Secrétariat Général

Bureau National de Coordination REDD+

Niveaux d'émissions de référence des forêts de Madagascar pour la réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts

Soumission à la Convention-Cadre des Nations Unies
sur les Changements Climatiques

Juillet 2017

Table de matières

LISTE DES FIGURES 4
LISTE DES TABLEAUX 4
LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS 7
1 INTRODUCTION 9
2 PORTEE DU NERF 12
2.1 DEFINITION DE LA FORET 12
2.2 PORTEE GEOGRAPHIQUE ET DELIMITATION DES ECOREGIONS 13
2.3 PERIODE DE REFERENCE 18
2.4 RESERVOIRS CARBONE 20
2.5 GAZ A EFFET SERRE 21
3 APPROCHE METHODOLOGIQUE GENERALE 22
4 DONNEES D'ACTIVITE 25
4.1 METHODOLOGIE SPECIFIQUE 25
4.2 CLASSIFICATION DES TERRES ET CLASSES DE CHANGEMENT 31
4.3 POST-CLASSIFICATION 37
4.4 VALIDATION EXTERNE DES RESULTATS ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.5 CHANGEMENT D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2005 ET 2013 39
5 STOCKS DE CARBONE ET FACTEURS D'EMISSION 47
5.1 DESCRIPTION DES DONNEES D'INVENTAIRE FORESTIER 47
5.1.1 L'inventaire forestier de 1996 47
5.1.2 L'inventaire forestier du PERR-FH 2014 49
5.2 LA BIOMASSE AÉRIENNE 53
5.2.1 Forêt humide 53
5.2.2 Forêt Sèche et Forêt Épineuse 56
5.2.3 Mangrove 62
5.2.4 Non-forêt 67
5.3 LA BIOMASSE SOUTERRAINE 71
5.4 LES FACTEURS D'ÉMISSION 73
6 QUANTIFICATION DU FREL 80
7 EVALUATION DE L'INCERTITUDE DU NERF 81
7.1 IDENTIFICATION ET EVALUATION DES SOURCES D'INCERTITUDE 81
7.1.1 Source des incertitudes des données d'activité 81
7.1.2 Sources d'incertitudes des facteurs d'émissions 83
7.2 QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE 86

7.2.1 Calcul de l'incertitude des données d'activité 87
7.2.2 Calcul de l'incertitude des facteurs d'émissions 91
7.2.3 Calcul de l'incertitude du niveau de référence 94
8 DISCUSSION, CONCLUSION ET PLAN D'ACTION POUR L'AMELIORATION DU NERF 96
8.1 MANQUE DE DONNEES, VALIDITE DES HYPOTHESES ET QUESTIONS METHODOLOGIQUES 97
8.2 PLAN D'ACTIONS POUR L'AMELIORATION DU NERF 103
BIBLIOGRAPHIE 105

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Domaines phytogéographiques de la Madagascar 14
Figure 2 : Classes de couverture du sol qui forment la base du NERF 17
Figure 3 : Etapes de traitement des données pour l'analyse historique de la déforestation 27
Figure 4 : Mise en évidence des changements de classes sur une composition colorée multi-dates...34
Figure 5 : Délimitation des classes sur l'image 2013 à classifier 34
Figure 6 : Vérification et affinage sur Google Earth 35
Figure 7 : Principe de la classification par arbre de décision 36
Figure 8 : Représentation schématique du processus d'élimination des nuages 38
Figure 9 : Exemple de post-classification 39
Figure 10 : Disposition des camps d'inventaire de 1996 (Source: IEFN 1996) 48
Figure 11 : Disposition des grappes d'inventaire de 1996 pour les forêts sèche et Épineuse (Source: IEFN 1996) 49
Figure 12: Disposition des grappes d'inventaire PERR-FH 50
Figure 13 : Disposition des placettes d'inventaire PERR-FH 51
Figure 14 : Carte des grappes d'inventaire du projet PERR-FH (2014) 52
Figure 15 : Description du traitement des données de l'inventaire PERR-FH 53
Figure 16 : Description du traitement des données de l'inventaire de 1996 57
Figure 17 : Arbre de décision pour attribuer les densités spécifiques 59
Figure 18 : Mangrove biomass study area (source: Jones et al. 2014) 64
Figure 19 : Zone d'étude (source : Andriamananjara et al. 2016) 68
Figure 20 : Plan d'échantillonnage dans les occupations du sol post-déforestation (source : Andriamananjara et al. 2016) 69
Figure 21 : Cartes des hot-spots de déforestation, zones de validation et d'échantillonnage 89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définition de la forêt 12
Tableau 2 : Postes d'émissions et d'absorptions comptabilisés dans les activités REDD+ 19
Tableau 3 : Prise en compte des réservoirs carbone 20
Tableau 4 : GES sélectionnés dans la comptabilisation carbone 21
Tableau 5 : Equations GIEC utilisées pour le développement du NERF 22
Tableau 6 : Cadre méthodologique concernant l'analyse historique de la déforestation 25
Tableau 7 : Caractéristiques des différentes bandes spectrales des capteurs LANDSAT 28
Tableau 8 : Date des images Landsat utilisées pour l'analyse historique de la déforestation 29

Tableau 9 : Définitions des classes de couverture de sol 31

Tableau 10 : Typologie des classes d'occupation du sol retenue pour l'analyse multi-date 32

Tableau 11 : Perte de superficie forestière par écorégion 41

Tableau 12 : Calcul des facteurs d'émission 47

Tableau 13: Facteur d'échelle dans les sous-placettes de dimension fixe – Inventaire forestier PERR-FH de 2014 55

Tableau 14: Statistiques de l'inventaire PERR-FH 55

Tableau 15: Facteurs d'échelle dans les sous-placettes de dimension fixe 61

Tableau 16 : Statistiques de l'inventaire forestier de 1996 61

Tableau 17 : Classes de mangroves (source : adapté de Jones et al. 2014) 65

Tableau 18 : Equations allométriques et densités de bois utilisées dans l'estimation de la biomasse (source : adapté de Jones et al., 2014) 65

Tableau 19 : Estimation des stocks de carbone des mangroves (source : basé sur Jones et al. 2014)66

Tableau 20 : Biomasse aérienne dans les classes d'occupation du sol post-déforestation 69

Tableau 21 : Biomasse dans des sites post-déforestation localisés dans l'écorégion des forêts sèches (adapté de Raharimalala et al. (2012) 70

Tableau 22 : Biomasse aérienne de la classe "non-forêt" par écorégion 71

Tableau 23 : Quotients racinaire/foliacé (RSR) 71

Tableau 24 : Biomasse souterraine par classe d'occupation du sol 72

Tableau 25 : Facteurs de conversion Carbone et CO_2 74

Tableau 26 : Stocks de carbone forestiers et non forestiers 74

Tableau 27 : Synthèse des facteurs d'émissions 75

Tableau 28 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Forêt Humide » 75

Tableau 29 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Forêt Sèche » 76

Tableau 30 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Forêt Épineuse » 77

Tableau 31 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Mangrove » 77

Tableau 32 : Emissions par écorégion et calcul du NERF 80

Tableau 33 : Erreur d'échantillonnage de la biomasse dans différentes strates forestières et non forestières 86

Tableau 34 : Espacement du semis de points réguliers en fonction de l'intensité de la déforestation ..88

Tableau 35 : Dates et références des images SPOT 5 utilisées pour la validation externe des forets humides 88

Tableau 36: Matrice de confusion externe pour la classification des forêts humides 90

Tableau 37 : Matrice de confusion externe pour la classification des forêts sèches, épineuses et mangroves 90

Tableau 38 : Composition et agrégation de l'incertitude de l'estimation de la biomasse aérienne 92

Tableau 39: Composition et agrégation de l'incertitude de l'estimation des stocks de carbone en mangrove 92

Tableau 40 : Incertitude de l'estimation de la biomasse souterraine 93
Tableau 41 : Incertitude de l'estimation des stocks de carbone 93
Tableau 42 : Incertitude des facteurs d'émissions 94
Tableau 43 : Incertitude du NERF et des émissions par écorégion.....95
Tableau 44 : Synthèse du plan d'actions 103

LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS

BA	Biomasse Aérienne
BDD	Base De Données
BDOT	Base de Données d'Occupation de Terres ()
BNC-REDD+	Bureau National de Coordination REDD+
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CH_4	Méthane
CO_2	Dioxyde de carbone
CP	Conférence des Parties
DA	Donnée d'Activité
DGF	Direction Générale des Forêts
DHP	Diamètre à Hauteur de Poitrine
ERP-D	Document du Programme de Réduction des Emissions
FCPF	Fonds de Partenariat pour le Carbone Forestier
FE	Facteur d'Emissions
FRMi	Forêt Ressources Management
GES	Gaz à Effet de Serre
GFC	Global Forest Change
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
GLS	Global Land Survey
GOFC-GOLD	Global Observation for Forest Cover and Land Dynamics
GPG-LULUCF	Recommandations en matière de bonnes pratiques pour l'utilisation des terres, les changement d'affectation des terres et la foresterie
GPS	Global Positioning System
IDA/GEF	International Development Association / Global Environment Facility
IEFN	Inventaire Ecologique Forestier National
LD	Lignes directrices
MEEF	Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie, et des Forêts
MNT	Modèle Numérique de Terrain

MOM 1	Matière organique 1 : Bois mort
MOM 2	Matière organique 2 : Litière
N_2O	Protoxyde d'azote
NERF	Niveau d'Emissions de Référence des Forêts
OOB	Out of Bag
PERR-FH	Projet Eco-Régional REDD+ des Forêts Humides
PHCF	Programme Holistique de Conservation des Forêts
PLR	Produits Ligneux Récoltés
Programme-RE	Programme de Réduction d'Emissions
REDD+	Réduction des Emissions dues à la Déforestation et la Dégradation des Forêts
R-PP	Plan de Préparation à la REDD+
RSR	Root-shoot ratio (Rapport racinaire-foliacé)
SAPM	Système des Aires Protégées de Madagascar
SEAS-OI	Surveillance de l'Environnement Assisté par Satellite dans l'Océan Indien
SGFD	Sites de Gestion Forestière Durable
SLC	Scan Line Corrector (Correcteur de ligne de balayage)
SOC	Carbone organique du sol
tms	Tonnes de matière sèche
UOT	Utilisation et Occupation des Terres
VCS	Voluntary Carbon Standard

1 INTRODUCTION

La réduction des émissions dues à la déforestation et la dégradation des forêts (REDD+) est un mécanisme qui vise simultanément l'atténuation des effets du changement climatique, la diminution de la déforestation, la conservation des forêts et le développement durable. Le principe de la REDD+ est d'octroyer une compensation financière à des pays forestiers qui réduisent l'émission des gaz à effet de serre (GES) issues des émissions et absorptions liées aux forêts.

Des travaux relatifs à la préparation de Madagascar à la REDD+ ont été menés à travers deux projets :

- Le Projet Eco-Régional REDD+ des Forêts Humides (PERR-FH) entre 2013 et 2015 – projet mis en œuvre par un Consortium constitué de Wildlife Conservation Society, de l'Office national pour l'environnement et de ETC Terra, et financé par le Projet d'Appui de l'IDA/GEF au Programme Environnemental, Phase 3 (Financements additionnels) – qui a développé quelques produits clés pour la REDD+. Ainsi, des inventaires forestiers ciblant l'écorégion des forêts humides de l'Est ont été effectués dans l'objectif d'établir un scénario de référence des émissions dues à la déforestation dans cette écorégion.
- En parallèle, le Plan de Préparation à la REDD+ (R-PP) de Madagascar a été approuvé en 2014 par le Comité des Participants du Fonds de Préparation du Fonds de Partenariat pour le Carbone Forestier (FCPF), permettant le déblocage de financements pour finaliser les activités de préparation de Madagascar à la REDD+. Le Bureau National de Coordination REDD+ (BNC-REDD+) a ainsi été créé au sein du Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie, et des Forêts (MEEF) dans l'objectif de piloter et de coordonner toutes les initiatives sur la REDD+. Une partie des sommes accordées au titre de ce don sera utilisée dans le but d'améliorer le niveau d'émissions de référence des forêts (NERF) dans les prochains mois, notamment la réalisation d'inventaires forestiers dans les autres écorégions.

Ainsi, Madagascar a décidé de présenter un NERF sur une base volontaire et sur la base des données existantes, en vertu de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC)[1].

Ce NERF a été développé par le BNC-REDD+ avec l'appui de FRMi[2] sur base de données existantes produites par les deux projets mentionnés ci-avant. ETC Terra a également contribué à la réalisation de ce NERF.

[1] Notamment les lignes directrices fournies par la CCNUCC à travers les décisions prises lors des Conférences des Parties (CP), en particulier les Modalités d'établissement des niveaux d'émission de référence pour les forêts et des niveaux de référence pour les forêts dans la décision 12/CP.17, les directives sur les niveaux d'émission dans l'annexe de la décision 12/CP.17, les « Recommandations en matière de bonnes pratiques pour l'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la foresterie (GPG-LULUCF) » (GIEC 2003) et « les lignes directrices pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre » (GIEC 2006).

[2] Espace Fréjorgues Ouest 60, rue Henri Fabre 34130 MAUGUIO - Gd Montpellier - FRANCE
Tél.: +33(0)4 67 20 08 09 Fax : +33(0)4 67 20 08 12 Email : frm@frm-france.com www.frm-france.com

Sur la base des activités planifiées du BNC-REDD+, ce rapport propose aussi de présenter le plan d'action pour l'amélioration du NERF dans les années à venir, notamment grâce aux travaux en cours ou sur le point d'être menés dans le cadre du Fond de Préparation à la REDD+ du FCPF.

Madagascar souhaite adopter une approche progressive pour le développement de son NERF national comme suggéré dans la décision 12/CP.17, paragraphe 10. En tant que tel, le présent NERF reflète la meilleure information disponible au moment de la soumission. La portée de la soumission et les méthodologies appliquées devront être modifiées dans le futur lorsque de nouvelles méthodologies, données et produits seront disponibles. Il est prévu que les prochaines versions du NERF vont incorporer les points suivants : :

- Actualisation de la période de référence à 2005-2016 et analyse de la tendance historiques. En ce moment il y a évidence préliminaire de l'existence d'une tendance historique, ce qui mettrait en doute l'utilisation d'une moyenne historique comme proxy des émissions futures. Si l'existence de la tendance historique est confirmée, Madagascar va proposer une méthode de construction basée sur une tendance historique, ajustement de la moyenne historique ou projection ;
- Création et officialisation d'un système de classification de l'Utilisation et Occupation des Terres (UOT) pour Madagascar qui sera la base de la Base de Données d'Occupation de Terres (BDOT) qui sera produit en 2018,
- Actualisation et officialisation de la définition de forêt afin de permettre de considérer toutes les écorégions de Madagascar (forêts épineuses, mangroves, forêt sèche de l'ouest) ;
- Actualisation des données d'activités en base à une nouvelle BDOT qui sera produite para la méthode d'échantillonnage et interprétation de placettes ;
- Mise à jour des facteurs d'émissions de la forêt sèche de l'Ouest, forêt épineuse et la Mangrove.

Cette communication et le NERF ne préjugent ou ne modifient pas la Contribution Prévue Déterminée au niveau National de la République du Madagascar ou les Mesures Nationales d'Atténuation Appropriées, conformément au Plan d'action de Bali.

L'ensemble des informations utilisées ou produites dans le présent document est issu de rapports disponibles en libre accès sur internet, et qui ont déjà été évalués par des tierces parties. En regroupant l'ensemble de ces informations et données ainsi que les rapports d'évaluation, le présent document propose des méthodes et un contenu transparent, complet, précis et fiable.

Structure et contenu du NERF

Le document soumis suit la structure suivante :

- Le chapitre 2 fournit des informations sur la définition de la forêt et comment celle-ci a été prise en compte dans l'élaboration du NERF, mais aussi sur les sources et puits (activités REDD+), les

réservoirs carbone et les GES pris en compte. Lorsque des puits, sources, réservoirs ou GES sont exclus, le choix est dûment justifié et argumenté.

- Ce chapitre contient également des éléments sur la cohérence en termes de puits, sources, réservoirs et GES entre le NERF et les émissions et absorptions de GES rapportées dans le cadre de la seconde communication nationale.
- Le chapitre 3 contient une description de la méthodologie générale utilisée pour le calcul du NERF sur la base du guide du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC) de 2006 concernant les inventaires nationaux de GES.
- Le chapitre 4 contient un descriptif de la méthode spécifiquement liée au calcul des données d'activités
- Le chapitre 5 présente la méthode de calcul des stocks de carbone et des différents facteurs d'émissions
- Le chapitre 6 quantifie le NERF
- Le chapitre 7 présente l'estimation des incertitudes dans le calcul du NERF
- Le chapitre 8 propose des discussions et conclusions sur le calcul du NERF et présente le plan d'action pour son amélioration future et par étapes.

Lorsque cela est possible, le rapport contient des encadrés expliquant comment les méthodes ou les données seront améliorées ultérieurement (en lien avec le plan d'action du chapitre 8).

2 PORTEE DU NERF

Le chapitre 2 présente le cadre méthodologique et les définitions clés pour le développement du NERF.

2.1 DEFINITION DE LA FORET

La définition adoptée au niveau national à Madagascar est présentée dans le tableau ci-dessous. La définition correspond à celle adoptée dans le cadre du Mécanisme de Développement Propre. Dans le cadre de l'assistance technique de l'Office Nationale pour Environnement/MEEF/Madagascar National Parks (MNP), une analyse de l'Inventaire Ecologique et Forestier National de 1996 (IEFN 1996) a permis de constater que toutes les formations forestières (forêts denses humide de l'Est, forêt dense sèche de l'ouest, forêt épineuse, mangrove) peuvent répondre à cette définition de la forêt en termes de superficie et couverture houppier. En quelques cas les massifs de forêt épineuse et Mangrove n'arrivent pas à 5 mètres de manière naturelle, mais à cause du manque d'informations, cette soumission va considérer qu'ils atteignent la hauteur de 5 mètres. Madagascar est maintenant engagé dans un processus de définition du système de classification de Utilisation et Occupation de Terres qui va aussi analyser la opérationnalisation de la définition de la forêt et s'il est nécessaire de modifier la définition pour ces écorégions. Par ailleurs, lors de l'atelier organisé par le BNC-REDD+ en Avril 2016 pour la définition nationale des activités REDD+, cette définition a été rappelée et revalidée par l'ensemble des parties prenantes de la REDD+ comme étant celle qui doit s'appliquer. Toutefois, cette définition de forêt au niveau national concerne seulement la forêt naturelle, notamment intacte, elle ne tient pas en compte les autres écosystèmes comme les formations secondaires ou très dégradées, plantation et autres. Aussi, elle fera encore l'objet de consultation d'autres parties prenantes à tous les niveaux (régional et national) et de validation par un document national ou un texte règlementaire.

C'est important de noter que cette définition est cohérente avec la définition utilisée dans l'inventaire national GES et dans le domaine du MDP. Néanmoins, la définition n'est pas cohérente avec celle du FRA qui est cohérente avec la définition par défaut définit para la FAO. Il est prévu que la définition de la forêt utilisée dans le cadre du FRA sera mise à jour à la définition ci présenté.

Tableau 1 : Définition de la forêt

SEUILS	VALEUR
Hauteur minimale des arbres (m)	≥ 5m
Couverture de canopée minimale (%)	≥ 30%
Superficie minimale (hectare)	≥ 1

La définition de la forêt a été respectée dans les différentes étapes du développement du NERF :

- Les sites avec une surface inférieure à un hectare sont exclus des données d'activité : cela a été réalisé par l'intermédiaire de l'unité minimale de cartographie (UMC) qui correspond ici à 9 pixels des images satellitaires utilisées (chaque pixel faisant 30 m x 30 m), soit une superficie totale de 0,81 ha (qui sert comme approximation de 1 ha).
- Pour assurer la conformité avec ce paramètre de hauteur, la hauteur moyenne de chacune des grappes a été calculée, pour l'inventaire PERR-FH comme pour l'inventaire de 1996.
- Dans l'inventaire de l'IEFN 1996 et l'inventaire PERR-FH, le plan d'échantillonnage a été établi sur la base d'une carte forestière respectant la définition de la forêt en termes de couverture de canopée.

2.2 PORTEE GEOGRAPHIQUE, DELIMITATION DES ECOREGIONS ET ZONAGE FORESTIER NATIONAL

L'échelle du NERF est nationale, c'est-à-dire que les données collectées pour sa quantification couvrent l'ensemble du pays. Conformément aux instructions du GIEC (2006), p. 4.8, la délimitation des écorégions a été effectuée sur la base de critères écologiques.

L'Inventaire Ecologique Forestier National (IEFN) de 1996 avait pour but de combler les lacunes d'information concernant l'état et l'évolution des ressources forestières de Madagascar, et s'était ainsi fixé comme objectif de connaître la localisation et la distribution dans l'espace des différentes formations forestières, leurs principales caractéristiques dendrologiques et dendrométriques, écologiques, ainsi que leurs tendances évolutives. Ainsi, deux cartes de végétation de Madagascar ont été produites pour les années 1994 et 2000 et les domaines phytogéographiques y sont délimités de la façon suivante :

A. Domaines de l'Est et du Sambirano (0 – 800 m) ;

B. Domaines du Centre Versants Orientaux Etage de moyenne altitude (800 – 1800 m) ;

C. Domaines du Centre Etage des montagnes (> 1800 m) ;

D. Domaines du Centre – Versants Occidentaux étage de moyenne altitude (800 à 1800 m) ;

E. Domaines de l'Ouest (0 à 800 m) ;

F. Domaines du Sud ;

G. Autres formations naturelles azonales ;

H. Autres occupations du sol.

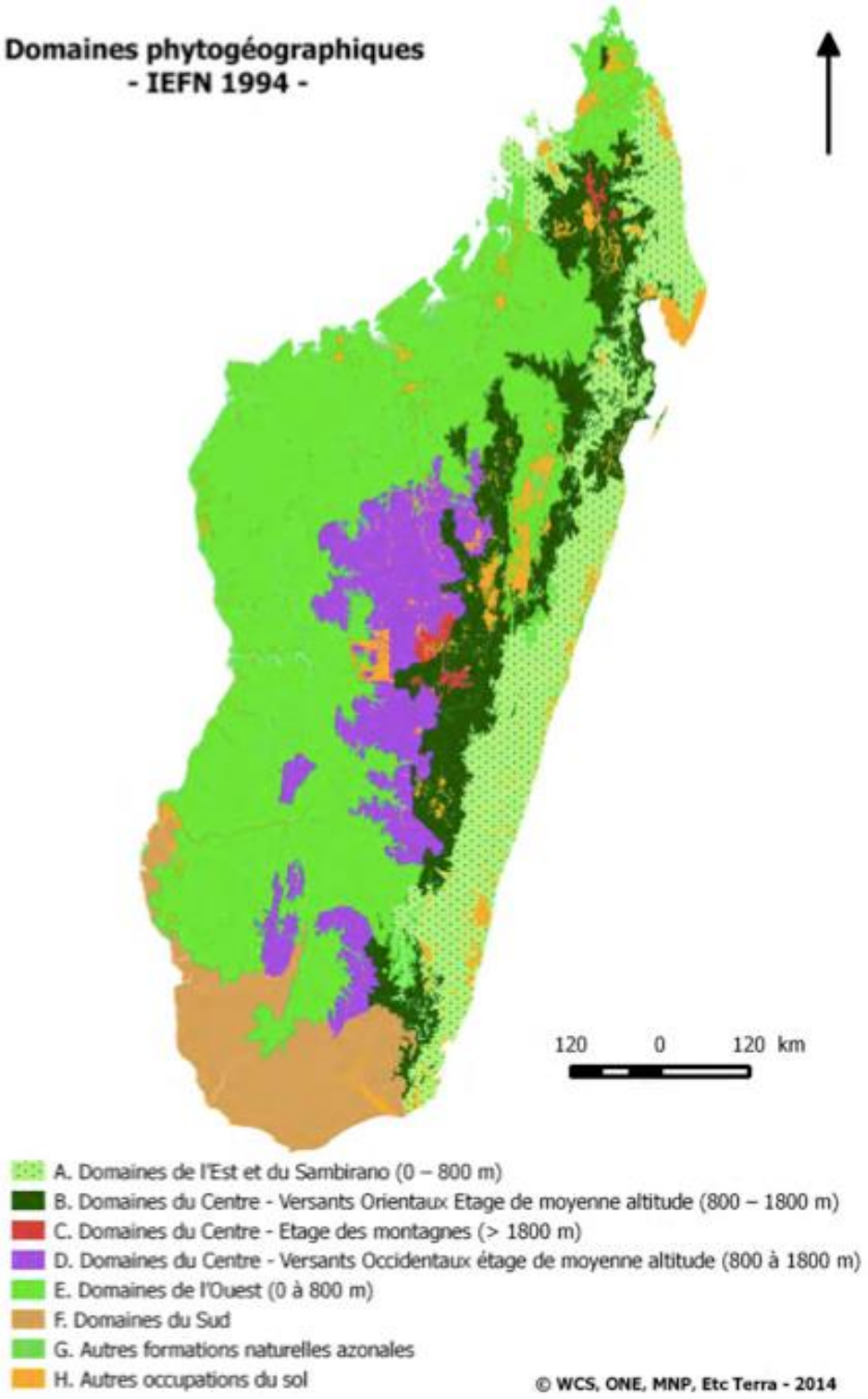


Figure 1 : Domaines phytogéographiques de la Madagascar

Compte tenu de la nécessité de rationaliser les travaux à conduire dans le cadre de la REDD+ au niveau national, il a été précisé dans le R-PP que seules quatre écorégions REDD+ seraient définies : Forêts Humides de l'Est, Forêts Sèches de l'Ouest, Forêts Epineuses du Sud, Mangroves. Ces quatre écorégions, issues de regroupements des domaines phytogéographiques présentés ci-dessus, sont délimitées de la manière suivante :

1. L'écorégion des Forêts Humides de l'Est correspond aux domaines et types de forêts/fourrés suivants :

   A. Domaines de l'Est et du Sambirano (0 – 800 m) : tous types de forêts denses humides sempervirentes de basse altitude et forêts littorales ;

   B. Domaines du Centre Versants Orientaux Etage de moyenne altitude (800 – 1800 m) : tous types de forêts denses humides sempervirentes de moyenne altitude ;

   C. Domaines du Centre Etage des montagnes (> 1800 m) : tous types de forêts sclérophylles de montagne et fourrés sclérophylles de montagne

2. L'écorégion des Forêts Sèches de l'Ouest correspond aux domaines et types de forêts/fourrés suivants:

   D. Domaines du Centre – Versants Occidentaux étage de moyenne altitude (800 à 1800m): tous types de forêts sclérophylles de moyenne altitude ;

   E. Domaines de l'Ouest (0 à 800 m) : tous types de forêts denses sèches (série à Dalbergia, Commiphora et Hidegardia)

3. L'écorégion des Forêts Epineuses du Sud correspond au domaine suivant:

   F. Domaines du Sud : tous types de forêts denses sèches et tous types de fourrés xérophiles

4. L'écorégion des Mangroves dont les contours ont été extraits du domaine suivant :

   G. Autres formations naturelles azonales

Le zonage forestier national définit deux types de modalités de gestion des ressources forestières lesquels sont le Système des Aires Protégées de Madagascar (SAPM) et les Sites de Gestion Forestière Durable (SGFD ou Koloala en langue malgache).

1) Le SAPM, régie par la loi 2015-005 portant refonte du Code des Aires Protégées, est un ensemble structuré et cohérent de toutes les Aires Protégées sans distinction y compris les Aires Protégés privées agréées, les Aires Protégées communautaires.

On entend par Aire Protégée un territoire délimité, terrestre, marin côtier, aquatique dont les composantes présentent une valeur particulière notamment biologique, naturelle, esthétique, morphologique, historique archéologique, cultuelle ou culturelle, et qui nécessite, dans l'intérêt général, une préservation multiforme.

Elle est gérée en vue de la protection et du maintien de la diversité biologique, de la conservation des valeurs particulières du patrimoine naturel et culturel et de l'utilisation durable des ressources naturelles contribuant à la réduction de la pauvreté. (Loi n°2015-005)

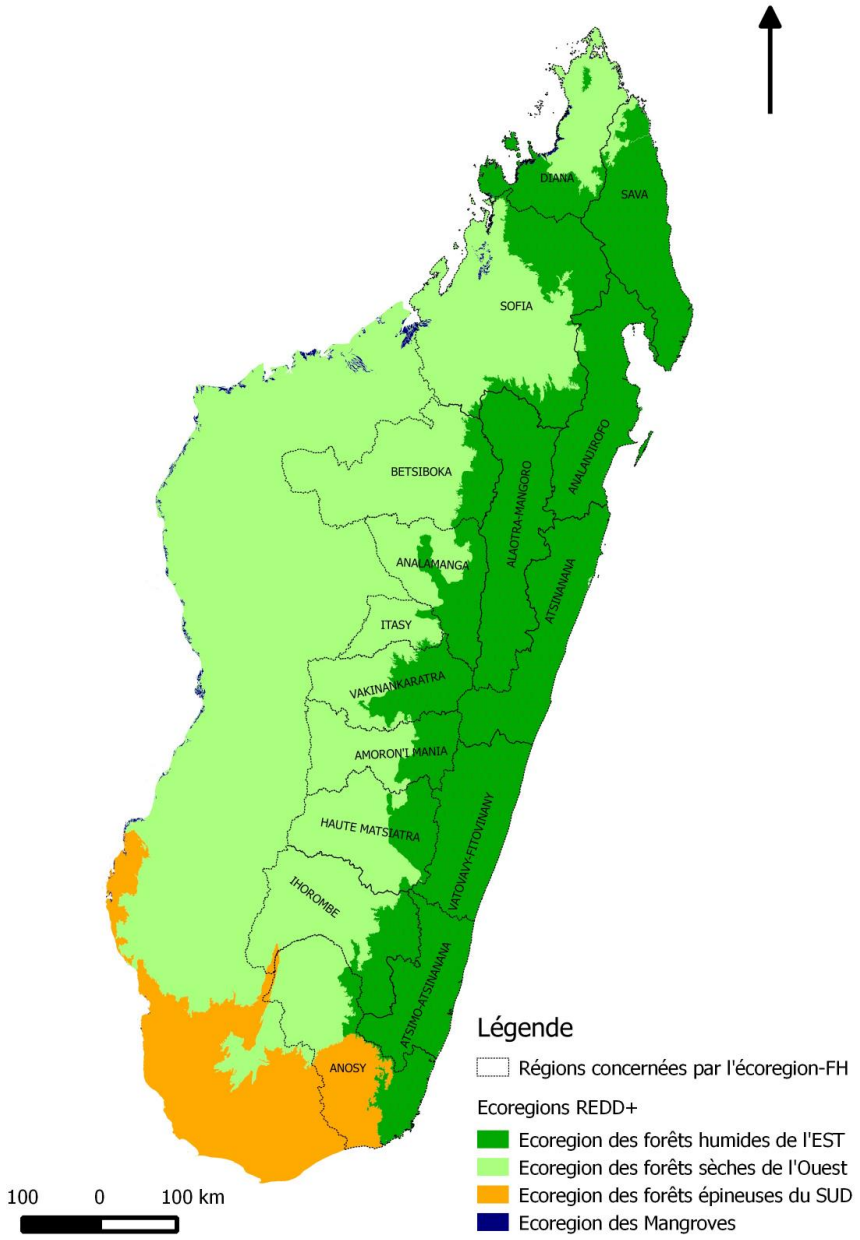
2) KOLOALA : ce sont des sites ayant pour objectifs de participer à la conservation des ressources forestières à travers la mise en place de systèmes de gestion forestière rationnelle et durables, permettant d'assurer une production soutenue en produits forestiers ligneux et non ligneux et d'améliorer la participation du secteur forestier au développement rural

Les modalités de gestion des sites koloala sont les suivants :

- Propriété de l'Etat ; gestion par l'Administration Forestière ; valorisation des ressources à travers l'octroi de conventions d'exploitation par voie d'adjudication régie par le décret N°98-782 relatif au régime de l'exploitation forestière ;
- Propriété de l'Etat ; gestion par des Communautés de Base (CoBa) riveraines ; valorisation des ressources à travers des permis de coupe annuels octroyés dans le cadre du contrat de transfert gestion.
- Propriété de l'état ; gestion déléguée au secteur privé par appel d'offres ; valorisation des ressources à travers des permis de coupe annuels octroyés dans le cadre du contrat de délégation de gestion.

