

# Changement de la couverture de forêts naturelles à Madagascar

2005–2010–2013

Année 2015



### **Remerciements**

- Consortium WCS – ONE – MNP – Etc Terra
- USGS Glovis et Earth Explorer pour les images utilisées à partir des serveurs de partage de données.

### **Financements**

- IDA/GEF au Programme Environnemental, phase 3 – Financement additionnel (FA PE3) Crédit IDA 4965 MG
- *Office National pour l'Environnement (ONE)*

### **Traitement des images**

- *Office National pour l'Environnement* : Rakotomanana Hanta, Rahagalala Pierre
- *Direction Générale des Forêts (DGF)* : Randriantsizafy Ignela
- *Madagascar National Parks (MNP)* : Andriarimihajana John, Andriambahiny Jean Eric
- *Wildlife Conservation Society (WCS)* : Rabenandrasana Jean Clarck, Rajaonson Rija
- *Etc Terra* : Rakotomalala Fety Abel, Randrianary Telina Minolalaina

### **Cartographie**

- *Office National pour l'Environnement* : Ranaivosoa Rija

### **Citation :**

ONE, DGF, MNP, WCS & Etc Terra (2015). **Changement de la couverture de forêts naturelles à Madagascar, 2005-2010-2013**. Antananarivo. 21p., 21 pl. A3 & cartographie A0.

# SOMMAIRE

ACRONYMES.....	2
1. Introduction.....	3
2. Méthodologies .....	5
2.1.- Type d'image satellite.....	6
2.2.-Dates et périodes de référence .....	6
2.3.- Prétraitement et traitement des données.....	8
2.4.- Classification. ....	8
2.4.1.-Définition des classes d'occupation du sol.....	8
2.4.2.- Délimitation des parcelles d'entrainement.....	8
2.4.3.- Classification à l'aide de l'algorithme « RandomForest ».....	9
3. Résultats.....	10
3.1 - Résultats au niveau national .....	10
3.2. Résultats cartographiques.....	11
3.2.1 - Résultats pour l'écorégion des forêts humides .....	12
3.2.2.- Résultats pour les écorégions des forêts sèches, épineuses et mangroves .....	12
3.3. Résultats généraux.....	13
3.3.1 Les « hotspots » de la déforestation pour l'écorégion des forêts humides.....	13
3.3.2 Les « <i>hotspots</i> » de la déforestation pour les écorégions des forêts sèches, épineuses et mangroves.....	13
3.3.3 Résultats par catégorie d'altitude.....	13
3.3.4 Validation des résultats de classification.....	13
4 CONCLUSION.....	15
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	16
CARTES PAR REGION .....	18

## ACRONYMES

<b>ENVI</b>	Exelis Visual Information Solutions -
<b>ERDAS imagine</b>	Logiciel d'application de la télédétection, conçu par ERDAS
<b>ETC Terra</b>	Etc Terra
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organisation
<b>FAPE3</b>	Fonds additionnel de la phase 3 du Programme Environnemental
<b>FCPF</b>	Fonds de Partenariat pour le Carbone Forestier
<b>FSEM</b>	Forêt Sèche, Epineuse et Mangrove
<b>GEF</b>	Global Environmental Facility
<b>GIEC</b>	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
<b>GloVis</b>	USGS Global Visualization Viewer
<b>GLS</b>	Global Land Survey
<b>GOFC-GOLD</b>	Global Observation of Forest Cover and Land Dynamics
<b>IDA</b>	International Development Association
<b>IEFN</b>	Inventaire Ecologique et Forestier National
<b>MNP</b>	Madagascar National Parks
<b>MRV</b>	Monitoring Reporting and Verification
<b>NDVI</b>	Normalized Difference Vegetation Index
<b>ONE</b>	Office National pour l'Environnement
<b>OOB</b>	Out-Of-Bag
<b>PERR-FH</b>	Projet Eco-Régional REDD des Forêts Humides
<b>QGIS</b>	Quantum GIS
<b>REDD</b>	Réduction des Emissions issues de la Déforestation et la Dégradation des forêts
<b>SAPM</b>	Système d'Aires Protégées de Madagascar
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>VCS</b>	Verified Carbon Standard
<b>WCS</b>	Wildlife Conservation Society

## 1. Introduction

Le présent rapport restitue une partie des réalisations du Projet Éco-Régional REDD forêts humides (PERR-FH) et son extension sur les forêts sèches, forêts épineuses et les mangroves. Le projet a été conduit dans le cadre du financement d'Appui de l'IDA/GEF au Programme Environnemental, Phase 3 – Financement additionnel, sous la composante 2.4-Analyse historique de la déforestation des écorégions pour trois années de référence suivantes : 2005-2010 et 2013.

