

Utilisation des fourrés xérophiles sur sol calcaire pour la fabrication de charbon de bois et l'abattis-brûlis dans le district Toliara II (sud-ouest de Madagascar)

Use of xerophytic thickets on calcareous soil for the production of charcoal and slash-and-burn agriculture in Toliara II district (southwest Madagascar)

Heriniaina Olivier RADOSY¹
Josoa Ramarolanonana RANDRIAMALALA¹
Stéphanie M. CARRIÈRE²
Dominique HERVÉ²

(1) Département des Eaux et Forêts, École Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175, Antananarivo 101, Madagascar (vonenina@gmail.com; rramrolanonana@yahoo.fr)

(2) Institut de Recherche pour le Développement, UMR 268 SENS (IRD, CIRAD, UPV, Univ. Montpellier 2), Site Saint-Charles, 34199 Montpellier Cedex 5, France (stephanie.carriere@ird.fr; dominique.herve@ird.fr)

Résumé

Le fonctionnement de l'écosystème des fourrés xérophiles du sud-ouest de Madagascar est encore mal connu. Le caractère semi-aride du climat limite la régénération de cette formation végétale selon le type de sol et les prélèvements par les populations locales. L'objectif de cette étude est d'analyser les effets de deux pratiques, fabrication de charbon de bois et agriculture sur brûlis ou hatsake, sur les fourrés xérophiles sur dalle calcaire. Trente placeaux carrés de 100 m² ont été échantillonnés dans deux communes rurales du district Toliara II, pour étudier la diversité, la structure, la régénération naturelle dans les fourrés xérophiles peu perturbés, les fourrés exploités pour la fabrication de charbon de bois, et dans les recrûs post-agricoles âgés de 10 à 30 ans. Cinquante-et-un carrés de 16 m² ont été échantillonnés selon le type de perturbation : fourrés utilisés pour l'agriculture sur brûlis, fourrés exploités pour la fabrication de charbon de bois, fourrés peu perturbés, pour estimer la biomasse épigée par la méthode destructive. Les résultats montrent que le charbon de bois et la culture sur brûlis modifient la composition floristique des recrûs post-agricoles et diminuent la richesse spécifique des fourrés. Néanmoins ces deux perturbations n'affectent pas l'indice de régularité. La fabrication de

charbon de bois et la culture sur brûlis réduisent la densité arbustive des fourrés xérophiles et la hauteur totale des individus semenciers. De même, les pratiques du hatsake et du charbonnage réduisent la densité arbustive des fourrés xérophiles, la hauteur totale des individus semenciers et la biomasse épigée ligneuse. Enfin, la fabrication de charbon de bois et la pratique de la culture sur brûlis réduisent la capacité de régénération des fourrés xérophiles qui est déjà faible.

Mots clés : Biomasse, régénération, perturbation, agriculture sur brûlis.

Abstract

Little is known about the functioning of xerophytic thickets in southwestern Madagascar. Intensively exploited by local population, extreme climatic conditions limit the regeneration of this plant formation according to soil type. Focusing on the effects of human disturbance, this study investigates: the effects of slash-and-burn practice for crop cultivation, and charcoal production, on the xerophytic thickets on calcareous soil. Thirty square plots of 100 m² were randomly sampled according to the type of disturbance: slash-and-burn agriculture or woody charcoal production areas vs. less disturbed areas (selective logging) in two communes of Toliara II district. The diversity, stem density, and total height of all plants were recorded in charcoal production and fallow area aged from 10 to 30 years (to studying the effect of slash-and-burn crop cultivation). Fifty-one square plots of 16 m² also were randomly sampled to estimate the above ground biomass using the harvesting method. Results show that charcoal production and slash-and-burn practices reduced species richness and modify floristic composition. These disturbances also decreased mean height, stem density and the above-ground biomass. Finally, shrub regeneration rates were low even in less disturbed areas, however, slash-and-burn agriculture and charcoal production reduced the already weakened regeneration capacity of the xerophytic thickets

Key words : Biomass, regeneration, disturbance, crop cultivation.

Introduction

Les fourrés xérophiles du sud-ouest de Madagascar sont des formations végétales sèches spécialisées en termes d'adaptation à un climat semi-aride. Leur apparition tient au fait que les conditions pédoclimatiques ne permettent plus la formation de forêt dense sèche ($P < 600$ mm/an, saison sèche très marquée > 9 mois ; Guillaumet & Koechlin, 1971 ; Razanaka, 1996). Le fonctionnement de ces fourrés xérophiles est encore mal connu actuellement. Les études en zone semi-aride à Madagascar se rapportent majoritairement aux forêts denses sèches du Sud-Ouest (Raherison & Grouzis, 2005 ; Blanc-Pamard *et al.*, 2005) et à celles de l'ouest (Rohner & Sorg, 1986 ; Sorg & Rohner, 1996 ; Raha-rimalala *et al.*, 2010). Les études concernant les fourrés épineux concernent surtout la zone littorale (Randriamalala *et al.*, 2016, Randriamalala *et al.*, 2017).

Dans le district de Toliara II, choisi comme zone d'étude, les fourrés xérophiles font l'objet d'une déforestation importante (Masezamana *et al.*, 2013). Ils servent de pâturage aux petits ruminants et sont exploités pour la production de charbon de bois. Ils constituent également une réserve foncière de

terres arables pour l'agriculture sur brûlis notamment dans la partie nord du district de Toliara II où les précipitations sont plus importantes que dans la partie sud (Blanc-Pamard *et al.*, 2005 ; Rabeniala *et al.*, 2009 ; Raliarivelo *et al.*, 2010).

L'agriculture sur brûlis est l'une des principales causes de dégradation de la forêt (Mass, 1995). Elle consiste en un défrichement de la forêt « naturelle » primaire, mature ou secondaire, suivi d'un brûlis de la végétation afin d'obtenir, grâce aux cendres, des éléments minéraux facilement assimilables par les cultures. Les parcelles défrichées sont mises en culture quelques années avant d'être mises en jachère (Giardina *et al.*, 2000).

