UNIVERSITE DE MONTPELLIER II

Sciences et Techniques du Languedoc

École Doctorale *Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences, Environnement* (SIBAGHE)

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Dynamique des forêts tropicales par télédétection

Résultats et perspectives pour les mangroves



Présenté par

Christophe PROISY

Soutenue le 13 Janvier 2014

Jury composé de :

Madame Agnès Begué, CIRAD, Montpellier, Rapporteur

Monsieur Marc Robin, Professeur, Université de Nantes, Rapporteur

Monsieur Kamel Soudani, Maitre de Conférences, Université Paris Sud XI, Examinateur

Monsieur Eric Tabacchi, Chargé de Recherche CNRS, Toulouse, Rapporteur

Monsieur Nicolas Arnaud, Directeur de Recherche CNRS, Montpellier, Examinateur

IRD, UMR AMAP, c/o CIRAD, TA A51 PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 05, France

christophe.proisy@ird.fr tél: 04.67.61.75.45

IRD, UMR AMAP, c/o CIRAD, TA A51 PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 05, France
christophe.proisy@ird.fr tél: 04.67.61.75.45

"Car le végétal est aussi le langage de l'organisme silencieux que représente la terre. Du lichen initial au séquoia, le peuple végétal est infini : de forme, de taille, de fonction, de substance, de couleur, de floraison, de fructification infiniment diversifiées."

Pierre Rabhi



"So it is not true, …, that we each should "cultivate our own valley, and not attempt to build roads over the mountain ranges… between the sciences."

Anderson, P.W., 1972. More Is Different. Science 177, 393-396.
Philip Warren Anderson a reçu le Prix Nobel de Physique en 1977.

IRD, UMR AMAP, c/o CIRAD, TA A51 PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 05, France
christophe.proisy@ird.fr tél: 04.67.61.75.45

SOMMAIRE

ACRONYMES 2
PREAMBULE 3
PARTIE 1 - RESUME DE CARRIERE 5
1. CURRICULUM VITAE 6
2. PUBLICATIONS 9
3. ENCADREMENTS D'ETUDIANTS 14
PARTIE 2 - STRATEGIE AUTONOME DE RECHERCHE 16
1. CONTEXTE 17
1.1 A la fenêtre des changements 17
1.2 Des enjeux pour l'étude des forêts tropicales? 17
2. OBJECTIFS, OBJETS D'ETUDE, DEMARCHE 19
2.1 Objectifs 19
2.2 Objets d'étude 19
3. REGION D'ETUDES, TERRAIN, IMAGES ET METHODES 21
3.1 Tous en mangrove! 21
3.2 Terrain 29
3.3 Télédétection 34
3.4 Mise en œuvre d'une chaine d'analyse 36
4. DES RESULTATS METHODOLOGIQUES 43
4.1 Sur les observations radar 43
4.2 Sur l'imagerie optique à THRS 49
4.3 Synthèse sur les recherches méthodologiques 54
5. DES RESULTATS THEMATIQUES SUR LES MANGROVES 56
5.1 Structuration et biomasses épigées 56
5.2 Dynamique côtière 58
5.3 Synthèse sur les recherches thématiques 62
6. UN PROJET DE RECHERCHE SUR LES MANGROVES 63
6.1 Justification (si besoin était) 63
6.2 Axes de recherche 63
6.3 Vers un réseau de stations d'observations 66
7. CONCLUSION GENERALE 72
8. REFERENCES 73
PARTIE 3 - TEXTES DES PRINCIPALES PUBLICATIONS 81

ACRONYMES

CNES: Centre National d'Études Spatiales, Toulouse.

CLS: Collecte Localisation Satellites

ASTRIUM: Filiale d'EADS

CEOS: Committee on Earth Observation Satellites

CREOCEAN: Société de Services et Conseil en Environnement Littoral et Marin et Océanographie

DEAL: Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

ENGREF: École National du Génie Rural des Eaux et Forêts.

FUI: Fond Unique Interministériel.

GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IEPA: Institut de Recherches Scientifiques et Techniques de l'Amapá, Macapá, Brésil.

INPE: Institut National d'Études Spatiales, São José dos Campos, Brésil.

p. ex.: par exemple

RSO: Radar à Synthèse d'Ouverture

SEPANGUY: Société d'Etude, de Protection et d'Aménagement de la Nature en Guyane

THRS: Très Haute Résolution Spatiale.

TOSCA: Programme CNES 'Terre Océan Surfaces Continentales Atmosphère'.

UERJ: Université de l'État de Rio de Janeiro, Brésil.

UFPA: Université Fédérale du Pará, Belém, Brésil.

UNFCCC: United Nations Framework on Climate Change

UPS: Université Paul Sabatier, Toulouse.

UMR AMAP: UMR 'botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes', Montpellier.

UMR CEREGE: Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement, Aix en Provence.

UMR CESBIO: Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, Toulouse.

UMR ECOLAB: Laboratoire d'Écologie Fonctionnelle et Environnement, Toulouse.

UMR LOG: Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Wimereux.

UMR TETIS: UMR Territoires Environnement, Télédétection et Information Spatiale, Montpellier.

PREAMBULE

Voici *'une notice comprenant une synthèse des recherches et des encadrements d'étudiants'* (je reprends les termes employés par l'École Doctorale SIBAGHE).

J'ai donc tenté d'écrire un livret groupant les indications relatives à la construction, à l'entretien et à l'utilisation… de mon projet de recherche.

La première partie de cette notice résume les caractéristiques factuelles du projet (qui je suis, d'où je viens, ce que j'ai fait jusqu'à présent et avec qui).

La seconde partie décrit le scénario que j'essaie de mettre en place pour acquérir et partager des connaissances. Seules les grandes lignes de ce scénario à long terme sont décrites.

La dernière partie donne une série de résultats validés par des personnes dont la compétence est reconnue (mais l'identité cachée).

Christophe Proisy

PARTIE 1 - RESUME DE CARRIERE

1. CURRICULUM VITAE

- *Christophe PROISY*

Chargé de Recherche de 1ère classe à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
Docteur en Télédétection Spatiale de la Biosphère Continentale
Né le 19 février 1968 à Angers, Maine et Loire (nationalité française)

- *Adresse professionnelle*

IRD, UMR AMAP c/o CIRAD
TA A51, PS2, Boulevard de la Lironde
34398 Montpellier cedex 5, France
Tél.: 04.67.61.75.45; Mél. christophe.proisy@ird.fr

- *Diplômes et grades universitaires*

2009 : Accréditation à la Direction de Recherches (ADR), Ecole Doctorale SIBAGHE (Université de Montpellier 2), France
1999 : Doctorat en télédétection radar pour l'étude de la dynamique des écosystèmes forestiers, Université Paul Sabatier (UPS), Toulouse, France
1993 : Diplôme d'Études Approfondies en Astrophysique, Géophysique et Techniques Spatiales, Université Paul Sabatier Toulouse III, France
1992 : Maitrise d'Électronique Électrotechnique et Automatique, Université de Nantes, France
1990 : DEUG Mathématiques et Sciences et Structures de la Matière, Université d'Angers, France

- *Fonctions occupées*

Depuis juin 2006 : Chargé de Recherche IRD (CR1), UMR AMAP, Montpellier, France
Janvier 2005 : Avancement au grade de CR1, UMR AMAP, Cayenne, Guyane Française
Novembre 2001 : Chargé de Recherche IRD (CR2), UMR AMAP, Cayenne, Guyane Française
2001 : Chargé de Recherche IRD (CR2 en CGRA1), Toulouse, France
1999-2001 : Contractuel du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), UMR CESBIO, Toulouse
1995 -1999 : Doctorant UPS, UMR CESBIO, Toulouse
1993-1995 : Volontaire à l'Aide Technique, ENGREF, Kourou, Guyane Française

- *Activités scientifiques*

Sujet: Étude de la dynamique des forêts tropicales par télédétection
Objets d'étude : Mangroves amazoniennes (90%), forêts tropicales de terre ferme (10%)

Thématiques:
- *Écologie forestière : architecture des palétuviers; biomasse et structuration des peuplements forestiers; processus de colonisation.*
- *Dynamique côtière: morphodynamique, accrétion vaseuse, érosion (transfert sédimentaire).*

Méthodes:
- *Physique de la mesure: analyse de la diffusion de signaux ou éclairements dans les couverts forestiers; du domaine optique aux micro-ondes.*
- *Informatique et modélisation: algorithmes et traitement de flux de données spatiales ou de différentes origines; développement de modèle et d'interfaces-utilisateurs.*
- *Campagne de mesures de terrain: de l'inventaire forestier aux descriptions d'arbres par approches 3D de géomètre (tachéomètre laser); échantillonnage des parcelles par interprétation des images à très haute résolution spatiale (THRS); méthodes d'accès, de déplacement et de travail en mangroves (sites isolés).*

Publications
- 24 articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture.
- 3 chapitres de livre avec comité de lecture.
- 4 conférences internationales invitées.
- 45 communications dans des conférences en grande majorité internationales.

Animation scientifique
- Réseau de chercheurs franco-brésiliens pour l'étude des écosystèmes côtiers amazoniens (ECOLAB).

- Président de l'Association Ecolab-Guyane (aide et promotion des échanges scientifiques notamment d'étudiants entre le Brésil, la Guyane Française et le France). 2006-2013.
- Co-animateur des Jeudis de l'AMAP, séminaires et conférences organisés au sein de l'UMR AMAP.

Lecture d'articles et évaluation de projets scientifiques et pédagogiques

- *Revues scientifiques:*

  Remote Sensing of Environment (9), International Journal of Remote Sensing (2), ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (2), Remote Sensing (2), Wetlands Ecology and Management (2), Forest Ecology & Management (1), Landscape and Urban Planning (1), Estuarine, Coastal & Shelf Science (1).

- *Projets évalués:*

  1: pour la Fondation de la Recherche pour la Biodiversité (FRB); 1 pour le WWF et la SEPANGUY.

Collaborations effectives

- Collaborations nationales
  AgroParisTech (Montpellier); ASTRIUM (Toulouse); CLS (Toulouse); CNES (Toulouse); CREOCEAN (Montpellier); UMR CEREGE (Aix en Provence); UMR CESBIO (Toulouse); UMR ECOLAB (Toulouse); UMR LOG (Wimereux); UMR TETIS (Montpellier).
- Collaborations internationales

  Département d'Observation de la Terre, Université d'Aberystwtyh, Pays de Galle, Royaume Uni.