La méthodologie adoptée a été la même donc pour les quatre écorégions :

- Ecorégion des forêts humides ;
- Ecorégion des forêts sèches ;
- Ecorégion des forêts épineuses ;
- Ecorégion des Formation naturelle zonale : mangroves.

La grande différence entre ces écorégions réside dans l'aspect spectral des classes Forêts à détecter. En effet, les forêts sèches présentent des réponses spectrales très diverses et sont fortement influencées par la saisonnalité de l'acquisition des images. Ainsi, il est plus difficile de photo-interpréter sur les forêts sèches et épineuses que sur les forêts humides. Sans vérification à plusieurs reprises, divers types de confusion peuvent survenir.

Les données satellitaires utilisées proviennent des satellites LANDSAT5, LANDSAT7 et LANDSAT8 et ce pour les trois (03) années de référence 2005, 2010 et 2013. La méthodologie utilisée se singularise par l'utilisation de l'algorithme Random Forest, codé par Breiman et Cutler (2004) et qui a été importé dans le logiciel libre R développé par Liaw et Wiener (2002).

Les résultats attendus sont :

- Une carte de la déforestation historique de 2005-2010-2013 pour l'ensemble des quatre (4) écorégions : forêts humides, forêts sèches, forêts épineuses et mangroves de Madagascar ;
- Des cartes de la déforestation par région administrative entre 2005-2010 puis entre 2010-2013.

En outre, le présent document décrit le procédé d'acquisition et le choix des images satellitaires, les méthodes de traitement et de classification ainsi que les résultats obtenus. Ces résultats seront ensuite catégorisés selon l'écorégion concernée.

Les travaux d'analyses ont été menés par le consortium WCS, ONE, MNP et ETC Terra.. Les équipes des quatre membres du consortium se partagent le travail, notamment au regard de leurs connaissances du terrain.

