



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
ÉCOLE DOCTORALE DE PHYSIQUE ET APPLICATIONS



EAD Physique du Globe, de l'Environnement et de l'Énergie (PGEE)

THÈSE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT EN PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Spécialité : Physique du Globe

**“MESURE ET SUIVI DE LA DYNAMIQUE DU COUVERT FORESTIER : CAS DE L'ÉCORÉGION
DES FORÊTS HUMIDES DE L'EST DE MADAGASCAR”**

Présentée et soutenue publiquement par :

Fety Abel RAKOTOMALALA

22 décembre 2020



22/12/2020





INTRODUCTION

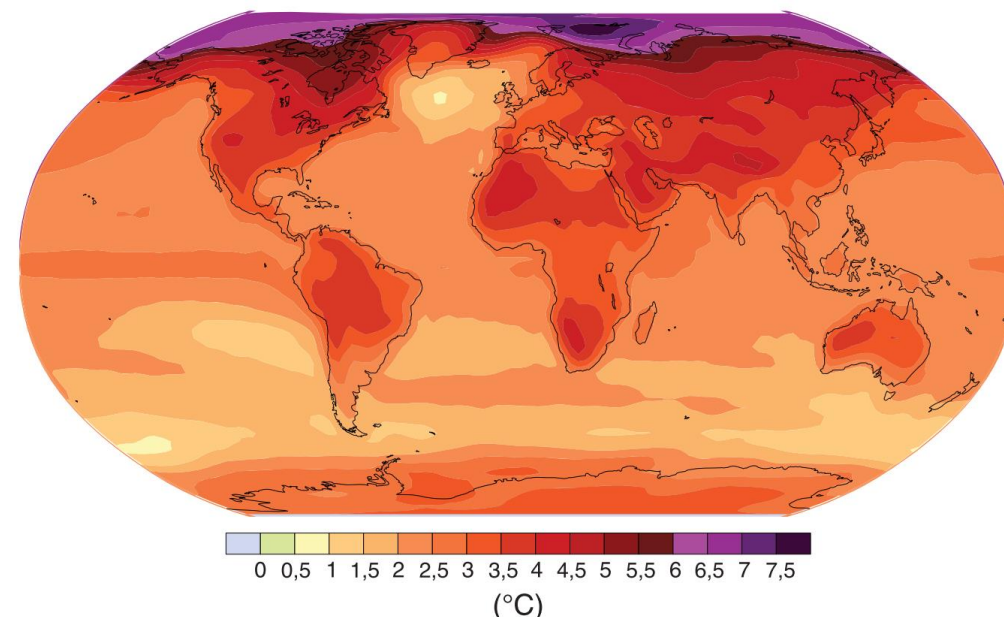


CONTEXTE D'ÉTUDE (1/3)

■ International

Problème du Changement Climatique (CC)

- Usages et Changements d'Usages des terres et Perte du couvert forestier
- 25% des émissions de Gaz à Effet de Serre d'origine anthropique
- Augmentation de la température du globe



Initiative internationale de lutte contre le CC

→ réduire les émissions de GES liés à l'Usage au Changement Usage des Terres

CONTEXTE D'ÉTUDE (2/3)

- National

Problèmes CC

→ Intensification des phénomènes climatiques

Usage et Changement Usage des Terres, perte du couvert forestier

→ Risque de disparition de la biodiversité

- Participation à la lutte contre le CC, préservation de la biodiversité :

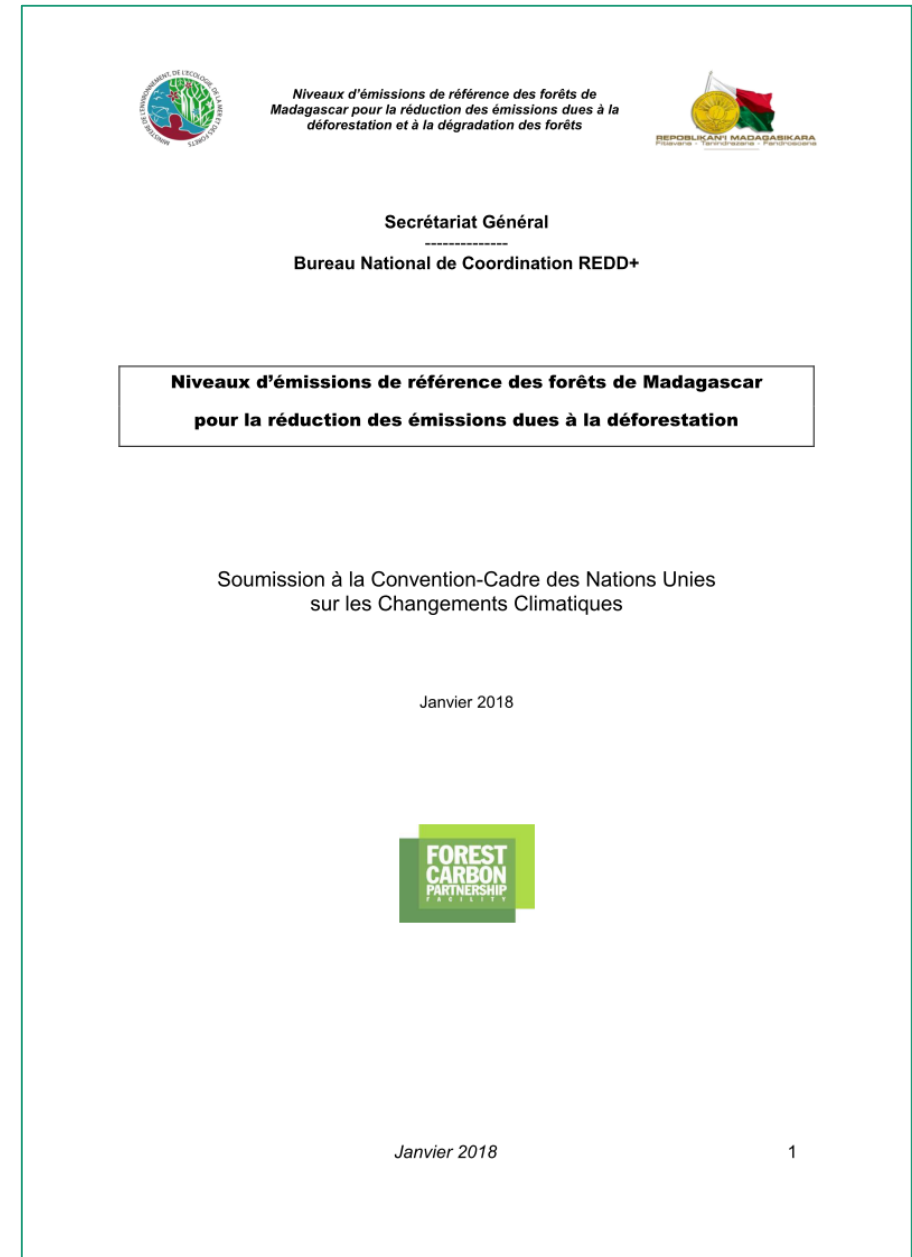
Adoption du programme REDD+



CONTEXTE D'ÉTUDE (3/3)

Systeme existant ?

- Niveaux d'Émissions de Référence des Forêts (NERF), janvier 2018
 - Émissions liées à la **déforestation comptabilisé**
 - **Pas de données sur la dégradation et la régénération forestière**



FINALITÉS

Apporter une contribution à la mise en place d'un **Système National de Suivi des Forêts (SNSF)** à Madagascar :

- **Données** nécessaires pour la mise en œuvre du REDD+
- Informations importantes pour la **gestion des ressources naturelles**



PROBLÈMES

Mise en place d'un système national de **Suivi, Notification et de Vérification (SNV)** :

Processus à suivre	Données existantes	Données nécessaires
Déforestation	X	X
Dégradation	?	X
Régénération forestière	?	X

Quelle serait la méthodologie appropriée pour estimer l'évolution du couvert forestier dans l'écorégion des forêts humides ?

SOLUTIONS ET HYPOTHÈSES

Estimation de l'évolution du couvert forestier :

- **H1, Couplage entre l'analyse simultanée des données satellitaires multidates et les données mesurées sur terrain**
- **H2, Intégration des variables sol et végétation, géomorphologiques et bioclimatiques**

(Goetz et Dubayah, 2011; Yang et al., 2012; Grinand et al., 2013; Gómez et al., 2014)



AXES DE RECHERCHES

Estimation de la **déforestation** historique à partir de la **classification multidate** d'images **LANDSAT** (30m)

Axe de recherche 1

Analyse et suivi de la **dégradation** et la **régénération** forestière en **croisant** la **variation de la biomasse** forestière et l'état du **couvert forestier** (F-nF)

Axe de recherche 2

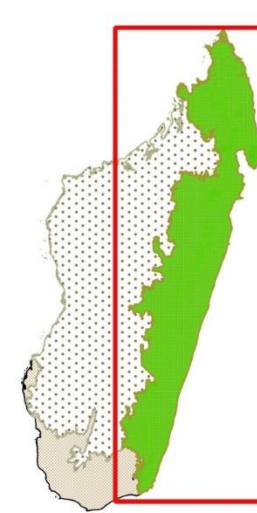
ZONE D'ÉTUDE

Écorégion des forêts humides :

- Superficie : **2,2 millions d'hectare**
- Type de forêts : **Tropicales denses humides sempervirentes**



Importance de la **biodiversité menacée** par la déforestation et la dégradation forestière
→ **Site prioritaire en terme de conservation**



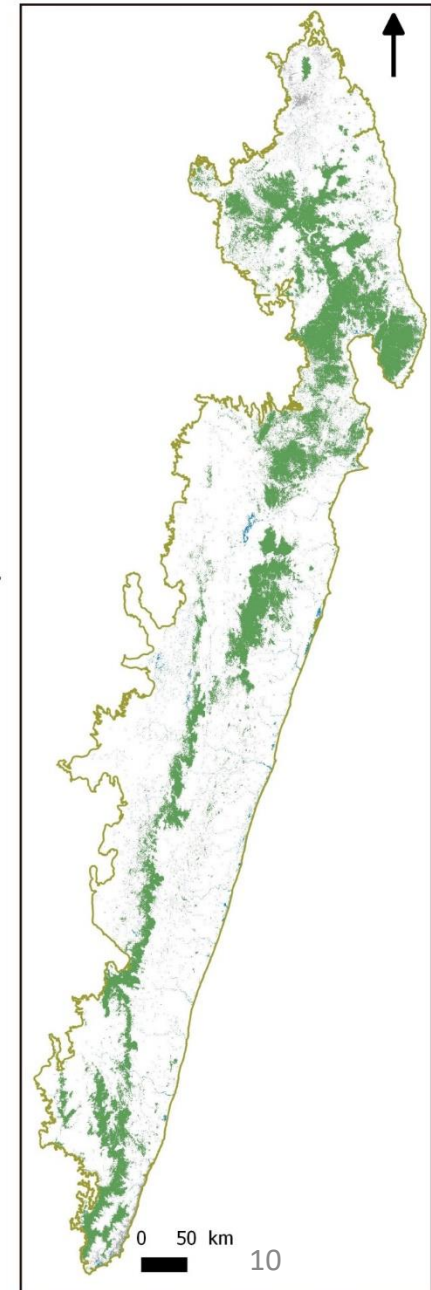
Ecorégion des forêts de Madagascar

■ Ecorégion des forêts humides de l'EST

● Ecorégion des forêts sèches de l'OUEST

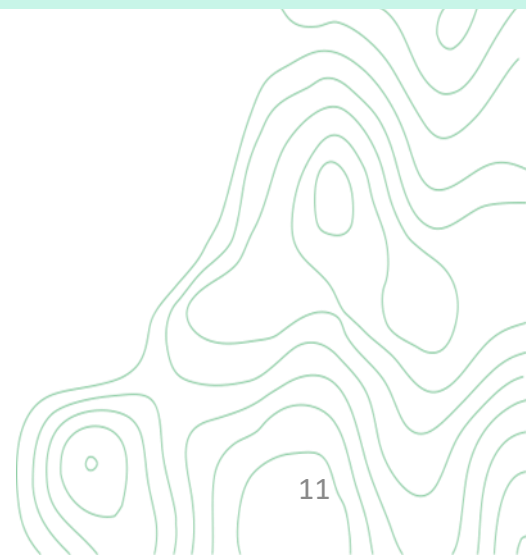
■ Ecorégion des forêts épineuses du SUD

■ Forêts tropicales denses humides





CADRE MÉTHODOLOGIQUE



C'est quoi une forêt ?