  Département des Sciences Forestières, Université de Dresden, Allemagne.

  Faculté d'Océanographie, Université de l'Etat de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brésil.

  Université Fédérale du Pará, Belém, Brésil.

  Institut de Recherches Scientifiques et Techniques de l'Etat d'Amapá (IEPA), Macapá, Brésil.

  Institut National de Recherche Spatiale (INPE), São José dos Campos, Brésil.

Projets scientifiques depuis 2001 (année d'entrée à l'IRD)
(responsable=PI; participant=PA; tâche de travail=WP).

- **Réalisés:**
  1. CPER Guyane. WP "Etude de la forêt guyanaise à partir d'observations aériennes et spatiales" (2002-2004), co-PI.
  2. PNEC Chantier Guyane. (2002-2004). PA.
  3. Kyoto & Carbon Initiative (2005-2008). PA.
  4. ANR BLANC "STAMP" (2008-2011). PA.
  5. INSU/EC2CO (2009-2011), PA
  6. TOSCA/CNES "FOTO_METRICS" , PI.
  7. TOSCA/CNES "TropiSAR", PA.
  8. FUI "INFOLITTORAL-1", WP PI.
- **En cours:**
  9. AIRD/Guyamazone "BIOFLOR", 2012-2014, PA.
  10. INDESO, WP 'Mangrove & Integrated Coastal Zone Management' (2013-2017), WP PI.
  11. FONASO Erasmus Mundus Phd program, 2013-2016, co-PI.

Séjours professionnels au Sud

- Séjours en Guyane Française:
  - 1993-1995: ENGREF, Volontariat à l'Aide Technique, Kourou.
  - Affectation IRD-Guyane, Déc. 2001- Juin 2006, Cayenne.
  - Mission Longue Durée, IRD-Guyane, Fév. à Mi-avril, 2011, Cayenne.
- Séjours courts (missions) :
  - Environ 8 mois cumulés en Guyane Française depuis 2006.
  - Environ 3 mois au total au Brésil (Amapá et Pará).
  - 3 semaines en Indonésie (dont 2 dans le delta de la Mahakam, Kalimantan).

- Langues
  - Anglais : lu, écrit, parlé (usage professionnel courant).

- Portugais : lu (usage professionnel courant), parlé et écrit (niveau compréhensible pour conférence et échanges de messages électroniques).

Activités d'enseignement

1. Travaux Dirigés "Synthèses bibliographiques", module 'Écologie des Forêts Tropicales', Formation GEEFT-Master 'Fonctionnement des Écosystèmes Naturels et Cultivés'. 9 h annuelles.
2. Cours magistral: 'Mangroves: interface maritime', Master 'Recherche Biodiversité et Écosystèmes Continentaux et Marins, option "Océanologie" et Master Pro 'Gestion Intégrée des Écosystèmes Marins Côtiers', Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 2007.
3. Cours magistral: en Télédétection radar, Université Antilles-Guyane, 10h en 2009, Cayenne.

Implications institutionnelles à l'IRD

- Membre élu de la commission IRD CGRA1 'Ingénierie et expertise' (2008-2012).
  - Membre de jury pour un concours externe CR2 commun CSS1-CGRA1, "Physicien du signal ou hydrologue (observation de la terre par techniques satellitaires pour l'analyse des dynamiques de l'hydrosphère", juin 2009.
  - Membre de jury pour un concours interne IR2, Février 2012.
  - Examens d'activités d'une vingtaine de dossiers d'ingénieurs, assistants-ingénieurs et techniciens
  - Évaluation de deux dossiers de Laboratoire Mixte International (LMI)
- Membre de la commission d'homologation des Centres Automatisés de Traitement de l'Information (CATI) et demandes de Primes pour la Fonction Informatique (PFI). Depuis 2011.

Responsabilités au sein de l'UMR AMAP

Mon positionnement au sein de l'UMR AMAP correspond à ma motivation de créer du lien entre échelles spatiotemporelles, méthodes de mesure et d'analyse et disciplines. Au travers des prises de responsabilités explicitées ci-dessous, je souhaite démontrer que les observations spatiales ont un rôle important à jouer dans la mesure des propriétés structurales de la végétation. C'est un souci, à la fois, de 'démocratisation' de l'usage des images satellites, mais également, de rigueur dans l'analyse de leur potentiel (cf. *'Pretty pictures are not enough'*). Réciproquement, mon projet de recherche trouve vraiment matière à se développer au contact de mes collègues de l'UMR, en particulier, pour les compétences assez uniques et rassemblées d'analyse botanique de l'architecture des végétaux.

Pour le prochain quinquennat 2015-2020 (s'il y a évaluation positive de l'AERES), les activités scientifiques de l'UMR AMAP se structureront autour d'une quinzaine de thèmes (l'organisation en équipes reste administrativement pertinente). Je me suis proposé comme animateur de deux thèmes.

Le premier thème est nommé "S*tructure et dynamique 3D des forêts tropicales*". Je le codirigerai avec Nicolas Barbier (IRD). Il vise à mettre au point et évaluer des méthodes de mesure et des modèles décrivant 1) la structure 3D et la dynamique de grands arbres tropicaux, 2) les peuplements de forêts tropicales et 3) la diffusion des signaux dans les couverts forestiers. Le thème est centré pour apporter des informations sur l'écologie des forêts tropicales (terre ferme et mangroves) dans différents contextes environnementaux (Afrique Centrale, Guyane Française, Inde et Indonésie) en s'appuyant sur des bases de données rassemblées (multi-échelles, multi-sources, multi-pays, etc.).

Le second thème est intitulé "*Écologie appliquée et services environnementaux*". Je le codirigerai avec Alexia Stokes, INRA). Il vise à identifier les services environnementaux et les mécanismes de résilience écologique d'écosystèmes-cibles (dont les mangroves) quand ils sont soumis à des contraintes naturelles (glissement de pentes, érosion, plantes invasives, etc.) ou anthropiques (fragmentation, conversion, etc.).
Les travaux à développer dans ces deux thèmes interagiront avec les connaissances botaniques et écologiques produites par les thèmes "Diversité et Plasticité des formes de croissance et des Traits Architecturaux" ou "Dynamique de la biodiversité végétale des forêts tropicales humides" et les savoir-faire méthodologiques développés dans les thèmes "Mathématiques pour les plantes et plantes pour les mathématiques" et "Développement de logiciel générique pour la modélisation des plantes".

2. PUBLICATIONS

- **Articles dans les revues à comité de lecture (ACL)**
  (IF= Facteur d'impact actuel; IF5 = facteur d'impact sur 5 ans)
  Nombre total d'articles ACL= 24; Avec IF>0.8 = 20;
  Moyenne des Facteurs d'Impact= 3.6

1. Nascimento Jr, W.R., Souza-Filho, P.W.M., **Proisy, C.**, Lucas, R.M., & Rosenqvist, A., **2013**. *Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 117, 83-93. **IF5=2.8**
2. Zhou, J., **Proisy, C.**, Descombes, X., le Maire, G., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Viennois, G., Zerubia, J., & Couteron, P., 2013. *Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images.* Forest Ecology and Management, 301, 129-141. **IF5=2.9**
3. Anthony, E.J., Gardel, A., **Proisy, C.,** Fromard, F., Gensac, E., Peron, C., Walcker, R., & Lesourd, S., **2013**. *The role of fluvial sediment supply and river-mouth hydrology in the dynamics of the muddy, Amazon-dominated Amapá–Guianas coast, South America: A three-point research agenda.* Journal of South American Earth Sciences, 44, 18-24. **IF5=1.6**
4. Ploton, P., Pélissier, R., **Proisy, C.,** Flavenot, T., Barbier, N., Rai, S.N., Couteron, P., **2012a**. *Assessing aboveground tropical forest biomass using Google Earth canopy images.* Ecological Applications, 22(3), 993-1003. **IF=3.8**
5. Barbier N., **Proisy C.,** Véga C., Sabatier D., Couteron P., **2011**. *Bidirectional texture function of high resolution optical images of tropical forest: an approach using LiDAR hillshade simulations.* Remote Sensing of Environment, 115 (1), 167-179. **IF5=6.1**
6. Barbier, N., Couteron, P., Gastellu-Etchegorry, J. P. and **Proisy, C., 2012**. *Linking canopy images to forest structural parameters: potential of a modeling framework.* Annals of Forest Science, 69(2): 305-311. **IF=1.4**
7. Gensac, E., Lesourd, S., Gardel, A., Anthony, E. J., **Proisy, C.** and Loisel, H., **2011**. *Short-term prediction of the evolution of mangrove surface areas: The example of the mud banks of Kourou and Sinnamary, French Guiana.* Journal of Coastal Research, SI 64: 388-392. **IF=0.5**
8. Anthony, E.J., Gardel, A., Gratiot, N., Proisy, C., Allison, M.A., Dolique, F., & Fromard, F., **2010**. *The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank-shoreline interactions.* Earth-Science Reviews, 103, 99-121. **IF5=8.8**
9. Barbier, N., Couteron, P., **Proisy**, C., Yadvinder, M., Gastellu-Etchegorry, J.P., **2010**. *The variation of apparent crown size and canopy heterogeneity across lowland Amazonian forests.* Global Ecology and Biogeography, 19(1): 72-84. **IF=7.2**
10. Gardel, A. **Proisy, C.**, Lesourd, S., Philippe, S., Caillaud, J., Gontharet, S., Anthony, E. J., Brutier, L. **2009**. *A better understanding of mud cracking processes gained from in situ measurements on an intertidal mudflat in French Guiana.* Journal of Coastal Research, SI 56(1):424-428. **IF=0.5**
11. **Proisy**, C., Gratiot, N., Anthony, E. J. Gardel, A., Fromard, F., Heuret, P., **2008**. *Mud bank colonization by opportunistic mangroves: a case study from French Guiana using lidar data.* Continental Shelf Research, 29(3): 632-641. **IF5=2.3**
12. Gratiot, N., Anthony, E.J., Gardel, A., Gaucherel, C., **Proisy**, C., & Wells, J.T. **2008**. *Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes.* Nature Geoscience, *1*(3), 169-172. **IF=12.4**
13. Anthony, E. J., Dolique, F., Gardel, A., Gratiot, N. Polidori, N., **Proisy**, C., **2008**. *Nearshore intertidal topography and topographic-forcing mechanisms of an Amazon-derived mud bank in French Guiana.* Continental Shelf Research, 28(6): 813-822. **IF5=2.3**
14. **Proisy, C.**, Couteron, P., Fromard, F., **2007**. *Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images.* Remote Sensing of Environment, 109(3): 379-392. **IF5=6.1**
15. Lucas, R. M., Mitchell, A. L., Rosenqvist, A., **Proisy**, C., Melius A., Ticehurst, C., **2007**. *The potential of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: Case studies from the Tropics.* Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 17(3): 245-264. **IF=1.9**
16. Fromard, F., Vega, C., **Proisy, C., 2004.** *Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys.* Marine Geology, 208(2-4), 265-280. **IF5=3.0**
17. Polidori, L., Couteron, P., Gond, V., **Proisy, C.,** Trichon, V., **2003.** Télédétection et caractérisation des paysages amazoniens", Revue Forestière Française, numéro spécial "Connaissance et gestion de la forêt guyanaise", 101-117. **IF non trouvé.**

