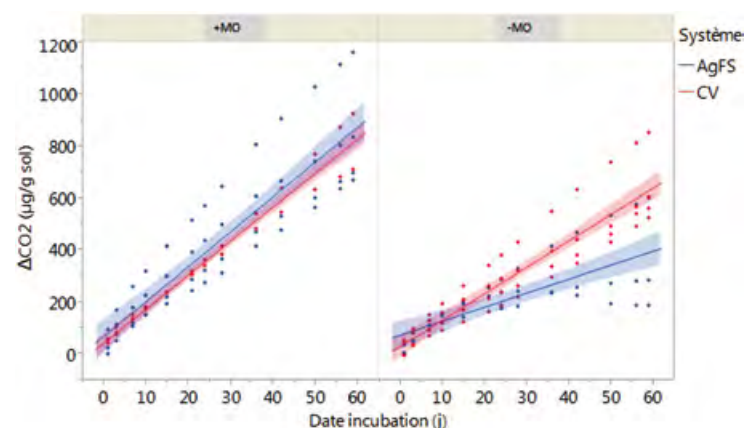


Figure 6 : Variation de ΔCO_2 suivant la date d'incubation entre les deux systèmes étudiés
 ΔCO_2 (35 °C - 25 °C) : différence de C- CO_2 émis entre les deux niveaux de température ;
 -MO : sans ajout de matière organique et ; +MO : avec ajout de matière organique sous forme de fumier

Éditeurs scientifiques

Hervé DUCHAUFOUR a occupé entre 1990 et 2012, différents postes pour le Ministère français des Affaires Etrangères et le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) dans les régions des Caraïbes, Afrique Centrale et pays des Grands Lacs. Il a été responsable de plusieurs projets nationaux et régionaux financés par la France et l'Union Européenne dans le domaine de la coopération universitaire et scientifique. De novembre 2012 à août 2016, il a été chargé du pilotage stratégique et technique de la Coopération universitaire et scientifique franco-malgache en lien avec le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. De formation pluridisciplinaire (géologie, pédologie et agronomie) et diplômé d'un Doctorat en biologie forestière, ses expériences dans les pays du Sud lui valent de comprendre des problématiques complexes et de proposer des solutions par des analyses et diagnostics utilisant l'approche systémique et la démarche participative afin d'amorcer des dynamiques de partenariat Nord-Sud opérationnelles et innovantes.

Tantely M. RAZAFIMBELO est agro-pédologue, directeur du Laboratoire des RadioIsotopes de l'Université d'Antananarivo. Ses activités de recherche portent sur les bilans de gaz à effet de serre et la dynamique du carbone du sol dans les agrosystèmes et écosystèmes naturels à Madagascar. A l'échelle régionale, elle coordonne le réseau Carbone du sol pour une Agriculture durable en Afrique ou CaSA, qui regroupe une centaine de chercheurs africains et français qui étudient l'impact des pratiques agricoles durables sur les propriétés du sol, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique.

Jacqueline RAKOTOARISOA est Directeur Scientifique du FOFIFA. Agronome de formation et Docteur en Physiologie Végétale, elle s'est spécialisée sur les systèmes de riziculture et les techniques agricoles de conservation. Ses recherches ont porté sur la cinétique de la décomposition des résidus des plantes de couverture et les processus de minéralisation de la matière organique et leur impact sur la dynamique de l'azote dans le sol et l'efficacité de la nutrition azotée du riz pluvial en systèmes de culture sous couverture végétale.

Bruno Salomon RAMAMONJISOA est Professeur titulaire, Directeur de l'Ecole doctorale « Gestion des Ressources Naturelles et Développement » et Directeur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA de l'Université d'Antananarivo). Docteur Ingénieur forestier, il s'est spécialisé en économie forestière et en politique des ressources naturelles. Depuis 1997, il est responsable de plus d'une dizaine de projet de recherche impliquant plusieurs partenaires européens et américains. Il est auteur et/ou co auteurs de 45 articles. Depuis 2011, il est membre de l'IUFRO (International Union of Forest Research Organizations) à Madagascar.

