



**Collaboration CIRAD-ECO pour
l'amélioration des reboisements à Antsiranana**

Mission d'appui du Cirad du 6 au 11 septembre 2016

JP Bouillet – JM Bouvet

Octobre 2016

Table des matières

1 - PROGRAMME DE MISSION	4
2 - ATTENDUS DE LA MISSION.....	5
3 - GESTION DURABLE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS	6
3.1 – PROBLEMATIQUE	6
3.1.1 - <i>Fertilité du sol et biodiversité associée</i>	6
3.1.2 - <i>Carbone</i>	7
3.1.3 - <i>Eau</i>	8
3.2 - DIAGNOSTIC	8
3.2.1 - <i>Constat général</i>	8
3.2.2 - <i>Sylviculture des plantations d'eucalyptus</i>	9
3.3 PROPOSITIONS D' ACTIONS.....	11
3.3.1 - <i>Impact des plantations sur la fertilité des sols</i>	11
3.3.2 - <i>Impacts des plantations sur la biodiversité fonctionnelle des sols</i>	11
3.3.3 - <i>Séquestration de carbone par les plantations</i>	12
3.3.4 - <i>Amélioration des pratiques sylvicoles</i>	13
4 - PLANTATIONS MELANGEES EUCALYPTUS – ACACIA	17
4.1 PROBLEMATIQUE.....	17
4.2 - DIAGNOSTIC	18
4.3 - PROPOSITIONS D' ACTION	19
4.3.1 <i>Impact d'A. crassicarpa sur la production et le cycle de l'azote dans les plantations d'eucalyptus</i>	19
4.3.2 <i>Invasion des plantations d'Eucalyptus par Acacia sp.</i>	20
5 – DIVERSIFICATION DES ESPECES DE PLANTATION	21
5.1 – PROBLEMATIQUE	21
5.2 – DIAGNOSTIC	22
5.2.1 - <i>Espèces exotiques</i>	22
5.2.2 - <i>Espèces locales</i>	22
5.2.3 - <i>Vergers à graines d'eucalyptus</i>	23
5.2.4 - <i>Qualité des variétés d'eucalyptus plantées</i>	24
5.3 - PROPOSITIONS D' ACTIONS.....	25
5.3.1 - <i>Diversification des espèces exotiques</i>	25
5.3.2 - <i>Diversification - espèces locales</i>	26
5.3.3 - <i>Gestion des vergers à graines d'eucalyptus</i>	27
5.3.4 - <i>Gestion des variétés d'eucalyptus</i>	28
5.3.5 - <i>Variétés d'Acacia</i>	28
6 – IMPACT DES PLANTATIONS SUR LES FORETS NATURELLES.....	29
6.1 – PROBLEMATIQUE	29
6.2 – DIAGNOSTIC	29
6.3 – PROPOSITIONS D' ACTION	31
7 – GESTION DES ATTAQUES DE LEPTOCYBE INVASA	33
7.1 – PROBLEMATIQUE	33
7.2 – DIAGNOSTIC	34
7.3 – PROPOSITION D' ACTIONS	35
8 - EFFET ALLELOPATHIQUE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS ET D'ACACIAS	37
8.1 – PROBLEMATIQUE	37
8.2 – PROPOSITIONS D' ACTIONS.....	37

9 - AUTRES ETUDES.....	38
10 - PLANIFICATION DES INTERVENTIONS ET MODALITES D'INTERVENTION DU CIRAD.....	39
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

En préambule de ce rapport, les missionnaires tiennent à remercier tout le personnel du projet PAGE pour la qualité de leur accueil, la très bonne organisation de la mission et la richesse des échanges.

1. Programme de mission

06/09/2016 : Trajet Antananarivo-Ivato (départ 6h00) – Diego Suarez (arrivée 8h00)

Heure	Lieu de travail	Activités	Thématiques
10h00-12h00	Bureau PAGE/ECO	Réunion avec l'équipe PAGE/ECO à Diégo	Présentation des réalisations du programme (Power point), activités réalisées avec CIRAD Rappel objets de la mission et de l'attente d'ECO vis-à-vis de la collaboration avec CIRAD Discussion sur les points de détails apportés concernant le programme
14h00-15h30	Ankitsakalaninadmbay	Trajet Diégo – Ankitsaka	
15h30-16h15	Ankitsaka	Visite parcelle semencière et observation des plantations d'Eucalyptus en monoculture et diversifié	Appréciation état parcelles semencières et entretien à réaliser Etat des plantations d'Eucalyptus (changement climatique et plantation) Diversification d'espèces
16h15-16h45	Ankitsaka	Visite GMDR	Présentation de la technologie de transformation et discussion sur l'impact au changement climatique
16h45-18h00		Trajet Ankitsaka - Diégo	Nuitée à Diégo

07/09/2016

Heure	Lieu de travail	Activités	Thématiques
07h30-09h30	Sahafary	Trajet Diégo - Sahafary	
09h30-11h00	Sahafary	Visite anciens VAG et anciennes parcelles de diversification Visite forêt naturelle environnante	Appréciation état vergers à graine Entretien des VAG Diversification d'espèces : espèces à utiliser, aspect technique Mise en place de forêt de transition entre forêt naturelle et plantation artificielle
11h00-12h00	Sadjoavato	Trajet Sahafary-Sadjoavato	
12h00-12h30	Sadjoavato	Pause Sandwich	
12h30-13h30	Sadjoavato	Point de vue	Paysage forestier Diversification / Envahissement par les espèces <i>Acacia sp.</i> et <i>Grevillea sp.</i>
13h30-15h30	Analalava	Visite forêts naturelles environnantes	Restauration des paysages forestiers Mise en place de forêt de transition entre forêt naturelle et plantation artificielle
15h30-18h00		Trajet Analalava – Ambilobe	Nuitée à Ambilobe

08/09/2016

Heure	Lieu de travail	Activités	Thématiques
07h30-08h15	Ambilobe	Trajet Ambilobe – Angodorofa	
08h15-09h30	Angodorofa	Visite plantations infectées par la gale	Discussion sur les maladies d'Eucalyptus : disposition à prendre
09h30-10h30	Isesy	Trajet Angodorofa-Isesy/Bobasatrana	
10h30-11h30	Isesy/Bobasatrana	Visite pépinière infectée par la gale	Discussion sur les maladies d'Eucalyptus : conduite en pépinière, moyens de lutte
11h30-12h00	Ambilobe	Pause déjeuner	
12h00-13h30		Trajet Ambilobe-Marotaolana	
13h30-14h30	Marotaolana	Visite des plantations	Propagation de la maladie, mesures à prendre Etat des plantations
14h30-17h00		Trajet Marotaolana-Diégo	Nuitée à Diégo

9/09/2016

Heure	Lieu de travail	Activités	Thématiques
Matinée	Bureau	Préparation de la restitution (éventuellement discussions / échanges, collecte de données supplémentaires).	
Après midi		Restitution de la visite sur terrain et discussion avec l'équipe du PAGE/ECO Discussion avec les responsables au sein d'ECO (suite à donner : activités, recherche)	

10/09 : Travail de bureau – début de rédaction du rapport

11/09 : Trajet Diego (départ : 9h00) – Antananarivo (arrivée à 11h00)

2 - Attendus de la mission

Ceux-ci ont été exposés lors de la réunion de lancement du 06/09 et déclinés comme suit.

- 1) Observer et étudier sur terrain l'état des plantations à dominance d'Eucalyptus et celui des forêts naturelles existantes dans les zones environnantes
- 2) Se concerter avec les responsables au sein du PAGE/ECO DIANA sur les aspects nécessitant des études approfondies liées à la monoculture d'Eucalyptus et sur les activités pouvant être réalisées pour une valorisation optimale des plantations d'Eucalyptus existantes ainsi que pour la conduite de nouvelles plantations diversifiées
- 3) Proposer les études et/ou activités pouvant être réalisées en collaboration avec le CIRAD ou autres organismes de recherche (FOFIFA, ESSA/Forêts, etc.)

Pour répondre à ces attendus et sur la base des discussions et des visites de terrain, le rapport décline pour chacune des thématiques d'intérêt identifiées, la problématique générale, un diagnostic et des propositions d'action. Concernant ces dernières, il n'a pas semblé opportun à ce stade de détailler de manière exhaustive les projets proposés (hypothèses, matériels et méthodes, résultats spécifiques, budgets...). Seuls les objectifs généraux, les grandes lignes de méthodologie et les coopérations scientifiques envisagées sont données. Etant entendu que ces points seront développés par la suite en fonction des attentes du projet PAGE et des échanges avec les propriétaires où pourront être installés les parcelles expérimentales (exemple : M Dodo).

- 4) Planifier avec les responsables au sein du PAGE/ECO DIANA les interventions ultérieures de l'équipe du CIRAD.

Une proposition est faite à la fin du rapport sur la base d'un appui forfaitaire des deux experts.

3 – Gestion durable des plantations d'eucalyptus

3.1 – Problématique

Des critiques ont pu être émises sur la gestion non durable des plantations d'eucalyptus du projet PAGE et sur les impacts environnementaux associés auxquelles il convient de répondre par des pratiques adaptées et des résultats chiffrés.

3.1.1 - Fertilité du sol et biodiversité associée

Un propos classique est que les eucalyptus diminuent la fertilité des sols, voire les « stériliseraient » et les transformeraient en « désert vert » (concept du « deserto verde » au Brésil). De nombreux travaux ont été menés sur cette problématique (on trouve ainsi 306 références sur Scopus avec les mots clés « soil fertility » et « eucalyptus ») avec des résultats contrastés en fonction des caractéristiques écologiques et des modes de gestion des plantations. Au Nigeria, l'afforestation en *E. camaldulensis* de savanes en zone semi-arides a conduit à une diminution des quantités de matière organique et d'éléments minéraux dans le sol superficiel (Jaiyeoba, 1995). Le mécanisme évoqué est l'augmentation des pertes par drainage de surface sous plantations. Au Brésil, en comparaison à la savane originelle (cerrado), une diminution de la concentration en carbone du sol superficiel a été observée sous *E. camaldulensis* planté sur sols sableux mais pas argileux (Zinn et al., 2002). A l'inverse les caractéristiques du carbone du sol ont été modifiées par l'afforestation seulement sur sol argileux. Les concentrations en K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont inférieures après plusieurs rotations d'*Eucalyptus* par rapport au contrôle (pâturages dégradés) (Leite et al., 2010). Par contre les quantités de P assimilables augmentent. En Inde les quantités échangeables dans le sol de P, K, Ca, Mg, Cu, Mn, Fe and B diminuent avec l'âge des plantations d'*E. citriodora*. L'inverse est observé pour N, S et Zn (Ramamurthy et al., 2016).

Au Congo, équilibrer le bilan d'éléments minéraux pour le compartiment sol à la fin de la 1ère rotation de futaie nécessite une apport de 120 kg N/ha (Laclau et al., 2005). Par contre le bilan est équilibré pour les autres éléments. Une même tendance au déséquilibre du bilan N sans fertilisation est observée aussi au Brésil, et d'une manière générale pour les plantations productives d'eucalyptus (Laclau et al., 2010).

Le bilan en éléments minéraux d'une plantation étant le résultat de l'interaction entre les conditions de station (propriétés édaphiques, apports atmosphériques..), les modes de gestion (durée de rotation,...) et les besoins de la plante satisfaits par les prélèvements au sol et le recyclage (interne ou via les litières), il n'est pas possible de connaître l'impact des plantations sur la fertilité du sol sans études spécifiques. C'est pourquoi il sera proposé de mener de telles études pour donner au projet des informations chiffrées et incontestables sur l'impact des plantations sur l'évolution des propriétés édaphiques (cf. propositions d'actions).

L'impact de l'afforestation en *Eucalyptus* sur la faune du sol apparait aussi contrasté en fonction des conditions écologiques et des systèmes de référence. Dans l'horizon de surface (0-5cm) une biomasse microbienne identique a été trouvée sous *E. grandis* et *E. cloeziana* et dans des reliquats de forêts avoisinantes dans le Minas Gerais (Brésil) (Braga et al., 2016). Dans le Nord de ce pays, la diversité de fourmis relevée dans les litières d'*Eucalyptus* était intermédiaire entre celle en forêt naturelle et en monocultures de maïs (de Nadai Corassa et al., 2015). Au Brésil, Camara et al. (2012) ont trouvé une diversité d'arthropodes du sol supérieure en forêt naturelle (mata atlantica) qu'en plantations d'*Eucalyptus*. L'inverse a été observé en Inde dans des afforestations d'*Eucalyptus* par

rapport aux savanes originelles (Reddy and Venkataiah, 1990). Au Brésil la diversité de collemboles et de mites était inférieure dans des plantations d'eucalyptus par rapport aux formations herbeuses natives (Rieff et al., 2016). En Chine, la litière d'*E. grandis* présentait une plus grande quantité de collemboles que celle d'*Alder formosa* (aulne). Par contre une plus grande quantité de macrofaune a été relevée quand la litière des deux espèces étaient en mélange (Li et al., 2013).

La conduite d'études spécifiques apparaît donc ici aussi nécessaire pour juger de l'impact des plantations du projet PAGE sur la faune du sol (cf propositions d'action).

3.1.2 - Carbone

Une des critiques reçues par le projet est que les plantations d'eucalyptus ne stockeraient pas de carbone de manière pérenne à cause de leur faible durée de rotation (7 ans sur la première rotation puis 5 ans entre chaque coupe de taillis). Cette critique repose parfois sur une mauvaise compréhension des flux et stocks à prendre en compte comme le résume le schéma représenté ci-après (figure 1).

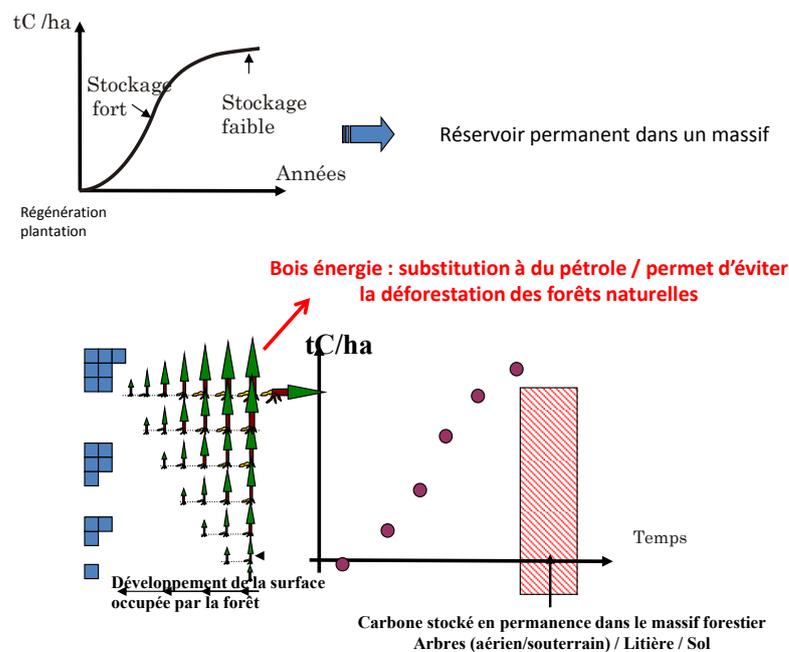


Figure 1. Représentation schématique du stock de carbone constitué par des plantations forestières à rotation de 7 ans. Dans l'hypothèse d'un massif équilibré - sur la base d'un massif de 7 000 ha, 1 000 ha sont coupés chaque année pour être replantés juste ensuite (ou conduits en taillis) - le stock de C présent en permanence correspond à celui des 1000 ha des plantations de 1 an + 1 000 ha des plantations de 2 ans + ... + 1 000 ha des plantations de 6 ans. La biomasse des plantations coupées à 7 ans se substitue à de l'énergie fossile (charbon minéral, gaz, pétrole) ou provenant de l'exploitation de la forêt naturelle.

