



RAPPORT FINAL
Programme "Modélisation et scénarios de la biodiversité"
Appel à projet 2013

Acronyme: **BioSceneMada**

Projet n°: AAP-SCEN-2013 I

**Scénarios de la biodiversité sous l'effet conjoint du
changement climatique et de la déforestation à
Madagascar**

Rédacteur du rapport: Ghislain Vieilledent
E-mail: ghislain.vieilledent@cirad.fr

Date de rédaction: 03 Janvier 2018

Durée du projet: 5 ans
Date de début: 15/05/2014

Date de fin: 15/05/2019

1. Description courte

Madagascar est une île de l'océan indien qui s'est détachée de l'Afrique puis de l'Inde il y a plusieurs dizaines de millions d'années. La biodiversité y a évolué de façon isolée. Ainsi, près de 90% des espèces n'existent que sur l'île. Cette biodiversité est fortement menacée par les changements climatiques et la déforestation. Le projet BioSceneMada, en s'appuyant sur des modèles climatiques, écologiques et paysagers, se propose d'établir des scénarios d'évolution de la biodiversité à Madagascar sous l'effet conjoint du changement climatique et de la déforestation. Les cartes issues du projet permettent d'identifier les zones à risque de perte de biodiversité et de déforestation ainsi que les zones refuges pour la biodiversité. Ces cartes peuvent être utilisées afin d'agir efficacement pour la conservation des forêts et de la biodiversité à Madagascar, notamment en priorisant les actions de conservation sur des zones cibles, tout en s'appuyant sur le réseau d'aires protégées actuel.



Figure 1: Population de baobabs de l'espèce *Adansonia suarezensis* sur le site de la Montagne des Français au nord de Madagascar. Cette espèce est fortement menacée par la perte d'habitat associée aux changements climatiques.



Figure 2: Lémurien de l'espèce *Indri indri* dans le parc national de Mantadia à l'est de Madagascar. Cette espèce est fortement menacée par la perte d'habitat associée à la déforestation.

2. Résumé

Le projet FRB-FFEM BioSceneMada vise à produire des scénarios d'évolution de la biodiversité à Madagascar sous l'effet conjoint du changement climatique et de la déforestation d'origine anthropique (<https://bioscenemada.cirad.fr>). Le projet a une durée de 60 mois (36 mois consacrés au travail de recherche et 24 mois consacrés au transfert et à la communication des résultats auprès des gestionnaires de la biodiversité à Madagascar et des décideurs politiques). Démarré courant 2014, il se terminera en 2019. Le projet associe quatre partenaires en France (Cirad, ETC Terra) et à Madagascar (WCS Madagascar, Office National de l'Environnement).

Madagascar est reconnu pour son exceptionnelle biodiversité, tant du point de vue du nombre d'espèces que des taux d'endémisme (proches de 90% dans tous les groupes taxonomiques). Cette biodiversité, principalement concentrée dans les forêts tropicales de l'île, est sévèrement menacée par le changement climatique et la déforestation. L'objectif du projet BioSceneMada est premièrement d'établir des scénarios de déforestation (en tenant compte notamment de la croissance démographique) et d'estimer la perte de biodiversité associée à ces scénarios. Deuxièmement, l'objectif est d'estimer l'impact des changements climatiques sur la perte de biodiversité. L'impact sur la biodiversité sera considéré sous l'angle des espèces (risque d'extinction des espèces via la restriction des aires de distribution, ex. les espèces de baobabs) mais également sous l'angle des communautés (perte d'habitat ou restriction des habitats pour les communautés, ex. la forêt épineuse). Troisièmement, l'objectif du projet est d'identifier les

futurs points-chauds (“hotspots”) de biodiversité à fort risque de déforestation. Ces scénarios permettront notamment de réfléchir à l’optimisation du réseau d’aires naturelles protégées en concentrant les efforts de conservation sur des zones cibles identifiées sur la base de résultats scientifiques.

Les premiers résultats de recherche ont permis de proposer des scénarios de référence pour la déforestation à Madagascar à l’horizon 2050 et 2100. En s’appuyant sur l’étude de la déforestation passée (période 1990-2000-2010), les modèles prédisent une diminution du couvert forestier de 9.3 millions d’hectares (Mha) en 2010 à environ 5 Mha en 2050 et moins de 2 Mha en 2100. La déforestation se fait majoritairement en dehors des aires protégées jusqu’en 2050, puis pénètre dans les aires protégées au-delà de cette date. En 2100, la forêt résiduelle se situe en altitude dans des zones reculées (péninsule de Masoala).

Une base regroupant les données d’occurrence de 4969 espèces a également été constituée. Cette base regroupe des données animales (vertébrés et invertébrés) et végétales (arbres et autres plantes) pour une grande variété de groupes taxonomiques, représentatifs de la biodiversité à Madagascar. Cette base constitue un inventaire sans précédent de la biodiversité à Madagascar et regroupe des données vérifiées tant du point de vue taxonomique que de la localisation géographique. Ces données ont été utilisées pour modéliser la niche climatique des espèces et estimer leur vulnérabilité aux changements climatique. Les données issues des modèles climatiques du GIEC pour Madagascar ont été regroupées sur le site MadaClim (<https://madaclim.cirad.fr>) qui est un des produits du projet BioSceneMada. Un atlas comprenant les aires de distribution présentes et futures de l’ensemble des 4969 espèces sera édité. Cette analyse permettra d’identifier les hotspots présents et futurs de la biodiversité. A l’échelle de la communauté, ces données ont également été utilisées pour mettre en évidence l’effet du climat sur la structure des communautés. On montre notamment que l’importance du climat dans la détermination de l’assemblage des espèces est très variable d’un groupe taxonomique à l’autre.

Les résultats du projet montrent également que les forêts humides se situant en altitude, dans les zones peu accessibles (péninsule de Masoala notamment), et qui seront impactées tardivement par la déforestation, sont les plus sensibles au changement climatique. Les espèces de ces forêts sont en effet peu adaptées à une augmentation forte de la saisonnalité (impliquant une diminution de la saison de végétation) et à une augmentation forte de la température prévues dans cette région. Ainsi, la conservation de la forêt et de la biodiversité à Madagascar face à la double contrainte de la déforestation et du changement climatique constitue un véritable challenge. Au vue de ces résultats, la première action à entreprendre nous semble de lutter efficacement contre la déforestation afin de conserver les forêts naturelles existantes, qui ne représentent que 15% du territoire national à Madagascar en 2014. Nos résultats montrent également que ces actions de conservation ne pourront se mettre en place à Madagascar sans une meilleure orientation de l’aide internationale au développement avec pour objectif une amélioration de la gouvernance, une lutte contre la corruption et l’application des lois environnementales.

3. Principaux résultats valorisés dans les publications scientifiques

MadaClim: portail de données climatiques et environnementales à Madagascar

Nous avons développé le site internet MadaClim (<https://madaclim.cirad.fr>) qui reprend toutes les données climatiques actuelles ainsi que les prédictions climatiques issues des modèles du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Les données sont à 1km de résolution et distribuées spécifiquement pour Madagascar. Des variables bioclimatiques comme l'évapotranspiration et le nombre de mois secs ont été recalculées et ajoutées aux variables existantes. En plus des données climatiques, des données environnementales incluant altitude, pente, irradiation solaire, géologie, sol, etc. ont été compilées.

Référence:

Vieilledent G., O. Gardi, C. Grinand, C. Burren, M. Andriamanjato, C. Camara, C. J. Gardner, L. Glass, A. Rasolohery, H. Rakoto Ratsimba, V. Gond, and J.-R. Rakotoarijaona. 2016. Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *Journal of Ecology*. 104: 703-715. doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12548>.

Vieilledent G. 2016. MadaClim: a set of climatic and environmental spatial variables for Madagascar. Data paper. in prep.

Carte de carbone forestier et vulnérabilité des forêts tropicales au changement climatique à Madagascar

En utilisant les données climatiques présentées précédemment et des données d'inventaires forestiers pour 1771 placettes réparties sur l'ensemble de Madagascar, nous avons démontré qu'il existait un lien fort entre climat et stocks de carbone forestiers. Nous avons produit une carte précise des stocks de carbone forestier en 2010 à Madagascar à une résolution de 250 m. Les changements climatiques devraient induire des modifications fortes des communautés forestières et en conséquence une diminution de -17% (7-24%) des stocks de carbone forestier à Madagascar à l'horizon 2100 par rapport à 2010.

Références:

Vieilledent G., O. Gardi, C. Grinand, C. Burren, M. Andriamanjato, C. Camara, C. J. Gardner, L. Glass, A. Rasolohery, H. Rakoto Ratsimba, V. Gond, and J.-R. Rakotoarijaona. 2016. Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *Journal of Ecology*. 104: 703-715. doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12548>.

El Hajj M., N. Baghdadi, I. Fayad, G. Vieilledent, J.-S. Bailly, and D. Ho Tong Minh. 2017. Interest of integrating spaceborne LiDAR data to improve the estimation of biomass in high biomass forested areas. *Remote Sensing*. 9(3). <https://doi.org/10.3390/rs9030213>.

Base de données de biodiversité à Madagascar

Nous avons construit un jeu de données sur la biodiversité à Madagascar regroupant 300 000 observations (points de présence) pour 4969 espèces. Ces espèces sont réparties dans différents groupes taxonomiques (Plantes, Vertébrés, Invertébrés) et sont représentatives de la biodiversité à Madagascar. Ces données, provenant de différents instituts, sont issues d'un travail de prospection conséquent qui s'étalent sur plusieurs dizaines d'années.

Référence:

Charra M., S. Goodman, A. Raselimanana, M.-J. Raherilalao, V. Soarimalala, D. Lees, F. Rakotondrainibe, J. Moat, M. Andriamanjato, W. J. Baker, M. Rakotoarinivo, M. Vorontsova, T. Pearce, T. F. Allnutt, D. Razafimpahana, M. Pedrono, J.-R. Rakotoarijaona and G. Vieilledent. Climate or watersheds ? Environmental factors determining species assemblages change according to the taxonomic group. in prep.

Atlas de la biodiversité à Madagascar et de sa vulnérabilité au changement climatique

Nous avons développé un script R permettant de modéliser la niche climatique des espèces à partir de modèles d'ensemble (Vieilledent *et al.*, 2013a; Araujo & New, 2007). Le script permet d'estimer l'aire de distribution actuelle et future des espèces à Madagascar. En utilisant cette approche pour les 4969 espèces du jeu de données sur la biodiversité à Madagascar, l'idée est d'obtenir un atlas de la biodiversité à Madagascar et de sa vulnérabilité au changement climatique. Un prototype de cet atlas a été réalisé pour les 7 espèces de baobab présentes à Madagascar.

Référence:

Muniz-Tagliari M., J.-M. Leong Pock-Tsy, C. Cornu and P. Danthu and G. Vieilledent. Vulnerability of the seven baobab species in Madagascar to climate change. in prep.

Vieilledent G., M. Muniz-Tagliari, C. Grinand, F. Montfort. Atlas of the biodiversity of Madagascar: present species distribution and species vulnerability to climate change. in prep.

Cartes de biodiversité et des communautés d'espèces à Madagascar

En utilisant des modèles de communautés (Ferrier *et al.*, 2007), nous avons cherché à identifier les facteurs environnementaux déterminants les assemblages d'espèces. Ces facteurs peuvent être climatiques ou associés à des barrières géographiques comme les bassins versants ou

les rivières (Pearson & Raxworthy, 2009). En appliquant ce modèle à nos données de présence d'espèces à Madagascar, nous avons obtenu une première carte de la biodiversité β à Madagascar. Mais le pourcentage de déviance expliquée par le modèle est faible (<10%). En appliquant ce même modèle à chaque groupe taxonomique, nous avons trouvé que les facteurs explicatifs l'assemblage des communautés d'espèces variaient d'un groupe taxonomique à l'autre, le climat n'étant pas toujours le facteur le plus important. Pour le groupe des lémuriens, ce sont les bassins versants qui expliquent en majorité l'assemblage des espèces. A contrario, le climat explique une grande partie des assemblages d'espèces de reptiles et d'amphibiens, espèces poikilothermes (animaux ayant une température corporelle qui varie avec celle de leur milieu). Pour d'autres groupes, comme les arbres, les facteurs climatiques et les bassins versants semblent expliquer à part égale les assemblages d'espèces.

Référence:

Charra M., S. Goodman, A. Raselimanana, M.-J. Raherilalao, V. Soarimalala, D. Lees, F. Rakotondrainibe, J. Moat, M. Andriamanjato, W. J. Baker, M. Rakotoarinivo, M. Vorontsova, T. Pearce, T. F. Allnutt, D. Razafimpahanana, M. Pedrono, J.-R. Rakotoarijaona and G. Vieilledent. Climate or watersheds? Environmental factors determining species assemblages change according to the taxonomic group. in prep.

Soixante ans (1953-2014) d'étude de la déforestation et de la fragmentation forestière à Madagascar

Nous avons obtenu de nouvelles cartes d'évolution de la couverture forestière à Madagascar sur la période 2000-2014. Elles viennent compléter les cartes de Harper *et al.* (2007) pour les années 1953, 1973 et 1990. Nous montrons que le couvert forestier a diminué de 44% sur la période 1953-2014. Les forêts naturelles couvrent 8.9 Mha en 2014 (15% du territoire national) et incluent 4.4 Mha (50%) de forêt humide, 2.6 Mha (29%) de forêt sèche, 1.7 Mha de forêt épineuse (19%) et environ 177,000 ha (2%) de mangrove. Depuis 2005, les surfaces déforestées annuellement ont augmenté à Madagascar pour atteindre 100 000 ha/an sur la période 2010-2014. Aujourd'hui, environ 50% de la forêt est située à moins de 100 m de la lisière et est donc exposée aux perturbations.

Référence:

Vieilledent G., C. Grinand, F. A. Rakotomalala, R. Ranaivosoa, J.-R. Rakotoarijaona, T. F. Allnutt, and F. Achard. Combining global tree cover loss data with historical national forest-cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *bioRxiv*. 147827. doi: <https://doi.org/10.1101/147827>. in review in *Biological Conservation*.

Retour sur les facteurs de déforestation: la pauvreté n'est pas l'unique responsable de la déforestation à Madagascar.

