

Eucalyptus robusta pour une production durable de bois énergie à Madagascar : bilan des connaissances et perspectives

Daniel VERHAEGEN^{1, 6}
Honoré RANDRIANJAFY^{1, 2}
Hery RAKOTONDRAOELINA ANDRIATSITOHAINA^{1, 2}
Marie-Christine TRENDELEBURG RAKOTONIRINA^{1, 2}
Nicolas ANDRIAMAMPIANINA^{1, 2}
Pierre MONTAGNE^{1, 3}
Alain RASAMINDISA^{1, 2}
Gilles CHAIX^{4, 6}
Jean-Pierre BOUILLET^{4, 5}
Jean-Marc BOUVET⁶

¹ Cirad
Dispositif en Partenariat "Forêts
et Biodiversité"
BP 853, Antananarivo
Madagascar

² Fofifa/Drfp
BP 904, Ambatobe
Antananarivo 101
Madagascar

³ Cirad
Upr Bsef
Campus international de Baillarguet
34398 Montpellier Cedex 5
France

⁴ Departamento de Ciências Florestais
da ESALQ/Universidade de São Paulo
Avenida Pádua Dias 11, Caixa Postal 9
CEP 13418-900, Piracicaba-SP
Brésil

⁵ Cirad
Umr Eco&Sols
2, place Viala
34060 Montpellier Cedex 2
France

⁶ Cirad
Umr Agap
« Genetic diversity and breeding
of forest trees »
Avenue Agropolis
34398 Montpellier Cedex 5
France



Eucalyptus robusta (région de Moramanga).

RÉSUMÉ

EUCALYPTUS ROBUSTA POUR UNE PRODUCTION DURABLE DE BOIS ÉNERGIE À MADAGASCAR : BILAN DES CONNAISSANCES ET PERSPECTIVES

Dès son introduction à Madagascar, *Eucalyptus robusta* a été retenu comme espèce de reboisement pour sa remarquable capacité d'adaptation. L'extension de sa plantation par les populations rurales a abouti à la création d'un massif de près de 140 000 hectares autour d'Antananarivo. Son bois est devenu la principale source d'énergie utilisée par les ménages urbains et ruraux malgaches. Mais aujourd'hui, la production durable de cette ressource est gravement menacée. Le marché déficitaire et la pauvreté des populations rurales amènent les propriétaires forestiers à exploiter leurs taillis avec des rotations de plus en plus courtes, parfois inférieures à 2 ans. Cette surexploitation induit un gaspillage des éléments minéraux qui ne sont pas compensés par des apports extérieurs de nutriments. La production de charbon de bois se poursuit à partir de meules traditionnelles dont le rendement pondéral n'est que de 10 % environ. Le doublement de ce rendement par des méthodes simples permettrait pourtant de diminuer les superficies de forêt exploitées chaque année. À 6 ans, l'accroissement moyen annuel en volume commercial bois fort sur écorce des taillis anciens est de 18,8 m³/ha/an. Les meilleures provenances importées récemment permettent de doubler le volume moyen individuel des arbres à 9 ans. Des vergers à graines ont été plantés avec plusieurs provenances de l'aire naturelle pour créer des variétés composites. Cependant, des fécondations préférentielles intra-provenances et des pollutions par le pollen extérieur affectent fortement la qualité des variétés produites. Pour l'extension du massif d'eucalyptus, les populations rurales continuent à utiliser des graines locales ou planter des sauvageons. Ces plantations en *E. robusta* devront continuer à produire du bois malgré les modifications biotiques et abiotiques déjà constatés à Madagascar. Face à ces changements, les technologies modernes peuvent aider la recherche forestière à proposer un système durable de production de bois énergie autour des grands centres urbains. Cela aurait pour effet de maintenir un revenu régulier participant à la survie des populations rurales.

Mots-clés : *Eucalyptus robusta*, amélioration génétique, économie, gestion des plantations, changements globaux, Madagascar.

ABSTRACT

EUCALYPTUS ROBUSTA FOR SUSTAINABLE FUELWOOD PRODUCTION IN MADAGASCAR: REVIEW OF KNOWLEDGE AND FUTURE PROSPECTS

Since it was introduced in Madagascar, *Eucalyptus robusta* has been considered as a suitable species for reforestation thanks to its outstanding ecological adaptability. With further plantings in rural communities, the species now covers some 140 000 hectares around Antananarivo. Its timber has become the main source of fuel for urban and rural households in Madagascar. Today, however, the sustainability of this resource is under severe threat. The market deficit coupled with rural poverty is causing forest owners to shorten their coppicing cycles, sometimes to as little as 2 years. This over-exploitation is depleting soil minerals that are not being replaced by nutrient inputs. Traditional charcoal production has continued, using earth mounds where the potential yield by weight is only about 10%. Applying simple methods to double the yield would substantially reduce the forest area logged each year for charcoal. At 6 years of age, the annual increment in commercial timber from older coppices is about 18.8 m³/ha/year. The best recently imported provenances are doubling the average individual volume of 9 year-old trees. Seed orchards have been planted with several provenances from the natural range of the species to create composite varieties. However, the quality of the varieties produced is significantly affected by preferentially intra-provenance fertilisation and external pollen. In extending the planted area, rural populations have continued to use local seeds or to plant seedlings found in old plantations. These *E. robusta* plantations should continue to produce wood despite the biotic and abiotic changes already observed in Madagascar. To cope with these changes, modern technologies can help forest researchers to develop a sustainable fuelwood production system around large urban centres. This would maintain regular incomes to enable rural populations to survive.

Keywords: *Eucalyptus robusta*, genetic improvement, economy, plantation management, global change, Madagascar.

RESUMEN

EUCALYPTUS ROBUSTA PARA UNA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE LEÑA EN MADAGASCAR: CONOCIMIENTOS EXISTENTES Y PERSPECTIVAS

Desde su introducción en Madagascar, *Eucalyptus robusta*, se eligió como especie de reforestación por su notable plasticidad ecológica. La extensión de su siembra por las comunidades rurales llevó a la creación de una formación forestal de cerca de 140 000 hectáreas alrededor de Antananarivo. Su leña se ha vuelto la principal fuente de energía de los hogares urbanos y rurales malgaches. Sin embargo, actualmente la producción sostenible de este recurso se encuentra seriamente amenazada. El mercado deficitario y la pobreza de las explotaciones rurales hacen que los propietarios forestales exploten sus montes bajos con rotaciones cada vez más cortas, a veces inferiores a los 2 años. Esta sobreexplotación induce un derroche de elementos minerales que no se ve compensado por aportes externos de nutrientes. La producción de carbón vegetal se sigue efectuando mediante carboneras tradicionales cuyo rendimiento ponderal apenas alcanza el 10%. Si se duplicara dicho rendimiento con métodos de fácil aplicación, se podría disminuir la superficie de bosque explotada cada año. A los 6 años, el incremento promedio anual de madera gruesa con corteza en antiguos montes bajos es de 18,8 m³/ha/año. La reciente importación de árboles de mejores procedencias permite duplicar el volumen promedio individual a los 9 años. Se sembraron huertos semilleros con distintas procedencias del área natural para crear variedades compuestas. Sin embargo, la calidad de las variaciones producidas se ve considerablemente afectada por fecundaciones preferentemente intraprocedencias y contaminaciones por polen externo. Las poblaciones rurales siguen utilizando semillas o plantitas silvestres recogidas in situ para la extensión de la formación de eucaliptos. Estas plantaciones de *E. robusta* tendrán que seguir produciendo madera a pesar de las modificaciones bióticas y abióticas ya observadas en Madagascar. Frente a estos cambios, las modernas tecnologías pueden ayudar a la investigación forestal a proponer un sistema sostenible de producción de leña alrededor de los grandes centros urbanos. Esto permitiría mantener una renta regular que ayudaría a la supervivencia de las poblaciones rurales.

Palabras clave: *Eucalyptus robusta*, mejora genética, economía, manejo de plantaciones, cambios globales, Madagascar.

Introduction

De nombreux pays ont fortement investi dans les plantations pour répondre à la demande croissante de produits forestiers. En 2010, les plantations forestières atteignaient 271 millions d'hectares (FAO, 2010). Les eucalyptus constituent une part importante (8 %) de ces reboisements, avec une superficie estimée à 22 millions d'hectares (IGLESIAS-TRABADO, WILSTERMANN, 2008). L'Inde, le Brésil et la Chine totalisent plus de la moitié de ces plantations. Les principales espèces utilisées sont *Eucalyptus camaldulensis*, *E. deglupta*, *E. globulus*, *E. grandis*, *E. nitens*, *E. robusta*, *E. saligna*, *E. urophylla* et *E. tereticornis*. Ces espèces ont été plantées pendant plus d'un siècle pour la production principale de perches et de bois énergie (DAVIDSON, 1995). Les populations rurales ont rapidement apprécié le faible coût d'établissement des peuplements, la croissance rapide des plants et la vigueur des rejets, même dans des conditions écologiques difficiles. Les plantations industrielles d'eucalyptus ont été développées pour produire de la pâte à papier car leur rentabilité est plus élevée que pour d'autres espèces de feuillus (DAVIDSON, 1995). Pour obtenir les accroissements annuels les plus élevés possible, les industriels plantant des eucalyptus ont favorisé la création d'hybrides interspécifiques dont les meilleurs génotypes ont ensuite été multipliés par bouturage.