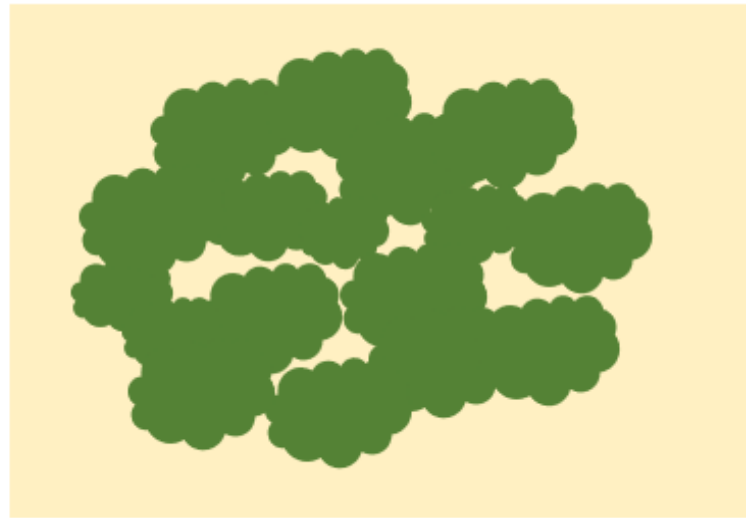
CCNUCC :

Critères basés sur les seuils minimaux concernant 3 paramètres biophysiques



Surface du couvert forestier (ha)

> 1 ha



Couverture de la canopée (%)

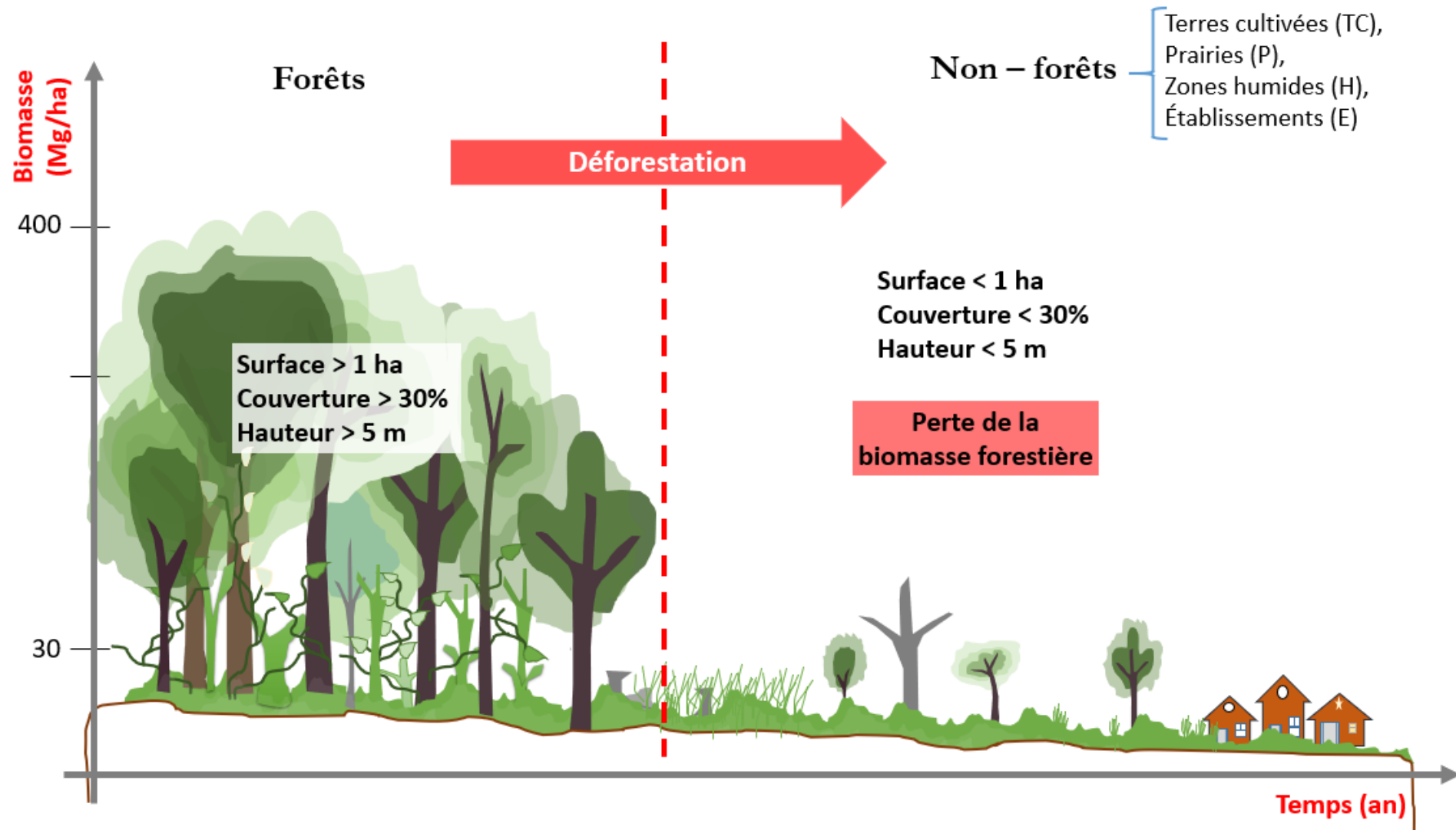
> 30%



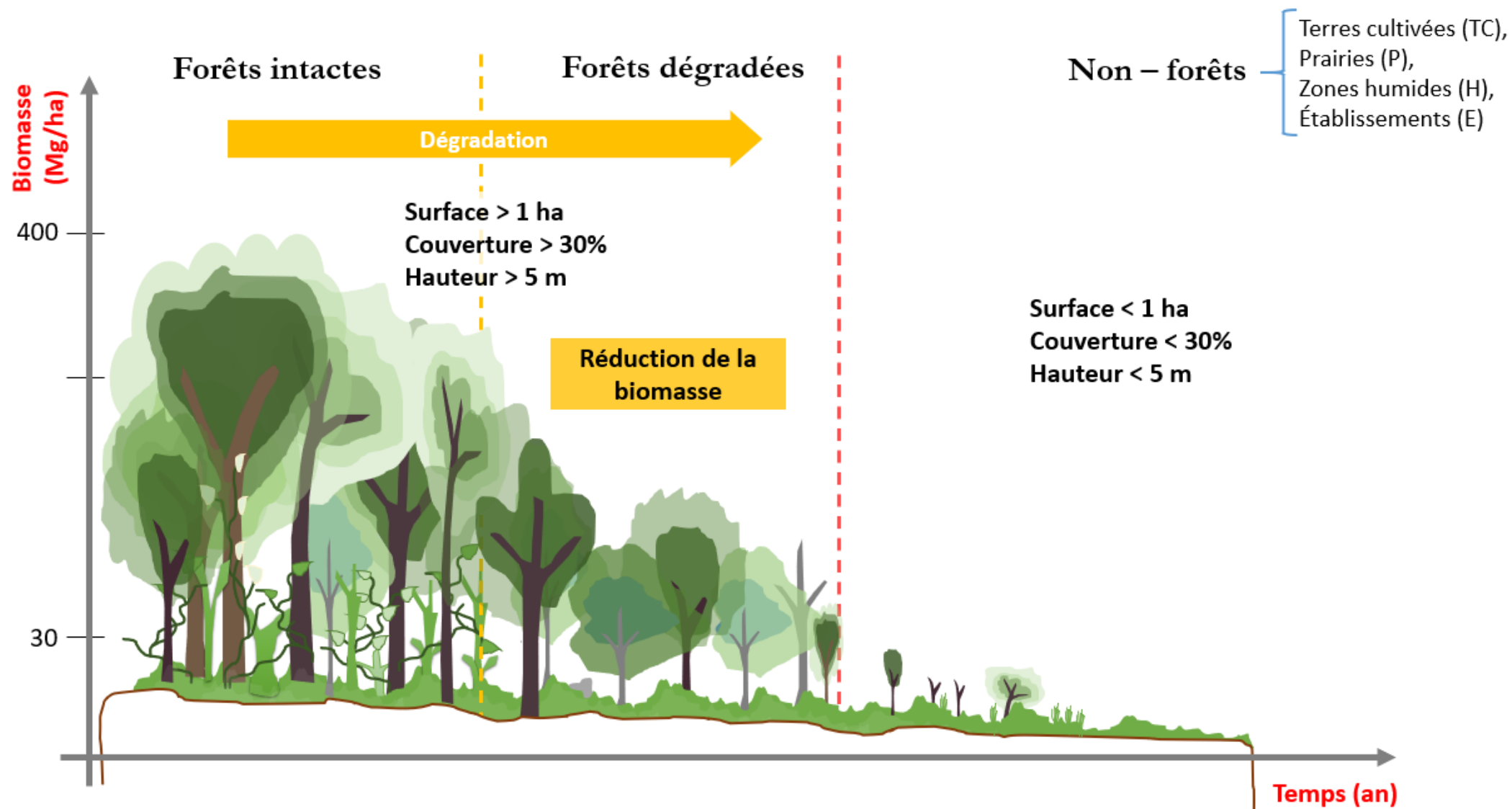
Hauteur moyenne des arbres (m)

> 5 m

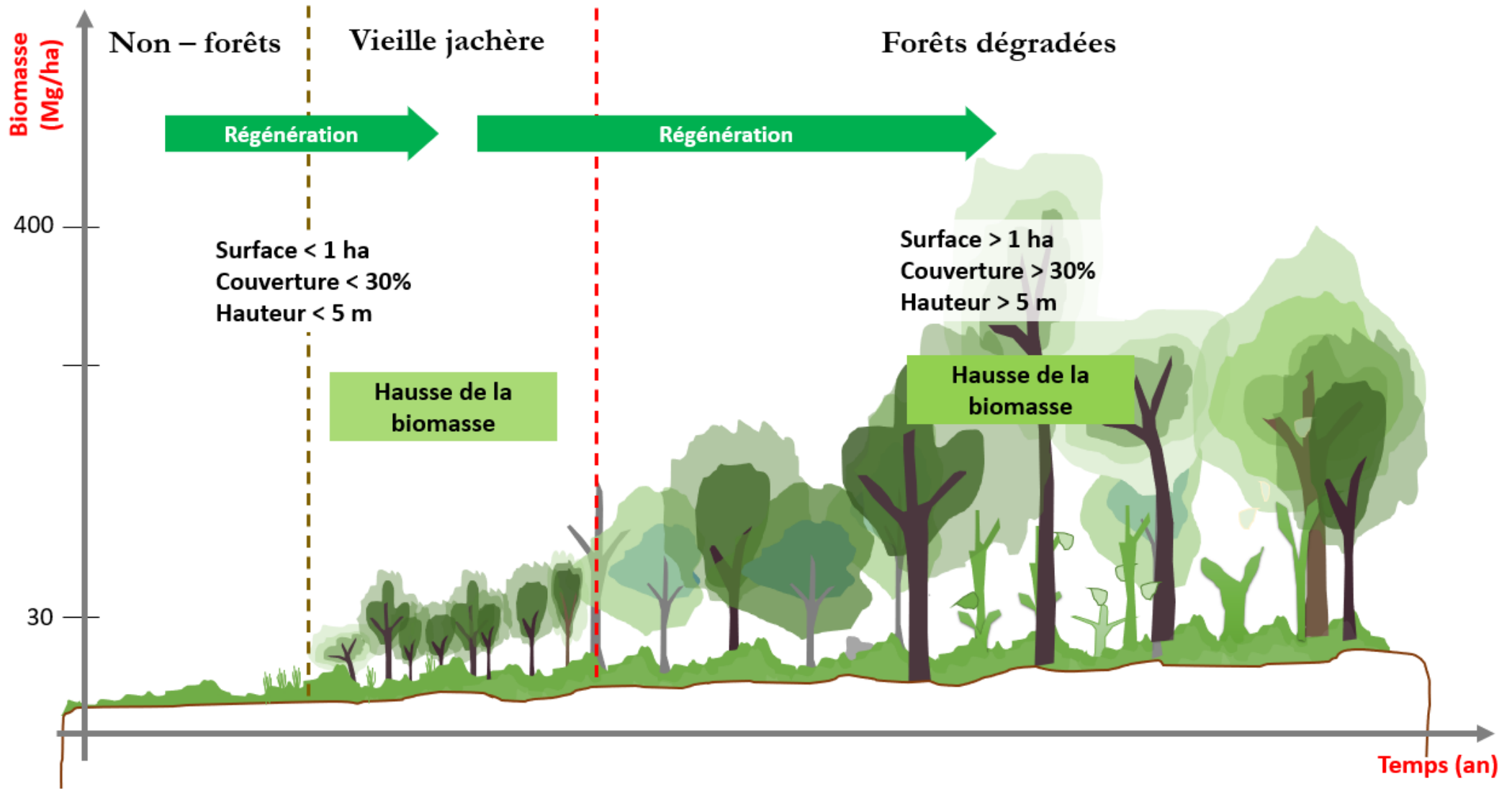
C'est quoi une « déforestation » ?



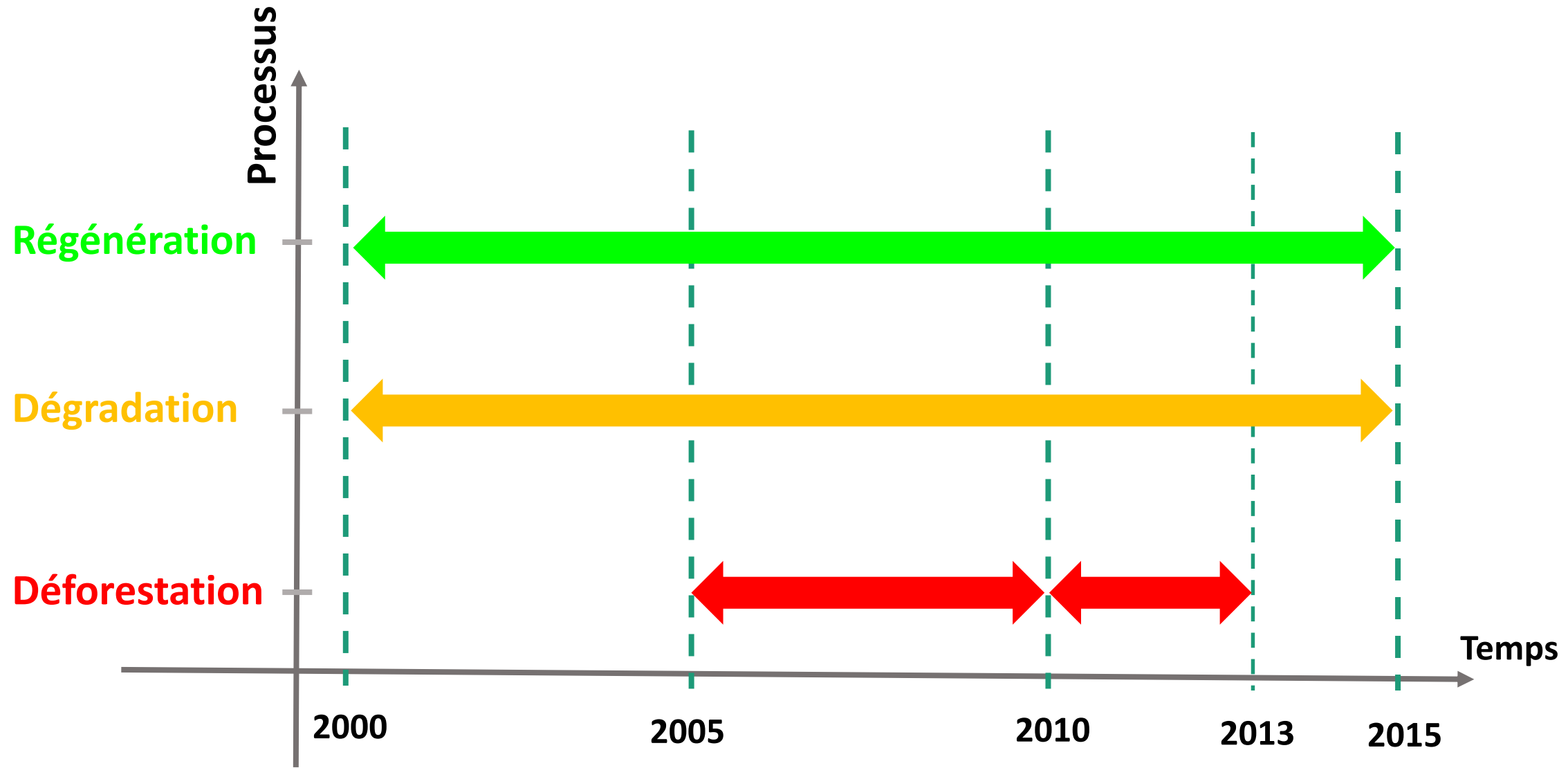
C'est quoi une « dégradation forestière »



C'est quoi une « régénération forestière » ?