18. **Proisy**, C., Mougin, E., Fromard, F., Trichon, V., Karam, M. A., **2002**. *On the influence of canopy structure on the polarimetric radar response from mangrove forest.* International Journal of Remote Sensing, 23(20): 4197-4210. **IF=1.1**
19. **Proisy,** C., Mougin, E., Dufrêne, E., Le Dantec, V., **2000a**. *Monitoring seasonal changes of a mixed temperate forest using ERS SAR observations.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(1): 540-552. **IF5=3.5**
20. **Proisy,** C., Mougin, E., Fromard, F., Karam, M. A., **2000b**. *Interpretation of polarimetric signatures of mangrove forests.* Remote Sensing of Environment, 71: 56-66. **IF5=6.1**
21. Mougin, E., **Proisy, C.,** Marty, G., Fromard, F., Puig, H., Bétoulle, J. L., Rudant, J.P., **1999**. *Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(1): 94-102. **IF5=3.5**
22. Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J. P., Dufrêne, E., LeDantec, V., Mougin, E., Marty, G., **Proisy**, C., **1999**. *Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest. Inversion of the PROSPECT model.* International Journal of Remote Sensing, 20(5): 879-894. **IF5=1.1**
23. **Proisy, C.,** Mougin, E., Fromard, F., Rudant, J.P., **1998**. *Télédétection radar des mangroves de Guyane Française*, Photo-Interprétation - Images Aériennes et spatiales, Numéro spécial Séminaire Télédétection et Végétation - CEMAGREF-ENGREF, Volume 36 – 1998/1: 81-88. **IF non trouvé.**
24. Mougin, E., Lopes, A., Frison, P. L., **Proisy, C., 1995**. *Preliminary analysis of ERS-1 wind scatterometer data over land surfaces.* International Journal of Remote Sensing, 16(2): 391-398. **IF5=1.1**

- **Conférences internationals invitées**

1. **Proisy**, **C., 2011a**. *Monitoramento da biomassa de florestas de mangue associadas a costas com intensa dinâmica costeira. O caso da Guiana Francesa*. *XIV Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar*, 31 Oct. - 4 Nov., Baneario Camboriu, SC, Brazil.
2. **Proisy, C., 2011b**. *Remote sensing of mangrove biomass: results and perspectives*. *XV Brazilian Remote Sensing Symposium*. 30 Apr.-5 May, Curitiba, PR, Brazil.
3. **Proisy, C.,** Couteron, P., Fromard, F., & Pélissier, R., **2007c**. Mangroves dynamics from FOTO of IKONOS images and Lidar data. *VIII workshop ECOLAB*, 6-12 Aug., Macapá, AP, Brazil.
4. **Proisy,** C., **2005**, Guiana Francesa: a continuidade da costa amazonica tão especifica, Invited presentation, *IV Workshop PIATAM MAR*, Projecto Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de petróleo e derivados na zona costeira amazônica, 14-19 Feb., Salinopolis, PA, Brazil.

- **Articles dans les ouvrages collectifs avec comité de lecture**

1. Ploton, P., Pélissier, R., Barbier, N., **Proisy, C.**, Ramesh, B. R. & Couteron, P., **2012b.** Canopy texture analysis for large-scale assessments of rainforest stand structure and biomass. Chap. 24. In M. Lowman, Devy, S. & Ganesh, T. (Ed.), *Treetops at Risk? Challenges of Global Forest Canopies.* (pp. 237-245): *Springer, New York*.
2. **Proisy, C.,** Barbier, N., Guéroult, M., Pélissier, R., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Grau, E., Couteron, P., **2012.** Biomass prediction in tropical forests: the canopy grain approach. In: Fatoyinbo, L. (Ed.), Remote Sensing of Biomass: Principles and Applications. INTECH publisher, pp. 59-76. ISBN: 978-953-51-0313-4. (> 2000 téléchargements).
3. Fromard, F., & **Proisy, C., 2010.** Coastal dynamics and its consequences for mangrove structure and functioning in French Guiana. In M. Spalding, M. Kainuma & L. Collins (Eds.), "*Revised World Atlas of Mangrove for Conservation and Restoration of Mangrove Ecosystems". Earthscan Ltd, London, UK* (pp. 229-232). ISBN 978-1-84407-657-4.

- **Articles dans les ouvrages collectifs sans comité de lecture**

1. **Proisy, C., 2011**. Mangroves, richesse d'un littoral instable. In A.O. P. Gombauld, M. Béreau, P. Charles-Dominique, J-M Footsing, B. Carme, P. Grenand, F. Grenand, P. Lacombe (Ed.), *De la Recherche en Guyane: la science par l'exemple* (pp. 53-54). Ibis Rouge éditions, Cayenne. ISBN: 978-2-84450-403-6.
2. **Proisy, C., 2010**. Potential of L-band radar imagery for studying tropical forest dynamics: the international ALOS Kyoto & Carbon Initiative. In: Agropolis International (Editor), *Dossier Agropolis* "Télédétection et Systèmes d'Information pour l'Environnement et les Territoires ". Montpellier. pp.13.

- **Communications dans les conférences internationales**
  Les communications référencées dans la base ISI sont indiquées.

1. Rolland K., Baillarin, F., Sannier, C., Gardel, A., Fromard, F., Froidefond, J-M., Lafon, V., **Proisy, C.**, Mercier, F., **2012**. Développement de produits et Services issus de l'Observation de la Terre pour la surveillance de la Dynamique Côtière**.** In, XIV SELPERS 2012, 19-23 Nov., Cayenne, French Guiana.
2. Blanchard, E., **Proisy, C.,** Anthony, E.J., dos Santos, V.F., Fromard, F., Gardel, A., Gensac, E., & Walcker, R., **2012**. Quantifying and monitoring vulnerability of Amazon-influenced mangrove coasts. Case study from French Guiana In, *Meeting on Mangrove ecology, functioning and Management, 2-6 Jul.,* Galle, Sri Lanka.
3. le Maire, G., Nouvellon, Y., Roupsard, O., Christina, M., Charbonnier, F., Zhou, J., Ponzoni, F., Stape, J.-L., Dauzat, J., Couteron, P., & **Proisy, C**. **2012**. Very high resolution satellite images for parameterization of tree-scale forest process-based model. In, *IGARSS 2012,* 22-27 Jul., Munich, Germany. Réf. ISI.
4. Zhou, J., **Proisy, C.,** Couteron, P., Descombes, X., Zérubia, J., Nouvellon, Y., & Le Maire, G., **2011**. Tree crown detection in high resolution optical images during the early growth stages of eucalyptus plantations in Brazil In, *Asian Conference on Pattern Recognition*.28-30 Nov., Beijing, China. Réf. ISI.
5. **Proisy, C.,** Ferreira dos Santos, V., Walfir Souza Filho, P.W., da Rocha Nascimento Junior, W., Machado da Silveira, O.F., Vieira da Silva, M., Anthony, E.J., Blanchard, B., Fromard, F., Gardel, A., Gensac, E., & Walcker, R., **2011**. Dispersal of the Amazon mud along Pará, Amapá and French Guiana coasts: evidence of impacts on mangrove ecosystems dynamics and consequences for multi-scale interdisciplinary research In, *IVth Scientific Meeting of the ORE-HYBAM*. 6-9 Sep., Lima, Peru.
6. Anthony, E.J., Gardel, A., Gensac, E., **Proisy, C.,** Lesourd, S., Fromard, F., & Walcker, R., **2011**. An overview of morpho-sedimentary processes on the Amazon-influenced Amapa-Guianas coast, South America. In, *IVth Scientific Meeting of the ORE-HYBAM*. Lima, Peru.
7. Blanchard, E., **Proisy, C.,** Anthony, E.J., Fromard, F., Gardel, A., Gensac, E., & Walcker, R., **2011**. Suivi de la dynamique de biomasse des mangroves dans un contexte de changements côtiers intenses. Cas du littoral guyanais. In, *Vulnerability of coastal ecosystems to global change and extreme events. 24-28 Oct., Biarritz, France.*
8. Walcker, R., Fromard, F., Anthony, E.J., Gardel, A., & **Proisy, C.**, **2011**. Significant control of mangrove changes by trade-wind generated waves over the last 60 years in French Guiana. In, *Vulnerability of coastal ecosystems to global change and extreme events* (p. 94). *24-28 Oct., Biarritz, France.*
9. **Proisy, C.,** Blanchard, E., Degenne, P., & LoSeen, D., **2010**. Toward the simulation of the Amazon-influenced mangrove-fringed coasts dynamics using Ocelet. In, *LandMod 2010*. 3-5 Feb., Montpellier, France.
10. Zhou, J., **Proisy, C.,** Descombes, X., Hedhli, I., Barbier, N., Zerubia, J., Gastellu-Etchegorry, J.-P., & Couteron, P., **2010**. Tree crown detection in high resolution optical and LiDAR images of tropical forest. In, *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII, 20-23 Sep. Toulouse : France*. Réf. ISI.
11. Gardel, A., **Proisy**, C., Lesourd, S., Philippe, S., Caillaud, J., Gontharet, S., Anthony, E. J., Brutier, L., **2009**. A better understanding of mud cracking processes gained from in situ measurements on an intertidal mudflat in French Guiana. 10th International Coastal Symposium, 13-18 Apr., Lisbon, Portugal. Réf. ISI.
12. Lucas, R.M., Carreiras, J., **Proisy,** C., Ticehurst, C., Walfir, P. and Bunting, P., **2008**. Contributions of ALOS PALSAR to Global Mangrove Mapping and Monitoring, ALOS PI symposium, 3-7 Nov., Rhodes, Greece. Réf. ISI.
13. **Proisy**, C., Couteron, P. Pélissier, R., Barbier, N., Engel, J., **2007b**, Monitoring canopy grain of tropical forest using Fourier-based textural ordination (FOTO) of very high resolution images, Proc. IGARRS'07,. Vols 1-12: 4324-4326. 23-26 Jul., Barcelone, Spain. Réf. ISI.
14. **Proisy**, C., Gratiot, N. Gardel, A., Anthony, E., Heuret, P., Fromard, F., **2006**, Relating mud bank altitude to mangrove communities, Int. symposium "Mud deposit in coastal areas", 13-17 Nov. 2006, Porto Alegre, Brazil.
15. Gratiot, N., Gardel, A., **Proisy,** C. Anthony, E., **2006**, A severe mangrove retreat along the muddy coast of French Guiana, International symposium "Mud deposit in coastal areas", 13-17 Nov. 2006, Porto Alegre, Brazil.
16. Mitchell, A., Lucas, R. M., **Proisy**, C., **Melius**, A., **2005**, Sensitivity of radar backscatter to mangrove forest structure and AIRSAR imaging parameters, Proc. IGARSS'05, 25-29 Jul., Coex, Seoul, Korea, 2090- 2093. Réf. ISI.
17. **Proisy,** C., **2005**, Guiana Francesa: a continuidade da costa amazonica tão especifica, Invited presentation, IV Workshop PIATAM MAR I, Projecto Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de petróleo e derivados na zona costeira amazônica, 14-19 February, Salinopolis, PA, Brazil.