À Madagascar, la forêt plantée de pins et d'eucalyptus est estimée à 415 000 hectares (FAO, 2010). Elle compte une part élevée de reboisements paysans, régulièrement répartis dans beaucoup de régions. Cette dynamique de plantations paysannes conduite depuis plus d'un siècle constitue un phénomène remarquable, non connu en Afrique à une échelle comparable (MONTAGNE *et al.*, 2009). Cette dynamique s'est accélérée entre 1991 et 1998 ; plus de 16 000 hectares ont alors été plantés en milieu rural dans les six provinces malgaches (RAMAMONJISOA, 1999). Cet essor du reboisement est attribuable à la raréfaction des produits forestiers (énergie ou construction), à la volonté gouvernementale de sécurisation foncière visant à distribuer des titres de propriété après la plantation, à l'augmentation du nombre d'organisations non gouvernementales (Ong) et de financements pour protéger les berges des rivières et les sources et pour apporter un appui aux communautés villageoises (RAMAMONJISOA, 1999). La maîtrise des techniques de plantation par les populations rurales a permis d'atteindre en 1999 une superficie de près de 150 000 hectares d'eucalyptus répartis selon trois axes : Moramanga-Ambatondrazaka, Andriba-Fianarantsoa et Anjozorobe-Manjakandriana-Tsiazompaniry (RANDRIANJAFY, 1999). Entre 2005 et 2010, le taux annuel de reboisement a atteint 7,3 % (FAO, 2010). En 2014, à partir des données publiées (FAO, 2010 ; RANDRIANJAFY, 1999), il est possible d'estimer que 235 000 hectares ont été reboisés en

eucalyptus, dont 140 000 aux alentours d'Antananarivo. Une grande partie de la population malgache voit désormais dans cet arbre un investissement rentable à long terme mais aussi un patrimoine à léguer aux enfants, ce qui l'incite à faire du reboisement.

À Madagascar, les plantations d'eucalyptus ont été établies par les communautés rurales sur des sols pauvres, acides et peu propices à l'agriculture. Pour ces espèces, la recherche forestière a fortement investi dans des domaines aussi variés que les essais d'introduction et l'amélioration génétique, la sylviculture et les différents modes de gestion des plantations, l'écologie des plantations, l'érosion des sols et la nutrition minérale, les dimensions économiques et sociales des plantations, les techniques de transformation du bois et leur utilisation. Malgré ces nombreux travaux de recherche réalisés depuis plus de 50 ans, peu de résultats ont été publiés dans des revues internationales. La majorité de ces informations relève de rapports internes.

Cet article expose et discute les principaux résultats de recherche obtenus à Madagascar en prenant comme exemple *Eucalyptus robusta*. La bibliographie montre aussi que les résultats obtenus sur d'autres espèces d'*Eucalyptus* sont très souvent transférables à *E. robusta*. L'objectif principal est d'identifier les facteurs qui risquent de compromettre la durabilité de la production en bois énergie des Hautes Terres avec *E. robusta* et de proposer les thèmes de recherche à développer qui contribueront à l'amélioration des conditions de vie des populations rurales de Madagascar.



Photo 1.

L'extension des plantations villageoises d'*Eucalyptus robusta* à Madagascar se fait à partir de graines récoltées sur place et parfois commercialisées par les pépiniéristes privés (route d'Anjozorobe).

Photo D. Verhaegen.

Résultats de recherche à Madagascar

Introduction des eucalyptus à Madagascar et amélioration génétique

L'introduction du genre *Eucalyptus* à Madagascar se situe entre 1857 et 1889 (VERHAEGEN *et al.*, 2011). Les premiers reboisements ont eu lieu en 1897, après l'organisation des services des mines, des forêts et de l'agriculture. Les pépinières forestières ont été installées à proximité des grandes villes, probablement à partir de graines récoltées sur place ; cependant, l'origine des premières semences introduites reste inconnue.

À Madagascar, la croissance en plantation des espèces autochtones de forêt naturelle étant mal connue, et afin de répondre à des enjeux de production, les essences exotiques ont été rapidement retenues pour constituer les reboisements. Les genres *Eucalyptus* et *Pinus* se sont distingués en raison de leur caractère héliophile, leur rusticité et leur croissance rapide en plantation monospécifique. La synthèse des résultats issus des essais forestiers et des

arboretums a permis de dresser une liste d'une trentaine d'espèces pouvant être plantées à Madagascar (CHAIX, 2003 ; CHAIX, RAMAMONJISOA, 2001 ; SUTTER, RAKOTONOELY, 1990). Pour répondre aux besoins du marché local, des efforts ont été consentis par la recherche forestière afin de produire localement des variétés améliorées et adaptées aux différentes conditions bioclimatiques de Madagascar (tableau I).

Des vergers à graines ont été installés et gérés pour produire des variétés composites à partir d'une sélection massale phénotypique basée sur la croissance (hauteur et circonférence), et parfois la forme (rectitude et absence de fourche basse) (CHAIX, RAMAMONJISOA, 2001). Les propriétés chimiques et technologiques du bois n'ont pas été prises en compte dans les programmes d'amélioration génétique. Les vergers actuels sont composés d'arbres issus de provenances récoltées dans des aires naturelles parfois très vastes et plantés en mélange. Les arbres peu vigoureux ou présentant un défaut majeur ont été éliminés par éclaircie. Les graines sont récoltées sur les arbres laissés en place, dont le mélange constitue la variété composite (WHITE *et al.*, 2007). À partir de 1993, 70 hectares de vergers à graines ont été plantés dans toutes les régions biocli-

Tableau I.

Production des principales espèces de plantation testées dans quatre stations écologiques contrastées de Madagascar (CHAIX, 2003).

Station	Altitude (m)	Pluviométrie (mm)	Température moyenne (°C)	Sol	Espèce	Âge (ans)	Densité (tiges/ha)	Production (m ³ /ha/an)
Antsirinala	900	1 300-1 500	17-18	Ferrallitique	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	8	617	9,5
					<i>Eucalyptus maculata</i>	12	423	6,6-9,6
					<i>Eucalyptus robusta</i>	7	647	10,0-15,0
					<i>Eucalyptus grandis</i>	13	550	24,0
					<i>Eucalyptus microcorys</i>	8	444	6,5-11,0
					<i>Eucalyptus resinifera</i>	11	419	7,7
					<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	10	1 111	4,0
					<i>Eucalyptus tereticornis</i>	10	1 111	4,0-9,9
					<i>Acacia mangium</i>	5,5	1 111	5,4
Mahela	50	2 300	22-23	Latéritique	<i>Eucalyptus maculata</i>	9,5	380	14,7
					<i>Eucalyptus robusta</i>	9	310	11,1-17,3
					<i>Eucalyptus grandis</i>	7,5	470	12,6-29,5
					<i>Eucalyptus microcorys</i>	5	623	8,6
					<i>Eucalyptus resinifera</i>	9	309	10,6
					<i>Eucalyptus tereticornis</i>	4,5	690	17,6
					<i>Acacia mangium</i>	5	312	11,8
					<i>Acacia auriculiformis</i>	4	625	9,6-13,9
					<i>Acacia crassicarpa</i>	3,5	246	12,0-13,8
Kianjasoa	900	1 300	18-21	Ferrallitique	<i>Eucalyptus citriodora</i>	5,5	1 111	15,2
					<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	5,5	1 111	14,2
Toliara	100	300-500	20-24	Sableux	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	6,5	400	14,0

matiques de Madagascar en complément des réalisations antérieures. Le nombre d'espèces concernées est élevé et couvre l'essentiel des besoins en reboisement : neuf *Eucalyptus* sp., quatre *Acacia* sp., deux *Casuarina* sp., et cinq espèces diverses qui produisent aussi bien du bois de service que du bois d'œuvre (CHAIX, 2003). *Eucalyptus robusta* et *E. camaldulensis* ont été sélectionnés pour la production de bois énergie. La production de graines est effective depuis 1998 et le Silo national des graines forestières (Sngf) assure la diffusion des variétés auprès des services de l'État, d'Ong et de particuliers. Néanmoins, une part importante de l'extension des plantations en *E. robusta* est encore assurée par les pépinières villageoises (photo 1). Les graines utilisées sont récoltées sur les anciennes plantations ou à partir de régénérations naturelles (photo 2).

Les essais comparatifs de provenances d'*E. robusta* montrent que les provenances anciennement naturalisées présentent toujours des croissances faibles, quelle que soit la station d'essai. La base génétique des peuplements anciens rencontrés sur les Hautes Terres est étroite et leur variabilité génétique est faible (BOUVET, ANDRIANIRINA, 1990 ; LEBOT, RANAIVOSON, 1994). Les provenances du centre de l'aire naturelle en Australie, Elliott river, Fraser island, Noosa, David Law et Woodford, sont les plus performantes (RAZAFIMAHATRATRA, 2013). L'héritabilité de la croissance en diamètre chez *E. robusta* est faible (le coefficient d'héritabilité h^2 est compris entre 0,06 et 0,21), ce qui explique les très grandes variations de croissance des descendances des vergers. Ainsi, deux descendances d'arbres « + » sélectionnés de la provenance Coopernook ont présenté la meilleure et la plus mauvaise croissance en volume à sept ans (RAZAFIMAHATRATRA, 2013). Ces résultats auraient dû conduire à éliminer dans les vergers tous les arbres donnant de mauvais descendants, mais cette étape n'a pu être réalisée.