A l'issue d'une mission de terrain dans le Menabe, à l'ouest de Madagascar, nous avons conclu que les causes directes de la déforestation dans la région sont l'agriculture sur brulis pour la culture de rente comme le maïs ou l'arachide. Le maïs et l'arachide sont principalement exportés sur les marchés internationaux. Ces activités sont favorisées par un marché global non régulé, une forte corruption et une non-application des lois environnementales à Madagascar. Si aucune solution n'est trouvée pour lutter efficacement contre la déforestation, le couvert forestier pourrait diminuer de plus de 50% sur la période 2010-2050 dans la région.

Référence:

Vieilledent G., C. Grinand, M. Pedrono, T. Rabetrano, J.-R. Rakotoarijaona, B. Rakotoarivelo, F. A. Rakotomalala, L. Rakotomalala, A. Razafimpahanana, M. Nourtier, and F. Achard. It's not only poverty: uncontrolled global trade and bad governance are responsible for rampant deforestation in Western Madagascar. in prep.

Cartes du couvert forestier futur à Madagascar

Nous avons estimé la probabilité spatiale de déforestation à l'échelle nationale à Madagascar, à une résolution fine de 30 m pour l'année 2010. A partir de cette carte, en considérant une déforestation moyenne annuelle de 100 000 ha/an, nous avons pu prédire les zones susceptibles d'être déforestées sur la période 2010-2050. Les projections montrent une concentration des forêts dans les zones peu accessibles et situées en altitude dans le futur. Les aires protégées semblent relativement efficaces sur le court terme (horizon 2050) en contribuant à déplacer la déforestation sur des zones à plus faible biodiversité, en dehors des aires protégées mais n'ont pas d'efficacité sur le plus long terme (horizon 2100).

Références

Dezécache C., J.-M. Salles, G. Vieilledent, and B. Héault. 2017. Moving forward socio-economically focused models of deforestation. *Global Change Biology*. 23(9): 3484-3500. <https://doi.org/10.1111/gcb.13611>.

Vieilledent G., and F. Achard. Including spatial-autocorrelation in deforestation model to obtain realistic deforestation projections at national or continental scales. in prep.

Grinand C., G. Vieilledent, T. Razafimbolo, J.-R. Rakotoarijaona, M. Nourtier M., and M. Bernoux. Land use change spatial modeling using machine learning tools and a global land cover change dataset. in prep.

Modèles d'évolution de l'intensité de déforestation en Afrique et à Madagascar

Nous avons établi un modèle d'évolution des surfaces déforestées pour les pays africains en prenant en compte le couvert forestier existant et la taille de la population. Ce modèle est utilisé pour prédire les tendances de déforestation pour l'Afrique pays par pays. Pour Madagascar, on observerait une diminution de l'intensité de déforestation après 1950 liée à la transition démographique et à la réduction du couvert forestier disponible. Toutefois, les surfaces déforestées annuellement resteraient importantes ($> 75\,000\text{ ha/an}$). Selon ce scénario, le couvert forestier diminuerait ainsi de plus de 50% entre 2000 et 2050 et de plus de 75% entre 2000 et 2100, pour atteindre environ 2 Mha en 2100 (Fig. 9).

Références

Vieilledent G., W. F. Laurance, S. Peedell, and F. Achard. The fate of tropical forests associated to the demographic explosion in Africa. in prep.

4. Rapport d'activités et productions scientifiques

Description générale des activités et résultats

Contexte et enjeu

L'île de Madagascar s'est séparée du continent africain il y a environ 165 millions d'années, et de l'Inde il y a 88 millions d'années (Ali & Aitchison, 2008). Cette île continent a été colonisée par les humains il y a seulement 2300 ans environ (Burney *et al.*, 2004; Cox *et al.*, 2012; Tofanelli *et al.*, 2009). La flore et la faune de Madagascar ont évolué de façon isolée. Ceci a contribué à l'émergence d'une biodiversité exceptionnelle à Madagascar et d'un fort taux d'endémisme dans de nombreux groupes taxonomiques (Crottini *et al.*, 2012; Goodman & Benstead, 2005). Madagascar contient ainsi 5% de la biodiversité mondiale connue sur seulement 0,4% des terres émergées dans le monde. Il a quatre fois plus d'espèces de palmiers que dans toute l'Afrique (Dransfield & Beentje, 1995). Un quart des espèces de plantes vasculaires existent à Madagascar pour un cinquantième de la superficie des terres par rapport à l'Afrique (Schatz *et al.*, 1996). De même, plus de la moitié des caméléons du monde sont présents à Madagascar. L'endémisme au niveau de la famille et du genre taxonomique est également élevé. Chez les amphibiens, 23 des 24 genres existants, et une famille sur quatre est endémique de Madagascar (Vieites *et al.*, 2009). Plus de 83% des plantes vasculaires (Schatz, 2000) et jusqu'à 86% des invertébrés sont endémiques de l'île (Goodman & Benstead, 2005). A Madagascar la diversité phylogénétique des vertébrés est plus élevée que dans toute l'Amérique centrale et du Sud (Holt *et al.*, 2013). La biodiversité terrestre de Madagascar est principalement concentrée dans les forêts (Hannah *et al.*, 2008) qui incluent plusieurs types de végétation ligneuse tels que les forêts humides de l'Est et du Nord, les forêts sèches épineuses du Sud et les forêts sèches décidues à l'Ouest (Vieilledent *et al.*, 2016).

La biodiversité malgache est sévèrement menacée par le changement climatique (Hannah *et al.*, 2008) et la déforestation (Allnutt *et al.*, 2008; Harper *et al.*, 2007; Vieilledent *et al.*, 2013b). Plusieurs études ont mis en évidence le risque de perte de biodiversité due au changement climatique à Madagascar. De nombreuses espèces malgaches, par exemple les reptiles, ont des niches climatiques étroites et sont particulièrement vulnérables. Dans une étude portant sur 30 espèces de reptiles et d'amphibiens dans le massif le plus élevé de Madagascar, Raxworthy *et al.* (2008) ont montré un déplacement en altitude des espèces de 19 à 51 m entre 1993 et 2003 qui est associé au réchauffement climatique local. Le déplacement vers le haut de la pente peut potentiellement entraîner l'extinction des espèces actuellement présentes aux plus hautes altitudes. De plus, plusieurs auteurs ont prédit une perte d'habitat importante sous l'effet du changement climatique tant pour les espèces animales (voir Andriamasimanana & Cameron (2013) pour le cas de neuf espèces d'oiseaux malgaches) que végétales (Hannah *et al.*, 2008; Vieilledent *et al.*, 2013a), et qui pourraient conduire à l'extinction des espèces (voir l'exemple de l'espèce de baobab *Adansonia suarezensis* dans l'article de Vieilledent *et al.* (2013a)). Alors que la biodiversité terrestre de Madagascar est principalement concentrée dans les forêts, les études par télédétection et analyse d'images satellites révèlent que seulement 10 à 15% de la forêt originelle subsiste à Madagascar et que la déforestation se poursuit à un rythme d'environ 1% par an (Achard *et al.*, 2002; Harper *et al.*, 2007; Vieilledent *et al.*, 2013b). Pendant ce temps, la population humaine a plus que triplé depuis 1950 et continue de croître à un rythme proche de 3% par an (Raftery *et al.*, 2012; Vieilledent *et al.*, 2013b). À Madagascar, les moyens de subsistance des populations dépendent dans une large mesure des ressources forestières. Certaines études indiquent que le capital naturel du pays représente 49% de la richesse totale du pays (World Bank, 2013). Vieilledent *et al.* (2013b) ont récemment souligné le lien entre démographie et intensité de la déforestation à Madagascar et le risque d'une augmentation de la vitesse de la déforestation à court terme liée à l'explosion démographique. De plus, plusieurs indices de développement placent couramment Madagascar autour du dixième rang des pays les plus pauvres, ce qui induit un risque fort de pression sur les forêts naturelles restantes. En raison à la fois des niveaux élevés de diversité et d'endémisme sur l'île et du déclin rapide des habitats naturels, Madagascar est universellement reconnue comme une priorité mondiale pour la conservation de la biodiversité (Brooks *et al.*, 2006; Myers *et al.*, 2000).

Pour éviter la déforestation et atténuer les changements climatiques, Madagascar est en train de mettre en place le programme national REDD+ de Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts. Plusieurs projets pilotes REDD+ ont été développés à Madagascar, principalement dans la forêt tropicale humide de la côte Est (voir par exemple le PHCF, "Programme Holistique de Conservation des Forêts", présenté dans Vieilledent *et al.* (2013b)). Bien que le programme REDD+ soit principalement axé sur les émissions de carbone, le programme REDD+ national et les projets locaux devront intégrer des co-bénéfices pour la biodiversité. Pour le moment, peu d'information et d'outils sont disponibles pour évaluer l'impact des projets REDD+ en terme de conservation de la biodiversité.

Pour préserver la biodiversité malgache, un travail remarquable a été réalisé depuis le cinquième congrès mondial sur les parcs de l'IUCN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) tenu à Durban en 2003, afin de concevoir un réseau d'aires protégées intégrant

les points chauds de biodiversité et les aires protégées existant à l'époque au niveau national ([Kremen et al., 2008](#)). Actuellement, il existe plus de 50 aires protégées à Madagascar divisées entre les réserves naturelles intégrales (catégorie I de l'IUCN), les parcs nationaux (catégorie II de l'IUCN) et les réserves spéciales (catégorie IV de l'IUCN) ([Rabearivony et al., 2010](#)). Parmi ces aires protégées, beaucoup sont dans un statut temporaire ou en cours de création ([Rabearivony et al., 2010](#)). Le futur réseau d'aires protégées à Madagascar (SAPM, Système d'Aires Protégées à Madagascar) devrait couvrir plus de 10% du territoire national et intégrer une bonne partie des forêts naturelles subsistant à Madagascar. Dans le contexte d'un changement climatique anthropique rapide ([IPCC, 2007](#); [Loarie et al., 2009](#)), il est très probable que de nombreuses espèces ne soient pas en mesure de s'adapter ni de coloniser de nouveaux habitats favorables d'un point de vue climatique ([Menéndez et al., 2006](#)). Ceci s'explique en partie par une faible dispersion des espèces, rendue difficile par la disparition des animaux disperseurs ([Menéndez et al., 2006](#); [Vieilledent et al., 2013a](#)) et une perte d'habitat (associé à la déforestation) en dehors des aires protégées actuelles ([Vieilledent et al., 2013a](#)). Ainsi, les espèces devraient connaître une contraction de leur aire de distribution actuelle ([Andriamasimanana & Cameron, 2013](#); [Hannah et al., 2008](#); [Raxworthy et al., 2008](#); [Vieilledent et al., 2013a](#)). Par conséquence, la majeure partie de la biodiversité devrait se concentrer dans des zones refuge à l'intérieur des aires protégées. Identifier ces zones refuge est particulièrement important afin d'orienter les efforts de conservation sur des sites pertinents.

Objectifs

L'objectif du projet BioSceneMada est de développer des scénarios d'évolution de la biodiversité sous l'effet conjoint de la déforestation et du changement climatique (Fig. 3). On se propose premièrement d'établir des scénarios de déforestation et d'estimer la perte de biodiversité associée à cette déforestation. Les scénarios de déforestation s'appuieront sur les taux de déforestation historiques, qui seront à estimer, ainsi que sur la croissance démographique et sur le lien qui existe potentiellement entre population et déforestation. Ce lien sera à mettre en évidence et à estimer quantitativement. Les scénarios de croissance démographique ne seront pas à établir mais seront issus de la littérature. Deuxièmement, l'objectif est d'estimer l'impact des changements climatiques sur la perte de biodiversité à Madagascar. Il faudra donc dans un premier temps établir une base de données représentative de la biodiversité à Madagascar. L'impact sur la biodiversité sera considéré sous l'angle des espèces (risque d'extinction des espèces via la contraction des aires de distribution, ex. les espèces de baobabs) mais également sous l'angle des communautés (perte d'habitat ou restriction des habitats pour les communautés, ex. la forêt tropicale humide de montagne). Les scénarios climatiques du GIECC (Groupe International d'Experts sur les Changements Climatiques) seront utilisés. Troisièmement, l'objectif du projet est d'identifier les futurs points-chauds ("hotspots") de biodiversité à fort risque de déforestation.

L'ensemble de ces scénarios sera spatialisé et les résultats seront principalement rendus sous forme de cartes. Les scénarios permettront notamment de proposer des stratégies d'aménagement du territoire les plus efficaces possibles en vue de la conservation de la biodiversité et s'appuyant sur des résultats issus de la recherche scientifique. Par exemple,

les efforts de conservation pourraient être concentrés soit sur les zones refuges de la biodiversité sous contrainte climatique, soit au contraire sur des zones importantes pour la conservation de la biodiversité mais qui risquent de disparaître à cause de la déforestation.

Biological data: distribution of 7222 species

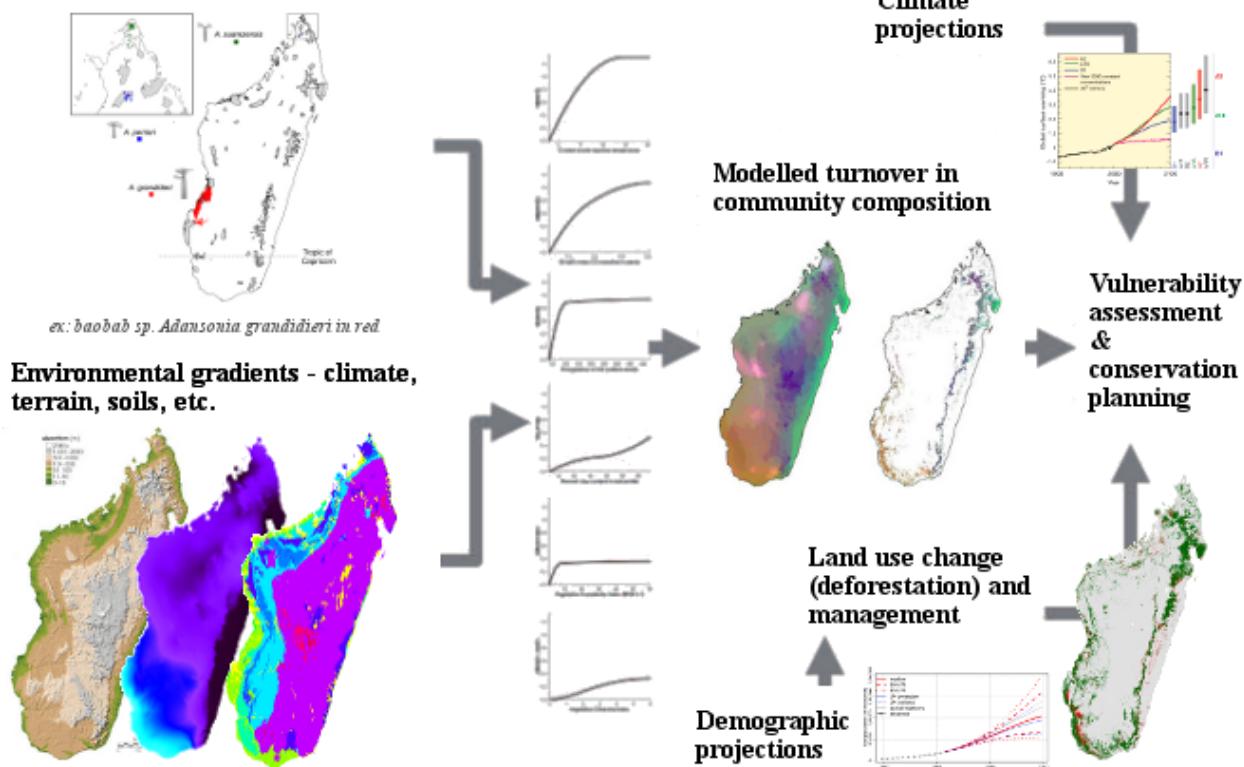


Figure 3: **Description schématique du projet.** Les modèles combinent des données d'inventaires, des données environnementales et des données démographiques pour évaluer l'impact futur des changements climatiques et de la déforestation sur la biodiversité à Madagascar. Les résultats sont utilisés pour une aide à la décision en aménagement du territoire et pour définir des stratégies de conservation efficaces.