Selon la carte PERR-FH de 2013, sur un total de 8,49 millions d'hectares de forêts denses, environ 6,59 millions d'hectares se situent dans le SAPM. Environ 1,9 millions d'hectares de forêts, se trouvent par conséquent en dehors des AP donc dans les sites Koloala.

Des calculs distincts de biomasse et de facteurs d'émissions ont été réalisés pour chacune de ces quatre écorégions. Il n'est pas nécessaire d'en faire pour chaque zone (SAPM et Koloala). En effet le SAPM et Koloala ne sont pas des strates forestières, ce sont en fait des modalités de gestion des ressources forestière selon le zonage forestier. D'ailleurs la comparaison de quantité de biomasses dans ces deux systèmes démontre qu'il n'y a pas vraiment une différence significative.



! !

Figure 2 : Classes de couverture du sol qui forment la base du NERF

2.3 PERIODE DE REFERENCE

Conformément à la décision 13/CP19, paragraphe 2, le NERF a été développé à partir de données issues de la période historique de référence de 2005 jusqu'à 2013 – cette période a été sélectionnée en raison des données récentes et complètes dont elle dispose.

Par conséquent le NERF quantifie les émissions de la déforestation pendant cette période. Il est toutefois important de noter que les images satellitaires adéquates ne sont pas disponibles à partir du 1er Janvier 2005 jusqu'au 31 décembre 2013, mais plutôt approximativement autour de ces dates. Par conséquent, la période de référence n'est pas de neuf ans exactement, mais de 8,31 ans (moyenne des périodes de toutes les images sur l'ensemble de la zone d'étude, voir Tableau 8) ; c'est donc cette période de 8,31 ans qui a été considérée pour le calcul de la perte annuelle moyenne de couvert forestier.

Le BNCR est en train de produire des nouvelles données d'activités et il est prévu que la période de référence sera mise à jour dans les prochaines soumissions.

Activités REDD+

Conformément à la décision 1/CP.16, paragraphe 70 définissant les activités REDD+, le tableau ci-dessous présente les sources et les puits sélectionnés pour le NERF :

Tableau 2 : Postes d'émissions et d'absorptions comptabilisés dans les activités REDD+

Activités Sources / Puits	Inclus ?	Justification / Explication
La réduction des émissions liées à la déforestation (source)	oui	Les travaux de PERR-FH ont permis de recueillir les informations nécessaires pour élaborer le NERF national sur la période de référence souhaitée. Les émissions liées à la déforestation incluent les émissions liées au changement des stocks de carbones forestiers et les émissions non-CO2 causées par des feux au moment de la conversion.
La réduction des émissions liées à la dégradation des forêts (source)	non	Aucune donnée disponible. Madagascar souhaite cependant développer une méthodologie afin d'estimer la dégradation. Il est donc possible qu'elle soit prise en compte lors d'une prochaine soumission du NERF (voir chapitre 8).
Le renforcement des stocks de carbone forestier: plantations ou reboisements menant à une conversion de terres non forestières vers des terres forestières (puits)	non	Aucune donnée disponible à ce stade, la cartographie de plantations forestières n'ayant pas été effectuée jusqu'à maintenant. Malgré tout Madagascar lance actuellement un programme de reboisement important, et dans ce cadre il sera possible d'inclure le renforcement des stocks de carbone forestier dans une prochaine soumission du NERF.
Le renforcement des stocks de carbone forestier: régénération naturelle dans des terres forestières demeurant forestières (puits)	non	Aucune donnée disponible. Cependant dans le cadre du financement FCPF pour la préparation nationale à la REDD+, Madagascar a déjà réalisé des inventaires dans les zones forestières dégradées des forêts humides de l'Est, et a prévu de réaliser des inventaires dans les forêts sèches de l'Ouest et épineuses du sud en 2017 -2018. Cela permettra donc lors d'une prochaine soumission du NERF de prendre en compte ce renforcement des stocks de carbone.
La conservation des stocks de carbone	non	Étant donné que la réduction des émissions dues à la déforestation présente des chevauchements avec la conservation des stocks de carbone et la gestion durable des forêts, ces deux dernières activités REDD+ ne sont pas prises en compte dans le NERF de Madagascar.
La gestion durable des forêts	non	

Par conséquent, les données d'activité concerneront uniquement la déforestation des différentes écorégions. Comme indiqué dans le tableau ci-dessus, l'évaluation de la dégradation est un défi majeur. Dans le cadre du développement d'un Programme de Réduction d'Emissions (Programme-RE) pour le Fonds Carbone du FCPF, le BNC-REDD+ est en train de tester une méthodologie pour quantifier les GES issus de la dégradation. Si cette méthodologie est satisfaisante, elle pourra être testée au niveau national dans une version ultérieure du NERF.

Ci-dessous sont ainsi indiquées les définitions provisoires des activités REDD+ qui ont été décidées à Moramanga, et qui vont être testées dans le cadre du PRE. Ces définitions ne sont applicables que pour la forêt humide de l'Est.

Déforestation : Conversion directe anthropique, d'une superficie continue d'au moins 0,36 ha, temporaire ou permanente, d'une terre forestière à une terre non forestière.

A titre d'exemple, la conversion d'une forêt primaire en Tavy serait de la déforestation, bien que cette conversion soit temporaire. La conversion d'une forêt secondaire à non forêt serait aussi de la déforestation.

Dégradation : Réduction des stocks de carbone forestier due à des perturbations anthropiques se manifestant par la perte de canopée, non qualifiable comme déforestation.

Par exemple : la dégradation forestière représente la perte brute de carbone forestier en forêt mature.

Renforcement des stocks : Augmentation des stocks de carbone forestier, soit par un passage d'une terre non forestière à une terre forestière, soit par la croissance et/ou la restauration de forêts existantes.

2.4 RESERVOIRS CARBONE

Ce chapitre présente et justifie le choix des différents réservoirs carbone du NERF.

Tableau 3 : Prise en compte des réservoirs carbone

RÉSERVOIRS CARBONE	SÉLECTIONNÉ ?	JUSTIFICATION / EXPLICATION
Biomasse aérienne (BA)	Oui	Les émissions provenant de la biomasse aérienne constituent la majorité des émissions et il est donc indispensable de comptabiliser ce réservoir.
Biomasse souterraine (BS)	Oui	En considérant un rapport BS/BA de l'ordre de 20% à 56%, ce réservoir est significatif à l'échelle nationale et sera donc pris en compte.
Bois mort (MOM 1) et litière (MOM 2)	Oui	Lors de l'inventaire de l'IEFN 1996 et du PERR-FH, les bois morts sur pied ont été mesurés et ils ont été pris en compte dans le calcul de biomasse. En revanche, le bois mort sur le sol et la litière n'ont pas été prises en compte.
Carbone organique du sol (SOC)	Non	Madagascar dispose de données précises et fiables pour l'écorégion des forêts humides mais pas pour les autres écorégions. Malgré des données SOC de qualité dans les forêts humides de l'Est, il n'a pas été possible de développer un modèle fiable qui pronostique le facteur d'émission du SOC (c'est-à-dire l'évolution du SOC pendant la transition du stade forêt au stade non-forêt). Cela peut être dû aux multiples cycles de déforestation / jachère/ régénération qui peuvent engendrer des valeurs très variables de SOC pour des sites de BA similaire.
Produits ligneux récoltés (PLR)	Non	Pas de données disponibles et fiables à ce stade. D'après le Protocole Kyoto, les Pays Non-Annexe I ne sont pas obligées d'inclure PLR dans leurs inventaires GES.

2.5 GAZ A EFFET SERRE

Le tableau ci-dessous présente et justifie le choix des GES sélectionnés pour le NERF.

Tableau 4 : GES sélectionnés dans la comptabilisation carbone

GAZ À EFFET DE SERRE	SÉLECTIONNÉ ?	JUSTIFICATION / EXPLICATION
CO_2	Oui	Le CO2 représente la part la plus importante des émissions dues à la déforestation à Madagascar, principalement due à la culture sur brûlis.
CH_4	Oui	Normalement la cause principale de la déforestation, sauf les mangroves, est la culture sur brûlis. Donc il a été considéré l'émission CH4 au moment de la conversion en non-forêt. La raison de cela est d'augmenter l'exhaustivité du NERF et avoir une idée de l'importance des forêts par rapport aux émissions totales. Dans cette soumission, les émissions non CO2 liées au feu en forêt restant forêt (dégradation) n'ont pas été considérées.
N_2O	Oui	Normalement la cause principale de la déforestation, sauf les mangroves, est la culture sur brûlis. Donc il a été considéré l'émission N2O au moment de la conversion en non-forêt. La raison de cela est d'augmenter l'exhaustivité du NERF et avoir une idée de l'importance des forêts par rapport aux émissions totales. Dans cette soumission, les émissions non CO2 liées au feu en forêt restant forêt (dégradation) n'ont pas été considérées.

3 APPROCHE METHODOLOGIQUE GENERALE

Il est préconisé de développer le NERF en suivant les orientations du GIEC, en effet :

- La Décision 4/CP15 incite les pays en développement à utiliser les orientations et les directives les plus récentes du GIEC, telles qu'elles ont été adoptées ou préconisées par la Conférence des Parties (CP), pour calculer les émissions (sources) et les absorptions (puits) de GES liées aux forêts ainsi que les stocks de carbone forestier et les changements de superficies forestières ;
- De même, le Cadre Méthodologique du Fonds Carbone du FCPF, Critère 5 demande que [Le Programme de Réduction d'Emissions applique les directives et orientations les plus récentes du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), telles qu'adoptées ou préconisées par la Conférence des parties, en tant que base d'estimation des émissions de gaz à effet de serre liées aux forêts, par source, et des Absorptions par puits].

Conformément à ces orientations, le NERF a été développé en suivant les règles et les méthodes préconisées par le GIEC, 2006. D'après les définitions du GIEC, la méthodologie se base sur l'approche des gains et des pertes, c'est-à-dire une estimation du solde net des additions et des absorptions à partir d'un stock de carbone (IPCC, 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4, section 2.2). Le tableau ci-dessous présente une vue d'ensemble.

Tableau 5 : Equations GIEC utilisées pour le développement du NERF

ACTIVITÉS REDD+ (SOURCES ET PUITS)	EQUATIONS APPLIQUÉS	RÉFÉRENCE
Toutes activités	Equation 2.2 Equation 2.3	Vol. 4, chapitre 2, section 2.2.1, page 2.7
Déforestation - changements des stocks	Equation 2.16	Vol. 4, chapitre 2, section 2.3.1.2, page 2.20
Déforestation – émissions non-CO2	Equation 2.27	Vol. 4, chapitre 2, section 2.4, page 2.53

Changement de stocks

Suivant les notations du GIEC, la somme des changements du stock de carbone (ΔC_{LU_i}) est défini comme somme des changements dans la biomasse aérienne (ΔC_{AB}) et dans la biomasse souterraine (ΔC_{BB}) qui forment ensemble le changement de la biomasse totale (ΔC_B).

$$\Delta \boldsymbol{C_{LU_i}} = \Delta \boldsymbol{C_{BA}} + \Delta \boldsymbol{C_{BS}} + \Delta \boldsymbol{C_{BM}} = \Delta \boldsymbol{C_B}$$ ***Equation 1***

Avec

$\Delta \boldsymbol{C_{LU_i}}$ Changement de stock de carbone, pour l'activité REDD+ i, pendant la période de

	référence, en tC/an
ΔC_{BA}	Changement de stock de carbone dans le réservoir de la biomasse aérienne, pendant la période de référence, en tC/an
ΔC_{BS}	Changement de stock de carbone dans le réservoir de la biomasse souterraine, pendant la période de référence, en tC/an
ΔC_{B}	Changement de stock de carbone dans la biomasse totale (aérienne et souterraine), pendant la période de référence, en tC/an

Étant donné que la déforestation est la seule activité REDD+ comptabilisée, les équations suivantes permettent de quantifier les émissions. Ainsi, selon le GIEC 2006, le changement annuel de stock de carbone dû au changement de l'occupation du sol de forêt à non-forêt est déterminé par :

$$\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{CONVERSION} - \Delta C_L$$

Equation 2

Avec

ΔC_{B}	Changement de stock de carbone dans la biomasse totale (aérienne et souterraine), pendant la période de référence, en tC/an
ΔC_{G}	Augmentation des stocks de carbone dans la biomasse lors de la conversion du stade non-forêt au stade forêt, en tonnes C/an
$\Delta C_{CONVERSION}$	Changement du stock de carbone lors de la conversion du stade forêt au stade non-forêt, en tonnes C/an
ΔC_{L}	Changement du stock de carbone a cause de la récolte de bois d'œuvre, de la production de charbon et autres perturbations, en tonnes C/an

Selon les recommandations du Chapitre 2.2.1 de *GFOI Methods Guidance* pour l'application des instructions de GIEC dans le cadre de REDD+, l'Equation 2 peut être simplifiée en considérant les deux suppositions suivantes :

- Le changement du stock de carbone dans la biomasse (ΔC_B) correspond au changement initial de stock de carbone ($\Delta C_{CONVERSION}$);
- On suppose que la biomasse / le stock de carbone est perdu immédiatement pendant la conversion de forêt a non-forêt ;

Par conséquent, le changement de stock de carbone est estimé de la manière suivante :

$$\Delta C_{CONVERSION} = \sum_j EF_j \times \Delta A_j$$

Equation 3

Avec

$\Delta C_{CONVERSION}$	Changement du stock de carbone lors de la conversion du stade foret au stade non-forêt, en tonnes C/an
EF_j	Facteur d'émission pour la transition j, en tonnes CO2 ha^{-1}.

ΔA_j Superficie de forêt convertie du stade forêt au stade non-forêt pendant la période de référence, en ha/an.

Le facteur d'émission est défini de la manière suivante :

$$EF_j = \left(B_{Avant,j} - B_{Apres,j}\right) x\ CF\ X\ \frac{44}{12}$$ ***Equation 4***

Avec

EF_j Facteur d'émission pour la transition j en tonnes CO2 ha^{-1}.

$B_{Avant,j}$ Stock de biomasse avant la conversion du stade forêt au stade non-forêt, pour la transition j, en tonnes de matière sèche ha^{-1}

$B_{Apres,j}$ Stock de biomasse après la conversion du stade forêt au stade non-forêt, pour la transition j, en tonnes de matière sèche ha^{-1}. Dans le cas de la biomasse morte, la conformément aux recommandations du GIEC pour le Niveau 1, il a été considéré que la valeur est égale à zéro.

CF Fraction de carbone dans la biomasse sèche.

44/12 Facteur d'expansion de carbone à CO2.

Conformément à l'approche méthodologique présentée plus haut, le Chapitre 4 fournit des données d'activités (c.à.d. ΔA_j) à partir d'analyses de la déforestation historique. Ensuite, le Chapitre 5 présentera des données sur les facteurs d'émission pour la biomasse aérienne et souterraine (conformément à l'approche méthodologique présentée dans le Chapitre 2).

Emissions non-CO2

Suivant les notations du GIEC, les émissions non-CO2 sont calculées en base à l'équation 2.27 :

$$P_{feu} = SxM_BxC_fxG_{fe}x10^{-3}$$ ***Equation 5***

Avec

P_{feu} Quantité d'émissions de gaz à effet de serre dues au feu, tonnes de chaque GES, par exemple, CH4, N2O, etc.

S Superficie brûlée, ha. Dans cette soumission, la superficie brulée est la même que la superficie déforestée.

M_B Masse de combustible disponible à la combustion, tonnes ha-1. Sont inclus la biomasse, la litière du sol et le bois mort. Lorsqu'on utilise des méthodes de niveau 1, on suppose que les pools de litière et de bois mort sont nuls.

C_f Facteur de combustion, non dimensionnel (valeurs par défaut au tableau 2.6)

G_{fe} Facteur d'émissions, g kg^{-1} de matière sèche brûlée (valeurs par défaut au tableau 2.5)

Les quantités d'émissions non CO2 sont multipliées par les facteurs de conversion en tCO2eq *(le global warming potential).* Pour CH4, la valeur est de 25 et pour N2O c'est 298.

4 DONNEES D'ACTIVITE

Les données d'activité ont été calculées dans le cadre du Projet Eco-Régional REDD+ des Forêts Humides (PERR-FH), financé par le Programme Environnemental. Ces travaux ont été réalisés par le consortium de Wildlife Conservation Society (mandataire du consortium), de l'Office National pour l'Environnement, de Madagascar National Parks et d'ETC Terra.

Le présent chapitre rappelle comment les données d'activité historique ont été développées à partir de la méthodologie présentée dans la sous-composante 2.4 du projet PERR-FH *« Analyse historique de la déforestation pour l'écorégion des forêts humides de l'Est de Madagascar : 2005 – 2010 – 2013 »*. Il décrit notamment le procédé d'acquisition et le choix des images satellitaires, les méthodes de traitements et de classification, ainsi que les principaux résultats obtenus.

4.1 METHODOLOGIE SPECIFIQUE

Les méthodologies retenues pour réaliser cette analyse de l'évolution du couvert forestier se basent sur les directives méthodologiques REDD+ établies et validées pour l'écorégion lors de l'atelier qui s'est tenu à Antananarivo en décembre 2013 et qui visait à définir les méthodes les plus appropriées au regard des cadres méthodologiques du Fond Carbone du FCPF et du VCS. Le contenu de cette approche, des données utilisées et du processus de traitement, est résumé dans le Tableau 6 ci-dessous.

Cette méthode s'est également inspirée d'une étude antérieure effectuée par Grinand et al (2013) dans le cadre du Programme Holistique de Conservation des Forêts (PHCF), un des projets REDD mis en œuvre à Madagascar depuis 2008.

Tableau 6 : Cadre méthodologique concernant l'analyse historique de la déforestation

ETAPE 1 : CARACTÉRISATION DES DONNÉES	
Type d'image satellite	Images à haute résolution (30m ou mieux). Utilisation d'image d'un même fournisseur pour l'ensemble de l'écorégion. Note : Préférence pour les images LANDSAT qui sont gratuites.
Date et période observée	Image des années 2005, 2010 et 2013/14. Ont été recherchées en priorité les groupes d'images prises dans une même année pour plus d'homogénéité.
ETAPE 2 : TRAITEMENTS ET ANALYSES	
Prétraitement	- Lorsque les images n'étaient pas pré-traitées, une correction atmosphérique et une correction géométrique ont été réalisées. Lorsque la couverture nuageuse dépasse 10% dans une zone de l'écorégion, des techniques de combinaison de scènes identiques à dates différentes pour réduire au minimum cette couverture nuageuse ont été appliquées.

Classification	Utilisation de la méthode de classification supervisée (impliquant la délimitation de parcelles d'entrainement ou d'apprentissage) et prise en compte des 6 catégories d'occupation des sols du GIEC. Utilisation de Google Earth et/ou d'images à très haute résolution (2m ou mieux) pour aider à la délimitation de ces parcelles d'entrainement. Utilisation du logiciel R avec l'algorithme RandomForest.
Analyse	L'analyse a été réalisée de manière automatique en utilisant R/Random Forest. Elle a été conduite par zone pour faciliter le travail des opérateurs comme des machines.
Post traitement	3 niveaux de post traitements ont été réalisés : - Lissage 3x3 pixels, sur un filtre à majorité ; - Filtre pour les forêts à moins de 1 ha - Filtre sur les surfaces déforestées inférieur à 0,36 ha (sur 2x2 pixels)
ETAPE 3 : EVALUATION DE LA PRÉCISION	
Evaluation de la précision des cartes produites	Utilisation d'un tiers (1/3) des parcelles d'apprentissage (ou parcelles d'entrainement) pour évaluer la précision. En plus une évaluation externe de la précision en utilisant des images à très haut résolution a été réalisée. La précision globale (ou Overall Accuracy) recherchée pour la classification forêt/Non-Forêt était d'au moins 75%.

Chaîne de traitement des données

La chaîne de traitement de données est résumée dans la Figure 3 ci-dessous.

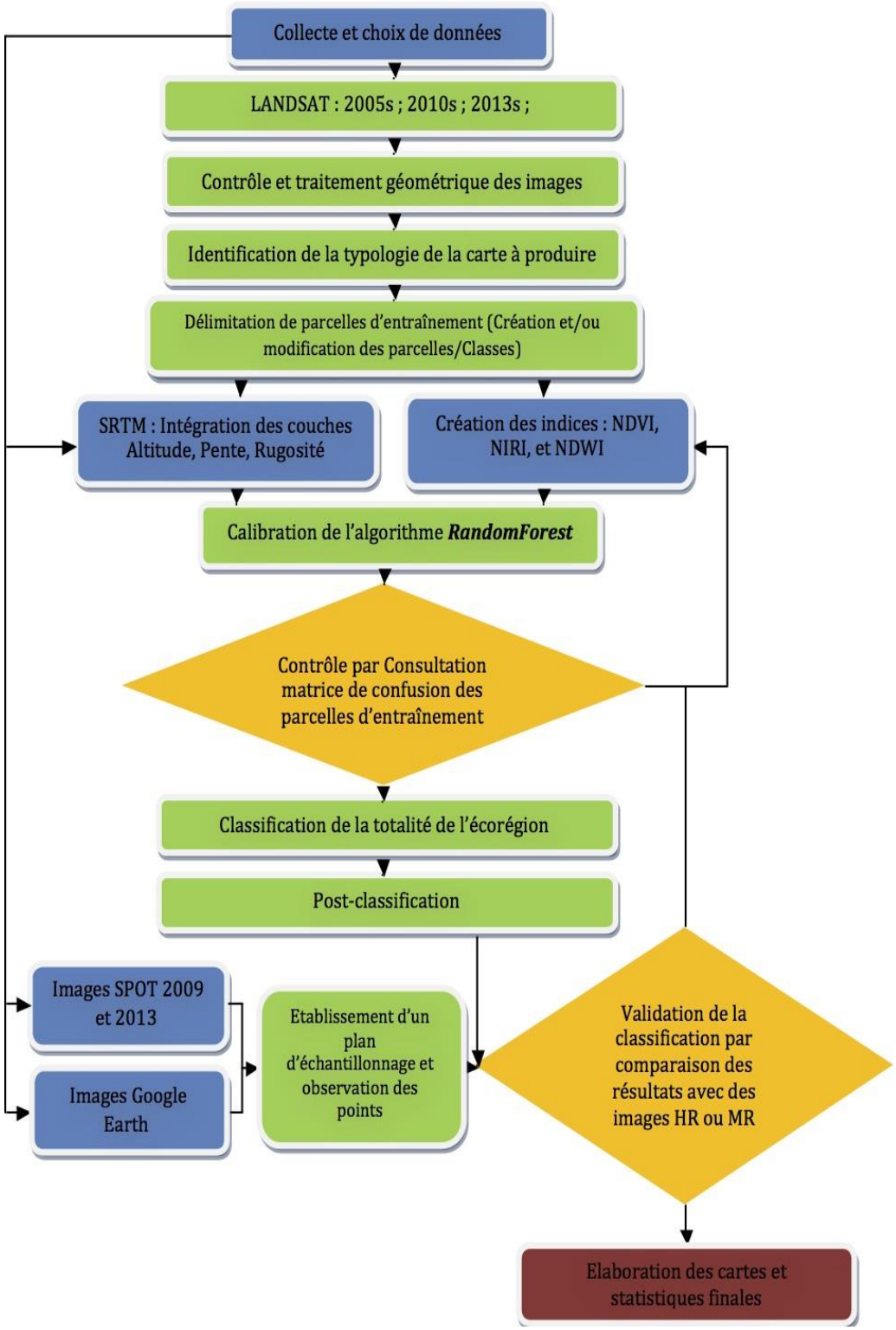


Figure 3 : Etapes de traitement des données pour l'analyse historique de la déforestation

Type d'image satellite

Les images LANDSAT ont été utilisées pour réaliser ce travail afin de garantir une homogénéité dans le type d'images utilisées et la disponibilité de ces données sur une grande étendue géographique et temporelle. D'autre part, ce type d'image est recommandé pour la cartographie de la déforestation car elles offrent une résolution correspondant à la limite maximale de 30 m requise par les méthodologies REDD+ (GOFC-GOLD 2013).

Ces images sont disponibles sur les serveurs de partage de données de l'USGS, à savoir Glovis et Earth Explorer et y ont été téléchargées gratuitement. Les caractéristiques de ces images sont résumées dans le Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Caractéristiques des différentes bandes spectrales des capteurs LANDSAT

LANDSAT 5/7			LANDSAT 8		
Bande spectrale	**Longueur d'onde**	**Résolution**	**Bande spectrale**	**Longueur d'onde**	**Résolution**
Bande 1 - Bleu (B)	0,45 - 0,52	30 m	Bande 2 – Bleu (B)	0,450 - 0,515	30 m
Bande 2 - Vert (V)	0,52 - 0,60	30 m	Bande 3 – Vert (V)	0,525 - 0,600	30 m
Bande 3 - Rouge (R)	0,63 - 0,69	30 m	Bande 4 – Rouge (R)	0,630 - 0,680	30 m
Bande 4 - Near-Infrared (NIR)	0,76 - 0,90	30 m	Bande 5 - Near-Infrared (NIR)	0,845 - 0,885	30 m
Bande 5 - Near-Infrared 1 (NIR1)	1,55 - 1,75	30 m	Bande 6 - Near-Infrared 1 (NIR1)	1,560 - 1,660	30 m
Bande 7 - Mid-Infrared (MID)	2,08 - 2,35	30 m	Bande 7 - Mid-Infrared (MID)	2,100 - 2,300	30 m

Dates et périodes de référence

Ainsi que cela a été présenté dans le Chapitre 2.3, la période historique de référence couvre la période 2005-2013. Au sein de cette période, les années 2005, 2010 et 2013 ont été prises comme années de référence (« années pivot »).

Il est important de noter que la présence de couverture nuageuse dans la zone d'étude limite fortement le choix des dates exactes de l'image. De ce fait, les dates ont été choisies à une année près de l'année de référence (± un an).

Le Tableau 8 ci-dessous présente les dates des images sélectionnées, I1 étant l'intervalle en nombre d'années décimales pour la période 2005-2010 et I2 l'intervalle en nombre d'années décimales pour la période 2010-2013.

Tableau 8 : Date des images Landsat utilisées pour l'analyse historique de la déforestation

Scènes	Images 2005	Images 2010	Images 2013	I1	I2	Période totale
157 - 071	25.03.2005	04.11.2011	07.02.2014	6,62	2,26	8,88
158 - 069	02.06.2004	09.08.2008	28.12.2013	4,19	5,39	9,58
158 - 070	27.08.2006	05.10.2010	19.06.2013	4,11	2,71	6,82
158 - 071	27.01.2005	20.05.2011	18.03.2014	6,31	2,83	9,14
158 - 072	10.06.2007	18.01.2011	18.03.2014	3,61	3,16	6,77
158 - 073	11.06.2007	08.07.2011	18.05.2013	4,08	1,86	5,94
158 - 074	24.06.2006	08.07.2011	18.05.2013	5,04	1,86	6,9
158 - 075	26.04.2005	15.11.2009	05.07.2013	4,56	3,64	8,2
158 - 076	03.08.2005	30.11.2009	13.08.2013	4,33	3,7	8,03
158 - 077	12.04.2006	20.04.2009	26.06.2013	3,02	4,19	7,21
159 - 068	24.04.2005	19.04.2009	22.04.2013	3,99	4,01	8
159 - 069	18.08.2006	10.06.2010	26.06.2013	3,81	3,05	6,86
159 - 070	24.04.2005	26.03.2009	22.04.2013	3,92	4,08	8
159 - 071	06.02.2006	05.05.2009	13.08.2013	3,24	4,28	7,52
159 - 072	20.03.2004	30.04.2010	13.08.2013	6,12	3,29	9,41
159 - 073	28.04.2006	01.05.2010	25.05.2013	4,01	3,07	7,08
159 - 074	25.04.2005	07.06.2009	25.05.2013	4,12	3,97	8,09
159 - 075	11.09.2006	30.03.2010	23.04.2013	3,55	3,07	6,62
159 - 076	10.01.2005	05.11.2009	16.09.2014	4,82	4,87	9,69
159 - 077	11.04.2006	19.04.2009	22.04.2013	3,02	4,01	7,03
159 - 078	07.11.2004	24.03.2011	22.04.2013	6,38	2,08	8,46
160 - 070	28.05.2006	28.11.2009	29.04.2013	3,51	3,42	6,93
160 - 071	23.04.2005	20.05.2009	07.09.2014	4,08	5,3	9,38
160 - 072	13.08.2005	05.06.2009	06.08.2014	3,81	5,17	8,98
160 - 073	22.03.2005	29.04.2010	05.07.2014	5,11	4,19	9,3
160 - 074	22.03.2005	12.11.2009	10.11.2014	4,65	5	9,65
160 - 075	17.01.2005	12.11.2009	10.11.2014	4,82	5	9,82
160 - 076	09.05.2005	15.03.2011	29.04.2013	5,85	2,13	7,98
160 - 077	23.04.2005	15.03.2011	02.05.2014	5,9	3,13	9,03
161 - 071	29.03.2005	25.04.2009	29.08.2014	4,08	5,35	9,43
161 - 072	16.05.2005	25.04.2009	25.05.2014	3,95	5,08	9,03
161 - 073	16.05.2005	17.04.2009	28.07.2014	3,92	5,28	9,2
161 - 074	29.03.2005	25.04.2009	30.09.2014	4,08	5,44	9,52
161 - 075	29.03.2005	20.04.2010	12.07.2014	5,06	4,23	9,29
161 - 076	16.05.2005	25.04.2009	25.05.2014	3,95	5,08	9,03
Moyenne						8,31

Prétraitement des données

Outre la considération des différentes caractéristiques des bandes spectrales, le choix des images se base également sur les critères suivants :

- Taux de couverture nuageuse ;
- Caractéristiques géométriques de l'image ;
- Présence ou non d'effet de la défaillance du capteur Landsat 7 (*SLC - off*).