A Hawaï la conversion des pâturages en plantations d'eucalyptus augmente le stock de C du le 1^{er} mètre de sol de 17.5% auquel s'ajoute la substitution du C fossile par de la biomasse renouvelable (Crow et al., 2016). Au Brésil l'afforestation en Eucalyptus ne change pas significativement le stock de C du sol (Fialho and Zinn, 2014) mais là également il convient de prendre en compte en plus la production de biomasse sur pied. A Madagascar la conduite en taillis d'*E. robusta* sur les hautes terres à une augmentation du stock de C par rapport à la savane originelle de 38 tC /ha,

essentiellement via les souches et le système racinaire (Razakamanarivo et al., 2010). Il apparaît donc que pour répondre de manière précise aux interrogations/critiques émises, des travaux spécifiques (cf propositions d'actions) doivent être menés sur le massif pour tenir compte des facteurs (topographie, texture des sols, âge des plantations, rotation ...) pouvant influencer sur le stockage de C et sa répartition entre les compartiments de l'écosystème (sol, biomasse souterraine, biomasse aérienne).

3.1.3 - Eau

Une des préoccupations majeures liées à l'utilisation des eucalyptus en reboisement est leur impact sur les ressources hydriques du sol et le débit des rivières (Cossalter and Pye-Smith, 2003; Smethurst et al., 2015). Il est certain que ces espèces, comme toutes plantes, consomment de l'eau pour leur croissance et leur entretien physiologique et peuvent impacter, par exemple, le niveau des nappes phréatiques (observations faites sur les plantations d'eucalyptus d'Antanimieva dans la région de Tuléar). Dans le cas de plantations très productives (production moyenne de 50 m³/ha/an dans l'Etat de São Paulo - Brésil) la consommation a pu être estimée en moyenne à 1390 mm/an sur une rotation de 6 ans, pour des précipitations totales moyennes de 1450 mm/an (Christina et al., 2016). Cette consommation va être bien sûr inférieure pour des plantations relativement peu productives comme celles du projet PAGE. Cependant des travaux spécifiques doivent être menés, la consommation hydrique des plantations dépendant des géotypes plantés et des conditions environnementales : pour une même production, de fortes valeurs du déficit de pression de vapeur (VPD), liées par exemple à des températures élevées et des vents forts, vont entraîner une consommation en eau plus élevée des arbres.

3.2 - Diagnostic

3.2.1 - Constat général

Même si les missionnaires ne peuvent avoir qu'une vue très partielle du massif implanté, les parcelles font l'objet d'exploitations régulières et aucune laissée à l'abandon n'a été observée sur le trajet, même si parfois la densité d'arbres pouvait être limitée à quelques centaines de tiges à l'hectare (par exemple avec des parties de parcelle sans arbres ou avec de très petits individus). On note une hétérogénéité forte, entre régions, entre parcelles ou parfois à l'intérieur des parcelles. Ceci ne doit pas forcément surprendre, le matériel végétal étant encore peu amélioré et les opérations sylvicoles concernant essentiellement la phase de plantation (labour, trouaison...), d'exploitation et éventuellement de dépressage des brins. Logiquement, les productions restent modestes (très majoritairement < 10 m³/ha/an), liées aussi en grande partie aux difficiles conditions écologiques, par exemple les précipitations limitées (aux environs de 1100 mm dans la région de Diégo Suarez), une saison sèche marquée (> 6 mois) et des températures élevées. Le stress hydrique des arbres en saison sèche est amplifié par le fort vent (Varatraza) qui souffle dans la région de Diego Suarez de mai à octobre augmentant l'évapotranspiration des arbres (par augmentation du VPD).

Plus généralement il convient de rappeler que les espèces d'eucalyptus les plus productives (*E. grandis* ...) proviennent des zones sub-tropicales. Parallèlement, les conditions optimales de croissance pour les eucalyptus se situent classiquement (cf Brésil avec des productions moyennes

annuelles de 40-50 m³/ha/an sur des rotations de 6 ans) à des températures moyennes aux alentours de 20°C (Drake et al., 2015 ; Wood et al., 2015). Les températures sont très sensiblement plus élevées dans la région de Diana et il n'est bien sûr pas dans l'objectif du projet de PAGE d'atteindre de telles productions. Le massif existe et produit de manière significative et ceci depuis plus de 20 ans, ce qui est véritablement un succès dans le cadre de plantations villageoises dans des zones à fortes contraintes hydriques et aussi, a priori, nutritionnelles (cf propositions infra).

Cette réussite tient aussi sans nul doute au travail soutenu de concertation et dialogue du projet avec les reboiseurs, comme l'illustre la forte implication des acteurs rencontrés. L'intérêt de ceux-ci est d'autant plus fort que leurs plantations génèrent des rentrées d'argent parfois très significatives (cas par exemple de M Dodo qui possède une trentaine d'hectares de plantation).

3.2.2 - Sylviculture des plantations d'eucalyptus

Préparation du terrain

Le labour effectué - préconisé à 40 cm de profondeur - est sans conteste une opération bénéfique dans les conditions du reboisement de Diana. Il permet, entre autres, de décompacter le sol de surface et favorise ainsi le bon développement initial du système racinaire, phase essentielle à la croissance ultérieure des arbres et à l'exploration des horizons profonds (Bouillet et al., 2002 ; Laclau et al., 2013). Ce point est particulièrement important quand on prend en considération l'importance des prélèvements hydriques en profondeur, essentiel pour croître en saison sèche, voir survivre lors de sécheresse particulièrement marquée, grâce à des prélèvements dans la nappe phréatique (Christina et al., 2016).

Par ailleurs cette opération sylvicole permet un désherbage sur la largeur du labour limitant ainsi la concurrence des adventices sur cette zone la 1^{ère} saison de végétation (Christian Andriamanantseheno, comm. pers.). En activant la minéralisation de la matière organique des horizons superficiels du sol, le labour doit aussi permettre d'augmenter la disponibilité des éléments minéraux pour les arbres et, partant, leur croissance.

Il faut cependant noter que pour la plupart des plantations d'eucalyptus industrielles dans le monde, le labour a été abandonné au profit d'un sous solage qui permet également la décompaction d'un grand volume de sol en profondeur (photo 1) mais laissant en place la végétation/rémanents d'exploitation (concept du « minimum cultivation », Gonçalves et al., 2007).

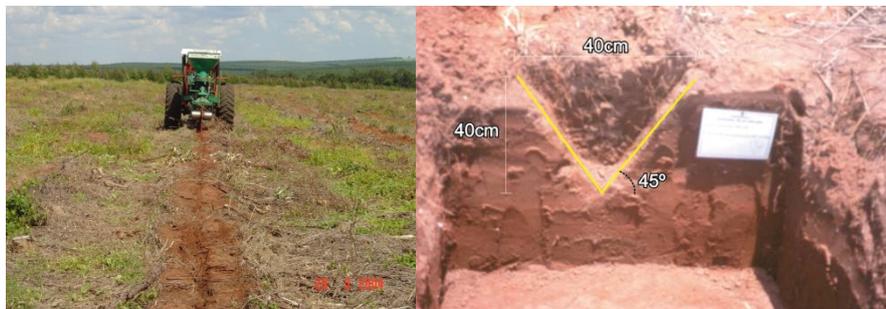


Photo 1. Pratique du sous-solage et volume de sol décompacté (exemple du Brésil)

En parallèle, cette pratique limite une minéralisation trop importante et rapide de la matière organique de surface et les risques liés de perte d'éléments minéraux par drainage latéraux (dans le cas de pentes marquées) et/ou par drainage profond. Il limite ainsi les risques de baisse de fertilité des sols, voire de formation de croûte indurée (Merino et al., 2004 ; Mills and Fey, 2004) dans le cas de labours répétés. Par contre une telle pratique nécessite, outre des tracteurs de très forte puissance, un désherbage chimique non envisageable dans le cas du projet, et une fertilisation des plantations (cf propositions en infra).

Ecartements

La densité de 1111 tiges /ha (plantation à 3 m x 3 m) paraît adaptée aux conditions écologiques, des espacements plus faibles pouvant induire une mortalité significative (par concurrence entre les tiges) dans les endroits les plus secs (sols très sableux et/ou peu profonds à faible capacité de rétention hydrique, pas de nappe phréatique ou nappe très profonde hors d'accès pour les arbres).

Entretiens

Aucun entretien (désherbage) des plantations n'est classiquement effectué (photo 2). Ceci peut se révéler très dommageable pour la croissance des arbres vu la forte concurrence des adventices, et particulièrement des graminées, pour l'eau (Adams et al., 2003 ; Garau et al., 2008, 2009) et/ou les éléments minéraux (Eyles et al., 2012). Des mesures simples et efficaces peuvent être testées permettant, suivant les endroits et conditions de milieu, d'utiliser moins d'eau ou de produire plus de biomasse pour une même quantité d'eau consommée (cf propositions d'action).



Photo 2. Taillis d'*E. camaldulensis* poussant dans un tapis dense de graminées (plantations de M Dodo, Ankitsaka) (Photo JM Bouvet - Cirad)

Ce manque d'entretiens des plantations augmente aussi le risque et la force des feux qui surviennent régulièrement dans certaines zones du reboisement. Or même si *E. camaldulensis* présente une certaine capacité à résister au feu, celui-ci affecte la production des arbres, en 1^{er} lieu en diminuant sa capacité photosynthétique par séchage de tout ou partie du feuillage. Mais l'impact négatif des feux se traduit également au travers des pertes d'éléments minéraux par volatilisation de N (Ellis and Gradley, 1983) ou par les cendres emportées par le vent ou les ruissellements, et de son effet sur la matière organique du sol (Faria et al., 2015), ou la faune et le fonctionnement du sol (Brennan et al., 2009).

Durées de rotation

La durée standard de rotation (coupe à 7 ans de la 1^{ère} rotation de futaie puis ensuite tous les 5 ans) semble adéquate et globalement respectée même si le temps de passage entre deux coupes pourrait être augmenté dans les lieux les moins fertiles (cf la préconisation de PAGE d'un diamètre minimum d'exploitabilité de 11 cm à 1.30m). Cependant il a été observé des durées de rotation plus courtes (< 3 ans) pouvant mettre rapidement en péril la durabilité de la production, comme ceci s'observe aux environs de Tananarive sur les taillis d'*E. robusta*. En effet les premières années après la plantation ou la coupe se caractérisent par de forts prélèvements au sol (pour la constitution du houppier), la phase de recyclage par transferts internes dans l'arbre (Laclau et al., 2001, 2005) ou via le dépôt des litières aériennes ou souterraines et leur minéralisation ne devenant prépondérante qu'après 2-3 ans (Laclau et al., 2010).

3.3 Propositions d'actions

3.3.1 - Impact des plantations sur la fertilité des sols

A l'exception du travail de master de Laura Prill (2015), aucune étude n'a été conduite dans le cadre du projet PAGE sur l'impact des plantations d'eucalyptus sur les sols. Plus généralement il n'existe pas de caractérisation des sols sur l'ensemble du massif de reboisement. La connaissance des propriétés édaphiques est pourtant très importante pour identifier, en les croisant par exemple avec les données avec les variables météorologiques (e.g. températures, précipitations, humidité de l'air), les facteurs de variabilité de la production des plantations.

L'échantillonnage devra être stratifié sur les différentes régions et prendre en compte les savanes originelles (en tant qu'écosystème de référence) et couvrir les différents âges de plantations (futaie, taillis). Les paramètres à analyser porteront sur les caractères physico-chimiques (texture, Capacité d'Echange Cationique, pH, C organique, N total, P total et P assimilable, K échangeable ...). Afin de réduire les coûts, certaines analyses (e.g. texture, CEC, microéléments) pourront être effectuées sur des sous échantillons ou des échantillons composites.

Ces mesures pourront être complétées par des mesures au laboratoire de minéralisation potentielle de N qui donneront des indications sur la capacité des sols à satisfaire les besoins azotés des arbres, les carences en cet élément pouvant être fortement suspectées vu les faibles teneurs en matière organique auxquelles on doit *a priori* s'attendre. Cette étude permettra de juger aussi de l'impact de l'afforestation sur les quantités de C dans les sols (cf proposition « séquestration de carbone »).

Les analyses de sol pourraient être effectuées au Laboratoire des Radiosotopes à Antananarivo où est basé JP Bouillet.

3.3.2 - Impacts des plantations sur la biodiversité fonctionnelle des sols

L'impact des eucalyptus sur la biodiversité fonctionnelle du sol sera estimé via le suivi de la disparition dans des bait laminas (Kratz, 1998 ; Tao et al., 2015) de substrats standards (haricots, blé, *Eucalyptus*, *A. mangium*) aux propriétés biochimiques contrastées (N, composés solubles, lignine, tanins...). Les bait lamina (photo 3) seront préparés suivant la méthode mise au point à Eco&Sols / LRI. Ils seront installés à raison de 15 par parcelle unitaire. On comparera, sur plusieurs régions, des

parcelles de forêt naturelle, de savane originelle et de plantations d'eucalyptus. L'expérience sera menée en saison des pluies et en saison sèche en faisant l'hypothèse que l'activité biologique du sol (méso/macro faunique) différera entre ces deux périodes. Ces mesures seront complétées par la description de la faune du sol associée.



Photo 3. Baits lamina installés au champ (partie gauche). Chaque bait lamina contient 4 substrats standard (4 répétitions / 16 emplacements par lame) enterrés dans le sol dont la disparition est suivie dans le temps (partie droite).

Ces travaux pourront bénéficier pour cette étude de l'expertise technique et scientifique de l'équipe Eco&Sols - LRI (e.g. Dr Jean Trap pour le suivi des populations fauniques).

3.3.3 - Séquestration de carbone par les plantations

Une estimation précise des flux de C entrants et sortants de l'écosystème au cours de la rotation nécessite l'utilisation de système eddy covariance (Nouvellon et al., 2011). Cependant une estimation du stockage de C peut être réalisée sur la base d'inventaire de biomasse aérienne, souterraine et de l'évolution du carbone stocké dans le sol comme pour les études menées sur les taillis d'*E. robusta* sur les hauts plateaux malgaches (Razakamanarivo et al., 2011, 2012).

Le plan d'échantillonnage devra prendre en compte les différentes localisations des plantations (Diego, Ambilobe, ..) et la position topographique, celle-ci pouvant jouer sur la texture des sols, mais également le temps depuis l'afforestation (des études sur les hautes terres montrent que le stock de C du sol diminue durant les dix premières années de plantation (Marin-Spiotta et al., 2009) jusqu'à 5,6 % et augmente jusqu'à 6,1 à 18 % les vingt années suivantes (Laganière et al., 2009)). D'autres facteurs pourront également être pris en compte comme la position topographique ou la fréquence de passage des feux.