Le fait d'abattre les arbustes et de les brûler affecte fortement et pendant une période assez longue la richesse spécifique et la biomasse des formations forestières qui s'installent dans les recrûs (Randriamalala *et al.*, 2015). Cette mise en culture entraîne la fragmentation progressive des forêts de manière plus ou moins définitive selon les pratiques mises en œuvre et fixe la durée des jachères et par conséquent les périodes de rotation agricole (Ravonjimalala *et al.*, 2017). Le feu peut également nuire à la régénération des formations naturelles (réduction du taux de régénération et de la richesse spécifique) suite à la réduction voire la destruction complète de la banque de graines du sol (Mamede & de Araújo, 2008 ; Randriamalala *et al.*, 2015). Il peut également réduire la fertilité du sol : perte de la matière organique dans le sol, des nutriments par exportation ou lessivage, modification des propriétés physico-chimiques du sol (Alegre & Cassel, 1996.) Cette déforestation peut aussi avoir des effets négatifs sur l'équilibre hydrologique de la zone en question. En effet, la disparition de la formation végétale a des effets sur le cycle de l'eau : diminution de l'hygrométrie, augmentation de l'évapotranspiration et du ruissèlement lors des périodes de pluie favorisant l'érosion hydrique. Enfin, la pratique de l'agriculture sur brûlis contribue également à l'accentuation du réchauffement climatique par l'émission de dioxyde de carbone, un gaz à effet de serre (Tinker *et al.*, 1996).

Le charbon de bois (CB) constitue l'une des principales sources d'énergie domestique dans les pays en voie de développement comme Madagascar (Ramamonjisoa, 1993). La coupe de bois pour la production de CB ou de bois de chauffe est l'une des principales causes de la dégradation des forêts en zone semi-aride (Wezel & Bender, 2004). Dans le district de Toliara II, le charbon de bois produit dans la zone sert majoritairement à alimenter la ville de Toliara en combustible domestique bon marché (Masezamana *et al.*, 2013).

La plupart des analyses sur la fabrication de CB abordent les aspects socioéconomiques de cette activité par une analyse de filière (Ramamonjisoa, 1993 ; Pandey, 2002 ; Pote *et al.*, 2006). Les effets des prélèvements de bois ou de la fabrication de CB sur les forêts sèches (FS) sont par contre peu abordés. La coupe des arbres et des arbustes pour la production de CB peut pourtant entraîner une réduction de leur densité (Wezel & Bender, 2004 ; Raoliarivelo *et al.*, 2010 ; Oduori *et al.*, 2011). Par ailleurs, le risque de départ de feu incontrôlé est également omniprésent et présente lui aussi un risque pour ces formations (Wezel & Bender, 2004).

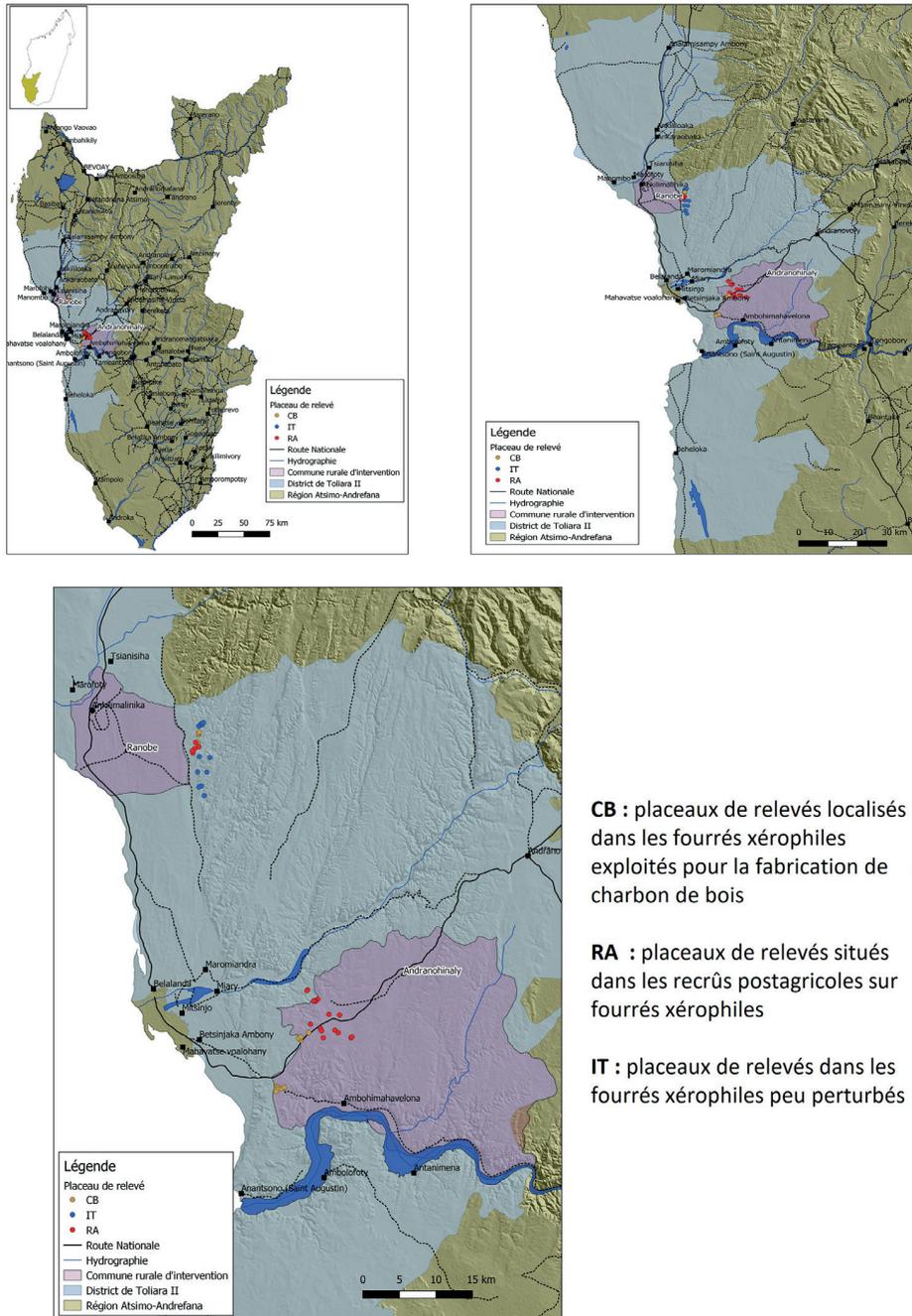
Rares sont les études qui analysent conjointement les effets de la fabrication de CB et de l'agriculture sur brûlis sur les fourrés xérophiles (FX). Néanmoins, il a été montré que les fourrés localisés aux alentours des villages sont surexploités : la fabrication de CB réduit la diversité et la densité des FX et le prélèvement de bois correspondant dépasse la productivité de cet écosystème (Raoliarivelo *et al.*, 2010). Il faut préciser que ces études ont été réalisées à l'échelle relativement restreinte d'une seule

commune, celle de Soalara-sud. De plus, l'effet de l'interaction de ces fourrés avec l'agriculture sur brûlis a été peu abordé. Ce travail vise à combler cette lacune en analysant les effets de la fabrication de CB et de l'agriculture sur brûlis sur le fonctionnement des FX (diversité, structure spatiale, régénération et production). Ce travail analyse les effets de la fabrication de CB et de l'agriculture sur brûlis sur le fonctionnement des fourrés sur dalle calcaire, car en termes de surface occupée, ces formations sont les plus abondantes dans la zone d'étude. En outre, du point de vue de la biomasse épigée, de la structure (densité, hauteur totale moyenne) et de la diversité (richesse spécifique et indice de régularité), il n'y pas de différence significative entre ces formations peu perturbées et celles se développant sur sables roux, seule la composition floristique diffère (Randriamalala *et al.*, 2016, 2019). Par ailleurs, les effets de l'agriculture sur brûlis ont été analysés par l'étude des recrûs post-agricoles âgés de 10 à 30 ans. Il s'agit de qualifier la résilience (faible ou forte) des FX face (i) à la fabrication de CB et (ii) à la pratique de l'agriculture sur brûlis. La résilience écologique de l'écosystème des FX est sa capacité à retrouver un fonctionnement normal après avoir subi une perturbation importante (Holling, 1973).