PÉRIODES DE SUIVI



DIFFICULTÉS ?



- Suivi de la déforestation
 - Amélioration de la fréquence de suivi (< 5 ans)
 - Validation de la carte finale

- **Suivi de la dégradation et la régénération**
 - **Changement subtil**, de l'ordre de grandeur d'un pixel d'image LANDSAT (30m)
 - **Processus lent**, nécessite de longues séries temporelles d'images

- **Intégration des définitions** dans le processus de traitement des données satellitaires, exigée dans le cadre du programme REDD+

- **Nuage et effet de relief** sur les images satellitaires



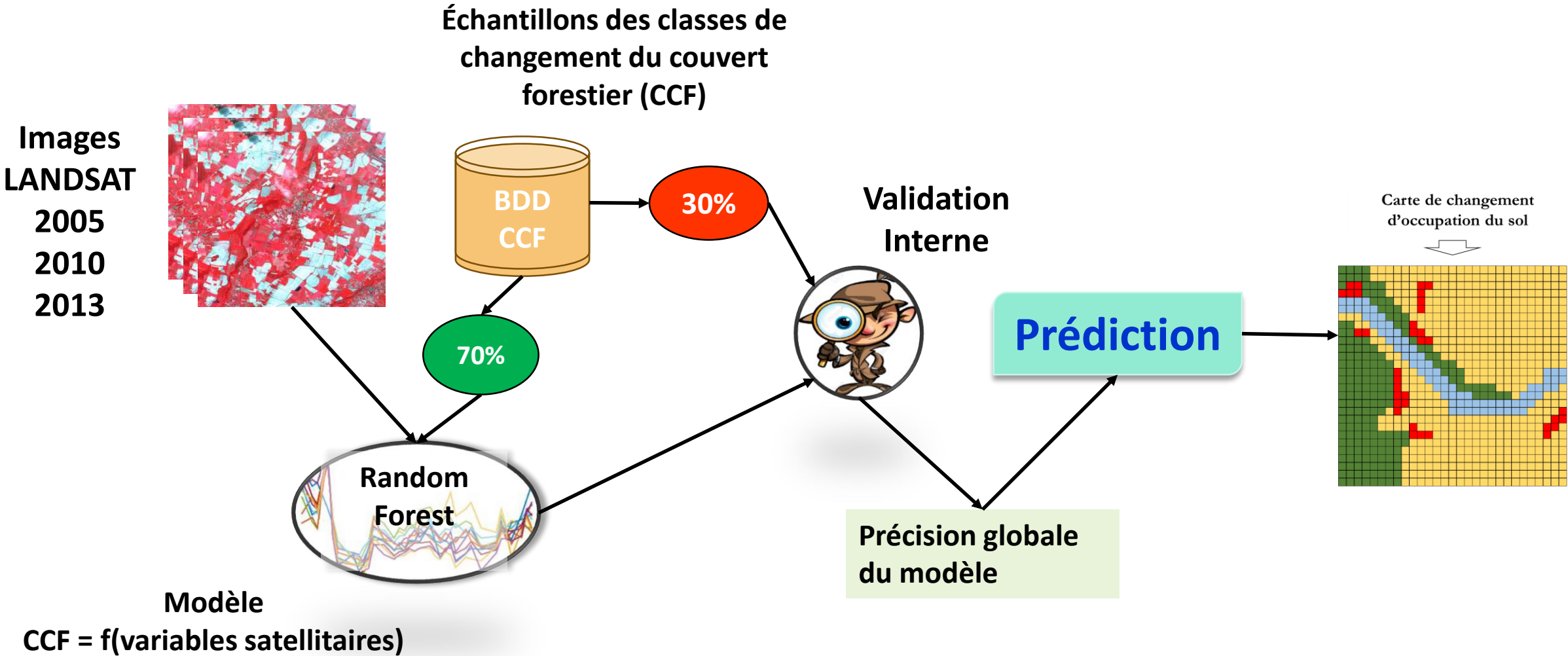
AXE 1 :

ESTIMATION DE LA DÉFORESTATION DES FORÊTS HUMIDES À MADAGASCAR EN UTILISANT UNE CLASSIFICATION MULTIDATE D'IMAGES LANDSAT

Rakotomalala et al., 2015



Classification supervisée d'images multidates



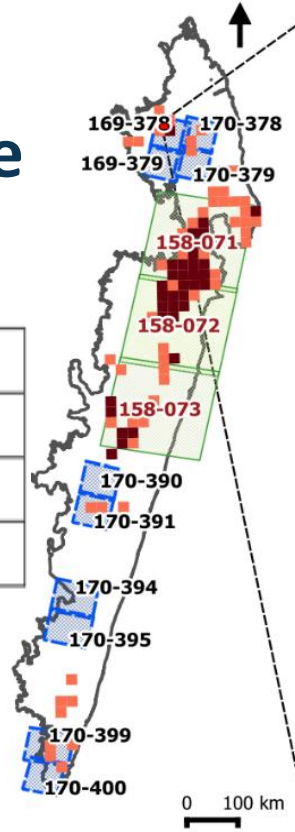
Validation

- Trois niveaux de grille de validation selon l'intensité de déforestation

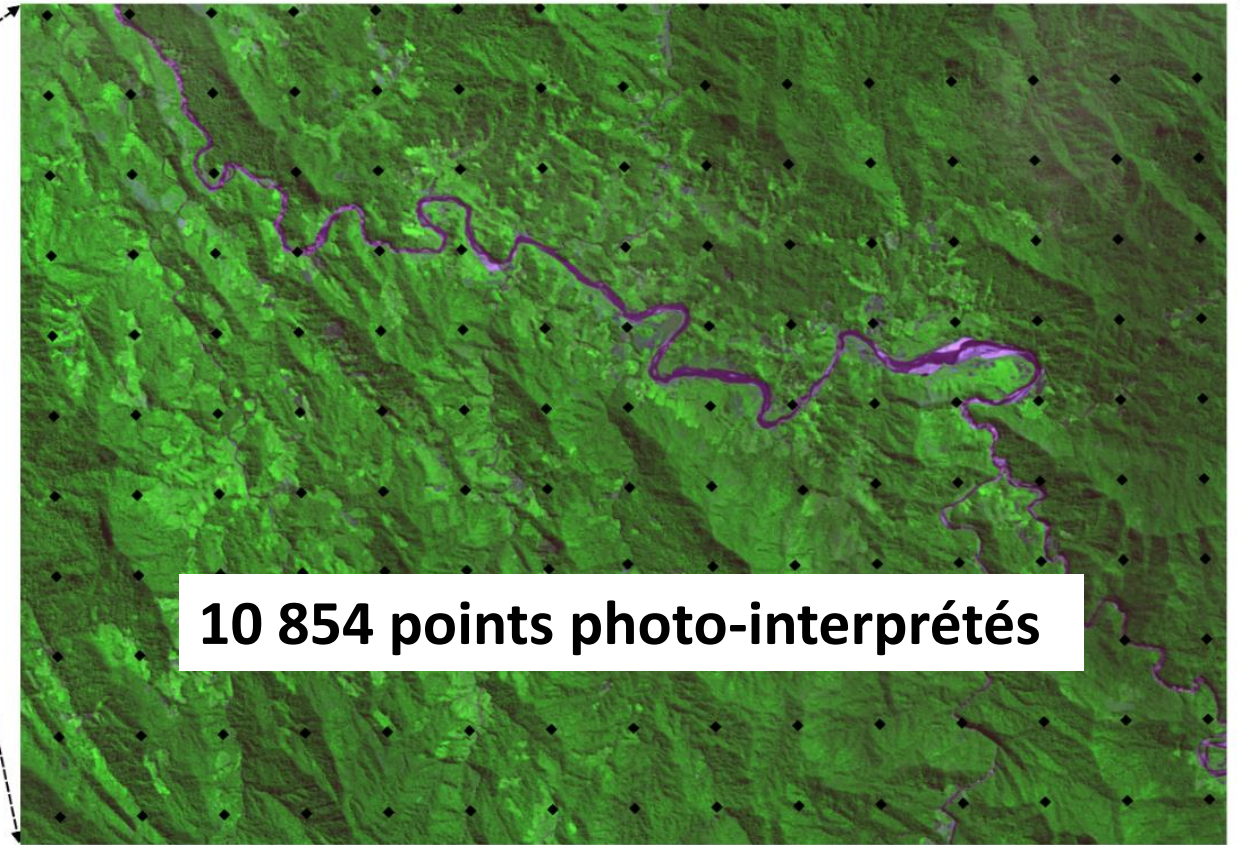
Pression (Ha/an)	Classe	Taille grille [Km]
0,4 - 20	Faible	5
20 - 50	Moyenne	1
> 50	Forte	0,5

- Période 2010-2013

- Spot 5 (10m)
/LANDSAT (30m)



Semis des points de validation sur une scène d'image SPOT - 5 de 10 mètres de résolution



Olofsson et al (2014)