18. **Proisy,** C., **2004**, Méthodes spatiales amazoniennes, Invited presentation, VII Worshop ECOLAB, Ecosystèmes côtiers amazoniens de la recherche à la gestion, 30 nov.- 5 déc., Cayenne, Guyane Française.
19. Melius, A., **Proisy, C.**, Heuret, P. and Boudon, F., **2004**, Coupling Avicennia tree architecture to radar backscatter models for estimating mangrove forest biomass. VII Worshop ECOLAB, Ecosystèmes côtiers amazoniens de la recherche à la gestion, ,30 nov. - 5 déc., Cayenne, Guyane Française.
20. Mitchell, A., Lucas, R. M., **Proisy, C**. and Melius, A., **2004**, Spatial estimation of above-ground biomass and structure of tropical mangrove forest using multifrequency SAR. The 12th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, , 18-22 Oct., Fremantle, Western Australia
21. Lucas, R. M., **Proisy, C.**, Melius, A. and Mitchell, A., **2004**, The potential of ALOS PALSAR for quantifying the biomass and structure of tropical and subtropical mangroves. The 7th Intecol International Wetlands conference, Utrecht, The Netherlands,25-30 July.
22. **Proisy, C.**, Souza Filho, P., Prost, M. T., Fromard, F., Mendes, A. C., de Coligny, F., **2003a** *Monitoring the Dynamic of the Amazon Coast (Pará, Brasil and French Guiana) Using a Common Methodology Based on a Spatial Analysis Coupled to a Simulation Tool* . Mangrove 2003 conference, 20-24 May, Salvador, Bahia, Brazil.
23. **Proisy, C.,** Mitchell, A., Lucas, R., Fromard, F., Mougin, E., **2003b,** *Estimation of mangrove biomass using multifrequency radar data. Application to mangroves of French Guiana and Northern Australia.* Proceeding of the Mangrove 2003 conference, 20-24 May, Salvador, Bahia, Brazil.
24. Polidori, L., **Proisy, C., 2003**, Potencialidades e limitações do sensoriamento remoto para o estudo das costas tropicais úmidas. Mangrove 2003 conference, 20-24 May, Salvador, Bahia, Brazil.
25. **Thévand, A.,** Fromard, F., **Proisy, C.,** Couteron, P., **2003,** Structural features and dynamics of mangrove forests in the Amazonian coastal region. A case study in the Kaw River estuary, French Guiana, using field measurements and high resolution remote sensing techniques. Mangrove 2003 conference, 20-24 May, Salvador, Bahia, Brazil.
26. **Proisy**, C., **2002**, Concepção dum modelo regional da dinâmica dos manguezais costeiras pilotado por observações espaciais, Invited presentation. VI Workshop ECOLAB, 22-29 sep. Belém, PA, Brazil.
27. Gardel, A., **Proisy** C., Gratiot, N., Polidori, L., de Coligny, F., **2002**, Du banc de vase à la mangrove : apport d'une série d'images SPOT 1986-2001 pour le suivi de la dynamique du littoral guyanais. VI Workshop ECOLAB, 22-29 Sep. Belém, PA, Brazil.
28. Lucas, R., Mitchell, A., **Proisy, C.**, **2002**, The use of polarimetric AIRSAR(POLSAR) data for characterising mangrove communities, AIRSAR Earth Science and Applications Workshop, 4-6 March, 2002, Pasadena, CA, USA.
29. **Proisy**, C., Mougin, E., Fromard, F., **2001**, Radar remote sensing of mangrove forests: results and perspectives, Proc. IGARSS'2001, 9-13 July, Sydney, Australia. Réf. ISI.
30. **Proisy**, C., Mougin, E., Martin, Borderies, P., Chênerie, I., Thirion, L., **2001**, Seasonal variations of ERS coherence values over a mixed temperate forest , Proc. IGARSS'2001, 9-13 July, 2001, Sydney, Australia. Réf. ISI.
31. Ruiz, C., Borderies, P., Chênerie, I., Mougin, E., **Proisy,** C., **2000**, Interferometric Coherence of Forested Areas Over large Frequency Band, Proc. PIERS'2000 symposium, 5-14 Jul., Cambridge, Massachusetts, USA.
32. Ruiz, C., Borderies, P., Chênerie, I., Mougin, E., **Proisy**, C., **2000**, A multi-constituent and multi-layer model for coherent backscattering of forested areas. Proc. EUSAR'2000 symposium, 23-25 May, Munich, Germany.
33. **Proisy**, C., Mougin, E., Lopes, A., Ruiz, C., Borderies, P., Chênerie, I., Sarti, F., Dufrêne, E., Ledantec, V.,, **2000**, Usefulness of ERS coherence time series for monitoring the vegetation cycle of a mixed deciduous forest, Proc. ERS-ENVISAT symposium, 16-20 Oct., Goteborg, Sweden.
34. **Proisy**, C., Sarti, F., Mougin, E., Lopes, A., Dufrêne, E., LeDantec, V., Ruiz, C., Borderies, P, Chênerie, I., **1999**, Temporal variations of interferometric coherence over a deciduous forest, Proc. CEOS SAR Workshop, 26-29 Oct., Toulouse, France : 25:30. Réf. ISI.
35. Ruiz, C., Borderies, P., Chênerie, I., **Proisy**, C., Mougin, E., **1999**, Modeling of electromagnetic waves interaction with forest canopies, Proc. CEOS SAR Workshop, 26-29 Oct., Toulouse, France : 551-555. Réf. ISI.
36. Mougin, E., **Proisy**, C., Ducrot, D., Lopes, A., Rivalland, V., Marty, G., Dufrêne, E., Le Dantec, V., Sarti, F., Souyris, J. C., Adragna, F., Horn, R., **1998**, Radar remote sensing of a mixed deciduous forest temperate forest. Results and perspectives, Second International Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-physical Parameters from SAR data for Land Applications, ESTEC, 21-23 Oct., Noordwijk, The Netherlands.
37. Dufrêne, E., Le Dantec, V., Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J. P., Marty, G., Mougin, E., **Proisy, C.,** Lacaze, B. and Rambal, S., **1997**, Remote sensing of the Fontainebleau forest during EMAC-94 :

Objectives and data collection program", Proc. EMAC 94/95 final results, ESTEC, 14-16 April, pp. 91-95. Noordwijk, The Netherlands.
38. **Proisy,** C., Dufrêne, E., Gastellu-Etchegorry, J.P., LeDantec, V., Marty, G., Mougin, E., **1997a**, Monitoring seasonal dynamics of the Fontainebleau forest with radar remote sensing data. Proc. EMAC 94/95 final results, ESTEC, 14-16 Apr., pp. 105-109, Noordwijk, The Netherlands.
39. **Proisy** C., Fromard, F., Mougin E., Puig H., Bétoulle J.L., Cadamuro, L., **1997b**, From pioneer stages to cemetery stands: structural diversity, aboveground biomass and dynamics in French Guiana mangroves. Radar data analysis and modelisation, 4th Workshop ECOLAB, Cayenne, French Guiana..
40. **Proisy**, C., Mougin, E.; Dufrêne, E., LeDantec, V., **1997c**, Dynamique saisonnière de la rétrodiffusion en bande C d'une forêt tempérée, 7th International Symposium on "Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing", 6-11 Apr., pp.125, Courchevel, France.
41. Dufrêne, E., LeDantec, V., Demarez V., Gastellu-Etchegorry, J. P., Marty, G., Mougin, E., **Proisy, C.,** Lacaze, B. and Rambal, S., **1997**, Remote sensing of the Fontainebleau forest during EMAC-94 : Objectives and data collection program. Proc. EMAC 94/95 final results, ESTEC, 14-16 Apr., pp. 91-95. Noordwijk, The Netherlands.
42. **Proisy,** C., Mougin, E., Fromard, F., **1996**, Investigating correlations between radar data and mangrove forests characteristics, Proc. IGARSS'96 , Vol. I, pp.733-735. Lincoln - Nebraska, USA.
43. Mougin, E., **Proisy,** C., Gastellu-Etchegorry, J. P., Demarez, V., Marty, G., Dufrêne, E., LeDantec, V., Lacaze, B., Rambal, S., **1995**, Microwave signatures of a temperate forest during EMAC-94. International Symposium on Retrieval of bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications", Toulouse, 17-20 October, pp. 161-166. Toulouse, France.
44. Mougin, E., Lopes, A., Frison, P.L., **Proisy,** C., Lo Seen, D., **1994**, Study of terrestrial ecosystems at a global scale with the ERS-I wind scatterometer data. 'Physical measurements and signatures in remote sensing' symposium, Jan. 17-21, 399-406. Val d'Isère, France.
45. Mougin, E., Lopes, A., Frison, P. L., **Proisy**, C., Warich, A., Lo Seen, D., Lecomte, P., **1993**, Analysis of ERS-I scatterometer data over land surfaces, Preliminary results. Invited paper at the 2nd ERS-1 symposium, 11-14 Oct, pp. 393-397, Hamburg, Germany.