Matériels et méthodes

SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude se trouve dans le district de Toliara II. Les coordonnées géographiques de ce district sont comprises entre 22,33248 ° et 24,22980 ° de latitude Sud et 43,26881 ° et 44,34649 ° de longitude Est. Sur le plan administratif, le district de Toliara II appartient à la région Atsimo-Andrefana (sud-ouest de Madagascar). C'est le plus grand district de cette région en termes de superficie avec ses 9 300 km². Le district en lui-même est formé de 26 Communes rurales, mais les travaux de terrain ont été menés principalement dans deux communes : la commune rurale d'Ankilimalinike (Zone de Ranobe) et la commune rurale d'Andranonihaly (Zone d'Ankiliberengy ; figure 1).



CB : placeaux de relevés localisés dans les fourrés xérophiles exploités pour la fabrication de charbon de bois

RA : placeaux de relevés situés dans les recrûs postagricoles sur fourrés xérophiles

IT : placeaux de relevés dans les fourrés xérophiles peu perturbés

Figure 1 : Cartes de localisation de la zone d'étude (district, communes, placeaux)

CLIMAT, TYPE DE SOLS ET VÉGÉTATION

Le climat est de type tropical semi-aride avec une pluviométrie moyenne annuelle de 418 mm (moyenne des 20 dernières années, station météorologique de la ville de Toliara in Raoliarivelo *et al.*, 2010). La végétation naturelle du site d'étude est un fourré xérophytique à Didiereaceae et à Euphorbiaceae (Cornet & Guillaumet, 1976). Les sols du site d'étude sont de nature dunaire et sableuse peu évoluée, sol à sable roux et de nature calcaire sur affleurements de grès calcaires, sol à dalle calcaire (Besairie & Collignon, 1971 ; Koechlin *et al.* 1974 ; Razanaka, 1996). Les sables roux sont des sols rouges sableux de décalcification de 1-2 m de profondeur sur des matériaux calcaires (Hervieu, 1959) tandis que les dalles calcaires sont des sols squelettiques, rocailleux avec des affleurements fréquents de roches calcaires qui par endroit forment de véritables dalles. Cette étude se focalise sur les formations se développant sur ces sols à dalles calcaires.

INVENTAIRE FLORISTIQUE

La méthode du quadra (Braun-Blanquet, 1966) a été utilisée lors des inventaires floristiques. Trente placeaux de 10 m x 10 m ont été choisis aléatoirement dans des zones perturbées par la fabrication de charbon de bois et l'agriculture sur brûlis et des zones témoins où les fourrés ne subissent que très peu de perturbation d'origine anthropique. Les placeaux ont été localisés dans deux communes rurales (CR) appartenant au district de Toliara II : vingt-neuf placeaux dans la zone d'Ankiliberengy (CR Andranonihaly) et sept placeaux dans la zone de Ranobe (CR Ankilimalinike).

Les sites les plus perturbés sont la plupart du temps situés proches des villages (≤ 5 km) et font l'objet de culture sur brûlis et de prélèvement de bois pour la production de CB. Cette dernière activité se pratique majoritairement sur les fourrés sur sables roux pour des raisons pratiques. Toutefois, lorsque les espèces propices à la fabrication de charbon de bois sont épuisées au niveau des fourrés sur sable roux, les villageois exploitent les essences des fourrés sur dalle calcaire notamment pour ceux localisés à proximité des zones propices à l'installation des fours à charbon (zone avec un sol sableux). Les bois sont coupés au niveau des essences des fourrés sur dalle calcaire notamment à proximité des zones sableuses propices à l'installation des fours à charbon. Dans la zone d'Ankiliberengy, pour la mise en place des fours à charbon, les charbonniers transportent du sable dans les fourrés sur dalle calcaire avant de pratiquer le charbonnage. A Ranobe, les charbonniers pratiquent l'une ou l'autre ou les deux techniques au choix lors du charbonnage. L'analyse des effets de l'agriculture sur brûlis a été effectuée en étudiant les recrûs post-agricoles sur fourrés dont l'âge après abandon est compris entre 10 et 30 ans. Les sites les moins perturbés (majoritairement localisés loin des villages : distance > 5 km à vol d'oiseau) ne font l'objet que de quelques prélèvements de bois d'œuvre (habitation, construction de charrette et de pirogue).

Dans les placeaux de 10 m x 10 m (100 m²), les arbres et arbustes de plus de 1,3 m de hauteur, ainsi que les lianes adultes qualifiées d'individus semenciers ou matures, ont été inventoriés au même titre que les individus de régénération (individus dont la hauteur totale est inférieure à 1,30 m). Les données d'inventaires ont permis de calculer les indices de diversité et de structure suivants :

- La richesse spécifique (S.100 m⁻²) est le nombre total d'espèces présentes dans la surface de relevé (Fournier & Sasson, 1983) ;

- L'indice de régularité (R) est le rapport entre l'indice de Shannon-Weaver et la diversité maximale (Pielou, 1966 ; Dajoz, 1996) ;

$$\sum Ni \times (\log_2(Ni)) / \log_2(S)$$

Ni, abondance de l'i-ème espèce ; $N = \sum Ni$ (i=1 à S), abondance numérique totale d'espèces ; S, richesse spécifique.

- La densité arbustive est le nombre d'arbustes par unité de surface (Da.100 m⁻²) ;

- La densité de lianes (Dl.100 m⁻²) est le nombre de lianes par unité de surface. Elle peut être considérée comme un indicateur de perturbation. En effet, une végétation mature, de par son large spectre biologique, doit contenir plus de lianes que celle qui est secondarisée (Karlowski, 2006) ;

- La hauteur totale moyenne (Hm en m) ;

- Les taux de régénération (TR_i) (Rothe, 1964 ; Carrière *et al.*, 2008 ; Rabarison *et al.*, 2013) des espèces inventoriées ont été calculés comme suit :

$$TR_i = (nsp/Nsp) \times 100$$

nsp : nombre d'individus de régénération de l'espèce (i) et Nsp : nombre d'individus semenciers de l'espèce (i).