La substitution du C d'origine savane par celui des plantations pourra se baser sur l'évolution au cours du temps de la signature isotopique $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ (Razakamanarivo et al., 2010), les graminées (plante en C4) présentant un enrichissement en ^{13}C supérieur (valeur moins négative par rapport au standard international) que celui des eucalyptus (plantes en C3).

Le projet pourrait bénéficier de l'expertise du LRI qui a développé une grande expertise dans ce champ de recherche (e.g. Dr Razakamanarivo Herintsitohaina)

3.3.4 - Amélioration des pratiques sylvicoles

La production des plantations est fonction, pour un matériel végétal donné, de l'utilisation de l'eau, de la lumière et des éléments minéraux. Dans le cas des eucalyptus, leur efficacité (i.e biomasse produite par quantité de ressources consommées) augmente avec la disponibilité de ces ressources (Battie-Laclau et al., 2014). En d'autres termes, quand les eucalyptus disposent de manière satisfaisante de ces ressources, les plantations consommeront moins de ressources pour une production donnée et l'obtention d'une production donnée nécessitera moins de surface de plantations (ce qui peut être un argument pour contrer des critiques sur l'expansion des plantations).

L'amélioration des pratiques sylvicoles contribue à augmenter cette efficacité d'utilisation des ressources. C'est l'objectif des propositions qui suivent.

Entretiens et fertilisation des plantations

Entretiens

Comme précisé précédemment, la végétation adventice exerce une compétition forte sur les eucalyptus, particulièrement en saison sèche. Un désherbage autour des plants devrait permettre de réduire significativement cette compétition. Celui-ci devra être effectué par binage de surface pour limiter au maximum la détérioration des racines des eucalyptus poussant dans les horizons superficiels (Bouillet et al., 2002).

Fertilisation

Une croissance correcte des plantations d'eucalyptus nécessite de satisfaire à minima leurs besoins en éléments minéraux (particulièrement les 2 premières années après plantation/coupe où les prélèvements au sol sont les plus forts (Laclau et al., 2010)). Il ne rentre pas dans nos propos de comparer et de viser sur le projet les productions obtenues sur des plantations industrielles. Mais il paraît intéressant de donner des informations sur les fertilisations apportées dans différents pays

- *Brésil (production moyenne de 45-50 m³/ha/an)*. Une fertilisation non limitante pour la croissance des arbres est classiquement apportée. Les doses varient suivant le matériel végétal utilisé et les conditions écologiques : 50-150 kg N /ha, 30-60 kg P/ha et 80-160 kg K/ha.
- *Congo (15-20 m³/ha/an)*. Une fertilisation par ha de 16 kg N, 7 kg P et 20 kg K est appliquée à la plantation puis de 20 kg N, 9 kg P et 25 kg K à 2 ans. Sur la 1^{ère} rotation de taillis, 40 kg N, 18 kg P et 50 kg K par ha sont apportés à 1.5 an (Bouillet et al., 2004). En 2^{ème} rotation de taillis, cette fertilisation doit augmenter d'un tiers.
- *Australie (15-20 m³/ha/an)*. Des apports jusqu'à 500 kg N / ha par rotation sont nécessaires pour maximiser la production d'*E. nitens* en Tasmanie (Smethurst et al., 2004).
- *Afrique du Sud (20-30 m³/ha/an)*. Il est observé une forte réponse d'*E. urophylla*grandis* à l'apport, séparément ou en combinaison, de N et P (du Toit and Ocroft, 2003).
- *Chine*. Les plantations d'eucalyptus, surtout installées sur des sols à forte capacité de sorption du phosphore, nécessitent l'apport de 50 à 200 kg P/ha à la plantation (Xu and Dell, 2002).

Les besoins des plantations de PAGE sont bien sûr inférieurs à ces valeurs au vu de leur production. Mais il serait important de tester de manière pratique le gain en volume et en revenus supplémentaires que pourrait engendrer un apport limité de fertilisation. Ceci toujours dans l'objectif de maximiser l'efficacité des ressources via en particulier l'établissement un cycle biologique efficace (recyclage des éléments minéraux par les litières...). Cette pratique permettra une

production supérieure sur le massif, générera plus de revenus pour les reboiseurs et les encouragera à améliorer la gestion de leurs parcelles. Et, in fine, elle contribuera à la durabilité des plantations en équilibrant les bilans minéraux (ou en limitant leur déséquilibre).

Les estimations pourront être affinées, mais en fonction de l'expérience des missionnaires, de la production visée (10 m³/ha/an pour les plantations fertilisées) et des formulations présentes sur le marché (e.g. Agrivet), il est proposé de tester un apport de +/-130 kg NPK (11-22-16) par ha. Sur la base de 1111 tiges/ha, la dose à appliquer par emplacement sera de 120 g de NPK (11-22-16).

Cet apport pourrait être complété par un apport d'engrais organique qu'on peut trouver localement (e.g. Guanomad). Cependant le faible dosage en éléments minéraux de ces engrais nécessiterait d'en appliquer de grandes quantités (plusieurs kg par emplacement) ce qui paraît difficilement applicable par les reboiseurs (mais pas impossible dans le cadre d'expérimentations).

Expérimentation

Type de peuplement

Les peuplements cibles sont des taillis avec des rejets âgés de moins d'un an.

Fertilisation x Entretien

L'objectif est, à terme, de mettre en place sur chacune des différentes régions une expérimentation testant les modalités « entretien » et « fertilisation starter ». Ce réseau permettra en effet de renforcer la puissance de l'expérimentation et la robustesse des conclusions et aidera à la divulgation des résultats auprès des reboiseurs.

Après discussion avec le personnel d'Eco-Diana, il est proposé pour des raisons opérationnelles et de coûts de se concentrer dans un 1er temps sur la région de Diégo. Les grandes lignes du dispositif expérimental sont données ci-après.

1) Les parcelles unitaires où seront appliqués les traitements et les mesures effectuées devront comporter 25-30 arbres intérieurs entourés de deux lignes de bordure.

2) Quatre traitements seront testés.

- T1 : pas d'entretien et pas de fertilisation

- T2 : entretien (1 mètre de rayon autour des arbres désherbé par binage de surface) sans fertilisation

- T3 : entretien avec fertilisation (120 g NPK (11-22-16) par emplacement)

- T4 : fertilisation (120 g NPK (11-22-16) par emplacement) sans entretien

3) L'essai devra comporter au moins 3 blocs. Pour des raisons opérationnelles (surface suffisante à trouver,...) ces répétitions pourront correspondre chacune à un site différent (i.e. propriétaire) dans la région.

4) Mesures de croissance et de production. Les hauteurs et C_{1.30m} seront mesurées si possible 2 fois/an, en saison des pluies et en saison sèche. Si une seule date de mesures était possible, celles-ci devront être effectuées chaque année à la même période (nous préconisons alors à la fin de la

saison des pluies). Des tarifs de biomasse seront établis en fin d'expérimentation pour les différents traitements, la forme des arbres (et *de facto* les équations de biomasse) pouvant être significativement affectée par les pratiques testées. Le missionnaire se propose d'être présent lors de la 1^{ère} campagne d'échantillonnage.

5) Statut hydrique des arbres. Il est proposé de caractériser la compétition hydrique des adventices sur les arbres. Le statut hydrique des arbres serait suivi sur les 3 traitements *via* leur potentiel hydrique foliaire. On utiliserait pour cela une chambre de Scholander (cf photo 4). La mesure avant le lever du soleil (Predawn ψ) rend compte du statut hydrique de l'arbre, celui-ci étant alors au potentiel du sol (plus cette valeur est négative et plus l'arbre est stressé). La différence entre ce potentiel et celui mesuré à midi donne le gradient hydrodynamique racines-tiges du potentiel hydrique foliaire (le risque de cavitation pouvant conduire à la mort de tout ou partie de l'arbre étant inversement proportionnelle à la différence entre ces deux valeurs).

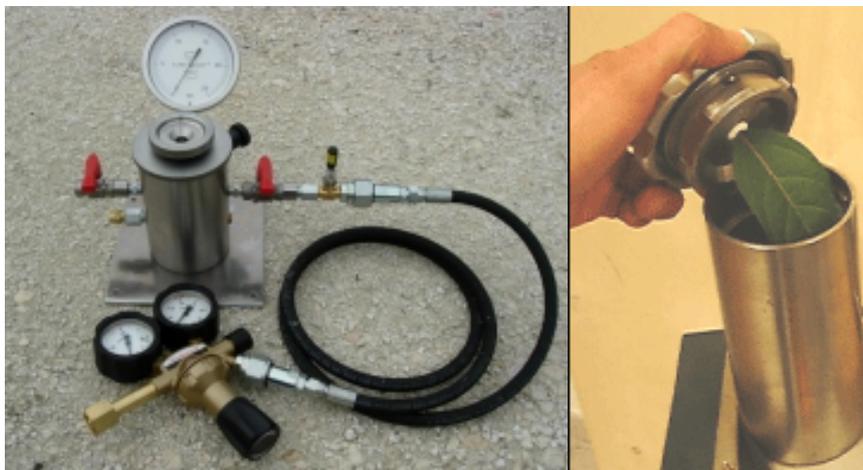


Photo 4. Chambre de Scholander permettant d'estimer le potentiel hydrique foliaire. La chambre dans laquelle est mise une feuille qui vient juste d'être récoltée est connectée à une bonbonne de N sous pression. La pression nécessaire pour faire apparaître une goutte d'eau à l'extrémité du pétiole – qui se situe à l'air libre – correspond à ce potentiel (dépression exercée par la plante pour retenir l'eau dans la feuille).

En parallèle l'humidité volumique des horizons superficiels du sol pourra être suivie avec des sondes de type Campbell HS2 (photo 5). On pourra en particulier établir l'évolution de l'humidité sur la ligne de plantation (labourée initialement) et l'interligne.

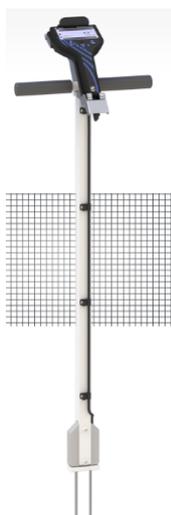


Photo 5. Capteur portatif Campbell HS2-P pour suivre l'humidité des horizons superficiels sol (0-20 cm).

Si le projet ne pouvait se procurer tout de suite le matériel (prix HT et hors transport : 5.5 k€ pour la chambre de Scholander et 1.5 k€ pour les sondes HS2), le Cirad pourra prêter en 2017 une sonde Campbell HS2, acquise sur cette fin d'année 2016. Le prêt d'une chambre de Scholander ne pourrait par contre s'envisager au mieux qu'en 2018 si le matériel peut être effectivement acquis par le Cirad.

Des échantillons de feuilles seront prélevés et analysés à intervalles réguliers pour étudier l'impact - *a priori* positif - des entretiens et de la fertilisation sur le statut nutritionnel des arbres. Les analyses végétales pourront être réalisées au Laboratoire des Radiosotopes à Antananarivo où est basé JP Bouillet.

Gestion des brins de taillis

Contexte

La production d'une plantation n'augmente plus à partir d'une certaine densité de tiges à l'hectare (fonction des espèces et des conditions écologiques) (Bartoli and Decourt, 1971). La production peut même diminuer si cette densité augmente trop à cause de la concurrence trop forte entre tiges (phénomène de « cannibalisme »). Ce qui est vrai pour une rotation donnée se vérifie aussi entre rotations. En d'autres termes, il convient de garder +/- la même densité de brins de taillis que de tiges de futaie. Faute de quoi les tiges surnuméraires ne croîtront que peu, n'atteindront pas la dimension acceptable pour produire du charbon de bois. On peut même assister, comme dans le cas de la futaie, à une diminution de la production totale avec un nombre de brins trop important.

Le dépressage des brins doit aboutir à une densité totale de 1100-1300 tiges/ha, ce qui en pratique conduit à laisser 1 à 2 tiges/ souche suivant la mortalité de souche observée localement. Il faut toujours privilégier le(s) brin(s) le(s) plus vigoureux, quel que soit le positionnement sur la souche.

Expérimentation

Type de peuplement

Les peuplements cibles sont des taillis avec des rejets entre 6 mois et un an montrant déjà une hiérarchie visible entre brins dominants et co-dominants-dominés.

Gestion des brins x Entretiens-Fertilisation

Comme précédemment, l'objectif sera de mettre en place à terme sur chacune des différentes régions une expérimentation testant les modalités « gestion des brins » et « entretiens - fertilisation ». Cependant il est proposé de se concentrer dans un 1er temps sur la région de Diégo. Les grandes lignes du dispositif expérimental sont données ci-après.

1) Les parcelles unitaires où seront appliqués les traitements et les mesures effectuées devront comporter 25-30 arbres intérieurs entourés de deux lignes de bordure.

2) Quatre traitements seront testés.

- T1 : Pas de dépressage de brins et pas d'entretiens-fertilisation

- T2 : Pas de dépressage avec entretien (1 mètre de rayon autour des arbres désherbé par binage de surface) et fertilisation (120 g NPK (11-22-16) par emplacement)

- T3 : Dépressage laissant 1 à 2 brins par souche et pas d'entretiens-fertilisation

- T4 : Dépressage laissant 1 à 2 brins par souche avec entretien (1 mètre de rayon autour des arbres désherbé par binage de surface) et fertilisation (120 g NPK (11-22-16) par emplacement)

3) L'essai devra comporter au moins 3 blocs. Pour des raisons opérationnelles (surface suffisante à trouver,...) ces répétitions pourront correspondre chacune à un site différent (i.e. propriétaire) dans la région.

4) Mesures de croissance et mesures complémentaires. Le suivi expérimental et les mesures reprendront le protocole développé pour l'expérimentation « Fertilisation x entretiens »

4. Plantations mélangées Eucalyptus – Acacia

4.1 Problématique

Associer des arbres fixateurs d'azote aux eucalyptus peut constituer une alternative intéressante et crédible aux monocultures. En effet une telle association peut conduire à une plus forte production sur la parcelle (Forrester et al., 2006 ; Bouillet et al., 2013) et un meilleur statut azoté des eucalyptus (Bouillet et al., 2013; Paula et al., 2015). Ceci grâce à deux processus :

- La complémentarité entre les deux espèces qui augmente l'utilisation des ressources disponibles comme c'est le cas avec, par exemple, une captation supérieure de l'énergie lumineuse dans le cas d'une espèce poussant en sous étage de la seconde.
- La facilitation par laquelle une des deux espèces augmente la disponibilité d'une ressource pour la seconde. Tel est le cas avec la fixation symbiotique de N₂ par les acacias et le transfert

d'une partie du N fixé vers *Eucalyptus* (sur un temps long via la chute des litières d'*Acacia* et leur décomposition/minéralisation, ou rapidement par transfert direct de N dans le sol vers les *Eucalyptus* via les exsudats racinaires et les réseaux mycéliens).