- Autres productions (revue, rapports, participation à des films)

1. **Proisy, C.,** & Guéroult, M. **2011**. Description simplifiée de l'architecture de palétuviers adultes. *Lettre d'information de l'UMR AMAP, 23-24*.
2. **Proisy, C.**, **2009**, La mangrove entre deux eaux, milieu résilient. *Sciences au Sud*, 49.
3. **Proisy, C. 2010**. Les mangroves amazoniennes : une adaptation exemplaire. Rapport d'activité 2009 IRD. page 16.
4. Blanchin, J., **2006**, "Le chant du Paypayo", Bande dessinée documentaire, Ibis Rouge Editions, 111 pages. ISBN 10: 2-84450-287-3.
5. Melius, A., **2004**, Mangroves au radar, Sciences au Sud 24: 12.
6. Emission Grandeurs Natures, France 2-3, 2005, "La dynamique du littoral guyanais". Réalisation Michel Huet & Hubert Roy.
7. **Proisy, C.,** Gond, V., Fromard, F., **2005c**, Etude de la forêt guyanaise à partir d'observations aériennes et spatiales. Action 1.1 du CPER région Guyane: Caractériser l'écosystème forestier guyanais pour mieux le gérer. Rapport scientifique final. 57 pages.

3. ENCADREMENTS D'ETUDIANTS

- Niveau post-doc

1. Ivania Cerón Souza (colombienne), Smithsonian Tropical Research Institute de Panama, Panama. Titre: Genetic structure of neotropical red mangrove species. Accueil sur 15 jours en Guyane Française, 2011.
2. Jean-Baptiste Féret (français), 1 an, Post-doc CNES. Titre: Simulation d'images hyperspectrales de forêts tropicales. PI=JP. Gastellu-Etchegorry (UMR CESBIO). Co-encadrant, 2014-2015.

- Niveau doctorat

1. Jia Zhou (chinoise), 2009-2012, Bourse UM2, ED Sibaghe. Soutenue le 16 Novembre 2012. Co-encadrant.
2. Paula Maria Moura de Almeida (brésilienne). Démarré en 2012. Bourse CNPq Sandwich. Co-encadrant avec Univ. Rio de Janeiro (Pr. M. Soares).
3. Bruno Cesar Perreira (brésilien), en cours. Bourse Universitaire. Co-encadrement ponctuel (1 mois), Univ. Rio Grande do Norte.
4. Adewole Alegoke (nigérian), 2013-2016, bourse ERASMUS-MUNDUS. Démarrage au 1er Sep. 2013. Co-encadrant avec Univ. Dresden, Allemagne.
5. Rinny Rahmania (indonésienne), 2013-2016, bourse sur projet international INDESO. Démarrage au 1er Oct. 2013. Directeur de thèse.

- Niveau Master-Ingénieur

1. Bourden, C., 2013. Bilan sur les mesures de biomasse aérienne et de carbone en mangroves amazoniennes. Conséquences pour le paiement pour services écosystémiques (PSE). Master Sciences et technologie, Santé, Spécialité: Ecosystèmes tropicaux naturels et exploités, Ecologie des forêts tropicales, Université Antilles-Guyane: 43 pages.
2. Blanchard, E., 2009, Avancées et reculs des mangroves guyanaises: bilan par analyse spatiale sur plusieurs décennies. Master 2e année FENEC, Université de Sciences de Montpellier 2.
3. Chesnes, M., 2009, Etude de l'impact des pratiques de fumoirs à poissions sur la durabilité de l'écosystème de mangrove au Cameroun. Stage fin d'étude, Ingénieur AgroParisTech. Encadrement principal: ONFI.
4. Didier, A., 2008, Caractérisation des habitats et peuplements de la mangrove de Tumbak (Nord Sulawesi, Indonésie) et évaluation socio-économique des services fournis par cet écosystème. Master 1ère année 'Ingénierie en écologie et Gestion de la biodiversité', Université de Sciences de Montpellier 2.
5. Thébaut, P., 2008, Microtopographie de bancs de vase en Guyane Française par photogrammétrie. Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans.
6. Morelle, F., 2007, Suivi spatio-temporel de la morpho-dynamique des bancs de vase du littoral amazonien et de leur colonisation par la mangrove, Master 2e année Sciences et Technologies, Université de Lille. (Encadrant principal: A. Gardel)
7. Léon, A., 2006, SIG et analyse spatiale pour l'étude des forêts tropicales, Master II professionnel Carthagéo, ENSG, Université Paris I, 25 pages.
8. Rochotte, D., 2004, "Extraction automatique de paramètres structuraux des mangroves guyanaises à partir d'analyses de texture sur des images à haute résolution spatiale IKONOS", Mémoire de fin d'études, Formation des Ingénieurs Forestiers, Ecole Nationale du Génie Rurale, des Eaux et des Forêts, 52 pages.
9. Melius, A., 2003, "Mesures radar de la dynamique des mangroves guyanaises", DEA Méthodes Physique en Télédétection, Université Paris 7, 27p.
10. Rochotte, D., Scaglia, S., Willefert, N., 2003, Dynamique de la mangrove d'Iracoubo, *Mémoire du module « Forêt tropicale humide »* de l'ENGREF, Kourou, 20p.
11. Thévand, A., 2002, "Structure et dynamique des mangroves de la région de Kaw (Guyane Française)", DEA 'Ecologie des Systèmes Continentaux', UPS, Toulouse, 36 pages.
12. Martin, E., 2001, "Evaluation d'un modèle cohérent permettant de déterminer le degré de cohérence interférométrique radar d'un couvert forestier", DEA Micro-Ondes et Transmission Optique, UPS, Toulouse, 25 pages.
13. Biscans, F., 2000, "Validation expérimentale d'un code de diffraction par un milieu forestier", DEA Micro-Ondes et Transmission Optique, UPS, Toulouse, 29 pages.

- Niveau Lycéen (projet tutoré)

1. Villageois, S., Figaro, A., Le Pelletier, J., 2006, "Dynamique côtière du littoral guyanais". Projet d'étude "L'homme et la nature", 1ère S, Lycée Melkior Garré, Cayenne, Rapport de stage, 80 pages.

- Jurys de Master et Thèse (autres que ceux des étudiants encadrés)

1. Thèse: Anthea Mitchell (australienne), University of New South of Wales, Sydney, Australia, 25 Feb. 2004. Titre: Remote sensing techniques for assessment of mangrove forest structure, species composition and biomass, and response to environmental change.
2. Thèse: Eloi Grau (français), Université Paul Sabatier, Toulouse, France. 2 Mai 2012. Titre: Modélisation DART du transfert radiatif Terre-Atmosphère pour simuler les bilans radiatif, images de télédétection et mesures LIDAR des paysages terrestres.
3. Master: Da Rocha Nascimento, Jr. W. (brésilien), Univ. Fédérale du Para (UFPA), Belém, Brésil. 3 Avril 2011. Titre: Detecção de mudanças na coasta de manguezais da Amazônia à partir da classificação orientada a objetos de dados multisensores. Université Fédérale du Para.
4. Master: Marta Viera da Silva (brésilienne), Univ. do Amapá (UNIFAP), Macapa, Brésil. 21 Mar. 2013. Titre: Mudanças espaço-temporais de curto periodo dos manguezais da foz do Amazonas ao Cabo Orange.

PARTIE 2 - STRATEGIE AUTONOME DE RECHERCHE

1. CONTEXTE

1.1 A la fenêtre des changements

Depuis plus de trente ans, les observations spatiales à partir des instruments embarqués sur les satellites contribuent à l'étude du climat, des océans, des surfaces continentales (Fig. 1) et de l'impact des activités humaines sur les ressources terrestres (Imhoff et al. 2004; Rosenqvist et al. 2003). Notre planète est un système complexe à multiples dimensions: toutes les résolutions spatiales sont nécessaires et tout le domaine électromagnétique de l'ultraviolet aux micro-ondes doit être utilisé pour l'étudier. Les informations obtenues alors contribuent à l'étude des surfaces terrestres (couverture forestière, taille des banquises, agriculture, etc.) et des processus (circulations atmosphérique et océanique, urbanisation, déforestation, désertification, etc.). Le recul temporel sur 30 ans permet d'évaluer l'ampleur des changements voire d'obtenir des tendances d'évolution des processus.

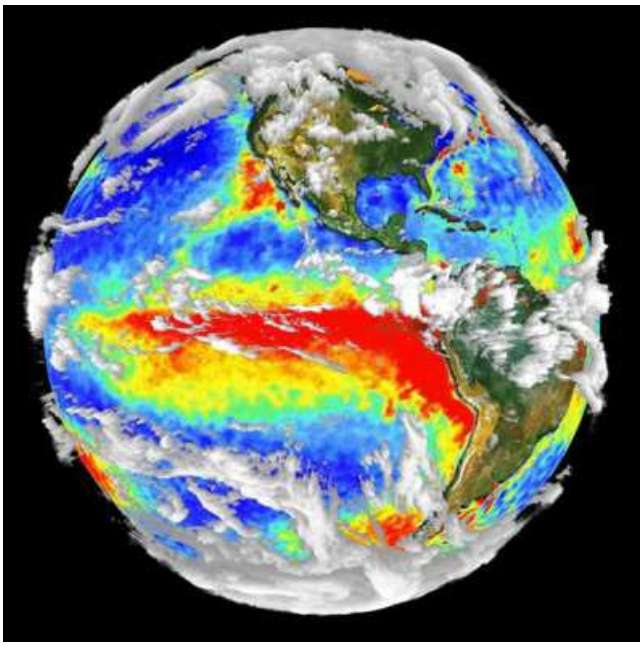


Figure 1: La Terre vue par l'ensemble des satellites du programme Terra de la NASA.