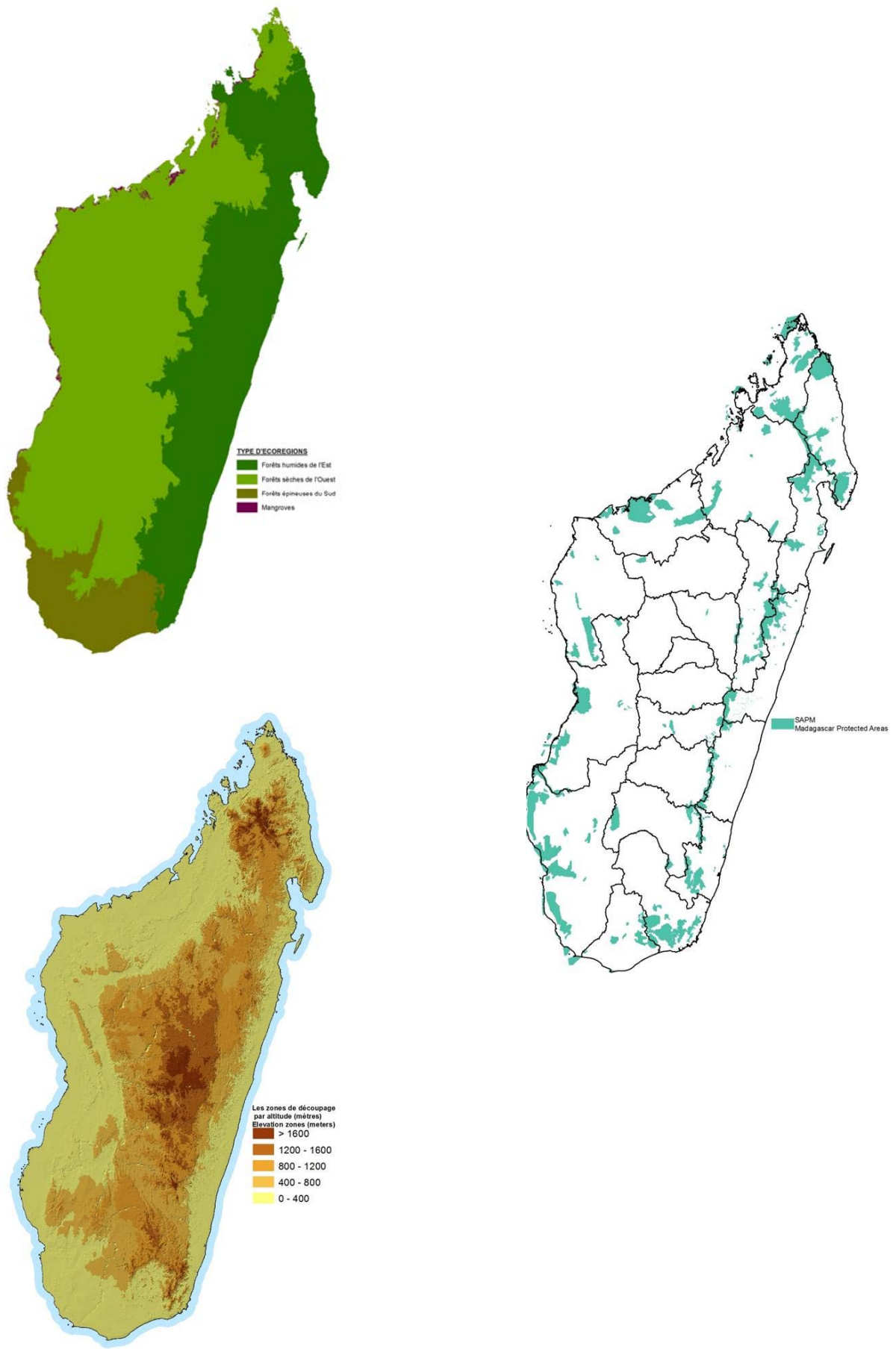


Figure 01: Limites des 4 écorégions, SAPM, et découpage par altitude

## 2. Méthodologies

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 des forêts humides de l'Est, 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 FCPF et de VCS. Le processus de traitement des données est résumé dans le tableau 1 ci-dessous.

Ces méthodologies se sont également inspirées d'une étude antérieure effectuée par Grinand et al. (2013) dans le cadre du Programme Holistique de Conservation des Forêts (PHCF), un des projets pilote REDD mis en œuvre à Madagascar depuis 2008.

**Tableau 1:** Cadre méthodologique concernant l'analyse historique de la déforestation dans l'écorégion de forêt humide de l'Est

<b>Etape 1 : Caractérisation des données</b>	
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. On recherchera en priorité les groupes d'images prises dans une même année pour plus d'homogénéité.
<b>Etape 2 : Traitements et Analyses</b>	
Prétraitement	Si les images ne sont pas prétraitées, il faudra alors conduire : <ul style="list-style-type: none"> <li>- une correction atmosphérique ;</li> <li>- une correction géométrique.</li> </ul> Dans le cas où la couverture nuageuse dépasse les 10% dans une zone de l'écorégion, il faudrait appliquer des techniques de combinaison de scènes identiques à dates différentes pour réduire au minimum cette couverture nuageuse.
Classification	Utilisation de la méthode de classification supervisée (impliquant la délimitation de parcelles d'entraînement ou d'apprentissage) et prise en compte des 6 catégories d'occupation des sols du GIEC Utilisation souhaitable de Google Earth et/ou d'images à très haute résolution (2m ou mieux) pour aider à la délimitation de ces parcelles d'entraînement. Utilisation du logiciel R avec l'algorithme <i>RandomForest</i> sous réserve qu'un autre logiciel et/ou algorithme plus performants ne soient à notre disposition avant le début des travaux.
Analyse	L'analyse se fera automatiquement par R/ <i>Random Forest</i> . Elle sera conduite par zone pour faciliter le travail des opérateurs comme des machines.
Post traitement	3 niveaux de post traitements seront réalisés : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lissage 3x3 pixels, sur un filtre à majorité ;</li> <li>- Filtre pour les forêts à moins de 1 ha</li> <li>- Filtre sur les surfaces déforestées inférieur à 0,36 ha (sur 2x2 pixels)</li> </ul>
<b>Etape 3 : Evaluation de la précision</b>	
Evaluation de la précision des cartes produites	Utilisation d'un tiers (30%) des parcelles d'apprentissage (ou parcelles d'entraînement) pour évaluer la précision. La précision globale (ou Overall Accuracy) recherchée sera d'au moins 75%.