L'hypothèse de fécondations croisées entre tous les arbres des vergers (panmixie) n'est que très partiellement validée. À Madagascar, dans le verger à graines d'*E. grandis* pourtant isolé à Analatsary, il existe une pollution de 40 % avec du pollen extérieur non identifié (CHAIX *et al.*, 2010). Les vergers à graines d'*E. robusta* ne peuvent pas être totalement isolés car les anciens peuplements sont partout présents et apportent en grande quantité un pollen non souhaitable. En dehors de la pollution par le pollen extérieur au verger, l'autofécondation a été estimée à 3 % et des liens de parenté (consanguinité) sont observés dans 33 % des descendances. De sorte qu'un tiers seulement des graines (198/600) produites par le verger est issu de croisements entre provenances différentes (CHAIX *et al.*, 2010). Ces résultats, peu conformes à l'hypothèse de panmixie, peuvent être attribués au décalage de la période de floraison entre des provenances qui, dans leur aire naturelle, croissent dans des conditions écologiques très différentes. À Madagascar, cette phénologie décalée entre les provenances favorise un brassage génétique intra-provenance. En outre, l'apport de pollen extérieur à base génétique étroite et non souhaitable affecte la qualité des graines produites par les vergers d'eucalyptus (CHAIX *et al.*, 2007).

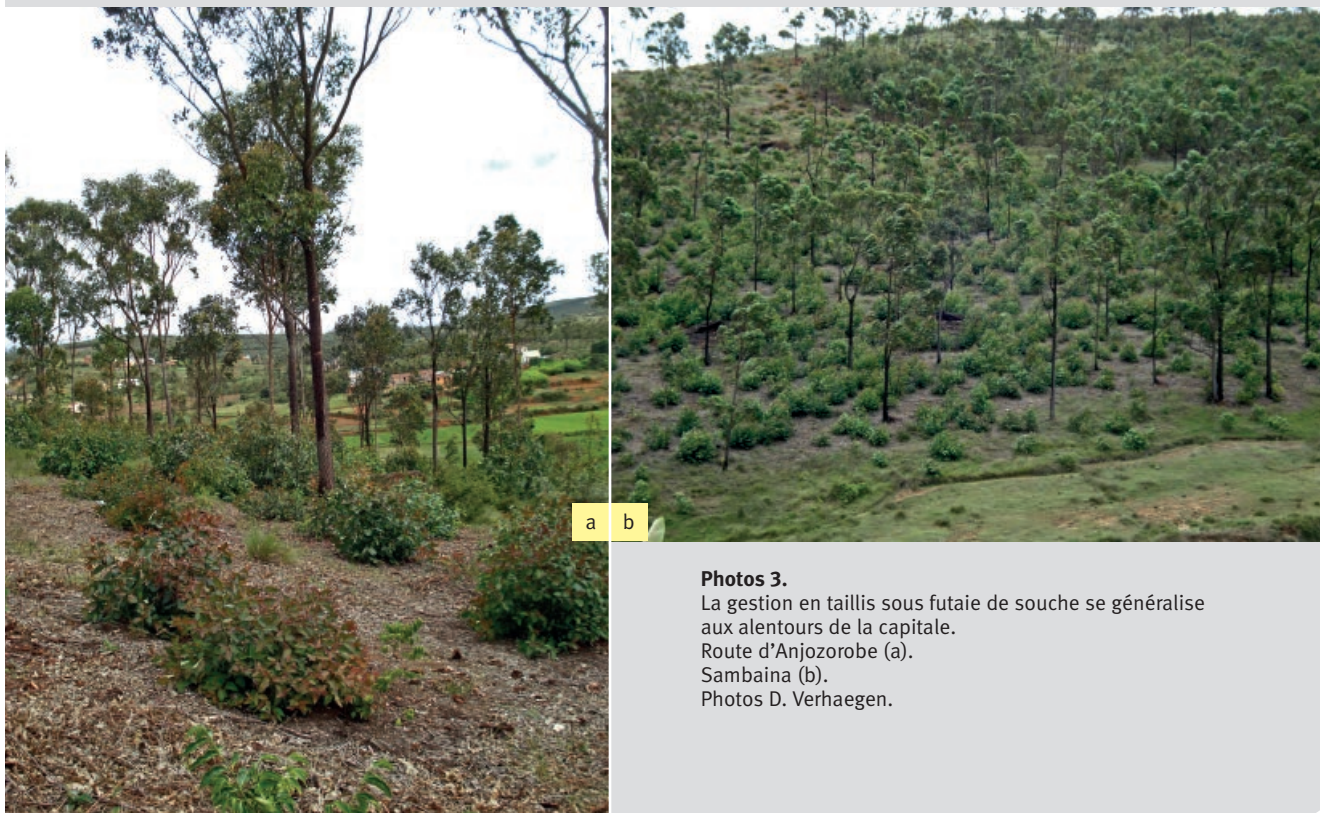


Photo 2.

La régénération naturelle existe sous *Eucalyptus robusta* et est très utilisée par les paysans pour les nouvelles plantations (sommet de colline 7 km à l'Est d'Anjozorobe). Photo D. Verhaegen.

Place des eucalyptus dans l'économie malgache

En 2009, pour une population de 17,1 millions d'habitants, la consommation nationale de bois était estimée à 17,5 millions de mètres cubes par an pour l'énergie domestique et à 4,2 millions de mètres cubes par an de bois d'œuvre et de service. Principale source d'énergie des ménages urbains et ruraux malgaches, le bois fournit près de 90 % de l'énergie totale utilisée dans le pays (MONTAGNE *et al.*, 2009). En milieu rural, la consommation de bois de feu est évaluée entre 480 et 945 kg par habitant et par an (MEYERS *et al.*, 2006). En milieu urbain, la consommation annuelle par habitant est estimée à 94 kg de bois de feu et à 110 kg de charbon de bois (RANDRIANJAFY, 1993). Un peu moins de la moitié (44 %) de la production totale de charbon de bois est fournie par les peuplements d'eucalyptus. Selon

**Photos 3.**

La gestion en taillis sous futaie de souche se généralise aux alentours de la capitale.

Route d'Anjozorobe (a).

Sambaina (b).

Photos D. Verhaegen.

les prévisions de MEYERS *et al.* (2006), la production totale durable de bois énergie et de bois de construction, d'œuvre et de service arriverait à subvenir aux besoins de consommation jusqu'aux environs de 2010 (22,5 millions de mètres cubes par an). Au-delà de cette date, la production durable de bois serait déficitaire. En 2014, ce déficit pourrait expliquer en partie les modifications observées sur les rythmes de coupe des taillis d'*E. robusta*.

Les filières bois énergie de plantation sont caractérisées par un grand professionnalisme. Les plantations appartiennent à des propriétaires forestiers coutumiers ou en indivision qui gèrent leur patrimoine pour s'assurer des entrées d'argent régulières. L'exploitation est assurée par des tâcherons, bûcherons et la carbonisation par des charbonniers. Le transport est réalisé par des professionnels et le commerce est entre les mains de grossistes qui approvisionnent des réseaux structurés de petits détaillants (MONTAGNE *et al.*, 2009).

Dans la région Alaotra-Mangoro, la production moyenne de bois d'*E. robusta* est de 43,5 m³/ha à 4 ans. Le prix du sac de charbon de 30 kg est de 1,75 €. Le rendement pondéral de carbonisation aboutit à 109 sacs, soit un revenu d'environ 192 € par hectare, hors main-d'œuvre (MONTAGNE, BERTRAND, 2012). Le faible pouvoir d'achat des consommateurs limite les possibilités de hausse des prix du bois énergie qui sont plafonnés depuis plusieurs années alors que les coûts de production (transformation, transport) sont en constante augmentation. La production de charbon de bois en milieu rural ne permet pas de sortir de la précarité mais garantit des revenus de survie (BERTRAND,

1999 ; MONTAGNE *et al.*, 2009). En conséquence de la stagnation du prix de vente du charbon de bois, les populations continuent à étendre les plantations pour maintenir leur revenu nominal et diversifient leur production vers le marché de bois d'œuvre et de service plus rémunérateur.

Sylviculture et gestion des plantations d'*Eucalyptus robusta*

Dans les conditions écologiques des Hautes Terres, une densité de plantation de 1 100 tiges à l'hectare représente un bon compromis entre la croissance initiale des plants et la maîtrise du recrû herbacé. Dans les conditions de pluviométrie et de température plus élevées de la côte Est de Madagascar, la croissance initiale des arbres est supérieure, ceux-ci pouvant atteindre 13 m à 4 ans (CHAIX, RAZAFIMAHARO, 1998). *E. robusta* convient bien à de nombreux types de gestion, en taillis, en futaie, en taillis sous futaie (photos 3) ou en lignes de brise-vent.

Les tables de production des taillis d'*E. robusta* (tableaux II) ont été établies (RANDRIANJAFY, DELEPORTE, 1998). Sur les Hautes Terres, le volume commercial bois fort, avec un minimum de 7 cm en diamètre (CAILLIEZ, 1980), sur écorce à 6 ans varie de 95 à 132 m³/ha en fonction de la qualité des sols. En considérant les conclusions de CHAUVET (1969) et de RANDRIANJAFY (1993), l'accroissement annuel courant (ALDER, 1980) d'un taillis d'*E. robusta* est maximum à 6 ans et son accroissement annuel moyen est maximum à 10 ans (tableaux II). Aucune augmentation significative de l'accroissement courant ne peut plus être obtenue entre 6 et 11 ans, la rotation

Tableaux II.

Tables de production pour taillis d'*Eucalyptus robusta* (RANDRIANJAFY, com. pers.).

Indice de fertilité du sol : IF = 0,70 pour les taillis de haut de pente et équivalents ; l'indice de fertilité correspond à une hauteur dominante moyenne des 100 plus gros rejets de 9,9 m à 6 ans.