RAKOTONDRAVAO est chercheur en parasitologie, spécialiste des maladies des animaux de rente. Ses recherches portent sur les maladies parasitaires et la parasitologie, la malacologie et l'écologie parasitaire. Il a dirigé le Département de Recherche Zootechnique et Vétérinaire du FOFIFA de 1997 à 2012 et a participé à l'enseignement de la parasitologie vétérinaire à la Faculté de Médecine (mention vétérinaire). Il est Membre de la Société Française de Parasitologie.

Liste des auteurs

Seuls les auteurs figurant en tête de liste et les membres des collectifs PARRUR sont mentionnés.

Noms et Prénoms	Institution de rattachement	Adresse électronique
QUALIKKO		
Frédéric DESCROIX	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UMR PERSYST « QualiSud », Co-conception de systèmes agroalimentaires de qualité	frederic.descroix@cirad.fr
Jean-Jacques RAKOTOLAMALALA	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Département de Recherches Agronomiques	rakotomalala.jjr@moov.mg
Elisa BOUSQUET	Montpellier SupAgro (Montpellier, France)	elisa.bousquet@hotmail.fr
Dina Harisoa RAHAINGOSAMBATRA	Université d'Antananarivo - Faculté des Sciences, Département de Biologie et Ecologies Végétales	dinarsou@gmail.com
Alexandre CHEN-YEN-SU	Université de La Réunion - UFR des Sciences et Technologies (Saint Denis, La Réunion)	alexandre.chen-yen-su@univ-reunion
GIROFLIER		
Gaylor RAZAFIMAMONJISON	Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques	rdinagaylor@yahoo.fr
Renaud BOULANGER	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UMR PERSYST « QualiSud », Food Processing Research Unit	renaud.boulanger@cirad.fr
Michel JAHIEL	Centre Technique Horticole de Tamatave (Madagascar)	ctht@moov.mg
M. RAKOTOARISON	Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques	
R. SANDRATRINIAINA	Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques	
Jean RASOARAHONA	Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques	jeanras@moov.mg
Panja RAMANOELINA	Présidence Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques	panjarama@moov.mg
Fanjaniaina FAWBUSH	Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques, Industries Agricoles et Alimentaires	fanjafawbush@gmail.com
Marc LEBRUN	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UMR PERSYST « QualiSud », Co-conception de systèmes agroalimentaires de qualité	marc.lebrun@cirad.fr
Pascal DANTHU	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), DP Forêts et Biodiversité. Direction régionale CIRAD (Madagascar)	pascal.danthu@cirad.fr

INNOVEPICE		
Hanitra ANDRIANOELISOA	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Département de Recherches Forestières et de Gestion des Ressources Naturelles	hanitrashn@hotmail.com
Harizoly RAZAFIMANDIMBY	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Département de Recherches Forestières et de Gestion des Ressources Naturelles	mandimbizo@yahoo.fr
Jean Michel LEONG POCK TSY	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), DP Forêts et Biodiversité	leong@cirad.mg
Romule Joseph RANDRIANAIVO	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Département de Recherches Technologiques	rromulejoseph@gmail.com
Hery Andriatsitohaina RAKOTONDRAOELINA	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Département de Recherches Forestières et de Gestion des Ressources Naturelles	
Nadiah Vololomboahangy MANJATO	Missouri Botanical Garden, Madagascar	
GIPYRI		
Harinjaka RAVELOSON	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Centre Régional de Recherche Antsirabe. Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat, Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité (SPAD)	raveloharinjaka@yahoo.fr
Antsa RAFENOMANJATO	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Centre Régional de Recherche Antsirabe. Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat, Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité (SPAD)	
Alain RAMANANTSOANIRINA	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Centre Régional de Recherche Antsirabe. Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat, Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité (SPAD)	ntsoanirina@moov.mg
Mathilde SESTER	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UPR Agro-écologie et Intensification Durable des cultures Annuelles (Montpellier)	mathilde.sester@cirad.fr
Louis-Marie RABOIN	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UPR Agro-écologie et Intensification Durable des cultures Annuelles (Montpellier)	louis-marie.raboin@cirad.fr
RALSTONIA		
Volatsara Baholy RAHETLAH	Centre de recherche et de développement rural en agriculture et en élevage (FIFAMANOR), Antsirabe	volats@yahoo.fr
Santatra H. RAVELOMANANTSOA	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UMR PVBMT, Pôle de Protection des Plantes (Saint-Pierre, La Réunion)	
Philippe PRIOR	Institut National de la Recherche Agronomique (NRA), Département Santé des Plantes et Environnement (Paris, France)	philippe.prior@inra.fr
Rado RASOLOMAMPIANINA	Centre National de Recherches sur l'Environnement, Laboratoire de microbiologie environnementale	mampionina@yahoo.fr