RÉSULTATS AXE 1

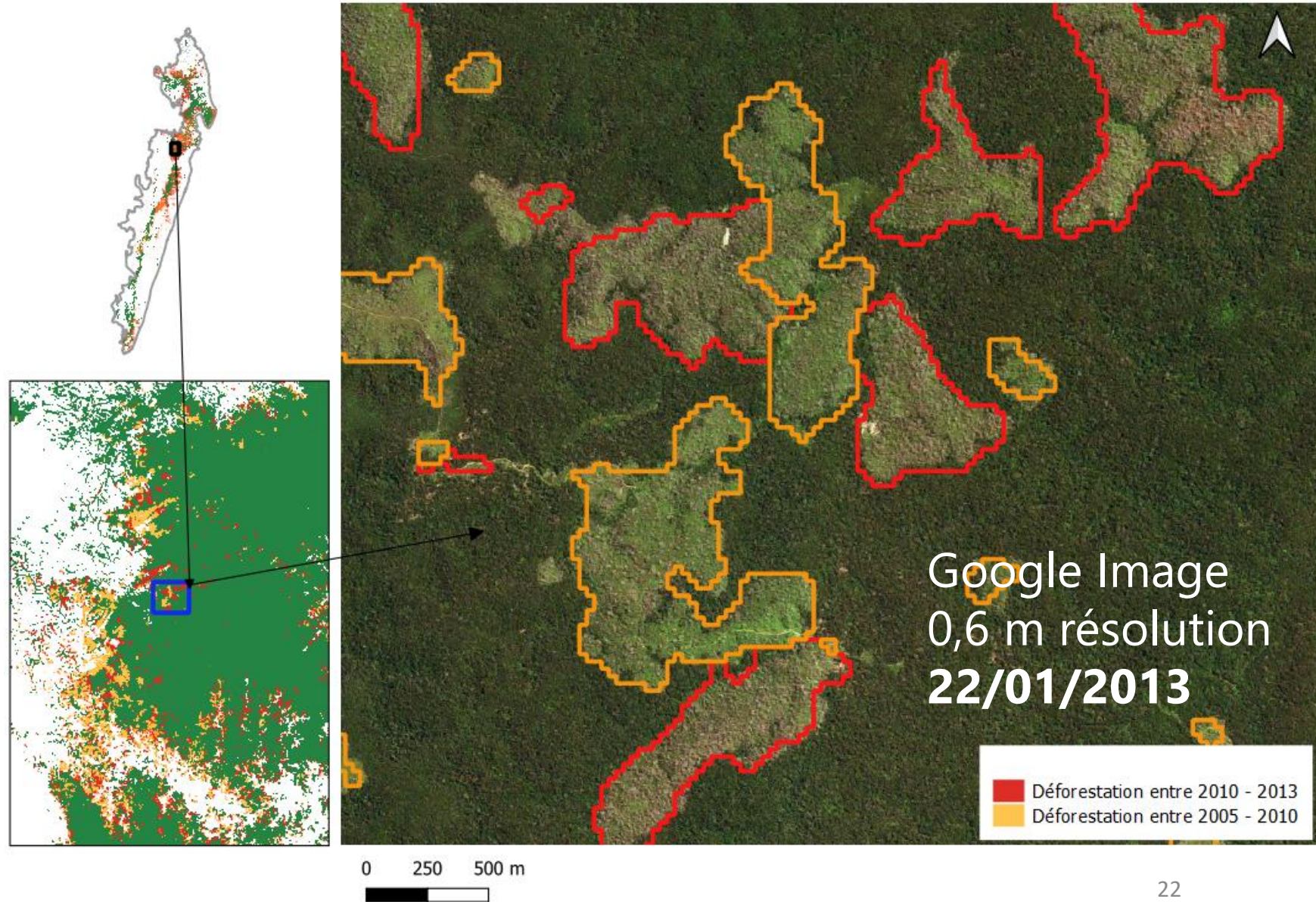


Validation de la carte de déforestation historique

Précision globale ~ 90%
Kappa ~ 80%

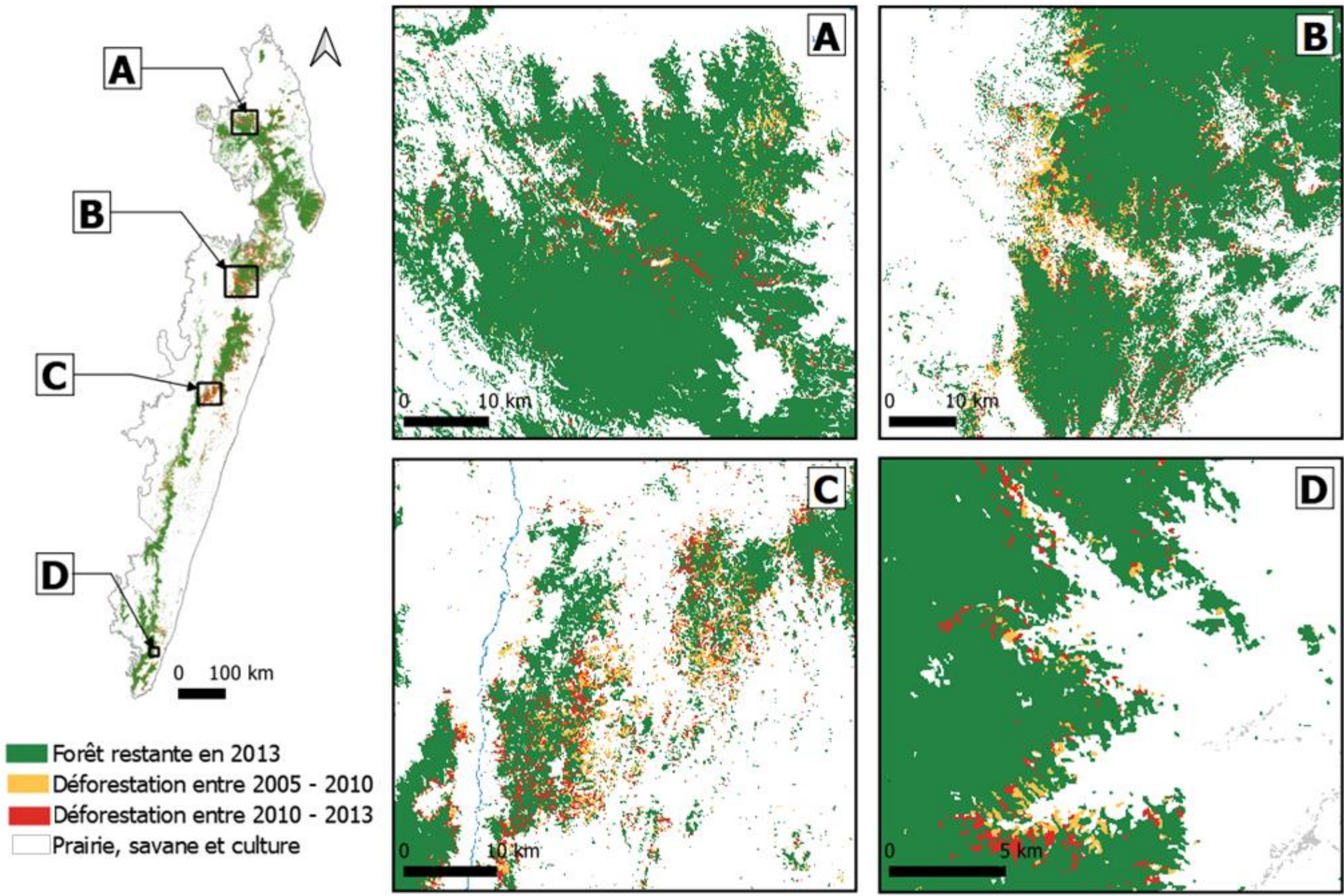
Précision

Couvert forestier ~ 88%
Déforestation ~ 75%



Carte de déforestation historique entre 2005 - 2013

4 « hot-spot » de déforestation



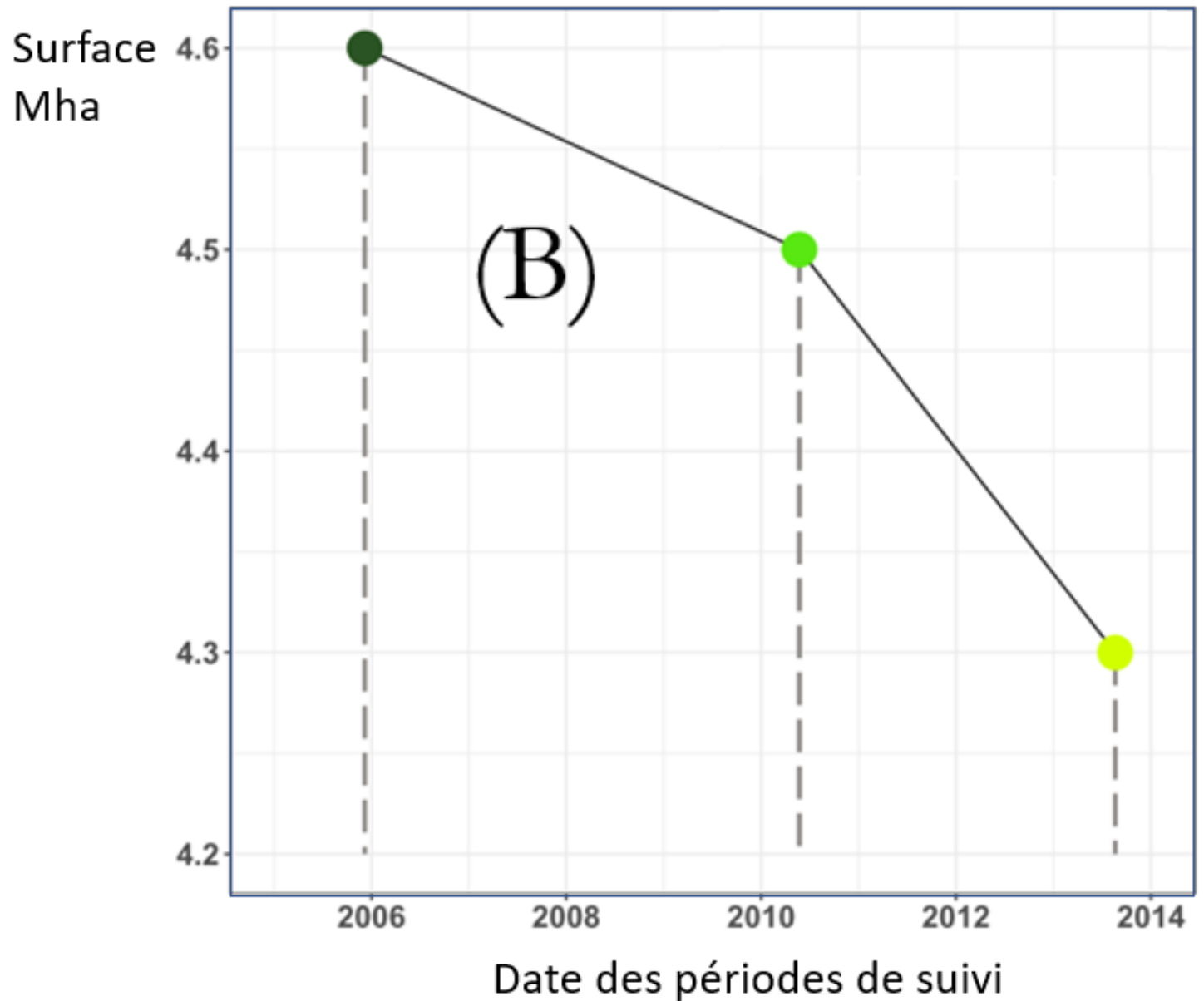
Évolution de la superficie du couvert forestier entre 2005 – 2013



Rythme de déforestation
2005 – 2010 = 22 109 ha/an
2010 – 2013 = 33 978 ha/an

Taux de déforestation
2005 – 2010 = 0,49 %/an
2010 – 2013 = 0,77 %/an

Changement de surface du couvert forestier





AXE 2 :

ANALYSE ET SUIVI DE LA DÉGRADATION ET DE LA RÉGÉNÉRATION FORESTIÈRE

ATBC, 2019



Cartographie de la dégradation et de la régénération forestière

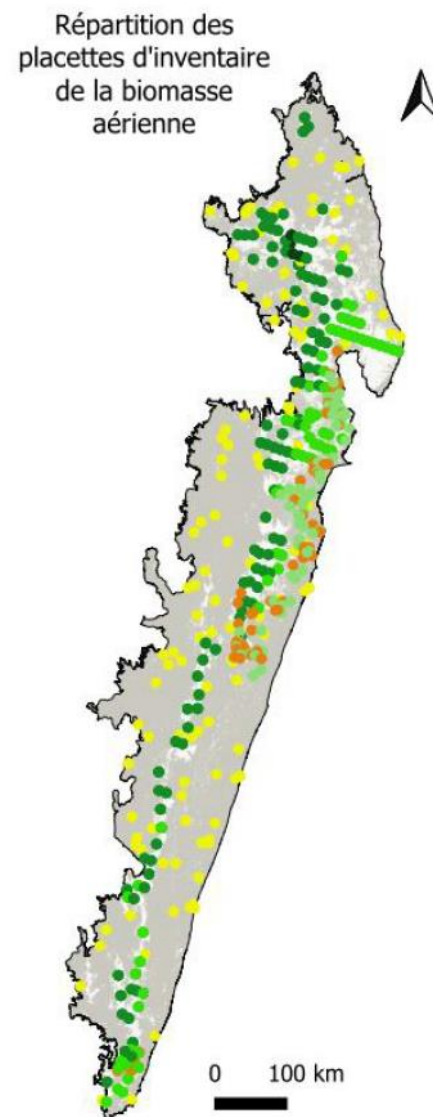
		Variation du stock de carbone de la biomasse entre 2000 – 2015				
		Forêts 2000	Forêts 2015	Diminution significative	Pas de changement significatif	Augmentation significative
État du couvert forestier en 2000 et 2015	Oui	Oui	Dégradation forestière, couverture > 30% (forêt dégradée)	Maintien du couvert forestier	Maintien du couvert forestier avec augmentation de stock	
	Oui	Non	Déforestation			
	Non	Oui	Régénération forestière, couverture > 30% (recrûs forestiers, forêt secondaire)			
	Non	Non	Processus de dégradation du sol (baisse du couvert végétal)	Milieu inchangé en dehors de la forêt (savane, prairie, jeune jachère, zone de culture)	Régénération non forestière, couverture < 30% (vieille jachère, zone agroforestière, forestière)	

8 catégories de classe de changement d'affectation des terres

Inventaire de la biomasse aérienne

Réalisation d'une campagne d'inventaire (2016), collecte et valorisation des données existantes (2014, 2016)

→ TOTAL = 748 placettes (2014-2016)



Exemple d'une grappe d'inventaire de la biomasse aérienne



Exemple d'un profil d'inventaire de la biomasse aérienne



Stratification des zones d'inventaire de la biomasse aérienne

- Forêts sclérophylles de montagne > 1800 m
- Forêts humides de moyenne altitude]800 - 1800 m]
- Forêts humides de basse altitude]0 - 800 m]
- Forêts humides dégradées
- Forêts humides secondaires
- Terres non-forestières

- Terres forestières
- Terres non-forestières
- Limite écorégion des forêts humides