Le prétraitement des données a pour finalité de disposer de données utilisables dans le cadre d'une analyse temporelle, c'est-à-dire avec une couverture nuageuse faible ou nulle, un décalage géométrique inférieur à 1 pixel et peu ou pas d'effet de stripping. Ce travail a été réalisé grâce aux logiciels ENVI, ERDAS Imagine et QGIS. Il consiste à respecter la conformité spatiale des données, notamment vis-à-vis du futur mosaïquage des images et de l'empilement des couches (Layer stacking). Ainsi, les images téléchargées ont fait l'objet d'une vérification et d'une correction géométrique.

Comme dit précédemment, la disponibilité d'images dénuées de nuages dans la zone d'étude située sur le versant oriental de Madagascar est assez limitée. Les images retenues pour l'analyse présentent généralement moins de 20% de couverture nuageuse à l'exception notable des zones de Makira-Masoala, de la Baie d'Antongil (MaMaBaie) et du COMATSA où la couverture nuageuse est parfois très élevée. Ceci a conduit à effectuer une classification supervisée sur des images multi-dates dans toute l'écorégion dans le but de réduire les incertitudes.

En effet, d'après le GOFC-GOLD (CP18, 2012), il est clairement mentionné que l'analyse multi-date réduit les erreurs en comparaison de classifications produites indépendamment pour plusieurs dates : « Dans l'objectif d'étudier les changements d'occupation du sol, il est important de souligner que, plutôt que de comparer des cartes produites indépendamment à partir de différentes dates, il est préférable de combiner plusieurs dates en une seule image et d'identifier directement les changements. La différence est subtile mais importante, étant donné qu'il est plus fiable d'identifier les changements sur des images multi-dates qu'à travers la comparaison de cartes individuelles dérivées d'images satellites de différentes dates. »

Afin de garantir la propriété géométrique des images, les produits Global Land Survey (GLS) et *Level-1T* (L1T) ont été utilisés. D'après Gutman et al (2008), ces données disposent de qualités radiométriques et géométriques satisfaisantes pour effectuer l'analyse des changements d'occupation du sol, notamment pour l'analyse historique de la déforestation. Pourtant leur utilisation est fortement limitée par la présence d'une forte couverture nuageuse dans les régions Nord (COMATSA) et Nord-Est (Makira-Masoala) de l'écorégion. Dans ces régions les données GLS et L1T peuvent être complétées par d'autres images de niveau géométrique nécessitant des vérifications minutieuses. Les images qui présentaient des gros problèmes de géométrie (distorsion) ont été écartées de l'analyse. Par contre, celles qui présentaient seulement des problèmes de géométrie simple (calage) ont été corrigées et utilisées dans l'étude (COMATSA: 158-069 [2005 et 2010], COFAV: 158-073 [2005]).

Liée à la défaillance du capteur du satellite LANDSAT-7 depuis 2003, des bandes de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres sans information sont présentes sur ces images. La présence de ces bandes sur les images relatives aux années de références 2005 et 2010 a également limité le choix et compliqué le travail puisqu'il a fallu mosaïquer deux scènes de même date afin de corriger ces défauts.

Généralement, de telles données n'ont pas été retenues dans l'analyse lorsqu'il existait d'autres images de bonne qualité mais à l'inverse, certaines de ces images présentaient parfois de moindres taux de couverture nuageuse et un bon calage géométrique, ce qui leur conférait donc encore un certain intérêt.

4.2 CLASSIFICATION DES TERRES ET CLASSES DE CHANGEMENT

L'approche cartographique pour la déforestation est exhaustive sur toute la zone à étudier, c'est-à-dire que le traitement des données est homogène sur l'ensemble de la région étudiée afin d'éviter les bais méthodologiques liés à un operateur.

Dans la pratique, cette opération se déroule en trois étapes :

- Définition des classes d'occupation du sol ;
- Délimitation des parcelles d'entraînement ;
- Classification proprement dite à l'aide d'un algorithme de classification.

Définition des classes d'occupation du sol

La définition des différentes classes d'occupation des sols retenues a fait l'objet de discussions entre les membres du consortium qui ont travaillé pour ce mandat. En tenant compte avant tout des recommandations du GIEC (GIEC, 2006) puis des diverses occupations du sol connues sur l'ensemble de l'écorégion, et celles qui sont effectivement détectables via l'imagerie LANDSAT, les classes de végétation et d'occupation du sol suivantes ont été retenues :

Tableau 9 : Définitions des classes de couverture de sol

NOM	ABRÉVIATION	DÉFINITION
Terres forestières	F : Forêt Humide S: Forêt Sèche E: Forêt Épineuse M: Mangrove	Superficies forestières avec une couverture de canopée égale ou supérieure à 30%, avec une superficie égale ou supérieure à 1 ha et avec une hauteur égale ou supérieure à 5m, localisées dans les écorégions des forêts humides, épineuses et sèches ; ou mangroves.

Nom	Abréviation	Définition
Prairies et terres cultivées	P	Prairies ou terres cultivées avec une couverture de canopée inférieure à 30% et/ou une hauteur inférieure à 5m et / ou une superficie inférieure à 1 ha.
Zones humides	H	Zones humides avec une couverture de canopée inférieure à 30% et/ou une hauteur inférieure à 5m et / ou une superficie inférieure à 1 ha.
Ombre / Nuage	O	Zones couvertes par des nuages ou des ombres

L'analyse de l'historique de la déforestation ayant bien entendu privilégié la détection des changements au niveau de la classe des Terres forestières, c'est la typologie présentée dans le Tableau 10 qui a ainsi été adoptée.

Tableau 10 : Typologie des classes d'occupation du sol retenue pour l'analyse multi-date

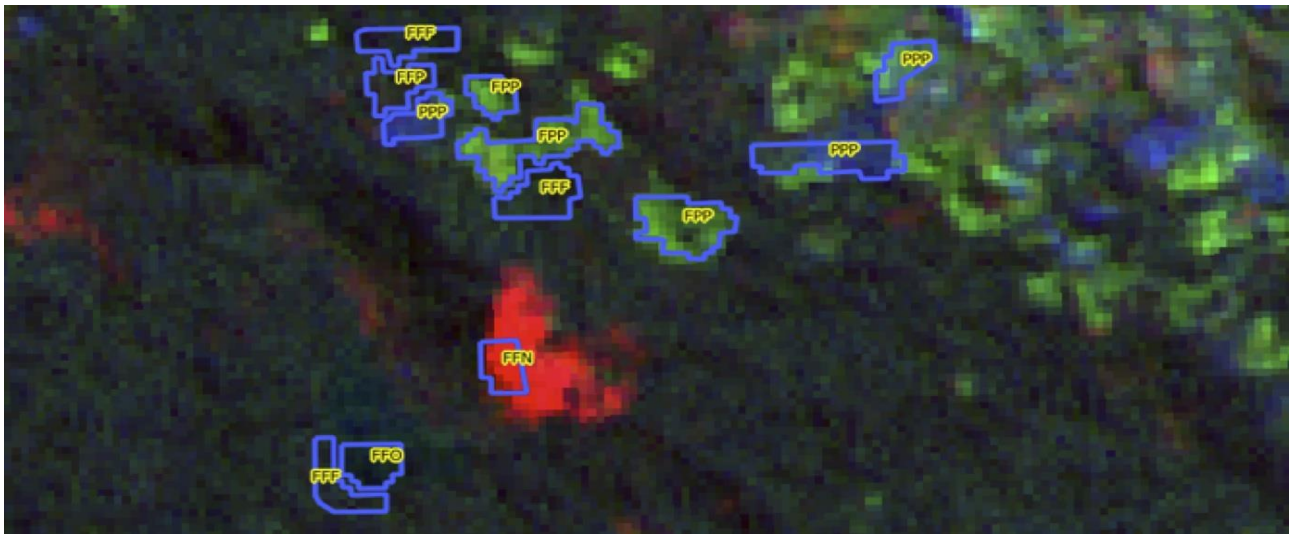
Code	Couverture du sol en 2005	Couverture du sol en 2010	Couverture du sol en 2013	Changement de la couverture du sol	Abréviation
111	Forêt humide	Forêt humide	Forêt humide	Terres forestières humides intactes	FFF
113	Forêt humide	Forêt humide	Prairies et terres cultivées	Terres forestières humides converties en prairies/terres cultivées entre 2010-2013	FFP
133	Forêt humide	Prairies et terres cultivées	Prairies et terres cultivées	Terres forestières humides converties en Prairies/Terres cultivées entre 2005-2010	FPP
183	Forêt humide	Nuage / ombre	Prairies et terres cultivées	Terres forestières humides converties en Prairies/Terres cultivées entre 2005-2013	FOP
222	Forêt sèche	Forêt sèche	Forêt sèche	Terres forestières sèches intactes	SSS
223	Forêt sèche	Forêt sèche	Prairies et terres cultivées	Terres forestières sèches converties en prairies/terres cultivées entre 2010-2013	SSP
228	Forêt sèche	Forêt sèche	Nuage / ombre	Terres forestières sèches intactes	SSO
233	Forêt sèche	Prairies et terres cultivées	Prairies et terres cultivées	Terres forestières sèches converties en prairies/terres cultivées entre 2005-2010	SPP
288	Forêt sèche	Nuage / ombre	Nuage / ombre	Terres forestières sèches intactes	SOO
333	Prairies et terres cultivées	Prairies et terres cultivées	Prairies et terres cultivées	Non-foret	PPP
444	Zone humide	Zone humide	Zone humide	Zones humides inchangées	HHH
533	Forêt épineuse	Prairies et terres cultivées	Prairies et terres cultivées	Terres forestières épineuses converties en prairies/terres cultivées entre 2005-2010	EPP
553	Forêt épineuse	Forêt épineuse	Prairies et terres cultivées	Terres forestières épineuses converties en prairies/terres cultivées entre 2010-2013	EEP

Code	Couverture du sol en 2005	Couverture du sol en 2010	Couverture du sol en 2013	Changement de la couverture du sol	Abréviation
555	Forêt épineuse	Forêt épineuse	Forêt épineuse	Terres forestières épineuses intactes	EEE
666	Autres terres	Autres terres	Autres terres	Autres terres (pas de changement)	AAA
733	Mangroves	Prairies et terres cultivées	Prairies et terres cultivées	Mangroves déforestées entre 2005-2010	MPP
773	Mangroves	Mangroves	Prairies et terres cultivées	Mangroves déforestées entre 2010-2013	MPP
777	Mangroves	Mangroves	Mangroves	Mangroves inchangées	MMM
778	Mangroves	Mangroves	Nuage / ombre	Mangroves inchangées	MMO
788	Mangroves	Nuage / ombre	Nuage / ombre	Mangroves inchangées	MOO
888	Nuage / ombre	Nuage / ombre	Nuage / ombre	Nuage / ombre	OOO

Délimitation des parcelles d'entraînement

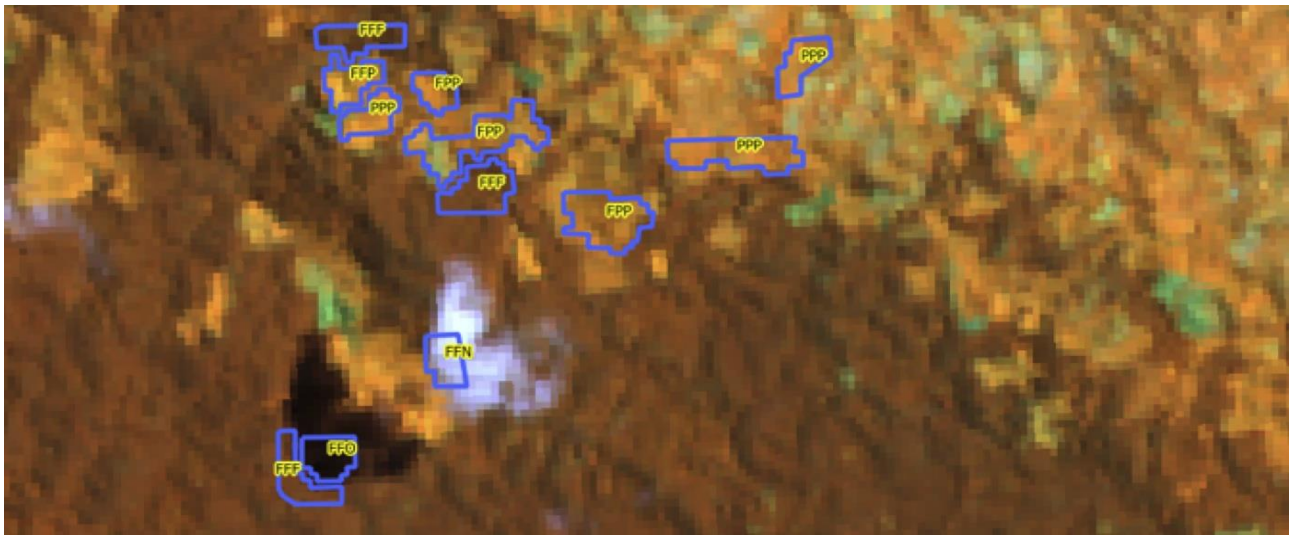
Dans une approche de classification supervisée, cette étape est nécessaire pour calibrer l'algorithme de classification. La qualité du résultat de la classification dépend en grande partie de la bonne délimitation de ces parcelles d'entraînement. Dans cette étude, la délimitation de ces dernières a été réalisée par photo-interprétation sur les images à classifier et en s'appuyant sur d'autres sources d'information. Pour mieux localiser les changements entre classes, une composition colorée multi-dates de la bande spectrale des images a été produite.

Les classes ont été localisées en grappes : regroupement de plusieurs parcelles d'entraînement dans un même paysage. Il a été fait en sorte que soient délimitées au moins 3 classes d'occupation du sol différentes (FFF, FFP et FPP) sur chaque grappe. Enfin, les contours des parcelles ont été affinés et vérifiés en les superposant que les images satellites très haute résolution disponibles dans Google Earth. Au final, une base de données géolocalisées a été produite et rassemble tous les polygones et résultats de photo-interprétation pour les trois dates étudiées. Les Figure 4 à Figure 6 ci-dessous illustrent cette procédure.



(R: Band 3-2013; G: Band 3-2010; B:Band3-2005) : En vert sont les déforestations entre 2005 - 2010, en rouge, soit des nuages en 2013 ou des déforestations entre 2010 - 2013

Figure 4 : Mise en évidence des changements de classes sur une composition colorée multi-dates



(composition colorée : R : Band4 ; G : Band 5 ; B : Band 3) : Ici on observe l'ombre du nuage en noir et le nuage en blanc, les forêts en orange foncé et les déforestations en orange un peu plus clair

Figure 5 : Délimitation des classes sur l'image 2013 à classifier

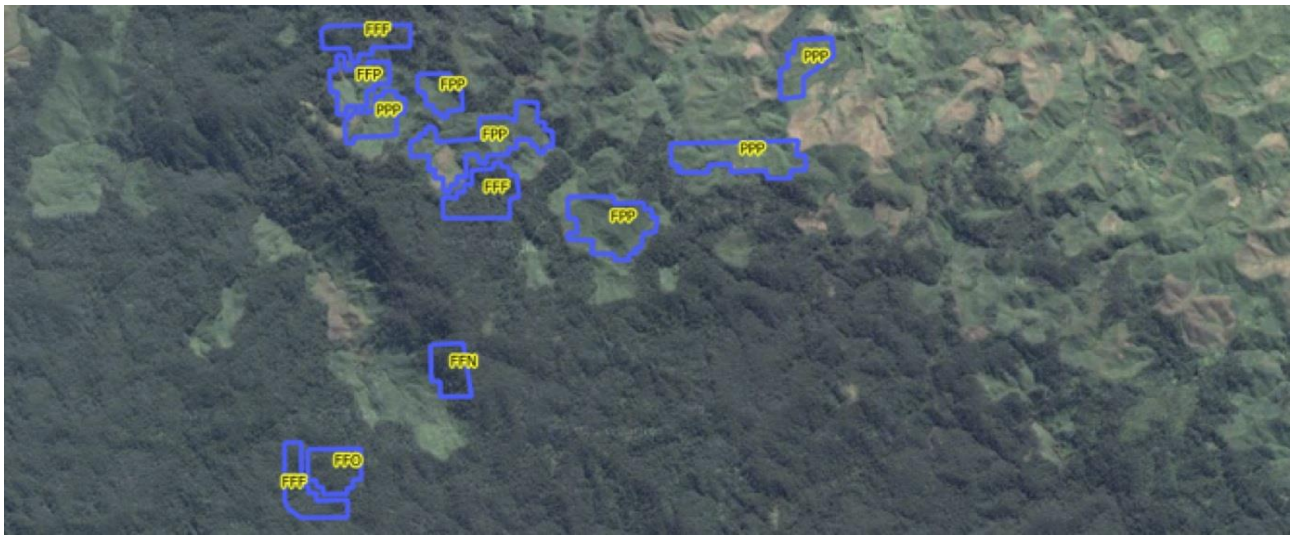


Figure 6 : Vérification et affinage sur Google Earth

Classification à l'aide d'un algorithme de classification

C'est l'algorithme « *RandomForest* », développé par Breiman et al (2001), qui a été sélectionné pour la classification. C'est un algorithme d'apprentissage supervisé qui combine une technique d'agrégation (*bagging*) et l'algorithme d'arbres de décision dont le principe est représenté dans la Figure 7. Il a été importé dans le logiciel libre R par Liaw and Wiener (2002) dans le package *RandomForest*.

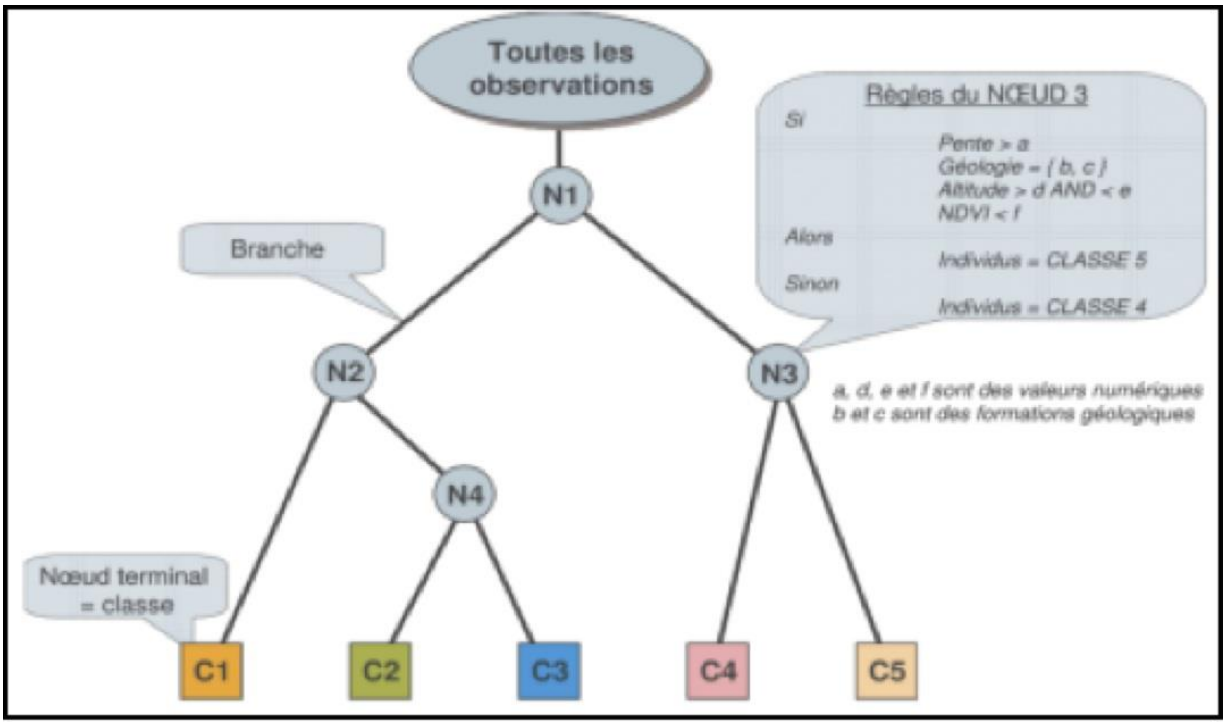


Figure 7 : Principe de la classification par arbre de décision

Dans un premier temps, l'algorithme *RandomForest* a dû être calibré afin de prédire les différentes catégories d'occupation du sol à classifier. La calibration sur modèle se fait en prenant les 70% du jeu de données d'apprentissage, les 30% restants étant utilisés pour la validation (matrice de confusion et indicateurs). On parle de validation interne car l'ensemble des placettes n'est pas utilisé et la carte n'est pas encore produite. Par ailleurs, l'algorithme calcule un autre indicateur de performance du modèle, une estimation de son erreur de généralisation sur les 30% de données non utilisées pour la construction du modèle de classification : l'erreur « *Out-Of-Bag* » (OOB).

Le paquet *RandomForest* permet aussi d'avoir des informations sur l'importance des variables utilisées. Quelles sont les variables vraiment nécessaires pour expliquer la classification ? De quelles variables peut-on se passer ? Voilà les questions pour lesquelles des réponses sont attendues. Pour ce faire, un indice d'importance des variables spécifiques aux forêts a été développé par Breiman (2001) : il utilise la permutation aléatoire des variables. Plus les permutations aléatoires d'une variable engendrent une forte augmentation de l'erreur, plus la variable est importante. A l'inverse, si les permutations n'ont aucun effet sur l'erreur, la variable est considérée comme très peu importante.

Couches d'informations spatiales utilisées

Afin d'améliorer le degré de discrimination des classes étudiées, plusieurs couches d'indices dérivées des canaux primaires ont été calculées, notamment :

- L'indice normalisé de végétation : NDVI (Normalised Difference Vegetation Index);

$$NDVI = \frac{NIR1 - R}{NIR1 + R} \qquad \text{(Equation 6)}$$

- L'indice de réflectance du proche infrarouge : NIRI (Near Infrared Reflectance Index);

$$NIRI = \frac{NIR2 - NIR1}{NIR2 + NIR1} \qquad \text{(Equation 7)}$$

- L'indice normalisé de l'eau : NDWI (Normalised Difference Water Index).

$$NDWI = \frac{NIR1 - V}{NIR1 + V} \qquad \text{(Equation 8)}$$

En plus de ces indices, des exo-canaux (indices morphométriques) ont été introduits (altitude, pente et rugosité) et dérivés d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ; ceci dans le but d'atténuer l'effet de relief sur les réflectances des canaux primaires.

4.3 POST-TRAITEMENT

Suite à la procédure de classification, il subsiste généralement des classes ombres/nuages et un faible taux de pixels isolés lié à des petites forêts ou parcelles, ou des erreurs de classification. Ainsi, la post-classification consiste à nettoyer l'image classifiée afin de la faire correspondre aux exigences de MMU et réduire les erreurs.

Filtrage

Cette étape commence par le nettoyage du bruit (effet « poivre et sel ») sur l'image classifiée par l'application de filtre convolutif majoritaire utilisant une fenêtre de balayage de dimension 3 x 3 pixels[3]. Ensuite, l'étape suivante consiste à appliquer consécutivement deux fonctions[4] permettant d'éliminer les "patches de forêt" et les "patches de déforestation" selon les conditions suivantes :

- 0,81 hectare pour la forêt (soit environ 3x3 pixels avec des images LANDSAT),
- 0,36 hectare pour la déforestation (soit 2x2 pixels avec des images LANDSAT).

Cependant l'application de ce dernier filtre n'a pas réussi à éliminer tous les « patches de forêt » de moins d'un ha. Cependant cette superficie est considérée comme négligeable (i.e. 10662 ha pour toute Madagascar).

Tableau 11 : Dimensions des patches de pixels de forêt

Dimension du patch	<0.5 ha	< 1 ha	<2 ha	<=2 ha	>5 ha
Superficie (ha)	2,472	10,662	54,033	110,010	8,396,641

[3] Plus d'informations sur ce type de filtrage peuvent être trouvées dans ce lien http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Majority_Filter/009z00000037000000/

[4] Plus d'informations sur un filtre similaire peuvent être trouvées dans le lien suivant http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Region_Group/009z00000039000000/

Elimination des ombres/nuages

Pour disposer d'une cartographie complète de l'écorégion, les ombres et nuages ont été traités grâce à la carte *Global Forest Change* (Hansen et al., 2012) qui met gratuitement à disposition une très importante quantité de données pour la période 2000-2012 (pourcentage de couverture forestière, pixels déforestés par année, images brutes). Les données ont été traitées de manière à produire une carte forestière en 2005 et 2012. Il a ainsi été possible de classifier une grande partie des pixels concernés par les ombres et nuages sur les images LANDSAT sélectionnées. Les Figure 8 et Figure 9 ci-dessous illustrent les démarches qui ont été appliquées.

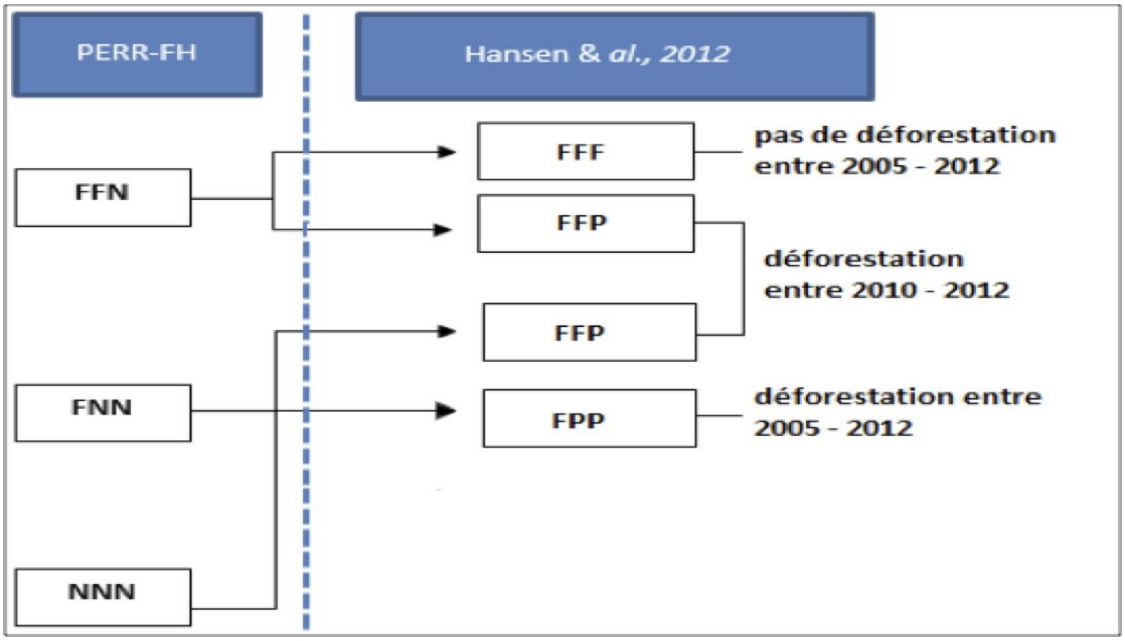


Figure 8 : Représentation schématique du processus d'élimination des nuages

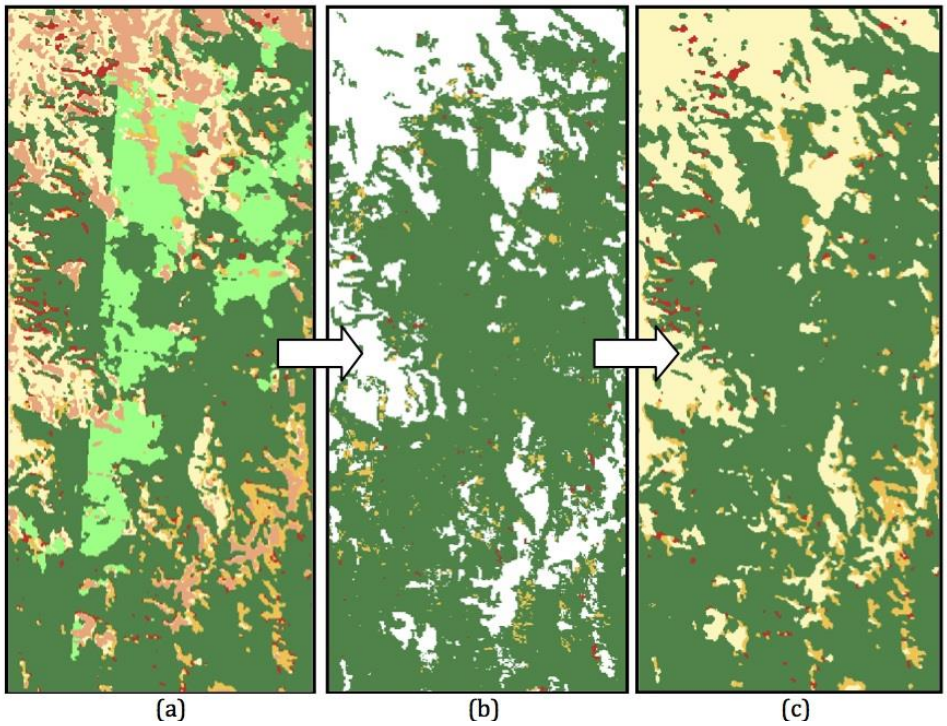


Figure 9 : Exemple de post-classification

(a) Classification avec la classe forêt humide sous nuage et ombre (en vert clair, bruits déjà traités) ; (b) Carte de déforestation hybride entre 2005-2012 obtenue à partir de la carte Global Forest Change ; (c) Carte historique de la déforestation entre 2005-2013 du PERR-FH (patches de déforestation ≥ 0,36 ha et patches forestiers ≥ 1 ha). En vert les forêts intactes, en orange la déforestation entre 2005 - 2010 et en rouge la déforestation entre 2010 – 2013

4.4 ANALYSE DE LA PRECISION

Se reporter au chapitre 7.2.1.

4.5 CHANGEMENT D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2005 ET 2013

Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'analyse de la déforestation entre 2005 et au niveau des quatre écorégions et au niveau national.

Il est à noter qu'il y a une légère augmentation de superficie de déforestation pour les écorégions de forêts humides et de forêt sèche pour la période de 2010-2013 par rapport à la période de 2005-2010. Le principal moteur de déforestation est la pratique de culture sur brulis ou « tavy », celle-ci est due au contexte socio-politique du pays qui prévaut durant la période de transition «2009-2013». En effet, la situation socio-économique de la population devenait très précaire et le seul moyen de subvenir à ses besoins c'est de se rabattre aux ressources naturelles et les terrains forestiers.