INFORIZ		
Hélène DAVID-BENZ	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Environnements et Sociétés, UMR Moisa (Montpellier, France)	helene.david-benz@cirad.fr
Norontsoa Annie Hanitriniala ANDRIANDRALAMBO	Lot A 139 Ambodiriana Nord, Ambatolampy 104 (Madagascar)	norontsoaannie@gmail.com
Chiara CHIMIRRI	Via di Ripoli 207/g (Florence, Italy)	chiara.chimirri@gmail.com
Helgina SOANJARA	Logt 150 A LE, Lazaret Prefet Sud (Antsiranana, Madagascar)	elginass@yahoo.fr
Noro RAHELIZATOVO	Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques, AgroManagment	deptagrom@gmail.com
Bezaka RIVOLALA	Observatoire du Riz, Plan d'Action pour le Développement Rural - PADR (Madagascar)	padr.resprorodr@blueline.mg
MADAPISCI		
Marc R. OSWALD	ISTOM, École supérieure d'agro-développement international (Cergy, France) APDRA, Pisciculture Paysanne (Massy, France)	m.oswald@istom.net m.oswald@apdra.org
Monique RAVAKARIVelo	Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Département de Recherches en Zootechnie et Vétérinaire	monique.ravakarivelo@yahoo.fr
Olivier MIKOLASEK	CIRAD, Département PERSYST, UR Aquaculture et Gestion des Ressources Aquatiques (Montpellier)	olivier.mikolasek@cirad.fr
Harentsoanirina RASAMOELINA ANDRIAMANIVO	Commission Océan Indien, Réseau SEGA One Health (Ebène, Maurice)	harena23@gmail.com harena.rasamoelina@coi-ioc.org
NEWCASTLE		
Harentsoanirina RASAMOELINA ANDRIAMANIVO	Commission Océan Indien, Réseau SEGA One Health (Ebène, Maurice)	harena23@gmail.com harena.rasamoelina@coi-ioc.org
Sophie MOLIA	Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UR AGIRs	sophie.molia@cirad.fr
Nivohanitra Perle RAZAFINDRAIBE	Université d'Antananarivo, Faculté de Médecine, Département Vétérinaire	nhperle@gmail.com
CYSTICERCOSE		
Anjanirina RAHANTAMALALA	Institut Pasteur de Madagascar, Unité d'Immunologie des maladies infectieuses	anjanirina@pasteur.mg
Vincent PORPHYRE	Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), UMR 112 Systèmes d'élevage en milieux méditerranéens et tropicaux	vincent.porphyre@cirad.fr vporphyre@gmail.com
Niry RABENINDRINA	Institut Pasteur de Madagascar, Unité d'Immunologie des maladies infectieuses	rniry@pasteur.mg
Jacques ZAFIMAHEFA	Service de Neurologie, CHU, Madagascar	razjul@yahoo.fr
Harentsoanirina RASAMOELINA ANDRIAMANIVO	Commission Océan Indien, Réseau SEGA One Health (Ebène, Maurice)	harena23@gmail.com harena.rasamoelina@coi-ioc.org
Ronan JAMBOU	Institut Pasteur, Département des Parasites, Insectes vecteurs, Paris	ronan.jambou@pasteur.fr