Développement de modèles et scénarios de la biodiversité

Modélisation de l'intensité de la déforestation

Modélisation spatialisée de la déforestation

Modélisation de la niche climatique des espèces

Modélisation de l'assemblage des espèces en communauté

Principaux résultats

MadaClim: portail de données climatiques et environnementales à Madagascar

Dans le cadre du projet BioSceneMada, nous avons développé le site internet MadaClim (<https://madaclim.cirad.fr>). Ce site reprend toutes les données climatiques actuelles fournies par WorldClim ainsi que les prédictions climatiques issues des modèles du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et fournies par le CGIAR CCAFS. Les données sont recomplées (reprojetées et rééchantillonnées à 1km) et distribuées spécifiquement pour Madagascar. Des variables bioclimatiques supplémentaires comme l'évapotranspiration et le nombre de mois secs ont été calculées et ajoutées aux variables déjà disponibles. En plus des données climatiques, des données environnementales (sol, géologie, altitude, etc.) sont également fournies. Ce site et ces données sont particulièrement utiles pour tous les chercheurs, gestionnaires, membres d'ONG environnementales, ministères voulant étudier les effets du changement climatique à Madagascar. Elles peuvent être utilisées par exemple pour calculer les anomalies climatiques prédites par les modèles du GIECC (Fig. 4).

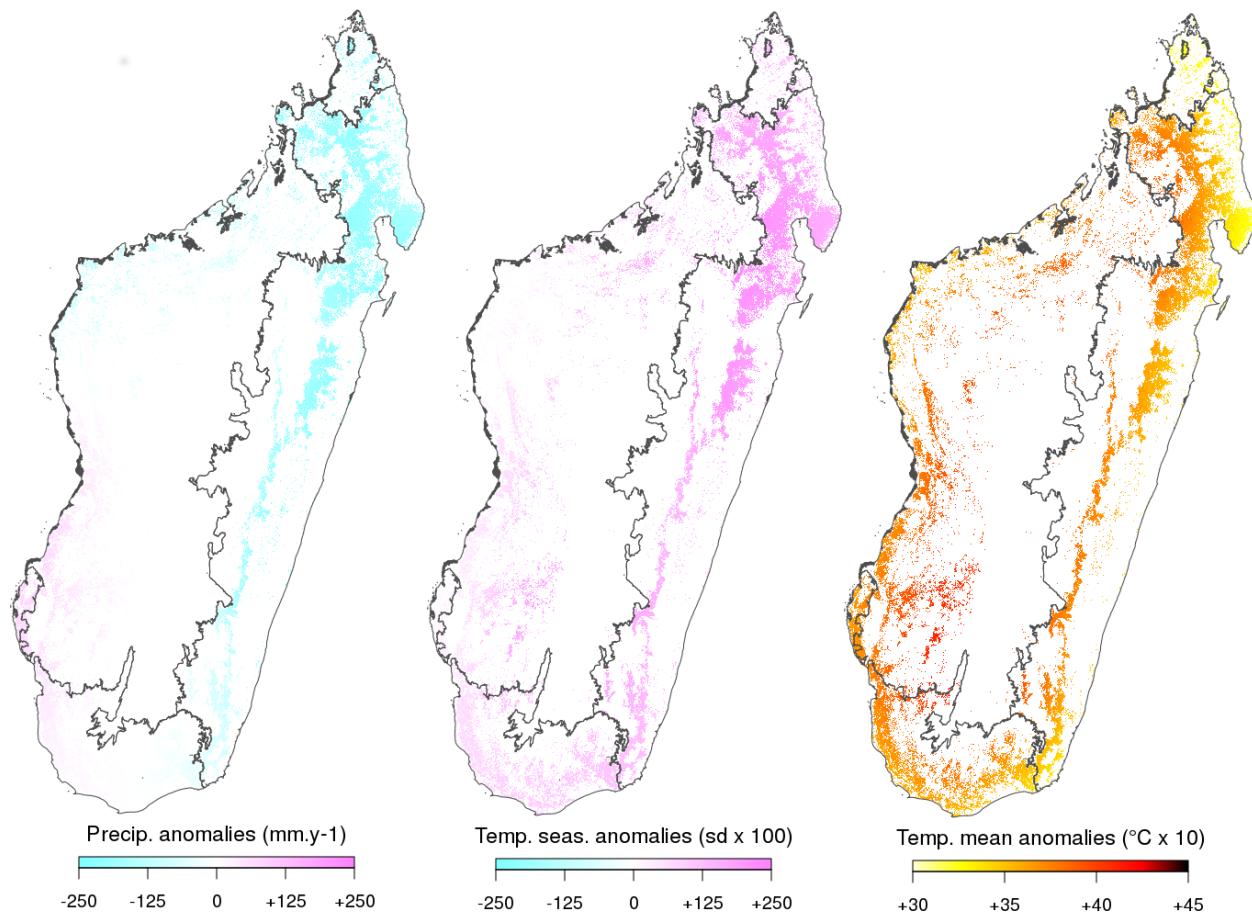


Figure 4: Anomalies climatiques prédictes sur les forêts de Madagascar entre 2010 et 2080. Les anomalies ont été calculées pour les précipitations annuelles (panneau de gauche), la saisonnalité de la température (milieu) et la température moyenne annuelle (droite) en faisant la moyenne des prédictions de sept modèles climatiques du GIEC suivant le scénario d'émission RCP 8.5. Les précipitations devraient diminuer, notamment sur les forêts humides de l'est et la saisonnalité de la température ainsi que la température moyenne annuelle devraient augmenter sur l'ensemble des forêts de Madagascar.

Carte de carbone forestier et vulnérabilité des forêts tropicales au changement climatique à Madagascar

Dans le cadre du projet BioSceneMada, en utilisant les données climatiques précédemment calculées (<https://madaclim.cirad.fr>) et des données d'inventaires forestiers pour 1771 placettes réparties sur l'ensemble de Madagascar, nous avons démontré qu'il existait un lien fort entre climat et stocks de carbone forestiers. Ce lien est notamment déterminé par les caractéristiques architecturales (hauteur notamment) des espèces d'arbres présentes le long du gradient climatique à Madagascar (climat → assemblage d'espèces → stocks de carbone). Ainsi, les stocks de carbone sont en moyenne beaucoup plus faibles en forêt épineuse (17 Mg.ha^{-1}) qu'en forêt humide (150 Mg.ha^{-1}). Le modèle statistique intégrant la relation climat-stock de carbone a permis de produire une carte précise des stocks de carbone

forestier à Madagascar à une résolution de 250 m. Cette carte pourra être utilisée par les instances gouvernementales à Madagascar ou les porteurs de projet REDD+ au niveau régional pour le calcul des émissions de CO₂ associées à la déforestation. Cette carte ainsi que les données qui ont permis de l'obtenir sont disponibles sur le site du projet BioScenemada (<https://bioscenemada.cirad.fr/carbonmaps>) ainsi que sur le serveur de données Dryad (doi: 10.5061/dryad.9ph68).

Concernant les scénarios d'évolution de la biodiversité et des stocks de carbone forestier, nous avons montré à l'aide de ce modèle que les changements climatiques devraient induire des modifications fortes des communautés forestières et en conséquence une diminution de -17% (7-24%) des stocks de carbone forestier à Madagascar à l'horizon 2100 par rapport à 2010 (Fig. 5). Ces changements seront vraisemblablement plus forts pour la forêt humide de l'est (notamment autour de la péninsule de Masoala-Makira) que pour les forêts sèches et épineuses de l'ouest et du sud. En comparaison, un taux de déforestation constant de 0.5% par an conduirait à une perte de carbone forestier de l'ordre de 29% entre 2010 et 2100. L'impact potentiel des changements climatiques sur les émissions de CO₂ n'est donc pas à négliger.

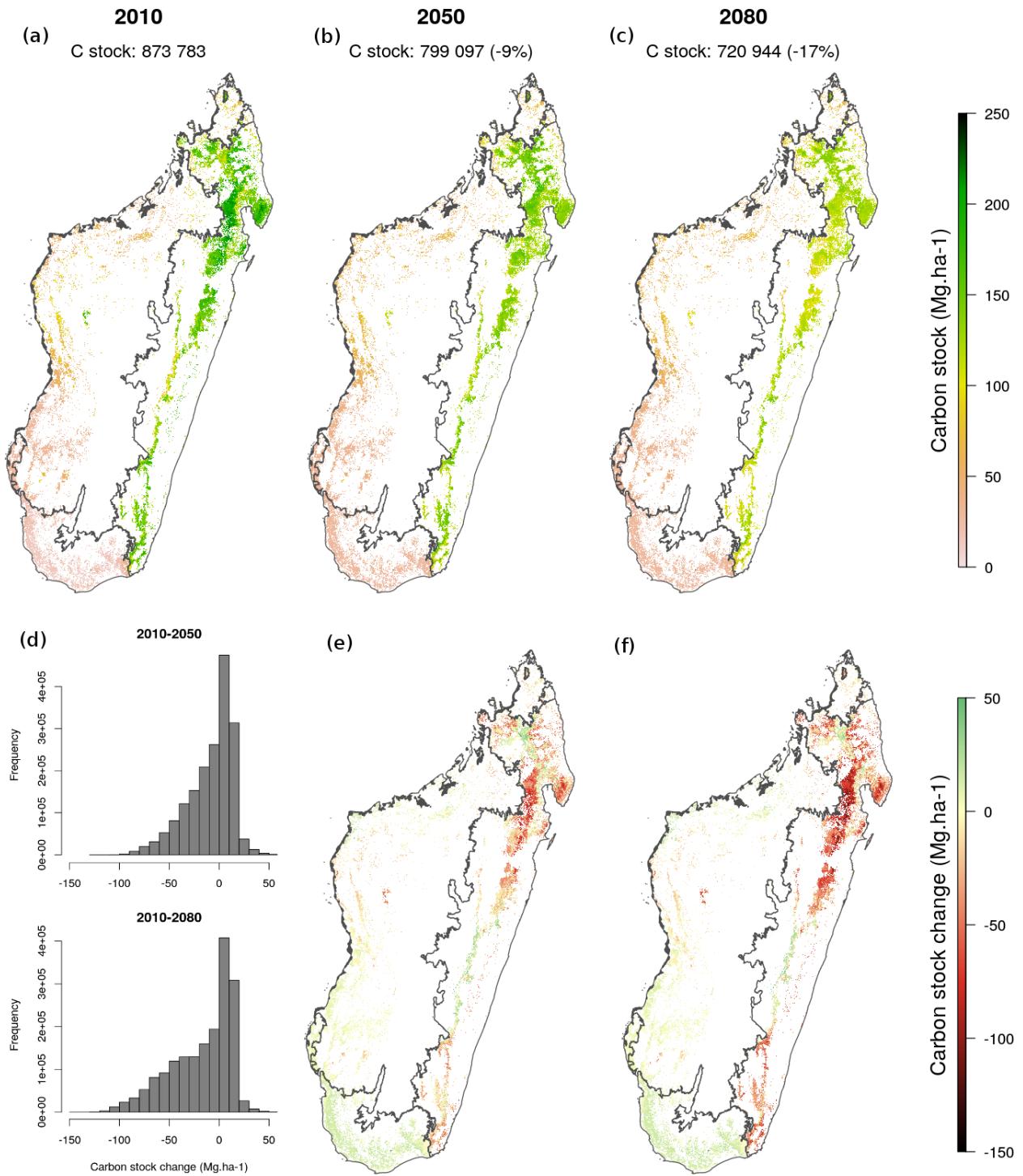


Figure 5: Carte de carbone forestier et évolution potentielle des stocks sous l'effet du changement climatique. Les changements climatiques devraient induire des modifications fortes des communautés forestières et en conséquence une diminution des stocks de carbone forestier (-17% en 2100 par rapport à 2010).

Base de données de biodiversité à Madagascar

Nous avons construit un jeu de données sur la biodiversité à Madagascar regroupant 300 000 observations (points de présence) pour 4969 espèces. Ces espèces sont réparties dans différents groupes taxonomiques (Plantes, Vertébrés, Invertébrés) et sont représentatives de la biodiversité à Madagascar (Tab. 1). Nous avons apporté une attention particulière à la qualité des données. Toutes les données ont été vérifiées du point de vue des coordonnées géographiques (issues de relevés GPS) et de la taxonomie. Pour la vérification de la taxonomie, nous nous sommes appuyés sur le package `taxize` disponible sous le logiciel R. Ce travail de compilation de données de biodiversité est sans précédent à Madagascar. Les précédentes études scientifiques sur la biodiversité à l'échelle nationale à Madagascar s'appuyaient sur un nombre d'espèces < 2843 (Allnutt *et al.*, 2008; Kremen *et al.*, 2008). Plusieurs institutions ont accepté de partager leur données de biodiversité dans le cadre du projet BioSceneMada et ont ainsi largement contribué à la réalisation de cette base de données. Ces données sont souvent issues d'un travail de prospection conséquent qui s'étalent sur plusieurs dizaines d'années.