On peut dire que cette augmentation de superficie déforestée n'est qu'une situation passagère et ne sera pas une tendance dans le futur.

En ce qui concerne les superficies brulées, il faut noter que la considération que le défrichement de végétation lié aux feux est exacte étant donné que le principal facteur de déforestation est la culture sur brûlis.

Tableau 12 : Superficie des forêts et perte de superficie forestière par écorégion. *Les valeurs de déforestation ne correspondent pas à la différence des superficies de forêt en chaque date car il y a une proportion faible de superficie de forêt qui est classifiée comme no data en périodes ultérieures .

	Superficie			Deforestation [en ha]					
Ecorégion	**2005**	**2010**	**2013**	**2005-2010**	**2010-2013**	**2005-2013**	**Déforestation totale pendant la période de référence**	**Déforestation annuelle**	**Taux de déforestation [5] (%)**
Forêt Humide	4 469 603	4 385 790	4 294 071	82 108	91 692	14	173 814	20 916	0,47
Forêt Sèche	3 141 516	2 938 023	2 668 108	203 389	264 271	-	467 660	56 277	1,89
Forêt Épineuse	1 713 636	1 593 014	1 506 507	120 621	86 507	-	207 128	24 925	1,58
Mangrove	245 772	243 398	241 526	2 288	1 313	-	3 601	433	0,25
Total				**408 406**	**443 783**	**14**	**852 203**	**102 550**	**1,11**

[5] Calculé à titre indicatif, partir de la formule de Puyravaud (2002) et de la période de temps de 8,31 ans sur l'ensemble des deux périodes.

Tableau 13 : Matrice de transition 2005-2010

LULC classes			2010										
			Forêt humide	**Forêt sèche**	**Forêt épineuse**	**Mangroves**	**Cropland/Grassland**	**Wetland**	**Sols nus/sables/roches**	**Ombre**	**Nuage**	**No Data**	**Total**
2005	**Forestland**	**Forêt humide**	**4 385 790**	-	-	-	82 108	-	-	14	-	1 692	4 469 603
		Forêt sèche	-	2 938 023	-	-	203 389	-	-	104	-	-	3 141 516
		Forêt épineuse	-	-	1 593 014	-	120 621	-	-	-	-	-	1 713 636
		Mangroves	-	-	-	243 398	2 288	-	-	0		86	245 772
	Cropland/Grassland		-	-	-	-	47 846 303	-	-	-	-	-	47 846 303
	Wetland		-	-	-	-	-	781 158	-	-	-	-	781 158
	Settlements/Other Land	**Sols nus/sables/roches**	-	-	-	-	-	-	968 531	-	-	-	968 531
		Ombre	-	-	-	-	-	-	-	79	-	-	79
		Nuage											-
		No Data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total		4,385,790	2 938 023	1 593 014	243 398	48 254 709	781 158	968 531	197		1 778	59 166 598

Tableau 14 : Matrice de transition 2010-2013

LULC classes			2013										
			Forêt humide	**Forêt sèche**	**Forêt épineuse**	**Mangroves**	**Cropland/Grassland**	**Wetland**	**Sols nus/sables/roches**	**Ombre**	**Nuage**	**No Data**	**Total**
2010	**Forestland**	**Forêt humide**	4 294 071	-	-	-	91 692	-	-	-	27	-	4 385 790
		Forêt sèche	-	2 668 108	-	-	264 271	-	-	5 644		-	2 938 023
		Forêt épineuse	-	-	1 506 507	-	86 507	-	-	-	-	-	1 593 014
		Mangroves	-	-	-	241 526	1 313	-	-	559		-	243 398
	Cropland/Grassland			-	-	-	48 254 709		-	-	-		48 254 709
	Wetland			-	-	-	-	781 158		-	-		781 158
	Settlements/Other Land	**Sols nus/sables/roches**	-	-	-	-	-	-	968 531	-	-	-	968 531
		Ombre	-	-	-	-	14	-	-	183	-	-	197
		Nuage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		No Data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 778	1 778
	Total		4,294,071	2 668 108	1 506 507	241 526	48 698 506	781 158	968 531	6 385	27	1 778	59 166 598

Données d'activité

Cette section présente les résultats d'analyse des données d'activité par écorégion. Il n'existe pas de modèle officiel de rapport pour retranscrire les données d'activités d'un NERF national soumis à la CNUCC. Nous avons donc choisi ici de nous appuyer sur la trame de rapport fournie le FCPF pour l'élaboration d'un Document de Programme de Réduction d'Emissions (DPRE).

Description du paramètre,	**Perte annuelle de forêt humide**
Sources ou puits concernés par le paramètre considéré :	Le paramètre concerne l'estimation des GES dus à la déforestation.
Unité de la donnée :	Hectares par an
Valeur du paramètre	20 915
Source de la donnée ou description de la méthode utilisée pour obtenir la donnée:	Images Landsat 5, 7 et 8 pour l'écosystème des forêts humides qui ont été superposées pour déterminer le changement d'occupation du sol de forêt a non-forêt (prairie et/ou culture) entre 2005 et 2010 puis entre 2010 et 2013. La méthodologie pour le calcul de la valeur est présentée plus haut (chapitre 4).
Echelle spatiale:	Le paramètre est applicable à l'écorégion des forêts humides sur une superficie totale (c.à.d. forêt et non-forêt) de 20 585 864 ha.
Analyse des principales incertitudes:	L'incertitude est principalement engendrée par les erreurs commises dans la classification des images Landsat.
Estimation de l'exactitude, de la précision et/ou du degré de confiance :	Voir section 7

Description du paramètre:	**Perte annuelle de forêt sèche**
Sources ou puits concernés par le paramètre considéré :	Le paramètre concerne l'estimation des GES dus à la déforestation.
Unité de la donnée :	Hectares par an
Valeur du paramètre	56 277
Source de la donnée ou description de la méthode utilisée pour obtenir la donnée :	Images Landsat 5, 7 et 8 pour l'écosystème des forêts sèches qui ont été superposées pour déterminer le changement d'occupation du sol de forêt a non-forêt (prairie et/ou culture) entre 2005 et 2010 puis entre 2010 et 2013. La méthodologie pour le calcul de la valeur est présentée plus haut (chapitre 4).
Echelle spatiale :	Le paramètre est applicable à l'écorégion des forêts sèches sur une superficie totale (c.à.d. forêt et non-forêt) de 32 850 415 ha.
Analyse des principales	L'incertitude est principalement engendrée par les erreurs commises

incertitudes :	dans la classification des images Landsat.
Estimation de l'exactitude, de la précision et/ou du degré de confiance:	Voir section 7

Description du paramètre:	**Perte annuelle de forêt épineuse**
Sources ou puits concernés par le paramètre considéré :	Le paramètre concerne l'estimation des GES dus à la déforestation.
Unité de la donnée :	Hectares par an
Valeur du paramètre	24 925
Source de la donnée ou description de la méthode utilisée pour obtenir la donnée:	Images Landsat 5, 7 et 8 pour l'écosystème des forêts épineuses qui ont été superposées pour déterminer le changement d'occupation du sol de forêt a non-forêt (prairie et/ou culture) entre 2005 et 2010 puis entre 2010 et 2013. La méthodologie pour le calcul de la valeur est présentée plus haut (chapitre 4).
Echelle spatiale	Le paramètre est applicable à l'écorégion des forêts épineuses sur une superficie totale (c.à.d. forêt et non-forêt) de 5 479 843 ha.
Analyse des principales incertitudes :	L'incertitude est principalement engendrée par les erreurs commises dans la classification des images Landsat.
Estimation de l'exactitude, de la précision et/ou du degré de confiance,	Voir section 7

Description du paramètre:	**Perte annuelle de mangroves**
Sources ou puits concernés par le paramètre considéré :	Le paramètre concerne l'estimation des GES dus à la déforestation.
Unité de la donnée :	Hectares par an
Valeur du paramètre	433
Source de la donnée ou description de la méthode utilisée pour obtenir la donnée:	Images Landsat 5, 7 et 8 pour l'écosystème des mangroves qui ont été superposées pour déterminer le changement d'occupation du sol de forêt a non-forêt (prairie et/ou culture) entre 2005 et 2010 puis entre 2010 et 2013. La méthodologie pour le calcul de la valeur est présentée plus haut (chapitre 4).
Echelle spatiale	Le paramètre est applicable à l'écorégion des mangroves sur une superficie totale (c.à.d. forêt et non-forêt) de 293 315 ha.
Analyse des principales incertitudes :	L'incertitude est principalement engendrée par les erreurs commises dans la classification des images Landsat.
Estimation de l'exactitude, de la précision et/ou du degré de confiance:	Voir section 7

5 STOCKS DE CARBONE ET FACTEURS D'EMISSION

L'estimation de la biomasse forestière par écorégion a été développée à partir des sources suivantes :

1. Ecorégion des forêts denses humides : analyse des 567 placettes d'inventaire issues du projet PERR-FH ;
2. Ecorégion des forêts sèches : analyse de 187 grappes de placettes (3 placettes par grappes) issues de l'inventaire forestier national de 1996 ;
3. Ecorégion des forêts épineuses : analyse de 106 grappes de placettes (3 placettes par grappes) issues de l'inventaire forestier national de 1996 ;
4. Ecorégion des mangroves : estimation basée sur la publication de Jones et al. (2014).

La biomasse de la strate non-forêt a été estimée à partir de la publication de Andriamananjara et al. (2016).

La biomasse souterraine a ensuite été calculée à partir des rapports des systèmes racinaires/foliacés (*root-shoot ratios*, RSR) publiés dans l'article de Mokany et al. (2006).

Finalement, les facteurs d'émissions ont été calculés en soustrayant, par écorégion, la biomasse de la strate non-forêt à celle de la strate forestière (voir Tableau 15) puis en convertissant cette perte de biomasse en émissions de CO_2.

Tableau 15 : Calcul des facteurs d'émission

Occupation du sol initiale	Occupation du sol après déforestation	Facteur d'emission
Forêt Humide	Non-forêt	Déforestation Foret Humide (D_{FH})
Forêt Séche	Non-forêt	Déforestation Forêt Séche (D_{FS})
Forêt Épineuse	Non-forêt	Déforestation Forêt Épineuse (D_{FE})
Forêt Mangrove	Non-forêt	Déforestation Mangroves (D_M)

5.1 DESCRIPTION DES DONNEES D'INVENTAIRE FORESTIER

5.1.1 L'inventaire forestier de 1996

L'IEFN 1996 constitue jusqu'à l'heure actuelle le premier et seul inventaire écologique et forestier qui couvre l'ensemble des écosystèmes terrestres de Madagascar. L'IEFN 1996 avait pour but de combler les lacunes d'information concernant l'état actuel et l'évolution des ressources forestières de Madagascar, informations jugées indispensables pour une gestion stratégique et durable des ressources forestières au niveau national et régional. Il s'était ainsi fixé comme objectif de connaître la localisation et la distribution dans l'espace des différentes formations forestières.

La méthode utilisée dans le cadre de l'IEFN 1996 comportait deux phases :

- la première phase d'inventaire, dédiée au traitement et à l'interprétation visuelle d'images satellites LANDSAT5 dans le but de réaliser une cartographie numérique des formations forestières,
- la deuxième phase d'inventaire, dédiée à la récolte par échantillonnage terrestre des principaux paramètres dendrologiques, dendrométriques, floristiques et faunistiques des formations forestières importantes et la constitution d'une base de données informatique dans le but d'examiner et d'analyser les données récoltées.

L'inventaire est constitué de 196 « camps », contenant chacun 5 grappes. L'une des cinq grappes est directement localisée au centre du camp, tandis que les autres sont placées à 1 km de la grappe centrale vers le nord, l'est, le sud et l'ouest (voir Figure 10).

Les dispositifs d'échantillonnages en grappes se divisent en deux types d'unités :

- grappe à six placettes, dans les forêts denses humides sempervirentes : échantillons aux sommets et à mi-distance des côtés d'un triangle équilatéral de 80m de côté ;
- grappes à trois placettes, dans les forêts denses sèches décidues et dans les fourrés xérophiles : échantillons aux sommets d'un triangle équilatéral de 40m de côté.

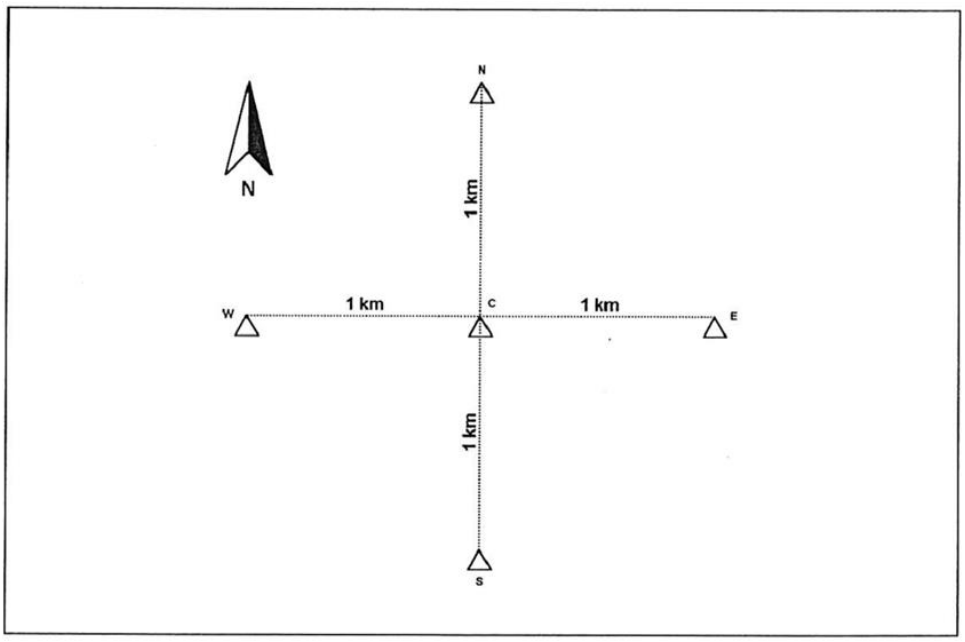


Figure 10 : Disposition des camps d'inventaire de 1996 (Source: IEFN 1996)

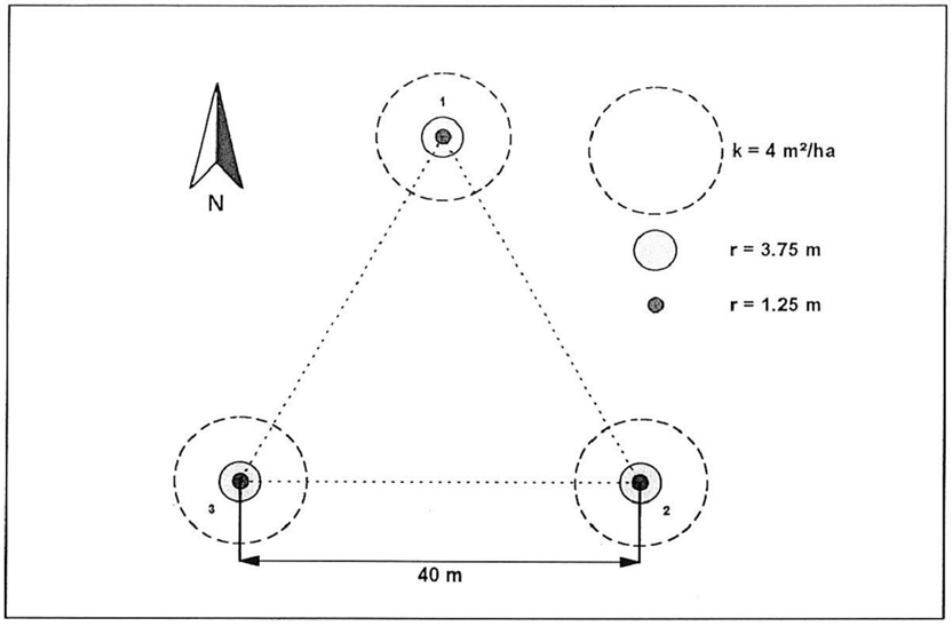


Figure 11 : Disposition des grappes d'inventaire de 1996 pour les forêts sèche et Épineuse (Source: IEFN 1996)

L'IEFN 1996 a relevé des paramètres dendrologiques et dendrométriques sur les individus échantillonnés et a également relevé des paramètres écologiques, floristiques, faunistiques et d'utilisation des ressources.

A l'issue de l'IEFN 1996, il a été recensé 773 échantillons au total, avec 678 espèces appartenant à 378 genres et à 116 familles. Ainsi, une carte de végétation de Madagascar à l'échelle du 1/200 000 a été produite pour l'année 1996 (FTM, ONE, Direction des Eaux et Forêts).

Les domaines phytogéographiques délimités ont été présentés dans la partie 2.

5.1.2 L'inventaire forestier du PERR-FH 2014

L'inventaire forestier PERR-FH a été mené en 2014 et a couvert l'ensemble de l'écorégion des forêts humides de l'Est. L'objectif était de déterminer les facteurs d'émission à utiliser avec les données d'activités de déforestation afin de quantifier le niveau de référence des émissions au sein de cette écorégion. Cet inventaire a permis également de développer la carte éco-régionale des stocks de carbone du sol.

Le cadre méthodologique pour cet inventaire peut se résumer comme suit : (i) utilisation des données existantes, (ii) stratification basée sur celle de l'IEFN 1996, (iii) Méthode d'échantillonnage (avec une précision de 10% à 95% de probabilité), (iv) Réservoirs carbones mesurés, (v) types de données à

collecter (selon le manuel de la DGF), (vi) Echantillons et placettes, (vii) traitement (modèle allométrique, logiciel de traitement d'inventaire).

Concernant la méthode de relevé des données sur le terrain : les réservoirs de carbones mesurés sont la biomasse aérienne vivante et la biomasse morte debout. Le dispositif d'inventaire distingue deux niveaux d'organisation : (i) les grappes d'inventaires à trois échantillons (A, B et C) disposés sous forme de triangle équilatéral de 200m de côté et (ii) les placettes d'inventaires regroupant chacune quatre sous-échantillons (1,2, 3 et 4) circulaires pour le relevé des grands arbres, des arbres moyens, des petits arbres et de la régénération naturelle.

La Figure 12 montre schématiquement une grappe d'inventaire avec les trois placettes qui la composent. Chaque grappe d'inventaire est composée de trois placettes d'inventaire disposées en triangle. Les placettes (ou échantillons) sont définies par les coordonnées géographiques de leur centre. Les centres des placettes sont identifiés à l'aide du GPS et marqués de manière permanente à l'aide de piquets en acier. Chaque placette est photographiée d'un point situé environ 10 m en aval du centre de la placette (Geotagging).

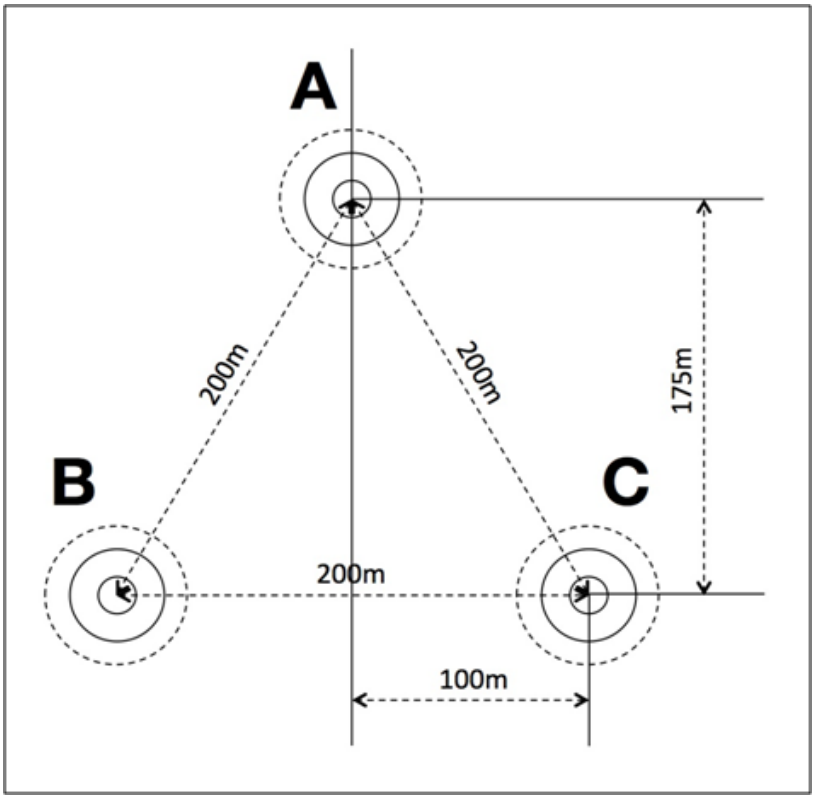


Figure 12: Disposition des grappes d'inventaire PERR-FH

Chaque placette d'inventaire est divisée en quatre sous-placettes ou sous-échantillons (cf. Figure 13) :

1-Grands arbres :

Arbres avec dhp ≥ 30 cm ;Identifiés à partir du centre de la placette à l'aide du Relaskop en utilisant le facteur 2.

2-Arbres moyens :

Arbres avec dhp ≥ 15 cm et dhp < 30 cm ; Relevés dans un cercle avec 10 m de rayon.

3-Petits arbres :

Arbres avec dhp ≥ 5 cm et dhp < 15 cm ; Relevés dans un cercle avec 4 m de rayon.

4-Régénération naturelle :

Arbres avec dhp < 5 cm ; Relevés dans un cercle avec 1 m de rayon, décalé de 15 à 20 m.

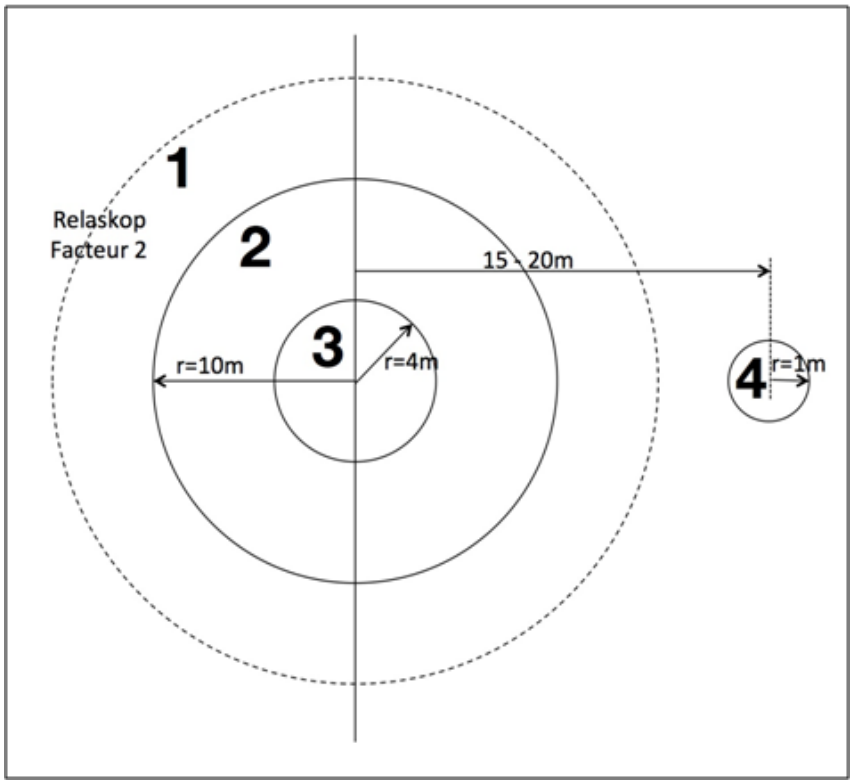


Figure 13 : Disposition des placettes d'inventaire PERR-FH

Les types de données à collecter sont : les renseignements généraux, les paramètres dendrométriques et dendrologiques (DHP, hauteur totale)

Dans le cadre de cet inventaire, 567 placettes ou 189 grappes ont été inventories selon la carte ci-dessous.

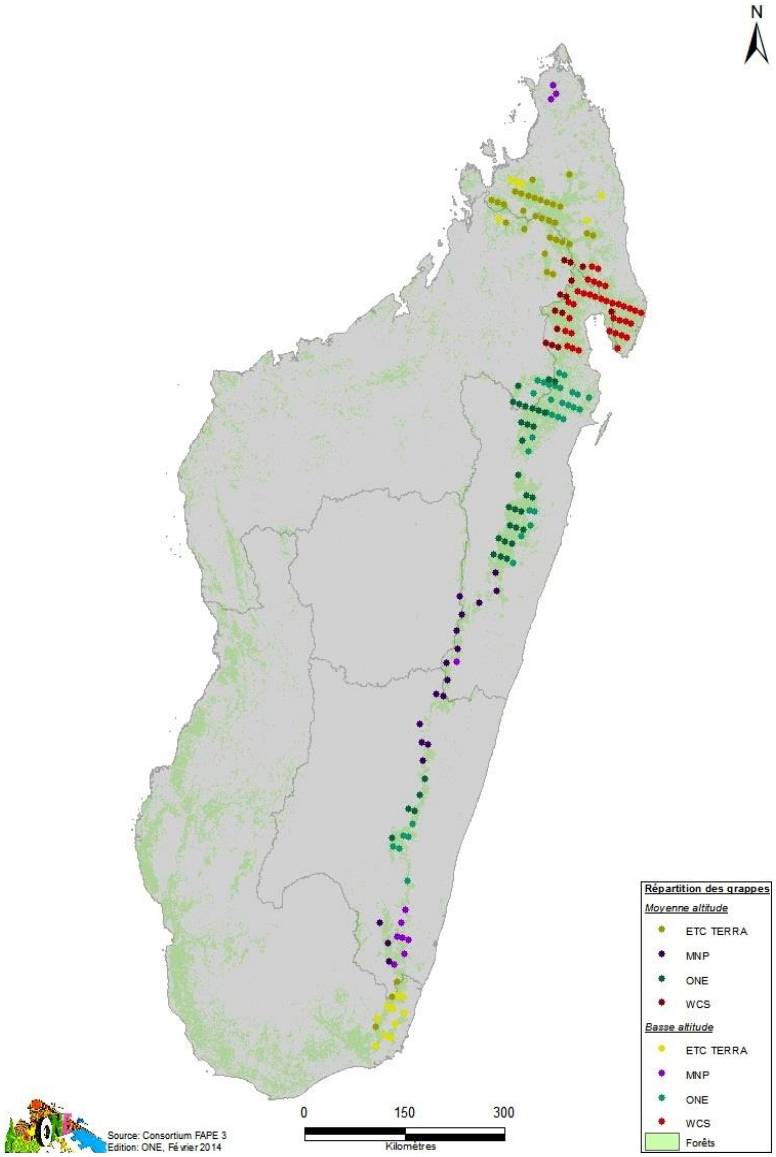


Figure 14 : Carte des grappes d'inventaire du projet PERR-FH (2014)

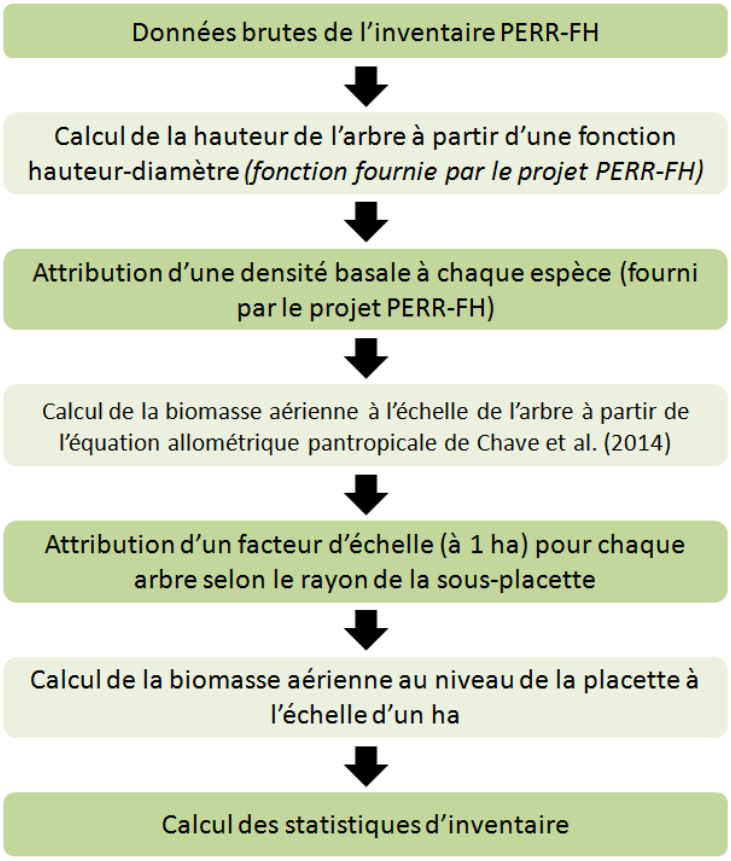
5.2 LA BIOMASSE AERIENNE ET LE BOIS MORT

5.2.1 Forêt humide

Le calcul de la biomasse aérienne dans l'écorégion des forêts humides a été réalisé à partir des 567 placettes d'inventaires réparties en 189 grappes mises en place dans le cadre du projet PERR-FH (*cf.* résumé dans la section 5.1.2 ou le Livrable 2 de l'étude PERR-FH annexé à ce rapport). Nous considérons ici que la grappe est l'unité d'échantillonnage.

Le traitement des données de l'inventaire PERR-FH a été réalisé de la manière suivante (Figure 15) :

Figure 15 : Description du traitement des données de l'inventaire PERR-FH



Le rapport d'inventaire de PERR-FH (livrable 2) est fourni en annexe du présent rapport sous la forme d'un fichier distinct. Ces données ainsi que toutes les étapes de traitement qui ont suivi sont annexées à ce rapport dans un fichier distinct (20170522_PERR_FH_inventory_biomass.*xlsx*).

Les données sur les hauteurs des arbres collectées sur le terrain (2 519 arbres) ont été utilisées pour construire une relation hauteur-diamètre sur base d'une fonction proposée par Chave et al. (2014). Après analyse de ces données, la relation suivante a pu être développée :

$$H_{est} = 1{,}389036*\exp(0{,}980517*\ln(D))*\exp(-\ 0{,}07032031*(\ln(D))^2) \quad (1)$$

L'application de cette relation diamètre-hauteur aux arbres de l'inventaire de 1996 (écorégion des forêts humides) dont la hauteur a réellement été mesurée montre une surestimation de la hauteur d'environ 16%.

Les densités basales spécifiques des arbres inventoriés ont déjà été compilées par le projet PERR-FH. D'après Clovis Grinand (2016, *comm. pers.*), les valeurs de densités proviennent d'une part des Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de GES, et d'autre part de la base de données globale de densités de bois[6]. Lorsque la valeur de densité n'était pas disponible pour une espèce donnée, c'est la valeur moyenne de densité du genre ou de la famille qui était recherchée. Lorsqu'aucune de ces valeurs n'était disponible ou connue, c'est alors la valeur par défaut conservative[7] de 0,5 qui était utilisée.