Par ailleurs l'association d'une espèce fixatrice peut augmenter la disponibilité en phosphore minéral pour les *eucalyptus* via la production de phosphatase, enzyme nécessaire à la minéralisation du P contenu dans la matière organique (Binkley et al., 2000; Houlton et al., 2008). Elle peut également augmenter la séquestration de carbone dans le sol (Forrester et al., 2013; Blaser et al., 2014) et la diversité microbienne et faunique du sol (Bini et al., 2013; Manhães et al., 2013; Rachid et al., 2013).

4.2 - Diagnostic

La présence d'*Acacia auriculiformis* (majoritairement) ou d'*A. mangium* a été observée sur un certain nombre de parcelles (photo 5).



Photo 5. Présence d'*A. auriculiformis* en association avec *Corymbia torrelliana* et *E. camaldulensis* (Sahafary)
(Photo JM Bouvet - Cirad)

Certains propriétaires voient cette association comme une opportunité de production complémentaire à celle des *eucalyptus* (photo 6). Ainsi M Dodo a indiqué que l'exploitation d'*A. auriculiformis* générerait, tous les 5 ans, 1000 sacs de charbon, celui-ci étant de qualité au moins égale à celui d'*Eucalyptus*. L'amélioration de la fertilité des sols grâce à la fixation symbiotique de N_2 a été aussi mentionnée comme un des avantages liés à la présence d'*acacia* au sein des plantations d'*eucalyptus*. Une estimation chiffrée de l'impact positif de cette association sur le bilan de N et le fonctionnement azoté de l'écosystème participerait à l'argumentation en faveur des plantations mélangées *Eucalyptus* + *Acacia* (cf propositions d'action).



Photo 6. Tiges coupées d'*A. auriculiformis* dans une parcelle de M Dodo (Ankitsaka) (Photo JM Bouvet - Cirad)

Dans d'autres endroits apparaissent des régénérations très denses (photo 7) susceptibles de mettre en péril les rejets d'eucalyptus. Il semble que ce soit *A. mangium* qui présente le plus fort risque d'invasion, une des raisons pouvant être liée à l'appétence de ses graines par les oiseaux qui les disséminent ensuite dans leurs fèces. Des travaux sont proposés pour connaître les facteurs qui favorisent la dissémination de ces espèces sur le massif de Diana (cf propositions d'actions).



Photo 7. Régénération d'*A. mangium* près d'une parcelle d'*E. camaldulensis* - zone de Sadjoavato (Photo JM Bouvet - Cirad)

4.3 - Propositions d'action

4.3.1 Impact d'*A. auriculiformis* sur la production et le cycle de l'azote dans les plantations d'eucalyptus

Le travail proposé visera 2 objectifs

1) Quantifier l'impact de l'association d'*A. auriculiformis* sur la production des plantations mélangées d'Eucalyptus.

Un réseau de « parcelles jumelles » de plantations pures vs mixtes d'Eucalyptus sera établi et suivi dans le temps. Ce réseau couvrira les différentes régions où cette association est observée. Les

mesures et estimation des biomasses ainsi que le suivi du statut hydrique des acacias et des eucalyptus suivront le protocole développé au § 3.3.4

2) Etudier l'impact de l'association sur le statut azoté des arbres et le cycle de l'azote.

Sur un sous-échantillon de parcelles du même réseau, on estimera la fixation symbiotique de N₂ par la méthode de la dilution isotopique (Bouillet et al., 2008). Des échantillons de feuilles d'Acacia et d'Eucalyptus seront prélevés en saison des pluies et en saison sèche pour analyse ¹⁵N et estimation de la proportion du N dérivant de la fixation symbiotique (Ndfa%). En fonction des moyens disponibles, les transferts souterrain de N des acacias vers les eucalyptus pourront être quantifiés (Paula et al., 2015).

En complément la concentration en N des feuilles d'Eucalyptus sera suivie en fonction de la distance des acacias. Ceci en parallèle à la minéralisation potentielle de N du sol qui prendra également en compte la variabilité ligne vs interligne.

Les analyses végétales et de minéralisation potentielle du sol pourront être réalisées au Laboratoire des Radiosotopes à Antananarivo où est basé JP Bouillet.

Une candidate potentielle a été identifiée pour effectuer un travail de doctorat sur ce sujet. Cette étudiante, Angéline Tsifantenana, a été major de la promotion à l'ESSA-Forêts sortie en 2016. Elle serait encadrée par JP Bouillet, chercheur Cirad au LRI, titulaire d'un doctorat en Sciences Forestières et Professeur visitant à l'Université de São-Paulo (Esalq) et effectuerait son doctorat au sein de l'ESSA-Forêts dans l'équipe « Gestion des Ressources Naturelles et Développement » (responsable Pr Randriamboavonjy comme encadrant).

Le comité de thèse serait constitué des encadrants ci-dessus, de cadres du projet PAGE et de chercheurs spécialisés dans la sylviculture et le fonctionnement des plantations forestières. D'autres participants (chercheurs de l'université d'Hambourg par exemple) proposés par le projet PAGE sont évidemment tout à fait opportuns pour accompagner la thèse.

4.3.2 Invasion des plantations d'Eucalyptus par Acacia sp.

Comme observé durant la visite de terrain, on peut observer sur certaines parties du reboisement des régénérations importantes d'*A. auriculiformis* ou *A. mangium* au sein ou en limite des parcelles d'Eucalyptus. Dans ce contexte il est proposé d'étudier l'influence des facteurs pilotant le développement invasif des Acacias. Parmi ceux-ci on peut citer les espèces (par exemple *A. mangium* paraîtrait plus invasif que *A. auriculiformis*), les régions, le climat/microclimat, la situation topographique, l'âge d'exploitation, la présence de pieds mère, l'occurrence de feux....

Cette proposition serait à rapprocher de celles présentées au § 6.3.3.

5 – Diversification des espèces de plantation

5.1 – Problématique

Le matériel végétal est un point clef de la réussite des plantations. La bonne adéquation entre facteurs environnementaux (sols, climat, écosystème à reboiser), objectifs économiques et sociaux et les espèces utilisées nécessite parfois de nombreuses années de recherches et de tests d'introduction ; voir par exemple les travaux entrepris en République du Congo (Brézard 1983, Vigneron 1987).

Le choix des espèces de plantation a conduit, dans de nombreuses situations de zones tropicales, caractérisées par des terrains très peu fertiles, aux espèces exotiques telles que les eucalyptus et les acacias. Ces choix ont été parfois fortement critiqués soulignant les effets négatifs de ces exotiques sur l'environnement et le manque d'intérêt pour le matériel végétal autochtone.

Le travail de sélection des espèces a souvent abouti aux choix de l'eucalyptus et l'acacia, au vu des capacités adaptatives très élevées de ces deux genres botaniques. Ce potentiel résulte du processus d'évolution qui a conduit ces espèces à s'adapter aux conditions environnementales particulièrement difficiles en Australie avec l'alternance de sècheresses et de feux, sur des sols très pauvres.

Plus précisément pour les eucalyptus, on note un pool d'espèces très large (environ 700 entre le genre *Eucalyptus* et le nouveau genre *Corymbia*, auparavant inclus dans le genre *Eucalyptus*). Une quarantaine présente un intérêt pour les plantations, notamment industrielles, une quinzaine étant réellement utilisées et commercialisées (ENCE 2015). Ces résultats sont issus des tris d'espèces dans les années 1960-70 dans différents pays de la zone tropicale et sub-tropicale. Aujourd'hui les plantations d'eucalyptus couvrent 22 millions d'ha et représente 12% des surfaces plantées dans le monde ; 90 pays plantent de l'eucalyptus principalement dans les régions tropicales, sub-tropicales et méditerranéennes (ENCE 2015).

Les acacias australiens jouent un rôle significatif dans les plantations, tant d'un point de vue économique que par leurs impacts environnementaux positifs dans les paysages ruraux, notamment des pays asiatiques. Plusieurs espèces sont commercialement importantes pour la production de pâte et le sciage. Elles se sont développées en raison de leur croissance rapide et leur production élevée en biomasse, d'une sylviculture pouvant être simple, de la forte production de semences. On compte ainsi presque 2 millions d'ha d'*Acacia mangium* en Indonésie, pays où se situent 70% des plantations de cette espèce.

Ces traits font cependant courir le risque d'une propagation au-delà des plantations, ces espèces pouvant devenir envahissantes dans le cas de conditions favorables à leur dissémination, germination et croissance (Castro-Diez, 2011 ; Richardson et al., 2015). Parmi celles-ci, *A. auriculiformis* et *A. mangium* sont considérés comme pouvant être très invasifs (supplementary material - Castro-Diez, 2011).

Au-delà du choix d'espèces, d'autres aspects rentrent en ligne de compte pour définir le matériel à planter. La production des semences et donc la création des variétés à planter reste une phase cruciale. La notion de provenances (zones géographiques au sein de l'aire naturelle qui se distinguent les unes des autres sur un plan génétique) a permis de réaliser des gains génétiques sur les caractères d'intérêt (volume, forme, qualité du bois) ; voir par exemple des études au Congo (Bouvet

and Delwaulle, 1983) et à Madagascar (Bouvet and Andrianirina, 1990). Il est donc nécessaire de démarrer les plantations avec les provenances les mieux adaptées.

Une seconde étape consiste à mettre en place un schéma d'amélioration. Les premiers schémas d'amélioration et les techniques horticoles ont cherché à maximiser ces gains génétiques notamment par la maîtrise de la multiplication végétative à grande échelle chez eucalyptus (Vigneron and Bouvet, 2001). Ce modèle, très utilisé dans les plantations industrielles, est remplacé par la production de variétés synthétiques ou de variétés population à partir de verger à graines de clones ou de famille dans le cadre de la foresterie paysanne, comme c'est le cas à Madagascar. La maîtrise de la qualité des semences en foresterie paysanne reste cependant un problème important chez les eucalyptus. En effet les vergers ne sont pas faits selon les règles de l'art (pollution par d'autres peuplements), les graines sont souvent récoltées sur des arbres isolés (accentuant les effets de consanguinité dans les semences) et sur des arbres de forme et de croissance très moyenne (pour faciliter la récolte) aboutissant à une contre sélection. Des études sur des vergers à graines d'*E. grandis* à Madagascar ont montré un taux de pollution par du pollen extérieur et l'effet de consanguinité sur la croissance avec des graines issues de vergers (Chaix et al., 2010).

En résumé, il est possible d'avoir un matériel végétal performant avec les eucalyptus et autres espèces exotiques pour reboiser des zones très difficiles, mais la diversification des espèces, l'analyse des provenances et la démarche de production de graines sont des étapes clefs à ne pas négliger.

5.2 – Diagnostic

5.2.1 - Espèces exotiques

La démarche du projet, à son origine, a consisté à tester différentes espèces exotiques et locales dans un dispositif de terrain mono site. Malgré les nombreux arboreta implantés à Madagascar dans les années 1960, cette démarche nous paraît très pertinente dans une zone (région de Diana) où peu d'expériences de plantation ont été réalisées dans le passé. La visite de l'essai de diversification (secteur Sahafary), installé en 1996, nous a permis d'observer les performances de certains eucalyptus comme : *Eucalyptus torrelliana* (en fait *Corymbia torrelliana* du fait de la séparation du genre *Corymbia* du genre *Eucalyptus*) et *Eucalyptus citriodora* (aujourd'hui aussi genre *Corymbia citriodora*). Ces deux espèces montrent de bonnes capacités adaptatives. *E. torrelliana* fournit un charbon de bois de bonne qualité mais présente une très mauvaise forme après le recépage. D'après nos discussions avec les représentants d'ECO-Consult, il semble cependant que seuls *E. camaldulensis* et *Acacia auriculiformis* soient ressortis significativement des espèces testées.

Sans que nous ayons consulté le protocole de l'essai, Il semble que celui-ci ne concernait qu'un petit nombre d'espèces. Il serait avantageux d'élargir le champ de celles-ci en testant notamment des eucalyptus au vu des connaissances sur l'adaptation de ces espèces obtenues ces deux dernières décennies.

5.2.2 - Espèces locales

Pour diversifier le matériel végétal utilisé en plantation, le projet PAGE cherche à promouvoir les espèces autochtones. La capacité des espèces locales en plantation peut être abordée en s'inspirant

des travaux antérieurs ayant identifié des espèces locales propices au reboisement dans la zone. Elle peut aussi s'opérer par une observation des formations secondaires en bordures des zones de forêt d'où peuvent émerger des espèces de type « pionnière », à croissance initiale rapide et héliophile, qui seraient à tester en plantation. Cet aspect n'a pas été réellement abordé lors de la mission car nous n'avons pas eu le temps d'explorer les zones de forêt qui auraient permis de débattre plus en détail sur le potentiel des espèces locales. Une observation, lors de la tournée dans la zone de Sadjoavato, a été réalisée dans les écotones montrant une espèce locale qui pourrait être une légumineuse et qui semble présenter une bonne croissance en émergeant du fourré.

5.2.3 - Vergers à graines d'eucalyptus

La mise en place de vergers à graines d'*E. camaldulensis*, dans la zone de reboisement du secteur Ankitsaka avec M. Dodo et dans celle de Sahafary, souligne la préoccupation du projet à fournir des semences de bonne qualité.

Deux provenances australiennes et une provenance malgache ont été installées sous forme de trois parcelles mono-provenances dans le verger d'Ankitsaka. La sélection des semenciers a été réalisée sur la forme et la croissance et les arbres non sélectionnés sont gérés en taillis. Les semenciers semblent avoir été sélectionnés de façon convenable sur ces deux critères. Ces critères semblent avoir été prépondérants car on observe une distribution parfois non homogène (regroupement d'arbres « + » à certains endroits) (photo 8). On note aussi que les vergers sont au centre du massif de reboisement et que les risques de pollution par le pollen extérieur à la parcelle ne sont donc pas à négliger.



Photo 8. Peuplement semencier d'*Eucalyptus camaldulensis* (Ankitsaka) montrant les semenciers sélectionnés et le reste du peuplement géré en taillis (Photo JM Bouvet - Cirad)

Des erreurs de sélection dans le verger à graines de Sahafary a conduit à éliminer les arbres « + ». Les arbres non sélectionnés ont été abattus et ont fait l'objet d'un traitement de dévitalisation de souche mais qui n'a été que peu efficace. Il semble que tous les arbres soient géo-référencés et que les arbres « + » initiaux soient localisés. Ceci permettrait de rebâtir un plan avec les arbres restant sur la parcelle et de revenir à un processus de sélection correct à condition que les arbres « + » d'origine soient encore vivants et en nombre suffisant.

5.2.4 - Qualité des variétés d'eucalyptus plantées

La visite de la plantation d'*E. camaldulensis* et de la pépinière de la zone de Isesy/Bobasatrana, (reboiseur Mr Cene) a permis d'aborder la question de la qualité du matériel végétal ou plus particulièrement de la qualité des variétés utilisées dans les plantations. Nous avons observé une plantation datant de 2014 caractérisée par une forte hétérogénéité avec des plants variant de 2 à 5 m en hauteur et parfois des arbres rabougris, dont les origines seraient soit des regarnis et soit des plants à très faible potentiel de croissance.