Table 1: **Bases de données sur la biodiversité de Madagascar.** La base de données inclut des points de présence pour 4969 espèces réparties dans différents groupes taxonomiques. Ces espèces sont représentatives de la biodiversité à Madagascar.

	Groupe	Espèces	Genres	Obs.
Plantes	Arbres	531	283	40178
	Palmiers	178	16	5105
	Fougères	317	82	1664
	Légumineuses	724	149	30305
	Graminées	283	113	3469
	Autres	1229	359	34265
Vertébrés	Mammifères	189	69	28316
	Lémuriens	64	15	3136
	Oiseaux	285	172	60895
	Reptiles	153	41	4938
	Amphibiens	78	21	208
Invertébrés	Escargots	537	113	1635
	Fourmis	379	46	70012
	Papillons	262	82	16396
	Autres	355	203	6202
TOTAL=		4969	1749	303588

Atlas de la biodiversité à Madagascar et de sa vulnérabilité au changement climatique

Nous avons développé un script permettant de modéliser la niche climatique des espèces à partir de modèles d'ensemble (Vieilledent *et al.*, 2013a; Araujo & New, 2007). Ce script utilise le package `biomod2` sous R. A partir de variables environnementales, incluant des variables

climatiques (température moyenne annuelle, saisonnalité de la température, précipitations annuelles, déficit en eau, nombre de mois secs) et des variables physiques (radiation solaire, géologie) disponibles sur le site [MadaClim](#), il permet de prédire la probabilité de présence ainsi que l'aire de distribution présente et future des espèces à Madagascar. Les prédictions sont issues de plusieurs modèles statistiques (Maxent, GLM, GAM et Random Forest). L'approche par modèles d'ensemble permet de moyenner les prédictions faites par plusieurs modèles statistiques afin d'évaluer l'incertitude des prédictions et d'augmenter la robustesse de l'aire de distribution. Le script a été développé au cours du stage de Master II de Mario Muniz-Tagliari. L'idée est de pouvoir utiliser ce script et modéliser l'aire de distribution présente et future de l'ensemble des espèces constituant le jeu de données sur la biodiversité à Madagascar (4969 espèces).

Le script a été optimisé. Il peut être parrallélisé, c'est-à-dire envoyé sur les différents processeurs d'un serveur afin d'accélérer les calculs. Il permet également de créer un document pdf dynamique, réactualisable très facilement, où les photos, textes, figures et tableaux sont agencés de manière automatique pour chaque espèce (Fig. 6). La dernière version du script est disponible sur GitHub: <https://github.com/ghislainv/atlas>. Ce répertoire, privé jusqu'à la publication de l'atlas, est accessible sur demande. L'objectif est d'obtenir au final un atlas de la biodiversité à Madagascar incluant (i) les points de présence des espèces, (ii) leur aire de distribution actuelle, (iii) la distribution future potentielle des espèces sous l'effet du changement climatique et une estimation de leur vulnérabilité au changement climatique.

Un prototype de cet atlas a été réalisé pour les 7 espèces de baobab présentes à Madagascar. Le prototype de l'atlas est disponible [ici](#).

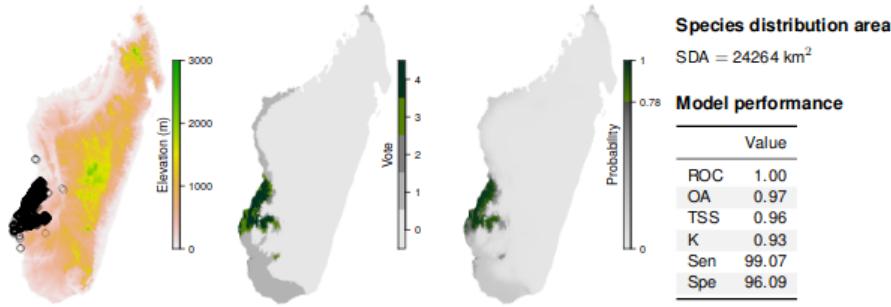
Adansonia grandiflora Baill.

NA, Malvaceae, –

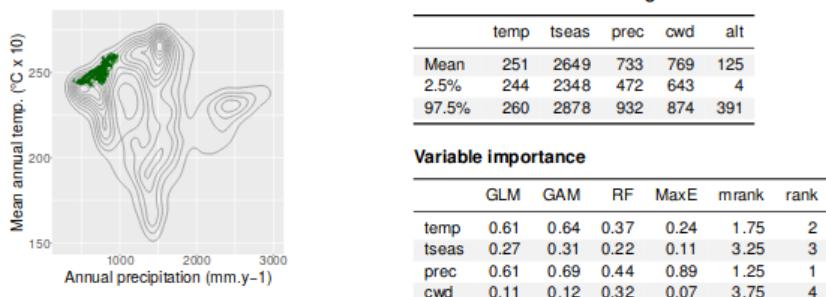


The long-lived Grandier's baobab is in leaf from October to May, and flowers between May and August (2). The flowers, said to smell of sour watermelon, open just before or soon after dusk, and all the pollen is released during the first night (2). It is pollinated by nocturnal mammals, such as fork-marked lemurs. They move through the canopies, inserting their snouts into the white flowers and licking nectar from the petal bases, resulting in pollen being deposited in the lemur's face (3). Grandier's baobab bears ripe fruit in November and December (2). Unlike the baobabs of Africa and Australia, it appears that the seeds of the tasty fruit are not dispersed by animals. Lemurs are the only living animals on Madagascar that are capable of acting as seed dispersers, yet this has never been documented (2). In the past however, this could have been very different. [...] <http://eol.org/5406372>

Current distribution



Climatic niche



Vulnerability to climate change

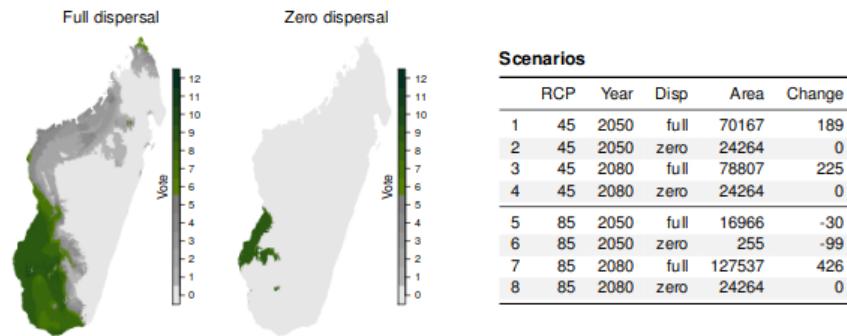


Figure 6: Extrait de l'atlas de la biodiversité à Madagascar et de sa vulnérabilité au changement climatique pour l'espèce *Adansonia grandiflora*. Une fiche est dynamiquement créée à partir du nom taxonomique de l'espèce et de ses points de présence en utilisant un script R. Photo et texte sont extraits automatiquement du site *Encyclopedia Of Life* (<http://eol.org>). Un ensemble de modèles statistiques est utilisé pour prédire la niche climatique et l'aire de distribution actuelle de l'espèce. Ce modèle d'ensemble est ensuite utilisé pour prédire la vulnérabilité de l'espèce au changement climatique en intégrant les prédictions climatiques du GIECC suivant deux scénarios, RCP 8.5 et 4.5.

Cartes de biodiversité et des communautés d'espèces à Madagascar

Lorsque l'on parle de carte de biodiversité à l'échelle nationale, l'objectif n'est pas uniquement d'obtenir des informations sur la localisation des “hotspots” ou points-chauds de la biodiversité (les sites ayant une diversité spécifique élevée), ce que l'on appelle la diversité α . Il est en effet surtout intéressant de considérer la diversité β , c'est-à-dire les communautés ou assemblages d'espèces et comment les assemblages d'espèces changent spatialement (“species turnover”), selon des gradients environnementaux (d'altitude, de climat, etc.). De telles cartes n'existent pas actuellement à l'échelle nationale pour Madagascar. Seules des cartes de végétation sont disponibles pour lesquelles la classification s'appuie sur la définition de grands biomes (<http://www.vegmad.org>) et non sur des relevés à l'échelle de l'espèce, à la fois pour la faune et la flore.

En utilisant des modèles de communautés (Ferrier *et al.*, 2007), nous avons cherché à identifier les facteurs environnementaux déterminants les assemblages d'espèces. Ces facteurs peuvent être climatiques ou associés à des barrières géographiques comme les bassins versants ou les rivières (Pearson & Raxworthy, 2009). Il ainsi été montré que la distribution des espèces de lémuriens à Madagascar était fortement liée aux bassins versants (Wilmé *et al.*, 2006; Mercier & Wilmé, 2013). Les modèles de communautés que nous avons utilisés, appelés GDM (Generalized Dissimilarity Models), modélisent les changements d'espèces au sein de la communauté en fonction des gradients environnementaux en s'appuyant sur des indices de dissimilarités entre sites (Ferrier *et al.*, 2007). En appliquant ce modèle à nos données de présence d'espèces à Madagascar, nous avons obtenu une première carte de la biodiversité β à Madagascar (Fig. 7). Mais le pourcentage de déviance expliquée par ce modèle est faible (<10%).

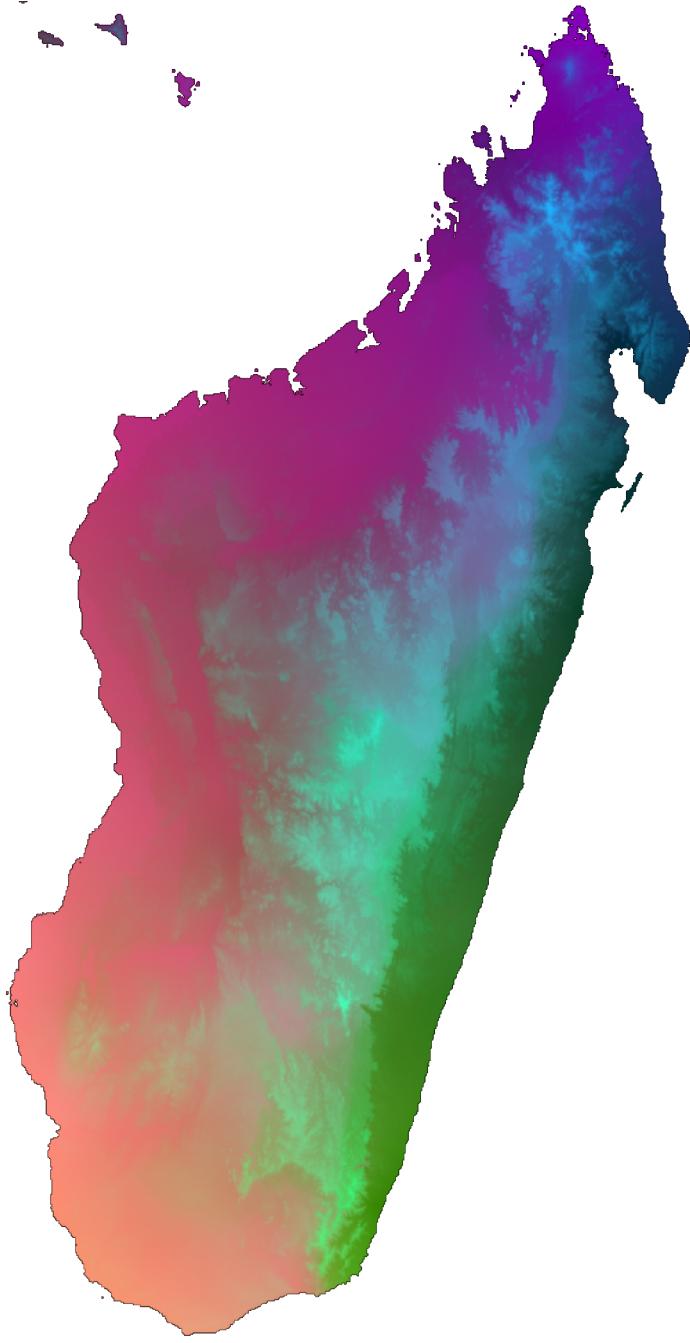


Figure 7: **Carte de biodiversité β pour Madagascar.** Les couleurs indiquent les changements d’assemblage d’espèces spatialement: les sites aux couleurs proches présentent des assemblages d’espèces proches. Deux gradients sont largement visibles sur cette carte: un gradient est-ouest lié à la topographie (chaîne de montagne nord-sud) et aux précipitations ainsi qu’un gradient nord-sud associé à la latitude et à la saisonnalité.

En appliquant ce même modèle à chaque groupe taxonomique, nous avons trouvé que (i) le pourcentage de variance expliquée par le modèle était généralement beaucoup plus élevé (entre 11% et 88%, Tab. 2) et que (ii) les facteurs explicatifs l’assemblage des communautés

d'espèces variaient d'un groupe taxonomique à l'autre, le climat n'étant pas toujours le facteur le plus important (Tab. 2). Par exemple, nous avons confirmé les résultats obtenus par Wilmé *et al.* (2006) pour les espèces de lémuriens. Pour ce groupe, ce sont les bassins versants qui expliquent en majorité l'assemblage des espèces (84% de déviance expliquée). Cela pourrait notamment s'expliquer par la difficulté qu'on a à traverser les cours d'eau. A contrario, le climat explique une grande partie des assemblages d'espèces de reptiles et d'amphibiens, espèces poikilothermes (animaux ayant une température corporelle qui varie avec celle de leur milieu) et des espèces de mammifères autres que les lémuriens. Pour d'autres groupes, comme les espèces d'arbres, les facteurs climatiques et les bassins versants semblent expliquer à part égale les assemblages d'espèces.

Ainsi, on voit qu'il est difficile d'établir une carte des communautés d'espèces végétales et animales à Madagascar, les facteurs explicatifs de la distribution des communautés changeant d'un groupe à l'autre. Nous montrons également que lorsque l'on utilise des modèles de communautés construits à partir de GDM, basés sur indices de dissimilarités combinant toutes les espèces, il y a un risque d'obtenir un modèle très peu explicatif, alors que des modèles à l'échelle du groupe taxonomique sont bien meilleurs. Il serait ainsi nécessaire d'envisager (i) de croiser les cartes de biodiversité obtenues par groupe taxonomique, ou bien (ii) de travailler plutôt avec des modèles de distribution à l'échelle de l'espèce, ou encore (iii) d'utiliser d'autres types de modèles comme les "modèles joints" (Warton *et al.*, 2015), permettant de combiner des processus à l'échelle de l'espèce et des processus à l'échelle de la communauté.