Ensuite, la biomasse était calculée à partir de l'équation allométrique de Vieilledent et al. (2012) :

$$AGB_{est} = EXP(-1.948+1.969*LN(D)+0.66*LN(H_{est})+0.828*LN(\rho)) \quad (2)$$

Avec :

AGB_{est}	Biomasse aérienne estimée, exprimée en tonnes de matière sèche (tms)
ρ	Densité du bois (t/m³)
D	Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP) (cm)
H_{est}	Hauteur totale de l'arbre estimée (m)

Après le calcul de biomasse au niveau de l'arbre, un facteur d'échelle a été attribué à chaque arbre pour transposer à l'échelle d'un hectare les valeurs calculées. Etant donné que chaque placette est constituée de 4 sous-placettes (voir Figure 13 dans la section 5.1.2), différents facteurs d'échelle ont été attribués selon le diamètre de l'arbre (voir Tableau 16 pour les sous-placettes de dimension fixe).

[6] *Global wood density database* (Chave et al. 2009 ; Zanne et al. 2009) : http://datadryad.org/handle/10255/dryad.235

[7] Les termes conservative or conservateur dans les contexte de ce document veut dire sous-estimation des émissions GES du NERF. Cela est liée à le concept d'approche conservative consacrée dans la Decision 20/CMP.1 du Protocole de Kyoto.

Tableau 16: Facteur d'échelle dans les sous-placettes de dimension fixe – Inventaire forestier PERR-FH de 2014

DHP DE L'ARBRE [CM]	RAYON DE LA SOUS-PLACETTE [M]	DIMENSION DE LA SOUS-PLACETTE [M²]	FACTEUR D'ÉCHELLE DE CONVERSION À 1 HA
≥15<30	10	314,16	31,83
≥5<15	4	50,27	198,94
<5cm	1	3,14	3 183,10

Pour les arbres de diamètre ≥ 30 cm qui ont été sélectionnés au relascope (facteur 2), le facteur d'échelle a été calculé de la manière suivante :

$$SF=RCV * \frac{10,000}{\pi * c^2 * D^2} \quad (4)$$

Avec :

SF facteur d'échelle, sans dimension

RCV valeur comptabilisée au relascope (0 ou 0,5 ou 1)

c c-value pour la surface terrière de facteur 2, sans dimension (ici 35,352)

D Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP), en m

Le facteur d'échelle a ensuite été utilisé pour calculer la biomasse à l'échelle de 1 ha pour chaque arbre. Puis, les biomasses aériennes ont été sommées par grappe pour calculer les statistiques d'inventaire (Tableau 17).

Pour le bois mort en pied, on a suivi le même processus de calcul que celle de la biomasse aérienne vu qu'on n'avait pas des indicateurs de l'état ou le degré de dégradation des arbres mortes.

Tableau 17: Statistiques de l'inventaire PERR-FH pour biomasse aérienne

PARAMÈTRES DE LA BIOMASSE AÉRIENNE	VALEUR
Moyenne [tms/ha]	262,18
Min [tms/ha]	28,82
Max [tms/ha]	520,56
Écart-type [tms/ha]	83,70
N	189,00
Intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	10,01
Intervalle de confiance à 90% [%]	3,82%
Valeur min de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	252,16
Valeur max de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	272,19

Tableau 18: Statistiques de l'inventaire PERR-FH pour bois mort

Paramètres du bois mort (en pied)	Valeur
Moyenne [tms/ha]	13,16
Min [tms/ha]	0,00
Max [tms/ha]	84,41
Écart-type [tms/ha]	13,61
N	189
Intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	1,63
Intervalle de confiance à 90% [%]	12,37%
Valeur min de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	11,53
Valeur max de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	14,79

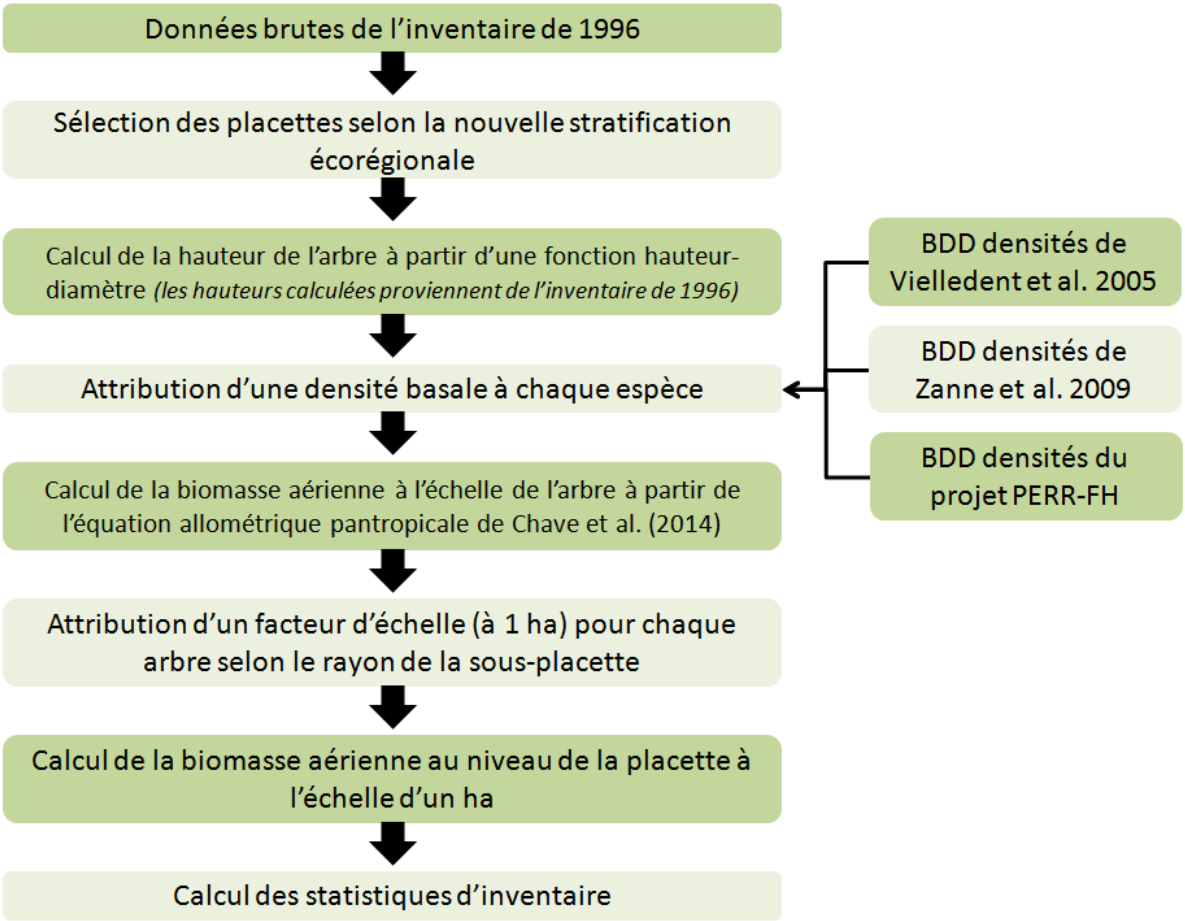
5.2.2 Forêt Sèche et Forêt Épineuse

Le calcul de la biomasse aérienne dans ces deux écorégions a été effectué à partir des 187 (forêt sèche) et 106 (forêt épineuse) grappes d'inventaire (3 placettes par grappe) mises en place par l'inventaire forestier national de 1996 (*cf.* présentation dans la section 5.1.1 et le rapport de l'inventaire forestier national de 1996 annexé au présent rapport).

Etant donné que la distance entre les centres des placettes d'une même grappe est seulement de 40 m (contre 200 dans l'inventaire PERR-FH), les statistiques d'inventaire ont été calculées au niveau de la grappe.

Le processus de traitement des données d'inventaire est décrit dans la Figure 16.

Figure 16 : Description du traitement des données de l'inventaire de 1996



Les données de l'inventaire de 1996 ont été fournies à l'état brut. Le rapport d'inventaire de 1996 est fourni en annexe du présent rapport sous la forme d'un fichier distinct. Ces données ainsi que toutes les étapes de traitement qui ont suivi sont annexées à ce rapport dans un fichier distinct (20170522_1996_inventory_biomass_by_ecoregion (version 2) *.xlsx*).

Etant donné que le plan d'échantillonnage de l'inventaire de 1996 est basé sur une stratification végétale différente (*cf.* section 2.2), la première étape a consisté à sélectionner uniquement les placettes localisées dans les limites des écorégions des forêts sèches et des forêts épineuses. Etant donné que les coordonnées géographiques n'étaient disponibles qu'au niveau du « camp » (c'est-à-dire le centroïde de 5 grappes, chaque grappe étant distante de 1 km du centroïde du camp), la sélection a été réalisée à partir de la localisation des camps (même si 1 ou 2 grappes pourraient être situées dans une autre écorégion). Dans l'écorégion des forêts sèches, 1 camp (c'est-à-dire 5 grappes) a été exclu parce qu'il était initialement attribué à l'écorégion des forêts humides et qu'une méthode d'échantillonnage différente avait donc été utilisée (9 placettes par grappe et facteur du relascope différent).

Pour la majorité des arbres, les données de hauteur étaient disponibles dans les données brutes. Pour la minorité d'arbres dont aucune valeur de hauteur n'était attribuée, celle-ci a été calculée à partir de la relation diamètre-hauteur (fournie dans le rapport d'inventaire forestier de 1996) suivante :

Pour les forêts sèches :

$$H_{est} = e^{2.9920 - \frac{9.0579}{D}} \quad (5)$$

Avec :

H_{est} Hauteur totale estimée de l'arbre, en m

D Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP), en cm

Pour les forêts épineuses :

$$H_{est} = e^{2.4798 - \frac{9.9758}{D}} \quad (6)$$

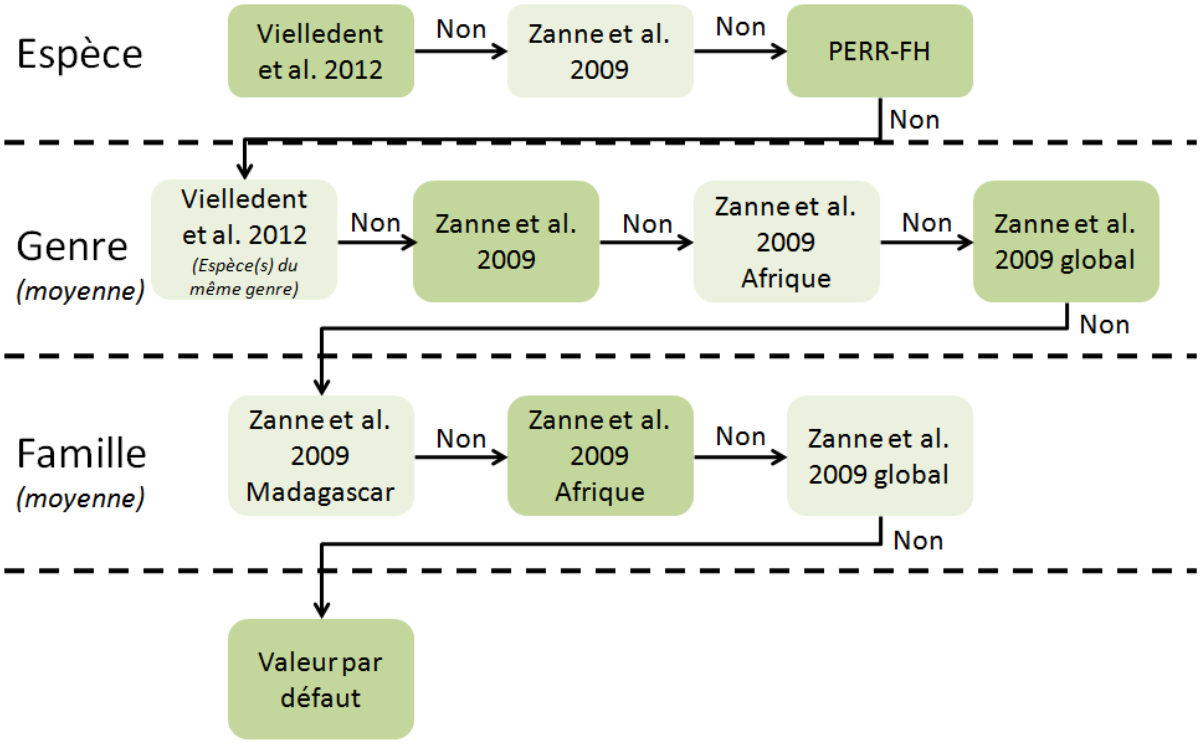
Avec :

H_{est} Hauteur totale estimée de l'arbre, en m

D Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP), en cm

Les valeurs de densité de chaque arbre ont été attribuées selon l'arbre de décision présenté dans la Figure 17.

Figure 17 : Arbre de décision pour attribuer les densités spécifiques



Les densités de bois proviennent des 3 bases de données suivantes, par ordre de priorité d'utilisation :

1. La base de données de densités de bois réalisée par Vieilledent et al. (2012) dans le cadre de recherches dans le domaine des équations allométriques (cette base de données est en partie basée sur celle de Rakotovao et al, 2011) ;

2. La base de données globale des densités de bois compilées par Zanne et al. (2009) ;

3. La base de données de densités de bois compilées par le projet PERR-FH dans le cadre de l'analyse des données de l'inventaire PERR-FH

Nous avons utilisé en priorité la base de données de Vieilledent et al. (2012) puisqu'elle provient directement de recherches spécifiques à Madagascar.

Dans un premier temps, la valeur de densité au niveau de l'espèce était recherchée. Lorsque l'espèce n'était pas répertoriée, ou sa densité non connue, la valeur de densité était recherchée au niveau du genre, en utilisant les bases de données dans l'ordre suivant :

1. Densité d'une espèce de même genre (la moyenne des densités de plusieurs espèces du même genre n'a été réalisée que lorsque plusieurs espèces d'un même genre étaient disponibles) dans la base de données de Vieilledent et al. (2012)

2. Densité moyenne de toutes les espèces du même genre présentes à Madagascar dans la base de données de Zanne et al. (2009)
3. Densité moyenne de toutes les espèces du même genre présentes en Afrique dans la base de données de Zanne et al. (2009)
4. Densité moyenne de toutes les espèces du même genre présentes dans le monde dans la base de données de Zanne et al. (2009)

Dans les cas où une seule espèce du même genre était indiquée dans la base de données, c'est la densité de cette espèce qui était attribuée.

Si aucune valeur de densité n'était disponible à l'échelle du genre, ou si seule la famille de l'arbre était connue, la valeur de densité utilisée provenait alors des bases de données utilisées de la manière suivante :

1. Densité moyenne de toutes les espèces de la même famille présentes à Madagascar dans la base de données de Zanne et al. (2009)
2. Densité moyenne de toutes les espèces de la même famille présentes en Afrique dans la base de données de Zanne et al. (2009)
3. Densité moyenne de toutes les espèces de la même famille présentes dans le monde dans la base de données de Zanne et al. (2009)

Enfin, si aucune valeur de densité ne pouvait encore être attribuée à ce stade (parce qu'aucune valeur de densité n'était disponible ou parce que l'arbre n'était pas identifié), c'est alors la valeur de densité par défaut de 0,5 qui était attribuée (cette valeur a été choisie puisqu'il s'agit de la valeur par défaut utilisée dans le projet PERR-FH).

Ensuite, la biomasse était calculée à partir de l'équation allométrique de Vieilledent et al. (2012) :

$$AGB_{est} = EXP(-1.103+1.994*LN(D)+ 0.317*LN(H_{est})+ 1.303*LN(\rho)) \quad (2)$$

Avec :

AGB_{est}	Biomasse aérienne estimée, exprimée en tonnes de matière sèche (tms)
ρ	Densité du bois (t/m³)
D	Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP) (cm)
H_{est}	Hauteur totale de l'arbre estimée (m)

Après le calcul au niveau de l'arbre, un facteur d'échelle a été appliqué à chaque arbre afin de mettre à l'échelle de 1 ha les valeurs de biomasse. Etant donné que chaque placette est constituée de 4 sous-placettes (Figure 13 dans la section 5.1.2), différents facteurs d'échelles ont été attribués en fonction du DHP de chaque arbre. Le Tableau 19 ci-dessous indique les facteurs d'échelle pour les sous-placettes de dimension fixe.

Tableau 19: Facteurs d'échelle dans les sous-placettes de dimension fixe

DHP de l'arbre [cm]	Rayon de la sous-placette [m]	Superficie de la sous-placette [m²]	Facteur de mise à l'échelle de 1 ha
15 > DHP ≥ 3	3,75	44,18	226,35
DHP < 3 cm	1.25	3,14	3 183,10

Pour les arbres de DHP ≥ 15 cm qui ont été identifiés au relascope (facteur 4), le facteur d'échelle a été calculé de la manière suivante :

$$SF=RCV * \frac{10,000}{\pi * c^2 * D^2} \quad (8)$$

Avec :

SF facteur d'échelle, sans dimension

RCV valeur comptabilisée au relascope (0 ou 0,5 ou 1)

c c-value pour la surface terrière de facteur 4, sans dimension (ici 24,995)

D Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP), en m

Le facteur d'échelle a ainsi été utilisé pour la calculer la biomasse à l'échelle de 1 ha pour chaque arbre. Les biomasses aériennes ont ensuite été sommées par grappe pour calculer les statistiques d'inventaire (Tableau 20).

Pour le bois mort, le même processus de calcul a été suivi. La raison de ne pas appliquer des facteurs réducteurs de biomasse c'est que les inventaires ne fournissaient pas une indication de l'état de dégradation de l'arbre, mais seulement une indication de si l'arbre était mort ou pas.

Tableau 20 : Statistiques de l'inventaire forestier de 1996

Paramètres de la biomasse aérienne	Valeur Forêt épineuse	Valeur Forêt sèche
Moyenne [tms/ha]	20,21	58,01
Min [tms/ha]	1,07	0,00
Max [tms/ha]	78,44	184,27
Écart-type [tms/ha]	14,50	37,54
N	122	187
Intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	2,16	4,52
Intervalle de confiance à 90% [%]	10,68%	7,78%
Valeur min de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	18,05	53,50

Paramètres de la biomasse aérienne	Valeur Forêt épineuse	Valeur Forêt sèche
Valeur max de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	22,37	62,53

Tableau 21 : Statistiques de l'inventaire forestier de 1996

Paramètres du bois mort en pied	Valeur Forêt épineuse	Valeur Forêt sèche
Moyenne [tms/ha]	0,71	4,09
Écart-type [tms/ha]	2,63	7,11
N	122	187
Intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	0,39	0,85
Intervalle de confiance à 90% [%]	55,30%	20,87%
Valeur min de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	0,32	3,24
Valeur max de l'intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	1,10	4,95

5.2.3 Mangrove

Une estimation de la biomasse des mangroves est indiquée dans cette première version du NERF par souci d'exhaustivité, c'est-à-dire dans le but de fournir un NERF pour l'ensemble des types forestiers prédominants à Madagascar. Les valeurs de biomasse des mangroves proviennent d'un article de Jones et al. (2014). Les estimations de biomasse sont considérées comme fiables, mais il existe plusieurs difficultés majeures qui limitent leurs applicabilités au NERF national :

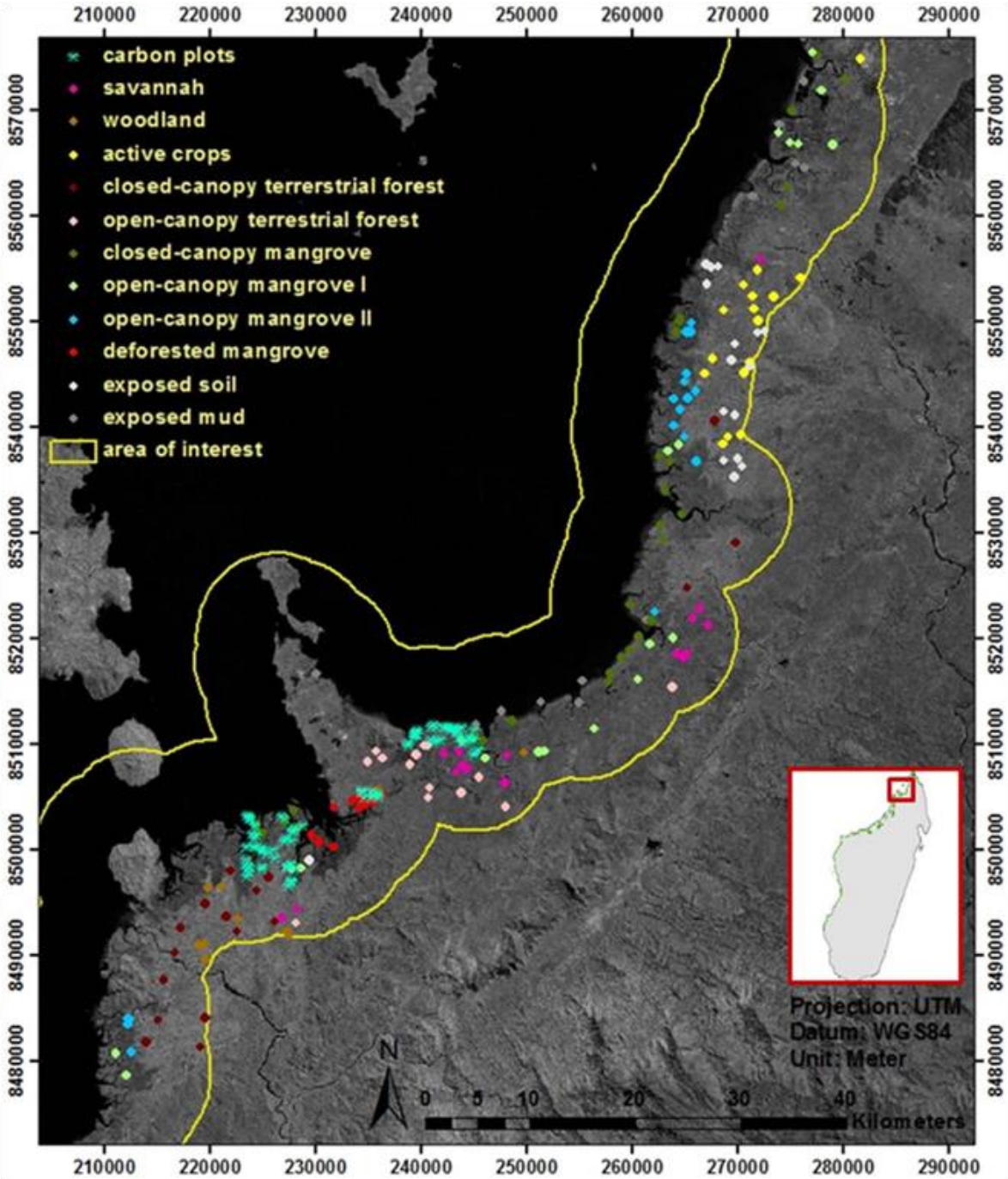
- Les mesures de biomasses ont été réalisées dans une petite zone d'étude au Nord-Ouest de Madagascar, l'échantillon n'est donc pas représentatif de l'ensemble de l'écorégion des mangroves ;
- De même, l'échantillon est de petite taille
- La valeur de biomasse fournie dans cet article inclut le bois mort.
- Bien que Jones et al. (2014) ait cartographié les sites de déforestation au sein des mangroves, aucune estimation de biomasse n'a été réalisée sur ces sites post-déforestation.

Néanmoins, cette étude fournit les meilleures données disponibles actuellement pour estimer les émissions liées à la déforestation des mangroves. Mais afin de prendre en compte les limites citées ci-dessus, le calcul des émissions a été réalisé de manière plutôt conservative.

Ces données ainsi que toutes les étapes de traitement qui ont suivi sont annexées à ce rapport dans un fichier distinct (*20170522_mangrove_biomass.xlsx*).

Les mesures de biomasse ont été réalisées dans 55 placettes de dimension 10 m x 10 m (dans certains cas 20 m x 20 m) localisées dans le Nord-Ouest de Madagascar. La zone d'étude est constituée d'approximativement 26 000 ha de mangroves (Figure 18).

Figure 18 : Mangrove biomass study area (source: Jones et al. 2014)



Avant de procéder à l'échantillonnage de la biomasse, les mangroves (ainsi que les autres écosystèmes forestiers et non forestiers) ont été cartographiés et classifiés. Les mangroves ont été divisées en 4 classes (Tableau 22).

Tableau 22 : Classes de mangroves (source : adapté de Jones et al. 2014)

CLASSE	DESCRIPTION DE LA COMPOSITION CARACTERISTIQUE	AUTRES TYPES DE MANGROVES POTENTIELLEMENT INCLUS
Mangrove à couvert fermé	Peuplement grand et mature. Couvert > 60%	Stade jeune extrêmement dense
Mangrove à couvert ouvert – type 1	Arbres jeunes, de taille petite à moyenne. Couvert compris entre 30 et 60%. Influencé par le contexte pédologique (sol/vase).	Naturellement ouvert ; strate dominante extrêmement dégradée
Mangrove à couvert ouvert – type 2	Arbres petits et rabougris, très clairsemés. Couvert forestier ≥ 10%. Dominé par le contexte pédologique (sol/vase).	
Mangrove déforestée	Mosaïque d'arbres rabougris et dépérissants. Couvert forestier < 30%. Extrêmement influencé par l'érosion du sol et de la vase.	

La biomasse aérienne (incluant le bois mort), la biomasse racinaire et le carbone organique du sol ont été mesurés dans les trois premières classes présentées dans le tableau ci-dessus. La biomasse a été estimée à partir des équations allométriques et des densités de bois présentées dans le Tableau 23 (le DHP et la hauteur ont été systématiquement mesurés sur le terrain). Les équations allométriques proviennent de Clough et al. (1989), Comley et al. (2005) et Kauffman et al. (2010), tandis que les densités de bois proviennent de Dharmawan et al. (2008) : toutes ces références sont citées dans Jones et al. (2014).

Tableau 23 : Equations allométriques et densités de bois utilisées dans l'estimation de la biomasse (source : adapté de Jones et al., 2014)

Espèce	Equation allométrique	Densité du bois
Avicennia marina	$B = 0{,}1848 \times DHP^{2{,}3524}$	0,661
Bruguiera gymnorrhiza (feuilles)	$B = 0{,}0679 \times DHP^{1{,}4914}$	0,741
Bruguiera gymnorrhiza (tige)	$B = 0{,}464 \times (DHP^2 \times H)^{0{,}94275} \times p$	0,741
Ceriops tagal (DHP 2–18 cm)	$B = 10^{-0{,}7247} \times DHP^{2{,}3379}$	0,803
Ceriops tagal (DHP 18–25 cm)	$B = 10^{-0{,}494} \times DHP^{2{,}056}$	0,803
Heritiera littoralis (feuilles)	$B = 0{,}0679 \times DHP^{1{,}4914}$	1,074
Heritiera littoralis (tige)	$B = 0{,}464 \times (DHP^2 \times H)^{0{,}94275} \times p$	1,074
Lumnitzera racemosa	$B = 0{,}0214 \times (DHP^2 \times H)^{1{,}05655} \times p$	0,565
Rhizophora mucronata (feuilles)	$B = 0{,}0139 \times D^{2{,}1072}$	0,867
Rhizophora mucronata (racines)	$B = 0{,}0068 \times DHP^{3{,}1353}$	0,867
Rhizophora mucronata (tige)	$B = 0{,}0311 \times (DHP^2 \times H)^{1{,}00741} \times p$	0,867
Sonneratia alba	$B = 0{,}0825 \times (DHP^2 \times H)^{0{,}89966} \times p$	0,78
Xylocarpus granatum	$B = 0{,}0830 \times (DHP^2 \times H)^{0{,}89806} \times p$	0,7

Note : DHP désigne le diamètre à hauteur de poitrine ; D désigne le diamètre ; H désigne la hauteur ; p désigne la densité.

Les résultats de Jones et al. (2014) pour la biomasse aérienne sont présentés dans le Tableau 24 (les résultats sont indiqués en tC/ha et non en tms/ha comme précédemment parce que la fraction carbone utilisée par Jones et al. 2014 n'a pas pu être déterminée.

Tableau 24 : Estimation des stocks de carbone des mangroves (source : basé sur Jones et al. 2014)

Classe	Moyenne des stocks de carbone contenus dans la biomasse aérienne et racinaire (incluant le bois mort) [tC/ha]	N	Intervalle de confiance à 90% [tC/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Mangrove à couvert fermé	146,8	23	+/- 17,52	+/- 12%
Mangrove à couvert ouvert – type 1	42,9	28	+/- 9,88	+/- 23%
Mangrove à couvert ouvert – type 2	20,8	4	+/- 10,83	+/- 52%

- Étant donné que les données d'activité des mangroves ne sont pas disponibles avec la même stratification que celle des facteurs d'émissions, les hypothèses suivantes ont été établies afin de calculer le NERF :
- 35% de la déforestation des mangroves se produit dans les mangroves à couvert fermé, et 65% dans les mangroves à couvert ouvert de type 1 (en pratique, cela signifie que c'est la moyenne du stock de carbone des deux premières classes qui est utilisée). Ces valeurs correspondent aux superficies de forêt fermée et forêt ouverte présente dans la zone d'étude de la publication. La moyenne a été calculée comme la moyenne ponderée ;

Tableau 25 : Estimation de la biomasse aérienne des mangroves (source : basé sur Jones et al. 2014) *La moyenne est la moyenne pondéré en base aux superficies de chaque strate

	Mangrove à couvert fermé	Mangrove à couvert ouvert – type 1	Moyenne*
Superficie dans la zone de l'étude (ha)	14 015	26 192	
Poids	0,35	0,65	
BA+BS (tms/ha)	312,34	91,28	168,33
SE	10,20	5,80	
n	23,00	28,00	
z value 90% CI	1,72	1,70	

90% IC	17,51	9,88	12,54
Incertitude relative	5,61%	11%	7,45%

- L'estimation de la biomasse dans les mangroves à couvert ouvert de type 2 est utilisée pour estimer le stock de carbone résiduel après déforestation afin d'établir le facteur d'émission.

5.2.4 Non-forêt

Afin d'estimer les émissions dues au changement d'occupation du sol et à la déforestation en particulier, il est nécessaire de tenir compte de la biomasse résiduelle à long-terme dans l'usage/occupation du sol post-déforestation.

Etant donné qu'il n'existe pas de données d'inventaires à grande échelle dans les stades non forestiers, le stock de carbone résiduel post-déforestation a été estimé à partir d'une publication d'Andriamananjara et al. (2016) pour les forêts humides et de Raharimalala et al. (2012) pour les forêts sèches et épineuses.

Ces données ainsi que toutes les étapes de traitement qui ont suivi sont annexées à ce rapport dans un fichier distinct (*20160117_Non-Forest_Biomass.xlsx*).