## 2.1.- Type d'image satellite

Les images LANDSAT ont été utilisées pour réaliser ces travaux afin de garantir une homogénéité dans le type d'image utilisée et un accès à des données sur une grande étendue en archive. D'autre part, ce type d'image est recommandé pour la cartographie de la déforestation car il offre 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 2 ci-dessous.

**Tableau 2:** 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

## 2.2.-Dates et périodes de référence

Les années 2005, 2010 et 2013 ont été prises comme années de référence. Comme annoncé précédemment, ce choix a été opéré de façon à respecter à la fois les critères énoncés par les standards internationaux du VCS et du FCPF. Ces critères sont résumés dans le tableau 3.

**Tableau 3:** Critères par rapport aux images satellitaires des standards VCS-JNR et du cadre méthodologique du FCPF

VCS	FCPF
3 dates étudiées sur les 10 dernières années 2 ans minimum entre chaque date	L'échéance de la période de référence correspond à la date la plus proche, antérieure à 2013* La date de début de la Période de référence précède son échéance d'environ 10ans

\* Selon le cadre méthodologique du FCPF, « une autre échéance ne sera admise qu'en présence d'arguments concluants, par exemple pour s'aligner sur les dates d'un Niveau (d'émissions) de référence pour les forêts d'autres programmes REDD+ pertinents, des communications nationales, d'un Programme national de réduction d'émissions ou de la stratégie nationale en matière de changement climatique ».

Par ailleurs, il faut noter que la présence de couverture nuageuse dans la partie Nord Est de 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 ( $\pm$  un an). Le tableau 4 ci-dessous présente les dates sélectionnées.



**Tableau 4:** Date des images Landsat utilisées pour l'analyse historique de la déforestation

Scènes	Images 2005	Images 2010	Images 2013	I1	I2
157 - 071	25/03/2005	04/11/2011	07/02/2014	6,62	2,26
158 - 069	02/06/2004	09/08/2008	28/12/2013	4,19	5,39
158 - 070	27/08/2006	05/10/2010	19/06/2013	4,11	2,71
158 - 071	27/01/2005	20/05/2011	18/03/2014	6,31	2,83
158 - 072	10/06/2007	18/01/2011	18/03/2014	3,61	3,16
158 - 073	11/06/2007	08/07/2011	18/05/2013	4,08	1,86
158 - 074	24/06/2006	08/07/2011	18/05/2013	5,04	1,86
158 - 075	26/04/2005	15/11/2009	05/07/2013	4,56	3,64
158 - 076	03/08/2005	30/11/2009	13/08/2013	4,33	3,70
158 - 077	12/04/2006	20/04/2009	26/06/2013	3,02	4,19
159 - 068	24/04/2005	19/04/2009	22/04/2013	3,99	4,01
159 - 069	18/08/2006	10/06/2010	26/06/2013	3,81	3,05
159 - 070	24/04/2005	26/03/2009	22/04/2013	3,92	4,08
159 - 071	06/02/2006	05/05/2009	13/08/2013	3,24	4,28
159 - 072	20/03/2004	30/04/2010	13/08/2013	6,12	3,29
159 - 073	28/04/2006	01/05/2010	25/05/2013	4,01	3,07
159 - 074	25/04/2005	07/06/2009	25/05/2013	4,12	3,97
159 - 075	11/09/2006	30/03/2010	23/04/2013	3,55	3,07
159 - 076	10/01/2005	05/11/2009	16/09/2014	4,82	4,87
159 - 077	11/04/2006	19/04/2009	22/04/2013	3,02	4,01
159 - 078	07/11/2004	24/03/2011	22/04/2013	6,38	2,08
160 - 070	28/05/2006	28/11/2009	29/04/2013	3,51	3,42
160 - 071	23/04/2005	20/05/2009	07/09/2014	4,08	5,30
160 - 072	13/08/2005	05/06/2009	06/08/2014	3,81	5,17
160 - 073	22/03/2005	29/04/2010	05/07/2014	5,11	4,19
160 - 074	22/03/2005	12/11/2009	10/11/2014	4,65	5,00
160 - 075	17/01/2005	12/11/2009	10/11/2014	4,82	5,00
160 - 076	09/05/2005	15/03/2011	29/04/2013	5,85	2,13
160 - 077	23/04/2005	15/03/2011	02/05/2014	5,90	3,13
161 - 071	29/03/2005	25/04/2009	29/08/2014	4,08	5,35
161 - 072	16/05/2005	25/04/2009	25/05/2014	3,95	5,08
161 - 073	16/05/2005	17/04/2009	28/07/2014	3,92	5,28
161 - 074	29/03/2005	25/04/2009	30/09/2014	4,08	5,44
161 - 075	29/03/2005	20/04/2010	12/07/2014	5,06	4,23
161 - 076	16/05/2005	25/04/2009	25/05/2014	3,95	5,08