Table 2: Facteurs explicatifs l'assemblage des espèces par groupe taxonomique. Le tableau indique le pourcentage de déviance expliquée par chacun des modèles. Les modèles Clim n'incluent que des variables climatiques, les modèles WS n'incluent que les bassins versants (WS pour "watershed") et les modèles C+WS incluent les deux types de facteurs. Le modèle Full inclue en plus des corrélations spatiales.

Groupes	Clim	WS	C+WS	Full
Plantes				
Arbres	30	28	43	44
Tous	24	16	31	32
Animaux				
Lémuriens	56	84	87	88
Autres mammifères	63	30	64	65
Oiseaux	8	3	9	11
Reptiles et Amphibiens	34	33	40	40
Invertébrés	9	3	9	11
Tous	6	2	6	9

Soixante ans (1953-2014) d'étude de la déforestation et de la fragmentation forestière à Madagascar

Nous avons obtenu de nouvelles cartes d'évolution de la couverture forestière à Madagascar sur la période 2000-2014 (Fig. 8). Ces cartes sont sans nuages et disponibles à 30 m de résolution. Elles viennent compléter les cartes de [Harper *et al.* \(2007\)](#) disponibles pour les années 1953, 1973 et 1990. Ainsi, nous avons pu étudier l'évolution du couvert forestier et de la fragmentation de la forêt à l'échelle nationale sur une période de 60 ans. Nous montrons que le couvert forestier a diminué de 44% sur la période 1953-2014 (37% si l'on considère la période 1973-2014). Les forêts naturelles couvrent 8.9 Mha en 2014 (15% du territoire national) et incluent 4.4 Mha (50%) de forêt humide, 2.6 Mha (29%) de forêt sèche, 1.7 Mha de forêt épineuse (19%) et environ 177,000 ha (2%) de mangrove. Depuis 2005, les surfaces déforestées annuellement ont augmenté à Madagascar pour atteindre 100,000 ha/an sur la période 2010-2014 (correspondant à un taux de déforestation de 1.1 %/an). Aujourd'hui, environ 50% de la forêt est située à moins de 100 m de la lisière et est donc exposée aux perturbations. Les cartes de couvert forestier sont disponibles sur le site du projet BioScèneMada: <https://bioscenemada.cirad.fr/forestmaps>. Elles servent de base au travail de modélisation du processus de déforestation.

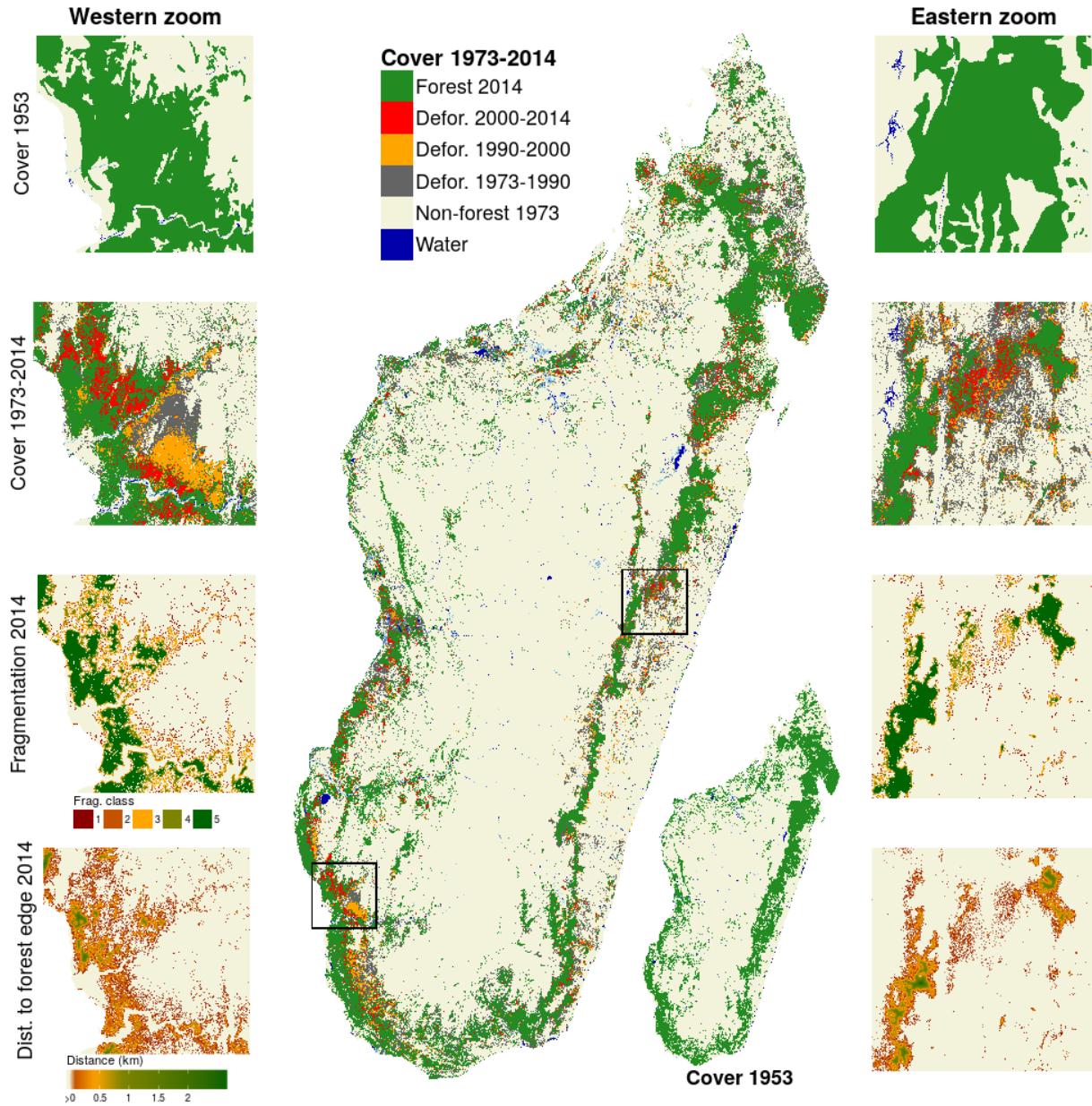


Figure 8: Evolution du couvert forestier à Madagascar sur 60 ans de 1953 à 2014.
 Les changements de couverture forestière de 1973 à 2014 sont présentés sur la figure principale. Le couvert forestier en 1953 est présenté dans l'encart en bas à droite. Deux séries de zooms sur la forêt sèche de l'ouest (à gauche) et de la forêt humide de l'est (à droite) présentent une vue plus détaillée de (du haut vers le bas): la couverture forestière en 1953, les changements de couverture forestière de 1973 à 2014, la fragmentation de la forêt en 2014 et la distance à la lisière de la forêt en 2014. Les données sur les plans d'eau et leur saisonnalité (bleu foncé pour permanent, bleu clair pour saisonnier) sont issues de l'article de ([Pekel et al., 2016](#)).

Retour sur les facteurs de déforestation: la pauvreté n'est pas l'unique responsable de la déforestation à Madagascar.

Afin de valider les cartes de déforestation historique obtenues sur la période 2000-2014 et d'identifier plus précisément les facteurs de déforestation, nous avons effectué une mission de terrain dans le Menabe, à l'ouest de Madagascar, en forêt sèche. Nous nous sommes concentrés sur deux zones identifiées comme "hot-spot" de déforestation, autour des Parcs Nationaux de Menabe-Antimena et Kirindy-Mité. Nous avons effectué des observations de terrain ainsi que des enquêtes auprès des populations et de l'administration locale afin d'identifier les causes de la déforestation. Nous avons conclu que les causes directes de la déforestation dans la région sont l'agriculture sur brulis pour la culture de rente comme le maïs ou l'arachide et le paturage des zébus (Fig. 9). Le maïs et l'arachide sont principalement exportés sur les marchés internationaux, notamment vers les îles de l'Océan Indien et en Chine. Ces activités sont favorisées par un marché global non régulé, une forte corruption et une non-application des lois environnementales à Madagascar. Dans l'hypothèse d'un scénario "business-as-usual", si aucune solution n'est trouvée pour lutter efficacement contre la déforestation, le couvert forestier pourrait diminuer de plus de 50% sur la période 2010-2050 dans les deux zones d'étude.

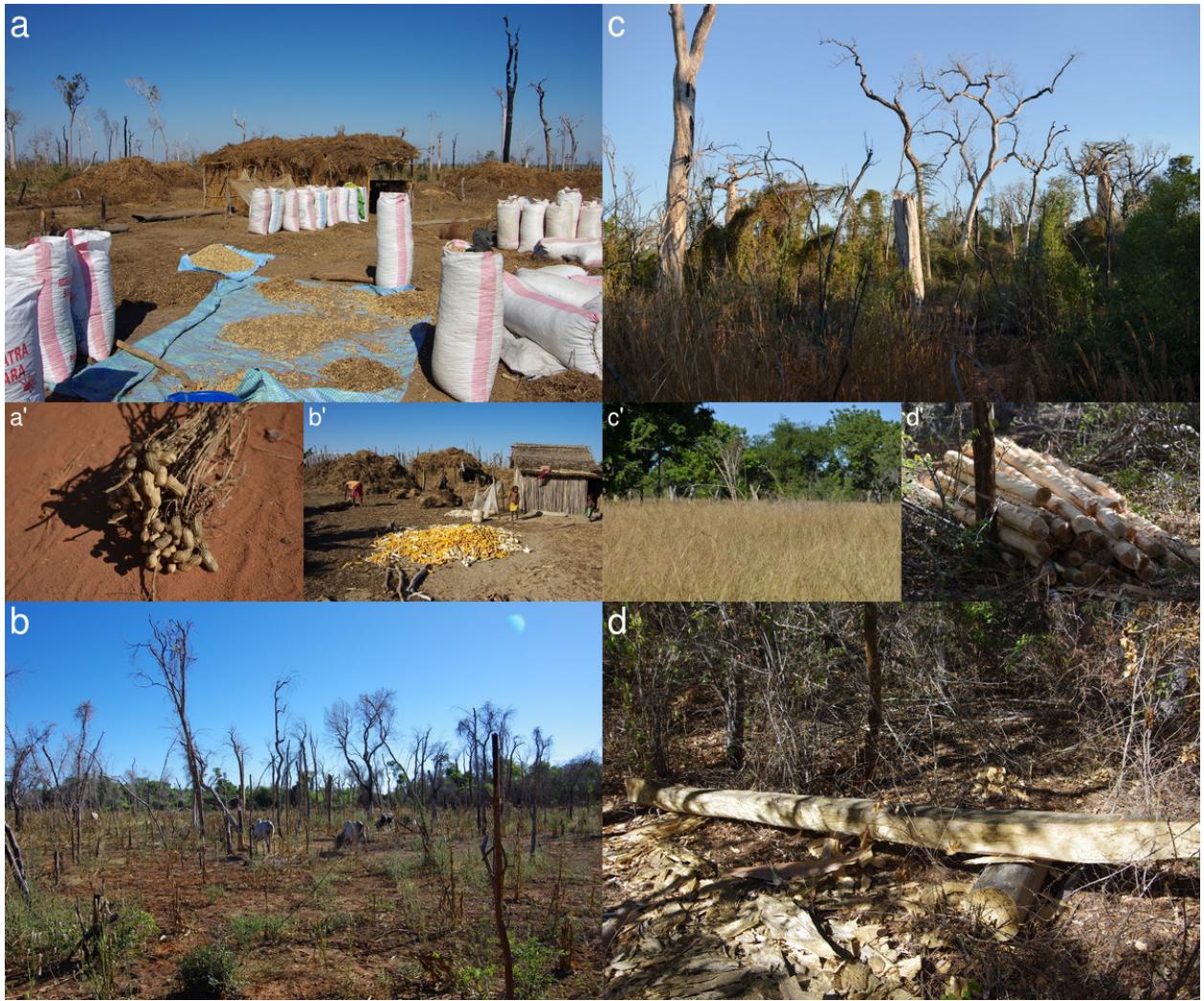


Figure 9: Principales causes de la déforestation dans le Menabe centrale. **a-a'**: Agriculture sur brulis (“*hatsake*”) pour la culture d’arachide. **b-b’**: Agriculture sur brulis pour la culture de maïs. **c-c’**: Cyclone suivi de feux incontrôlés d’origine anthropique. **d-d’**: Exploitation illégale de bois.

Logiciel Python deforestprob pour le calcul de la probabilité spatiale de déforestation

Un module Python a été développé afin de pouvoir estimer rapidement la probabilité spatiale de déforestation sur de grandes échelles spatiales (nationales ou continentales) avec une résolution fine (ex. 30 ou 10 m) et de prédire quelles seront les zones à risques de déforestation et les zones potentielles de refuge de la biodiversité dans le futur. Le modèle portant sur la localisation de la déforestation permet de prédire la probabilité spatiale de déforestation en fonction de variables environnementales décrivant l’accessibilité de la forêt (distance aux routes, villages et rivières, distance à la lisière de la forêt, topographie), son statut de protection (appartenance au réseau d’aires naturelles protégées) et son historique (distance

à la déforestation passée). Le module Python est disponible sur le serveur Github: <https://github.com/ghislainv/deforestprob>.

Nous avons utilisé ce module pour estimer la probabilité spatiale de déforestation à l'échelle nationale à Madagascar, à une résolution fine de 30 m et pour la couverture forestière de l'année 2010 (Fig. 10). Cette démarche a fait l'objet d'un tutoriel où chacune des étapes de modélisation est indiquée pas à pas. Cet tutoriel, disponible sous forme d'un notebook Jupyter est disponible à l'adresse suivante: <https://ghislainv.github.io/deforestprob>. Le tutoriel pourra notamment être utilisé pendant les ateliers de renforcement de capacité dans les deux prochaines années à venir.