5.2.4.1 Forêts humides

Dans le cadre de cette étude, la biomasse aérienne et le carbone du sol ont été évalués dans les forêts à couvert fermé, les jachères arborées, les jachères buissonnantes et les terrains dégradés dans le Corridor Ankeniheny-Zahamena situé à l'Est de l'écorégion des forêts humides (Figure 19).

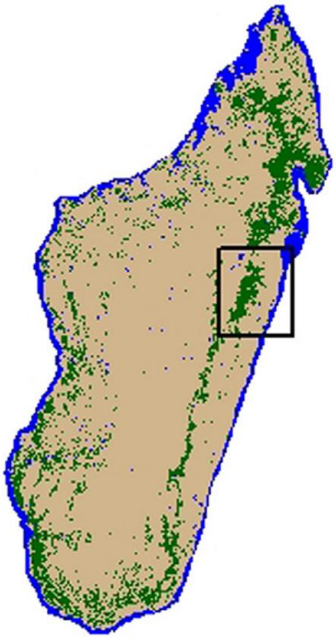


Figure 19 : Zone d'étude (source : Andriamananjara et al. 2016)

Les catégories « jachère arborée », « jachère buissonnante » et « terrain dégradé » sont intéressantes ici puisqu'elles correspondent au stade post-déforestation. D'après Styger et al. (2007 ; 2009), ces classes représentent la succession végétale typique après l'agriculture sur abattis-brûlis, ou « *tavy* » qui est le principal facteur de déforestation dans l'écorégion des forêts humides.

Au total, 91 sites post-déforestation ont été échantillonnés par Andriamananjara et al. (2016) : 32 jachères arborées, 29 jachères buissonnantes et 30 terrains dégradés. Quatre sous-placettes ont été mises en place au sein de chaque placette d'inventaire (Figure 20). Dans chaque sous-placette, toutes les espèces végétales ont été inventoriées individuellement à travers un quadrat de 1 m x 1 m, puis ont été coupées au niveau du sol et pesées afin d'estimer la biomasse aérienne. La biomasse a été obtenue après un séchage en étuve et un pesage des échantillons collectés dans le quadrat de 1 m², puis extrapolée à l'échelle d'1 ha.

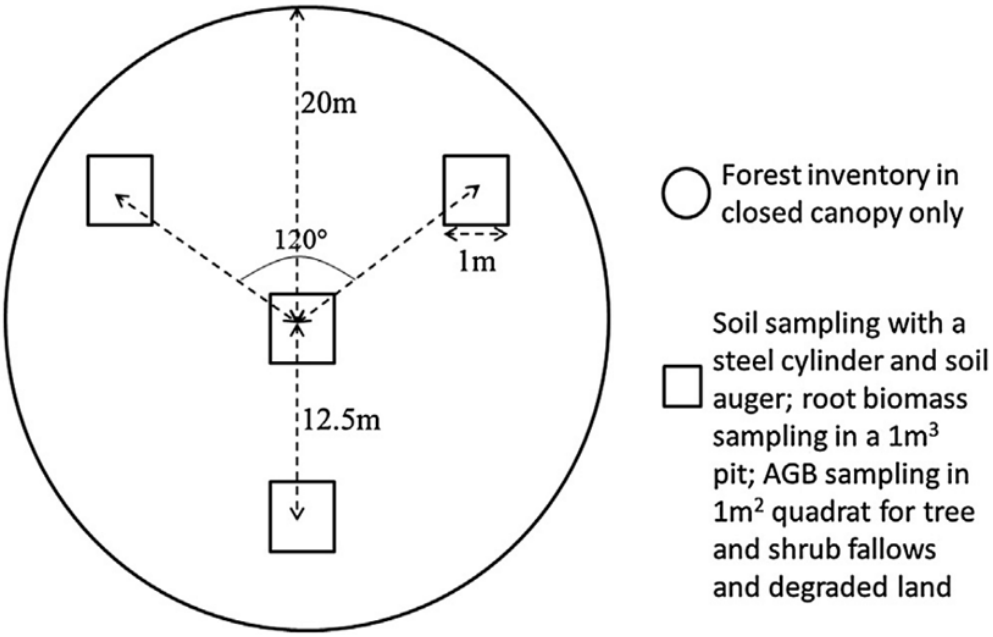


Figure 20 : Plan d'échantillonnage dans les occupations du sol post-déforestation (source : Andriamananjara et al. 2016)

Le Tableau 26 présente l'estimation de la biomasse aérienne dans les trois classes d'occupation du sol post-déforestation[8].

Tableau 26 : Biomasse aérienne dans les classes d'occupation du sol post-déforestation

Classe	Biomasse aérienne (tms/ha]	N	Écart-type	Intervalle de confiance à 90% [tms/ha][9]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Jachère arborée	21,6	32	14,82	+/- 4,31	+/- 19,95%
Jachère buissonnante	21,8	29	14,95	+/- 4,57	+/- 20,95%
Terrain dégradé	16,6	30	11,39	+/- 3,42	+/- 20,60%

Étant donné que les données d'activité de la strate non-forêt ne se conforment pas à la stratification présentée ci-dessus, nous avons utilisé la valeur de la classe « jachère buissonnante » pour estimer la valeur de la biomasse du stade post-déforestation dans l'écorégion des forêts humides, puisque

[8] Les stocks de carbone (tC/ha) ont été convertis en biomasse (tms/ha) à partir de la valeur de fraction carbone indiquée dans Andriamananjara et al. (2016)

[9] Andriamananjara et al. (2016) ont uniquement indiqué l'amplitude du coefficient de variation de la biomasse à travers les quatre classes étudiées, incluant la forêt à couvert fermé. Par principe de conservativité, nous avons utilisé la valeur la plus élevée pour calculer l'écart-type puis l'intervalle de confiance.

cette valeur est la plus élevée des trois et est donc conservative en termes d'estimation des émissions.

5.2.4.2 Forêts Sèches et Forêts Épineuses

Pour l'écorégion des forêts sèches et des forêts épineuses, nous avons utilisé des estimations de la biomasse post-déforestation issues de la publication de Raharimalala et al. (2012). Ce dernier a réalisé des recherches (dans l'écorégion des forêts sèches) dans des sites post-déforestation qui ont été abandonnés puis ont fait l'objet d'une régénération naturelle sur différents laps de temps (de 1 an à plus de 40 ans).

Tableau 27 : Biomasse dans des sites post-déforestation localisés dans l'écorégion des forêts sèches (adapté de Raharimalala et al. (2012)

Durée de l'abandon [années]	Biomasse des arbres + des lianes [tms/ha]	n	Erreur standard
1-5	0,403	5	+/- 0,401
6-10	1,2	5	+/- 0,7
11-20	2,5	5	+/- 0,3
21-30	17,4	5	+/- 4,2
31-40	41,1	5	+/- 8,4
>40	66,9	5	+/- 9,5

Nous avons utilisé la valeur "11-20 ans" puisque c'est celle qui correspond le mieux à la période de transition par défaut d'après les Lignes Directrices du GIEC (2006) pour l'inventaire des gaz à effet de serre[10].

5.2.4.3 Forêts de Mangrove

Conformément à ce qui a été mentionné dans la partie 5.2.3, nous avons utilisé la valeur de biomasse de la classe « Mangrove à couvert ouvert de type 2 » pour estimer la biomasse des sites post-déforestation dans l'écorégion des mangroves.

5.2.4.4 Recapitulatif

Le Tableau 28 ci-dessous récapitule les valeurs de biomasse utilisées pour les sites post-déforestation.

[10] Volume 4, Chapitre 2, section 2.3.1.1: [...] The length of time that land remains in a conversion category after a change in land use is by default 20 years (the time period assumed for carbon stocks to come to equilibrium for the purposes of calculating default coefficients [...]

Tableau 28 : Biomasse aérienne de la classe "non-forêt" par écorégion

Classe non-forêt	Biomasse aérienne (tms/ha)	Intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Non-forêt dans l'écorégion des forêts humides	21,80	+/- 4,57	+/- 20,95%
Non-forêt dans l'écorégion des forêts sèches	2.50	+/- 0,64	+/- 25,58%
Non-forêt dans l'écorégion des forêts épineuses	2.50	+/- 0,64	+/- 25,58%
Non-forêt dans l'écorégion des mangroves	44,26[11]	+/- 10,83	+/- 54,16%

5.3 LA BIOMASSE SOUTERRAINE

La biomasse souterraine a été estimée en utilisant un quotient racinaire/foliacé (*root-shoot ratio*, RSR). Les RSR ont été sélectionnés dans la publication de Mokany et al. (2006) (Tableau 29).

Tableau 29 : Quotients racinaire/foliacé (RSR)

Catégorie de végétation (issu de Mokany et al. 2006)	Correspondance avec les écorégions du NERF	Root-shoot ratio	Intervalle de confiance à 90%	Intervalle de confiance à 90% [%]
Forêt tropicale humide décidue > 125 tms/ha	Forêt humide	0,235	+/- 0,08	+/- 36,05%
Forêt tropicale humide décidue < 125 tms/ha	Forêt Humide Non-Forêt de l'écorégion des forêts humides	0,205	+/- 0,02	+/- 9,84%
Forêt tropicale/subtropicale sèche > 20 tms/ha	Forêt séche Forêt épineuse	0,275	+/- 0,02	+/- 6,89%
Forêt tropicale/subtropicale sèche < 20 tms/ha	Forêt séche Forêt épineuse Non-Forêt des écorégions des forêts sèches et épineuses	0,563	+/- 0,20	+/- 35,95%

[11] La valeur de biomasse en tms/ha est présentée dans ce tableau uniquement à titre indicatif, afin de faciliter la comparaison avec les autres valeurs des classes non-forêt. Etant donné que Jones et al. (2014) n'a pas indiqué la valeur de la fraction carbone utilisée dans sa publication, la biomasse a été calculée ici en divisant le stock de carbone par une fraction carbone de 0,47 (valeur par défaut du GIEC). De plus, cette valeur contient la biomasse souterraine et le bois mort.

Nous avons appliqué le même RSR pour les stades forestiers et non forestiers au sein d'une écorégion : en effet, étant donné que le facteur de déforestation prédominant est dû à l'agriculture de subsistance (et qu'il y a donc une régénération cyclique de la végétation naturelle), il ne serait pas conservatif d'utiliser des RSR différents (puisque le RSR des formations buissonnantes et des pâturages – par exemple – sont beaucoup plus élevés). Quoiqu'il en soit, les mises à feu fréquentes empêchent l'accroissement de la biomasse souterraine ; cette approche peut donc être considérée comme appropriée.

La biomasse souterraine a été calculée en multipliant la biomasse aérienne estimée dans la section 5.2 par les RSR présentés dans le Tableau 29. La biomasse souterraine ainsi obtenue est présentée dans le tableau suivant, par écorégion.

Tableau 30 : Biomasse souterraine par classe d'occupation du sol

Classification NERF de l'occupation du sol	Moyenne de la biomasse souterraine [tms/ha]	Intervalle de confiance à 90% [tms/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Forêt humide	53.75	8.57	15.94%
Forêt sèche	16.52	3.03	18.33%
Forêt épineuse	7.30	1.44	19.79%
Mangrove	Not displayed here because Jones et al. (2014) only provide total biomass values in carbon		
Non-forêt, écorégion des forêts humides	4.47	1.03	23.15%
Non-forêt, écorégion des forêts sèches	1.41	0.62	44.12%
Non-forêt, écorégion des forêts épineuses	1.41	0.62	44.12%
Non-forêt, écorégion des Mangroves	Not displayed here because Jones et al. (2014) only provide total biomass values in carbon		

Pour le calcul de la biomasse souterraine, le RSR a été utilisé pour les écorégions de forêt humide, forêt sèche et forêt épineuse. Les données d'inventaire à notre disposition nous permettent l'application de cette méthodologie. Contrairement à l'écorégion de Mangrove, nous avons utilisé les valeurs de biomasses fournies par l'article de Jones et al (2014) sans données brutes d'inventaire.

5.4 LES FACTEURS D'ÉMISSION

5.4.1 Changements de stocks

Afin de calculer les facteurs d'émissions, nous avons d'abord calculé la biomasse totale (biomasse aérienne + biomasse souterraine) puis converti cette biomasse en stock de carbone et en équivalent CO_2 en utilisant les facteurs de conversion présentés dans le Tableau 33. Nous avons utilisé l'estimation de la fraction carbone la plus conservative, et présumons donc que l'incertitude liée à ce facteur est égale à zéro.

Le Tableau 34 indique le stock total de carbone dans les strates forestières et non forestières par écorégion. Le Tableau 35 synthétise les facteurs d'émissions calculés pour ce NERF. Les Tableau 36 à Tableau 39 présentent le détail de chaque facteur d'émissions (y compris de leurs principales incertitudes).

Ces données ainsi que toutes les étapes de traitement qui ont suivi sont annexées à ce rapport dans un fichier distinct (*20170522_emission_calc.xlsx*).

Tableau 31 : Biomasse par réservoir et totale en classes forestières et non forestières

Classe NERF	tms/ha			
	BA	BS	MOM	Total
Forêts Humide	262,18	53,75	13,16	329,09
Forêt Séche	58,01	16,52	4,09	78,63
Forêt Epineuse	20,21	7,30	0,71	28,22
Forêt Mangrove		-		168,33
Non-forêt Ecoregion Forêt Humide	21,80	4,47	0	26,27
Non-forêt Ecoregion Forêt Séche	2,50	1,41	0	3,91
Non-forêt Ecoregion Forêt Épineuse	2,50	1,41	0	3,91
Non-forêt Ecoregion Mangrove		-		44,26

Tableau 32 : Biomasse totale en classes forestières et non forestières

Classe NERF	Biomasse totale	Intervalle de confiance à 90%	Intervalle de confiance à 90%

	[TDM/HA]	[TDM/HA]	[%]
Forêt humide	329,09	41,51	12,61%
Forêt sèche	78,63	10,30	13,09%
Forêt épineuse	28,22	4,01	14,22%
Mangrove	168,33	36,74	21,82%
Non-forêt, écorégion des forêts humides	26,27	4,68	17,83%
Non-forêt, écorégion des forêts sèches	3,91	0,89	22,81%
Non-forêt, écorégion des forêts épineuses	3,91	0,89	22,81%
Non-forêt, écorégion des Mangroves	44,26	23,97	54,16%

Tableau 33 : Facteurs de conversion Carbone et CO_2

PARAMÈTRE	VALEUR	SOURCE
Fraction carbone de la biomasse [tC/tms]	0,47	Lignes directrices AFOLU du GIEC 2006, tableau 4.3 (McGroddy et al. 2004)
Facteur de conversion du C vers le CO_2 [tCO2/tC]	44/12	Basé sur la masse moléculaire du carbone et de l'oxygène

Tableau 34 : Stocks de carbone forestiers et non forestiers

CLASSIFICATION NERF DE L'OCCUPATION DU SOL	STOCKS DE CARBONE [TCO2/HA]	INTERVALLE DE CONFIANCE À 90% [TCO2/HA]	INTERVALLE DE CONFIANCE À 90% [%]
Forêt humide	567,13	71,53	12,61%
Forêt sèche	135,51	17,74	13,09%
Forêt épineuse	48,63	6,91	14,22%
Mangrove	290,09	63,31	21,82%
Non-forêt, écorégion des forêts humides	45,27	8,07	17,83%
Non-forêt, écorégion des forêts sèches	6,73	1,54	22,81%
Non-forêt, écorégion des forêts épineuses	6,73	1,54	22,81%
Non-forêt, écorégion des Mangroves	76,27	41,31	54,16%

Tableau 35 : Synthèse des facteurs d'émissions

Type de changement d'occupation du sol	Facteur d'émissions [tCO2/ha]	Intervalle de confiance à 90% [tCO2/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Déforestation en Forêt Humide (D_{FH})	521,86	71,99	13,79%
Déforestation en Forêt Sèche (D_{FS})	128,78	17,81	13,83%
Déforestation en Forêt Épineuse (D_{FE})	41,89	7,08	16,90%
Déforestation dans les Mangroves (D_M)	213,83	75,59	35,35%

Tableau 36 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Forêt Humide »

Description du paramètre	Déforestation de la Forêt Humide (D_{FH}): Conversion de la Forêt Humide en non-forêt
Unité de la donnée	tCO2/ha
Valeur du paramètre	521,86
Source de la donnée	**Pour la biomasse aérienne forestière :** • 567 placettes d'inventaire réparties en 189 grappes (mesure des DHP de tous les arbres et des hauteurs sur un échantillonnage d'arbres) • Estimation de la hauteur des arbres à partir d'une relation diamètre-hauteur développée grâce à un jeu de données de hauteurs mesurées sur 2 519 arbres • Densités de bois issues de PERR-FH (2014) • Equation allométrique de Chave et al. (2014) **Pour la biomasse aérienne non forestière :** 29 placettes d'inventaire dans des strates végétales non forestières (Andriamananjara et al. 2016) **Pour la biomasse souterraine et le calcul du stock de carbone :** • RSR issus de Mokany et al. 2006 • Fraction carbone issue des Lignes Directrices AFOLU du GIEC (2006), tableau 4.3 (McGroddy et al. 2004)
Échelle spatiale	Ecorégion / locale
Incertitudes clés de ce paramètre	Erreur d'échantillonnage Erreurs de mesure du DHP et de la hauteur Erreur liée à la fonction diamètre-hauteur Erreur liée à l'équation allométrique Erreur liée au RSR
Estimation de l'incertitude	-

Tableau 37 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Forêt Sèche »

Description du paramètre	Déforestation de la Forêt Sèche (D_{FS}): Conversion de la Forêt Sèche en non-forêt
Unité de la donnée	tCO2/ha
Valeur du paramètre	128,78
Source de la donnée	**Pour la biomasse aérienne forestière :** • 187 grappes de placettes d'inventaire (inventaire forestier national de 1996) (mesure des DHP de tous les arbres et des hauteurs sur un échantillonnage d'arbres) • Estimation de la hauteur des arbres à partir d'une relation diamètre-hauteur • Densités de bois issues de Zanne et al. (2009), Vieilledent et al. (2012) et PERR-FH (2014) • Equation allométrique de Chave et al. (2014) **Pour la biomasse aérienne non forestière :** 5 placettes d'inventaire dans des strates végétales non forestières (Raharimalala 2012) **Pour la biomasse souterraine et le calcul du stock de carbone :** • RSR issus de Mokany et al. 2006 • Fraction carbone issue des Lignes Directrices AFOLU du GIEC (2006), tableau 4.3 (McGroddy et al. 2004)
Échelle spatiale	Ecorégion / locale
Incertitudes clés de ce paramètre	Erreur d'échantillonnage Erreurs de mesure du DHP et de la hauteur Erreur liée à la fonction diamètre-hauteur Erreur liée à l'équation allométrique Erreur liée au RSR
Estimation de l'incertitude	-

Tableau 38 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Forêt Épineuse »

Description du paramètre	Déforestation de la Forêt Épineuse (D_{FE}): Conversion de la Forêt Épineuse en non-forêt
Unité de la donnée	tCO2/ha
Valeur du paramètre	41,89
Source de la donnée	**Pour la biomasse aérienne forestière :** • 106 grappes de placettes d'inventaire (inventaire forestier national de 1996) (mesure des DHP de tous les arbres et des hauteurs sur un échantillonnage d'arbres) • Estimation de la hauteur des arbres à partir d'une relation diamètre-hauteur • Densités de bois issues de Zanne et al. (2009), Vieilledent et al. (2012) et PERR-FH (2014) • Equation allométrique de Chave et al. (2014) **Pour la biomasse aérienne non forestière :** 5 placettes d'inventaire dans des strates végétales non forestières (Raharimalala 2012) **Pour la biomasse souterraine et le calcul du stock de carbone :** • RSR issus de Mokany et al. 2006 • Fraction carbone issue des Lignes Directrices AFOLU du GIEC (2006), tableau 4.3 (McGroddy et al. 2004)
Échelle spatiale	Ecorégion / locale
Incertitudes clés de ce paramètre	Erreur d'échantillonnage Erreurs de mesure du DHP et de la hauteur Erreur liée à la fonction diamètre-hauteur Erreur liée à l'équation allométrique Erreur liée au RSR
Estimation de l'incertitude	-

Tableau 39 : Facteur d'émissions « Déforestation de la Mangrove »

Description du paramètre	Déforestation de la Mangrove (D_M): Conversion de la Mangrove en non-forêt
Unité de la donnée	tCO2/ha
Valeur du paramètre	213,83
Source de la donnée	• 55 placettes d'inventaire de mangrove (Jones et al. 2014 ; mesures du DHP et de la hauteur) • Densités de bois issues de Dharmawan et al (2008; tel que cité par Jones et al. 2014) • Equations allométriques issues de Clough et al. (1989), Comley et al. (2005) et Kauffman et al. (2010; tels que cités par Jones et al. (2014)
Échelle spatiale	Locale

Incertitudes clés de ce paramètre	Erreur d'échantillonnage Erreurs de mesure du DHP et de la hauteur Erreur liée à l'estimation de la densité du bois Erreur liée à l'équation allométrique
Estimation de l'incertitude	'

5.4.2 Émissions non-CO2

On n'a pris en compte que les émissions non–CO2 liées à la déforestation, en effet, c'est la seule activité qu'on a considérée dans le calcul de NERF. Les émissions non-CO2 en forêt restant forêt, correspond à l'activité dégradation qui n'a pas encore été prise en compte en cette soumission.
Pour le calcul des émissions non-CO2, il a été utilisé les valeurs par défaut du GIEC pour les facteurs d'émission et facteurs de combustion présentées respectivement dans les tableaux 2.5 et 2.6 du Volume 4, Chapitre 2. Afin d'attribuer des valeurs du tableau du GIEC, Il a été considéré que les valeurs de savane et prairie correspondent à la forêt épineuse, tandis que la forêt sèche correspond à une forêt tropicale qui ne peut pas être considéré comme une savane puisque elle est une forêt à canopée fermée.
Afin d'exprimer les valeurs de CH4 et N2O en tCO2 équivalents, on a utilisé les GWP de 25 pour le CH4 et 298 pour le N2O.

Tableau 40 : Facteur d'émissions, g kg-1 de matière sèche brûlée

Type végétation	Facteur d'émission (g/kg)	
	CH4	N20
Savane et prairie (foret épineuse)	2,3	0,21
Forêt tropicale (forêt humide et forêt sèche)	6,8	0,2

Tableau 41 : Facteur d'émissions, g kg-1 de matière sèche brûlée

Type végétation		Facteur combustion
Savanes arborées (feux de mi-saison/fin de saison sèche) *	Savane arborée (**forêt épineuse**)	0,72
Forêt primaire tropicale (rémanents et brûlis)	Forêt primaire tropicale (**forêt sèche**)	0,32
Forêt primaire tropicale (rémanents et brûlis)	Forêt primaire tropicale humide (**forêt humide**)	0,5

Tableau 42 : Global warming potential

Paramètre	Valeur

GWP CH4	25
GWP N2O	298

Tableau 43 : Calcul du facteur d'émission pour les émissions non-CO2

Type végétation	T ms /ha	Erreur à 90%	EF (tCO2/ha)	Erreur à 90%
Forêt Humide	329	13%	37.78	47%
Forêt Séche	79	13%	5.78	77%
Forêt Épineuse	28	14%	2.44	113%
Forêt Mangrove	168	22%	-	-

6 QUANTIFICATION DU FREL

À partir des données d'activités décrites dans le chapitre 4 (Tableau 12) et des facteurs d'émissions présentés dans le chapitre 5 (Tableau 35 pour le changement de stocks et Tableau 43 pour les émissions non-CO2), nous avons calculé les émissions annuelles par strate d'écorégion puis sommé l'ensemble de ces émissions pour calculer les émissions de GES totales annuelles sur la période de référence, ce qui correspond au niveau d'émissions de référence des forêts (Tableau 44).

Tableau 44 : Emissions par écorégion et calcul du NERF

Strate	Changements de stocks de carbone [tCO2/an]	Émissions non-CO2 [tCO2/an]	Emissions [tCO2/an]	Intervalle de confiance à 90% [tCO2/an]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Déforestation en Forêt Humide (D_{FH})	10 914 421	790 137	11 704 558	2 808 358	23,99%
Déforestation en Forêt Sèche (D_{FS})	7 247 128	325 128	7 572 256	1 833 416	24,21%
Déforestation en Forêt Épineuse (D_{FE})	1 044 155	60 805	1 104 960	291 120	26,35%
Déforestation dans les Mangroves (D_M)	92 661	0	92 661	37 637	40,62%
Niveau d'émissions de référence des forêts	**19 298 365**	**1 176 070**	**20 474 434**	**3 366 669**	**16,44%**

7 EVALUATION DE L'INCERTITUDE DU NERF

7.1 IDENTIFICATION ET EVALUATION DES SOURCES D'INCERTITUDE

Ce chapitre présente l'approche utilisée pour identifier, minimiser et quantifier l'incertitude d'après les Lignes Directrices du GIEC (2006) pour l'inventaire national des gaz à effet de serre (chapitre 3).

La méthodologie utilisée pour estimer les émissions moyennes annuelles de GES pendant la période de référence s'appuie sur dispositions des LD du GIEC (2006), et est équivalente à la méthode « Donnée d'activité x Facteur d'émissions » (DA x FE) indiquée dans le chapitre 3.2.3 du GFOI MGD 2[12] ainsi que nous l'avons démontré dans le chapitre 6. Etant donné que la multiplication n'entraîne pas elle-même d'incertitude, les incertitudes peuvent être divisées en 2 groupes : les incertitudes liées aux données d'activité (DA) et les incertitudes liées aux facteurs d'émissions (FE).

7.1.1 Source des incertitudes des données d'activité

Les incertitudes des données d'activité proviennent des incertitudes associées à la classification de l'occupation du sol à chacune des dates étudiées. D'après le *GOFC-GOLD REDD Sourcebook*, les sources d'incertitudes potentielles seraient : la qualité des données satellitaires, l'interopérabilité des différents capteurs, le traitement des images, les standards cartographiques et thématiques (par exemple la définition des catégories des terres et l'unité minimale de cartographie), le géoréférencement (précision géométrique), la procédure d'interprétation et le post-traitement.

7.1.1.1 Qualité des données satellitaires

Les images satellites utilisées sont : Landsat TM, ETM+ et Landsat 8, qui sont appropriées pour l'interprétation des occupations du sol et des changements d'occupation du sol en termes de résolution spatiale, spectrale et temporelle[13]. Il existe toutefois deux sources d'erreurs liées aux données disponibles :

- Landsat 7 ETM+ a perdu son correcteur de ligne de balayage (*Scan Line Corrector*, SLC) en avril 2003, compromettant ainsi la qualité des données à cause des larges bandes sans données en dehors de la zone centrale de l'image.
- L'écorégion des forêts tropicales humides est caractérisée par une couverture nuageuse importante et persistante, si bien que les nuages et leurs ombres compromettent également la qualité et entraînent par endroits une absence de données.

[12] GFOI (in press). Integrating remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative – Version 2. Chapitre 3.2.3

[13] GOFC-GOLD. (2015). REDD Sourcebook. 2.7.3.1.1 Sources of uncertainty.

Étant donné ces deux sources d'incertitude, ainsi que les corrections réalisées pour les forêts humides décrites ci-dessus, les zones sans données couvrent 0,01% de la superficie totale. Les classes d'occupation du sol affectées par les nuages sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Code	Occupation du sol en 2005	Occupation du sol en 2010	Occupation du sol en 2013	Changement d'Occupation du sol	Abréviation	Nb de pixels	Superficie (en ha)
228	Forêt sèche	Forêt sèche	Nuage / ombre	Terres forestières sèches intactes	SSO	73 693	6 632
288	Forêt sèche	Nuage / ombre	Nuage / ombre	Terres forestières sèches intactes	SOO	1 567	141
778	Mangroves	Mangroves	Nuage / ombre	Mangroves inchangées	MMO	6 558	590
778	Mangroves	Mangroves	Nuage / ombre	Mangroves inchangées	MMO	6 558	590
888	Nuage / ombre	Nuage / ombre	Nuage / ombre	Nuage / ombre	OOO	2 024	182
Total						90 400	8 136

7.1.1.2 Interopérabilité des différents capteurs

Bien que trois capteurs différents aient été utilisés (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI), ils ont tous la même résolution spatiale et spectrale. Les principales différences sont la meilleure qualité de Landsat 8 OLI due à son rapport signal/bruit élevé (trois fois plus élevé que Landsat ETM+) et les différences de résolution spectrale (Landsat 8 OLI contient des bandes supplémentaires, et le SWIR et le NIR n'ont pas la même plage spectrale que Landsat 7 ETM+). Cette source d'erreur potentielle doit être atténuée grâce à un pré-traitement et pendant le test pilote de l'algorithme de classification dans le cadre de la procédure d'interprétation. L'erreur est considérée comme négligeable mais toute erreur potentielle provenant de l'utilisation de différents capteurs se reflète également dans l'évaluation de la précision.

7.1.1.3 Géoréférencement

L'imagerie Landsat est géoréférencée avec une précision inférieure à 1 pixel, ce qui est une bonne pratique d'après le *GOFC-GOLD REDD Sourcebook*[14]. Cette source d'incertitude peut donc être considérée comme négligeable.

7.1.1.4 Procédure d'interprétation

La détection des changements a été réalisée à travers une classification semi-automatique / supervisée. Cela peut mener à des erreurs de classification : certains pixels qui en réalité ne

[14] GOFC-GOLD (2015). REDD Sourcebook. Section 2.1.2.2

changeaient pas d'occupation du sol obtiennent une nouvelle occupation du sol erronée, et à l'inverse certains pixels qui auraient dû changer d'occupation du sol sont restés dans la classe initiale. Il s'agit ici très probablement de la source d'erreur la plus significative.

7.1.1.5 Procédure de post-traitement

La procédure de post-classification est constituée des étapes de filtrage (par l'unité minimale de cartographie et par le filtre spécifique à la déforestation de 2 x 2 pixels). Il est présumé que cette procédure n'engendre pas d'incertitude.

7.1.2 Sources d'incertitudes des facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions sont calculés comme étant la différence entre deux estimations de moyennes de biomasse (*cf.* chapitre 0). L'incertitude des facteurs d'émissions est donc directement liée à l'estimation de la moyenne de la biomasse des différentes strates forestières et non forestières considérées.

D'après Cunia (1987), les mesures de biomasse aérienne entraînent trois types de sources d'erreurs : les erreurs de mesure (variables biométriques comme le DHP, la hauteur totale ou la densité basale, par exemple), l'erreur de prédiction du modèle allométrique utilisé (par exemple : incertitude des paramètres du modèle) et l'erreur d'échantillonnage (par exemple : plan d'échantillonnage, hétérogénéité spatiale de la forêt).

Toutefois, des recherches plus récentes comme celles de Picard et al. (2015), de Van Breugel et al. (2011) et de Chave et al. (2004) ajoutent une source d'incertitude supplémentaire qui serait liée à la sélection du modèle allométrique (par exemple lorsque différents modèles prédisent des valeurs différentes).