Photo 9. Plantation d'*Eucalyptus camaldulensis* (Isesy/Bobasatrana) avec une forte hétérogénéité des plants
(Photo JM Bouvet - Cirad)

La discussion sur l'origine des graines a mentionné que celles-ci étaient issues d'un peuplement semencier du projet mais sans un réel contrôle de la qualité des semences. Peu d'informations sont apparemment disponibles sur le processus de récolte (nombre de semenciers,...). De même la visite de la pépinière a montré une grande hétérogénéité des jeunes plants. Nous avons pu noter des plants vigoureux caractérisés par une forte croissance apicale, une tige très peu lignifiée, ainsi que des plants de petite taille déjà fortement lignifiés (photo 10). Il est donc tout à fait possible et nécessaire de faire un premier tri à ce stade.



Photo 10. Hétérogénéité des plants d'*E. camaldulensis* en pépinière due à des différences de développement lors de la phase de semis et repiquage – plantation Ilesy Bobasatrana (Photo JM Bouvet - Cirad)

Au vu de la visite de cette plantation et de la pépinière, il semble donc que des gains de productivité puissent être obtenus par un meilleur contrôle de l'origine des semences et des pratiques de sélection en pépinière.

Notons aussi que regarnir 4 à 5 mois après la plantation n'est pas efficace car la compétition est déjà très forte, empêchant les regarnis de rattraper leur retard. Les regarnis doivent s'opérer au maximum un mois après la plantation (à l'exception de larges trouées sans plants, due à une forte mortalité à la plantation par exemple).

5.3 - Propositions d'actions

5.3.1 - Diversification des espèces exotiques

Nous proposons de refaire un point sur l'essai d'introductions d'espèces exotiques par l'analyse des rapports existants et éventuellement l'analyse des dernières données de mensuration si cela n'a pas été réalisé.

Nous proposons de réaliser de nouvelles introductions d'espèces d'eucalyptus sur la base d'une étude qui comporterait trois volets :

- 1)** Confronter les conditions pédoclimatiques de la zone de plantation dans la région de Diana et celles de l'aire naturelle (même si ce n'est pas une garantie absolue) pour détecter les espèces ayant un potentiel en termes de plantation.
- 2)** Mener une étude bibliographique sur le comportement de ces espèces, au moins pour certaines d'entre elles. Si disponible compléter par l'analyse des performances de leurs provenances, via les essais de provenances qui ont été éventuellement mis en place dans d'autres pays présentant des similitudes sur le plan climatique (e.g. Brésil, Congo, Afrique du Sud).
- 3)** Recueillir des informations qui ne sont pas publiées, (mais présentes sous forme de rapport interne au sein des compagnies de reboisement, etc...) et que les consultants peuvent obtenir via leur réseau (par exemple au Brésil sur des questions similaires donnant une liste d'espèces d'eucalyptus à introduire dans des zones à fort stress hydrique).

Sans être exhaustif, il est possible que de nouvelles espèces comme *E. brasii*, *E. brassiana*, *E. dalrympleana* puissent être intéressantes. La performance de ces espèces sera évaluée par la mise en place un essai de comportement avec comme témoin une provenance locale d'*E. camaldulensis*.

En dehors des espèces d'eucalyptus, il est possible d'améliorer les connaissances sur le potentiel des acacias australiens par une étude approfondie des essais de provenances menés ces dernières années et qui ont mis en évidence une variabilité significative inter provenances au sein de ces espèces. Il serait alors nécessaire de confronter les meilleures provenances à celles « naturalisées » de la zone de Diana.

De plus l'introduction de nouvelles provenances d'acacias déjà étudiés serait l'occasion de tester de nouvelles espèces comme *A. crassicarpa*. Cette espèce qui avait été testée dans les années 1980 au

Mangoro région de Moramanga avait montré un fort potentiel par rapport à *A. mangium*, *A. auriculiformis* et *A. aulacocarpa*. Elle est utilisée à grande échelle en Indonésie.

Une fois cette liste d'espèces élaborée, il faudra obtenir les graines auprès de l'IPEF au Brésil via les contacts du Cirad et les centrales de graines australiennes (CSIRO). A noter que le Cirad dispose d'importants lots de graines de différentes espèces d'eucalyptus et d'acacia récoltées dans les années 1970 et 1980 mais qui sont encore susceptibles de germer (à tester cependant).

L'identification des nouvelles espèces exotiques pourrait être menée par des étudiants (master 2) et reposerait sur une analyse bibliographique. Cette étude pourrait se prolonger par une étude prospective sur les prédictions d'adaptation des espèces d'eucalyptus en fonction des changements climatiques possibles dans la région Diana. Les « species distribution model » (SDM) permettent de telle prédiction (Hijmans and June, 2016). L'approche SDM met classiquement en œuvre les étapes suivantes : 1) les occurrences d'une espèce (dans son aire naturelle notamment) sont compilées (base de données occurrence de l'espèce), 2) les valeurs de variables environnementales (comme le climat, le sol) associées à ces occurrences sont compilées (base de données environnementales), 3) ces deux bases de données permettent de générer/calibrer un modèle pour prédire l'occurrence, ou une autre mesure comme l'abondance des espèces, 4) Le modèle est utilisé pour prédire l'occurrence de l'espèce dans une la région d'intérêt dont on dispose des données environnementales ou de leur futures valeurs supposées (cas du changement climatique).

5.3.2 - Diversification - espèces locales

Nous proposons deux approches.

La première est basée sur les travaux antérieurs réalisés à Madagascar.

- Faire un bilan bibliographique sur l'écologie des espèces malgaches dont certaines ont pu faire l'objet de premières études sylvicoles (pépinière, conduite en plantation). Le but est d'identifier des espèces locales présentant un potentiel pour le boisement, au moins dans certaines zones de plantation comme par exemple les ourlets forestiers. Cette étude devra faire le point du niveau de maîtrise pour chaque étape : maîtrise de la gestion des semences (récoltes des graines, stockages...), maîtrise du semis, de l'élevage des plants en pépinière, des techniques de plantation, des techniques de suivi sylvicoles. En fonction du niveau de maîtrise, il pourra être décidé de procéder à de nouvelles expérimentations pour mettre au point la technique.

- Si un pool d'espèces est identifié, des tests de comportement peuvent être réalisés dans les ourlets forestiers selon un dispositif expérimental qui pourrait prendre la forme de plantation en ligne perpendiculaire à la lisière pour tester l'effet « distance à la lisière ».

La seconde approche serait à penser sur un terme plus long. Elle consisterait à détecter dans les zones de forêt secondarisée des espèces pionnières héliophiles présentant un potentiel pour être utilisée en plantation dans les zones de lisière. Il faudrait alors développer pour chaque espèce identifiée des études permettant de préciser les techniques de récolte et gestion des semences, de germination, de conduite des plants en pépinière, de comportement en plantation etc....

5.3.3 - Gestion des vergers à graines d'eucalyptus

Concernant les vergers à graines d'Ankitsaka, nous proposons les actions suivantes :

- Etablir un plan réactualisé des semenciers dans les vergers et vérifier la densité et la distribution des arbres. Ceci permettra de mieux définir les zones où il faut récolter,
- Récolter au centre de la parcelle semencière pour minimiser la pollution par le pollen extérieur au verger,
- Ne pas récolter sur des arbres isolés mais au sein des groupes d'arbres pour obtenir des graines issues de croisement entre semenciers. En effet, récolter sur des arbres isolés fait courir le risque d'obtenir des graines à haut niveau de consanguinité. La floraison chez un pied d'eucalyptus est asynchrone et on y trouve des fleurs à tous les stades. Les abeilles peuvent donc butiner et déposer le pollen sur le même arbre, surtout s'il est isolé, et donc contribuer à la production de graines issues d'autofécondation. La présence de voisins proches diminue ce risque.
- Si le taillis sous les semenciers est en état de fleurir, il faut l'exploiter une année avant de récolter des semenciers pour ne pas polluer les arbres sélectionnés par le pollen des arbres non sélectionnés. Sur le même « arbre + », on doit pouvoir faire une nette différence entre les fruits de l'année n (arbres « + » uniquement) et les fruits de l'année n-1 (issus des croisement entre les arbres « + » et le taillis) : couleur des fruits et état de dessiccation.

Concernant le verger à graines Sahafary (mis en place en 1999) nous proposons de faire un inventaire des souches de taillis restantes correspondant aux semenciers originellement sélectionnés en utilisant la base de données (géolocalisation de tous les pieds) pour savoir si ce verger est encore utilisable. Il est possible que la dévitalisation ait créé des zones très hétérogènes et entraîne la récolte d'arbres très isolés et/ou susceptibles d'être pollués.

Il faut refaire un point sur tous les arbres encore vivants sur la parcelle et notamment prendre soin de repérer correctement les semenciers qui avaient été marqués et analyser les paramètres suivants :

- Etat sanitaire de ces semenciers ; la dévitalisation des souches et la compétition ont pu affaiblir l'arbre « + » qui ne pourra plus alors occuper l'étage dominant.
- Densité des semenciers sur la parcelle (une trop faible densité - par exemple 50 arbres/ha - fait courir un risque de croisement consanguins sur des arbres isolés).
- Distribution des semenciers sur la parcelle : une distribution des arbres+ de façon isolé fait aussi courir le risque de croisement consanguin par autofécondation favorisé par la pollinisation entomophile.

Si l'état sanitaire des semenciers, leur densité et leur distribution ne sont pas acceptables, il sera alors nécessaire d'abandonner ce verger.

Dans la perspective d'implanter de nouveaux vergers à graines il paraît intéressant de reprendre les préconisations de D Verhaegen (voir son rapport de mission) et notamment de réintroduire de bonnes provenances d'*E. camaldulensis* (dont on connaît mieux maintenant l'origine) fournies par le CSIRO. Ceci sur la base d'un nombre conséquent de semenciers récoltés (une cinquantaine par

exemple). Nous rappelons les termes du rapport de D Verhaegen « *il serait souhaitable de planter 3 nouvelles parcelles (qui deviendront les futures parcelles semencières) avec les provenances de Katherine, Gilbert river et May river. Pour être sûr de la bonne qualité des graines importées, on pourrait faire appel au CSIRO (Australie) qui apporte une garantie de qualité des graines par rapport à des commerciaux* »

A noter que le Cirad dispose d'un nombre important de provenances d'*E.camaldulensis* qui pourraient être utilisées aussi pour la mise en place de ces vergers sous réserve qu'elles correspondent aux provenances citées ci-dessus et comportent un nombre de semenciers suffisante (autour de 50).

5.3.4 - Gestion des variétés d'eucalyptus

Des mesures simples et réalisables sans études supplémentaires peuvent être préconisées pour les futures plantations du projet afin d'améliorer la qualité du matériel végétal mis en place.

- Il faut éviter de regarnir plusieurs mois après la plantation car les plants rattraperont très difficilement, voire jamais, les premiers plants de la plantation d'origine. La compétition qui s'installe durant les premiers mois, notamment au niveau du système racinaire, est en effet extrêmement forte et empêche le bon développement des regarnis.

- Il faut essayer de vérifier l'origine des graines : type de vergers, type de récolte conduisant à la variété proposée (nombre de semencier, historique du verger, etc...).

- Il faut recourir à une présélection en pépinière au stade de jeune plant pour les moins vigoureux, présentant un début de lignification. Cette démarche ne permet pas de sélectionner les tout meilleurs mais permet d'éliminer les plus mauvais qui montrent déjà des difficultés à pousser dans un milieu très favorable.

5.3.5 - Variétés d'Acacia

L'origine des graines d'*Acacia mangium* et *A. auriculiformis* qui sont utilisées dans les plantations au cours de la mission a été très peu abordée. A noter que ces espèces font l'objet de programmes avancés d'amélioration, notamment en Asie du Sud Est (clonage, création de triploïde stériles pour éviter l'envahissement).

Sans aller jusqu'au démarrage d'un programme d'amélioration, il apparaît cependant important de garantir la qualité des variétés de ces espèces (variétés population et/ou variétés synthétiques) notamment si on souhaite favoriser les plantations en mélange. La méthode la plus simple consisterait à importer de nouvelles graines après une étude approfondie de la qualité des provenances : performance de la provenance en relation avec les conditions de la région de Diana, nombre de semenciers constituant la provenance. Il faudrait par la suite installer cette provenance dans une zone isolée d'autres plantations d'acacias et procéder à une sélection des meilleurs pieds (forme et croissance) pour transformer le peuplement en parcelle semencière. Cette action est à mettre en relation avec la diversification des espèces exotiques.

6 – Impact des plantations sur les forêts naturelles

6.1 – Problématique

Les plantations d'eucalyptus ou d'acacias sont souvent considérées comme des écosystèmes hostiles qui menacent les écosystèmes agricoles, par la compétition pour l'eau, pastoraux par la compétition avec les zones de pâture ou forestiers par le risque lié à l'envahissement des forêts naturelles.

Afin de mieux mesurer les risques, comprendre l'impact négatif ou positif, il apparaît en fait beaucoup plus avantageux de regarder les plantations d'espèces à croissance rapide dans un cadre de restauration des forêts et des paysages selon le concept « Forest and landscape restoration » (Sabogal et al 2015). Ce concept en plein développement fait référence à une approche associant les acteurs impliqués dans tous les secteurs d'utilisation des terres et appliquant un processus participatif de prise de décisions. Selon la définition la mieux reconnue, proposée par le Global Partnership on Forest and Landscape Restoration (GPFLR), FLR est «un processus qui rassemble les acteurs pour identifier, négocier et mettre en œuvre des pratiques qui rétablissent un équilibre optimal et consensuel concernant les bénéfices écologiques, sociaux et économiques des forêts et des arbres dans un schéma plus large de l'utilisation des terres » (GPFLR, N.D. <http://www.forestlandscaperestoration.org/>). Selon McGuire, (2014) FLR cherche à instaurer un équilibre entre la restauration des services écosystémiques liés à la biodiversité et au maintien des habitats, à la régulation des eaux, au stockage de carbone etc... et le soutien à la production agro-sylvo-pastorale. FLR fait appel à un cadre plus large, la notion de paysage, qui cherche à fournir des outils et méthodes pour allouer et gérer des terres en combinant à la fois des objectifs sociaux, économiques et environnementaux dans les zones où l'agriculture, l'exploitation des ressources naturelles, et d'autres utilisations productives des terres rentrent en conflit avec les questions d'environnement et de maintien de la biodiversité (Sayer et al 2013).

Pour gérer les plantations dans une approche de paysage, il apparaît important dans un premier de quantifier réellement les interactions entre les plantations et les autres écosystèmes agricoles et/ou naturels sur le plan biologique, économique et social.

6.2 – Diagnostic

Pour illustrer les interactions entre plantations et forêts naturelles et réfléchir à la régénération des espèces naturelles et l'envahissement des espèces introduites, nous avons observé des écotones (zone de contact des écosystèmes naturels et des écosystèmes plantés) dans deux zones.

Dans la zone de Sahafary nous avons pu observer des situations d'ourlet forestier, terme technique de phytosociologie désignant une végétation herbacée vivace incluant parfois quelques sous-arbrisseaux et rencontré en situation d'écotone. Dans ce secteur nous avons observé quelques plants d'espèces vivaces disséminés dans des zones non plantées large de 20 à 30 m autour de la Forêt (photo 11).