Âge (ans)	Hto (m)	Hdo (m)	Vcom (m ³ /ha)	Ama (m ³ /ha/an)	Aca (m ³ /ha/an)	Rej (/souche)	Vso (dm ³)	Cba (cm)
01	2,0	3,1	8,4			7,0	6,7	8,8
02	3,6	5,0	22,5	11,3	14,1	5,3	18,0	14,2
03	5,0	6,5	39,2	13,1	16,7	4,3	31,4	19,1
04	6,1	7,8	57,3	14,3	18,1	3,6	45,9	23,5
05	7,1	9,0	76,1	15,2	18,8	3,2	60,9	27,3
06	7,9	9,9	95,1	15,8	19,0	3,0	76,1	30,4
07	8,6	10,7	113,9	16,3	18,9	2,8	91,1	33,2
08	9,2	11,3	132,4	16,6	18,5	2,7	106,0	35,4
09	9,7	11,9	150,5	16,7	18,0	2,6	120,4	37,5
10	10,1	12,4	167,9	16,8	17,5	2,5	134,4	39,3
15	11,5	14,1	244,7	16,3	13,9	2,3	195,7	45,1
20	12,4	15,0	303,4	15,2	10,4	2,2	242,7	48,6

IF = 0,80 pour les taillis de mi-pente et dans la majorité des cas des basses collines orientales, ainsi que ceux des bordures des routes nationales entre les deux falaises. L'indice de fertilité correspond à une hauteur dominante moyenne des 100 plus gros rejets de 11,1 m à 6 ans.

Âge (ans)	Hto (m)	Hdo (m)	Vcom (m ³ /ha)	Ama (m ³ /ha/an)	Aca (m ³ /ha/an)	Rej (/souche)	Vso (dm ³)	Cba (cm)
01	2,3	3,5	10,0			6,1	8,0	10,0
02	4,1	5,5	26,9	13,4	16,8	4,6	21,5	16,1
03	5,7	7,3	46,7	15,6	19,9	3,7	37,4	21,9
04	7,0	8,8	68,2	17,0	21,4	3,1	54,5	27,0
05	8,1	10,1	90,3	18,1	22,2	2,8	72,3	31,3
06	9,0	11,1	112,7	18,8	22,4	2,6	90,2	35,0
07	9,7	12,0	134,9	19,3	22,2	2,5	107,9	38,0
08	10,4	12,7	156,6	19,6	21,7	2,4	125,3	40,6
09	10,9	13,4	177,7	19,7	21,1	2,3	142,1	42,9
10	11,4	13,9	198,0	19,8	20,3	2,2	158,4	45,0
15	13,0	15,7	286,7	19,1	16,0	2,1	229,4	51,2
20	13,9	16,7	353,8	17,7	11,8	2,0	283,0	55,1

IF = 0,90 : peuplements de bas de pente et des cas particuliers où le sol est équilibré du point de vue de la richesse en bases échangeables, sols qui sont très particuliers, ayant un précédent cultural agricole. L'indice de fertilité correspond à une hauteur dominante moyenne des 100 plus gros rejets de 12,5 m à 6 ans.

Âge (ans)	Hto (m)	Hdo (m)	Vcom (m ³ /ha)	Ama (m ³ /ha/an)	Aca (m ³ /ha/an)	Rej (/souche)	Vso (dm ³)	Cba (cm)
01	2,6	3,8	11,8			5,5	9,5	11,0
02	4,8	6,3	31,6	15,8	19,8	4,0	25,3	18,6
03	6,5	8,3	54,8	18,3	23,3	3,2	43,9	25,4
04	8,0	10,0	79,9	20,0	25,0	2,8	63,9	31,1
05	9,2	11,4	105,7	21,1	25,8	2,5	84,6	36,1
06	10,2	12,5	131,6	21,9	25,9	2,3	105,3	40,3
07	11,1	13,5	157,3	22,5	25,6	2,2	125,8	43,7
08	11,8	14,3	182,4	22,8	25,1	2,2	145,9	46,3
09	12,4	15,0	206,6	23,0	24,3	2,1	165,3	48,9
10	12,9	15,6	230,0	23,0	23,3	2,1	184,0	50,8
15	14,5	17,5	330,9	22,1	18,0	2,0	264,7	57,4
20	15,4	18,5	406,1	20,3	13,2	1,9	324,9	61,4

Âge : âge du taillis en années ; Hto : hauteur totale moyenne du rejet en m ; Hdo : hauteur dominante moyenne du taillis en m ; Vcom : production totale en volume commercial sur écorce en m³ par hectare ; Ama : accroissement moyen annuel en volume commercial sur écorce en m³ par hectare, depuis la plantation ; Aca : accroissement courant annuel en volume commercial sur écorce en m³ par hectare, c'est la production en volume sur une courte période (1 an dans le cas des tables) ; Rej : nombre moyen de rejets en bois forts par souche ; Vso : production moyenne de tous les rejets d'une souche en volume commercial (sur écorce) en dm³ ; Cba : circonférence moyenne à la base du rejet en cm.

**Photo 4.**

Tas de souche d'*Eucalyptus robusta* avant transport vers les meules de carbonisation.

Photo D. Verhaegen.



a

b

**Photos 5.**

Souche surexploitée avec départ de rejets depuis les racines mises à nu (a) et souche dépérissante (b).

Photo D. Verhaegen.

moyenne du taillis d'eucalyptus serait donc de 7 ans en tenant compte de la disparité des types de sols entre les zones Est, Ouest et Sud d'Antananarivo (RAMAMONJISOA, 1999).

Pour un traitement en futaie, la productivité varie de 1,5 m³/ha/an sur sols très pauvres et carencés à 35 m³/ha/an sur de bons sols. Pour le traitement en futaie, il est possible de ramener progressivement la densité à l'hectare de 1 200 plants à la plantation à 400 arbres à l'exploitation. Deux éclaircies sont nécessaires avec une intensité d'éclaircie de 40 % (RAMAMONJISOA, 1999).

Pour le taillis sous futaie, avec 30 à 50 tiges de futaie par hectare, il existe deux possibilités : soit deux rotations de taillis tous les 15 ans, soit quatre rotations de taillis tous les 7 ans, ce qui permet d'obtenir les tiges de futaie à l'âge de trente ans environ. La futaie sur souche peut également être reconstituée à partir des rejets sélectionnés qui sont maintenus dans la parcelle.

Les essais ont démontré le très bon comportement d'*E. robusta* après un recépage au ras du sol (RANDRIANJAFY, com. pers.). Ce mode de gestion augmente les quantités de bois prélevées lors des coupes, sans influencer la capacité de l'espèce à rejeter. La croissance initiale des rejets est même améliorée par rapport à la croissance des rejets obtenus après un recépage traditionnel à un mètre de hauteur. Aujourd'hui, les populations rurales autour d'Antananarivo mettent en application ce type de recépage au ras du sol. Mais la méthode peut aller jusqu'à l'exploitation complète de la souche (photo 4). Les souches surexploitées dépérissent, ou bien les rejets présentent une très mauvaise conformation (photos 5) compromettant la durabilité du taillis.

Les règles sylvicoles recommandent de ne pas exploiter les taillis de moins de six ans. Mais un marché déficitaire et la grande pauvreté des populations rurales conduisent actuellement les propriétaires des plantations d'*E. robusta* à exploiter leurs plantations suivant des rotations de plus en plus courtes. Il est fréquent de voir (photo 6) des rejets de deux à quatre ans exploités, parfois même d'un an et demi (TRENDELENBURG RAKOTONIRINA, 2008). En 2014, il n'existe plus de taillis âgés de six ans ou plus dans un rayon de 50 km autour d'Antananarivo. La durabilité des taillis pourrait être compromise par de telles pratiques sylvicoles (BAZILLE, DUCROCO, 2000).

Valorisation d'*Eucalyptus robusta*

Le bois parfait d'*E. robusta* est rouge orangé à rouge brique, mi-dur, lourd (densité 720 à 920 kg/m³), cassant, très nerveux et présentant de forts retraits (photo 7). Ce bois durable est soumis à de fortes tensions internes qui se libèrent au sciage et le rendement en produit fini sans défaut reste donc faible. Le bois n'a pas besoin d'être traité pour les menuiseries intérieures et les charpentes (GUENEAU, 1969 ; RAKOTOVAO *et al.*, 2012). *E. robusta* est principalement apprécié comme bois énergie (bois de chauffe et charbon de bois), mais il est également utilisé pour la construction (échafaudages, coffrages, charpentes, planchers, lambris, portes, fenêtres), l'ameublement (lits, tables, buffets), l'emballage (caisserie), pour la fabrication de pirogues, de poteaux, de panneaux reconstitués et la production de pâte à papier (CHAIX, RAZAFIMAHARO, 1998).



Photo 6.
Exploitation des rejets âgés de 1,5 à 2 ans
(route d'Anjozorobe).
Photo D. Verhaegen.



Photo 7.
Équarris d'*Eucalyptus robusta* (20 x 20 cm) et retraits.
Photo D. Verhaegen.

La production du charbon de bois se fait en meules traditionnelles à combustion partielle et à tirage direct. La construction et la conduite de ces meules sont bien maîtrisées par les charbonniers. Le rendement pondéral de ces meules traditionnelles est de 10 à 12 %. Les améliorations techniques mises au point permettent de doubler le rendement des meules (MONTAGNE *et al.*, 2009, 2010). Le progrès est basé sur la technique traditionnelle et ne nécessite pas d'intrants nouveaux ; il n'augmente donc pas les coûts de production. Les principales améliorations concernent le séchage préalable du bois, la construction de la meule sans

creusement du sol, l'utilisation des événements d'allumage et d'aération et de la cheminée, mais aussi l'extinction de la meule par la fermeture des événements et le refroidissement lent de la meule (MONTAGNE *et al.*, 2010).