- La moyenne des taux de régénération par plateau, pondérée par la densité des individus, a également été calculée :

$$TR = \text{Moyenne}(TR_i)$$

ESTIMATION DE LA BIOMASSE

Un sous-compartiment de 4 m x 4 m (16 m²) a été délimité de manière aléatoire dans chaque plateau pour l'estimation de la biomasse épigée arbustive. Vingt et un carrés de 16 m² ont ensuite été ajoutés et placés au hasard au sein des fourrés xérophiles selon le type de perturbation qu'ils subissent. Au final, la mesure de la biomasse s'est faite au sein de 51 carrés de 16 m² par la méthode destructive. Cette méthode consiste à couper tous les individus contenus dans le carré de relevé et à les peser. Lors de la pesée, les matériels végétaux ont été subdivisés en deux catégories : tiges (troncs et grosses branches dont le diamètre est supérieur à un centimètre) ; feuilles (feuilles et branches dont le diamètre est inférieur ou égal à un centimètre). Des échantillons de deux catégories de matières ont été pesés, mis dans des sacs hermétiques séparés pour être étuvés afin d'estimer leur teneur en eau.

ANALYSE DES DONNÉES

Une analyse de co-inertie (Xlstat 8.0) accompagnée d'une classification automatique hiérarchisée (CAH) a été effectuée sur les individus semenciers et les individus de régénération pour discerner d'éventuelles variations de la composition floristique selon le type de perturbation. Une analyse de la variance (ANOVA) à un facteur (perturbation) suivie d'un test de comparaison multiple de Tuckey a été effectuée sur les paramètres de diversité (richesse spécifique, indice de régularité), de structure

(densité arbustive, densité de liane, hauteur totale moyenne) et sur les valeurs de la biomasse épigée. Des analyses de Kruskal-Wallis à un facteur (perturbation), suivies d'un test de comparaison multiple de Dunn (Xlstat 8.0), ont été réalisées lorsque les conditions ne permettaient pas de conduire une ANOVA

Résultats

COMPOSITION FLORISTIQUE DES INDIVIDUS MATURES

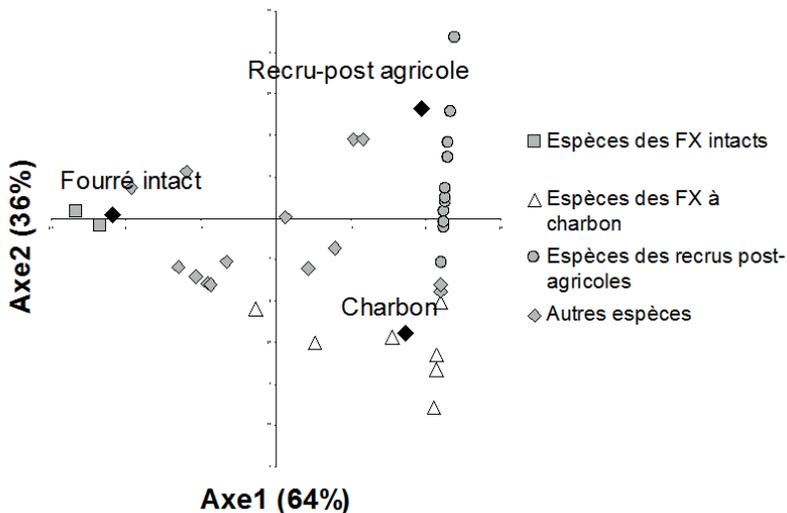


Figure 2 : Mise en relation de la composition floristique des individus matures avec les pratiques d'exploitation.

L'analyse de co-inertie menée sur la composition floristique des individus semenciers montre une relation significative entre la composition floristique des FX et les pratiques d'exploitation (coefficient $RV=0,50$; $p<0,001$; figure 2). Les compositions floristiques des strates supérieures des trois types de FX sont différentes.

Le premier axe de co-inertie (64 % de la co-inertie totale) sépare les (i) FX intacts des (ii) recrûs post-agricoles. Les espèces caractéristiques des FX intacts sont essentiellement : *Alantsilodendron humbertii* (R. Vig.) Villiers (Fabaceae), *Bauhinia grandidieri* Baill. (Fabaceae), *Bonamia spectabilis* (Choisy) Hallier f. (Convolvulaceae), *Capuronia* sp. Lourteig (Lythraceae) et *Commiphora orbicularis* Capuron (Burseraceae). Les espèces caractérisant les recrûs sont essentiellement : *Albizia tulearensis* R. Vig. (Fabaceae), *Combretum* sp. Loefl. (Combretaceae), *Commiphora brevicalyx* H. Perrier (Burseraceae), *Gagnebina commersoniana* (Baill.) R. Vig. (Fabaceae) et *Grewia erythroxyloides* Capuron (Malvaceae).

Le second axe de co-inertie (36 % de la co-inertie totale) sépare les recrûs post-agricoles des FX exploités pour la production de CB. Les espèces caractérisant ces derniers sont essentiellement : *Capuronia madagascariensis* Lourteig (Lythraceae), *Croton cotoneaster* Müll. Arg. (Euphorbiaceae), *Cynanchum madagascariense* K. Schum. (Apocynaceae), *Forsythiopsis vincoides* (Lam.) Benoist (Acanthaceae) et *Grewia franciscana* Capuron (Malvaceae).

DIVERSITÉ ET STRUCTURE DES INDIVIDUS MATURES

Les richesses spécifiques moyennes des FX sont comprises entre 12 et 27 espèces. Les richesses spécifiques moyennes sont affectées par les perturbations : les FX peu perturbés sont significativement plus riches en espèces ($F = 35,493$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 1). L'indice moyen de régularité des FX sur dalle calcaire ne varie pas de façon significative selon le type de perturbation ($F = 0,705$; ddl = 2, $p > 0,05$; tableau 1). La fabrication de charbon de bois et la pratique de la culture sur brûlis réduisent de manière significative la densité arbustive ($F = 32,266$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 1). Les densités moyennes de lianes ne présentent pas de variation significative pour les fourrés peu perturbés et les fourrés exploités pour la fabrication de charbon de bois ($K = 21,5043$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 1), par contre la densité de liane est nulle pour les recrûs post-agricoles. Les hauteurs totales moyennes des FX exploités pour la fabrication de charbon de bois ou ayant subi la culture sur brûlis sont significativement inférieures à celles des FX peu perturbés ($K = 14,4199$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 1).