ECOBao		
Seheno ANDRIANTSALAZA	Université d'Antananarivo, Faculté des sciences Département de Biologie et Ecologie végétales, Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat, Forêts et Biodiversité	s.andriantsaralaza@gmail.com
Elysée N. RASoAMANANA	Université d'Antananarivo, Faculté des sciences Département de Biologie et Ecologie végétales, Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat, Forêts et Biodiversité	elyseenoro@yahoo.fr
Onja Hariveloniaina RAZANAMARo	Université d'Antananarivo, Faculté des sciences Département de Biologie et Ecologie végétales, Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat, Forêts et Biodiversité	onjarh@gmail.com
Jean Michel LEONG POCK TSY	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), DP Forêts et Biodiversité	leong@cirad.mg
Pascal DANTHU	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), DP Forêts et Biodiversité. Direction régionale CIRAD (Madagascar)	pascal.danthu@cirad.fr
CARBONE		
Andry ANDRIAMANANJARA	Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radiolsotopes	njaraandry@yahoo.fr
Nandrianina RAMIFEHIARIVo	Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radiolsotopes. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo	ranandrianina@hotmail.fr
Tantely RAZAFIMBELo	Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radiolsotopes	tantely.razafimbelo@gmail.com tantely.razafimbelo@ird.fr
Jeannicq RANDRIANARISoA	Conservation International (Madagascar)	
Njara Narindra RASoLo	Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radiolsotopes. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo	
Eric BLANCHART	Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radiolsotopes. IRD, UMR Eco&Sols	eric.blanchart@ird.fr
Tovo RAFoLISY	Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radiolsotopes	tovonarivo.rafolisy@ird.fr

Table des matières

Préface	3
Présentation	5
Acronymes et abréviations	13
 Les cultures de rente d'exportation	17
 CHAPITRE 1 : Les cacaoyères du Sambirano : des produits à fort potentiel qualitatif insuffisamment valorisés	19
Introduction	21
Origines du cacao dans le monde	21
La production de cacao aujourd'hui	22
Le cacao à Madagascar	23
L'introduction du cacaoyer à Madagascar	23
La culture du cacaoyer aujourd'hui	23
Situation de la cacaoculture dans le sambirano selon la littérature	25
Objectifs et réalisations du Projet Qualikko	25
Diversité des vergers et des procédés post-récoltes	25
Réduction de la diversité végétale des vergers	41
Conclusion générale	45
Références bibliographiques	46
 CHAPITRE 2 : Pour l'optimisation de la qualité des produits du giroflier de Madagascar (clous et huiles essentielles) : étude des facteurs de leurs variabilités	57
Introduction générale	59
Le giroflier à Madagascar	62
L'introduction du giroflier à Madagascar	62
Le girofle : un arbre, deux produits	63
Évolution de la giroflière malgache	65
Valeur économique du girofle	67
Variabilités des huiles essentielles de girofle	70
Influence de la partie de la plante examinée (clous, feuilles et griffes)	70
Influence de l'origine géographique	71
Effets des stades phénologiques sur les he de clous de girofle de Madagascar	72
Effets des stades de développement sur les he de feuilles de girofle de Madagascar	73
Effet de séchage sur des he de feuilles de giroflier de Madagascar	74
États et analyses critiques de la pratique actuelle de la distillation paysanne	75
Typologie des alambics	77