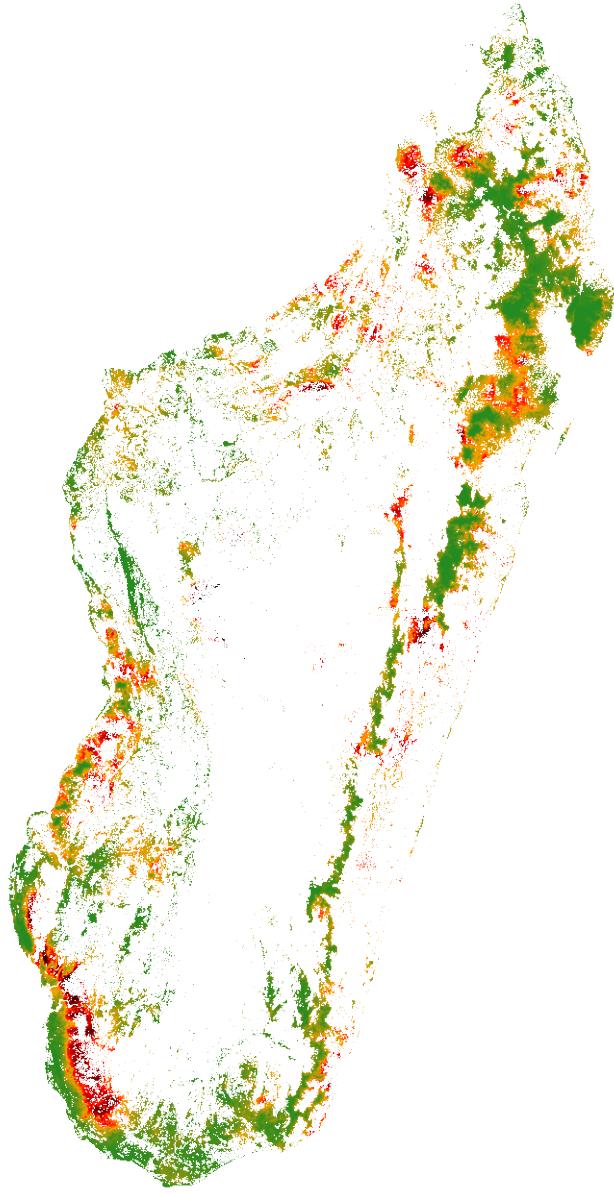


Figure 10: **Probabilité de déforestation pour les forêts de Madagascar.** Couvert forestier de l'année 2010 ([Vieilledent *et al.*, 2017](#)). La probabilité de déforestation est faible (vert) dans les zones reculées et au sein des aires protégées et augmente (rouge puis noir) avec la proximité des villes et des routes.

Cartes du couvert forestier futur à Madagascar

A partir de la carte de probabilité de déforestation de 2010, en considérant une déforestation moyenne annuelle de 100 000 ha/an à l'échelle nationale sur la période 2010-2050, nous avons pu prédire les zones susceptibles d'être déforestées sur la période 2010-2050 et la couverture forestière probable à Madagascar en 2050 (Fig. 11). Pour cela, nous calculons la surface forestière déforestée sur une période de 40 ans entre 2010 et 2050 (4 Mha) et nous attribuons

la classe “non-forêt” aux pixels ayant la plus forte probabilité de déforestation jusqu’à obtenir une surface de 4 Mha. Les projections montrent une concentration des forêts dans les zones peu accessibles et situées en altitude dans le futur, notamment autour de la péninsule de Mosoala-Makira et dans le Corridor Ankeniheny-Zahamena (Fig. 8). Les aires protégées semblent relativement efficaces sur le court terme (horizon 2050) en contribuant à déplacer la déforestation sur des zones à plus faible biodiversité, en dehors des aires protégées. Par contre, si les taux de déforestation restent constants, la déforestation pénétrera au sein des aires protégées les plus accessibles sur le plus long terme (horizon 2100).

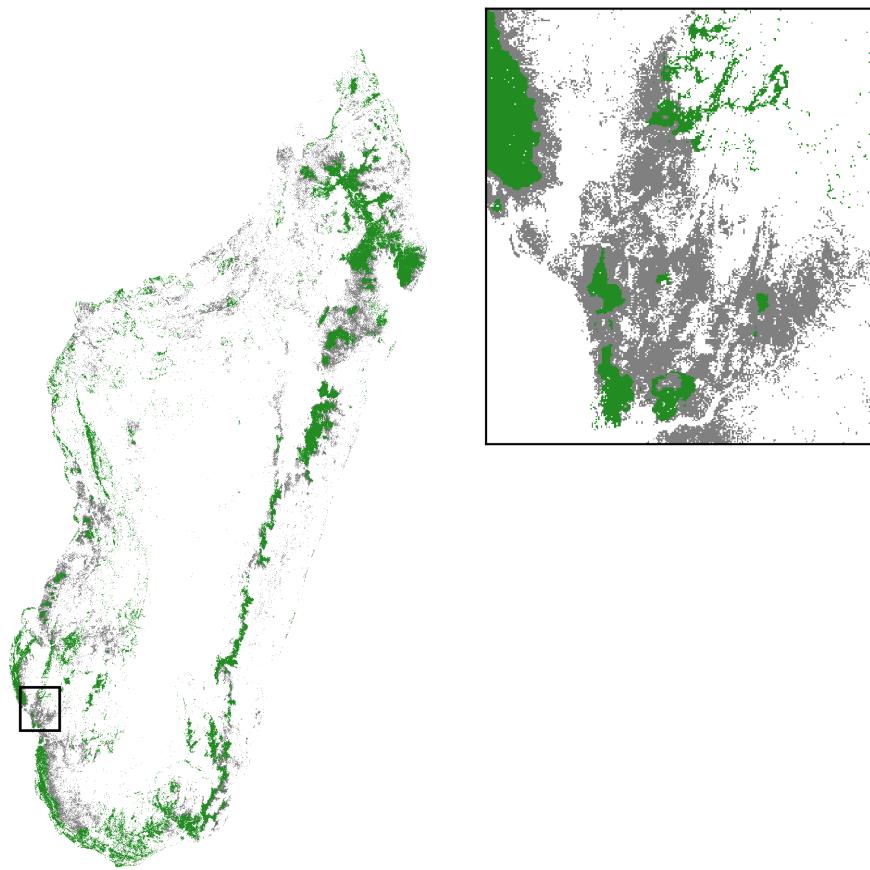


Figure 11: Deforestation sur la période 2010-2050 et couverture forestière en 2050 à Madagascar. Nous projetons la couverture forestière à l’horizon 2050 en considérant une déforestation moyenne annuelle de 100 000 ha/an. Vert: forêt résiduelle en 2050; gris: déforestation sur la période 2010-2050.

Modèles d’évolution de l’intensité de déforestation en Afrique et à Madagascar

Afin de proposer des scénarios d’évolution de l’intensité de déforestation et du couvert forestier à Madagascar, il a fallu construire un modèle à l’échelle de l’Afrique afin de disposer d’un plus grand nombre de données et d’avoir un modèle plus robuste. Le modèle permet d’estimer le

taux de déforestation (en ha/an) pour l'ensemble des pays africains en prenant en compte le couvert forestier existant (en ha) et la taille de la population (en nombre d'habitants). Trois jeux de données ont été comparés pour la modélisation : (i) celui issu du rapport Global Forest Ressource Assessment (FRA) 2015 de la FAO ([FAO, 2015](#)), (ii) celui issu du projet Trees du JRC ([Achard et al., 2014](#)) et (iii) celui issu de Global Forest Watch ([Hansen et al., 2013](#)). Nous montrons que les données de déforestation du FRA ne peuvent pas être utilisées pour modéliser et prédire la déforestation (“outlier”). Les résultats permettent également de montrer que malgré les variations annuelles des taux de déforestation (associables aux marchés et aux politiques), la tendance sur le long terme est forte et qu'un simple modèle permet de reproduire fidèlement l'évolution du couvert forestier de 1990 à 2015 pour la plupart des pays africains. Ce modèle est utilisé pour prédire les tendances de déforestation pour les pays africains, selon un scénario de référence (ou scénario “business-as-usual”), en tenant compte des projections démographiques des Nations Unies jusqu'à l'horizon 2100. Pour Madagascar, on observerait une diminution de l'intensité de déforestation après 1950 liée à la transition démographique et à la réduction du couvert forestier disponible. Toutefois, les surfaces déforestées annuellement resteraient importantes (>75000 ha/an). Selon ce scénario, le couvert forestier diminuerait ainsi de plus de 50% entre 2000 et 2050 et de plus de 75% entre 2000 et 2100, pour atteindre environ 2 Mha en 2100 (Fig. 12). Ces scénarios d'évolution de l'intensité de déforestation intégrant la croissance démographique seront utilisés pour obtenir de nouvelles cartes du couvert forestier futur en 2050 et 2100.

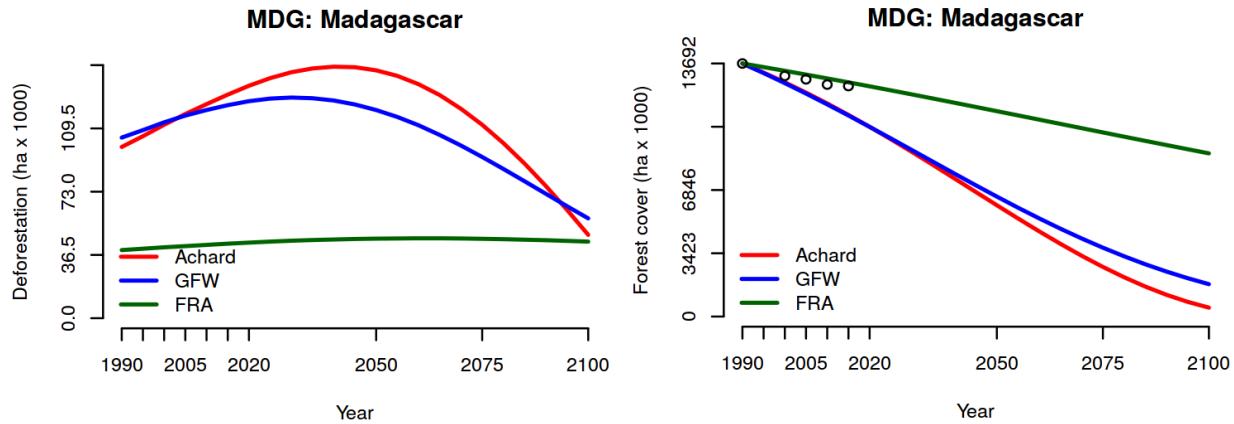


Figure 12: Evolution (1990-2010) et prédition (2010-2100) de la déforestation et du couvert forestier à Madagascar. La figure de gauche montre l'évolution de la déforestation (en milliers d'hectares par an) et la figure de droite l'évolution du couvert forestier (en milliers d'hectares). Nous avons considéré trois jeux de données (FAO FRA, Achard et al. 2014 JRC TREES project, Global Forest Watch Hansen et al. 2013). Les projections prennent en compte la croissance démographique (données des Nations Unies, 2015 Revision of World Population Prospects).

Liste des publications et communications scientifiques

I.1 - Articles ou communications primaires (résultats originaux) scientifiques

I.1.1. Dans périodique à comité de lecture.

Articles acceptés

Dezécache C., J.-M. Salles, G. Vieilledent, and B. Hérault. 2017. Moving forward socio-economically focused models of deforestation. *Global Change Biology*. 23(9): 3484-3500. <https://doi.org/10.1111/gcb.13611>.

El Hajj M., N. Baghdadi, I. Fayad, G. Vieilledent, J.-S. Bailly, and D. Ho Tong Minh. 2017. Interest of integrating spaceborne LiDAR data to improve the estimation of biomass in high biomass forested areas. *Remote Sensing*. 9(3). <https://doi.org/10.3390/rs9030213>.

Vieilledent G., O. Gardi, C. Grinand, C. Burren, M. Andriamanjato, C. Camara, C. J. Gardner, L. Glass, A. Rasolohery, H. Rakoto Ratsimba, V. Gond, and J.-R. Rakotoarijaona. 2016. Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *Journal of Ecology*. 104: 703-715. doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12548>.

Articles en pre-print/review

Vieilledent G., C. Grinand, F. A. Rakotomalala, R. Ranaivosoa, J.-R. Rakotoarijaona, T. F. Allnutt, and F. Achard. Combining global tree cover loss data with historical national forest-cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *bioRxiv*. 147827. doi: <https://doi.org/10.1101/147827>. in review in *Biological Conservation*.

Articles en préparation

Charra M., S. Goodman, A. Raselimanana, M.-J. Raherilalao, V. Soarimalala, D. Lees, F. Rakotondrainibe, J. Moat, M. Andriamanjato, W. J. Baker, M. Rakotoarinivo, M. Vorontsova, T. Pearce, T. F. Allnutt, D. Razafimpahanana, M. Pedrono, J.-R. Rakotoarijaona and G. Vieilledent. Climate or watersheds ? Environmental factors determining species assemblages change according to the taxonomic group. in prep.

Muniz-Tagliari M., J.-M. Leong Pock-Tsy, C. Cornu and P. Danthu and G. Vieilledent. Vulnerability of the seven Madagascar's baobab species to climate change. in prep.

Vieilledent G., M. Muniz-Tagliari, C. Grinand, F. Montfort. Atlas of the biodiversity of Madagascar: present species distribution and species vulnerability to climate change. in prep.

Vieilledent G., C. Grinand, M. Pedrono, T. Rabetrano, J.-R. Rakotoarijaona, B. Rakotoarivelo, F. A. Rakotomalala, L. Rakotomalala, A. Razafimpahanana, M. Nourtier, and F. Achard. It's not only poverty: uncontrolled global trade and bad governance are responsible for rampant deforestation in Western Madagascar. in prep.

Vieilledent G., and F. Achard. Including spatial-autocorrelation in deforestation model to obtain realistic deforestation projections at national or continental scales. in prep.

Grinand C., G. Vieilledent, T. Razafimbelo, J.-R. Rakotoarijaona, M. Nourtier M., and M. Bernoux. Land use change spatial modeling using machine learning tools and a global land cover change dataset. in prep.

Vieilledent G., W. F. Laurance, S. Peedell, and F. Achard. The fate of tropical forests associated to the demographic explosion in Africa. in prep.

Vieilledent G., 2016. MadaClim: a set of climatic and environmental spatial variables for Madagascar. Data paper. in prep.

I.1.2. Dans périodique sans comité de lecture.

I.1.3. Rapports diplômants

Grinand C. 2016. Suivi et modélisation des changements d'usage des terres et stocks de carbone dans les sols et les arbres dans le cadre de la REDD+ à Madagascar. Vers des mesures pertinentes localement et cohérentes à large échelle. *Thèse de doctorat en Écologie Fonctionnelle et Sciences Agronomiques*. Montpellier SupAgro. Ecole doctorale GAIA.