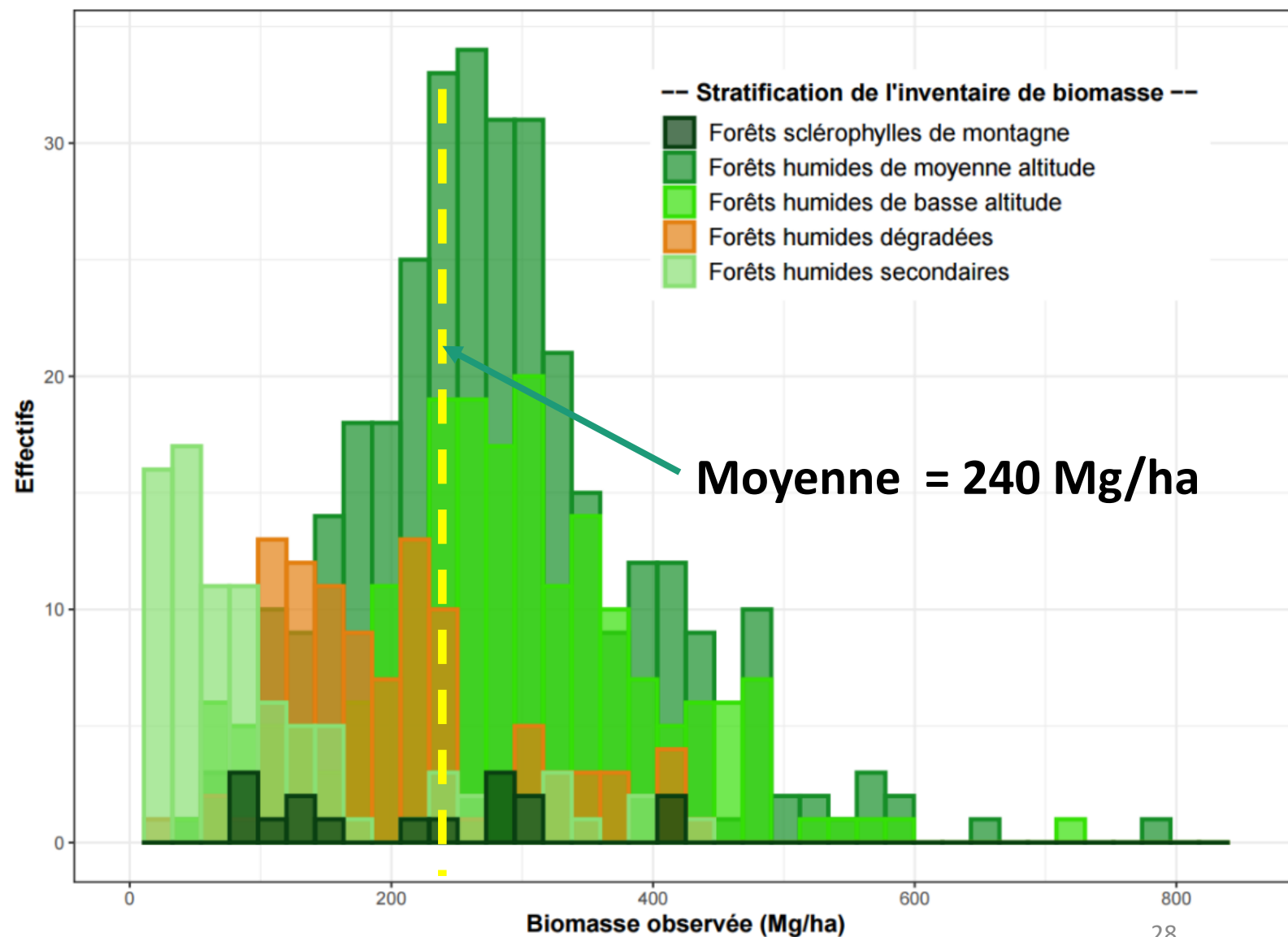
Estimation de la biomasse aérienne

National / global

- Base de données des densités de bois
- Équations allométriques

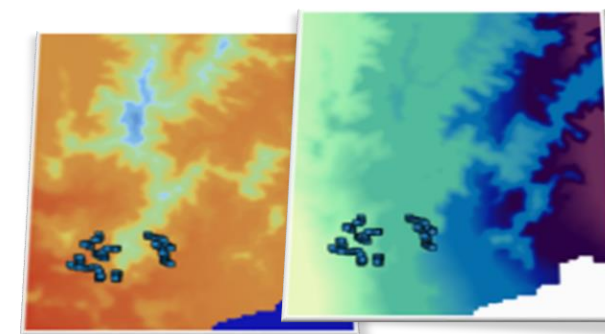
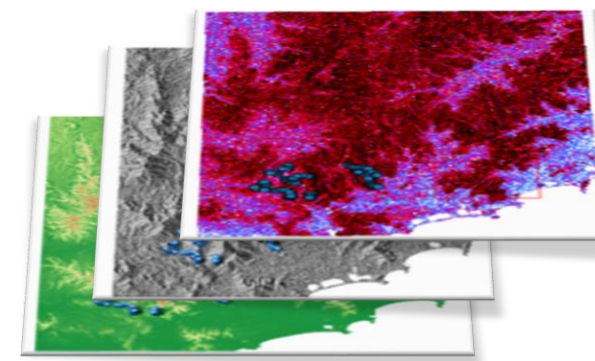
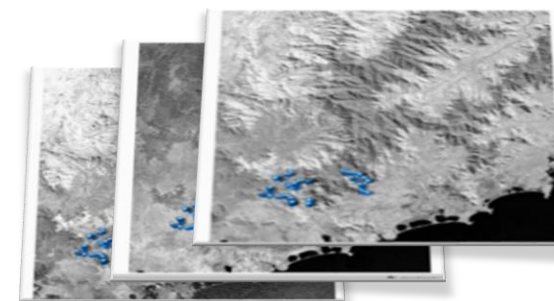
(Zanne, 2009, Rakotovao, 2012, Vielledent et al., 2012, Chave et al, 2014)

Distribution de la biomasse forestière



2) Modélisation de la biomasse

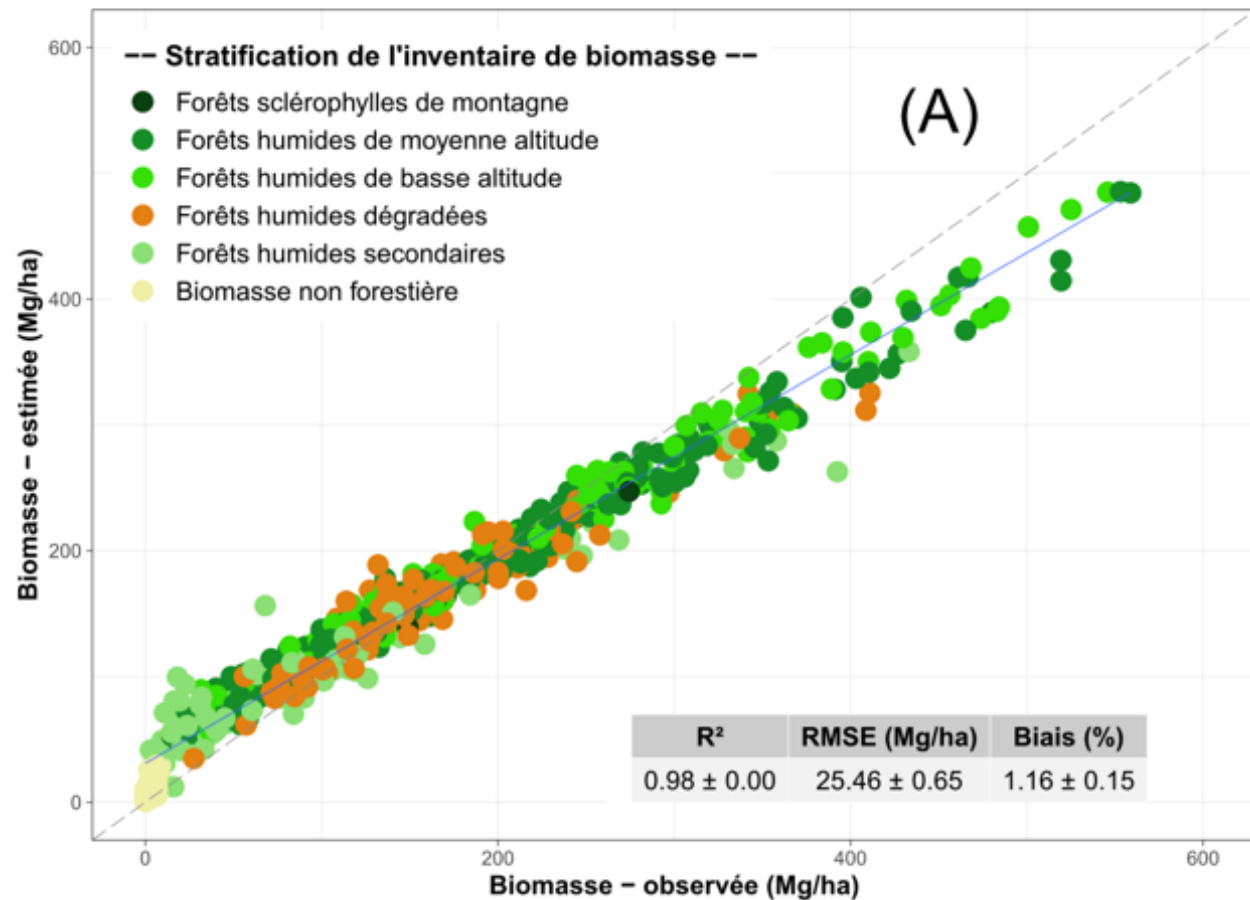
- **Régression multivariée** avec Algorithme **Random Forest** (70% calibration, 30% validation)
- **28 variables environnementales utilisées**
 - **18 sol & végétation** (satellite images bandes, indices de végétation, (NDVI, NDWI, NRI...))
 - **8 topographiques** (altitude, pente, aspect du terrain,...)
 - **2 bioclimatiques** (précipitations annuelle, température moyenne annuelle)



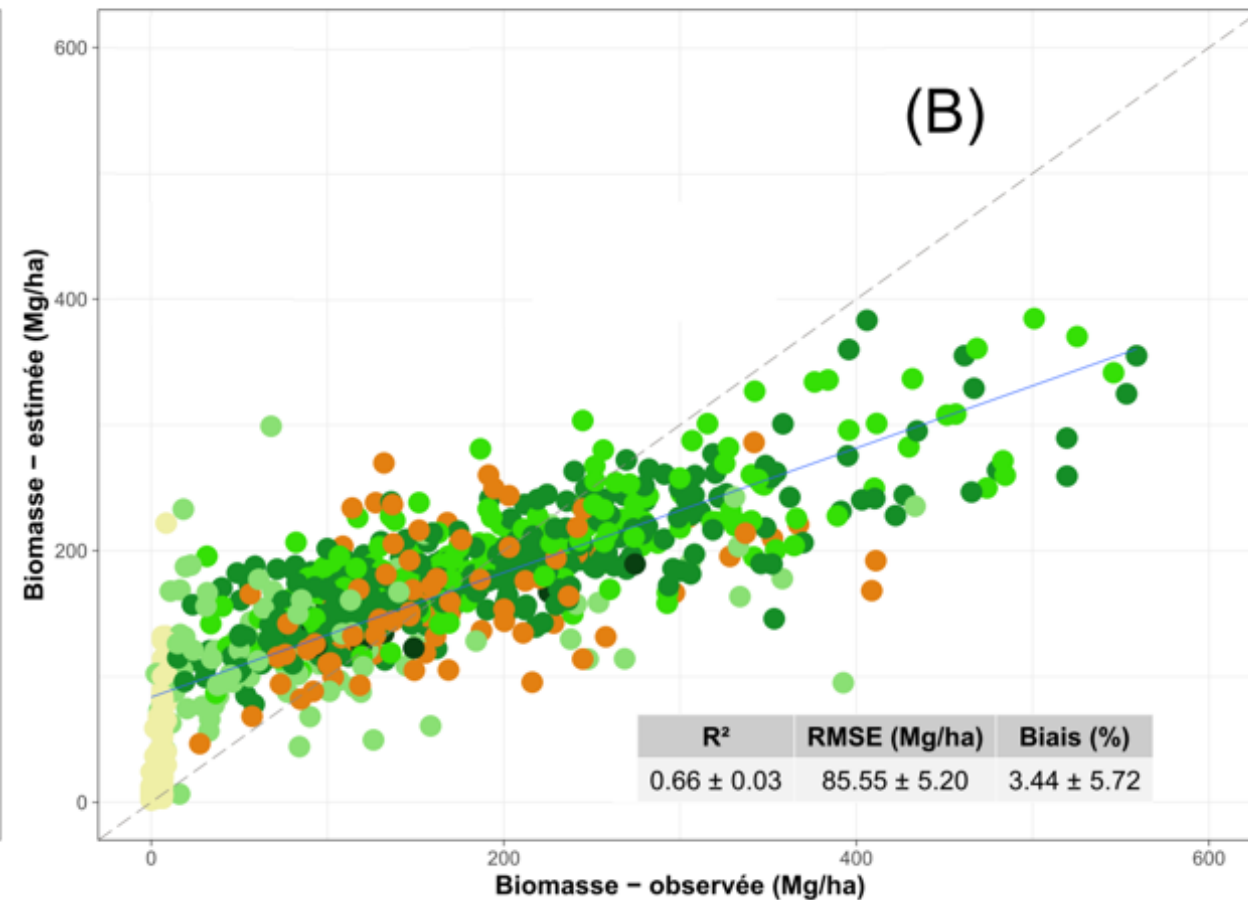
RÉSULTATS AXE 2

Qualité du modèle de la biomasse aérienne

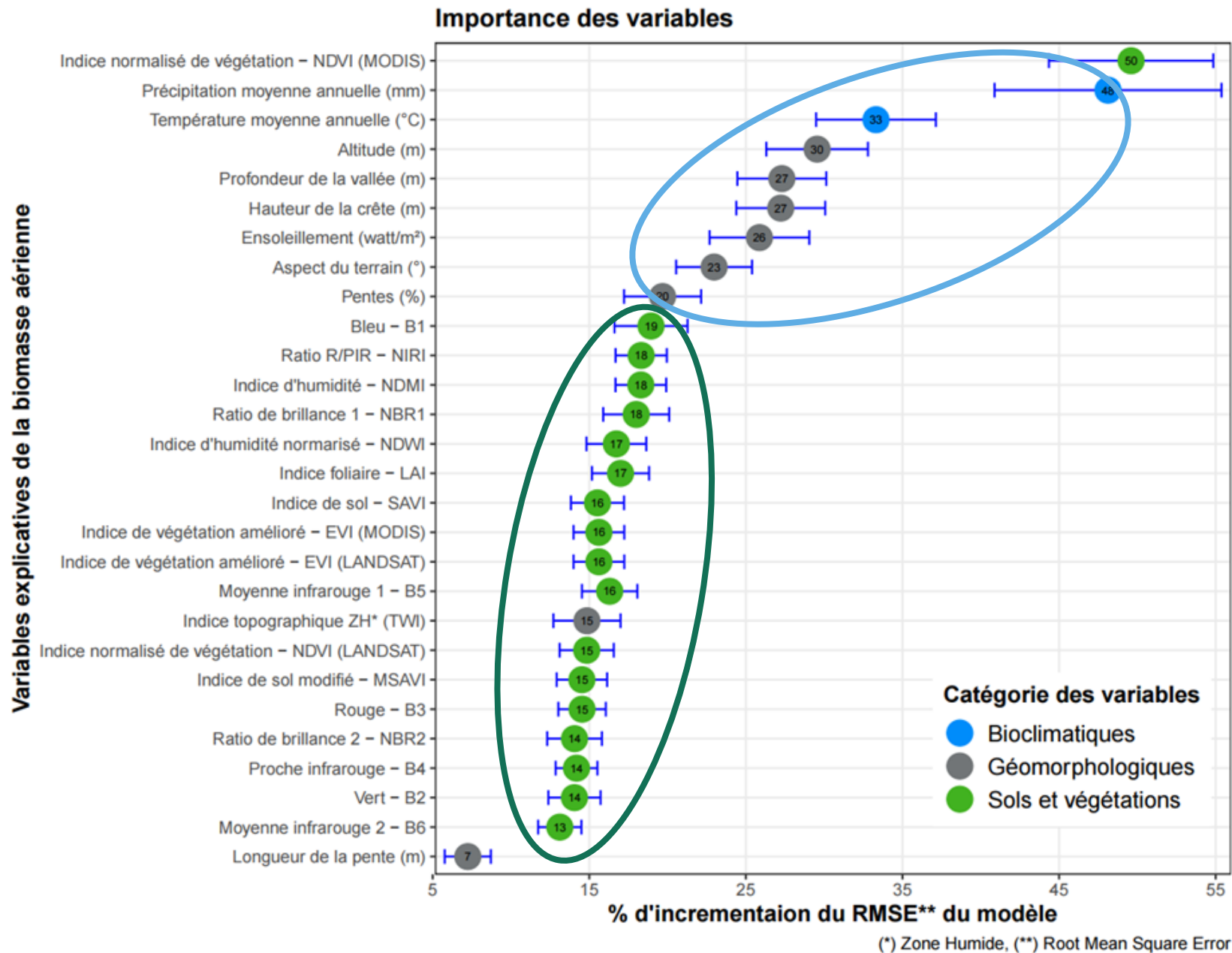
Calibration (70%)



Validation (30%)