Modifications et améliorations de l'alambic traditionnel	81
Modifications et améliorations apportées	81
Étude de la performance extractive de l'alambic avant et après les modifications et les améliorations	82
Conclusion générale	83
Références bibliographiques	84
 CHAPITRE 3 : Le Tsiperifery, poivre sauvage endémique de Madagascar, une richesse innovante dans la filière épice malgache	107
Problématique	108
Objectifs	109
Approche méthodologique	109
Quelques notions de qualité des produits agroalimentaires	110
Définition du terme épice	111
État des lieux du Tsiperifery, poivre sauvage endémique de Madagascar au sein de la filière épice malgache	112
Classification du Tsiperifery	113
Études écologiques du Tsiperifery	114
Diversité génétique du Tsiperifery	117
Étude de la technologie post-récolte du Tsiperifery	117
Étude chimique du Tsiperifery	119
Conclusions générales et recommandations	122
Références bibliographiques	122
 Les contraintes à l'intensification de la productivité et de la mise en marché des produits agricoles	133
 CHAPITRE 4 : Gestion de la diversité variétale du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose	137
Introduction	139
Contexte de l'étude	141
Le riz pluvial d'altitude dans la région du Vakinankaratra	141
La pyriculariose du riz	141
Les mélanges variétaux comme moyen de lutte contre la pyriculariose	143
Objectifs du projet GIPYRI/PARRUR	144
Caractérisation des populations de la pyriculariose et des résistances du riz à la pyriculariose	145
Objectifs	145
Renforcement des capacités du laboratoire de phytopathologie du FOFIFA à Antsirabe	145
Méthode d'inoculation artificielle du riz avec les souches de <i>M. Oryzae</i>	146
Premiers résultats	146
Étude et optimisation de l'effet des mélanges variétaux pour le contrôle des épidémies de pyriculariose	147
Mesures de la sévérité de la pyriculariose	147

Arrangement et proportion des variétés à associer	149
Comparaison de l'impact sur la pyriculariose de mélanges variétaux a deux composantes (1s:4r) impliquant différentes combinaisons de variétés	150
Comparaison de l'impact sur la pyriculariose d'un mélange de deux variétés de riz (1s:4r) et d'une association interspécifique riz-haricot	153
Biodiversité et pyriculariose en milieu réel	155
État de la diversité variétale du riz pluvial sur les hautes terres	155
État des connaissances sur les populations de pyriculariose à Madagascar	156
Impact de la pyriculariose sur la variété chhomrong dhan en milieu paysan	157
Effet des mélanges variétaux en milieu paysan	158
Appréciation des paysans sur les mélanges variétaux	161
Conclusion et perspectives	161
Remerciements	162
Références bibliographiques	163

CHAPITRE 5 : Contrôle intégré du flétrissement bactérien (*Ralstonia solanacearum*) de la pomme de terre dans la région du Vakinankaratra

Contexte	171
La pomme de terre : une ressource stratégique	171
Le flétrissement bactérien de la pomme de terre	171
Méthodologie	173
Diagnostic et caractérisation moléculaire des souches de <i>Ralstonia solanacearum</i>	173
Activité antagoniste des souches d'actinomycète et de pseudomonas vis-a-vis de <i>Ralstonia solanacearum</i>	175
Étude de l'impact de la diversité entomofaunique dans la transmission de <i>Ralstonia solanacearum</i>	177
Résultats et discussion	177
Diversité génétique des souches de <i>Ralstonia solanacearum</i>	177
Activité antagoniste des souches isolées vis-a-vis de <i>Ralstonia solanacearum</i>	179
Impact de la diversité entomofaunique dans la transmission de <i>Ralstonia solanacearum</i>	180
Conclusion	182
Références bibliographiques	182

CHAPITRE 6 : Comprendre les déterminants de l'accès au marché des producteurs pour améliorer les Systèmes d'Information de Marché. Le cas des producteurs de riz à Madagascar

Introduction	191
Les SIM, pour améliorer l'efficacité des marchés	192
Le marché du riz à Madagascar et l'Observatoire du Riz	193
Méthodologie d'ensemble du projet InfoRiz	194
Diagnostic : enquêtes auprès des producteurs et des acteurs de l'aval	194
Amélioration des méthodes de collecte et de diffusion de l'observatoire du riz	196