En outre, une autre erreur liée à l'estimation de la biomasse aérienne spécifique à la présente étude concerne l'erreur de la relation diamètre-hauteur. En effet, étant donné que la hauteur n'a pas été systématiquement mesurée sur l'ensemble des arbres, une fonction diamètre-hauteur a été développée d'une part par l'inventaire forestier national de 1996 et d'autre part par le projet PERR-FH. Cette fonction a été utilisée pour calculer la hauteur des arbres dans le but d'utiliser ce paramètre dans l'équation allométrique permettant d'estimer la biomasse.

Ce NERF inclut également la biomasse souterraine. Celle-ci a été calculée à partir de plusieurs rapports racinaire-foliacé (*root-shoot ratios*, RSR). Par conséquent, l'erreur liée au RSR doit également être considérée dans l'estimation de l'incertitude.

7.1.2.1 Estimation de la biomasse aérienne dans les placettes de terrain

7.1.2.1.1 Erreurs de mesure

Les erreurs de mesure sont les erreurs des paramètres du modèle allométrique. L'erreur de mesure sur le DHP peut être systématique ou aléatoire. La première est considérée comme négligeable étant donné que les mesures ont été effectuées par des opérateurs expérimentés qui ont suivi un protocole précis, tandis que la seconde peut se produire à cause d'erreurs aléatoires et engendrer ainsi par propagation un biais égal à zéro. Picard et al. (2015) présument dans leur analyse des incertitudes des facteurs d'émissions que cette erreur est approximativement égale à 2%.

La hauteur totale de l'arbre est un autre paramètre qui est mesuré et à laquelle peut être associée une erreur aléatoire (en supposant qu'il n'existe pas d'erreur systématique). D'après Chave et al. (2004), qui a mesuré 1 000 arbres, l'erreur de mesure de hauteur est égale à environ 10% de la hauteur réelle.

Enfin, la densité basale spécifique est un autre paramètre fréquemment utilisé dans les modèles allométriques. Etant donné que cette variable ne peut pas être mesurée sur le terrain, les valeurs utilisées proviennent généralement de la littérature et de bases de données mondiales. Chave et al. (2004) supposent que l'erreur liée à ce paramètre est égale à environ 10% de la valeur estimée.

D'après Chave et al. (2004), l'erreur propagée due à ces trois paramètres est égale à 16,5% de la biomasse totale de l'arbre. Toutefois, comme nous l'avons indiqué dans cette étude, les erreurs à l'échelle d'un arbre se compensent et s'annulent à l'échelle d'un peuplement. Mais d'après Picard et al. (2015) qui a uniquement considéré l'erreur de mesure du DHP, cette erreur est négligeable par rapport aux autres sources d'erreur.

7.1.2.1.2 Erreur de la fonction diamètre-hauteur

L'inventaire forestier national de 1996, comme le projet PERR-FH, ont développé une relation diamètre-hauteur pour estimer la hauteur (variable nécessaire dans l'équation allométrique). En appliquant la fonction développée par le projet PERR-FH aux arbres inventoriés lors de l'inventaire forestier national de 1996 (écorégion des forêts humides) pour lesquels la hauteur réellement mesurée était disponible, cette hauteur estimée avait un biais égal à +16%. Toutefois, l'application de l'équation allométrique pantropicale de Chave et al. (2014) ne faisant pas intervenir la hauteur donne une surestimation de la biomasse de 6% sur l'ensemble des placettes. Par conséquent, la relation hauteur-diamètre surestime certes la hauteur, mais le calcul de la biomasse à partir de l'équation allométrique utilisant cette hauteur estimée reste plus faible que la biomasse calculée à partir de l'équation allométrique sans hauteur. Bien que cette erreur ne soit pas quantifiée, elle participe à l'erreur totale dans l'estimation de la biomasse à l'échelle de la placette (section 7.2).

7.1.2.1.3 Erreur du modèle allométrique

L'erreur du modèle allométrique provient des trois sources suivantes :

- L'erreur due à l'incertitude des coefficients du modèle
- L'erreur due à l'erreur résiduelle du modèle
- La sélection du modèle allométrique

D'après Picard et al. (2015), la majeure partie de l'incertitude est liée à la sélection du modèle allométrique : elle peut atteindre 77% de l'estimation moyenne. Van Breugel et al. (2011) estime que l'erreur liée à l'équation allométrique peut varier de 5 à 35% selon le modèle sélectionné.

La première et la deuxième erreur peuvent quant à elles être considérées comme négligeables étant donné que l'incertitude des paramètres et l'erreur résiduelle du modèle de Chave et al. (2014) sont très faibles. Par conséquent, on peut supposer que la majeure source d'erreur ici est liée au choix de l'équation allométrique ; cette erreur est significative.

7.1.2.1.4 Erreur d'échantillonnage

L'erreur d'échantillonnage doit être ajoutée aux erreurs de mesures et de prédiction mentionnées plus haut. Celle-ci est utilisée pour extrapoler la biomasse à l'échelle de la zone d'intérêt. Cette erreur dépend: a) du plan d'échantillonnage ; b) de la taille de l'échantillon ; c) du type d'estimateur utilisé ; d) de la variabilité interne entre les différentes unités d'échantillonnage. L'erreur d'échantillonnage est considérée comme significative.

7.1.2.2 Estimation de la biomasse racinaire

Erreur du quotient racinaire/foliacé

Afin d'estimer la biomasse racinaire, la biomasse aérienne a été multipliée par le quotient racinaire/foliacé (*root-shoot ratio*, RSR). Nous avons utilisé des moyennes de RSR fournis par Mokany et al. (2006), qui a publié des valeurs de RSR selon différents types de végétation. Certaines des erreurs liées à l'estimation de la biomasse aérienne sont également valables ici, comme l'erreur de mesure et d'échantillonnage. Toutefois, la seule erreur disponible dans l'article de Mokany et al. (2006) concerne l'erreur d'échantillonnage au sein des différentes études analysées.

7.1.2.3 Synthèse

Comme cela a été présenté ci-dessus, les principales sources d'incertitude qui sont significatives pour l'estimation des facteurs d'émissions sont les suivantes :

- **Erreur de mesure** : erreurs aléatoires liées à la mesure des paramètres prédicateurs. Ainsi que cela a été décrit ci-dessus, cette erreur peut atteindre 10 à 16,5% du total, mais on peut espérer

que ces erreurs se compensent (au moins en partie) les unes les autres étant donné qu'il s'agit d'erreurs aléatoires.

- **Erreur du modèle allométrique** : la majeure source d'incertitude est la sélection de l'équation allométrique. Le choix d'équation de Vieilledent et al. (2012) va réduire l'incertitude au minimum car celle-ci est une équation locale.
- **Erreur de la relation hauteur-diamètre :** Ainsi que cela a été expliqué ci-dessus, cette erreur est comptabilisée dans l'estimation de l'erreur agrégée pour l'estimation de la biomasse aérienne au niveau de la placette lorsqu'on utilise une équation allométrique (voir plus haut). Afin de comptabiliser ces erreurs, nous avons utilisé une erreur agrégée de 15% qui comptabilise les erreurs de mesure (DHP et hauteur), l'erreur dans l'estimation de la densité basale du bois et l'erreur de la relation hauteur-diamètre. Cette valeur est la valeur maximale d'une estimation réalisée par Chave et al. (2014) qui avait évalué que l'incertitude totale de l'estimation de la biomasse pouvait aller jusqu'à 15% sur des placettes d'inventaire de 0,25 ha.
- **Erreur d'échantillonnage :** l'erreur d'échantillonnage des différents types forestier est présentée dans le Tableau 45.

Tableau 45 : Erreur d'échantillonnage de la biomasse dans différentes strates forestières et non forestières

Type d'occupation du sol	Erreur d'échantillonnage [%] (intervalle de confiance à 90%)
Forêt Humide	12.61%
Forêt Sèche	13.09%
Forêt Épineuse	14.22%
Mangrove	21.82%
Non-forêt, écorégion des Forêts Humides	17.83%
Non-forêt, écorégion des Forêts Sèches	22.81%
Non-forêt, écorégion des Forêts Épineuses	22.81%
Non-forêt, écorégion des Mangroves	54.16%

7.2 QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE

Lorsque l'incertitude n'a pas pu être réduite à zéro ou proche de zéro (en appliquant des valeurs conservatives par exemple), nous avons quantifié l'incertitude de tous les facteurs d'émissions et de

toutes les données d'activité. Nous avons utilisé la méthode de propagation simple des erreurs du GIEC (2006), en calculant l'incertitude de chaque donnée d'activité et de chaque facteur d'émission avant de les agréger pour estimer l'incertitude des émissions moyennes annuelles de GES. D'après le GIEC (2006), l'estimation de la moyenne et de l'écart-type de toutes les variables en entrée – ainsi que les équations qui combinent ces variables en entrée pour obtenir des résultats intermédiaires ou finaux – sont nécessaires pour quantifier l'incertitude selon la méthode de propagation simple des erreurs. L'approche suivante a été appliquée :

- Lorsque la moyenne, l'écart-type et la taille de l'échantillon étaient disponibles, nous avons calculé l'intervalle de confiance à 90%. Lorsque ces données n'étaient pas disponible, nous avons appliqué les préconisations du GIEC (2006) et avons estimé à dire d'expert cet intervalle de confiance (relatif).
- Dans tous les cas, nous avons supposé que cet intervalle de confiance était symétrique.

L'incertitude a ensuite été calculée en utilisant les équations fournies par les Lignes Directrices du GIEC (2006) pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (équations 3.1 et 3.2).

7.2.1 Calcul de l'incertitude des données d'activité

Le projet PERR-FH a réalisé une évaluation de la précision de la détection des changements dans les 4 écorégions.

Une matrice de confusion a été élaborée sur la base de points (10 000 points pour l'écorégion des forêts humides et 3 578 points pour les autres écorégions) photo-interprétés sur les images de validation, indépendante des images utilisées pour la classification et correspondant à peu près aux dates de la deuxième période étudiée (2010-2013). Ces points se répartissent sur des foyers de déforestation (hot spot) et selon un maillage de points allant de 5 à 1 km selon l'intensité de la déforestation.

Cette étape consiste en une confrontation statistique du résultat de la classification précédente (issue des images LANDSAT) avec le résultat de l'observation d'images satellites sur des points d'échantillonnage (approche point sampling) et pour deux dates historiques (2010 et 2013). L'échantillonnage de semis de points a été réalisée sur des images à haute résolution : SPOT 5 à 10 m de résolution et sur des images LANDSAT à 30 m de résolution. Ces dernières ont été utilisées au cas où de telles images SPOT n'étaient pas indisponibles sur les zones étudiées. Les images SPOT ont été collectées via la station de « Surveillance de l'Environnement Assisté par Satellite dans l'Océan Indien » (SEAS-OI) dans la plupart des cas et à partir de la base de données Image du PHCF (via Planet Action) dans d'autres cas. Au final, quatre régions sont couvertes par les images à haute résolution et pour deux dates historiques.

Une carte des taux de déforestation à partir des données du GFC (Global Forest Change, Hansen et al, 2013) sur une grille carrée de 20 x 20 km a été produite. Un échantillonnage régulier sur cette grille

a ensuite été réalisé selon l'importance de déforestation (taux de déforestation). Trois niveaux de classification ont été déterminés dans le but de densifier les observations de validation dans les « hot-spots » ou foyers de déforestation (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 46 : Espacement du semis de points réguliers en fonction de l'intensité de la déforestation

Pression de déforestation par grille de 20 par 20 km (ha/an)	Intensité de la déforestation	Espacement des points [km]
< 20	Faible	5 x 5
20 - 50	Moyenne	1 x 1
> 50	Forte	0,5 x 0,5

Le tableau ci-dessous présente les différentes dates et les références des scènes d'images SPOT 5 utilisées pour la validation externe des résultats.

Tableau 47 : Dates et références des images SPOT 5 utilisées pour la validation externe des forets humides

Zone	Référence de la scène SPOT (K-J)	Sources	
		Archives PHCF	SEAS-OI
		Date - 2010	Date - 2013
COMATSA	169 - 378	15/05/2009	11/09/2013
	169 - 379	24/03/2009	11/09/2013
	170 - 378	05/05/2009	12/08/2013
	170 - 379	05/05/2009	08/12/2013
COFAV-COFAM	170 - 390	24/03/2009	14/10/2013
	170 - 391	24/03/2009	14/10/2013
	170 - 394	29/04/2009	14/10/2013
	170 - 395	29/04/2009	14/10/2013
Fort-Dauphin	170 - 399	29/03/2009	12/05/2013
		22/02/2009	
		18/01/2008	
		14/03/2009	
	170 - 400	18/01/2008	12/05/2013

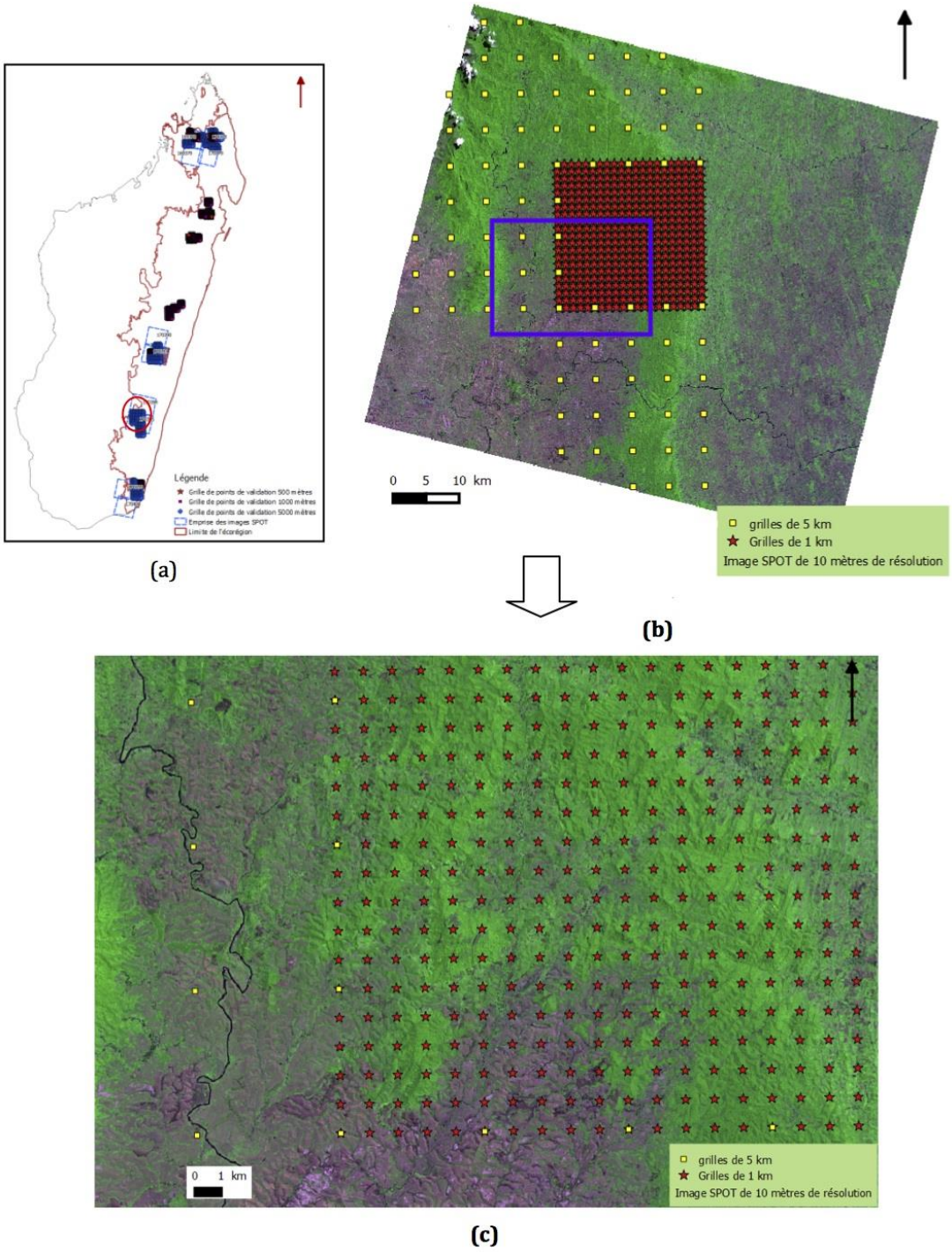


Figure 21 : Cartes des hot-spots de déforestation, zones de validation et d'échantillonnage

a) Carte de localisation des hot-spots de déforestation (b) Zones de validation, (b) Extrait des grilles d'échantillonnage sur des images SPOT 5 au niveau du COFAV (Images distribuées par SEAS-OI © CNES. Distribution Astrium Services / Spot image S.A., France, tous droits réservés)

Tableau 48: Matrice de confusion externe pour la classification des forêts humides

		Référence Classification				Précision producteur	Erreur de commission
		FF	FP	PP			
User Classification	FF	**5 154**	145	4 286 756	5 841	**88,2%**	11,8%
	FP	34	**273**	91 515	365	**74,8%**	25,2%
	PP	372	53	15 790 969	4 648	**90,9%**	9,1%
	Total	5 560	471	20 169 240	10 854		
	Précision l'utilisateur	**92,7%**	**58%**	**88%**			

Tableau 49 : Matrice de confusion externe pour la classification des forêts sèches, épineuses et mangroves

		Référence Classification				Précision producteur	Erreur de commission
		FF	FP	PP	Total		
User Classification	FF	**882**	77	130	1 089	**81,0%**	19,0%
	FP	92	**222**	66	380	**58,4%**	41,6%
	PP	344	162	**1 603**	2 109	**76,0%**	24,0%
	Total	1 318	461	1 799	3 578		
	Précision l'utilisateur	**66,9%**	**48%**	**89%**			

Discussion des résultats

Les matrices de confusion reportent une précision globale de 88,9% pour les classifications dans l'écorégion des forêts humides et de 75,7% dans les autres écorégions. Cette précision concerne la précision de la classification des forêts (restant forêt), changement de forêt en prairie / culture et la classification des prairies / cultures (restant prairies/cultures).

Il est important de noter que pour évaluer l'incertitude du NERF, seule la précision des changements d'occupation de sol de forêt à non-forêt est importante. Pour cette catégorie, la précision est de 74,8% dans l'écorégion des forêts humides et de 58,4% dans les autres écorégions.

D'après Olofsson et al (2014), il est nécessaire de calculer les 'stratified estimators' (calcul des superficies ajustées) : cela permet de déterminer l'intervalle de confiance et l'incertitude (relative).

Lorsque cette approche n'est pas possible en pratique, nous avons réalisé l'analyse de précision dans des zones de hot-spot de déforestation. Cette approche est acceptable étant donné que dans les hot-

spots de déforestation, il est probable d'inclure un nombre important de sites affectés par un changement d'occupation du sol. Mais de cette manière on surestime les superficies ajustées. Les calculs de superficies ajustées (à partir de l'approche 'hot-spot') ont été comparées aux superficies non ajustées (388% pour les forêts humides et 846% pour les autres écorégions). Par conséquent, il ne paraît pas possible de calculer des incertitudes (correctes) à partir des données existantes. Il serait donc nécessaire de refaire la validation et de déterminer les superficies ajustées et leur incertitude.

Etant donné que les estimations issues de la cartographie n'étaient pas accompagnées de leur intervalle de confiance, nous supposons que l'incertitude de ces estimations est d'environ ± 20%.

7.2.2 Calcul de l'incertitude des facteurs d'émissions

Le cadre méthodologique du Fonds Carbone du FCPF n'indique pas clairement quelles erreurs doivent être considérées dans l'évaluation de la précision des facteurs d'émissions. En revanche, les Lignes directrices du GIEC (2006) contiennent une description des bonnes pratiques du calcul et de la considération des incertitudes, mais n'inclut pas non plus de recommandations claires quant aux sources d'incertitudes qui doivent être comptabilisées.

Ainsi que cela a été mentionné ci-dessus, l'agrégation ou la propagation des incertitudes a été réalisée à partir de la méthode 1 des Lignes directrices du GIEC. Dans ce cas, l'estimation des incertitudes a été réalisée à partir des Lignes directrices du GIEC (Chapitre 2, Volume 1 de GIEC 2006). La propagation de l'erreur – à partir des incertitudes décrites dans les différentes publications ou déterminées à partir de différentes sources de données (dans le cas de la combinaison de valeurs) – a été réalisée à partir de la méthode 1 du GIEC (2006). Cela signifie que dans le cas d'une somme de deux paramètres x et y, nous avons considéré que leurs incertitudes σx et σy seraient combinées avec la racine de la somme de leurs carrés :

Incertitude (x+y) = $\sqrt{\sigma_x + \sigma_y}$.

Dans le cas d'une multiplication de deux paramètres x et y, nous avons considéré que les incertitudes σx et σy seraient combinées de la manière suivante :

Incertitude ($x * y$) = $\sqrt{\left[\frac{\partial f}{\partial x}\sigma_x\right] + \left[\frac{\partial f}{\partial y}\sigma_y\right]}$

Ces équations sont équivalentes à celles indiquées dans le Chapitre 2 du Volume 1 des LG du GIEC (2006).

Les cinq tableaux suivants présentent l'incertitude de la biomasse aérienne, de la biomasse racinaire, des stocks de carbone et des facteurs d'émissions.

Tableau 50 : Composition et agrégation de l'incertitude de l'estimation de la biomasse aérienne

Type d'occupation du sol	Moyenne de la biomasse aérienne [tms/ha]	Erreur d'echantillonnage (IC 90%) [tms/ha]	Erreur d'échantillonnage (IC 90%) [%]	Erreur equation Chave (IC 90%) [tms/ha]	Erreur equation Chave (IC 90%) [%]	Erreur totale BA (IC 90%) [tms/ha]	Erreur totale BA (IC 90%) [%]
Forêt humide	262,18	10,01	3,82%	39,33	15%	40,58	15,48%
Forêt sèche	58,01	4,52	7,78%	8,70	15%	9,80	16,90%
Forêt épineuse	20,21	2,16	10,68%	3,03	15%	3,72	18,42%
Mangrove	Jones et al, (2014) ne présente pas que valeurs de carbone total,						
Non-forêt, écorégion des forêts humides	21,80	4,57	20,95%	0,00	0%	4,57	20,95%
Non-forêt, écorégion des forêts sèches	2,50	0,64	25,58%	0,00	0%	0,64	25,58%
Non-forêt, écorégion des forêts épineuses	2,50	0,64	25,58%	0,00	0%	0,64	25,58%
Non-forêt, écorégion des Mangroves	Jones et al. (2014) ne présente pas que valeurs de carbone total.						

Tableau 51: Composition et agrégation de l'incertitude de l'estimation des stocks de carbone en mangrove

Type d'occupation du sol	Moyenne du stock de carbone de la biomasse aérienne + souterraine (dont bois mort) [tC/ha]	Erreur d'echantillonnage (IC 90%) [tC/ha]	Erreur d'échantillonnage (IC 90%) [%]	Erreur allometrique (IC 90%) [tC/ha]	Erreur allométrique (IC 90%) [%]	Erreur totale biomasse (IC 90%) [tC/ha]	Erreur totale biomasse (IC 90%) [%]
Mangrove	79,12	12,54	15,85%	11,87	15%	17,27	21,82%
Non-forêt, écorégion des Mangroves	20,80	10,83	52,05%	3,12	15%	11,27	54,16%

Tableau 52 : Incertitude de l'estimation de la biomasse souterraine

Classification NERF de l'occupation du sol	Moyenne de la biomasse souterraine [tms/ha]	Intervalle de confiance a 90% [tms/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Forêt humide	53,75	8,57	15,94%
Forêt sèche	16,52	3,03	18,33%
Forêt épineuse	7,30	1,44	19,79%
Mangrove	Jones et al, (2014) ne présente pas que valeurs de carbone total,		
Non-forêt, écorégion des forêts humides	4,47	1,03	23,15%
Non-forêt, écorégion des forêts sèches	1,41	0,62	44,12%
Non-forêt, écorégion des forêts épineuses	1,41	0,62	44,12%
Non-forêt, écorégion des Mangroves	Jones et al. (2014) ne présente pas que valeurs de carbone total.		

Tableau 53 : Incertitude de l'estimation du bois mort

	Forêt Humide	Forêt Séche	Forêt Épineuse
Moyenne Bois Mort [tms/ha]	13,16	4,09	0,71
Erreur relatif (+/- 90% CI)	12,37%	20,87%	55,30%
Intervalle confiance (tms/ha)	1,63	0,85	0,39

Tableau 54 : Incertitude de l'estimation des stocks de carbone

Classification NERF de l'occupation du sol	Stocks de carbone [tCO2/ha]	Intervalle de confiance a 90% [tCO2/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Forêts Humide	567,13	71,53	12,61%
Forêt Sèche	135,51	17,74	13,09%
Forêt Epineuse	48,63	6,91	14,22%
Forêt Mangrove	290,09	63,31	21,82%
Non-forêt Ecoregion Forêt Humide	45,27	8,07	17,83%

Non-forêt Ecoregion Forêt Séche	6,73	1,54	22,81%
Non-forêt Ecoregion Forêt Épineuse	6,73	1,54	22,81%
Non-forêt Ecoregion Mangrove	76,27	41,31	54,16%

Tableau 55 : Incertitude des facteurs d'émissions de changements de stocks

Type de changement d'occupation du sol	Facteur d'émissions [tCO2/ha]	Intervalle de confiance à 90% [tCO2/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Déforestation Foret Humide (D_{FH})	521,86	71,99	13,79%
Déforestation Forêt Séche (D_{FS})	128,78	17,81	13,83%
Déforestation Forêt Épineuse (D_{FE})	41,89	7,08	16,90%
Déforestation Mangoves (D_M)	213,83	75,59	35,35%

Tableau 56 : Incertitude des facteurs d'émissions non-co2

Type de changement d'occupation du sol	Facteur d'émissions [tCO2/ha]	Intervalle de confiance à 90% [tCO2/ha]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Déforestation Foret Humide (D_{FH})	23,72	18,31	77,20%
Déforestation Forêt Séche (D_{FS})	5,67	4,38	77,28%
Déforestation Forêt Épineuse (D_{FE})	2,44	2,77	113,47%
Déforestation Mangoves (D_M)	0,00	0,00	0,00%

7.2.3 Calcul de l'incertitude du niveau de référence

À partir de l'incertitude des données d'activité et des facteurs d'émissions, l'incertitude des émissions pendant la période de référence et finalement l'incertitude du NERF a été calculée en utilisant la

propagation de l'erreur (Tableau 57). L'incertitude totale du NERF a été estimée à environ ± 3,4 millions tCO2/an soit approximativement 17%.

Tableau 57 : Incertitude du NERF et des émissions par écorégion

Strate	Emissions [tCO2/an]	Intervalle de confiance à 90% [tCO2/an]	Intervalle de confiance à 90% [%]
Déforestation en Forêt Humide (D_{FH})	11 704 558	2 808 358	23,99%
Déforestation en Forêt Sèche (D_{FS})	7 572 256	1 833 416	24,21%
Déforestation en Forêt Épineuse (D_{FE})	1 104 960	291 120	26,35%
Déforestation dans les Mangroves (D_M)	92 661	37 637	40,62%
Niveau d'émissions de référence des forêts	20 474 434	3 366 669	16,44%

8 DISCUSSION, CONCLUSION ET PLAN D'ACTION POUR L'AMELIORATION DU NERF

Cette section discute brièvement quelques problématiques concernant le NERF, en particulier le manque de données, la validité des hypothèses et des simplifications méthodologiques. De plus, elle fournit des recommandations sur la façon dont ces points seront traités pour la révision du NERF national et du plan d'action pour sa mise en œuvre.

Le Niveau d'Emissions de Référence des Forêts (NERF) présenté ici est basé sur les meilleures données disponibles à ce jour. L'objectif était de présenter un NERF aussi complet que possible en termes de couverture géographique. Ce NERF couvre les quatre écorégions forestières principales du Madagascar. En tant que tel, la priorité a été donnée à l'exhaustivité plutôt qu'à la qualité des données ou à leur disponibilité – ces données ont en partie été complétées par des hypothèses que nous pensons réalistes et conservatrices. Ces hypothèses, ainsi qu'une partie de ces insuffisances techniques, sont discutées plus amplement ci-dessous.

Ce NERF a grandement bénéficié du projet PERR-FH récemment finalisé, qui a fourni toutes les données d'activité ainsi que celles de la biomasse pour l'écorégion forestière humide de l'Est. Il a également bénéficié de l'inventaire forestier national de 1996, ainsi que de la recherche scientifique menée dans les écosystèmes forestiers des mangroves (Jones et al. 2014), et des types d'occupation du sol post-déforestation (Andriamananjara et al. 2016).

Il est également important de mentionner que Madagascar s'est lancé dans deux procédures qui sont particulièrement pertinentes dans le cadre de la soumission de ce NERF.

1. Le premier est un processus national pour l'amélioration des données d'activité et des facteurs d'émissions, et pour la mise en œuvre du système national MRV. Une nouvelle analyse des changements du couvert végétal sera menée de 2005 à 2016 couvrant l'ensemble du territoire national. De plus, des inventaires forestiers supplémentaires seront menés en 2017 et 2018 afin de fournir de meilleures estimations de la biomasse des Forêts Sèches, des Forêts Epineuses, des Mangrove et des sites post-déforestation.
2. Le second est un processus régional couvrant l'ensemble de l'écorégion forestière humide de l'Est. Le BNC-REDD+ a soumis une demande au FCPF afin d'enregistrer cette écorégion au Programme-RE sous financement du Fonds Carbone FCPF. Tel que défini par ce processus, une classification plus détaillée du couvert végétal est en cours d'élaboration, de façon à inclure également la dégradation des forêts et l'augmentation des stocks de carbone forestier dans la comptabilisation des GES. Il est envisagé que cette classification plus détaillée du couvert végétal soit appliquée aux autres écorégions forestières au niveau national. Un inventaire a déjà été mené en 2016 afin d'améliorer l'estimation de la biomasse dans les forêts dégradées de l'écorégion des forêts humides de l'Est, fournissant des estimations de biomasse sur plus de 450 placettes sur 5 strates de dégradation différentes (reste à déterminer si l'on gardera cette stratification dans les études ultérieures).

En prenant compte de tout cela, la plupart de ces données, si ce n'est toutes, et quelques-unes des méthodes de cette première soumission du NERF, seront remplacées ou du moins complétées dans un laps de temps compris entre 1 et 2 années.

Par conséquent, la plupart des problèmes méthodologiques de cette première version du NERF devraient être résolus grâce à ces efforts. Cela est décrit dans la section 8.1 ci-dessous.

8.1 MANQUE DE DONNEES, VALIDITE DES HYPOTHESES ET QUESTIONS METHODOLOGIQUES

Construction du NERF

Ce NERF a été établi en base aux émissions annuelles historiques. Néanmoins, les données collectées montrent la probable existence d'une tendance à la hausse. Le taux de déforestation est passée de 81 000 ha dans la période 2005-2010 jusqu'à 147 000 ha dans la période 2010-2013. Bien que cela pourrait montrer l'existence d'une tendance, il faudrait encore analyser les causes de cette augmentation et collecter plus des évidences pour démontrer l'existence d'une tendance. Madagascar, va collecter des données dans les mois qui viennent pour mieux comprendre cette tendance.