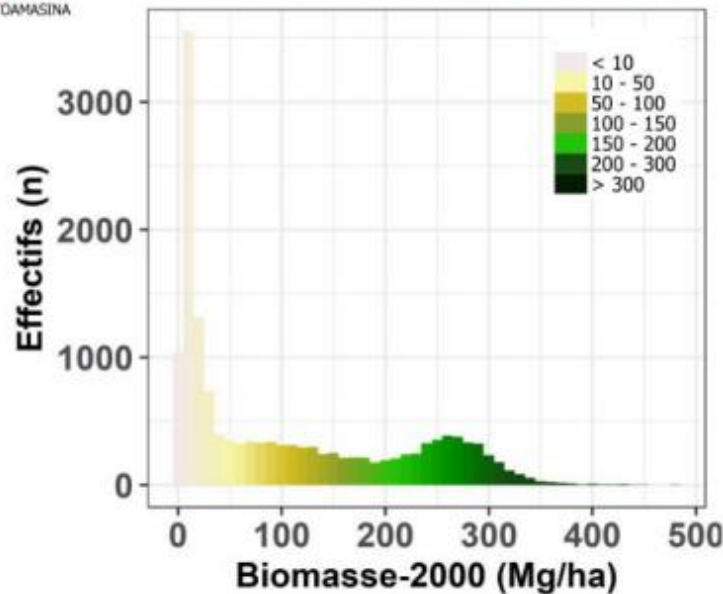


Importance des variables explicatives

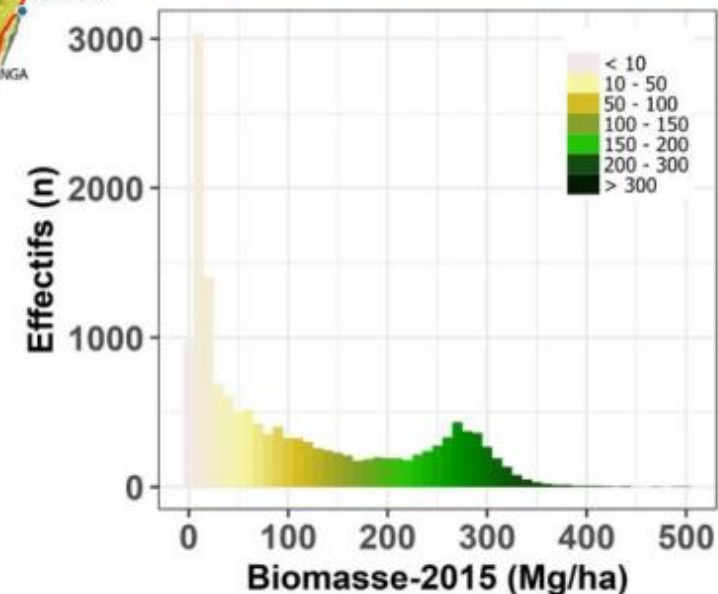
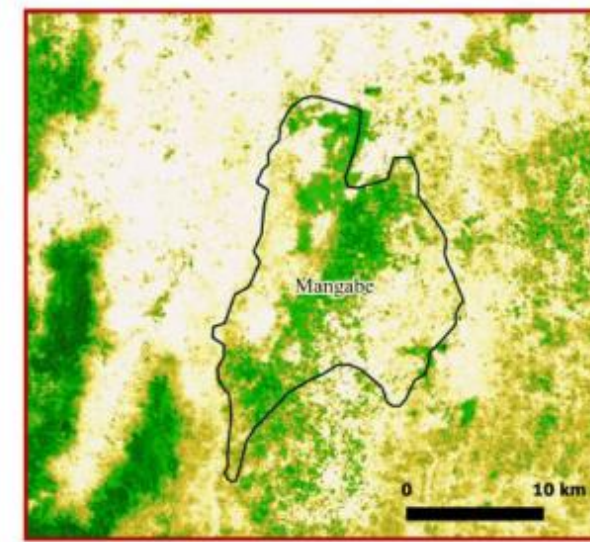


Cartes de la biomasse aérienne des forêts

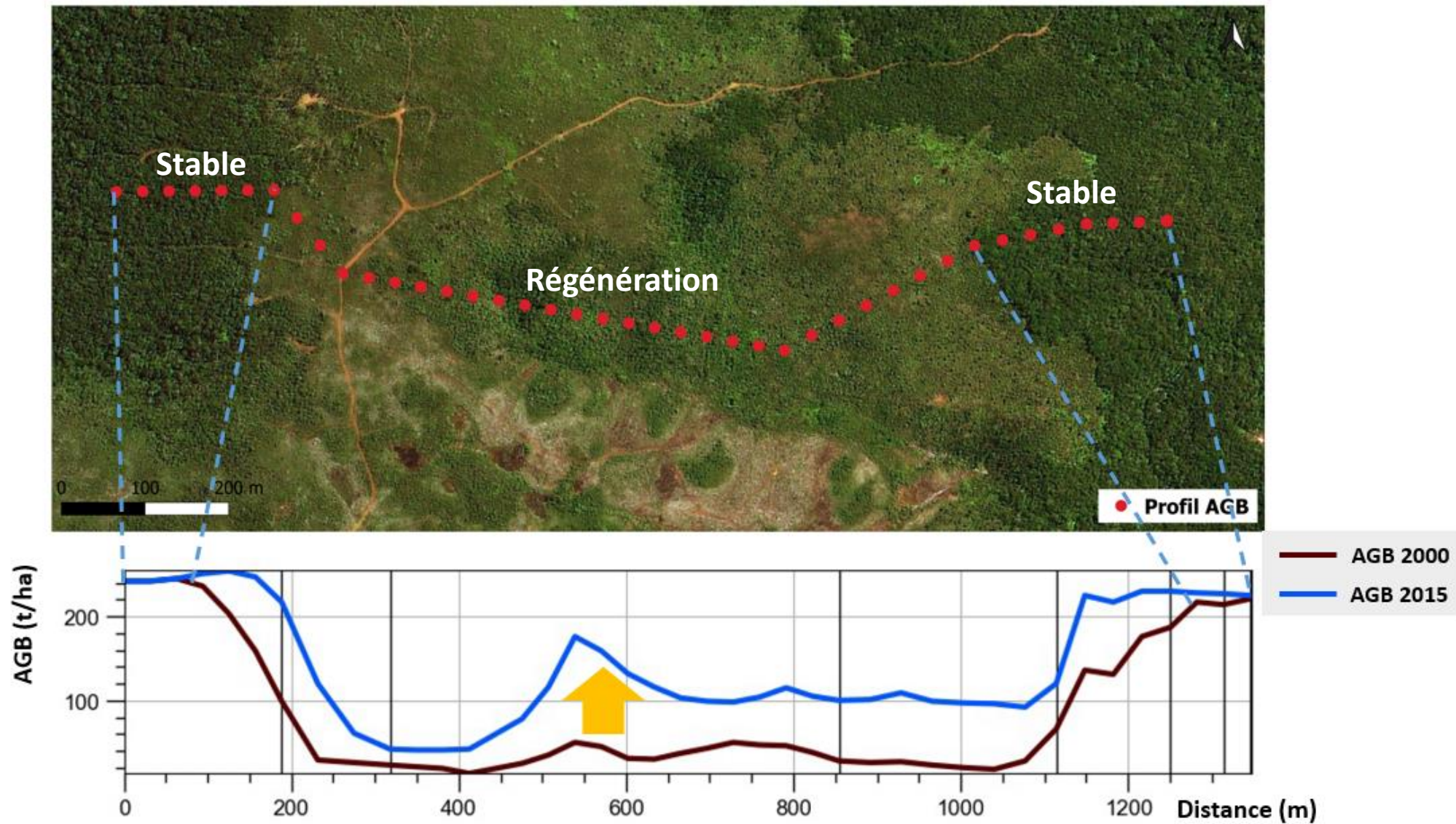
Cartes de la biomasse aérienne en 2000



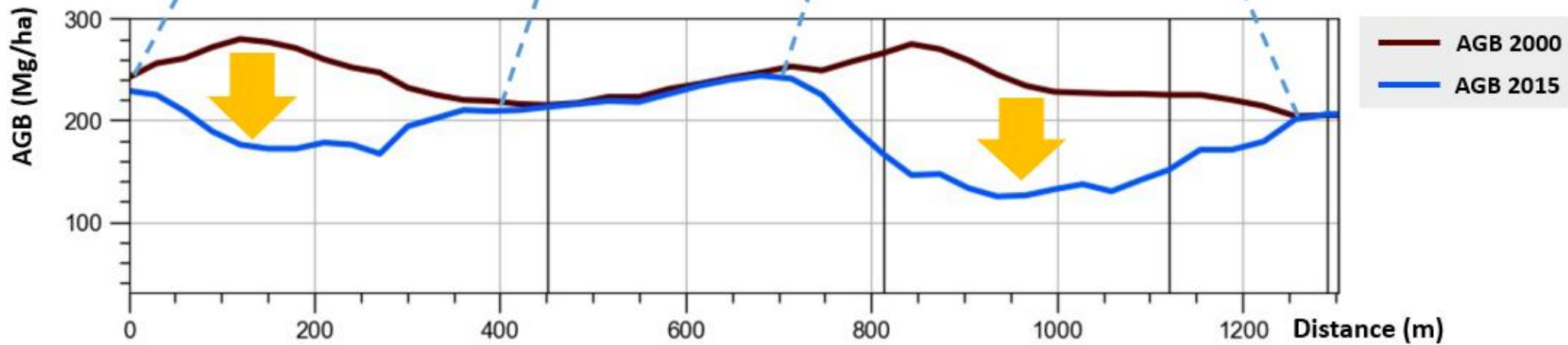
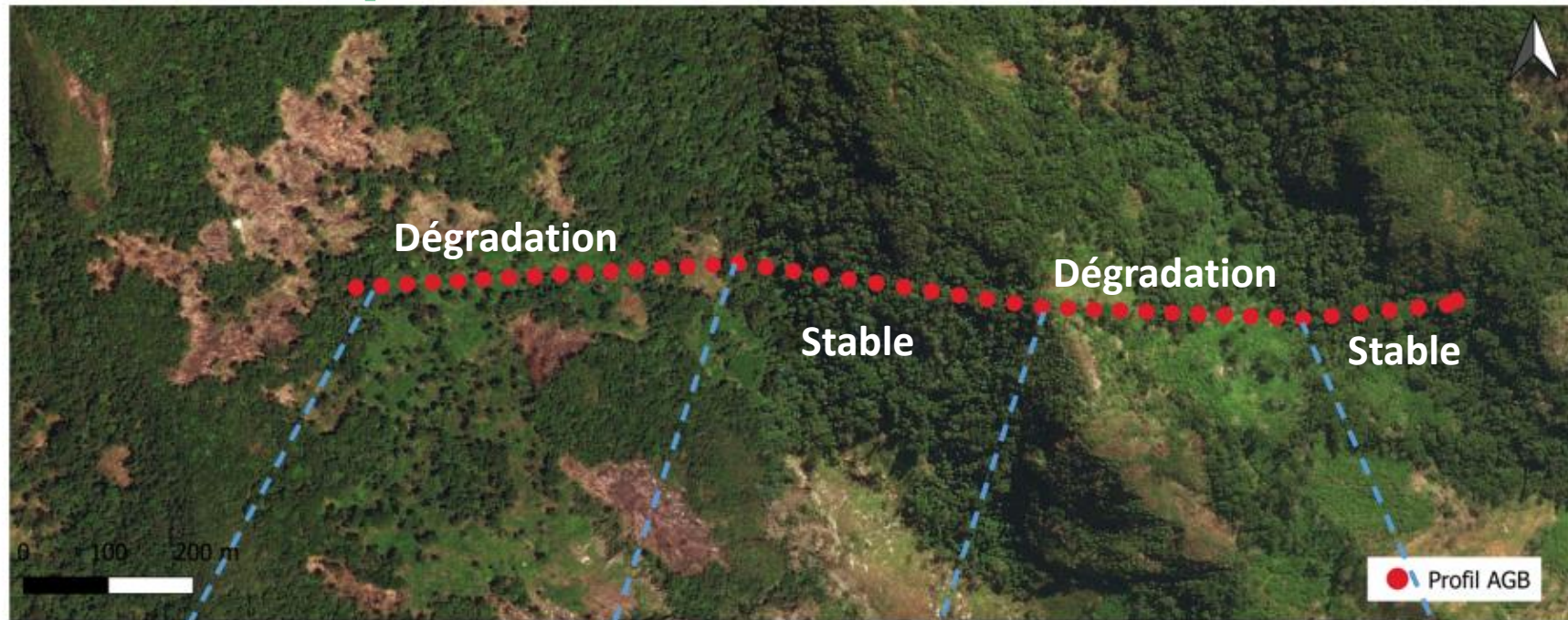
Cartes de la biomasse aérienne en 2015