Tableau 1 : Indices de diversité et de structure associés aux individus semenciers

Perturbation	n	Richesse spécifique (S.100 m ²)	Indice de régularité (R)	Densité arbustive (Da.100 m ²)	Densité de liane (Dl.100 m ²)	Hauteur totale (m)
Charbon	11	18±1a	0,87±0,02a	42±4a	5±1a	1,90±0,03a
Intact	7	27±2b	0,85±0,03a	118±11b	9±2a	2,76±0,14b
Agriculture	12	12±1a	0,87±0,01a	43±7a	0b	2,09±0,09a
P		< 0,0001	0,503	< 0,0001	< 0,0001	0,0007

Les valeurs représentent la moyenne ± l'erreur standard. Les différentes lettres indiquent des différences statistiques significatives entre les valeurs au seuil α de 0,05. Une analyse de la variance à un facteur a été utilisée sur la richesse spécifique, l'indice de régularité et la densité arbustive. Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé sur la densité de liane et la hauteur totale.

BIOMASSE AÉRIENNE DES FOURRÉS XÉROPHILES

La biomasse foliaire moyenne (< 1 cm) des recrûs post-agricoles est significativement inférieure à celle des fourrés peu perturbés ($K = 10,6034$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 2). Par contre la biomasse foliaire moyenne des fourrés exploités pour le charbonnage ne présente pas de différence significative par rapport à ceux des autres types de fourrés. Les biomasses moyennes des tiges des fourrés xérophi les exploités pour la fabrication de charbon de bois et par la culture sur brûlis sont significativement inférieures à celle des fourrés xérophi les peu perturbés ($K = 21,0734$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 2). Il en est de même de la biomasse épigée totale ($K = 20,6879$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 2).

Tableau 2 : Variation de la biomasse aérienne des fourrés xérophiles sur dalle calcaire selon le type de perturbation

Perturbation	n	Biomasse aérienne (kgMS.m ²)		
		Feuille ($\phi < 1\text{cm}$)	Tige ($\phi > 1\text{cm}$)	Totale
Charbon	17	0,89±0,08ab	1,04±0,20a	1,93±0,24a
Intact	13	1,38±0,19b	5,71±1,20b	7,08±1,33b
Agriculture	21	0,69±0,07a	0,69±0,18a	1,38±0,21a
P		0,005	< 0,0001	< 0,0001

Les valeurs représentent la moyenne \pm l'erreur standard. Les différentes lettres indiquent des différences statistiques significatives entre les valeurs au seuil α de 0,05. Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé sur les valeurs de la biomasse épigée.

COMPOSITION FLORISTIQUE DES INDIVIDUS DE RÉGÉNÉRATION

A l'inverse des individus semenciers, l'analyse de co-inertie montre que les perturbations d'origine anthropique retenues pour cette étude ne modifient pas la composition floristique des individus de régénération.

DIVERSITÉ ET STRUCTURE DE LA RÉGÉNÉRATION NATURELLE

À l'instar des individus semenciers, les individus de régénération des fourrés xérophiles peu perturbés ont une richesse spécifique plus élevée ($F = 17,421$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 3). Par contre l'indice de régularité des fourrés xérophiles peu perturbés est inférieur à ceux des fourrés perturbés par la fabrication de charbon de bois et la pratique de la culture sur brûlis ($F = 10,085$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 3). Les fourrés peu perturbés sont plus denses en arbustes ($K = 16,7737$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 3). Les densités de lianes des fourrés exploités pour la fabrication du charbon de bois et ceux ayant subi la culture sur brûlis sont significativement différentes ($K = 14,5005$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 3).

Tableau 3 : Paramètres de diversité et de structure de la régénération naturelle

Perturbation	n	Richesse spécifique (S.100 m ²)	Indice de régularité (R)	Densité arbustive (Da.100 m ²)	Densité de liane (Dl.100 m ²)
Charbon	11	12±1a	0,81±0,03a	36±5a	1±0b
Intact	7	22±2b	0,69±0,02b	265±39b	4±1ab
Agriculture	12	16±1a	0,85±0,02a	48±6a	7±1a
P		< 0,0001	0,001	0,0002	0,0007

Les valeurs représentent la moyenne \pm l'erreur standard. Les différentes lettres indiquent des différences statistiques significatives entre les valeurs au seuil α de 0,05. Une analyse de la variance à un facteur a été utilisée sur la richesse spécifique et l'indice de régularité. Une analyse de Kruskal-Wallis a été utilisée sur la densité arbustive et la densité de liane.

TAUX DE RÉGÉNÉRATION

Les taux de régénération des espèces arbustives des FX sont globalement faibles (TR < 100 %). En effet, leurs distributions sont déséquilibrées : la moitié des espèces recensées et présentant des individus matures ont un taux de régénération inférieur à 50 %, quel que soit le type de perturbation subie (tableau 4) tandis que le quart de ces espèces ne présentent pas de régénération naturelle. Les tests de khi-deux quant à la proportion d'espèces arbustive présentant un taux de régénération nul montrent que cette proportion est plus grande pour les fourrés exploités pour le charbonnage et la pratique de la culture sur brûlis comparés aux fourrés peu perturbés ($\chi^2 = 46,2193$; ddl = 2 ; $p < 0,05$; tableau 4).

Tableau 4 : Taux de régénération des espèces d'individus matures

Perturbation	Taux de régénération (%)	Proportion des espèces avec un TR nul (%)
Charbon	60 (0, 0, 50)	69,96a
Intact	226 (0, 50, 200)	41,94b
Agriculture	97 (0, 33, 100)	67,58a
<i>p</i>		< 0,0001

Les différentes lettres indiquent des différences statistiques significatives entre les valeurs au seuil α de 0,05. Les valeurs hors parenthèse représentent le taux de régénération moyen (%). Les valeurs entre parenthèses représentent respectivement le premier quartile (%), la médiane (%) et le troisième quartile (%).

Discussion

MODIFICATION DE LA COMPOSITION FLORISTIQUE DES INDIVIDUS MATURES

Il a été montré que les compositions floristiques des strates supérieures des trois types de FX sont différentes. La production de CB et le défrichage pour l'agriculture sur brûlis affectent la composition floristique de la strate supérieure des FX. Ces résultats corroborent ceux de Kiruki *et al.* (2017) qui démontrent une modification notable de la composition floristique entre formation forestière peu perturbée (contenu dans des réserves naturelles, parcs et des forêts privées) et formation forestière intensément perturbée par la pratique de l'agriculture et de la production de charbon de bois dans la région semi-aride de Kitui au Kenya ($P \approx 1000 \text{ mm.an}^{-1}$).