L'application de cette méthode permet au charbonnier d'obtenir 30 sacs de 50 kg de charbon de bois de bonne qualité pour une meule de 3 m de long, 1,5 m de large et 1,2 m de haut. De nombreuses actions de formation et de vulgarisation ont été entreprises (MONTAGNE *et al.*, 2010). Mais l'utilisation des meules améliorées par les charbonniers se développe peu, même si ces techniques font diminuer les superficies de forêt coupée et les coûts liés à la main-d'œuvre pour la production d'une même quantité de charbon.

Relations entre le climat, le sol et la couverture végétale

De 1961 à 1974, dans les quatre zones climatiques de Tampoketsa, Andasibe, Antanimora et Befandriana, des expérimentations ont été menées en bassins versants élémentaires pour étudier l'influence du couvert végétal, naturel ou artificiel, sur le ruissellement et l'érosion des sols. Les dispositifs d'Andasibe comparaient les plantations âgées d'*E. robusta* à la forêt naturelle et à une vieille jachère. BAILLY *et al.* (1974) ont montré que le coefficient de ruissellement (figure 1) est fortement diminué en forêt primaire ou sous plantation d'eucalyptus. La végétation forestière naturelle ou plantée régularise l'écoulement des eaux et diminue dans une forte proportion (entre 30 et 50 %) les débits spécifiques des crues. En outre, ils ont démontré que la forêt naturelle et le peuplement d'*E. robusta* évapotranspirent respectivement 100 et 250 mm de plus par an qu'une vieille jachère. Bien que les besoins hydriques des eucalyptus soient supérieurs à ceux de la vieille jachère ou la prairie naturelle, ils permettent de régulariser le débit des sources, alimentent les nappes phréatiques et écrètent les crues (BAILLY *et al.*, 1974). Les plantations d'eucalyptus permettent aussi de diminuer très fortement l'érosion par ruissellement comparativement aux pratiques traditionnelles de la culture sur brûlis ou de la prairie brûlée.

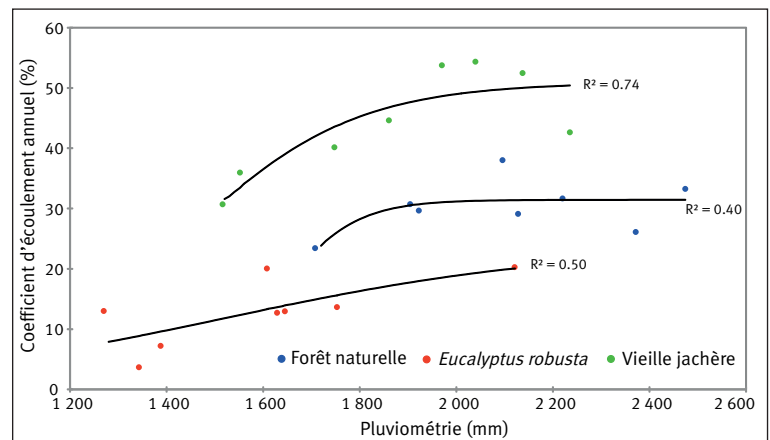


Figure 1.

Volume total d'eau écoulé annuellement du bassin versant exprimé en pourcentage de la pluviométrie. Mesures réalisées à Andasibe pendant neuf années de 1964 à 1972 sur trois bassins versants avec trois types de végétation (d'après les données de BAILLY *et al.*, 1974).

Tableau III.

Comparaison des caractéristiques des sols entre les parcelles plantées en eucalyptus et pins avec la végétation naturelle pour le calcium et l'azote (RAKOTONIRINA, com. pers.).

Élément	N	Horizon (cm)	Végétation naturelle (a)	Eucalyptus (b)	Pins (c)	Classement
Ca (cmole _c /kg sol)	15	0-20	0,12	0,02	0,03	a** > c* > b*
	10	20-30	0,05	0,02	0,03	a** > c = b ^{NS}
	14	30-75	0,03	0,02	0,03	a* > c = b ^{NS}
N (%)	15	0-20	0,19	0,16	0,13	a** > b* > c*
% profils contenant des racines en dessous de 1 m	-	-	78,6	88,5	61,1	-
			(11/14)	(23/26)	(22/36)	

N : nombre d'échantillons ; ** différences significatives à 1 % ; * différences significatives à 5 % ;
NS : différences non significatives.

Tableau IV.

Exportation d'éléments minéraux du bois et des écorces (en kilogramme par hectare) d'un taillis d'*Eucalyptus robusta* après une rotation de trois ans dans la région de Manjakandriana en comparaison avec les quantités restant dans le sol et dans la litière (TRENDELENBURG RAKOTONIRINA, 2008).

Composante	Azote (N)	Phosphore (P)	Potassium (K)	Calcium (Ca)	Magnésium (Mg)
Sol jusqu'à 86 cm	8 576*	21	276	1 157	351
Litière et feuillage	348	14	68	540	315
Bois et écorces	2	30	319	1 177	397

* Cette valeur élevée est probablement due à une mauvaise minéralisation.

En 1994, dans la région du Mangoro, l'impact sur le sol d'un taillis sous futaie d'eucalyptus a été comparé à ceux d'une plantation de *Pinus kesiya* et à la végétation naturelle, dominée par *Philippia* et *Helichrysum*, et maintenue en défens (RAKOTONIRINA, données non publiées). Les sols étudiés sont acides (3,8 < pH < 5,2). Avec plus de 50 % de l'acidité d'échange, l'acidité des horizons organiques de surface semble due à une libération d'aluminium échangeable. La quantité d'aluminium échangeable est significativement plus forte sous *Philippia* (73 %) que sous les boisements (50 %). L'analyse des éléments minéraux du sol (tableau III) montre que les reboisements en pins et en eucalyptus consomment plus d'azote et de calcium que la jachère. Les racines d'eucalyptus apparaissent plus efficaces pour traverser un horizon compact situé entre 30 et 75 cm et prélever du calcium (RAKOTONIRINA, com. pers.).

Dans la région de Manjakandriana, l'exploitation du bois non écorcé d'*E. robusta* entraîne une très forte exportation des éléments minéraux P, K, Ca et Mg (TRENDELENBURG RAKOTONIRINA, 2008) principalement contenus dans les écorces (tableau IV). Les quantités restituées au sol par les litières et le feuillage ne compensent que faiblement ces exportations. Les durées de rotation très courtes et l'exportation de toute la biomasse, sans restitution des écorces au sol, accélèrent l'épuisement des éléments minéraux des sols (RAMBELOARISON, 1987 ; TRENDELENBURG RAKOTONIRINA, 2008). Ainsi, la floraison très précoce des rejets de souche de *E. robusta* (photo 8), correspondant à un vieillissement rapide, pourrait être un premier signe de déséquilibre en nutriments du sol, comme cela est décrit pour d'autres espèces (EREL *et al.*, 2013 ; MATSOUKAS *et al.*, 2013). Les symbioses mycorhiziennes et/ou l'efficacité des racines à explorer les horizons profonds permettent actuellement la survie des vieux taillis ; en outre, le risque de mortalité pourrait être réduit par l'augmentation de la durée de rotation et une meilleure gestion des écorces.

Écologie des plantations

Les plantations d'espèces à croissance rapide telles que les eucalyptus ont été établies sur des sols acides dans de nombreuses régions de la zone tropicale et subtropicale. Depuis longtemps, les plantations d'eucalyptus font l'objet de controverses. Les naturalistes annonçaient la rupture de l'équilibre biologique naturel, la fin des sources, la stérilisation des sols et finalement l'arrivée des steppes à *bozaka* (*Andropogon gryllus*) qui succéderaient inéluctablement aux plantations d'eucalyptus. AUBREVILLE (1953) s'oppose à cette idée car il note la présence d'un sous-bois d'essences locales sous eucalyptus. Cette controverse continue, notamment sur la forte consommation en eau des eucalyptus (BROWN, GUREVITCH, 2004 ; NAMBIAR, BROWN, 1997).

À Madagascar, la biodiversité des agroécosystèmes proches des aires protégées présente un intérêt écologique car elle interagit avec celle des forêts naturelles. La présence de paysages variés et hétérogènes avec des habitats écologiques différents permet le maintien de la biodiversité. Pour maintenir ces paysages hétérogènes, il est même recommandé de favoriser la plantation et l'exploitation de ressources arborées, dont notamment l'eucalyptus sous forme de petites plantations villageoises (SERPANTIÉ *et al.*, 2007). Ces plantations d'eucalyptus participent indirectement à la conservation des écosystèmes naturels, car l'éloignement des populations rurales par rapport à la forêt naturelle est positivement corrélé à l'utilisation de l'eucalyptus en bois de service, bois d'œuvre et bois énergie (CARRIÈRE, RANDRIAMBANONA, 2007).

À Andranolava, le sol des savanes herbeuses à *Aristida similis* contient 69,9 t/ha de carbone et le sol sous eucalyptus 78,5 t/ha. La biomasse aérienne et la litière des savanes herbeuses contiennent 2,8 t/ha de carbone contre 21,7 t/ha pour le taillis d'eucalyptus. L'afforestation contribue à augmenter le stock de carbone, mais moins que prévu à cause de la minéralisation des réserves de matière organique sous reboisement et de l'exploitation rapide des rejets (SERPANTIÉ *et al.*, 2007). Ces résultats confirment bien l'importance des reboisements d'eucalyptus pour le stockage de carbone à Madagascar.