Muniz-Tagliari M. 2015. Biogéographie et vulnérabilité au changement climatique des espèces de baobabs à Madagascar. *Master II Biologie Végétale Tropicale*. Université de Montpellier.

Charra M. 2015. Mise en place d'une base de données et réalisation d'une carte de biodiversité faune/flore à Madagascar. *Master II Ecologie Biologie Evolution*. Université Paris-Sud XI, Orsay.

Long R. 2014. Modélisation de la déforestation à Madagascar. *Master I Agronomie Générale*. AgroParisTech.

I.1.4. Communications courtes dans congrès / symposiums scientifiques

Vieilledent G., W. F. Laurance, S. Peedell, and F. Achard. The fate of tropical forests associated to the demographic explosion in Africa. Scennet 2016: international conference on Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem Services in Support of Decision Making. Montpellier. Présentation orale.

Grinand C., G. Vieilledent, T. Razafimbelo, J.-R. Rakotoarijaona, M. Nourtier M., and M. Bernoux. 2016. New tools and methodological framework to study spatial drivers of deforestation, degradation and regeneration and forecast possible futures in Madagascar. Scennet 2016: international conference on Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem Services in Support of Decision Making. Montpellier. Présentation orale.

Vieilledent G., O. Gardi, C. Grinand, C. Burren, M. Andriamanjato, C. Camara, C. J. Gardner, L. Glass, A. Rasolohery, H. Rakoto Ratsimba, V. Gond, J.-R. Rakotoarijaona. 2016. Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate

change in Madagascar. In : Tropical ecology and society reconciliating conservation and sustainable use of biodiversity. Program and abstracts. Plinio Sist (ed.), Stéphanie Carrière (ed.), Pia Parolin (ed.), Pierre-Michel Forget (ed.). ATBC. Storrs : ATBC, Résumé, p. 325. Montpellier. Présentation orale.

Vieilledent G., M. Charra, M. Muniz-Tagliari, C. Grinand, T. F. Allnutt, D. Razafimparanana, M. Pedrono, J.-R. Rakotoarijaona. 2015. Biodiversity Scenarios in Madagascar. ICCB-ECCB 2015: 27th International Congress for Conservation Biology - 4th European Congress for Conservation Biology conference. Montpellier. Poster.

Vieilledent G., T. F. Allnutt, C. Grinand, M. Pedrono, J.-R. Rakotoarijaona, and D. Razafimparanana. BioSceneMada: Biodiversity scenarios under the effect of climate change and future deforestation in Madagascar. ICCB-ECCB 2015: 27th International Congress for Conservation Biology - 4th European Congress for Conservation Biology conference. Montpellier. Side-event FRB-FFEM. Présentation orale.

Vieilledent G., and F. Achard. 2018. Accounting for spatial autocorrelation in deforestation modelling. ISEC 2018: International Statistical Ecology Conference. St Andrews (UK). Présentation orale.

I.1.5. Autres supports.

Vieilledent G., C. Grinand, M. Pedrono, T. Rabetrano, J.-R. Rakotoarijaona, B. Rakotoarivelo, F. A. Rakotomalala and Dimby Razafimparanana. 2016. Deforestation process in the dry forests of the Menabe region, western Madagascar. Mission report.

I.2 - Synthèses scientifiques

- I.2.1. Dans périodique à comité de lecture.
- I.2.2. Dans périodique sans comité de lecture. I.2.3. Chapitre d'ouvrage.
- I.2.4. Ouvrage entier.
- I.2.5. Rapports diplômants à caractère bibliographique (thèse vétérinaire...).
- I.2.6. Conférences dans congrès ou symposium scientifique. I.2.7. Autres supports.

Tableau des livrables

Table 3: **Livrables du projet BioSceneMada.** Les livrables sont classés par catégories (“Bases de données”, “Cartes”, etc.). Les articles, disposant d’une section spécifique dans le rapport, n’ont pas été repris.

Catégorie	Description	Commentaire
Bases de données	Variables climatiques et environnementales	Livré
	Inventaires de 1771 placettes pour le stock de carbone forestier	Livré
	Base de données de biodiversité (points de présence pour 4969 espèces)	Livré
Scénarios	Scénarios de déforestation: tendance historique et effet de la démographie	Livré
	Scénarios climatiques et biodiversité	Livré pour certains groupes taxonomiques. A généraliser à l’ensemble des espèces.
Cartes	Evolution (1953-2014) du couvert forestier (30m)	Livré
	Carte de probabilité de déforestation (30m)	Livré
	Couvert forestier futur en 2050 et 2100 (30m)	Livré pour 2050. En cours pour 2100. Inclure le scénario avec croissance démographique.
	Stocks de carbone forestier en 2010 et 2080 (250m)	Livré
Atlas	Cartes des habitats forestiers vulnérables/résilients aux changement climatiques	Livré
	Carte de biodiversité beta (1km)	Première version. Nouvelle approche à développer pour tenir compte des différences entre groupes taxonomiques.
Atlas	Atlas de la biodiversité à Madagascar	Prototype livré. A généraliser à l’ensemble des espèces
Logiciels	Module Python ‘deforestprob’ pour la modélisation de la déforestation	Livré
	Script R ‘atlas’ pour la modélisation de la niche climatique des espèces	Livré

Personnes ayant participé à ce projet

Table 4: **Liste des participants au projet par institution.** Le statut des personnes ayant participé au projet en temps que stagiaire de Master ou thésard est indiqué dans la colonne de droite.

Institut	Nom	Statut particulier
ONE	Jean-Roger Rakotoarijaona	
	Rija Ranaivosoa	
	Bruno Rakotoarivelo	
ETC Terra	Clovis Grinand	Thésard
	Fety A. Rakotomalala	
	Marie Nourtier	
WCS	Frédérique Montfort	
	Ruoyin Long	Stagiaire
	Andriamandimbisoa (Dimby) Razafimpahanana	
Cirad	Thomas F. Allnutt	
	Tsiky Rabetrano	
	Ghislain Vieilledent	
Cirad	Miguel Pedrono	
	Mario Muniz-Tagliari	Stagiaire
	Margaux Charra	Stagiaire

5. Autres actions, produits de diffusion et exploitation des résultats vers les décideurs et les acteurs concernés

Diffusion, communication et transfert de connaissance (autres que supports à caractère scientifique)

Sites internet

Site web du projet BioSceneMada (<https://bioscenemada.cirad.fr>). Le site web permet d'avoir accès à toutes les informations et documents relatifs au déroulement du projet.

Le site web MadaClim (<https://madaclim.cirad.fr>), produit du projet BioSceneMada, regroupe les données climatiques et environnementales pour Madagascar.

Présentations

M. Pedrono, T. F. Allnutt, C. Grinand, J.-R. Rakotoarijaona, D. Razafimpahanana, and G. Vieilledent. Séminaire du projet FED-FEDER POCT “Biodiversité de l’Océan Indien”“, 2-5 juin 2015, Université de la Réunion, Saint Denis, Réunion, France. Public: Experts de la biodiversité de l’Océan Indien continental et étudiants en écologie de la Réunion.

Vieilledent G., T. F. Allnutt, C. Grinand, M. Pedrono, J.-R. Rakotoarijaona, and D. Razafimpahanana. 2015. BioSceneMada: Scénarios de la biodiversité sous l’effet conjoint du changement climatique et de la déforestation à Madagascar. Journées FRB 2015, “Les scénarios de la biodiversité à l’heure du changement climatique”. 2 octobre 2015. Paris. Public: Experts français de l’IPBES et du GIECC.

M. Pedrono, T. F. Allnutt, C. Grinand, J.-R. Rakotoarijaona, D. Razafimpahanana, and G. Vieilledent. Journée d’animation scientifique du Dispositif en Partenariat “Forêt et Biodiversité”, 25 septembre 2015, FOFIFA-DRFP, Antananarivo, Madagascar. Public: Chercheurs et étudiants malgaches, membres de la direction du CIRAD.

M. Pedrono, T. F. Allnutt, C. Grinand, J.-R. Rakotoarijaona, D. Razafimpahanana, and G. Vieilledent. Table ronde de la Journée du Volontariat Français sur le thème “Regards croisés sur le changement climatique à Madagascar”, 3 octobre 2015, Alliance Française, Antananarivo, Madagascar. Public: Grand public malgache et français, volontaires internationaux français, ONGs de développement.

M. Pedrono, T. F. Allnutt, C. Grinand, J.-R. Rakotoarijaona, D. Razafimpahanana, and G. Vieilledent. Série de conférences “COP21 à l’Institut Français de Madagascar: la recherche et le changement climatique”, 25 novembre 2015, Alliance Française, Antananarivo, Madagascar. Public: Grand public malgache et français.

Réunions avec les parties-prenantes

Plusieurs réunions de présentation du projet et de présentation des résultats intermédiaires ont eu lieu à Antananarivo avec les parties-prenantes du projet. Etaient présents des membres du MEEF (Ministère de l’Environnement, de l’Ecologie et des Forêts, Direction Générale des Forêts et Direction Générale de l’Environnement), des ONG environnementales (WWF, WCS, CI, GERP, Asity Madagascar, Vahatra, Biotope, Blue Ventures), des chercheurs (Université d’Antananarivo, ESSA, IOGA, LRI, IRD, Cirad, RGB Kew, MBG), des membres d’institutions nationales (Madagascar National Park, Office National de l’Environnement, FOFIFA):

- Réunion de présentation des avancées du projet, le 3 Juin 2016 à Antananarivo
- Réunion de présentation des avancées du projet, le 2 Avril 2015 à Antananarivo
- Réunion de lancement du projet, le 5 Mars 2014 à Antananarivo



Figure 13: Participants à la réunion de présentation des avancées du projet, le 3 Juin 2016 à Antananarivo. Les participants incluent des chercheurs, étudiants, membres d'ONG environnementales ou institutions nationales.

Articles de presse

Les résultats de l'article sur la vulnérabilité des forêts tropicales au changement climatique à Madagascar ont été largement diffusés dans la presse: [Journal of Ecology's blog](#), [The Conversation](#), [Le Figaro](#), [Le Point](#), [FranceTV info](#), [El Mercurio](#), [Midi-Libre](#), [Cirad](#), [Cirad activity report 2015](#).

Interviews

Les résultats de l'article sur la vulnérabilité des forêts tropicales au changement climatique à Madagascar ont fait l'objet d'une interview sur Radio Classique dans l'émission "3 minutes pour la planète" du 16 Février 2016.

Outils de gestion ou d'aide à la décision développés grâce à ce projet

Plusieurs outils ont été développés au cours du projet BioSceneMada pour la gestion ou l'aide à la décision concernant la conservation de la biodiversité à Madagascar. Ces outils sont sous forme de bases de données, de cartes à haute résolution, d'un atlas de la biodiversité, de logiciels. Ces outils seront notamment utiles pour l'application du programme REDD+ à Madagascar et l'optimisation du réseau d'aires naturelles protégées.

Base de données: Le projet BioSceneMada a permis de constituer une base de données climatiques et environnementales à Madagascar. Le projet a également permis d'obtenir une base de données de biodiversité incluant plus de 300 000 points de présences pour 4969 espèces représentatives de la biodiversité à Madagascar. Cette base de données, incluant des données privées, sera accessible sur demande.

Cartes: Le projet BioSceneMada a permis d'obtenir différentes cartes utiles pour la gestion de la biodiversité. Sont disponibles: des cartes de couverts forestiers sur la période 1953-2014 à 30m de résolution, une première carte de la biodiversité β , une carte des habitats forestiers vulnérables/résilients aux changements climatiques, une carte de la couverture forestière probable en 2050 et 2100 indiquant les zones à risque de déforestation.

Atlas: Un atlas de la biodiversité est en cours de réalisation. Un prototype de cet atlas a déjà été réalisé pour le groupe des baobabs à Madagascar. Cet atlas permettra d'obtenir l'aire de distribution actuelle des espèces ainsi qu'une estimation de leur vulnérabilité au changement climatique indiquant notamment les zones de refuge climatique pour ces espèces.

Bibliothèques logicielles: Deux principales bibliothèques logicielles à destination des gestionnaires ont été développées au cours du projet. Le module Python `deforestprob` permet la modélisation et la projection spatialisée de la déforestation dans le futur suivant différents scénarios d'intensité. Le script R `atlas` permet de modéliser la niche climatique des espèces et leur vulnérabilité au changement climatique en fonction des données de présence de l'espèce.

Activités de suivi et projets de valorisation des résultats

Sur 2018 et 2019, les deux dernières années du projet, il est prévu d'organiser des ateliers de renforcement de capacité à Madagascar. Ces ateliers seront à destination des étudiants, chercheurs, techniciens et gestionnaires à Madagascar travaillant sur la conservation de la biodiversité. Le renforcement de capacité porterait sur les approches et outils développés au cours du projet BioSceneMada, à savoir: (i) sur les modèles de déforestation et les scénarios de référence, (ii) sur les modèles de niche et l'atlas, (iii) sur les modèles de communauté et la réalisation de cartes de biodiversité.

Le premier atelier de renforcement de capacité sur les modèles de déforestation aura pour objectif de former les participants à l'utilisation du module Python `deforestprob`, servant à la spatialisation et la projection de la déforestation. Différents scénarios d'intensité de déforestation pourront être explorés. Les cartes de couvert forestier futur produites par les participants pourront être utilisées pour l'établissement du scénario de référence concernant les émissions de CO₂ associées à la déforestation à Madagascar. Ce scénario à l'échelle nationale est important pour la mise en place du programme REDD+ (“Réduction des Emissions liées à la Déforestation et la Dégradation des forêts”) à Madagascar. Les membres du “Bureau National REDD+” seront invités à participer à cette formation. L'objectif est que les participants puissent mettre à jour le scénario de référence au fur et à mesure de l'actualisation des cartes historiques de déforestation ou des variables explicatives en entrée (développement du réseau routier par exemple).