Test de différentes formes de diffusion des informations	196
Accompagnement pédagogique des producteurs	197
Collecte des feedbacks des destinataires d'informations sur le marché	197
Caractéristiques structurelles et stratégies de mise en marché des producteurs	198
Caractérisation des producteurs	198
Stratégies et contraintes de commercialisation	201
Accès aux moyens de communication et besoins en information	203
Discussion et conclusion	205
Références bibliographiques	207

Vers une politique nationale de lutte contre les maladies animales

CHAPITRE 7 : Croiser une approche compréhensive des systèmes d'élevage piscicole et leur diagnostic génétique - de l'ambition aux résultats

Contexte dans lequel s'inscrit le projet	220
Une situation confuse, source de questions	225
Revue des systèmes de production d'alevins sur les hauts plateaux	227
Aspects méthodologiques	227
Résultats : typologie des producteurs d'alevins discussion	229
Discussion	237
Structuration et variabilité des populations de carpe à Madagascar	241
Structuration et variabilité génétique des populations actuelles de carpe à Madagascar	245
Performances des carpes malgaches en élevage paysan	249
Résultats/Recommandations	252
Relecture de la méthode	252
Autres résultats	252
Quelles recommandations pour le développement de la pisciculture ?	253
Conclusion	257
Références bibliographiques	258

CHAPITRE 8 : La maladie de Newcastle

L'agent pathogène responsable de la maladie et les espèces affectées	270
Les oiseaux domestiques	270
Les oiseaux sauvages	271
L'homme	272
Les stratégies de lutte contre la maladie de Newcastle	276
La situation de la maladie de Newcastle à Madagascar	281
L'aviculture à Madagascar	281
Les facteurs de risque de la maladie de Newcastle à Madagascar	287

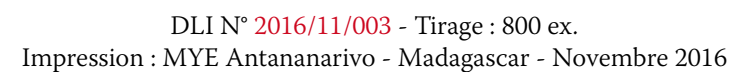
Les impacts socio-économiques de la maladie de Newcastle à Madagascar	288
Les stratégies de lutte à déployer à Madagascar	288
Le rôle clé de la surveillance épidémiologique	289
La vaccination à Madagascar	291
Les contraintes de la vaccination	292
Place de la communication	297
Références bibliographiques	298
 CHAPITRE 9 : La cysticercose une maladie négligée	309
Le parasite	310
Appréhender la maladie chez l'homme	322
Contrôle de la maladie animale	324
Remarques de conclusion : une approche coordonnée basée sur le marché	326
Références bibliographiques	327
 Pour la conservation de la biodiversité de Madagascar	347
 CHAPITRE 10 : Vers une compréhension des relations entre les baobabs et quelques éléments des écosystèmes forestiers de l'ouest de Madagascar : pollinisateurs, disperseurs et prédateurs	349
Introduction	351
Pollinisation des baobabs malgaches	352
Phénologie florale des espèces	352
Morphologie des fleurs des baobabs	352
Caractéristiques de l'odeur florale	353
Caractéristiques du nectar	353
Les visiteurs et les pollinisateurs des fleurs de baobabs	353
Efficacité des pollinisateurs	354
Conclusion	354
Dispersion des semences de deux espèces de baobabs dans l'Ouest de Madagascar	355
Efficacité des disperseurs actuels	356
Distribution spatiale des baobabs	356
Conclusion	357
Les achatines, prédateurs des jeunes plants de baobab ?	357
Perception à dire d'acteurs	358
Suivi de la consommation des achatines in situ	359
Expérience en milieu contrôlé	360
Conclusion	361
Conclusion générale	361
Références bibliographiques	362