Le ramassage de l'horizon humifère sous eucalyptus se généralise sur les Hautes Terres (BAZILLE, DUCROCQ, 2000). Cette pratique amplifie la perte de carbone souterrain (photo 9). Ce terreau est utilisé comme fumure organique sur les terres agricoles et comme couche de protection et de régulation thermique dans les rizières.

Discussion

Gestion des plantations d'eucalyptus

Dans le cas des plantations d'eucalyptus, l'efficacité d'utilisation des ressources est proportionnelle à la fertilité des sites (BINKLEY *et al.*, 2004). Une revue des études sur la photosynthèse de nombreuses espèces dans différents environnements a confirmé le potentiel élevé de fixation du carbone des plantations d'eucalyptus. En conditions contrô-



Photo 8.

Floraison précoce des rejets d'*Eucalyptus robusta*.
Photo D. Verhaegen.



Photo 9.

Récolte de l'horizon humifère sous *Eucalyptus robusta* (route d'Anjozorobe).
Photo D. Verhaegen.

lées, la transpiration des eucalyptus est largement expliquée par l'index de surface foliaire (L) et le déficit de saturation de l'air (D). Les taux maximums de photosynthèse (A_{max}), de carboxylation (V_{cmax}) et de transport d'électrons (J_{max}) sont élevés en comparaison avec les autres espèces forestières feuillues, mais ces taux sont limités par la disponibilité en eau et éléments nutritifs (WHITEHEAD, BEADLE, 2004).

**Photo 10.**

Feuille d'*Eucalyptus camaldulensis* présentant un individu adulte, une larve venant d'éclore et des cocons de *Glycaspis brimblecombei*. Photo D. Verhaegen.

La gestion de la matière organique des sols est essentielle à la durabilité des peuplements d'eucalyptus. Après exploitation des arbres, les pertes limitées de nutriments par le drainage profond ont montré la remarquable efficacité des eucalyptus à maintenir un pool limité de nutriments dans l'écosystème, même après une forte perturbation du milieu (LACLAU *et al.*, 2010). Pour maintenir les plantations d'*E. robusta* sur le long terme, il apparaît nécessaire d'apporter un certain nombre de nutriments ou de respecter inconsciemment la durée de rotation des taillis (LACLAU *et al.*, 2010 ; TREDELENBURG RAKOTONIRINA, 2008).

Pour les nouvelles plantations, la diversité des espèces sera un atout majeur pour faire face aux changements climatiques et à la vulnérabilité des peuplements forestiers (CHOAT *et al.*, 2012 ; PAQUETTE, MESSIER, 2011). À Madagascar, il faudra innover en diversifiant les espèces à planter sans toutefois bouleverser la filière de bois énergie en *E. robusta*. Les résultats de recherche obtenus au Brésil et au Congo ouvrent de nouvelles perspectives pour la gestion des plantations forestières d'eucalyptus dans des conditions de stress biotique et abiotique (LACLAU *et al.*, 2013a). Les plantations avec différentes espèces d'eucalyptus en mélange peuvent augmenter leurs rendements de 10 à 30 % (FORRESTER, SMITH, 2012). Sur sols pauvres, l'association avec des légumineuses peut augmenter la biomasse produite d'un tiers et améliorer la disponibilité en azote minéral (BOUILLET *et al.*, 2013 ; VOIGTLAENDER *et al.*, 2012). La biomasse des fines racines s'accroît de 27 % dans une plantation associant acacias et eucalyptus, avec une prépondérance des racines d'eucalyptus et une augmentation de la biomasse produite par chaque eucalyptus (LACLAU *et al.*, 2013b). Ce résultat s'explique par une meilleure capture potentielle d'eau et de nutriments, évitant des pertes par drainage profond.

Pour de vieilles plantations comme celles présentes autour d'Antananarivo, l'introduction de légumineuses pourrait améliorer la productivité des taillis.

Changements globaux

Dans la région d'Antananarivo, la hausse de la température est statistiquement significative entre 1961 et 2005 (+ 1,4 °C) avec une tendance à la diminution de la pluviométrie et un allongement des séquences sèches (RABEFITIA *et al.*, 2008). *Eucalyptus robusta* étant originaire des zones marécageuses d'Australie, les modifications des conditions écologiques des Hautes Terres vont encore éloigner cette espèce de ses conditions naturelles. Près de 41 % d'eucalyptus sur 800 espèces testées sont sensibles à de faibles variations de température (± 2 °C) (BOOTH, 2013).

La combinaison de la longévité des arbres, de la forte diversité génétique intra-population et des flux de pollen élevés entre les arbres, devrait rendre les espèces forestières particulièrement résistantes aux changements de conditions environnementales, à la perte de diversité génétique et à l'extinction (HAMRICK, 2004). Toutefois, les arbres disposent d'une faible amplitude de réponses possibles face à la sécheresse (CHOAT *et al.*, 2012). Le système hydraulique fonctionnel des arbres est très vulnérable et peut se désamorcer pendant les périodes de sécheresse. Cette embolie gazeuse entraîne le dessèchement puis la mort de l'arbre (CHOAT *et al.*, 2012). De nombreux arbres fonctionnent à la limite du point de rupture de ce système hydraulique ; ainsi, 70 % de 226 espèces forestières de 81 sites fonctionnent à la limite du point de rupture (< 1 mégapascal) de ce système hydraulique. *E. grandis* présenterait des risques de cavitation (embolie), notamment dans le cas du changement climatique (LOPEZ *et al.*, 2005). *Eucalyptus robusta* qui appartient à la même section des *Transversaria* et à la série des *Salignae* pourrait donc présenter ce même risque d'autant que, sur les Hautes Terres, il se trouve dans des conditions très éloignées de son aire d'origine, où il pousse dans des zones marécageuses et inondables.

Écologie des plantations

Les stratégies de séquestration du carbone mettent en lumière le potentiel des plantations, sans considérer toutes leurs conséquences environnementales. Une revue de 600 observations démontre que les plantations diminuent globalement les flux d'eau de 227 mm par an (JACKSON *et al.*, 2005). Les plantations participent à la recharge et à l'amélioration des nappes phréatiques mais réduisent les flux des ruisseaux et augmentent la salinisation et l'acidification des sols. Ce chiffre est très proche des résultats obtenus en bassin versant dans la zone forestière d'Andasibe avec *E. robusta* (BAILLY *et al.*, 1974).

Le ralentissement de la déforestation, la restauration des forêts et le reboisement sous les tropiques semblent les meilleurs mécanismes pour ralentir le changement climatique (JACKSON *et al.*, 2008). Les forêts tropicales combinent des taux de stockage rapide du carbone et des effets biophysiques bénéfiques dans de nombreux cas, dont une plus grande pluviométrie de convection. À Madagascar, de petites plantations villageoises peuvent contribuer au stockage de carbone en lisière de forêt naturelle sous climat humide, et au maintien de la biodiversité (SERPANTIÉ *et al.*, 2007).

Amélioration génétique

Dans le contexte des changements globaux, les variétés composites comme celles créées à Madagascar ne garantissent plus un avenir durable aux reboisements. La sélection phénotypique sur la vigueur des arbres a été peu efficace, en raison principalement de la faible héritabilité de ce trait le coefficient h^2 varie chez les espèces forestières entre 0,19 et 0,26 (WHITE *et al.*, 2007). Ainsi, pour le diamètre, $h^2 = 0,11$ chez *E. globulus* (CALLISTER *et al.*, 2013), $h^2 = 0,27$ pour *E. viminalis* (CAPPA *et al.*, 2010) et $0,06 < h^2 < 0,21$ pour *E. robusta* à Madagascar (RAZAFIMAHATRATRA, 2013). Les propriétés chimiques et technologiques du bois, essentielles pour le bois d'œuvre et le charbon de bois, n'ont malheureusement pas été prises en compte lors de la sélection des arbres et de la création des vergers à graines malgaches. Pourtant, la sélection est ici beaucoup plus efficace car ces variables liées aux propriétés des bois sont fortement héritables ($0,3 < h^2 < 0,6$) (WHITE *et al.*, 2007). L'héritabilité de la densité du bois est forte ($h^2 > 0,4$) (APIOLAZA *et al.*, 2005), et celle du taux de lignine, des extractibles et des retraits est très forte ($0,42 < h^2 < 0,64$) (POKE *et al.*, 2006). La densité du bois est également fortement corrélée au pourcentage de carbone libre (DOS SANTOS *et al.*, 2011; HEIN *et al.*, 2012) et donc à la qualité du charbon.

À Madagascar, il conviendrait de modifier le mode de production de semences forestières pour obtenir des variétés adaptées aux besoins des populations rurales et faire face aux changements globaux. La résilience effective des peuplements suppose une diversification accrue des espèces et des provenances utilisées en reboisement. HOFFMANN et SGRÖ (2011) considèrent que le seuil de survie aux changements climatiques d'une espèce pourra être augmenté en accélérant la vitesse d'adaptation, notamment dans le cas de projets de plantation, cela en associant des provenances diverses relevant d'aires aux conditions climatiques contrastées. Cette mesure pourra être assurée avec *E. robusta*, si les plantations futures recourent à une diversification des meilleures provenances. Cela suppose de créer de nouveaux vergers à graines où les sélections porteront sur tous les traits d'intérêt, en favorisant un brassage génétique intra-provenance mieux contrôlé. L'adaptation aux variations climatiques passera soit par la plantation de parcelles d'origines génétiques sélectionnées et contrastées, soit par la fourniture de semences diversifiées en mélange.