I<sub>1</sub> : Intervalle en nombre d'année décimale pour la période 2005 -2010

I<sub>2</sub> : Intervalle en nombre d'année décimale pour la période 2010 -2013

## 2.3.- Prétraitement et traitement des données

Outre la considération des différentes caractéristiques des bandes spectrales, le choix des images se base aussi 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 (*stripping*) ;

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 faible ou pas de couverture nuageuse, un décalage géométrique inférieur à 1 un 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 correction géométrique.

## 2.4.- Classification.

A la base, l'approche cartographique pour la déforestation est exhaustive sur toute la zone à étudier (en l'occurrence toutes les quatre écorégions confondues), c'est-à-dire que le traitement des données est homogène sur l'ensemble de la région étudiée afin d'éviter les biais méthodologiques liés à un opérateur.

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.

### 2.4.1.-Définition des classes d'occupation du sol

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

- Terres forestières ou forêts (F) ;
- Mangroves(M) ;
- Prairies et terres cultivées (P) ;
- Zones humides (H) ;
- Autres terres (Sol nu, sable, roche, établissement) (A) ;
- Nuage (N) ;
- Ombre (O) ;

L'analyse de l'historique de la déforestation a bien entendu privilégié la détection des changements au niveau de la classe des Terres forestières.

### 2.4.2.- 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. Cette délimitation a été réalisée par photo-interprétation sur les images à classifier et en s'appuyant sur d'autres sources d'information. Pour nous aider à 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. Elles ont été tracées de 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 avec des images satellites très haute résolution disponible dans Google Earth. Au final,

une base de données géolocalisées (BDD Parcelle Entraînement au format shapefile) a été produite et rassemble tous les polygones et résultats de photo-interprétation pour les trois dates étudiées..

### **2.4.3.- Classification à l'aide de l'algorithme « RandomForest »**

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

Dans un premier temps, l'algorithme *RandomForest* doit être calibré afin de nous permettre de prédire les différentes catégories d'occupation du sol à classer. La calibration du modèle se fait en prenant les 70% du jeu de données d'apprentissage, et les 30% restants seraient utilisés pour la validation (matrice de confusion et indicateurs). On parle de validation interne car l'ensemble des placettes n'est pas utilisée 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 package *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. Cette permutation est donc relative au nombre de fois où la variable est utilisée dans le nœud de l'arbre.