ALTÉRATION DES INDICES DE DIVERSITÉ ET DE STRUCTURE PAR LES PRATIQUES DU CHARBONNAGE ET DE LA CULTURE SUR BRÛLIS

Il a été montré que les activités de fabrication de CB et l'agriculture sur brûlis affectent la richesse spécifique, la densité arbustive et la hauteur totale moyenne des FX sur dalle calcaire. Pour la pratique de l'agriculture sur brûlis, ces résultats confirment ceux de Mahamane et Mahamane (2005) en zone

semi-aride du sud-ouest du Niger ($500 \text{ mm.an}^{-1} < P < 700 \text{ mm.an}^{-1}$) qui montrent que les recrues ont une richesse spécifique moindre comparée à la formation naturelle. Ces auteurs ont également constaté que les formations naturelles, c'est-à-dire peu perturbées, ont une densité arbustive supérieure à celle des recrues post-culturaux. De même, Leprun *et al.* (2009), dans la forêt dense sèche de Mikea (située au nord de la zone de Ranobe, un des sites de cette étude, $600 \text{ mm.an}^{-1} < P < 1000 \text{ mm.an}^{-1}$) ont constaté une importante réduction (de moitié) de la richesse spécifique des recrues post-culturaux comparés à la formation forestière originelle. Similairement, Kiruki *et al.* (2017) ont montré une diminution de la richesse spécifique, de la densité en arbustes et de la hauteur totale des arbres dans les formations forestières exploitées pour l'agriculture.

Quant aux perturbations entraînées par la fabrication de charbon de bois, ces résultats confirment ceux de Pote *et al.* (2006), en zone semi-aride d'Afrique du Sud ($P < 600 \text{ mm.an}^{-1}$) montrant que la richesse spécifique et la densité des arbustes sont plus faibles à proximité des villages, à cause de l'augmentation des prélèvements de bois pour la cuisson, la construction et les rites traditionnels, effectués par la population. De même, Kiruki *et al.* (2017) ont montré une diminution de la richesse spécifique et de la densité en arbustes en lien avec la production intensive de charbon de bois. Enfin, Oduori *et al.* (2011), en analysant des images satellitaires à très haute résolution de la partie nord-est de la Somalie ($P < 300 \text{ mm.an}^{-1}$) entre deux dates (2001 et 2006), ont montré que la densité en arbustes est plus faible dans les zones proches des villages à cause de la production intensive de CB.

RÉDUCTION DE LA BIOMASSE LIGNEUSE SUITE À LA PRATIQUE DE L'AGRICULTURE SUR BRÛLIS ET DE LA FABRICATION DE CHARBON DE BOIS

Les valeurs de la biomasse estimées par cette étude sont comparables à celles trouvées par d'autres études du moins pour les formations peu perturbées. Ainsi, Penzhorn *et al.* (1974), en zone semi-aride d'Afrique du Sud ($P \approx 400 \text{ mm.an}^{-1}$), ont trouvé une valeur de $184 \pm 33 \text{ t. ha}^{-1}$ de matière fraîche pour la biomasse épigée des fourrés xérophiles des zones protégées de l'*Addo Elephant National Park*. Cette valeur correspondrait à 97 t. ha^{-1} de matière sèche selon Pote *et al.* (2006) soit $9,7 \text{ kgMS.m}^{-2}$ contre $7,0 \text{ kgMS.m}^{-2}$ dans cette étude. De même, Mills *et al.* (2005) ont trouvé une valeur de $84 \pm 6 \text{ tMS. ha}^{-1}$ soit $8,4 \text{ kgMS.m}^{-2}$ pour la biomasse épigée dans les fourrés xérophiles de la région de l'*Eastern Cape* en Afrique du Sud (zone semi-aride, $250 \text{ mm.an}^{-1} < P < 350 \text{ mm.an}^{-1}$). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur, mais la valeur de biomasse obtenue à Madagascar est la plus faible.

La fabrication de charbon de bois et la pratique de l'agriculture sur brûlis contribuent à réduire la biomasse ligneuse. En ce qui concerne les effets de l'agriculture sur brûlis, on constate que même après plusieurs années d'abandon (> 10 ans), la biomasse des recrues post-agricoles reste encore largement inférieure à celle des fourrés peu perturbés (représentant environ un rapport de 1/7). Ces résultats sont en accord avec ceux de Leprun *et al.* (2009) qui ont montré que la biomasse des recrues post-agricoles de la forêt dense sèche de Mikea ne représentait que le sixième de la biomasse de la forêt dense sèche originelle. De même, Pote *et al.* (2006) ont montré une réduction de la biomasse ligneuse à proximité des villages, en lien avec l'augmentation des prélèvements des populations. Enfin, Kiruki *et al.* (2017) ont montré une diminution de la biomasse dans les zones exploitées pour l'agriculture et celles utilisées pour la production de charbon de bois ; ceci étant lié à la disparition des arbres de gros diamètre ($\geq 20 \text{ cm}$) et de hauteur élevée.

FAIBLE RÉGÉNÉRATION DES FOURRÉS XÉROPHILES

Les FX se régénèrent difficilement, même dans les zones peu perturbées par la fabrication de CB et la pratique de l'agriculture sur brûlis. En effet, le taux de régénération ne dépasse en général pas les 100 %. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Randriamalala *et al.* (2016) qui ont émis une hypothèse pour expliquer cette mauvaise régénération : une variation climatique qui entraîne une baisse des précipitations et qui affecte négativement la régénération naturelle. En effet la température et la disponibilité en eau sont des facteurs clés lors de la germination des graines puisque la levée de dormance s'opère grâce à des enzymes qui ne fonctionnent que pour des valeurs bien déterminées de la teneur en eau de la graine et de la température ambiante (Lloret *et al.*, 2004 et 2005). Une sécheresse prolongée peut retarder, voire empêcher la germination des graines en inhibant la levée de dormance. La baisse du nombre de graines ayant germé peut à son tour influencer sur la taille, la structure et la composition du futur peuplement. Toutefois, les pratiques de fabrication de charbon de bois et d'agriculture sur brûlis tendent à aggraver cette faible régénération des fourrés xérophiles, car les sites perturbés présentent une proportion significativement élevée d'espèces dont le taux de régénération est nul. En effet, ces deux perturbations contribuent à la disparition d'individus semenciers pour certaines espèces : celles à bois dur pour la fabrication du charbon de bois et celles qui ne sont pas résistantes au feu dans le cas de l'agriculture sur brûlis d'où l'augmentation des proportions des espèces aux taux de régénération égale à 0. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Kiruki *et al.* (2017) qui ont montré que la faible régénération des formations forestières de la zone de Kitui au Kenya était accentuée par leur exploitation pour l'agriculture et la fabrication intensive de charbon de bois.