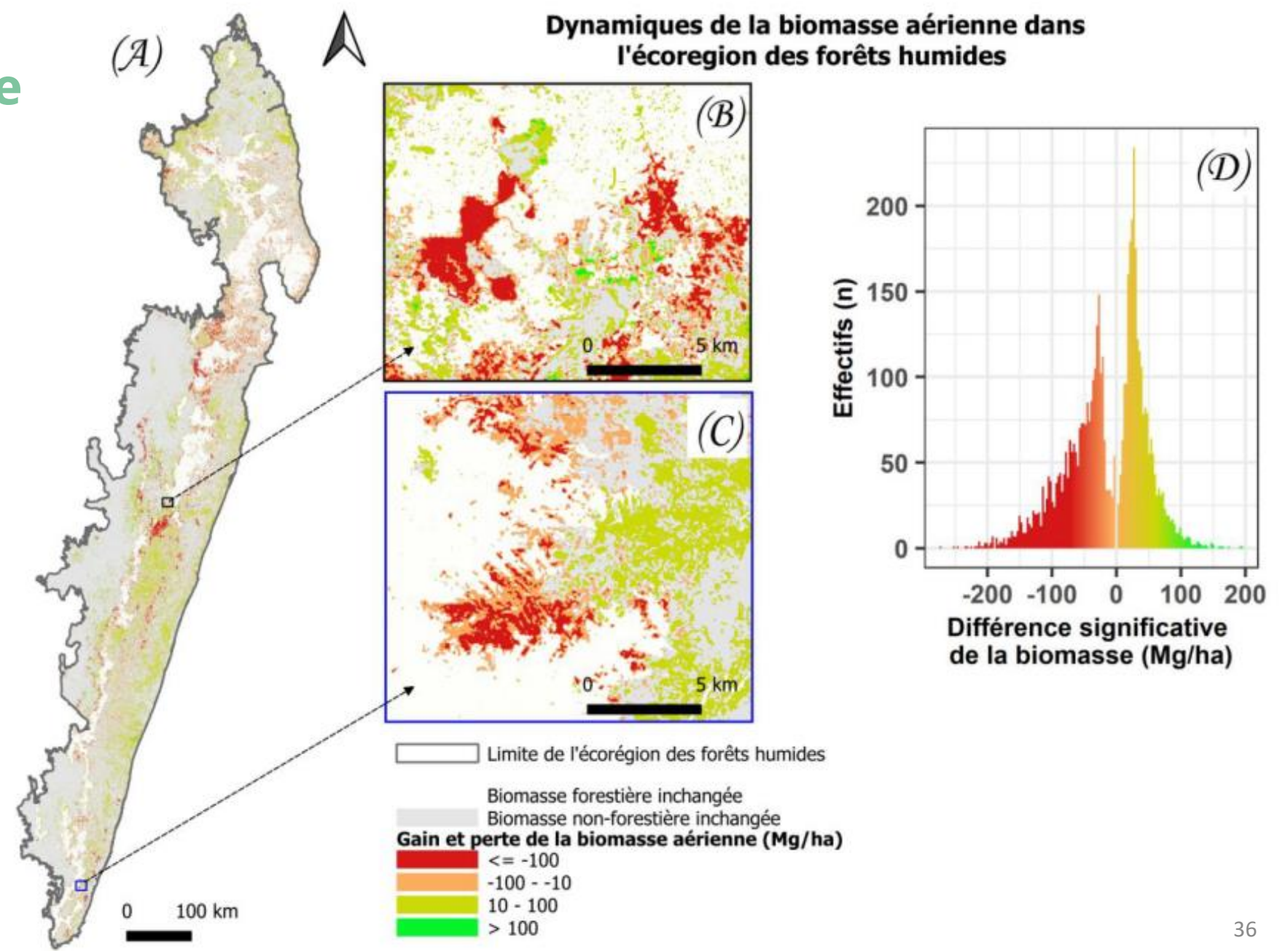
Observation d'un profil de biomasse (1/2)



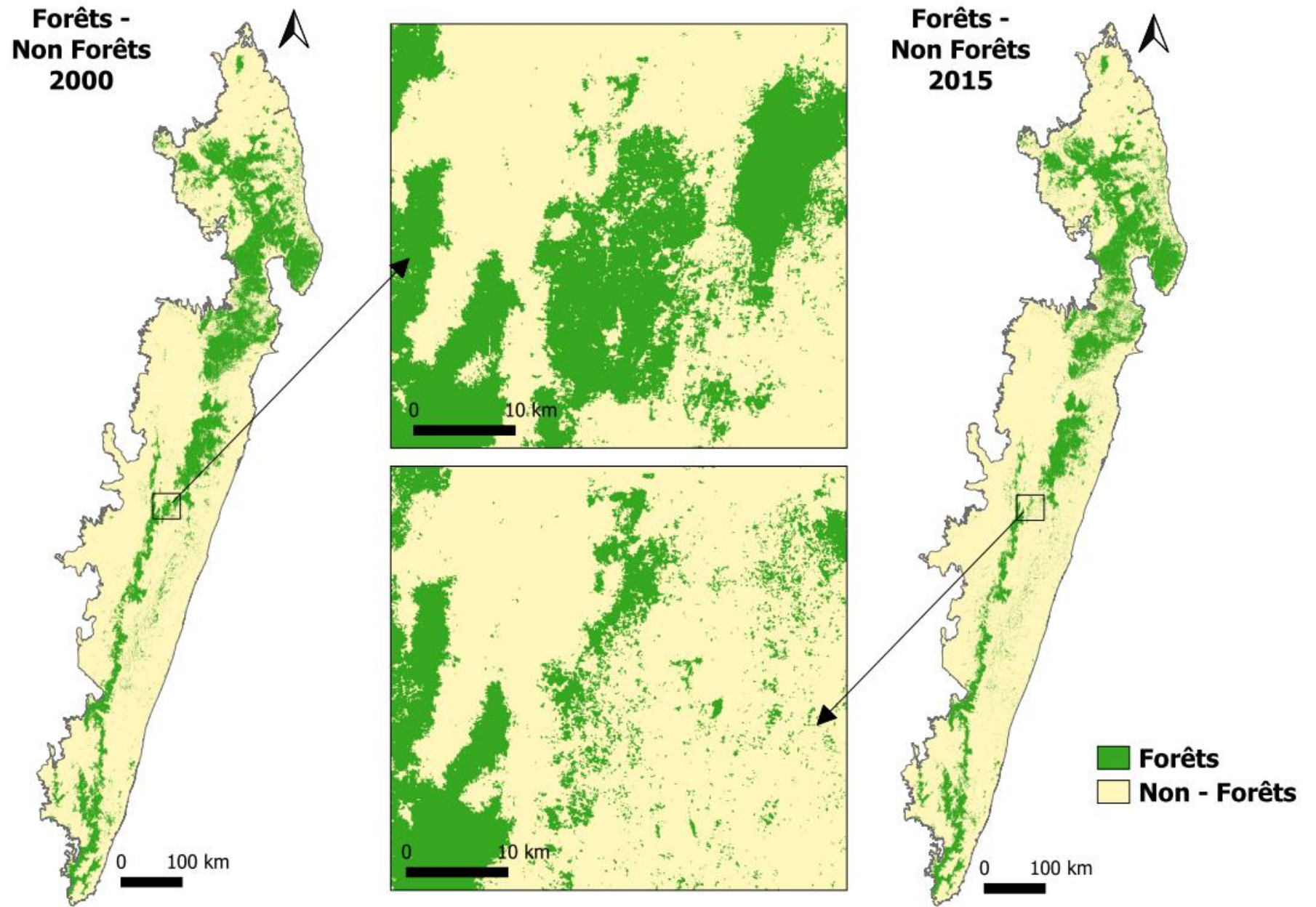
Observation d'un profil de biomasse (2/2)



Carte de dynamique de biomasse



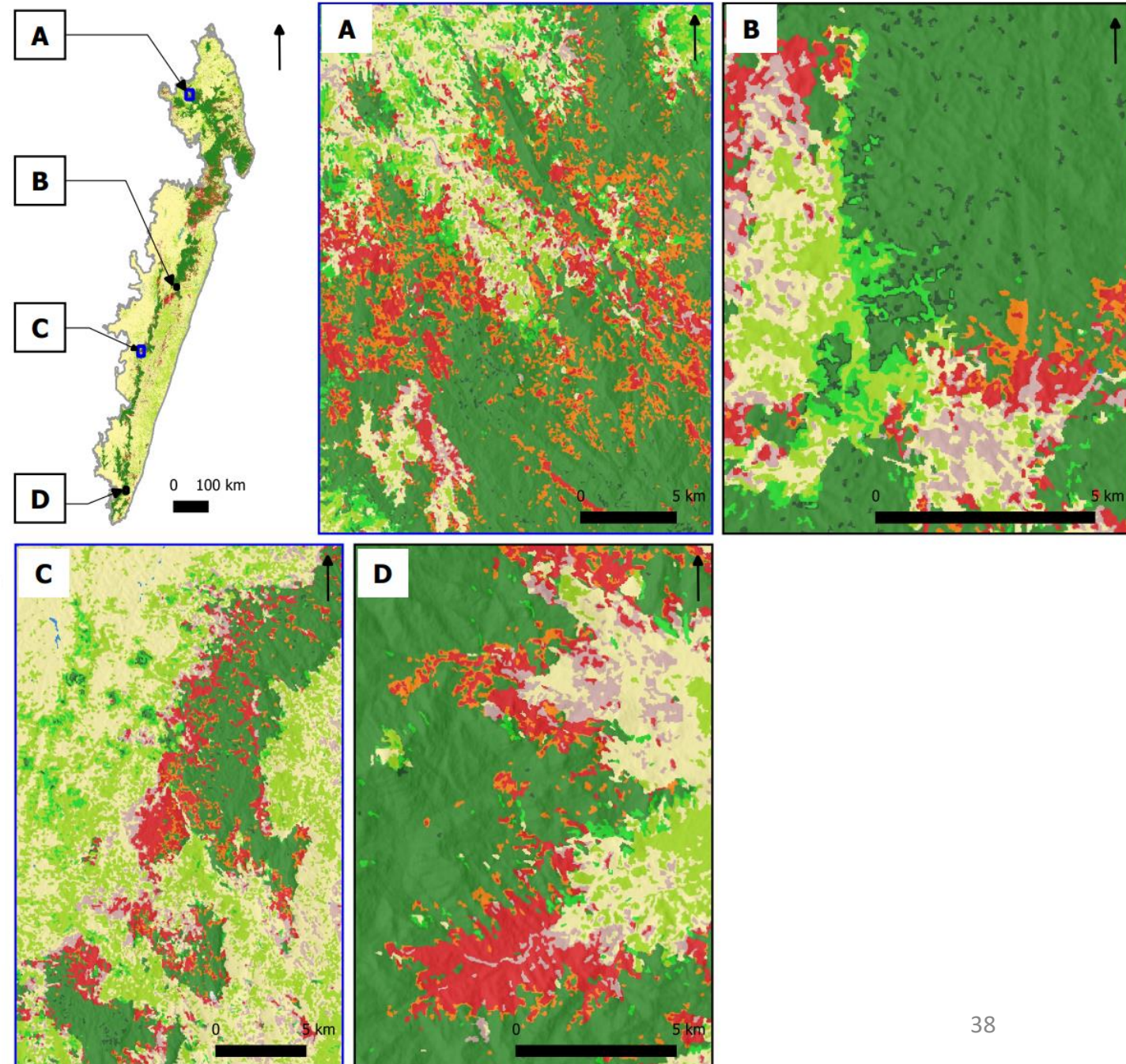
Carte de couvert forestier en 2000 - 2015



Carte finale de dégradation et de régénération

Légende

- Limite de l'écoregion des forêts humides
- Maintien du couvert
- Maintien du couvert avec renforcement de stock
- Dégradation
- Déforestation
- Régénération forestière
- Régénération non forestière (vieille jachère)
- Zone de culture et jachère
- Dégradation du sol
- Zones humides



Précision de la carte de dégradation et régénération forestière

Catégorie de changement d'affectation des terres	Précision d'utilisateur
Maintien du couvert	96 ($\pm 2,7$)%
Dégradation forestière	85 ($\pm 7,0$)%
Déforestation	83 ($\pm 7,4$)%
Régénération forestière	60 ($\pm 9,7$)%
Milieu inchangé hors forêts	90 ($\pm 2,1$)%
Régénération non forestière	73 ($\pm 7,0$)%



Précision globale = **88,5 ($\pm 1,7$) %**

Kappa = **82,80 %**

Superficies des classes de changement d'affectation des terres

Catégorie de changement d'affectation des terres	Superficie 2000 - 2015 (ha)	Couverture (%)	Superficie annuelle (ha/an)	Taux de changement (%/an)
Maintien du couvert forestier	3 674 920	17,1	-	-
Milieu inchangé hors forêts	12 641 334	58,7	-	-
Déforestation	942 767	4,38	62 851	1,28
Dégradation forestière	304 462	1,41	20 297	0,41
Régénération forestière	119 965	0,56	7 998	0,16
Régénération non forestière	2 859 732	13,2	189 465	-
Processus de dégradation du sol	1 012 416	4,7	67 494	-

Superficies des classes de changement d'affectation des terres

Catégorie de changement d'affectation des terres	Superficie 2000 - 2015 (ha)	Couverture (%)	Superficie annuelle (ha/an)	Taux de changement (%/an)
Maintien du couvert forestier	3 674 920	17,1	-	-
Milieu inchangé hors forêts	12 641 334	58,7	-	-
Déforestation	942 767	4,38	62 851	1,28
Dégradation forestière	304 462	1,41	20 297	0,41
Régénération forestière	119 965	0,56	7 998	0,16
Régénération non forestière	2 859 732	13,2	189 465	-
Processus de dégradation du sol	1 012 416	4,7	67 494	-

Superficies des classes de changement d'affectation des terres

Catégorie de changement d'affectation des terres	Superficie 2000 - 2015 (ha)	Couverture (%)	Superficie annuelle (ha/an)	Taux de changement (%/an)
Maintien du couvert forestier	3 674 920	17,1	-	-
Milieu inchangé hors forêts	12 641 334	58,7	-	-
Déforestation	942 767	4,38	62 851	1,28
Dégradation forestière	304 462	1,41	20 297	0,41
Régénération forestière	119 965	0,56	7 998	0,16
Régénération non forestière	2 859 732	13,2	189 465	-
Processus de dégradation du sol	1 012 416	4,7	67 494	-

Superficies des classes de changement d'affectation des terres

Catégorie de changement d'affectation des terres	Superficie 2000 - 2015 (ha)	Couverture (%)	Superficie annuelle (ha/an)	Taux de changement (%/an)
Maintien du couvert forestier	3 674 920	17,1	-	-
Milieu inchangé hors forêts	12 641 334	58,7	-	-
Déforestation	942 767	4,38	62 851	1,28
Dégradation forestière	304 462	1,41	20 297	0,41
Régénération forestière	119 965	0,56	7 998	0,16
Régénération non forestière	2 859 732	13,2	189 465	-
Processus de dégradation du sol	1 012 416	4,7	67 494	-



DISCUSSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

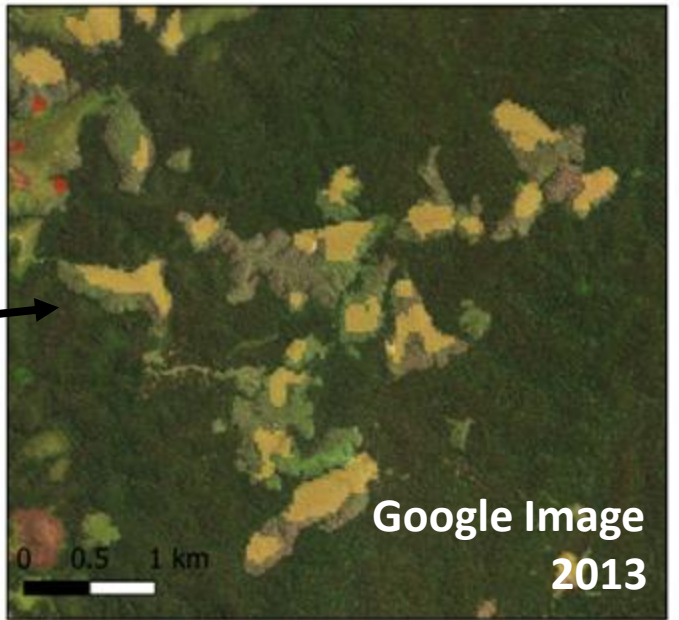
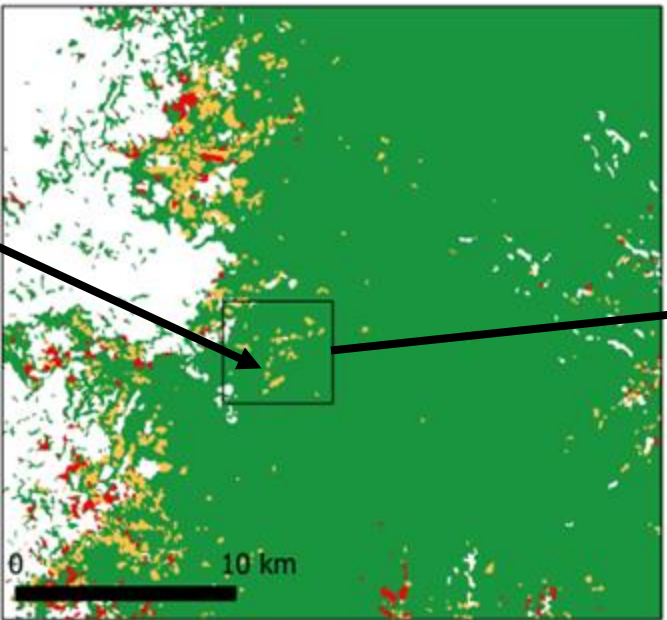


Estimation de la déforestation

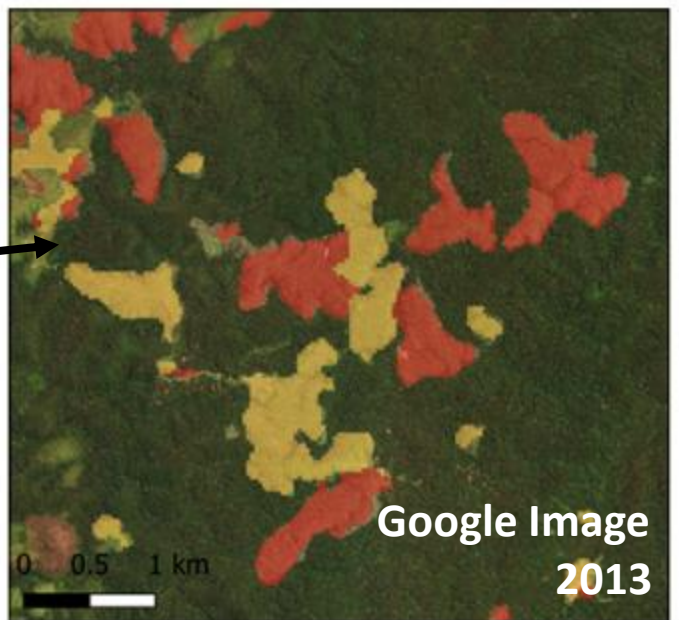
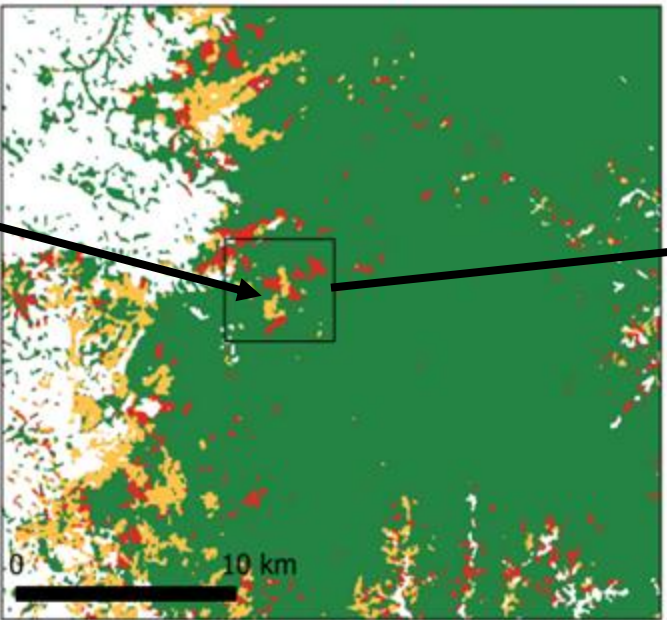
Combinaison des cartes nationales et globales 1954 - 2014

Date imprécis

Vielledent, 2018

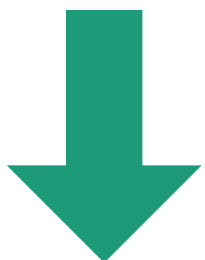


Présente étude



- Forêt restante en 2013/2014
- Déforestation entre 2005 - 2010
- Déforestation entre 2010 - 2013/2014
- Prairie, savane et culture

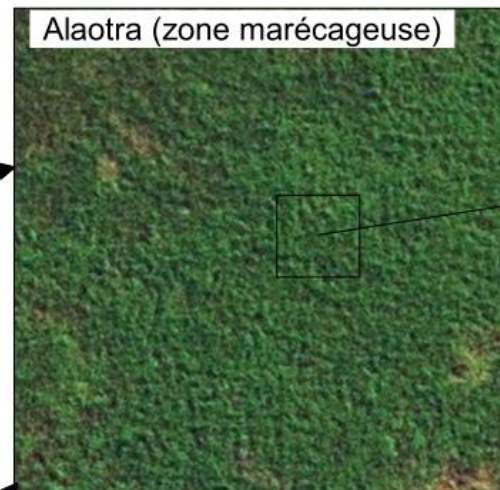
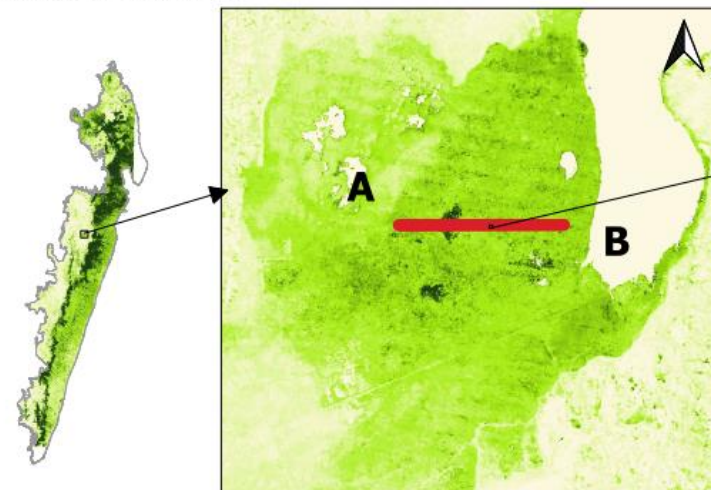
Estimation de la couverture de la canopée des arbres en 2000



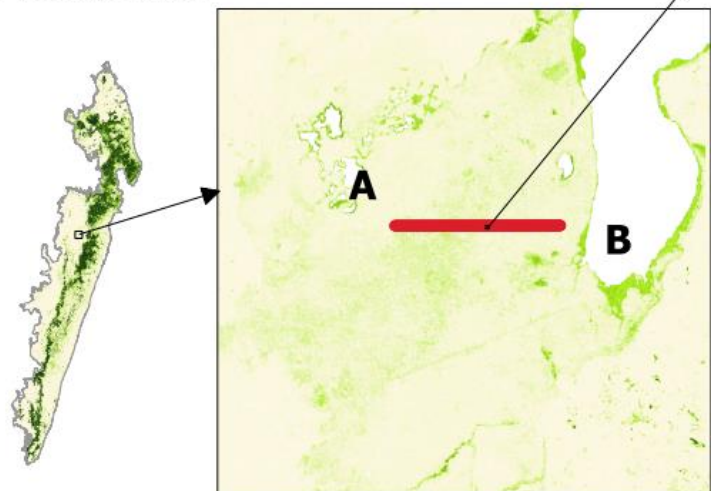
Forêts

- Hansen > 60 – 70%
- Cette étude > 30 %/ha

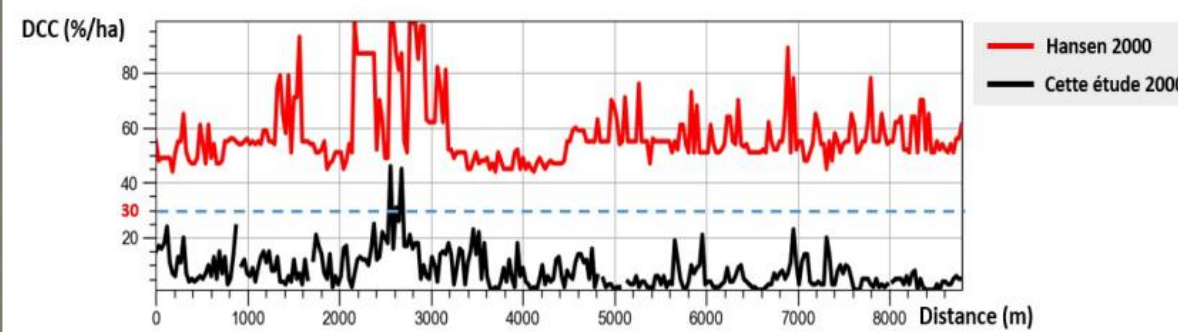
Hansen et al., 2013



Présente étude



Profil de DCC des arbres sur le transect [AB] de 10 km



Estimation de la biomasse forestière

	Hajj et al., 2017	Présente thèse
R ²	0,71	0,66 (±0,03)
Écart quadratique moyen, RMSE (Mg/ha)	71	85,55 (±5,20)
Source des variables utilisées	<u>LiDAR</u> , WorldClim, MODIS, SRTM (V1)	WorldClim, LANDSAT, MODIS, SRTM (V2)
Résolution spatiale de la carte (m)	250	30
Dates de validité de la carte	~2010	2015 (±1)
Biomasse moyenne estimée (Mg/ha)	281	249
Biomasse maximale estimée (Mg/ha)	650	600

Perspectives

- **Déforestation, Dégradation et Régénération forestière** → vers un **SUIVI ANNUEL** avec **SENTINEL 2** (10m), utilisant les mêmes méthodes
- **Intégration de hauteur de la végétation,**
 - Modèle de **Biomasse**
 - Modèle de **l'état du couvert forestier**
- **Inventaire biomasse aérienne de la végétation non forestière (savanes, jachères,...)**



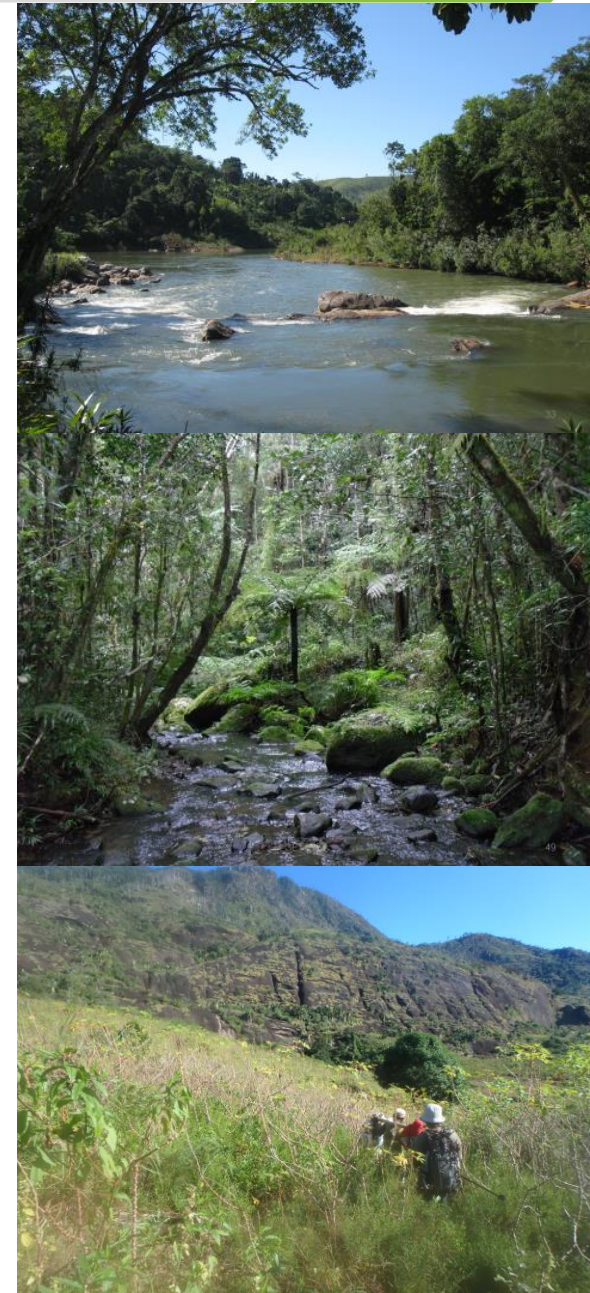


CONCLUSION GÉNÉRALE



- **Méthodes appropriées** pour estimer l'évolution du couvert forestier dans **l'écorégion des forêts humides**
 - **Déforestation** → Analyse multodate d'images satellitaires
 - **Dégradation et Régénération forestière** → croisement entre la variation de la biomasse forestière et l'état du couvert forestier

- **Hypothèses 1 et 2 vérifiées**
 - **H1**, analyse/classification simultanée des données satellitaires multidates → **Déforestation**
 - **H2**, les variables Géomorphologiques et bioclimatiques importantes → **Cartographie de biomasse et densité de la couverture de la canopée**



- **Apport dans la gestion des ressources naturelles à Madagascar**
 - Nécessaire pour alimenter un **Système National de Suivi des Forêts (SNSF)**
 - Outils innovants, informations nouvelles pour la **gestion des ressources naturelles** et de la biodiversité de Madagascar

- **Méthodologie, extrapolable dans les autres écorégions forestières, forêts sèches, forêts épineuses**





Merci

pour votre attention!

avez-vous des
Questions?