### 3. Résultats

#### 3.1 - Résultats au niveau national

**Tableau 5:** Surfaces forestières par écorégion :

Ecorégions	Surfaces forestières [Ha]			Taux annuels [%]	
	Forêt 2005	Forêt 2010	Forêt 2013	2005- 2010	2010 - 2013
Humides	4 555 788	4 457 184	4 345 093	0,50	0,94
Sèches	3 223 028	2 970 192	2 678 640	1,80	2,29
Epineuses	1 681 527	1 558 533	1 466 765	1,69	1,66
Mangroves	173 564	171 220	169 877	0,32	0,20
<b>TOTAL</b>	<b>9 451 350</b>	<b>8 977 337</b>	<b>8 485 509</b>	<b>1,18</b>	<b>1,50</b>

**Tableau 6:** Surfaces forestières par région :

Régions	Surfaces forestières [Ha]			Taux annuels [%]	
	Forêt 2005	Forêt 2010	Forêt 2013	2005- 2010	2010 - 2013
Alaoatra Mangoro	481 157	455 226	434 035	1,72	2,14
Amoron'i Mania	64 867	61 663	60 950	1,23	0,29
Analamanga	39 614	39 249	38 863	0,22	0,32
Analanjirifo	965 665	945 746	922 489	0,49	0,76
Androy	401 046	382 962	367 526	1,16	1,49
Anosy	518 819	502 427	495 375	1,07	0,35
Atsinanana	372 611	362 507	349 719	0,73	1,66
Atsimo Andrefana	1 589 449	1 438 278	1 282 452	2,06	2,80
Atsimo Atsinanana	303 088	299 289	297 493	0,33	0,15
Betsiboka	4 627	4 589	4 551	0,14	0,25
Boeny	450 278	427 035	405 092	1,18	1,19
Bongolava					
Diana	767 272	727 922	711 705	1,25	0,69
Haute-Matsiatra	93 664	92 221	91 462	0,40	0,24
Ihorombe	151 649	150 658	149 361	0,16	0,24
Itasy					
Melaky	647 572	625 167	587 188	0,83	1,04
Menabe	793 848	701 856	574 122	2,76	4,05
Sava	791 801	779 416	768 685	0,35	0,46
Sofia	954 111	926 824	889 994	0,72	1,22
Vakinankaratra	5 897	5 822	5 721	0,31	0,54
Vatovavy Fitovinany	192 811	189 072	187 982	0,46	0,21
<b>TOTAL</b>	<b>9 451 350</b>	<b>8 977 337</b>	<b>8 485 509</b>	<b>1,18</b>	<b>1,50</b>

### 3.2. Résultats cartographiques



Figure 02 : Carte historique de la déforestation de Madagascar

### **3.2.1 - Résultats pour l'écorégion des forêts humides**

La couverture de forêts naturelles pour l'écorégion des forêts humides a été évaluée à 4 555 788 ha en 2005, à 4 457 184 ha en 2010 et à 4 345 093 ha en 2013. Plus de 22 000 ha de forêts par an ont donc été perdus pour la période 2005 - 2010 et environ 45 000 ha par an pour la période 2010 - 2013.

Le taux annuel de déforestation pour l'écorégion des forêts humides a quasiment doublé entre les deux périodes étudiées puisqu'il est passé de 0,50% par an pour la période 2005 - 2010 à 0,94% par an pour la période 2010 - 2013.

Les résultats à l'échelle de l'écorégion montrent de fortes disparités spatiales pour les deux périodes d'analyse. Il est notamment important de noter que de manière générale, les dynamiques se sont opposées entre les Régions du Nord-Est (déforestation à la hausse) et celles du Sud-Est (déforestation à la baisse) de l'écorégion. Pour la première période d'analyse, 2005-2010, au niveau régional administratif, les taux de déforestation les plus élevés ont été constatés pour Alaotra Mangoro (1,72%), puis pour Amoron'i Mania (1,23% par an) et Atsinanana (0,72% par an).

Pour la période de 2010-2013, les taux de déforestation les plus élevés ont été constatés pour Alaotra Mangoro (2,13% par an), Atsinanana (1,66% par an) et Sofia (1,66% par an) pour la période 2010-2013.

La seule Région de l'Alaotra Mangoro a ainsi perdu en une période de seulement 8 ans plus de 15% de sa couverture forestière. En termes de superficie de forêt perdue, les régions Alaotra Mangoro, Analanjirofo et Sofia sont les plus touchées puisqu'elles ont respectivement perdu près de 21 000 ha, 23 000 ha et 24 000 ha entre 2010-2013 ; ce qui est considérable et très inquiétant pour l'avenir des forêts dans ces régions.