Les écosystèmes terrestres et marins changent (Walther et al. 2002). Ces changements influencent déjà et vont influencer de plus en plus notre mode de vie (Hassan et al. 2005). Dans un contexte de réchauffement global (Hansen et al. 2010), l'augmentation des pressions anthropiques sur des ressources terrestres limitées et inégalement réparties risque d'être pour l'humanité le verrou de passage au siècle suivant. Le 21e siècle s'annonce donc comme une période charnière pour toutes les sociétés humaines. Quoiqu'il en soit et sera, l'observation spatiale m'a et nous a fait prendre conscience que nous ne laisserons par la planète dans le même état que nous l'avons trouvée à notre naissance. La moindre des choses serait de donner à nos enfants (du Sud comme du Nord) une explication à ces changements voire des clés pour ne pas trop en pâtir.

1.2 Des enjeux pour l'étude des forêts tropicales?

La compréhension du fonctionnement des forêts repose sur la connaissance des mécanismes qui régissent les flux d'énergie et de matière au sein de l'écosystème et avec le milieu environnant. Par exemple, pour bien appréhender le cycle du carbone, il faudrait évaluer et suivre la production primaire nette (PPN) des forêts (p. ex. Zhang et al. 2013). Or, celle-ci ne peut être mesurée qu'indirectement (Clark et al. 2001a) et qu'avec beaucoup d'incertitudes notamment en forêts tropicales (Clark et al. 2001b). En forêts tropicales, les interactions entre facteurs abiotiques et communautés végétales sont encore insuffisamment décrites (Loreau et al. 2001; Carpenter et al. 2009) car les milieux tropicaux sont

particulièrement difficiles à parcourir (grandes étendues, sites souvent éloignés des routes) et à caractériser (hétérogénéité des structures forestières à toutes les échelles d'observation et diversité des espèces). Les questionnements sur les changements globaux (p. ex. Cox et al. 2013; Malhi et al. 2007; van der Werf, 2009), sur la biodiversité (p. ex. Loreau & de Mazencourt, 2013) ou sur les politiques socio-environnementales à développer (cf. programme REDD des Nations Unies) restent nombreux. L'évolution du fonctionnement de ces forêts, notamment en termes de capacité de croissance, de productivité (Lewis et al. 2009) ou de leur distribution sur les différents continents (Zelazowski et al. 2011) préoccupe également.

L'observation spatiale peut aider à cartographier des caractéristiques forestières et suivre des changements (Fig. 2). On peut s'accorder pour dire que la cartographie de la déforestation, c'est-à-dire la distinction des zones de 'forêts' par rapport à des zones 'non-forêts', est maintenant réalisable y compris en milieu tropical (p. ex. Rahman et al. 2013). Ceci dit, les technologies d'observation de la Terre, aussi sophistiquées soient-t-elles, ne sont pas des boîtes à outils 'clefs en main' pour comprendre les processus et phénomènes biologiques, écologiques ou physiques. Les interactions entre les signaux de télédétection (éclairement solaire, signal laser ou hyperfréquence) et les couverts forestiers sont bien trop complexes. Rendre compte de la dégradation forestière (Joseph et al. 2011) ou de la dynamique naturelle des forêts (i.e. des modifications dans les structures forestières) reste encore un défi. L'étude des forêts tropicales est donc un enjeu pour des travaux interdisciplinaires aussi bien fondamentaux que méthodologiques à mener sur la base d'une continuité des observations de terrain et de télédétection (Couteron et al. 2012).



Figure 2: Panoramas forestiers depuis le sommet de l'Inselberg des Nourragues, Guyane Française.

2. OBJECTIFS, OBJETS D'ETUDE, DEMARCHE

2.1 Objectifs

Mes travaux de recherche visent à apporter des informations sur le fonctionnement d'écosystèmes forestiers présentant une forte dynamique spatiale et temporelle à partir de mesures issues de l'analyse des données de télédétection. Dans le souci de valider des méthodes d'inversion de paramètres forestiers et d'évaluer leur robustesse, mon travail s'organise autour de la réalisation de campagnes de mesures de terrain et de l'interprétation des interactions signal-végétation dans les domaines optique et hyperfréquence. À terme, il s'agirait d'intégrer les connaissances et résultats acquis dans un outil (piloté par observations spatiales) de simulation des dynamiques forestières en fonction de leur environnement.

2.2 Objets d'étude

2.2.1 Dynamique forestière

L'objet central de mes recherches est la dynamique forestière, c'est-à-dire la variation dans le temps et dans l'espace de paramètres structuraux décrivant les forêts. Je distingue les paramètres à variations saisonnières des paramètres à variations interannuelles. Les premiers caractérisent le feuillage comme l'indice foliaire (cumul des surfaces de feuille par m^2). Les seconds décrivent la forme générale de l'arbre. Il s'agit principalement du diamètre de tronc à hauteur de poitrine (j'utiliserai l'acronyme anglais DBH, 'diameter at breast height'), la hauteur d'arbres ou la biomasse végétale. Les paramètres structuraux sont des mesures à l'échelle de l'arbre sommées pour un ensemble d'individus (le peuplement forestier). Les valeurs et les variations de ces paramètres forestiers sont influencées par les conditions environnementales. Dans certains cas, comme celui des mangroves, la structure forestière est un bon indicateur de l'ampleur et de la fréquence des changements environnementaux.

2.2.2 Images de télédétection[1]

Le terme 'télédétection' signifie l'acquisition à distance d'information sur un objet ou sur une surface, à partir de mesures effectuées par un instrument posé ou embarqué sur différents types de plate-forme (par exemple, trépied, bateau, avion, satellite). Les photographies aériennes constituent un premier exemple. La télédétection satellitaire a une place importante dans la pléthore technologique développée au 20ième siècle. Elle est capable, maintenant, d'observer n'importe quel point de la Terre en quelques jours avec une résolution spatiale de 50 cm à partir d'environ 700 km de distance. Si l'œil humain avait ce pouvoir de résolution, on pourrait voir des bactéries à l'œil nu! Quelles que soient les résolutions spatiales, les images de télédétection sont souvent magnifiques (JPL PhotoJournal; ESA Images Multimedia Gallery) car elles ont un pouvoir 'intégrateur' d'information que le cerveau humain perçoit bien.

[1] Pour le lecteur désireux d'en savoir plus sur les différentes techniques de télédétection, je conseille, particulièrement, les sites des ressources forestières du Canada et du JPL/NASA pour apprendre rapidement quelques fondamentaux.

Mais "*Pretty pictures are not enough*", expliquaient Adams et Gillespie (2006). Avant d'être un moyen d'analyse des forêts, les données de télédétection sont des objets d'étude à part entière. Elles ne sont pas des mesures directes de la dynamique des forêts car les variations d'intensité dans les images ne sont pas proportionnelles aux variations de DBH ou de biomasse aérienne. La plupart des instruments et capteurs ayant fourni ces images opèrent bien au-delà de notre champ de vision et les images produites ne représentent que la résultante finale d'interactions entre un signal (l'éclairement solaire pour les systèmes passifs ou le signal émis par l'instrument lui-même pour les systèmes actifs) et la surface observée. En observation de la Terre, on distingue plusieurs domaines électromagnétiques (Fig. 3) allant de l'ultraviolet, du visible, de l'infrarouge aux micro-ondes (ou hyperfréquences) voire jusqu'aux ondes sonores.

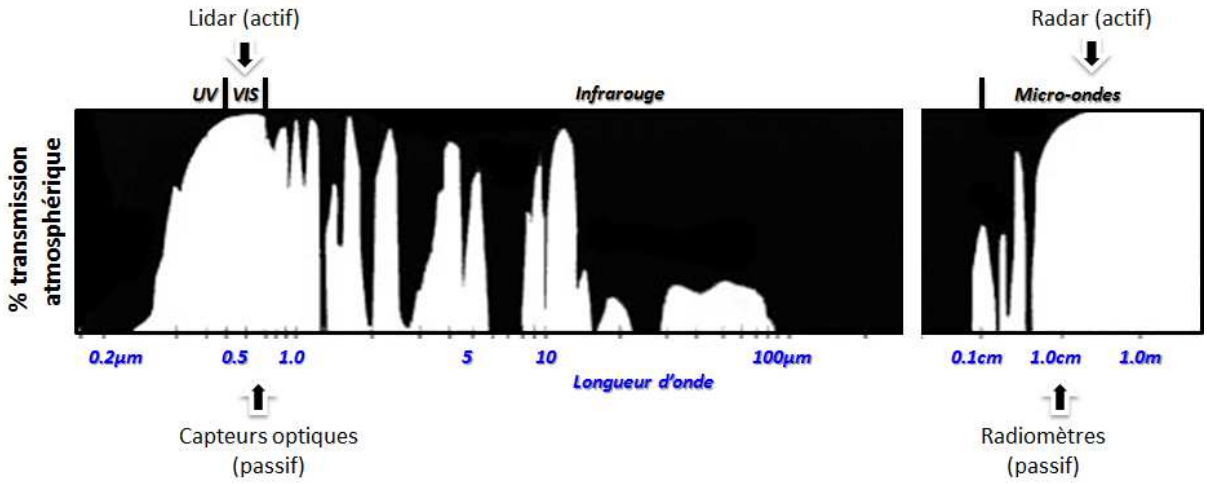


Figure 3: Les principaux domaines électromagnétiques en observation de la Terre. Les systèmes actifs sont distingués des systèmes passifs.

Très schématiquement, la présence de diffuseurs (objets/surfaces) perturbera d'autant moins un signal lumineux que la taille de ces diffuseurs sera petite par rapport à la longueur d'onde du signal. Notre capacité de vision (0.38 µm < λ < 0.78 µm) nous empêche de voir au travers des murs de quelques millimètres alors que notre capacité auditive nous permet d'entendre notre voisin (f=330 Hz; λ=1 m). De même, l'observation dans le visible avec des longueurs d'onde λ autour de 0.6 µm n'a rien à voir avec une observation en hyperfréquences, par exemple, en bande C (λ ~ 6 cm): le rapport de 'perception' est de 100000. En optique, ce sera donc l'organisation interne des cellules au sein d'une feuille qui va interagir avec l'éclairement solaire alors que ce sera plutôt la géométrie elle-même de la feuille qui va interagir avec le signal en bande C. On a donc tout intérêt à profiter de la complémentarité des différents domaines électromagnétiques d'observation pour étudier des milieux aussi complexes que les forêts.