Photo 11. Ourlet forestier en zone de transition entre forêts naturelles et plantations, zone de Sahafary (Photo JM Bouvet - Cirad)

Nous avons aussi visité des zones de plantation d'eucalyptus et d'acacias en bordure de forêt naturelle dans le secteur de Sadjoavato. Nous avons pu ainsi observer la très grande capacité d'*Acacia auriculiformis* et *A. mangium* à se régénérer sous d'anciens pieds mère de la même espèce, sans doute favorisée par le passage du feu permettant à l'important stock de graines présentes dans le sol de démarrer après levée de leur dormance (photo 12).



Photo 12. Régénérations naturelles d'acacias issues de pieds mères après passage du feu, zone de Sadjoavato (Photo JM Bouvet - Cirad)

De même nous avons pu observer aussi de la régénération abondante de *Grevillea banksii* sur des flancs de collines (photo 13).



Photo 13. Régénérations naturelles de *Grevillea banksii* en sommet de colline et d'*Acacia mangium* sur le flanc de colline, zone de Sadjoavato (Photo JM Bouvet - Cirad)

Ces observations ont été faites dans une zone proche des forêts naturelles et soulignent le risque d'envahissement de ces dernières. Nous avons pu d'ailleurs observer que certains ourlets forestiers étaient progressivement envahis par des acacias (photo 14). Ces zones semblaient être aussi colonisées par des espèces locales.



Photo 14. Zone de transition entre forêts naturelles et plantations, zone de Sadjoavato

(Photo JM Bouvet - Cirad)

Nous pensons que la technique qui a consisté à planter à des distances raisonnables des forêts naturelles, quelques dizaines de mètres, permettant à un ourlet forestier de se créer pour faciliter *a priori* la régénération d'espèces naturelles est une bonne approche. Ceci étant, malgré ces distances, la capacité des espèces naturelles à se régénérer semble faible sur les sites visités. Par contre la capacité d'envahissement des acacias ou du *Grevillea banksii* semble forte et reste une menace pour les ourlets forestiers. Il apparaît donc important pour le projet de quantifier dans l'espace et dans le temps les interactions entre plantations et fragments forêts naturelles.

6.3 – Propositions d'action

La question est de comprendre comment les plantations interagissent avec les formations naturelles dans un contexte de paysage, c'est à dire en prenant en compte les parcelles plantées et les zones de forêts dans un ensemble interconnecté. Cette analyse doit être conduite à plusieurs échelles d'espace (d'une zone de plantation à un bassin versant par exemple) et de temps (intervalle de quelques années comme une rotation de plantation à une période plus longue de 15 à 20 ans, voire plus).

Plusieurs études pourraient être lancées pour essayer de quantifier dans l'espace et dans le temps les dynamiques respectives de ces deux écosystèmes et les déterminants de leurs dynamiques (feu, vecteur de dissémination, proximité des plantations, activités humaines etc...).

Les questions/hypothèses qui peuvent se poser sont nombreuses, et nécessiteront de futures concertations avec le staff du projet PAGE. Plusieurs grandes questions peuvent être abordées :

1) Quel est le niveau d'envahissement des ourlets forestiers et forêts naturelles par les plantations d'eucalyptus et d'acacias (et de *Grevillea banksii*) ? Et en corollaire : quels sont les facteurs qui expliquent le mieux l'envahissement des zones d'ourlet et de forêt naturelle (distance entre

plantations et zones de forêts, type d'espèces plantées, âge des plantations, facteurs pédologiques, topographiques et orographiques, facteurs hydrographiques, passage des feux) ?

2) Les plantations conduisent-elles à une réduction de la surface des forêts naturelles environnantes ? Dans l'affirmative, quels seraient les facteurs qui pourraient expliquer le mieux l'impact des plantations sur cette réduction (facteurs écologiques et/ou économiques et sociaux).

3) Les plantations ont-elles un effet catalytique sur la régénération des espèces autochtones hors des zones forestières ?

De telles études nécessitent l'établissement en amont de bases de données ou de bases de données préexistantes comme le SIG relatif à la distribution des plantations et des zones de forêts. Elle générera aussi de nombreuses données liées aux variables à prendre en compte pour mesurer les dynamiques des formations dans l'espace et dans le temps (de façon diachronique ou synchronique) : richesse des espèces pérennes, des espèces annuelles, biomasses aériennes, diversité alpha, diversité bêta, banque de graines dans le sol, indice de couvert etc...

L'échantillonnage est un point crucial qu'il faudra penser en tenant compte des conditions très hétérogènes en milieu naturel et ainsi répondre aux questions de manière pertinente. Par exemple, une situation qui sera très fréquente dans le cas des études d'interaction plantation/forêt, consiste à décider du nombre de placettes le long des transects notamment si on souhaite suivre leur évolution (voir figure ci-dessous tirée de Fiers et al (2003).

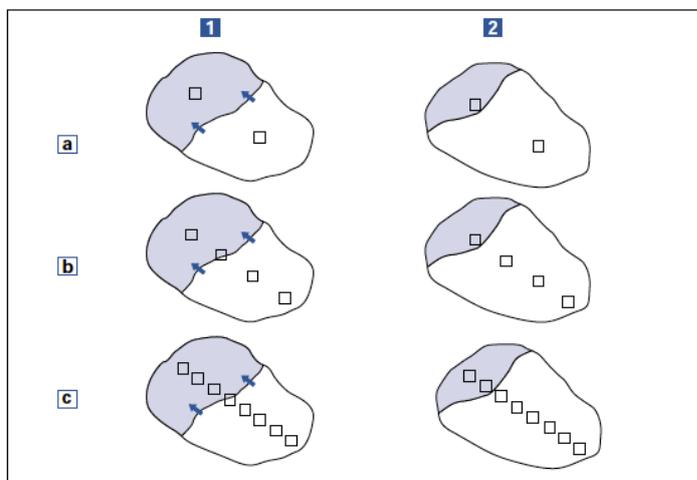


Figure n°22 : Utilisation de quadrats fixes placés dans des aires représentatives de deux communautés végétales. Dans la figure 22(a) les limites entre deux communautés se déplacent dans une direction Nord-Ouest. Tant qu'il n'y a pas de changement prononcé dans le quadrat de droite, il se peut que rien ne soit détecté pendant plusieurs années. Dans la figure 22(b) un quadrat supplémentaire, placé sur la limite originelle, peut fournir une indication de ce changement. Le mieux, cependant, serait de mettre un transect (ou une ligne de petits quadrats) tout au long de l'interface entre les deux communautés (figure 22c). De cette façon les changements mais aussi la vitesse de changement peuvent être mesurés.
Source : BIBBY et al., 1992.

Il sera aussi nécessaire de pouvoir quantifier l'évolution des fragments forestiers proches des plantations sur une période plus longue que celle d'un doctorat par des analyses d'images satellites ou de photos aériennes prises à des intervalles de temps plus conséquents.

Sur le plan académique l'étude est très orientée vers l'écologie (à mener dans le cadre de masters et/ou de doctorat). Elle pourrait déboucher sur des aspects très pratiques tels que les modalités de restauration dans les zones tampons entre plantations et forêts ou de création de corridors connectant des fragments forestiers. Elle pourrait permettre aussi de détecter des espèces pionnières susceptibles d'être testées dans des essais de comparaisons d'espèces (en relation avec le paragraphe sur la diversification des espèces locales).

Au-delà de l'écologie, les analyses d'interaction forêt naturelle/plantation pourraient s'inscrire dans une approche multidisciplinaire touchant l'aménagement/restauration des paysages forestiers. Comme nous l'avons souligné dans la problématique, en prenant en compte les espaces forestiers et non-forestiers de façon intégrée à l'échelle du paysage et en associant les questions socio-économiques relatives aux différents acteurs (reboiseurs, paysans, projet, communauté de base etc...) et écologiques, il est possible de fournir des éléments très pratiques et utiles au projet sur le plan de l'aménagement et de la gestion des ressources naturelles (cadre de la loi malgache sur les transferts de gestion).

Au-delà de l'encadrement des étudiants par l'expert, ce projet pourrait bénéficier des appuis du DP « Forêts et biodiversité à Madagascar », notamment de l'Université d'Antananarivo, Département de biologie végétale (Dr Roger Edmond) pour les aspects botanique/écologie mais aussi de l'Université de Diego Suarez. Ce projet pourrait s'appuyer aussi sur des compétences fortes développées à La Réunion sur les aspects écologie/analyse de données (Dr Olivier Flores). Le Cirad via son implication dans le DP Forêts et biodiversité » pourrait aussi apporter son appui par la contribution sous forme de bourses d'étudiants selon les conditions des écoles doctorales malgaches.

Une candidate potentielle a été identifiée pour effectuer un travail de doctorat sur ce sujet. Cette étudiante RAJAONARIVELO HERIMINO MANOA, est issue de la promotion à l'ESSA-Forêts sortie en 2016 Master II en Environnement – Territoire - Développement (E.T.D) au sein du Département des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques et présente de très bonnes références (deuxième du premier cycle et septième de sa promotion). Elle serait encadrée par Jean-Marc Bouvet, détenteur d'un doctorat et d'une habilitation à diriger les recherches, et effectuerait son doctorat au sein de l'ESSA-Forêts (chef du département comme encadrant) en relation avec le département DBEV (Roger Edmond). Le comité de thèse serait constitué des encadrants ci-dessus, de cadres du projet PAGE et de chercheurs de la Réunion spécialiste en écologie. D'autres participants (chercheurs de l'université d'Hambourg par exemple) proposés par le projet PAGE sont évidemment tout à fait opportuns pour accompagner la thèse.

7 – Gestion des attaques de *Leptocybe invasa*

7.1 – Problématique

Les plantations d'eucalyptus se sont fortement étendues au cours du siècle dernier et jusqu'à très récemment, celles-ci montraient peu de problèmes liés aux parasites. La raison invoquée par les spécialistes est liée à l'hypothèse d'échappement, i.e le fait de ne pas rencontrer de parasites dans les nouvelles zones d'introduction (Wingfield et al., 2008). Ceci étant, il semble que les plantations les plus récentes, notamment en Asie du sud-est, présentent beaucoup plus de problèmes sanitaires dus principalement à la rapidité de circulation des parasites à travers le monde (Paine et al., 2011). Le nombre d'introductions d'insectes a en effet été multiplié par cinq depuis les années 1980 et le nombre de parasites infestant les plantations d'eucalyptus a été multiplié par deux (Hurley, 2016).

Leptocybe invasa Fisher & La Salle (Hymenoptera: Eulophidae) est parmi les parasites de l'eucalyptus les plus virulents, dont la rapidité d'invasion a été la plus spectaculaire. Au cours des 20 dernières années cette guêpe, originaire du Queensland en Australie, a envahi une quarantaine de pays où l'eucalyptus est planté. En 2004, les études suggéraient que l'invasion était due à une seule femelle se multipliant par parthénogénèse. Mais depuis, la présence de mâles et de croisements a été

observée dans les zones infestées (Nugnes et al., 2015). Cette invasion a été favorisée par les échanges entre pays et continents, de matériel végétal sous forme de plants, boutures, semences. Au sein d'un massif, la propagation se fait par le vol de l'insecte et semble amplifiée par le vent. Notons que cet insecte est de taille très modeste ; la longueur des œufs, larves, nymphes, femelle et male *L. invasa* sont respectivement de 0.34–0.40 mm, 0.54–0.69 mm, 1.15–1.51 mm, 1.1–1.4 mm and 0.9–1.2 mm (Zheng et al 2014).

Les dommages sur les plants sont multiples, allant d'un aspect buissonnant et ralentissant la croissance jusqu'à la mort du plant. Plusieurs études ont montré que la sensibilité des eucalyptus à cet insecte variait entre les espèces (Dittrich-Schröder et al., 2012). Des tests impliquant des clones d'*E. camaldulensis* ont montré que cette espèce était plutôt sensible à ce parasite (Prabhu 2010). Il a été observé au Congo, après des attaques foudroyantes et très importantes sur l'hybride *E. urophylla*grandis*, donnant un aspect très buissonnant aux arbres âgés de quelques mois (2 m de hauteur en moyenne) un recouvrement de la croissance apicale par ré-individualisation d'un brin.

7.2 – Diagnostic

Les observations d'attaques de *Leptocybe invasa* ont été réalisées sur des rejets de taillis jeunes (2 m de hauteur) et aussi sur des taillis plus âgés avec des tiges de 4 à 5 m de hauteur (mais de façon moins intense) (secteur Angodorofa plantation de M Pepe - photo 15)).

L'intensité des attaques reste faible par rapport à d'autres zones hors de Madagascar connu des consultants, comme la République du Congo, mais le contexte écologique y est très différent : plantations industrielles et massif très compact. Par ailleurs le reboiseur (secteur Angodorofa) ayant constaté les attaques a éliminé immédiatement les plants atteints.



Photo 15. Attaque de *Leptocybe invasa* sur des brins de taillis d'eucalyptus (secteur Angodorofa plantation de M pepe) (Photo JM Bouvet - Cirad)

Des attaques sur des semis en pépinière sur *E. camaldulensis* ont aussi été observés. *A. mangium* et *A. auriculiformis* ne semblent par contre pas atteints (secteur Isesy/Bobasatrana – photo 16)



Photo 16. Attaque de *Leptocybe invasa* sur des semis d'eucalyptus – pas d'attaque sur les plants d'acacia voisins (secteur Isesy/Bobasatrana) (Photo JM Bouvet - Cirad)

Dans ce site, le reboiseur a commencé à tester des traitements en pépinière avec une solution de savon, extrait de feuille de neem et curcuma. Les effets semblent positifs mais les traitements sont à renouveler car les attaques se reproduisent (signalons que dans d'autres contextes forestiers, les traitements se font surtout en pépinière car plus faciles et moins coûteux que sur les plantations)

A noter que dans ce site aussi, les arbres les plus atteints n'ont pas pu être observés car les reboiseurs les ont détruits.

Même si le phénomène est pour l'instant très limité, il est possible que les attaques de *Leptocybe invasa* se développent de façon plus intense au sein des plantations d'*E. camaldulensis* de la région de Diana, si on se réfère aux expériences des autres pays ayant été confrontés à cet insecte, notamment au Brésil où *E. camaldulensis* est décrété comme sensible (Silva et al., 2015).

Certains facteurs peuvent favoriser le développement des attaques : 1) le fait que le matériel végétal soit relativement homogène avec une espèce principale en plantation, *E. camaldulensis*, qui semble sensible selon la bibliographie, 2) le fait que les peuplements sont gérés en taillis de courte rotation et donc permettent l'apparition régulières de jeunes tiges sur lesquelles *L. invasa* peut se développer 3) Le vent, qui est important dans la région, pourrait accélérer la propagation de l'insecte au sein du massif.

Ceci étant, d'autres facteurs comme le morcellement des massifs peuvent freiner la propagation. De même le fait que les plantations soient réalisées avec des variétés synthétiques (et non des clones comme dans beaucoup de pays à fort développement) peut aussi limiter les attaques.