### **3.2.2.- Résultats pour les écorégions des forêts sèches, épineuses et mangroves**

La couverture de forêts naturelles pour l'écorégion des forêts sèches a été évaluée à 3 223 028 ha en 2005, à 2 970 192 ha en 2010 et à 2 678 640 ha en 2013. Plus de 50 000 ha de forêts par an ont donc été perdus pour la période 2005 - 2010 et environ 97 000 ha par an pour la période 2010 - 2013.

Le taux annuel de déforestation pour l'écorégion des forêts sèches a presque doublé entre les deux périodes étudiées puisqu'il est passé de 1,80% par an pour la période 2005 - 2010 à 2,29 % par an pour la période 2010 - 2013.

L'écorégion des forêts épineuses a été évaluée à 1 681 527 ha en 2005, à 1 558 533 ha en 2010 et à 1 466 765 ha en 2013. Plus de 25 000 ha de forêts par an ont donc été perdus pour la période 2005 - 2010 et environ 30 000 ha par an pour la période 2010 - 2013.

Le taux annuel de déforestation pour l'écorégion des forêts épineuses a changé très peu entre les deux périodes étudiées puisqu'il est passé de 1,69% par an pour la période 2005 - 2010 à 1,66 % par an pour la période 2010 - 2013.

Les résultats à l'échelle de l'écorégion montrent une tendance assez homogène de l'évolution de la déforestation pour les deux périodes d'analyse.

Pour la première période d'analyse, 2005-2010, au niveau des régions, les taux de déforestation les plus élevés dans les forêts sèches ont été constatés à Menabe (2,82%), puis à Atsimo Andrefana (2,23% par an) et Boeny (1,50% par an).

Pour la période de 2010-2013, les taux de déforestation les plus élevés dans les forêts sèches ont été constatés pour Menabe (4,23%), puis Atsimo Andrefana (4,00% par an) et Androy (1,51% par an).

La superficie des mangroves a été estimée à 173 564 ha en 2005, à 171 220ha en 2010 et à 169 877 ha en 2013. Et le taux annuel de déforestation pour cette écorégion est de 0,32% et 0,2% respectivement pour la période 2005 - 2010 et la période 2010 - 2013.

### 3.3. Résultats généraux

#### 3.3.1 Les « hotspots » de la déforestation pour l'écorégion des forêts humides

Au niveau de l'écorégion des forêts humides dans son ensemble, la déforestation n'est pas distribuée de manière homogène dans une même région administrative. Une concentration de la déforestation en foyers ou « hotspots » de la déforestation peut être observée dans plusieurs Régions. Les plus importants de ces « hotspots » ont été enregistrés dans la région Alaotra Mangoro, les foyers d'Anosibe an'ala, et de Didy.

#### 3.3.2 Les « hotspots » de la déforestation pour les écorégions des forêts sèches, épineuses et mangroves

Au niveau de l'écorégion des forêts sèches et épineuses dans son ensemble, la déforestation s'est concentrée dans plusieurs foyers ou « hotspots », dans le Menabe qui présente deux grands foyers, dans l'Atsimo Andrefana représenté par le fameux site PK32 Ranobe et enfin dans la région Boeny, à côté du complexe Mahavavy Kinkony (Forêt de Tsiombikibo).

#### 3.3.3 Résultats par catégorie d'altitude

Dans le cadre de cette étude, les forêts humides de l'Est ont été subdivisées en deux grandes strates :

- **Forêts de basse altitude situées entre 0 et 800 m d'altitude** : cette strate est clairement la plus touchée par la déforestation depuis plusieurs années. Le taux de la déforestation y a doublé de 0,60% pour la période 2005 – 2010 à 1,15% pour la période 2010 – 2013.
- **Forêts de moyenne et de haute altitude au-delà de 800 mètres** : selon des études antérieures, cette strate est moins vulnérable à la déforestation. Néanmoins, le taux de déforestation y est aussi doublé de 0,44% pour la période 2005 – 2010 à 0,82% pour la période 2010 – 2013 et présente aujourd'hui des statistiques assez proches de celles observées en basse altitude.

#### 3.3.4 Validation des résultats de classification

##### 3.3.4. a- Ecorégion des forêts humides

La précision globale de l'analyse de la déforestation de cette écorégion a été de l'ordre de 90%.