Les risques biotiques sont présents à Madagascar et seront également à prendre en considération dans les programmes d'amélioration d'*E. robusta*. Depuis 2010, les peuplements d'*E. camaldulensis* sont attaqués massivement par le psylle *Glycaspis brimblecombei* (photo 10). Une mortalité non négligeable est observée dans les peuplements (photo 11) et sur les arbres isolés de toute l'île de Madagascar et un transfert du parasite vers *E. robusta* est à craindre.

Conclusion

Les modifications écologiques et anthropiques (changement du mode de gestion des plantations, base génétique insuffisante, carences de nutriments, hausse de la température, modifications pluviométriques et attaques parasitaires) qui se manifestent durablement à Madagascar auront vraisemblablement un impact majeur sur la productivité des boisements en eucalyptus. Les revenus des paysans des Hautes Terres de Madagascar risquent donc de diminuer si la dynamique de replantation s'arrête ou diminue, ou si la productivité des taillis chute. Dans un proche avenir, un enjeu sera d'augmenter la productivité des plantations en *Eucalyptus* dans un contexte de changement global. Pour assurer la durabilité de ces peuplements, il faudra répondre à plusieurs questions.

Les espèces utilisées actuellement pourront-elles s'acclimater ou s'adapter aux nouvelles conditions climatiques ? Faut-il modifier les pratiques sylvicoles de plantation, de nutrition et de gestion des taillis ? Quelles espèces complémentaires faudra-t-il choisir et quelles variétés faudra-t-il créer pour le reboisement ? Comment identifier rapidement les meilleurs génotypes ? Répondre à ces questions supposera d'avoir une connaissance approfondie du mode de fonctionnement et des propriétés intrinsèques des arbres et des relations entre ceux-ci et leur environnement. Aujourd'hui, des outils de mesure simples sont disponibles pour analyser la variabilité des propriétés technologiques et chimiques des bois (HEIN *et al.*, 2012 ; CAMPOS MAIOLI *et al.*, 2013 ; MONTEIRO *et al.*, 2010 ; POKE *et al.*, 2006). La variabilité des réponses des provenances aux changements climatiques peut être évaluée via la résistance à la cavitation et la mesure de l'épaisseur des parois (COCHARD *et al.*, 2005, 2008). Les techniques classiques d'amélioration génétique pourront être accélérées grâce au séquençage du génome d'*E. grandis*, mis à disposition de la communauté scientifique et maintenant utilisable pour d'autres espèces d'eucalyptus¹. Cette séquence du génome facilitera le développement des outils de génomique et l'utilisation de nouvelles méthodes de sélection (DENIS, BOUVET, 2013 ; GRATTAPAGLIA *et al.*, 2012).

La recherche doit se maintenir dans les différents domaines des sciences économiques et sociales, de l'écologie, de l'amélioration génétique et de l'écophysiologie. Les connaissances acquises sur les plantations d'eucalyptus devront être complétées en utilisant les avancées technologiques dans ces différents domaines de recherche afin d'améliorer les conditions de vie des populations rurales.

¹ <http://www.phytozome.net/eucalyptus.php>.



Photo 11.
Mortalité observée, sur la route de Tsiroanomandidy,
d'*Eucalyptus camaldulensis* attaqué par *Glycaspis*
brimblecombei.

Références bibliographiques

- ALDER D., 1980. Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers avec référence particulière aux forêts tropicales. Étude et prévision de la production. Rome, Italie, Fao, Étude Fao Forêts, 22 (2), 239 p.
- APIOLAZA L. A., RAYMOND C. A., YEO B. J., 2005. Genetic variation of physical and chemical wood properties of *Eucalyptus globulus*. *Silvae Genetica*, 54 (4-5): 160-166.
- AUBRÉVILLE A., 1953. Il n'y aura pas de guerre de l'eucalyptus à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 30 : 3-7.
- BAILLY C., BENOÎT DE COIGNAC G., MALVOS C., NINGRE J.-M., SARRAILH J.-M., 1974. Étude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar : expérimentations en bassins versants élémentaires. Nogent-sur-Marne, France, Gerdat-Ctft, Cahiers scientifiques, supplément de Bois et Forêts des Tropiques, 4, 114 p.
- BAZILLE D., DUCROCQ L., 2000. Caractérisation et dynamique des peuplements d'*Eucalyptus robusta* dans la zone Nord-Est d'Antananarivo. Rapport de stage. Val-de-Reuil, France, Esitpa, 45 p.
- BERTRAND A., 1999. La dynamique séculaire des plantations d'eucalyptus sur les hautes terres malgaches. *African Studies Quarterly*, 3 (2) : 61-68.
- BINKLEY D., STAPE J. L., RYAN M. G., 2004. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management*, 193 (1-2): 5-16.
- BOOTH T. H., 2013. Eucalypt plantations and climate change. *Forest Ecology and Management*, 301: 28-34.
- BOUILLET J.-P., LACLAU J.-P., GONCALVES J. L. D., VOIGTLAENDER M., GAVA J. L., LEITE F. P., HAKAMADA R., MARESCHAL L., MABIALA A., TARDY F., LEVILLAIN J., DELEPORTE P., EPRON D., NOUVELLON Y., 2013. Eucalyptus and Acacia tree growth over entire rotation in single- and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. *Forest Ecology and Management*, 301: 89-101.
- 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.
- BROWN K. A., GUREVITCH J., 2004. Long-term impacts of logging on forest diversity in Madagascar. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101 (16): 6045-6049.
- CAILLIEZ F., 1980. Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers avec référence particulière aux forêts tropicales. Estimation des volumes. Rome, Italie, Eao, Étude Fao Forêts, 22 (1), 107 p.
- CALLISTER A. N., ENGLAND N., COLLINS S., 2013. Predicted genetic gain and realised gain in stand volume of *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes*, 9 (2): 361-375.
- BARBOSA MAIOLI CAMPOS A. C., CHAIX G., DAVRIEUX F., TRUGILHO P., DA SILVA VIEIRA R., NAPOLI A., 2013. NIR spectroscopy for the prediction of fixed carbon on Eucalyptus charcoal for steelmaking industry. In: V. Bellon Maurel, P. Williams, G. Downey, IRSTEA. NIR 2013 Proceedings of 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy: Picking up good vibrations. La Grande-Motte, France, 2-7 June 2013. France, p. 506-509.

- CAPPA E. P., PATHAUER P. S., LOPEZ G. A., 2010. Provenance variation and genetic parameters of *Eucalyptus viminalis* in Argentina. *Tree Genetics & Genomes*, 6 (6): 981-994.
- CARRIÈRE S. M., RANDRIAMBANONA H., 2007. Biodiversité introduite et autochtone : antagonisme ou complémentarité ? Le cas de l'eucalyptus à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 292 (2) : 5-21.
- CHAIX G., 2003. Bilan et recommandations sur la gestion du dispositif de production de semences forestières améliorées et le programme d'amélioration génétique des espèces feuillues à croissance rapide à Madagascar. Fofifa-Cirad, 55 p.
- CHAIX G., RAMAMONJISOA L., 2001. Production de semences pour les reboisements malgaches. *Bois et Forêts des Tropiques*, 269 (3) : 49-63.
- CHAIX G., RAZAFIMAHARO V., 1998. *Eucalyptus robusta* Smith. *Le Flamboyant*, 48 : 5-9.
- CHAIX G., VIGNERON P., RAZAFIMAHARO V., HAMON S., 2007. Are phenological observations sufficient to estimate the quality of seed crops from a *Eucalyptus grandis* open-pollinated seed orchard? Consequences for seed collections. *New Forests*, 33 (1): 41-52.
- CHAIX G., VIGNERON P., RAZAFIMAHARO V., HAMON S., 2010. Improved management of Malagasy *Eucalyptus grandis* seed orchards using microsatellites and paternity assignment. *Journal of Tropical Forest Science*, 22 (3): 271-280.
- CHAUVET B., 1969. Inventaire des espèces forestières introduites à Madagascar. Tananarive, Madagascar, École normale supérieure agronomique, 188 p.
- CHOAT B., JANSEN S., BRODRIBB T. J., COCHARD H., DELZON S., BHASKAR R., BUCCI S. J., FEILD T. S., GLEASON S. M., HACKE U. G., JACOBSEN A. L., LENS F., MAHERALI H., MARTINEZ-VILALTA J., MAYR S., MENCUCINI M., MITCHELL P. J., NARDINI A., PITTMANN J., PRATT R. B., SPERRY J. S., WESTOBY M., WRIGHT I. J., ZANNE A. E., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491: 752-755.
- COCHARD H., BARIGAH S. T., KLEINHENTZ M., ESHEL A., 2008. Is xylem cavitation resistance a relevant criterion for screening drought resistance among *Prunus* species? *Journal of Plant Physiology*, 165 (9): 976-982.
- COCHARD H., DAMOUR G., BODET C., THARWAT I., POIRIER M., AMÉGLIO T., 2005. Evaluation of a new centrifuge technique for rapid generation of xylem vulnerability curves. *Physiologia Plantarum*, 124 (4): 410-418.
- DAVIDSON J., 1995. Ecological aspects of *Eucalyptus* plantations. In: White K., Ball J., Kashio M. (eds). *Proceedings of the Regional Expert Consultation on Eucalyptus*, 4-8 October, 1993. Bangkok, Thaïlande, FAO Regional Office for Asia and the Pacific, vol. I, 35-60.
- DENIS M., BOUVET J.-M., 2013. Efficiency of genomic selection with models including dominance effect in the context of *Eucalyptus* breeding. *Tree Genetics & Genomes*, 9 (1): 37-51.
- DOS SANTOS R. C., CARNEIRO A. D. O., CASTRO A. F. M., CASTRO R. V. O., BLANCHE J. J., DE SOUZA M. M., CARDOSO M. T., 2011. Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of eucalyptus. *Scientia Forestalis*, 39 (90): 221-230.
- EREL R., YERMIYAHU U., VAN OPSTAL J., BEN-GAL A., SCHWARTZ A., DAG A., 2013. The importance of olive (*Olea europaea* L.) tree nutritional status on its productivity. *Scientia Horticulturae*, 159: 8-18.
- FAO, 2010. Global forest resources assessment. Main Report. Rome, Italie, Fao, Forestry Paper, 163, 378 p.
- FORRESTER D. I., SMITH R. G. B., 2012. Faster growth of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus pilularis* in mixed-species stands than monocultures. *Forest Ecology and Management*, 286: 81-86.
- GRATTAPAGLIA D., VAILLANCOURT R. E., SHEPHERD M., THUMMA B. R., FOLEY W., KÜLHEIM C., POTTS B. M., MYBURG A. A., 2012. Progress in Myrtaceae genetics and genomics: *Eucalyptus* as the pivotal genus. *Tree Genetics & Genomes*, 8 (3): 463-508.
- GUENEAU P., 1969. Caractéristiques et utilisations de l'*Eucalyptus robusta* à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 124: 53-65.
- HAMRICK J. L., 2004. Response of forest trees to global environmental changes. *Forest Ecology and Management*, 197 (1-3): 323-335.
- HEIN P. R. G., BOUVET J. M., MANDROU E., CLAIR B., VIGNERON P., CHAIX G., 2012. Age trends of microfibril angle inheritance and their genetic and environmental correlations with growth, density and chemical properties in *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. *Annals of Forest Science*, 69: 681-691.
- HEIN P. G. R., LIMA J. T., CHAIX G., 2010. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. *Holzforchung*, 64 (1): 45-54.
- HOFFMANN A. A., SGRÒ C. M., 2011. Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 470: 479-485.
- IGLESIAS-TRABADO G., WILSTERMANN D., 2008. *Eucalyptus universalis*. Global cultivated eucalypt forests map 2008. Version 1.01. In: GIT Forestry Consulting's Eucalyptologies: Information resources on Eucalyptus cultivation worldwide. <http://www.git-forestry.com>
- JACKSON R. B., JOBBAGY E. G., AVISSAR R., ROY S. B., BARRETT D. J., COOK C. W., FARLEY K. A., LE MAITRE D. C., MCCARL B. A., MURRAY B. C., 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 310: 1944-1947.
- JACKSON R. B., RANDERSON J. T., CANADELL J. G., ANDERSON R. G., AVISSAR R., BALDOCCHI D. D., BONAN G. B., CALDEIRA K., DIFFENBAUGH N. S., FIELD C. B., HUNGATE B. A., JOBBAGY E. G., KUEPPERS L. M., NOSETTO M. D., PATAKI D. E., 2008. Protecting climate with forests. *Environmental Research Letters*, 3 (4): 1-5.
- LACLAU J.-P., RANGER J., DE MORAES GONÇALVES J. L., MAQUÈRE V., KRUSCHE A. V., THONGO M'BOU A., NOUVELLON Y., SAINT-ANDRÉ L., BOUILLET J.-P., DE CASSIA PICCOLO M., 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 (9): 1771-1785.