7.3 – Proposition d'actions

Il est proposé un suivi des attaques sur les plantations du projet PAGE, afin de mesurer leur évolution et comprendre la biologie de l'insecte dans la zone.

L'implantation d'un réseau d'observation et de suivi le long de la zone de plantation peut s'envisager de deux façons :

- par la mise à contribution des équipes d'enquêtes lors d'inventaires des plantations. Il faudrait mettre au point une fiche d'observation et de relevé permettant de mesurer l'intensité et de la géolocaliser (GPS, note d'intensité, type de plant, date de recépage,...). Ce système n'est cependant pas suffisant : il pourrait être biaisé si les reboiseurs entreprennent des opérations sylvicoles, suppriment des plants ou aussi par le feu, etc.... Par ailleurs il ne permet pas un suivi expérimental qui pourrait nécessiter un traitement particulier de la parcelle (rythme de coupe, des observations,...).

- par des enquêtes opérées par les reboiseurs eux-mêmes pour détecter d'éventuelles attaques sur leurs propres parcelles. Ceci nécessite cependant une sensibilisation et une formation pour les aider à identifier les attaques

- par l'installation d'un réseau de placettes permanentes dédiées au suivi de *L. invasa*. Ce réseau reste à définir et à planter de façon pertinente pour pouvoir tester l'évolution spatiale et temporelle des attaques et l'évolution de l'intensité. Il devra se faire dans un second temps car devant tenir compte des résultats de l'enquête chez les reboiseurs pour optimiser la mise en place de ce réseau de placettes permanentes. La distribution des parcelles (au sein et en bordure des massifs, le long de l'axe routier), leur taille, leur gestion sylvicole (rythmes de coupes pour proposer des jeunes tiges, la séquence d'observation, les paramètres à définir pour mesurer l'intensité de l'attaque... restent à déterminer au sein du projet PAGE en fonction des capacités de mise en œuvre et de suivi.

On peut penser *a priori* qu'un réseau de parcelles implantées selon un transect sud-nord permettra de mesurer l'évolution des attaques au sein des plantations partant du principe que les premières attaques sont apparues au sud du périmètre. Un paramètre important est la densité des parcelles permanentes sur le transect : une parcelle permanente tous les 5 km, les 10km ? Le choix définitif dépendra des moyens et des premières observations faites au sein des plantations.

Le suivi des parcelles se fera au moins pendant trois ans après la plantation (pour que les arbres atteignent une taille suffisante). Les arbres pourront être recépés et suivis à nouveau sur une période de trois ans avec une gestion de taillis simple ou double brins. Plusieurs hypothèses peuvent être testées comme :

- les attaques diminuent au fur et à mesure que les arbres atteignent leur taille adulte,
- la sensibilité à *Leptocybe invasa* dépend des espèces d'eucalyptus.

Ce type d'étude peut être entrepris par l'équipe de PAGE mais pourrait être confiée à des étudiants de niveau master qui seraient encadrés par le projet et les consultants en relation avec les départements des universités concernées (Université de Diégo et/ou de d'Antananarivo) et aussi avec l'Université de la Réunion qui envisage de positionner un VSI spécialisé dans cette thématique d'études auprès du FOFIFA.

Si on considère un suivi sur trois ans, un étudiant master chaque année avec son (ses) encadrant(s), pourra aider à faire une série d'observations plus poussée que l'équipe en régie et une analyse plus détaillée ; celle-ci pourra d'ailleurs accumuler au fur et à mesure les données des campagnes précédentes.

La question des moyens de lutte se posera si le développement des attaques s'amplifie. La littérature fait un point sur les mesures possible (Zheng et al 2014).

- la lutte chimique : elle est envisageable en pépinière mais n'est pas préconisée à grande échelle sur le terrain pour des problèmes de coût et d'impacts environnementaux. Certains traitements chimiques ont été réalisés en combinant granulés et aspersion (Zheng et al 2014) mais ces techniques reviennent chères, sont moyennement efficaces vu faible temps de génération et créent le risque de résistance si elles sont appliquées systématiquement.

- par l'utilisation de variétés synthétiques à large base génétique. On peut imaginer deux types de variétés ; Les variétés synthétiques (issues du croisement sur plusieurs générations d'un nombre de géniteurs restreint, une vingtaine) ou plus de façon plus réalisable des variétés populations (issues du croisement sur plusieurs générations d'un nombre d'individus plus conséquent, une à deux centaines, comme dans le cas des vergers à graines). En Inde des essais montrent une variabilité inter génotypes d'*E. camaldulensis* pour la résistance (Prabhu 2010). Des variétés à large base génétique peuvent garantir une meilleure résistance.

- Sur un terme plus long, la diversification des espèces d'eucalyptus peut être une solution. Les études en Inde (Prabhu 2010) et au Brésil (Silva et al. 2015) montrent que les espèces sont diversement susceptibles à la galle ; d'où l'intérêt de tester la résistance de différentes espèces d'eucalyptus dans les conditions de la zone de plantation en relation avec l'installation de placeaux permanents au sein du massif.

La recherche sur d'éventuels agents de lutte biologique est en cours en Australie et en Israël. Plusieurs ennemis naturels de ce ravageur ont été ainsi trouvés en Australie, y compris les guêpes parasites de trois genres *Aprostocetus*, *Quadrastichus* (*Eulophidae*) et *Megastigmus* (*Torymidae*) (FAO 2012). Ceci étant, cette approche ne semble pas encore opérationnelle pour le développement.

8 - Effet allélopathique des plantations d'eucalyptus et d'acacias

8.1 – Problématique

L'allélopathie se définit comme «tout effet direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante(micro-organismes inclus) sur une autre par le biais de composés biochimiques libérés dans l'environnement (atmosphère et sol)»(Rice 1984).

C'est un phénomène très courant dans les écosystèmes forestiers (Gallet et Pelissier 2002). L'allélopathie est largement considérée comme l'une des causes de la réduction de la biodiversité au sein des plantations d'eucalyptus. Cependant, la plupart des recherches menées sur ces effets a été effectuée en laboratoire, avec des graminées comme récepteurs, plantes qui ne parviennent pas à refléter pleinement les interactions entre ligneux au sein des écosystèmes naturels. (Chua et al 2014)

Le phénomène d'allélopathie peut se trouver éventuellement confondu avec d'autres aspects environnementaux : plus les densités de plantation sont fortes et plus les précipitations sont faibles, moins on observe de plantes se développant sous les plantations (Bouvet 1999).

Les effets allélopathiques s'estompent voire disparaissent dans des zones de plantations à faible densité et de bonne pluviométrie et préservées des feux (cas de la régénération d'espèces locales sous *Eucalyptus urophylla* et autres au Congo).

8.2 – Propositions d'actions

En général, il y a quatre processus provoquant des effets allélopathiques par lesquels les composés chimiques émis par les plantes sont libérés dans l'environnement : la volatilisation, le lessivage, la

décomposition de la litière et l'exsudation des racines. Tester l'ampleur de ces différents processus nécessite différents dispositifs d'expérience que nous ne nous détaillerons pas ici (Chu et al 2014).

L'effet allélopathique de la litière d'eucalyptus et d'acacia reste à tester avec des semis d'espèces locales provenant des forêts naturelles environnant les plantations et avec des espèces référence.

Des expériences pourraient être menées testant la germination et la croissance d'espèces locales de forêt sur différentes modalités de sols et litières : sol/litière de forêt, sol/litière d'ourlet forestier et sol/litière sous plantations d'eucalyptus et d'acacia.

Cette action est à mettre en relation avec les analyses d'interactions plantations-forêt naturelle pour mieux comprendre l'éventuel effet catalytique des plantations d'eucalyptus.

Les expériences seront sans doute à réaliser en milieu contrôlé de pépinière. On peut ainsi penser à une expérimentation en pots dans lesquels on teste différentes litières (forêt naturelles, savane, sous eucalyptus, sous acacias, sous mélanges eucalyptus acacia) croisées avec différentes plantes (riz, espèces de forêts) et croisée avec différents régimes hydrique (situation de stress et situation de non stress).

La réalisation de telle expérimentation en peuplement *in situ* est difficilement envisageable car beaucoup d'effets sont alors confondus avec l'effet allélopathique ; compétition pour l'eau, pour la lumière, pour les graminées etc...

La mise en place de l'expérimentation et l'observation des effets peut se réaliser en 6 mois : mise en place de l'expérience sur 15 jours, suivi pendant 4 mois et analyse des résultats pendant 1 mois. C'est en effet surtout la germination et les premiers stades de développement des plants qui sont critiques. Cette étude peut donc s'envisager dans le cadre de master, à condition que les graines soient disponibles

9 - Autres études

D'autres problématiques pourraient faire également l'objet d'études. On peut ainsi citer, sans que la liste soit exhaustive :

Concernant la sylviculture

- Etude de l'impact des feux sur les cycles biogéochimiques : estimation de la perte d'éléments minéraux avec comparaison savanes brûlées vs plantations protégées
- Mise en place d'un réseau de piézomètres pour suivre, sur les différentes régions du projet, la hauteur de la nappe phréatique en fonction de la position topographique.
- Etude de la profondeur d'enracinement des eucalyptus, paramètre très important à prendre en compte pour raisonner la croissance des arbres et leur résistance aux épisodes de sécheresse.
- Estimation du statut hydrique des arbres en fonction des conditions de station (région sol,...) et de l'âge des plantations

Concernant le matériel végétal

- Efficacité des vergers à graines de PAGE - Analyse du gain génétique obtenu par les variétés issues des vergers à graines : comparaison des performances des provenances introduites, des graines tout venant et des graines issues des vergers à graine du projet
- Optimisation des futurs vergers à graines - Sélection au sein des futurs vergers à graines de provenances par des approches de sélection précoce et sélection sur index multi-caractères (forme, croissance, qualité énergétique)

10 - Planification des interventions et modalités d'intervention du Cirad

Il est proposé un appui technique sous forme de backstopping et de missions après co-construction des activités avec le projet PAGE. Cet appui sera forfaitisé annuellement à 30 jours de consultance chacun pour les experts du Cirad, Dr JP Bouillet et Dr JM Bouvet. Ceci sur la base des tarifs Eco-Consulting soit 30 jours x 450 €/jour = 13 500€ / an / consultant.

Cet appui visera à :

- Un renforcement des capacités du staff PAGE par des formations ciblées
- Une co-construction des itinéraires techniques, protocoles expérimentaux, stratégie de prise de mesure, d'analyses, etc.. pour répondre aux différents objectifs du projet,
- L'encadrement d'étudiants (ingénieur, master, doctorat) dans le cadre du partenariat du Cirad au sein du DP "Forêt et biodiversité à Madagascar" et du DP SPAD "système de production d'altitude et durabilité" (FOFIFA, Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radio-Isotopes).

Les coûts additionnels seront à estimer pour chaque type d'action (bourse d'étudiants, consommables, analyses, déplacements sur le terrain, trajet avion Antananarivo-Diego, etc....).

Références bibliographiques

Adams, P.R., Beadle, C.L., Mendham, N.J., Smethurst, P.J., 2003. The impact of timing and duration of grass control on growth of a young *Eucalyptus globulus* Labill. Plantation. *New Forests*, 2, 147-165

Bartoli, M., Decourt, N., 1971. Densité de plantation. Etude bibliographique et premiers résultats d'une expérience sur le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.). *Annales des Sciences forestières*, 28, 59-81.

Battie-Laclau, P., Laclau, J.P., Domec, J.C., Christina, M., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., Gonçalves, J.L.M., Moreira, R.M., Krusche, A.V., Bouvet, J.M., Nouvellon, Y., 2014. Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. *New Phytologist*, 203, 401-413.

Bini, D., Santosa, C.A., Bouillet, J.P., Gonçalves, J.L.M., Cardoso, E.J.B.N., 2013. *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in monoculture and intercropped plantations: evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. *Applied Soil Ecology* 63, 57-66.

Binkley, D., Giardina, C., Bashkin, M.A., 2000. Soil phosphorus pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Albizia facaltaria*. *For. Ecol. Manage.* 128, 241–247.

Blaser, W.J., Shanungu, G.K., Edwards, P.J., Venterink, H.O., 2014. Woody encroachment reduces nutrient limitation and promotes soil carbon sequestration. *Ecology and Evolution* 4, 1423-1438.

Bouillet J.P., Laclau J.P., Arnaud M., Thongo A., 2002. Changes with age in the spatial distribution of roots of a eucalyptus clone in the Congo. Impact on water and nutrient uptake ability. *Forest Ecology and Management*, 171, 43-57.

Bouillet J.P., Safou Matondo R., Laclau J.P., Nzila J.D.D., Ranger J., Deleporte P. 2004. Pour une production durable des plantations d'eucalyptus au Congo : la fertilisation. *Bois et forêts des tropiques* (279) : 23-35.

Bouillet J.P., Laclau J.P., Gonçalves J.L.M., Moreira M.Z., Trivelin P.C.O., Jourdan C., Silva E.V., Piccolo M.C., Tsai S.M., Galiana A., 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil 2: Nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. *Forest Ecology and Management*, 255, 3918-3930.

Bouillet J.-P., Laclau J.-P., Gonçalves J.L.M., Voigtländer M., Gava J.L., Leite F.P., Hakamada R., Mareschal L., Mabiála A., Tardy F., Levillain J., Deleporte P., Epron D., Nouvellon Y., 2013. *Eucalyptus* and *Acacia* tree growth and stand production over a full rotation in single- and mixed-species plantations across 5 sites in Brazil and Congo. *Forest Ecology and Management*, 301, 89–101.

Bouvet J.M., Delwaulle, J.C., 1983. Introduction d'*Eucalyptus cloeziana* au Congo _ Pointe Noire, Parcelle 77-13. *Bois et Forêts des Tropiques* (200) : 7-20

Bouvet, J.M., Andrianirina, G., 1990. L'*Eucalyptus grandis* à Madagascar. Potentialités, bilan et orientations des travaux d'amélioration génétique. *Bois et Forêts des Tropiques* (226) : 5-19.

Bouvet, J.M , 1999. Les plantations d'eucalyptus : évolutions récentes et perspectives. *Le Flamboyant* (49) : p. 4-14.

Bouvet, J.M, Andrianoelina, O, 2001. La fragmentation forestière et l'exploitation forestière : quels sont leurs impacts sur les espèces nobles de Madagascar ed. Bakoulila Rakouth, Roger Edmond, JM Bouvet *Forest Restoration handbook in Madagascar from FOREAIM project*

Bouvet, J.M, 2011. FOREAIM Project no. 510790 Specific Targeted Research Project « Bridging restoration and multi-functionality in degraded forest landscape of Eastern Africa and Indian Ocean Islands » - Activity report 74 p + 60 p + Deliverables + Scientific result report 46 p et annexes

Braga, R.M., Sousa, F.F.D., Venturin, N., Braga, F.D.A., 2016. Biomass and microbial activity under different forest covers. *Cerne*, 22, 137-144.

Brennan, K.E.C., Christie, F.J., York, A., 2009. Global climate change and litter decomposition: More frequent fire slows decomposition and increases the functional importance of invertebrates . *Global Change Biology*, 12, 2958-2971.

Brézard JM. 1983. Les *Eucalyptus* introduits au Congo 1953-1981. Rapport CTFT-Congo, 100 p.