J'ai travaillé sur un éventail de données acquises par des instruments embarqués, soit sur avion ou hélicoptère, soit sur satellite (Table 1). Je me suis intéressé à des données de résolution spatiale allant de 50 cm (images Geoeye ou Quickbird) à 50 km (diffusiomètre vent d'ERS-1; Mougin et al. 1995).

Domaine	Type	Résolution spatiale			
		0.5 – 1 m	1-10 m	10-100 m	50 km
Optique	Passif: panchromatique et multispectral	IKONOS, GEOEYE, PLEIADES, QUICKBIRD, SPOT-5, WORLDVIEW (S) et Photographies IGN (A)		LANDSAT, SPOT1-4 (S)	
	Actif:Lidar	Hélicoptère: ALTOA			
Radar (actif)	Imageur (RSO)		AIRSAR, ESAR, TROPISAR (A); SIR-C/X-SAR (NV)	ALOS, ENVISAT, ERS-1/2, ENVISAT, JERS-1 (S); SIR-C/X-SAR, SRTM (NV)	
	Profilomètre				ERS-1/2 (S)

Table 1 : Récapitulatif des données de télédétection utilisées. S: satellite; A: aéroporté; NV: navette spatiale; RSO: radar à synthèse d'ouverture.

Mes études impliquent des images acquises dans le domaine optique entre ultraviolet et proche infrarouge (0.4 µm < λ < 2.5 µm; p. ex. Demarez et al. 1999; Proisy et al. 2007) et les principales bandes radar utilisées en observation de la Terre (3 cm < λ < 60 cm; p. ex. Proisy et al. 2000a; b). J'ai analysé des données Lidar dites de dernier écho acquise en infrarouge à 0.9 µm (Anthony et al. 2008; Proisy et al. 2009). Je n'ai pas travaillé en infrarouge thermique et je n'ai pas utilisé de données micro-ondes passives.

3. REGION D'ETUDES, TERRAIN, IMAGES ET METHODES

3.1 Tous en mangrove!

Cela fait vingt années que je parcours les forêts tempérées (Fontainebleau), forêts tropicales (Guyane Française) et les mangroves (Guyane Française, Brésil, Indonésie) pour réaliser des inventaires forestiers. Passer du temps en mangroves me parait une très bonne école pour se passionner d'écologie forestière tropicale. Emblématiques de la plupart des pays du Sud ayant un domaine littoral, les mangroves sont démonstratives de processus écologiques (cf. section suivante) et de processus côtiers (régime de marées, envasements, cycles biogéochimiques, chaînes trophiques, etc.). Avant de poursuivre la présentation de mes travaux, quelques lignes sur les problématiques de gestion littorale et des mangroves me paraissent nécessaires. Le texte ci-dessous est extrait en grande partie du rapport de Master IEGB d'Anaïs Didier, étudiante M1 Master IEGB que j'ai encadrée en 2008 (Didier, 2008).

3.1.1 Mangroves

Les mangroves sont des écosystèmes forestiers qui se développent dans les zones intertidales (zones de balancement des marées) des régions tropicales entre ±30° de latitude (Fig. 4). Les limites latitudinales sont corrélées avec la température (isotherme 24°C) et l'aridité (Saenger, 1998). Le domaine Indo-Pacifique avec une cinquantaine d'espèces de palétuviers (l'arbre de mangrove) se distingue du domaine Atlantique composé de moins d'une dizaine d'espèces (Tomlinson, 1994).

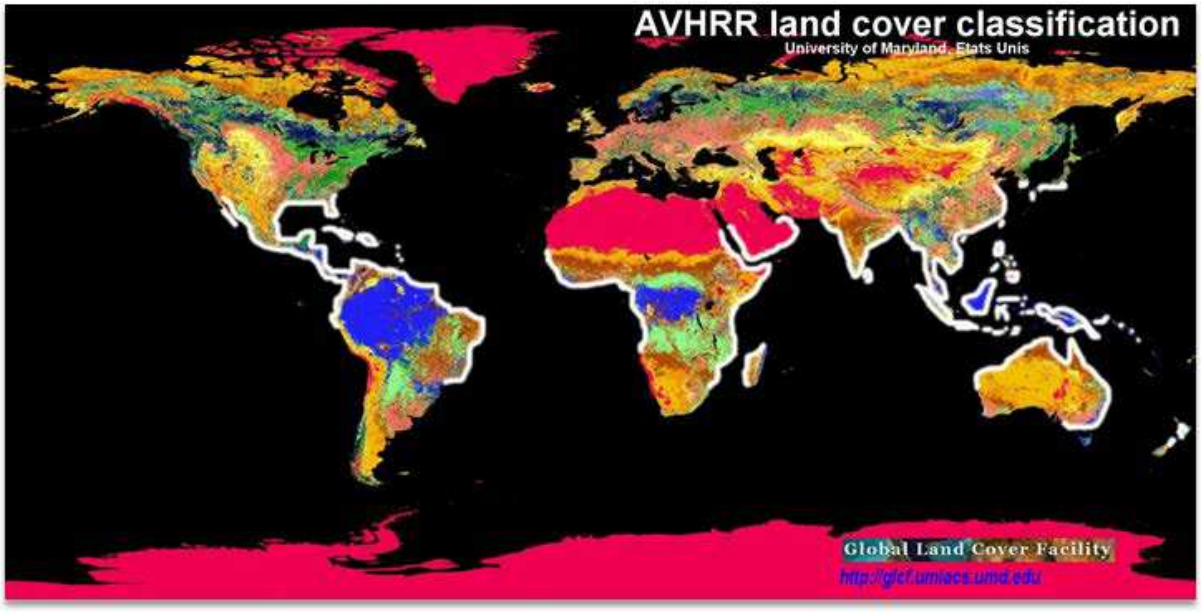


Figure 4: Aire de distribution des mangroves dans le monde (ligne blanche).

Comme cet écosystème est à l'interface entre le milieu terrestre et le milieu océanique, les palétuviers, espèces arborées qui le composent, possèdent des adaptations morphologiques et physiologiques particulières qui permettent la survie et le développement en milieu anaérobique (racines aériennes, pneumatophores), salé (halotolérance) et instable (racines "échasse"). La dynamique naturelle des mangroves est fortement régie par des forçages de type hydro-sédimentaires, liés à la fois aux phénomènes océaniques (cycles des marées, houles, vent), aux transports sédimentaires (vases, sables) côtiers, le tout en forte connectivité avec les milieux terrestres en arrière via les écoulements d'eau douce vers la mer (par exemple, Saenger, 2003).

Les mangroves jouent donc véritablement un rôle tampon de préservation et de protection du littoral. Elles participent non seulement au filtrage des pollutions et à la qualité des eaux littorales (p. ex., Schaffelke et al. 2005) mais elles constituent également une barrière physique qui atténue l'effet érosif (et parfois meurtrier) des houles de tempêtes, d'ouragans voire de tsunamis (par exemple, Tanaka et al. 2007).

On observe un gradient de densité de végétation en fonction de la latitude (Fig. 5) avec à l'équateur les plus fortes valeurs de biomasse et de hauteurs (Saenger et Snedaker, 1993). Sur les côtes vaseuses au Brésil ou en Guyane Française (entre 0 et 5°N), ces forêts atteignent 40 mètres de haut avec des diamètres de tronc de 120 cm (p. ex. Fromard et al. 1998).

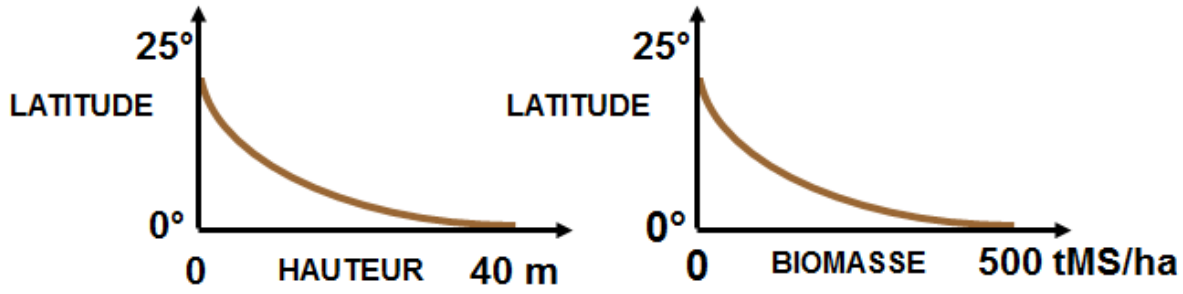


Figure 5: Variations latitudinales de la hauteur de canopée et de la biomasse épigée exprimée en tonnes de matières par hectare.

Refuge-habitat pour de nombreuses espèces animales (oiseaux, crabes, crevettes), la forte productivité liée à la dynamique accélérée de l'écosystème de mangrove alimente la chaine trophique côtière. La totalité de la litière étant utilisée et/ou exportée sur l'ensemble du domaine côtier par l'action des marées via un réseau dense de chenaux (p. ex., Nagelkerken et al. 2008), le bon fonctionnement de l'écosystème permet le renouvellement des ressources halieutiques. Près de 75% des espèces tropicales commercialisées ont passé une partie de leur vie en mangrove (UNEP-WCMC, 2006).