Conclusion

La pratique de la fabrication de CB et la pratique de l'agriculture sur brûlis contribuent à réduire la densité des ligneux et la biomasse ligneuse et affectent la composition floristique et la diversité des FX sur dalle calcaire. La résilience des FX à ces activités anthropiques est donc faible. Il n'y a pas de différence significative entre les effets de la fabrication du charbon de bois et de l'agriculture sur brûlis. L'agriculture se pratique principalement sur les sols sableux et rarement sur les sols à dalle calcaire. Tous les arbustes de la parcelle cultivée ne sont pas brûlés sur dalle calcaire, mais seulement ceux qui se trouvent sur des sols calcaires plus friables et faciles à travailler : calcaire de faible épaisseur, calcaire en cours d'altération, zones interstitielles entre dalles voisines. Les arbustes épargnés par le feu contribuent aux valeurs des densités et de la biomasse ligneuse rencontrées dans les recrûs post-agricoles à l'instar des espèces d'arbustes à bois tendre qui ne sont pas exploitées lors de la fabrication du charbon de bois. Par ailleurs, les FX se régénèrent mal, il n'y a pas suffisamment d'individus de régénération pour remplacer les individus matures actuels. Les FX du site d'étude sont formés par des peuplements vieillissants qui risquent de dépérir quand les individus matures actuels seront vieux. Cette mauvaise régénération peut être imputée à d'autres facteurs qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude et qui restent à déterminer. Toutefois, le charbonnage et la pratique de l'agriculture sur brûlis ne font qu'aggraver cette faible régénération puisqu'une proportion élevée d'espèces dont le taux de régénération est nul a été observée dans les sites perturbés par ces activités anthropiques.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'IRD qui a appuyé cette étude (notamment durant les travaux de terrain) à travers les financements octroyés dans le cadre des projets VALSE « Valorisation durable des formations sèches côtières » (UE/COI-Biodiversité), porté par l'IRD (UMR GRED), et le projet EXPLORE « Exploitation durable des forêts malgaches » de la JEAI (Jeune équipe associée à l'IRD).

Références bibliographiques

Alegre J. C., Cassel D. K., 1996. Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58, p. 39-48.

Besairie H., Collignon M., 1971. Géologie de Madagascar. I. Les terrains sédimentaires. Nouvelle carte géologique au 1/500 000^e. *Annales Géologiques de Madagascar*, Tananarive 35, 463 p.

Blanc-Pamard C., Milleville P., Grouzis M., Lasry F., Razanaka S., 2005. Une alliance de disciplines sur une question environnementale: la déforestation en forêt des Mikea (Sud-Ouest de Madagascar). *Natures Sciences Sociétés* 13, p. 7-20.

Braun-Blanquet J., 1964. *Pflanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde*. Springer Verlag, Wien.

Carrière S. M., Randrianasolo E., Hennenfent J., 2008. Aires protégées et lutte contre les bioinvasions : des objectifs antagonistes ? Le cas de *Psidium cattleianum* Sabine (Myrtaceae) autour du parc national de Ranomafana à Madagascar. *Vertigo* 8, p. 1-14.

Giardina C. P., Sanford Jr. R. L., Døckersmith I. C., Jaramillo V. J., 2000. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. *Plant and Soil* 220, p. 247-260.

Guillaumet J.-L., Koechlin J., 1971. Contribution à la définition des types de végétation dans les régions tropicales (exemple de Madagascar). *Candollea* 26 (2), p. 263-277.

Hervieu J., 1959. « Les sables roux du Sud de Madagascar » dans *Troisième conférence interafricaine des sols. Dalaba (GIN)*. Conférence Interafricaine des Sols, p. 233-243.

Holling C. S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, p. 1-23.

Karlowski U., 2006. Afromontane old-field vegetation: secondary succession and the return of indigenous species. *African Journal of Ecology* 44, p. 264-272.

Kiruki H. M., van der Zanden E. H., Gikuma-Njuru P., Verburg P. H. 2017. The effect of charcoal production and other land uses on diversity, structure and regeneration of woodlands in a semi-arid area in Kenya. *Forest Ecology and Management* 391, p. 282-295.

Koechlin J., Guillaumet J.-L., Morat Ph., 1974. Flore et végétation de Madagascar. Vaduz : J. Cramer, (5), Flora et Vegetatio Mundi 5, 701 p. ISBN 3-7682-0940-7

Lloret F., Peñuelas J., Estiarte M., 2004. « Experimental evidence of reduced diversity of seedlings due to climate modification in a Mediterranean-type community ». *Global Change Biology* 10, p. 248-258.

Lloret F., Peñuelas J., Estiarte M., 2005. Effects of vegetation canopy and climate on seedling establishment in Mediterranean shrubland. *Journal of Vegetation Science* 16, p. 67-76.

Maas J. M., 1995. *Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture*. In: Seasonally dry tropical forests, Bullock, S. H., Mooney, H.A. & Medina, E. p. 326-345. Cambridge University Press, Great Britain, ISBN 0521435145.

Mahamane L., Mahamane S., 2005. Biodiversity of ligneous species in semi-arid to arid zones of southwestern Niger according to anthropogenic and natural factors. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, p. 267-271.

Mamede M. de A., de Araújo F.S., 2008. Effects of slash and burn practices on a soil seed bank of caatinga vegetation in Northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments* 72, p. 458-470.

Masezamana H. N., Andrianarisoa J. H., Raoliarivelo L. I. B., Randriamalala R. J., 2013. *Identification et analyse d'activités alternatives à la fabrication de charbon de bois dans le district de Toliara II*. Rapport final projet Q096. Antananarivo : DERAD, Eastern and Southern Africa Partnership Program, 67 p.

Mills A. J., Cowling R. M., Fey M. V., Kerley G. I. H., Donaldson J. S., Lechmere-Oertel R. G., Sigwela A. M., Skowno A. L., Rundel P., 2005. Effects of goat pastoralism on ecosystem carbon storage in semiarid thicket, Eastern Cape, South Africa. *Austral Ecology* 30, p. 797-804.

Oduori S. M., Rembold F., Abdulle O. H., Vargas R., 2011. Assessment of charcoal driven deforestation rates in a fragile rangeland environment in North Eastern Somalia using very high resolution imagery. *J. Arid. Environ.* 75, p. 1173-1181.

Pandey D., 2002. : *Fuelwood studies in India: myth and reality*. Jakarta, Center for International Forestry Research (CIFOR), 93 p.

Penzhorn B. L., Robertse P. J., Olivier M. C., 1974. The influence of the African elephant on the vegetation of the Addo Elephant National Park. *Koedoe* 17, p. 137 - 158.

Pielou E. C., 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *J. Theor. Biol.* 13, p. 131-144.