Un second atelier de renforcement de capacité sera organisé sur les modèles de niche climatique. Ce second atelier aura pour objectif de former les participants à l'utilisation du script R permettant l'obtention des fiches par espèce constituant l'atlas de la biodiversité à Madagascar. L'objectif est que les participants puissent mettre à jour les fiches espèces et l'atlas au fur et à mesure de l'actualisation des données de présence. Ces fiches peuvent être utilisées afin d'identifier les espèces présentes sur un territoire (une aire protégée par exemple) et d'estimer la vulnérabilité de ces espèces au changement climatique afin d'entreprendre d'éventuelles actions de conservation. Ces actions de conservation peuvent inclure des actions de protection supplémentaires pour certaines zones refuges de la biodiversité ou de la restauration d'habitat. Il nous semble que ces outils seraient particulièrement utiles aux gestionnaires d'aires protégées à Madagascar. Les gestionnaires d'aires protégées comme Madagascar National Park seront invités à participer à cet atelier. L'ONE est également demandeur de ces outils afin de pouvoir obtenir des listes de présence d'espèces sur une zone donnée pour les études d'impact et les autorisations d'exploitation des ressources naturelles notamment.

En fonction du temps et du budget, un troisième atelier sera organisé sur les modèles de communauté et la réalisation de cartes de biodiversité à Madagascar. Enfin, une réunion de présentation des résultats consolidés du projet sera organisée à Antananarivo en 2019. L'ensemble des parties-prenantes du projet, travaillant dans le domaine de l'environnement à Madagascar, sera invité à participer à cette réunion.

6. Accès aux données

Données

Un effort a été entrepris afin que les données du projet soient rendues disponibles gratuitement et de façon permanente avec l'attribution d'un DOI (Digital Object Identifier) unique. Les plateformes utilisées pour l'archivage des données sont actuellement soit Dryad (<https://datadryad.org>), soit Zenodo (<https://zenodo.org>). A terme, l'ensemble des données sera disponible sur la plateforme Dataverse du Cirad (<https://dataverse.cirad.fr>), qui a été lancée en Février 2018. C'est le lien vers la plateforme Dataverse qui sera préférentiellement utilisé dans les publications. D'autres données seront rendues publiques au fur et à mesure de la publication des articles en préparation.

- Base de données climatiques et environnementales MadaClim accessible via le site internet <https://madaclim.cirad.fr>.
- Carte des stocks de carbone forestier sur le site internet du projet à l'adresse <https://bioscenemada.cirad.fr/carbonmaps>, ainsi que sur la plateforme Dryad <https://doi.org/10.5061/dryad.9ph68>.
- Cartes de couverture forestière sur la période 1953-2014 accessibles sur le site internet du projet à l'adresse <https://bioscenemada.cirad.fr/forestmaps>, ainsi que sur la plateforme Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.1145785>.
- Carte de probabilité de déforestation en 2010 sur le site du projet: <https://bioscenemada.cirad.fr/forestmaps>

- Carte de couvert forestier futur pour l'année 2050: <https://bioscenemada.cirad.fr/forestmaps>

Concernant la base de données de biodiversité, les données qu'elle inclue proviennent d'institutions différentes qui ont accepté de les partager dans le cadre du projet BioScèneMada. Seule une partie de ces données brutes sont accessibles publiquement. Une discussion avec l'ensemble des institutions ayant fourni les données de biodiversité aura lieu d'ici la fin du projet afin de voir dans quelle mesure celles-ci peuvent être rendues publiques à l'issue du projet. Les données de biodiversité publiques seront regroupées et rendues accessibles dès leur valorisation à travers la publication des articles en préparation.

Scripts informatiques

La plupart des scripts informatiques ayant servi à l'obtention des résultats sont également mis à la disposition de la communauté scientifique et des gestionnaires. L'outil utilisé pour le partage du code est la plateforme GitHub. Comme pour les données, d'autres répertoires seront créés et rendus publiques au fur et à mesure de la publication des articles en préparation.

- Code pour les données climatiques et environnementales: <http://ghislainv.github.io/madaclim>
- Code pour les stocks de carbone forestiers: <https://github.com/ghislainv/carbonmap>
- Code du module Python `deforestprob`: <https://github.com/ghislainv/deforesprob>
- Code pour les cartes historiques de déforestation sur la période 1953-2014: <https://github.com/ghislainv/deforestation-maps-Mada>
- Code pour la carte de probabilité de déforestation et la carte de couvert forestier en 2050: <https://github.com/ghislainv.github.io/deforestprob>
- Code pour l'atlas de biodiversité: <https://github.com/ghislainv/atlas> (accès sur demande, répertoire privé jusqu'à publication de l'atlas)
- Code pour l'analyse de la déforestation dans le Menabe: <https://github.com/ghislainv/menabe>

7. Références

Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T. & Malingreau, J.P. (2002) Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science*, **297**, 999–1002.

Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H.J., Bodart, C., Brink, A., Carboni, S., Desclée, B., Donnay, F., Eva, H.D., Lupi, A., Raši, R., Seliger, R. & Simonetti, D. (2014) Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology*, **20**, 2540–2554. ISSN 1365-2486.
URL <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12605>

- Ali, J.R. & Aitchison, J.C. (2008) Gondwana to Asia: Plate tectonics, paleogeography and the biological connectivity of the Indian sub-continent from the Middle Jurassic through latest Eocene (166–35 Ma). *Earth-Science Reviews*, **88**, 145–166.
- Allnutt, T.F., Ferrier, S., Manion, G., Powell, G.V.N., Ricketts, T.H., Fisher, B.L., Harper, G.J., Irwin, M.E., Kremen, C., Labat, J.N., Lees, D.C., Pearce, T.A. & Rakotondrainibe, F. (2008) A method for quantifying biodiversity loss and its application to a 50-year record of deforestation across Madagascar. *Conservation Letters*, **1**, 173–181. ISSN 1755-263X.
URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1755-263X.2008.00027.x>
- Andriamasimanana, R.H. & Cameron, A. (2013) Predicting the impacts of climate change on the distribution of threatened forest-restricted birds in Madagascar. *Ecol Evol*, **3**, 763–769. ISSN 2045-7758.
URL <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.497>
- Araujo, M.B. & New, M. (2007) Ensemble forecasting of species distributions. *Trends In Ecology & Evolution*, **22**, 42–47.
- Brooks, T.M., Mittermeier, R.A., da Fonseca, G.A.B., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J.F., Mittermeier, C.G., Pilgrim, J.D. & Rodrigues, A.S.L. (2006) Global biodiversity conservation priorities. *Science*, **313**, 58–61.
- Burney, D.A., Burney, L.P., Godfrey, L.R., Jungers, W.L., Goodman, S.M., Wright, H.T. & Jull, A. (2004) A chronology for late prehistoric Madagascar. *Journal of Human Evolution*, **47**, 25–63.
- Cox, M.P., Nelson, M.G., Tumonggor, M.K., Ricaut, F.X. & Sudoyo, H. (2012) A small cohort of Island Southeast Asian women founded Madagascar. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **279**, 2761–2768.
- Crottini, A., Madsen, O., Poux, C., Strauß, A., Vieites, D.R. & Vences, M. (2012) Vertebrate time-tree elucidates the biogeographic pattern of a major biotic change around the K–T boundary in Madagascar. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 5358–5363.
- Dransfield, J. & Beentje, H. (1995) *The palms of Madagascar*. Royal Botanic Gardens.
- FAO (2015) Global Forest Resources Assessment 2015. , Food and Agriculture Organization of the United Nations.
URL http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/FRA/spreadsheet/FRA_data/BULK.zip
- Ferrier, S., Manion, G., Elith, J. & Richardson, K. (2007) Using generalized dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta diversity in regional biodiversity assessment. *Diversity and distributions*, **13**, 252–264.
- Goodman, S.M. & Benstead, J.P. (2005) Updated estimates of biotic diversity and endemism for Madagascar. *Oryx*, **39**, 73–77.

Hannah, L., Dave, R., Lowry, P.P., Andelman, S., Andrianarisata, M., Andriamaro, L., Cameron, A., Hijmans, R., Kremen, C., MacKinnon, J., Randrianasolo, H.H., Andriambololonera, S., Razafimpahanana, A., Randriamahazo, H., Randrianarisoa, J., Razafinjatovo, P., Raxworthy, C., Schatz, G.E., Tadross, M. & Wilmee, L. (2008) Climate change adaptation for conservation in Madagascar. *Biology Letters*, **4**, 590–594.

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O. & Townshend, J.R.G. (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, **342**, 850–853.

URL <http://www.sciencemag.org/content/342/6160/850.abstract>

Harper, G.J., Steininger, M.K., Tucker, C.J., Juhn, D. & Hawkins, F. (2007) Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*, **34**, 325–333.

Holt, B.G., Lessard, J.P., Borregaard, M.K., Fritz, S.A., Araujo, M.B., Dimitrov, D., Fabre, P.H., Graham, C.H., Graves, G.R., Jonsson, K.A., Nogues-Bravo, D., Wang, Z., Whittaker, R.J., Fjeldsa, J. & Rahbek, C. (2013) An Update of Wallace's Zoogeographic Regions of the World. *Science*, **339**, 74–78.

IPCC (2007) Fourth Assessment Report (AR4), Climate Change 2007: Synthesis Report. , The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.

Kremen, C., Cameron, A., Moilanen, A., Phillips, S.J., Thomas, C.D., Beentje, H., Dransfield, J., Fisher, B.L., Glaw, F., Good, T.C., Harper, G.J., Hijmans, R.J., Lees, D.C., Louis, E., Nussbaum, R.A., Raxworthy, C.J., Razafimpahanana, A., Schatz, G.E., Vences, M., Vieites, D.R., Wright, P.C. & Zjhra, M.L. (2008) Aligning conservation priorities across taxa in Madagascar with high-resolution planning tools. *Science*, **320**, 222–226.

Loarie, S.R., Duffy, P.B., Hamilton, H., Asner, G.P., Field, C.B. & Ackerly, D.D. (2009) The velocity of climate change. *Nature*, **462**, 1052–1055.

Menéndez, R., Megías, A.G., Hill, J.K., Braschler, B., Willis, S.G., Collingham, Y., Fox, R., Roy, D.B. & Thomas, C.D. (2006) Species richness changes lag behind climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **273**, 1465–1470.

Mercier, J.L. & Wilmé, L. (2013) The Eco-Geo-Clim model: explaining Madagascar's endemism. *Madagascar Conservation & Development*, **8**, 63–68.

Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B. & Kent, J. (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, **403**, 853–858.

Pearson, R.G. & Raxworthy, C.J. (2009) The evolution of local endemism in Madagascar: watershed versus climatic gradient hypotheses evaluated by null biogeographic models. *Evolution*, **63**, 959–967.

Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N. & Belward, A.S. (2016) High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, **540**, 418–422. ISSN 0028-0836.
URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature20584>

Rabearivony, J., Thorstrom, R., Roland, L.A.R.d., Rakotondratsima, M., Andriamalala, T.R.A., Sam, T.S., Razafimanjato, G., Rakotondravony, D., Raselimanana, A.P. & Rakotoson, M. (2010) Protected area surface extension in Madagascar: do endemism and threatened species remain useful criteria for site selection? *Madagascar Conservation and Development*, **5**, 35–47.

Raftery, A.E., Li, N., Sevcikova, H., Gerland, P. & Heilig, G.K. (2012) Bayesian probabilistic population projections for all countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 13915–13921.
URL <http://www.pnas.org/content/109/35/13915.abstract>

Raxworthy, C.J., Pearson, R.G., Rabibisoa, N., Rakotondrazafy, A.M., RAMANAMANJATO, J.B., Raselimanana, A.P., Wu, S., Nussbaum, R.A. & Stone, D.A. (2008) Extinction vulnerability of tropical montane endemism from warming and upslope displacement: a preliminary appraisal for the highest massif in Madagascar. *Global Change Biology*, **14**, 1703–1720.

Schatz, G. (2000) Endemism in the Malagasy tree flora. *Diversité et Endémisme à Madagascar*, WR Lourenco and SM Goodman (eds.), pp. 1–9.

Schatz, G., Lowry II, P., Lescot, M., Wolf, A., Andriambololonera, S., Raharimalala, V. & Raharimampionona, J. (1996) Conspectus of the vascular plants of Madagascar: a taxonomic and conservation electronic database. *The Biodiversity of African Plants*, pp. 10–17. Springer.

Tofanelli, S., Bertoncini, S., Castri, L., Luiselli, D., Calafell, F., Donati, G. & Paoli, G. (2009) On the origins and admixture of Malagasy: new evidence from high-resolution analyses of paternal and maternal lineages. *Molecular biology and evolution*, **26**, 2109–2124.

Vieilledent, G., Cornu, C., Cuní Sanchez, A., Leong Pock-Tsy, J.M. & Danthu, P. (2013a) Vulnerability of baobab species to climate change and effectiveness of the protected area network in Madagascar: Towards new conservation priorities. *Biological Conservation*, **166**, 11–22.

Vieilledent, G., Gardi, O., Grinand, C., Burren, C., Andriamanjato, M., Camara, C., Gardner, C.J., Glass, L., Rasolohery, A., Rakoto Ratsimba, H., Gond, V. & Rakotoarijaona, J.R. (2016) Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *Journal of Ecology*, **104**, 703–715. ISSN 1365-2745.
URL <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2745.12548>

Vieilledent, G., Grinand, C., Rakotomalala, F.A., Ranaivosoa, R., Rakotoarijaona, J.R., Allnutt, T.F. & Achard, F. (2017) Combining global tree cover loss data with historical national forest-cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation

in Madagascar. *bioRxiv*.

URL <http://biorxiv.org/content/early/2017/06/08/147827>

Vieilledent, G., Grinand, C. & Vaudry, R. (2013b) Forecasting deforestation and carbon emissions in tropical developing countries facing demographic expansion: a case study in Madagascar. *Ecology and Evolution*, **3**, 1702–1716. ISSN 2045-7758.

URL <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.550>

Vieites, D.R., Wollenberg, K.C., Andreone, F., Köhler, J., Glaw, F. & Vences, M. (2009) Vast underestimation of Madagascar's biodiversity evidenced by an integrative amphibian inventory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 8267–8272.

Warton, D.I., Blanchet, F.G., O'Hara, R.B., Ovaskainen, O., Taskinen, S., Walker, S.C. & Hui, F.K. (2015) So Many Variables: Joint Modeling in Community Ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, **30**, 766–779. ISSN 0169-5347.

URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2015.09.007>

Wilmé, L., Goodman, S.M. & Ganzhorn, J.U. (2006) Biogeographic evolution of Madagascar's microendemic biota. *Science*, **312**, 1063–1065.

World Bank (2013) Madagascar country environmental analysis, taking stock and moving forward. , World Bank.