- LACLAU J.-P., DE MORAES GONÇALVES J. L., STAPE J. L., 2013a. Perspectives for the management of eucalypt plantations under biotic and abiotic stresses. *Forest Ecology and Management*, 301: 1-5.
- LACLAU J.-P., NOUVELLON Y., REINE C., GONCALVES J. L. D., KRUSHE A. V., JOURDAN C., LE MAIRE G., BOUILLET J.-P., 2013b. Mixing *Eucalyptus* and *Acacia* trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. *Ecologia*, 172 (3): 903-913.
- LEBOT V., RANAIVOSON L., 1994. *Eucalyptus* genetic improvement in Madagascar. *Forest Ecology and Management*, 63 (2-3): 135-152.
- LOPEZ O. R., KURSAR T. A., COCHARD H., TYREE M. T., 2005. Interspecific variation in xylem vulnerability to cavitation among tropical tree and shrub species. *Tree Physiology*, 25 (12): 1553-1562.
- MATSOUKAS I. G., MASSIAH A. J., THOMAS B., 2013. Starch metabolism and antiflorigenic signals modulate the juvenile-to-adult phase transition in *Arabidopsis*. *Plant, Cell and Environment*, 36: 1802-1811.
- MEYERS D., RAMAMONJISOA B., SÈVE J., RAJAFINDRAMANGA M., BURREN C., 2006. Étude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar. Antananarivo, Madagascar, USAID, IRG, 93 p.
- MONTAGNE P., BERTRAND A., 2012. Kajjala, Tattali, Djekabaara. Valoriser les produits pour mieux conserver les forêts. Tome 1 : Les expériences nationales. Volume 1 : Madagascar. Antananarivo, Madagascar, Cite, 186 p.
- MONTAGNE P., CREHAY R., RASAMINDISA A., RAZAFIMAHATRATRA S., 2010. Bonnes pratiques de carbonisation à Madagascar. Antananarivo, Madagascar, Cirad, Cra-W, Fofifa, Partage, 30 p.
- MONTAGNE P., RAZAFIMAHATRATA S., RASAMINDISA A., CREHAY R., 2009. Arina : le charbon de bois à Madagascar, entre demande urbaine et gestion durable. Antananarivo, Madagascar, Cite, 187 p.
- MONTEIRO T. C., DA SILVA R. V., LIMA J. T., HEIN P. R. G., NAPOLI A., 2010. Use of infrared spectroscopy to distinguish carbonization processes and charcoal sources. *Revista Cerne*, 16 (3): 331-390.
- NAMBIAR E. K. S., BROWN A. G., 1997. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Canberra, Australie, Csiro, 571 p.
- PAQUETTE A., MESSIER C., 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography*, 20 (1): 170-180.
- POKE F. S., POTTS B. M., VAILLANCOURT R. E., RAYMOND C. A., 2006. Genetic parameters for lignin, extractives and decay in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science*, 63 (8): 813-821.
- RABEFITIA Z., RANDRIAMAROLAZA L. Y. A., RAKOTONDRA-FARA M. L., TADROSS M., YIP Z. K., 2008. Le changement climatique à Madagascar. Antananarivo, Madagascar, Direction générale de la météorologie, 32 p.
- RAKOTOVAO G., RABEVOHITRA A. R., COLLAS DE CHATELPERRON P., GUIBAL D., GÉRARD J., 2012. Atlas des bois de Madagascar. Versailles, France, Éditions Quæ, 413 p.
- RAMAMONJISOA B., 1999. Rapport de compilation et d'analyse des données existantes sur le secteur des plantations forestières de Madagascar : état des plantations villageoises et familiales malgaches d'aujourd'hui. Programme en partenariat Fao/CE Gcp/Int/679/EC, 29 p.
- RAMBELOARISON G. E., 1987. Conduite d'exploitation et de sylviculture dans un taillis d'*Eucalyptus robusta* à Andranomangatsiaka, Fivondronnampokontany de Manjakandriana. PhD, Université de Madagascar, Antananarivo, 99 p.
- RANDRIANJAFY H., 1993. Production et aménagement des taillis d'eucalyptus à courte rotation. Zurich, Suisse, École polytechnique fédérale de Zurich, 236 p.
- RANDRIANJAFY H., 1999. Les plantations d'eucalyptus à Madagascar : superficie, rôle et importance des massifs. Programme en partenariat FAO/CE GCP/Int/679/EC, 18 p.
- RANDRIANJAFY H., DELEPORTE P., 1998. Tables de production des taillis d'*Eucalyptus robusta* pour la région de Manjakandriana. Non publié. Fofifa/Drfp.
- RAZAFIMAHATRATRA A. R., 2013. Étude de la variabilité génétique et des interactions génotype x environnement de *Eucalyptus robusta* à Madagascar. Mémoire de fin d'études, diplôme d'ingénieur en sciences agronomiques, 60 p.
- SERPANTIÉ G., RASOLOFOHARINORO, CARRIÈRE S. (ÉDS), 2007. Transitions agraires, dynamiques écologiques et conservation. Cite, IRD, 278 p.
- SUTTER E., RAKOTONOELY J., 1990. Introduction d'espèces exotiques à Madagascar. Projet d'inventaire des ressources ligneuses. Antananarivo, Madagascar, Fofifa/DRFP, vol. 7, 831 p.
- TRENDELENBURG RAKOTONIRINA M.-C., 2008. Exportation d'éléments minéraux par un taillis d'eucalyptus sur les hautes terres centrales malgaches. *Bulletin de l'Académie Malgache*, 87 (1) : 117-129.
- VERHAEGEN D., RANDRIANJAFY H., MONTAGNE P., DANTHU P., RABEVOHITRA R., TASSIN J., BOUVET J.-M., 2011. Historique de l'introduction du genre *Eucalyptus* à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 309 (3) : 17-25.
- VOIGTLAENDER M., LACLAU J.-P., GONCALVES J. L. D., PICCOLO M. D., MOREIRA M. Z., NOUVELLON Y., RANGER J., BOUILLET J.-P., 2012. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. *Plant and Soil*, 352 (1-2): 99-111.
- WHITE T. L., ADAMS W. T., NEALE D. B., 2007. *Forest Genetics*. Wallingford, Royaume-Uni, CAB International, 682 p.
- WHITEHEAD D., BEADLE C. L., 2004. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management*, 193 (1-2): 113-140.