- Camara, R., Correia, M.E.F., Villela, D.M., 2012. Effects of eucalyptus plantations on soil arthropod communities in a Brazilian Atlantic Forest conservation unit. *Bioscience Journal*, 28, 454-455
- Castro-Díez, P., Godoy, O., Saldaña, A., Richardson, D.M., 2011. Predicting invasiveness of Australian acacias on the basis of their native climatic affinities, life history traits and human use. *Diversity and Distributions*, 17 (5), pp. 934-945
- Cossalter, C., Pye-Smith, C., 2003. *Fast-Wood Forestry: Myths and Realities*. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Stape, J.L., Bouillet, J.P., Lambais, G.R., le Maire, G., 2016 Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology* (in press)
- Chaix, G, Vigneron, P, Razafimaharo, V, Hamon, S, 2010. Improved management of malagasy eucalyptus grandis seed orchard using microsatellites and paternity assignment. *Journal of Tropical Forest Science* 22, 271–280
- Chua, C, Mortimer, P.E., Wanga, H, Wanga, Y, Liua, X, Yua, S, 2014. Allelopathic effects of Eucalyptus on native and introduced tree species *Forest Ecology and Management* 323, 79–84
- Crow, S.E., Reeves, M., Turn, S., Taniguchi, S., Schubert, O.S., Koch, N., 2016. Carbon balance implications of land use change from pasture to managed eucalyptus forest in Hawaii. *Carbon Management*, 1-11 (on line)
- De Nadai Corassa, J., Faixo, J.G., Andrade Neto, V.R., Santos, I.B., 2015. Biodiversity of the ant fauna in different soil uses in North Mato Grosso. *Comunicata Scientiae*, 6, 154-163.
- Dittrich-Schröder, G., Wingfield, M. J., Hurley, B. P., Slippers, B. 2012. Diversity in Eucalyptus susceptibility to the gall-forming wasp *Leptocybe invasa*. *Agricultural and Forest Entomology*, 14, 419–427.
- Drake, J.E., Aspinwall, M.J., Pfautsch, S., Rymer, P.D., Reich, P.D., Smith, R.A., Crous, K.Y., Tissue, D.T., Ghannoum, O., Tjoelker, M.J., 2015. The capacity to cope with climate warming declines from temperate to tropical latitudes in two widely distributed Eucalyptus species. *Global Change Biology*, 21, 459–472.
- du Toit B, Oscroft D, 2003. Growth response of a eucalypt hybrid to fertilisation at planting across five site types in Zululand. *ICFR Bulletin* 21/2003, 30 p.
- Ellis, R.C., Gradley, A.M., 1983. Gains and losses in soil nutrients associated with harvesting and burning eucalypt rainforest. *Plant and Soil*, 3, 437-450
- ENCE, 2015. Sustainable forest management and Eucalyptus Grupo Empresarial ENCE, S.A. 2009. 75 pages
- Eyles, A., Worledge, D, Sands, P., Ottenschlaeger, M.L., Paterson, S.C., Mendham, D., O'Grady, A.P., 2012 Ecophysiological responses of a young blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation to weed control. *Tree Physiology*, 32, 1008-1020

- Faria S.R., De La Rosa J.M., Knicker H., González-Pérez, J.A., Villaverde J., Keizer J.J., 2015 Wildfire-induced alterations of topsoil organic matter and their recovery in Mediterranean eucalypt stands detected with biogeochemical markers. *European Journal of Soil Science*, 66, 699-713.
- Fialho, R.C., Zinn, Y.L., 2014. Changes in soil organic carbon under Eucalyptus plantations in Brazil: A comparative analysis. *Land Degradation and Development*, 25, 428-437.
- Fiers, V., et al., 2003. Etudes scientifiques en espaces naturels. Cadre méthodologique pour le recueil et le traitement de données naturalistes. Cahier technique de l'ATEN Numéro 72. Réserves Naturelles de France. Montpellier. p. 96
- Forrester, D.I., Bauhus, J., Cowie, A.L., Vanclay, J.K., 2006. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: a review. *For. Ecol. Manage.* 233, 211–230.
- Forrester, D.I., Pares, A., O'Hara, C., Khanna, P.K., Bauhus, J., 2013. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of Eucalyptus and nitrogen-fixing Acacia. *Ecosystems* 16, 123-132.
- Gallet, C, Pelissier, F, 2002. Interaction allélopathique en milieu forestier. *Revue Forestière Française* 2, 567-576.
- Garau, A.M., Lemcoff, J.H., Ghera, C.M., Beadle, C.L., 2008. Water stress tolerance in *Eucalyptus globulus Labill. subsp. maidenii* (F. Muell.) saplings induced by water restrictions imposed by weeds. *Forest Ecology and Management* 7, 2811-2819
- Garau, A.M., Ghera, C.M., Lemcoff, J.H., Baraňao, J.J., 2009. Weeds in *Eucalyptus globulus subsp. maidenii* (F. Muell) establishment: Effects of competition on sapling growth and survivorship. *New Forests*, 37, 251-264
- Gonçalves, J.L.M., Wichert, M.C.P., Gava, J.L., Masetto, A.V., Arthur Jr., J.C., Serrano, M.I.P., Mello, S.L.M., 2007. Soil fertility and growth of Eucalyptus grandis in Brazil under different residue management practices. *Southern Hemisphere Forestry Journal*, 69, 95-102.
- GPFLR: Global Partnership on Forest Landscape Restoration website (available at <http://www.forestlandscaperestoration.org/>).
- Hijmans, R, J., June, J. E, 2016. Species distribution modeling with R
- Houlton, B.Z., Wang, Y.P., Vitousek, P.M., Field, C.B., 2008. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere. *Nature* 454, 327–330.
- Hurley, B.P., Garnas, J., Wingfield, M.J. et al. (2016) Increasing numbers and intercontinental spread of invasive insects on eucalypts *Biol Invasions* 18: 921.
- Jaiyeoba, I.A., 1995. Changes in soil properties related to different land uses in part of the Nigerian semi-arid Savannah. *Soil Use and Management*, 11, 84-89.
- Kratz, W., 1998. The bait-lamina test: General aspects, applications and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 5, 94-96.

- Laclau J.P., Bouillet J.P., Ranger J., Joffre R., Gouma R., Saya A., 2001. Dynamics of nutrient translocation in stemwood across an age series of *Eucalyptus hybrid*. *Annals of Botany*, 88, 1079-1092.
- Laclau, J.P., Ranger, J., Deleporte, P., Nouvellon, Y., Saint-Andre', L., Marlet, S., Bouillet, J.P., 2005. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. *Forest Ecol. Manage.* 210, 375–391.
- Laclau J.-P., Ranger J., Gonçalves J.L.M., Maquère V., Krushe A.V., M'Bou Thongo A., Nouvellon Y., Saint-André L., Bouillet J.P., Piccolo M.C., Deleporte P. 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259, 1771-178
- Laclau J.P., Araújo da Silva E, Lambais G.R., Bernoux M., le Maire G., Stape J.L., Bouillet J.-P., Gonçalves, J.L.M., Jourdan C., Nouvellon Y., 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. *Frontiers in Functional Plant Ecology*, 4, 243. doi:10.3389/fpls.2013.00243
- Laganière, J., Angers, D., Paré, D., 2009. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 16, 439-453
- Leite, F.P., Silva, I.R., Novais, R.F., de Barros, N.F., Neves, J.C.L., 2010. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the rio doce valley. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*.
- Li, Y., Yang, W., Luo, C., Wu, F., Hu, J., 2013. Dynamics on soil faunal community during the decomposition of mixed eucalypt and alder litters. *Acta Ecologica Sinica*, 201, 159-167.
- Marin-Spiotta E., Silver W.L., Swanston C.W., Ostertag R., 2009. Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures. *Global Change Biology*, 15, 1584-1597.
- McGuire, D., 2014. FAO' s Forest and Landscape Restoration Mechanism. In J. Chavez-Tafur & J. Roderick Zagt, eds. *Towards productive landscapes*. Wageningen, Netherlands, Tropenbos International.
- Mills, J, Fey, M.V., 2004. Declining soil quality in South Africa: Effects of land use on soil organic matter and surface crusting. *South African Journal of Plant and Soil*, 21, 388-398
- Merino, A., Fernández-López, A., Solla-Gullón, F., Edeso, J.M., 2004. Soil changes and tree growth in intensively managed *Pinus radiata* in northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 196, 393-404.
- Nouvellon, Y., Stape, J.L., le Maire, G., Epron, D., Gonçalves, J.L.M., Bonnefond, J.-M., Campoe, O., Loos, R., Bouillet, J.-P., Laclau, J.-P., 2011. Factors controlling carbon and water balances on fast growing *Eucalyptus* plantations. In: *IUFRO Eucalyptus Conference*, 14–18 November 2011, Porto Seguro, Bahia State, Brazil, 43–46.

Nugnes F, Gebiola M, Monti MM, Gualtieri L, Giorgini M, Wang J, et al., 2015. Genetic Diversity of the Invasive Gall Wasp *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) and of its *Rickettsia* Endosymbiont, and Associated Sex-Ratio Differences. *PLoS ONE* 10(5): e0124660.

Paine, T.D, Steinbauer, M.J, Lawson, S.A., 2011. Native and Exotic Pests of Eucalyptus: A Worldwide Perspective *Annual Review of Entomology* 56, 181-201

Paula, R.R., Bouillet, J.P., Trivelin, P.C.O., Zeller, B., Gonçalves, J.L.M., Nouvellon, N., Bouvet, J.M., Plassard, C., Laclau, J.P., 2015. Evidence of short-term belowground transfer of nitrogen from *Acacia mangium* to *Eucalyptus grandis* trees in a tropical planted forest. *Soil Biology and Biochemistry* 91, 99-108.

Prabhu J.S.T, 2010. Susceptibility of eucalyptus species and clones to gall wasp, *Leptocybe invasa* Fisher and La Salle (Eulophidae: Hymenoptera) in Karnataka Karnataka J. Agric. Sci., 23, 220-221.

Prill, L. 2015. Master Ecological risks and opportunities of *Eucalyptus camaldulensis* plantations for energy wood production in Northern Madagascar. Masterarbeit im Studiengang Holzwirtschaft, Universität Hamburg, 87p.

Rachid, C.T.C.C., Balieiro, F.C., Peixoto, R.S., Pinheiro, Y.A.S., Piccolo, M.C., Chaer, G.M., Rosado, A.S., 2013. Mixed plantations can promote microbial integration and soil nitrate increases with changes in the N cycling genes. *Soil Biology and Biochemistry* 66, 146-153.

Ramamurthy, V., Singh, M., Srinivas, A., Silpasree, S., Ramesh Babu, A.C., Naidu, L.G.K., Prakasa Rao, E.V.S, 2016. Effect of age of plantation and season on leaf yield, content and composition of oil of *Eucalyptus citriodora* Hook. and soil properties in semi-arid conditions of Karnataka. *Research on Crops*, 17, 112-117

Razakamanarivo, R.H., Razafindrakoto, M.A., Albrecht, A., 2010. Fonction puits de carbone des taillis d'eucalyptus à Madagascar. *Bois et forêts des tropiques*, 305, 5-19.

Razakamanarivo, R.H., Grinand, C., Razafindrakoto, M.A., Bernoux, M., Albrecht, A., 2011. Mapping organic carbon stocks in eucalyptus plantations of the central highlands of Madagascar: A multiple regression approach. *Geoderma*, 162, 335-346.

Razakamanarivo, R.H., Razakavololona, A., Razafindrakoto, M.A., Vieilledent, G., Albrecht, A., 2012. Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass and Bioenergy*, 45, 1-10

Reddy, M.V., Venkataiah, B., 1990. Effects of tree plantation on qualitative and quantitative composition of soil arthropods of a semi-arid tropical savanna. *Environment and Ecology*, 8, 361-367

Rice E.L., 1984. Allelopathy. 2^e edition. Orlando, AcademicPress, 422p.

Richardson, D.M., Le Roux, J.J., Wilson, J.R.U., 2015. Australian acacias as invasive species: lessons to be learnt from regions with long planting histories. *Southern Forests*, 77, 31-39

Rieff, G.G., Natal-da-Luz, T., Sousa, J.P., Wallau, M.O., Hahn, L., de Sá, E.L.S., 2016. Collembolans and mites communities as a tool for assessing soil quality: Effect of eucalyptus plantations on soil mesofauna biodiversity. *Current Science*, 110, 713-719.

- Sabogal, C., Besacier, C., McGuire, D. 2015. Forest and landscape restoration: concepts, approaches and challenges for implementation *Unasylva* 245, 66, 2015/3
- Sayer, J., Sunderland, T., Ghazoul, J., Pfund, J.L., Sheil, D., Meijaard, E., Venter, Boedhihartono, A.K., Day, M., Garcia, C., van Oosten, C., Buck, L.E., 2013. Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses *PNAS* May 21, 2013 vol. 110 no. 21 8349–8356
- Silva, P.H.M., de Paula Müller R C, Miranda, A.C., Moraes, M.L.T., Furtado, E.L., Pieri, C., Brawner, J., Lee, D., 2015. Screening of rust and gall wasp in eucalypts species and provenances *Pesq. Flor. Bras., Colombo*, 35, 323-328,
- Smethurst, P.J., Almeida, A.C., Loos, R.A., 2015. Stream flow unaffected by Eucalyptus plantation harvesting implicates water use by the native forest streamside reserve. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 187–198.
- Tao, H.-H., Slade, E.M., Willis, K.J., Caliman, J.P, Snaddon, J.L, 2015. Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 218, 133-140
- Vigneron Ph. 1987. Les Eucalyptus introduits au Congo - supplément 1982 - 1986. 35 p. CTFT-Congo
- Vigneron P., Bouvet J.M. 2001. Eucalyptus. In : Charrier André (ed.), Jacquot Michel (ed.), Hamon Serge (ed.), Nicolas Dominique (ed.). *Tropical plant breeding*. Montpellier : CIRAD, p. 223-245. (coll. Repères).
- Wingfield, M.J, Slippers, B., Hurley, B.P, Coutinho, T.A, Wingfield, B.D., Roux, J., 2008. Eucalypt pests and diseases: growing threats to plantation productivity *Southern Forests* 2008, 70(2): 139–144
- Wood, S.W., Prior, L.D., Stephens, H.C., Bowman, D.M.J S., 2015. Macroecology of Australian Tall Eucalypt Forests: Baseline Data from a Continental-Scale Permanent Plot Network. *Plos One*, DOI:10.1371, 1-24
- Xu, D., Dell, B., 2002. Nutrient management of eucalypt plantations in South China. In: *International Symposium on Eucalypt Plantations, Guangdong, PR China. Papers and Abstracts*, 139–159.
- Zheng, X.L., Li, J., Yang, Z.D., Xian, Z.H., Wei, J.G., Lei, C.L., Wang, X.P., Lu, W., 2014. A review of invasive biology, prevalence and management of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle (Hymenoptera: Eulophidae: Tetrastichinae) *African Entomology* 22(1): 68–79
- Zinn, Y.L., Resck, D.V.S, Da Silva, J., 2002. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. *Forest Ecology and Management*, 166, 285-294.