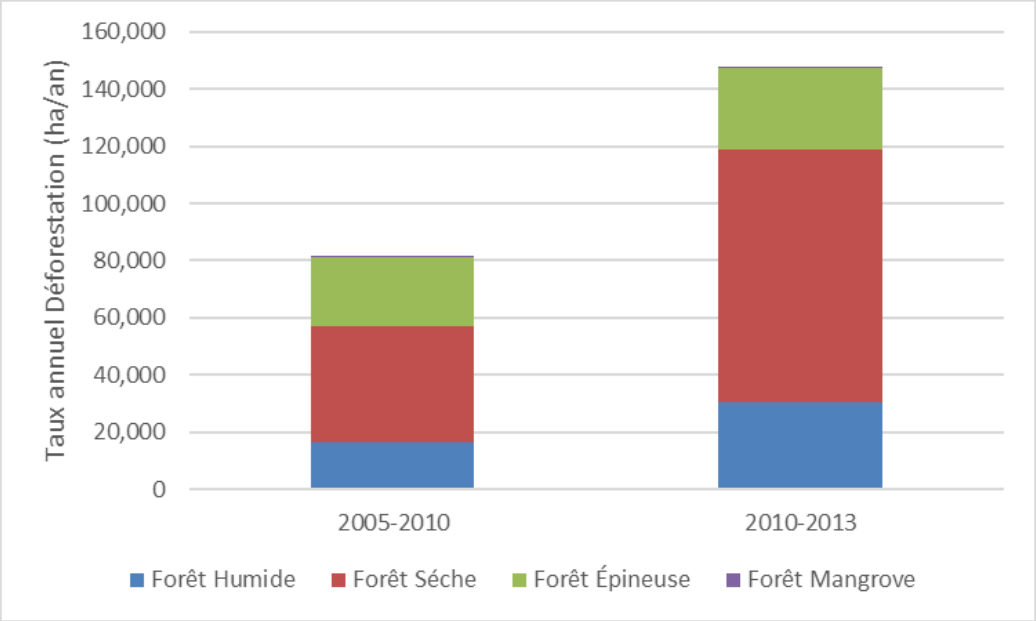


Figure 22. Taux de déforestation 2005-2010 et 2010-2013 et tendance

Activités REDD+

Ce NERF comptabilise uniquement la déforestation brute. Certes, les émissions dues à la dégradation des forêts sont probablement importantes – en particulier dans les écorégions des Forêts Sèches et

des Forêts Epineuses – mais aucune donnée n'est encore disponible à ce jour pour quantifier cette dégradation, dans aucune des écorégions. Néanmoins, et comme mentionné plus haut, un inventaire forestier a été mené en 2016 afin d'estimer la biomasse dans 5 strates différentes de forêt dégradée dans l'écorégion des forêts humides. Aujourd'hui, un travail est en cours afin de développer une nouvelle stratification forestière pour l'écorégion forestière humide qui, combinée à une nouvelle analyse du changement du couvert végétal et de l'inventaire forestier ci-nommé, devrait permettre de quantifier les émissions de la dégradation forestière, au moins pour l'écorégion des forêts humides en 2017. A moyen terme, la dégradation sera également estimée dans les autres écorégions forestières de façon à ce que la dégradation puisse être comptabilisée pour l'ensemble du pays dans une version révisée de ce NERF. De la même manière, la nouvelle analyse du changement du couvert végétal permettra aussi une estimation des améliorations des stocks de carbone du passage à 'terre non forestière' à 'forêt', de façon à ce que l'estimation de la dégradation brute actuelle puisse être remplacée par une estimation nette de la déforestation.

L'évaluation de l'augmentation des stocks de carbone dans les forêts demeurant 'forêts' nécessitera des relevés fréquents dans des placettes permanentes, et ceux-ci ne sont pas encore prévus, bien que la validation et donc la mise en œuvre du Programme-RE sur les Forêts Humides de l'Est permettra d'effectuer ces relevés (notamment dans le cadre de son système MRV), mais uniquement à l'échelle de cette écorégion.

Réservoirs carbone

Ce NERF comptabilise la biomasse aérienne, souterraine et bois mort sur pied. Des données sur le Carbone Organique du Sol (COS) sont disponibles pour l'écorégion forestière humide, ainsi que pour les mangroves (Jones et al. 2014) et pour les sites non forestiers dans l'écorégion des forêts humides (provenant du Projet PERR-FH et Andriamananjara et al. 2016). L'ensemble de ces données montre une quantité significative de carbone emmagasinée dans le sol. Jones et al. (2014), en particulier, ont trouvé que le COS dans les mangroves à couvert fermé et à couvert ouvert de type 1, correspond à 300%-750% du carbone de la biomasse aérienne (profondeur du COS : 150cm) ! Malheureusement, Jones et al. (2014) n'ont pas analysé le COS dans les sites de mangrove déboisés, et la perte de COS ne peut donc pas être estimée. Pour ce qui concerne les forêts denses de l'écorégion des forêts humides, le COS moyen (profondeur 100 cm) a été estimé à 185,39 tC/ha en forêt, et à 180,76 en site non forestier, montrant donc peu de différence. Les estimations du COS (profondeur 100 cm) données par Andriamananjara et al. (2016) sont plus basses et montrent une différence légèrement plus forte entre la forêt et la non-forêt (149,4 tC/ha en forêt contre 129-136,6 tC/ha en non-forêt).

De même, l'analyse menée par le Projet PERR-FH n'a pas pu déterminer de façon concluante comment la perte du COS se produit dans le temps après la déforestation. Les données existantes montrent donc leurs faiblesses à expliquer la différence entre le COS des placettes forestières et celui des placettes non forestières. Cela peut être lié au fait qu'il y a dans le cycle de tavy des sites qui ont été déforestés, ont été transformés en jachères puis ont progressivement évolué vers la forêt avant d'être à nouveau déforestés.

D'après les instructions du GIEC (2006), il est plus important de connaître la valeur finale d'une transition que de comprendre l'évolution des valeurs pendant la transition elle-même. Dans ce contexte, ces données pourront être étudiées de manière plus approfondie lors du calcul du niveau d'émission de référence du Programme-RE dans l'écorégion des forêts humides ; l'opportunité d'étendre ces données au niveau national sera alors étudiée.

Ce NERF ne comptabilise aucun transfert du réservoir de la biomasse aérienne et souterraine vers le réservoir de la Matière Organique Morte, ce qui peut ne pas être conservateur[15] – du moins pour les émissions de la biomasse souterraine. Il semble probable que la biomasse racinaire, lorsqu'elle n'est pas brûlée, se décompose progressivement après la déforestation : les émissions de carbone s'étendraient donc sur une longue période au lieu d'être immédiatement libérées dans l'atmosphère. Il se peut qu'il en soit de même pour une partie de la biomasse aérienne, lorsque celle-ci n'est pas brûlée en intégralité ni extraite suite à la déforestation. D'un autre côté, si nous considérons que la déforestation est constante pendant la période de référence (ce qui est d'ailleurs insinué avec l'approche actuelle de la 'moyenne historique'), alors le transfert et la libération du carbone des réservoirs de MOM vers l'atmosphère peuvent être considérés comme étant constants et, par conséquent, les émissions ne seraient pas surestimées. Le transfert et la libération du carbone des réservoirs de MOM vers l'atmosphère devraient d'ailleurs faire l'objet de recherches plus approfondies et pourraient ainsi être inclus dans une version ultérieure du NERF.

Définition de la forêt

Il existe un certain nombre de divergences entre la définition de la forêt et son application aux données d'activité. Le couvert forestier a été cartographié à l'échelle du pixel Landsat (approximativement 0,09 ha). Avant tout calcul de déforestation, un 'filtre' de 3x3 pixels Landsat (approx. 0,81 ha) a été appliqué afin d'exclure les zones boisées qui ne répondent pas au critère minimum de la définition de forêt et, par conséquent, qui ne devraient pas compter dans la déforestation. Ce même filtre a été appliqué à la dernière carte du couvert végétal sur la période de référence, de façon à exclure toute zone boisée restant en deça du minima requis par la définition de forêt, afin d'estimer la superficie restante de forêt à la fin de la période de référence.

En plus, il y a évidence que certaines formations de Forêts épineuses et Mangroves n'atteignent pas les 5 mètres en maturité. Donc il est prévu d'analyser en détail cette question ce qui pourrait mener à une nouvelle définition de forêt de Madagascar pour des différentes écorégions.

Par conséquent, les changements de définition de la forêt ou de l'unité minimale de cartographie devront être considérés dans une future version du NERF.

Données d'activité

Comme mentionné plus haut, les données d'activité actuelles pour l'écorégion des forêts humides sont en cours d'amélioration pour inclure davantage de strates forestières. Grâce à l'estimation de la

[15] Le terme conservateur est utilisé

biomasse de ces strates, l'estimation des émissions de la déforestation brute sera améliorée, et les émissions liées à la dégradation forestière et à l'augmentation des stocks de carbone (terre non forestière vers terre forestière) seront ajoutées au NERF de l'écorégion des forêts humides.

Des efforts similaires seront entrepris par le BNC REDD+ pour améliorer les données d'activité dans les autres écorégions.

Estimation de la biomasse et des facteurs d'émissions

Il existe plusieurs problèmes liés au calcul de la biomasse et des facteurs d'émissions.

1. L'inventaire forestier des forêts sèches et des forêts épineuses peut être considéré comme obsolète étant donné qu'il date de près de 20 ans. En supposant que la dégradation joue un rôle majeur dans ces écorégions, il est possible que la biomasse moyenne de ces écorégions soit considérablement plus faible aujourd'hui qu'en 1996.
2. Pour la majorité des arbres de l'inventaire PERR-FH (écorégion des forêts humides), la hauteur a été estimée à partir d'une fonction hauteur-diamètre, qui est elle-même dérivée d'un sous-échantillon de 2 500 arbres dont la hauteur a été mesurée. En appliquant cette fonction aux arbres de l'inventaire de 1996 (écorégion des forêts humides) pour lesquels la hauteur était disponible, la hauteur calculée est surestimée de 16%. Mais, étant donné que l'équation allométrique avec hauteur donne une valeur de biomasse inférieure à celle calculée à partir de l'équation allométrique sans hauteur, on peut finalement considérer que ce problème n'en est pas un. De plus, une surestimation de la hauteur de 16% n'engendrait pas une surestimation de la biomasse avec une même amplitude. Quoiqu'il en soit, une amélioration de la fonction hauteur-diamètre pourrait être réalisée dans une future version du NERF ; ce travail devra inclure l'erreur de prédiction de la fonction.
3. Pour une petite partie des arbres de l'inventaire de 1996 (moins de cent arbres dans les forêts sèches et forêts épineuses), la hauteur a également été calculée à partir de deux fonctions hauteur-diamètre. Ces fonctions ont été fournies par l'inventaire de 1996 mais sans apporter la moindre information sur les sources utilisées. Etant donné qu'elles n'ont été appliquées qu'à un petit nombre d'arbres, on peut considérer que ce problème est négligeable. Quoiqu'il en soit, la source et la validité de ces fonctions devront être identifiées, testées voire révisées dans une future version du NERF.
4. La procédure d'attribution des densités basales spécifiques aux arbres inventoriés n'a pas été exactement la même selon les inventaires traités. Pour le jeu de données issu du projet PERR-FH, la valeur de densité basale spécifique provient directement du projet PERR-FH, bien que la correspondance entre les noms scientifiques et les noms vernaculaires enregistrés pendant l'inventaire n'ait pas pu être finalisée ; cependant, des jeux de données différents (et parfois contradictoires) ont été utilisés. Afin d'améliorer cela dans une version ultérieure du NERF, une base de données dendrologiques nationale devra être réalisée, ce qui permettra d'une part d'établir clairement les correspondances entre les noms scientifiques et les noms vernaculaires, et d'autre part de rassembler les valeurs de densité basale spécifique issues de différentes sources.

5. L'estimation de la biomasse dans les sites post-déforestation est considérée comme appropriée dans l'écorégion des forêts humides. Pour les sites post-déforestation situés en forêt sèche et en forêt épineuse, la taille de l'échantillon est assez faible (n = 5). L'estimation concerne donc les forêts sèches et ne peut pas être applicable aux forêts épineuses. Dans ces deux dernières écorégions, l'approche actuelle peut plutôt être considérée comme une approximation discutable visant à palier le manque de données. L'alternative aurait consisté à notifier la perte brute de biomasse, ce qui aurait conduit à une surestimation des émissions par rapport à l'approche précédente. Quoiqu'il en soit, un nouvel inventaire forestier est prévu dans les écorégions des forêts sèches et des forêts épineuses en 2017, qui inclura des mesures dans des sites post-déforestation. Ces valeurs seront utilisées dans une version ultérieure du NERF afin de produire des estimations fiables de biomasse post-déforestation au sein de ces écorégions.
6. L'estimation de la biomasse des mangroves provient d'une étude locale ; les estimations de biomasse peuvent donc être considérées comme non représentatives de l'écorégion des mangroves. Pour résoudre cette simplification méthodologique, un inventaire des mangroves est prévu pour 2018 : la biomasse sera échantillonnée dans l'intégralité de l'écorégion des mangroves, y compris dans des sites dégradés et déforestés. Cela devrait permettre une estimation de la biomasse et des facteurs d'émissions plus représentative pour une version ultérieure du NERF.

Incertitudes

L'estimation de l'incertitude a été réalisée d'après les lignes directrices du GIEC (2006) pour les inventaires nationaux de GES. Pour le moment, la méthode de propagation de l'erreur a été utilisée pour agréger les incertitudes et produire une valeur d'incertitude totale du NERF dans un intervalle de confiance de 90%. La plupart des problèmes rencontrés pour l'estimation de l'incertitude (en particulier l'incertitude de l'évaluation de la biomasse) ont déjà été discutés dans le chapitre 7. De notre point de vue, le principal problème concernant l'estimation de l'incertitude dans ce NERF concerne l'incertitude liée au choix de l'équation allométrique et celle liée à la détection des changements. Concernant les équations allométriques, nous n'avons pas la possibilité d'estimer l'erreur de prédiction de la biomasse à l'échelle de l'arbre ou de la placette. Concernant la détection des changements, l'évaluation de la précision ne suit pas les recommandations faites par Oloffson et al. (2014), et le calcul des superficies ajustées ainsi que de leur intervalle de confiance n'a donc pas été possible. Ce problème devrait être atténué dans une certaine mesure grâce à la nouvelle analyse des changements d'occupation du sol qui sera réalisée en 2017. De plus, le BNC-REDD+ a réalisé une validation supplémentaire de la détection des changements en utilisant Collect Earth. Cela devrait permettre de suivre les étapes décrites par Oloffson et al. (2014) et de remplacer les estimations cartographiques (données d'activité) par des estimations de superficies ajustées (et de leurs intervalles de confiance), afin d'actualiser l'estimation de l'incertitude du NERF. Enfin, il est envisagé de calculer l'incertitude d'une version ultérieure du NERF selon une simulation Monte Carlo.

Cohérence du NERF avec les inventaires nationaux de GES, la CPDN et le Programme de Réduction des Émissions du Fonds Carbone FCPF

- **NERF et inventaire des GES :** Madagascar n'a pas initié d'inventaire national des GES pour le moment. Les émissions et les absorptions du secteur AFOLU (incluant les forêts) ont été publiées au sein de communications nationales. Les méthodes, les données et la portée de la comptabilisation de ces communications nationales ne sont pas cohérentes avec le présent NERF. Il est prévu que le processus national REDD+ de Madagascar contribue à améliorer les communications nationales à venir. Il faudra ainsi s'assurer d'obtenir une certaine cohérence, et que les inventaires nationaux de GES à venir prendront en compte les données et les méthodes utilisées dans le calcul de ce NERF et ses futures versions.

- **NERF et Contribution Prévue Déterminée au niveau National (CPDN) :** Madagascar a soumis sa CPDN à la CCNUCC ; l'objectif affiché était de réduire les émissions de GES de 30 millions de tCO_2e et d'augmenter ses absorptions de 62 millions de tCO_2e/an d'ici 2030. Cet objectif a été défini à partir d'un modèle « business as usual » qui suppose une tendance linéaire des émissions et des absorptions par rapport à une période historique de référence 2000-2010. Ce modèle considère de plus que le secteur LULUCF est un puits considérable (environ 215,89 millions de tCO2e pour l'année 2020). Le présent NERF indique toutefois que le secteur forestier – qui l'un des sous-secteurs les plus importants du LULUCF – est une source d'émissions.

  Il est important de noter que le présent NERF ne comptabilise pas la régénération ; il ne quantifie pas non plus les émissions dues à la dégradation ou l'augmentation de la biomasse dans les forêts. Or ces puits et ces sources influenceront notablement la compréhension globale de l'ensemble des émissions nettes liées à la déforestation et à la dégradation. Cela devra constituer la base de l'amélioration de la CPDN de Madagascar. Il est toutefois important de noter que le présent NERF ne préjuge pas de la qualité de la CPDN de Madagascar.

- **NERF et Programme-RE :** Le Programme-RE et son niveau d'émissions de référence couvrent une grande partie de l'écorégion des forêts humides : le niveau d'émission de référence sera donc proche de la sous-composante nationale des forêts humides du NERF. Cependant, il est fort probable que les périodes historiques de référence du niveau d'émission de référence du Programme-RE et du NERF ne soient pas les mêmes. De plus, il est possible que le Programme-RE inclut des réservoirs carbone supplémentaires (par exemple le carbone organique du sol) ou des activités REDD+ supplémentaires (comme la dégradation des forêts) et doive donc introduire d'autres méthodologies et d'autres données. De même, on peut s'attendre à des incohérences (au moins au niveau temporel) entre le niveau d'émission de référence du Programme-RE et le NERF. Il est toutefois envisagé d'utiliser le Programme-RE comme un test pilote avant son application à l'échelle nationale – c'est-à-dire que les méthodes éprouvées dans le cadre du Programme-RE pourront être appliquées aux autres écorégions en temps voulu afin d'améliorer le NERF national. En termes de cohérence de

comptabilisation des émissions, la comptabilisation du Programme-RE devra être considérée comme complémentaire et comme plus détaillée que le NERF.

8.2 PLAN D'ACTIONS POUR L'AMELIORATION DU NERF

Le tableau ci-dessous synthétise le plan d'actions visant à résoudre les principaux problèmes décrits dans les sections précédentes.

Tableau 58 : Synthèse du plan d'actions

PROBLEME RENCONTRE	ACTIVITE	PERIODE
Exclusion de la dégradation des forêts et augmentation des stocks de carbone, déforestation brute	Une analyse plus détaillée des changements d'occupation du sol incluant une ou plusieurs strates de forêt dégradée est en cours dans l'écorégion des forêts humides. Cela permettra de quantifier les émissions liées a) à la déforestation nette et b) à la dégradation des forêts.	Deuxième semestre 2017 pour l'écorégion des forêts humides Premier semestre 2018 pour les autres écorégions
Exclusion du carbone organique du sol	Dans la zone du Programme-ER (située dans l'écorégion des forêts humides), la possibilité d'inclure le carbone organique du sol sera considérée. À cette fin, des analyses approfondies seront mises en œuvre.	Premier semestre 2017
Exclusion du CH_4 et du N_2O	Dans la zone de l'ER-Programme (située dans l'écorégion des forêts humides), la possibilité d'inclure le méthane et le protoxyde d'azote sera considérée. À cette fin, des analyses approfondies seront mises en œuvre.	Premier semestre 2018
Incohérence des données d'activité avec la définition de la forêt	Le BNC-REDD+ évaluera la nécessité ou non de revoir la définition de la forêt.	Premier semestre 2018
Estimation de l'incertitude des données d'activité	Les données d'activité pour l'écorégion des forêts humides seront améliorées/remplacées dans le Programme-ER (voir premier point de ce tableau), ce qui permettra d'alimenter l'actualisation du NERF national. Suite au retour d'expérience dans l'écorégion des forêts humides, une nouvelle analyse des changements d'occupation du sol devra être réalisée ultérieurement dans les autres écorégions. Toute nouvelle analyse de changement d'occupation du sol devra être accompagnée d'une évaluation de la précision afin de permettre le calcul de l'incertitude des données d'activité.	Deuxième semestre 2017 pour l'écorégion des forêts humides Deuxième semestre 2018 pour les autres écorégions
Données d'inventaire forestier obsolètes ou non représentatives. Manque de données de biomasse pour la strate non-forêt.	De nouveaux inventaires forestiers sont prévus dans les forêts sèches, les forêts épineuses et les mangroves, incluant des échantillonnages dans les sites post-déforestation.	2017-2018
Attribution de la densité	Une base de données dendrologiques nationale	En continu à partir

PROBLEME RENCONTRE	ACTIVITE	PERIODE
basale spécifique	va être établie ; elle comprendra une attribution (unique, sans ambiguïté) des noms scientifiques aux noms vernaculaires ainsi que la correspondance des densités basales spécifiques issues de différentes sources.	du premier semestre 2017
Fonctions hauteur-diamètre	Les fonctions diamètre-hauteur actuelles dans les différentes écorégions seront analysées en détail et révisées si nécessaire.	2017
Cohérence entre le NERF, l'inventaire national de GES, la CPDN et le niveau d'émissions de référence du Programme-ER	Le BNC-REDD+, en collaboration avec les autres institutions gouvernementales concernées, travailleront à améliorer la cohérence entre le NERF national, les inventaires nationaux de GES (le cas échéant), la CPDN et le Programme-ER. À cette fin, un groupe de travail sera établi et mènera des échanges fréquents avec les différentes parties prenantes afin d'initier – si nécessaire – l'alignement des méthodes et des données liées à la comptabilisation des GES.	Dès 2017

BIBLIOGRAPHIE

Andriamananjara, A.; Hewson, J. Razakamanarivo, H.; Andrisoa, R.H.; Ranaivoson, N.; Ramboatiana, N.; Razafindrakoto, M.; Ramifehiarivo, N.; Razafimanantsoaa, M.P.; Rabeharisoa, L.; Ramananantoandro, T.; Rasolohery, A.; Rabetokotany, N.; Razafimbeloa, T. (2016) Land cover impacts on aboveground and soil carbon stocks in Malagasy rainforest. Agriculture, Ecosystems and Environment 233 (2016) 1–15.

Asner et al (2012) : Human and environmental controls over aboveground carbon storage in Madagascar, Gregory P. Asner, John K. Clark, Joseph Mascaro, Romuald Vaudry, K. Dana Chadwick, Ghislain Vieilledent, Maminiaina Rasamoelina, Aravindh Balaji, Ty Kennedy-Bowdoin, Léna Maatoug, Matthew S. Colgan and David E Knapp. Carbon Balance Management, 2012.

Baccini et al (2012) : Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps, January, 2012. A. Baccini, S. J. Goetz, W. S. Walker, N. T. Laporte, M. Sun, D. Sulla-Menashe, J. Hackler, P. S. A. Beck, R. Dubayah, M. A. Friedl, S. Samanta & R. A. Houghton. Nature Climate Change. Letters. DOI: 10.1038/nclimate1354

Breiman, L, (2001) : Random Forests, Machine Learning 45(1), 5-32, http://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324#page-1

Breiman, L (2002) : "Manual On Setting Up, Using, And Understanding Random Forests V3,1",http://oz,berkeley,edu/users/breiman/Using_random_forests_V3,1,pdf,

Chave J, Condit R, Aguilar S, Hernandez A, Lao S, Perez R (2004) Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. Philos Trans Royal Soc B 359:409–420

Chave et al (2005) : Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia 145:87–99.

Chave J, Coomes DA, Jansen S, Lewis SL, Swenson NG, Zanne AE (2009) Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecology Letters 12(4): 351-366. http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x

Chave et al (2014) : Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees, Jérôme Chave, Maxime Réjou-Méchain, Alberto Burquez, Emmanuel Chidumayo, Matthew S. Colgan, Welington B. B . Delitti, Alvaro Duque, Tron Eid, Philip M. Fearnside, Rosa C. Goodman, Matieu Henry, Angelina Martinez - Yrizar, Wilson A. Mugasha, Helene C. Muller -Landau, Maurizio Mencuccini, Bruce W. Nelson, Alfred Ngomanda, Euler M. Nogueira, Edgar Ortiz-Malavassi, Raphaël Pélissier, Pierre Ploton, Casey M. Ryan, Juan G. Saldarriaga and Ghislain Vieilledent, 2014. Global Change Biology, doi: 10.1111/gcb.12629.

Clough, B.F.; Scott, K. Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. For. Ecol. Manag. **1989**, 27, 117–127.

Comley, B.W.T.; McGuinness, K.A. Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. Aust. J. Bot. **2005**, 53, 431–436.

Cunia, T. 1987. Error of forest inventory estimates: its main components. *In* E.H. Whraton& T. Cunia, eds., *Estimating tree biomass regressions and their error. Proceedings of the workshop on tree biomass regression functions and their contribution to the error offorest inventory estimates, May 26–30, 1986, Syracuse, N.Y. – Part E*. Broomall, PA, USA,USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, General Technical Reportno. NE-117, pp. 1–14. 34, 39, 46, 184

Dharmawan, I.W.S.; Siregar, C.A. Soil carbon and carbon estimation of Avicennia marina (Forsk.). Vierh. Stand at Ciasem, Purwakarta. J. Penelit. Hutan dan Konservasi Alam. **2008**, 5, 317–328

FCPF, 2016, Cadre méthodologique du Fonds de partenariat pour le carbone forestier, Final révisée, 22 juin 2016,

GOFC-GOLD (2010) : A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. Resource Canada, Alberta, Canada. 210p.

Gutman, G., Byrnes, R., Masek, J., Covington, S., Justice, C., Franks, S., and R. Headley (2008) : Towards monitoring land cover and land-use changes at a global scale: The Global Land Survey 2005, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74, 6-10,

GIEC (2006) : Lignes Directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (éds). Publié : IGES, Japon.

GFOI (2013) Integrating remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative: Pub: Group on Earth Observations, Geneva, Switzerland, 2014

Grinand, C., Rakotomalala, F., Gond, V., Vaudry, R., Bernoux, M., Vieilledent, G., (2012) : "Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier".

Grinand (2011) : Développement d'une méthode de spatialisation des stocks de carbone dans le sol à l'échelle régionale, Application à un projet REDD à Madagascar, Mastère SILAT

Gutman, G., Byrnes, R., Masek, J., Covington, S., Justice, C., Franks, S., and R. Headley (2008) Towards monitoring land cover and land-use changes at a global scale: The Global LandSurvey 2005, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74, 6-10

Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. (2013) : "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." Science 342 (15 November): 850–53. Data available on-line from: http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest.

IEFN (1996) Carte des domaines phytogéographiques. Extrait de : Inventaire Ecologique Forestier National, Direction des Eaux et Forêts, DFS Deutsche Forstservice GmbH, Entreprise d'Etudes de Développement Rural « Mamokatra », Foiben-Taosarintanin'I Madagasikara

Heritokilalaina, A. (2010) : Évaluation du stock de Carbone de la biomasse végétale et du sol de la forêt du Nord-Est de Madagascar, suivant le niveau de dégradation cas du corridor forestier de Betaolana, Andapa. ESSA, Département des eaux et forêts, Université d'Antananarivo. Mémoire de fin d'études.

Jones, T.G; Ratsimba, H.R.; Ravaoarinorotsihoarana, L.; Cripps, G.; Bey, A. (2014) Ecological Variability and Carbon Stock Estimates of Mangrove Ecosystems in Northwestern Madagascar. *Forests* **2014**, *5*(1), 177-205; doi:10.3390/f5010177

Kauffman, J.B.; Cole, T.G. Micronesian mangrove forest structure and tree responses to a severe typhoon. Wetlands **2010**, 30, 1077–1084.

Liaw and Wiener (2002) : "Classification and Regression By random Forest » ftp://131.252.97.79/Transfer/Treg/WFRE_Articles/Liaw_02_Classification%20and%20regression%20by%20randomForest.pdf

McGroddy, M.E., Daufresne, T. and Hedin, L.O. (2004). Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial Redfield-type ratios. Ecology 85: 2390-2401.

Mokany, K.; Raison, R.J.; Prokushkin, A.S. (2006) Critical analysis of root :shoot ratios in terrestrial biomes. Global Change Biology (2006) 12, 84–96, d oi: 10.1111/ j.1365-2486.2005.001043.x

Olofsson, P.; Foody, G.M.; Herold, M.; Stehman, S.V.; Woodcock, C.E; Wulder, M.A. (2014) Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sensing of Environment 148 (2014) 42–57

Picard, N.; Henry, M.; Fonton, N.H.; Kondaoule, J.; Fayolle, A.; Birigazzi, L.; Sola, G.; Poultouchidou, A.; Trotta, C.; Maıdou, H. (2015) Error in the estimation of emission factors for forest degradation in central Africa. J For Res DOI 10.1007/s10310-015-0510-5

Puyravaud, J. -P. (2002) : Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. Forest Ecology and Management, 177, 593–596. https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/2160/Puyravaud2.pdf

Raharimalala, O; Buttler, A.; Schlaepfer, R.; Gobat, J.-M.(2012) Quantifying biomass of secondary forest after slash-and-burn cultivation in Central Menabe, Madagascar. Journal of Tropical Forest Science24(4): 474–489.

Rakotovao, G., A. Rabevohitra, J. Gerad, and P. Collas de Chatelperron (2011) Atlas des Bois de Madagascar. Technical report. Cirad and Fofifa, Montpellier, France

Styger, E., Rakotondramasy, H.M., Pfeffer, M.J., Erick, C.M., Fernandes, E.C.M., Bates, D.M., 2007. Influence of slash-and-burn farming practices on fallow succession and land degradation in the rainforest region of Madagascar. Agric. Ecosyst. Environ. 119 (3–4), 257–269.

Styger, E., Fernandes, E.C.M., Rakotondramasy, H.M., Rajaobelinirina, E., 2009.Degrading uplands in the rainforest region of Madagascar: fallow biomass, nutrient stocks, and soil nutrient availability. Agrofor. Syst. 77 (2), 107–122.

van Breugel, M; Ransijn, J.; Craven, D.; Bongers, F.; Hal, J.S. (2011) Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. Forest Ecology and Management

Volume 262, Issue 8, 15 October 2011, Pages 1648–1657

Vieilledent, G., R. Vaudry, S. F. D. Andriamanohisoa, O. S. Rakotonarivo, H. Z. Randrianasolo, H. N. Razafindrabe, C. Bidaud Rakotoarivony, J. Ebeling, and M. Rasamoelina (2012) A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models. *Ecological Applications* 22: 572–583. *Ecological Archives* A022-035

Zanne AE, Lopez-Gonzalez G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis SL, Miller RB, Swenson NG, Wiemann MC, Chave J (2009) Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository. http://dx.doi.org/10.5061/dryad.234