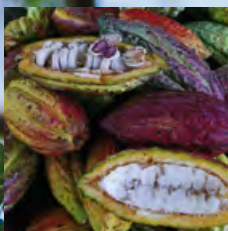
CHAPITRE 11 : Résilience de systèmes agroécologiques de la région Est de Madagascar cas de stockage de carbone et de fertilité du sol dans le cadre de la REDD+	369
Contexte général	371
Démarche pour la conduite de la Recherche-Action	373
Approche pour l'étude de l'évolution des stocks de carbone du sol selon les pressions anthropiques sur les forêts (étude 1)	373
Inventaire des agroécosystèmes de la région est de Madagascar pour appréhender la résilience au changement climatique (étude 2)	374
Expérimentation de laboratoire en mésocosmes pour simuler la variabilité climatique (étude 3)	375
Quelques résultats sur l'étude de la résilience des différents agroécosystèmes face aux pressions anthropiques et au stress climatique	376
Évolution des stocks de carbone suivant la pression exercée sur la forêt (conversion de forêt a non-forêt) (résultats de l'étude 1)	376
Potentialité des systèmes agroécologiques en termes de stockage de carbone et de disponibilité des nutriments (résultats de l'étude 2)	377
Résilience du système agroécologique face au stress thermique (résultats de l'étude 3)	378
Des pistes de recommandations pour les décideurs	380
Conclusion	380
Remerciements	381
Références bibliographiques	381
 Éditeurs scientifiques	389
Liste des auteurs	390

Première page de couverture :

- Photo 1 (*ECOBAB, chapitre 10*) : Roussette (*Rousettus Madagascariensis*) et fleur de baobab (*Adansonia grandidieri*). © Cyrille Cornu
- Photo 2 (*GIROFLIER, chapitre 2*) : Clous de girofle secs et frais
- Photo 3 (*GIPYRI, chapitre 4*) : Journée portes-ouvertes du 25 mars 2014 dédiée à l'amélioration génétique du riz pluvial d'altitude, rassemblant paysans et partenaires techniques du FOFIFA (Antenne d'Antsirabe)
- Photo 4 (*CYSTICERCOSE, chapitre 9*) : Truie et son propriétaire en route vers le marché
- Photo 5 (*RALSTONIA, chapitre 5*) : Champ de pomme de terre dans le Vakinankaratra
- Photo 6 (*Newcastle, chapitre 8*) : Petit élevage industriel de poules pondeuses près d'Ivato. © Hervé Duchaufour
- Photo 7 (*MADAPISCI, chapitre 7*) : Retour de pêche

- Photo 8 (*ECOBAB, chapitre 10*) : Baobab de Madagascar (*Adansonia Madagascariensis* Baillon, 1893). *Illustration de Grazyna Krecka-Duchaufour*
- Photo 9 (*QUALIKKO, chapitre 1*) : Cabosses du Sambirano. Fèves de couleur violet clair type Trinitario et fèves de couleur claire type Trinitario tendance Criollo. © *Hervé Duchaufour*
- Photo 10 (*GIPYRI, chapitre 4*) : Présentoir de variétés améliorées de riz pluvial adaptées à la haute et moyenne altitude à Madagascar
- Photo 11 (*QUALIKKO, chapitre 1*) : Le Saman ou « arbre à pluie » (*Albizia saman*), essence agroforestière de prédilection pour la couverture arborée des cacaoyères du Sambirano. © *Hervé Duchaufour*





Recherche interdisciplinaire pour le développement durable et la biodiversité des espaces ruraux malgaches

Application à différentes thématiques de territoire

Les ménages ruraux malgaches impliqués dans la chaîne alimentaire à travers la petite agriculture familiale cherchent à promouvoir l'innovation dans les domaines de la production, de la transformation, de la commercialisation et de la distribution. Onze équipes de recherche en partenariat se sont constituées pour les conduire à une augmentation de la production agricole, à des revenus plus élevés et à une gestion plus durable des ressources naturelles. Les systèmes d'innovations qui en découlent résultent d'une action collective, de l'apprentissage par la pratique et du partage des connaissances et des expériences. Sur le terrain, ces innovations impliqueront de nouvelles manières de penser et de gérer ainsi qu'une réelle volonté d'appréhender le changement dans la réalisation des objectifs de sécurité alimentaire et nutritionnelle, dans la réduction de la pauvreté et l'amélioration des moyens de subsistance, et dans la lutte contre le changement climatique.