Une matrice de confusion a été élaborée sur la base de 10.000 points 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.

**Tableau 7** : Matrice de confusion externe pour la validation de la carte historique de déforestation pour l'écorégion des forêts humides.

		Observation externe			Total	Erreur de commission	Précision du producteur
		FF	FP	PP			
Classification	Classes						
	FF	5154	145	542	5841	012	0,88
	FP	34	273	58	365	0,25	0,75
	PP	372	53	4223	4648	0,09	0,91
Total		5560	471	4823	10854		
Précision de l'utilisateur		0,93	0,58	0,88			
Kappa		0,79					
Précision Globale		0,89					

3.3.4. b- Ecorégion des forêts sèches, épineuses et mangroves.

**Tableau 8** : Matrice de confusion externe pour la validation de la carte historique de déforestation pour l'écorégion des forêts sèches, épineuses et mangroves

		Observation externe			Total	Erreur de commission	Précision du producteur
		Classes	FF	FP			
Classification	FF	882	77	130	1089	0,19	0,81
	FP	92	222	66	380	0,42	0,58
	PP	344	162	1603	2109	0,24	0,76
	Total	1318	461	1799	3578		
Précision de l'utilisateur		0,67	0,48	0,89			
Kappa		0,58					
Précision Globale		0,76					

L'indice Kappa 0,58 et la précision globale à 0,76 signifie que parmi les 3578 points d'observations, 76% sont bien classés, en revanche, 24% sont mal classés. En effet, la carte est donc précise à 76%, l'erreur marginale pour son utilisation est de 24%.



#### 4 CONCLUSION

En général, on constate une nette augmentation du taux de déforestation pour toutes les écorégions pour la période 2010- 2013. Spatialement, les lieux antérieurs de déforestation jouent un rôle important dans les aires déforestées récemment.

Pour les forêts humides de l'Est, un taux annuel de déforestation de 0,50% pour la période 2005-2010 et 0.94% entre 2010- 2013 a été constaté, ce qui équivaut respectivement à une perte annuelle de 23.000ha et de 42.000ha. Pour les deux périodes d'analyse, la région Alaotra Mangoro a eu toujours le plus grand taux de déforestation allant de 1,44% à 2,28%.

Pour les forêts sèches, épineuses et mangroves confondues, à l'image de ce qui a pu être observé dans l'écorégion des forêts humides, une nette augmentation de la déforestation est observée entre les deux périodes étudiées avec des « *hot-spots* » de déforestation particulièrement intenses dans les régions Menabe (4,05%) et Atsimo Andrefana (2,8%).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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](http://oz.berkeley.edu/users/breiman/Using_random_forests_V3.1.pdf),
- Breiman, L. & Cutler. A. (2004). Random Forests - original implementation.  
<http://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests>.
- FAO, 1995 Forest resources assessment 1990, Global Synthesis.  
<http://www.fao.org/docrep/007/v5695e/v5695e00.htm>
- GOF-C-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 remaining forests, and forestation resource. Canada, Alberta, 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). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Japan: IGES  
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- 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.
- 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>
- Liaw & 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](ftp://131.252.97.79/Transfer/Treg/WFRE_Articles/Liaw_02_Classification%20and%20regression%20by%20randomForest.pdf)
- Menon, S., Bawa, K.S., (1997) Application of geographic information systems, remote sensing, and landscape ecology approach to biodiversity conservation in Western Ghats. *Curr. Sci.* 75, 228 - 285
- Narendra Prasad, S., 1998. Conservation planning for the Western Ghats of Kerala. II. Assessment of habitat loss and degradation. *Curr. Sci.* 75, 228 - 285.
- ONE, MEF, FTM, MNP & CI (2013). Evolution de la couverture des forêts naturelles à Madagascar 2005 – 2010. 43p. 22 pl. –Antananarivo.
- 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>
- Vieilledent, G., Grinand, C., & Vaudry, R. (2013). Forecasting deforestation and carbon emissions in tropical developing countries facing demographic expansion: A case study in Madagascar. *Ecology and Evolution*, <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.550> (Article first published online: 3 MAY 2013).