Pote J., Shackleton C., Cocks M., Lubke R., 2006. Fuelwood harvesting and selection in Valley Thicket, South Africa. *Journal of Arid Environments* 67 (2), p. 270-287.

Rabarison H., Rakotondrafara A., Razafimandimbison S. G., Ratsimbason M., Rakotonandrasana S. R., Rajeriarison C., Randrianariveolosia M., 2013. Evaluation du risque d'extinction des *Cedrelopsis* (Rutaceae) de Madagascar. *Scr. Bot. Belg.* 50, p. 41-49.

Rabeniala R., Raoliarivelo L. I. B., Masezamana H. N., Andrianarisoa J. H., Randriamalala R. J., 2009. *Gestion de pâturage pour le cheptel de petits ruminants (ovins et caprins) dans une zone semi-aride du district de Toliara II. Rapport final projet Q906.* Antananarivo, DERAD, Eastern and Southern Africa Partnership Program, 84 p.

Raharimalala O., Buttler A., Ramohavelo C. D., Razanaka S., Sorge J-P., Gobat J-M., 2010. Soil-vegetation patterns in secondary slash and burn successions in Central Menabe, Madagascar. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139, p. 150-158.

Raherison S. M., Grouzis M., 2005. Plant biomass, nutrient concentration and nutrient storage in a tropical dry forest in the South–West of Madagascar. *Plant Ecology* 180, p. 33-45.

Ramamonjisoa B. S., 1993. *La ville au mille charbonniers.* Antananarivo : Département des Eaux et Forêts, Université d'Antananarivo, 267 p.

Randriamalala J.R., Hervé D., Letourmy P., Carrière S.M., 2015. Effects of slash-and-burn practices on soil seed banks in secondary forest successions in Madagascar. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 199, p. 312-319.

Randriamalala J. R., Radosy H. O., Razanaka S., Randriambanona H., Hervé D., 2016. Effects of goat grazing and woody charcoal production on xerophytic thickets of southwestern Madagascar. *Journal of Arid Environments* 128, p. 55-72.

Randriamalala J. R., Ramanantoandro T., Radosy H. O., Randriambanona H., Hervé D., 2017. Annual biomass increment of xerophytic thickets and sustainability of woody charcoal production in southwestern Madagascar. *Forest Ecology and Management* 400, p. 139-149.

Raoliarivelo L. I. B., Rabeniala R., Masezamana H. N., Andrianarisoa J. H., Randriamalala R. J., 2010. *Impact de la fabrication de charbon de bois sur la production et la disponibilité fourragère de pâturage en zone subaride, cas de la Commune de Soalara-Sud, Toliara II.* Rapport final projet Q909. Antananarivo, DERAD, Eastern and Southern Africa Partnership Program, 61 p.

Ravonjimalala H. R., Bogaert J., Hervé D., Razanaka S., Ranaivo J., Randriambanona H., Rakotondraompiana S., 2017. *Spatio-temporal evolution of the fragmentation classes of the Mikea dry deciduous forest (southwestern Madagascar).* In Mohamed Ouissar (ed.), Donald Gabrielo (ed.), Atsushi Tsunekawa (ed.), Steven Evett (ed.) : *Water and Land Security in Dryland, Response to Climate Change*, Springer, p. 209-220. (ISBN 978-3-319-54020-7, DOI 10.1007/978-3-319-54021-4)

Razanaka S. J., 1996. «Répartition des espèces xérophiles dans le sud-ouest de Madagascar» dans W.R. Lourenço (éd.), Biogéographie de Madagascar. Paris : ORSTOM (collection Colloques et Séminaires), p. 171-176.

Rohner U., Sorg, J.-P., 1986. *Observations phénologiques en forêt dense sèche*. Fiche technique N° 12, CFPF «Fofampiala», Morondava, Tome I.

Rothe P. L., 1964. Régénération naturelle en forêt tropicale : le *Dipterocarpus dyeri* (Dau) sur le versant cambodgien du golfe du Siam. *Bois et Forêt des Tropiques* 8, p. 386-397.

Sorg, J.-P., Rohner U., 1996. Climate and tree phenology of the dry deciduous forest of the Kirindy Forest. In: Ganzhorn, J.U., Sorg, J.-P., (Eds), *Ecology and Economy of a Tropical Dry Forest in Madagascar*. Primate Report Special issue, Göttingen, p. 57-80.

Tinker B. P., Ingram J. S. I., Struwe S., 1996. Effects of slash-and-burn agriculture and deforestation on climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58, p. 13-22.

Wezel A., Bender, S., 2004. Degradation of agro-pastoral village land in semi-arid southeastern Cuba. *J. Arid. Environ.* 59, p. 299-311.

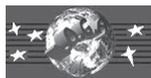
Valorisation durable des formations sèches de l’océan indien

Éditeurs scientifiques

**Dominique Hervé, Josoa R. Randriamalala, Herizo Randriambanona,
Samuel Razanaka, Vonjison Rakotoarimanana, Rado Elysé Ranaivoson,
Verohanitra Rafidison, Stéphanie M. Carrière**

Actes du séminaire de synthèse du projet VALSE (UE/COI-Biodiversity)
« Valorisation durable des formations sèches côtières »
Toliara, 17-19 septembre 2018

Antananarivo, Septembre 2022



Mise au point des manuscrits et maquette de l'ouvrage

Jérémy FINOT

Traduction des titres, résumés et mots clés en anglais

Grace DELOBEL HUSCHLE

Conception de la couverture

Jérémy FINOT

Edition

François Adoré RAZAFILAHY, MYE

Auteur des photos de couverture

Stéphanie M. Carrière

Recto de couverture : Baobab citerne, Ampotaka, Plateau Mahafaly, 2014.

Dos de couverture : Equeutage des haricots, Plateau Mahafaly, 2014.

Référence complète du projet VALSE

« Valorisation durable des formations sèches côtières »

UE/COI-Biodiversité, Financement européen géré par la Commission de l'Océan Indien ;

EUROPAID/137091/ID/ACT/RSO n° 92 : «Gestion de la biodiversité marine et côtière spécifique aux îles et états côtiers la région AOA-OI » ; FED/2016/382-097/GRJ/CN82, signé le 23/03/2017.

Référence de l'ouvrage pour citation

Hervé D., Randriamalala J.R., Randriambanona H., Razanaka S., Rakotoarimanana V., Ranaivoson R.E., Rafidison V., Carrière S. M. (eds.), 2022. Valoriser les forêts sèches. Valorisation durable des forêts sèches de l'Océan indien, Antananarivo, IRD, UE/COI-Biodiversity, Ed. Antso, 396 p.

© IRD, 2022

ISBN : 979-10-95771-40-1