Or, les 25 dernières années ont vu la disparition de 35% et 85% de la superficie mondiale des mangroves (FAO, 2007). Cette destruction a pour origine l'augmentation d'activités industrielles (aquaculture, barrages hydro-électrique, industries portuaire et pétrolière) et de l'urbanisation, elles-mêmes liées à une augmentation importante des populations vivant sur le littoral. Les pressions sur les ressources côtières ne sont pas que locales. La forte demande mondiale pour les crevettes pousse gouvernements et industriels à poursuivre l'installation de fermes aquacoles extensives au détriment de populations locales spoliées des richesses gratuites offertes par l'écosystème (p. ex., Sathirathai et Barbier, 2001). Les régions de mangroves deviennent de plus en plus fragmentées et les services rendus par l'écosystème diminuent proportionnellement à la disparition de l'écosystème. À ce rythme-là, à la fin du siècle, il n'y aura plus de mangroves: 'A World without mangroves?' titraient Duke et al. (2007) dans un article pour Science. Bien sûr, certains pays, des associations ou des industriels replantent. Mais, la restauration des mangroves se fait souvent à la va-vite: une seule espèce, sans considération de l'autoécologie de l'espèce ni de l'état hydrologique (Lewis, 2005; Fig. 6). Dans ces programmes de replantation, seul le nombre d'arbres plantés semble être important et il ne faut apparemment pas trop s'attarder sur un éventuel programme de suivi mais plutôt un nouveau financement pour replanter: 'Knowledge overload, wisdom underload' constate Lewis (2009).



Figure 6: Plantation de Rhizophora au Vietnam versus colonisation naturelle et opportuniste par *Avicennia germinans* en Guyane Française (cf. 'Résultats thématiques' et Proisy et al. 2009 pour des explications).

Ce contexte peut paraitre pessimiste. Pourtant, mes dernières missions de terrain à l'embouchure de l'Amazone au Brésil et dans le delta de la Mahakam en Indonésie me laissent entrevoir une lueur d'espoir: la vitalité de cet écosystème est impressionnante et lui permettrait de recoloniser des zones littorales abandonnées par l'homme.

3.1.2 La Guyane Française comme région pilote

La Guyane Française a un littoral particulièrement intéressant pour tester et mettre au point des méthodes spatiales (Proisy et al. 1998; Fromard et al. 2004): la dynamique des mangroves peut s'y observer quasiment au jour le jour.

Ce département français est au cœur de la plus longue côte vaseuse au monde (Fig. 7) qui s'étend sur plus de 1200 km entre les embouchures de l'Amazone et de l'Orénoque (Anthony et al. 2010; 2013). Sous l'action des houles et des courants côtiers, les sédiments s'agglomèrent à la côte pour former de grandes plates-formes (bancs) de vase. Le processus s'initie à partir du Cap Orange (cf. Fig. 7) et les bancs de vase se déplacent vers le nord-ouest jusqu'au Venezuela (Froidefond et al. 2004; Plaziat & Augustinus, 2004). Ce transfert de sédiments est dû à la remobilisation permanente des vases agglomérées sous l'action des houles (Anthony et al. 2010). Les sédiments remis en suspension pourront de nouveau 'se coller' un peu plus loin vers le Nord-Ouest. Il y a entre 4 et 5 bancs de vase le long des côtes guyanaises.

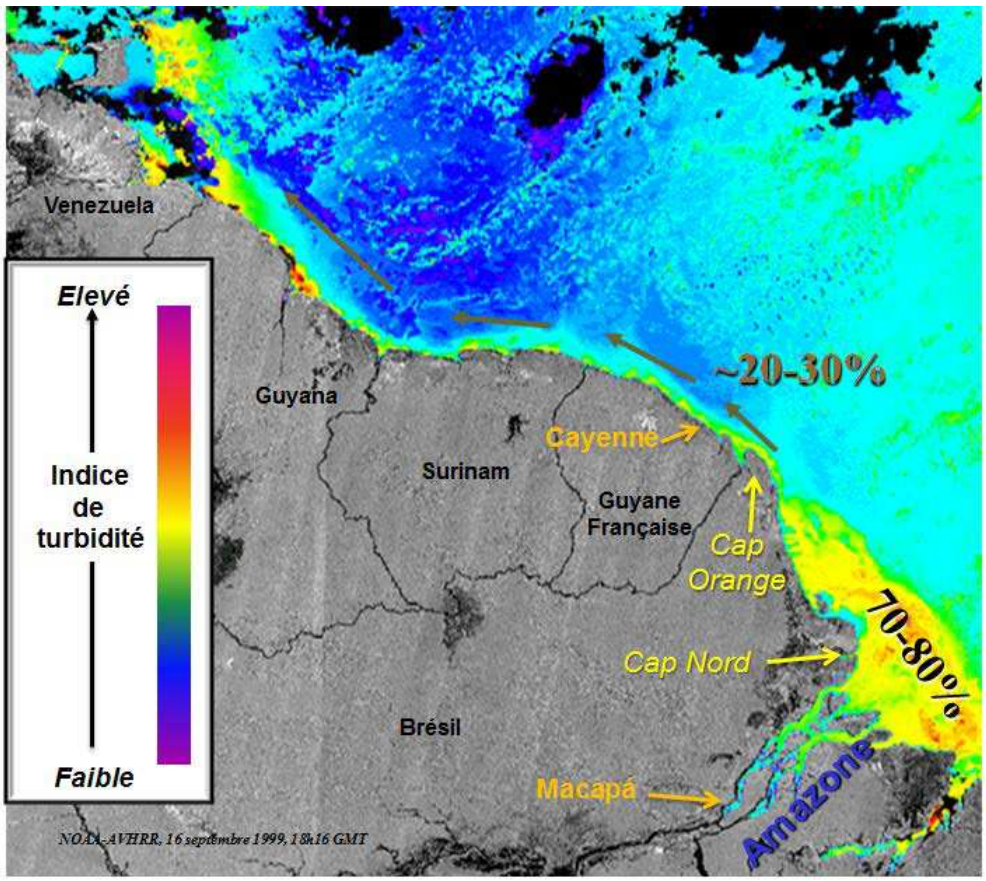


Figure 7: Les côtes sous influences des sédiments amazoniens. L'indice de turbidité donne une idée de la charge sédimentaire dans les eaux superficielles.

La zone de vase intertidale, c'est-à-dire la zone découverte à marée basse, peut atteindre 40 km de long pour 5 km vers le large (Fig. 8).

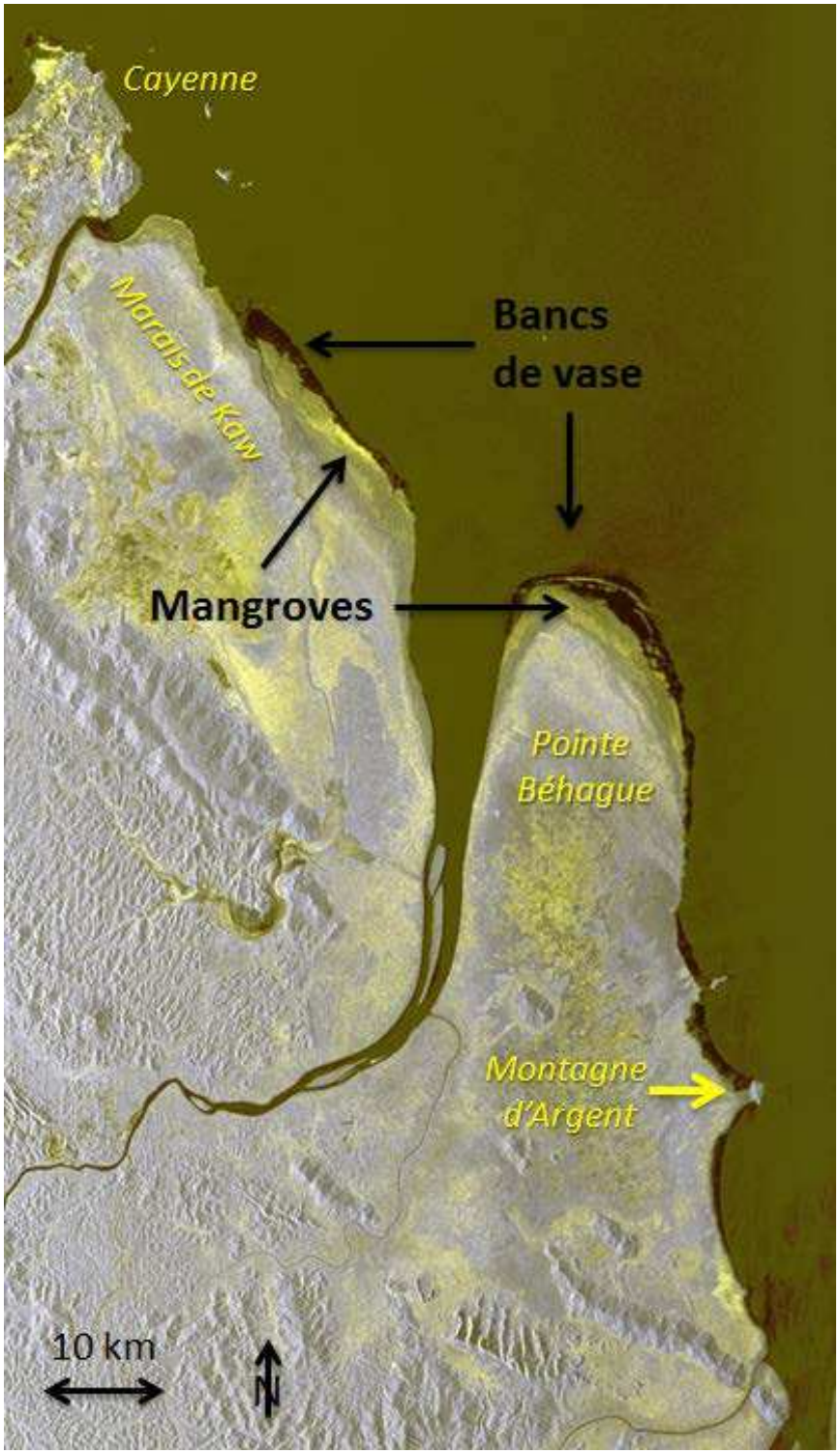


Figure 8: Le littoral guyanais entre la frontière brésilienne au Sud (fleuve Oyapock) et Cayenne, vu par l'instrument radar du satellite ALOS. Les zones noires en front de mer indiquent la position des bancs de vase et un effet de diffusion en direction opposée au satellite: en bande L, les zones envasées apparaissent comme lisses (d'après Proisy, 2010).

Au cours des décennies, tout point du littoral guyanais verra passer des phases d'érosion et des phases d'accrétion vaseuse avec disparition et apparition de forêts de mangroves. Les images satellitaires rendent bien compte de ces importants changements dans la morphologie du littoral (Fromard et al. 2004; Fig. 9). On peut suivre l'évolution du trait de côte depuis les années 1950 (cf. §5.2).

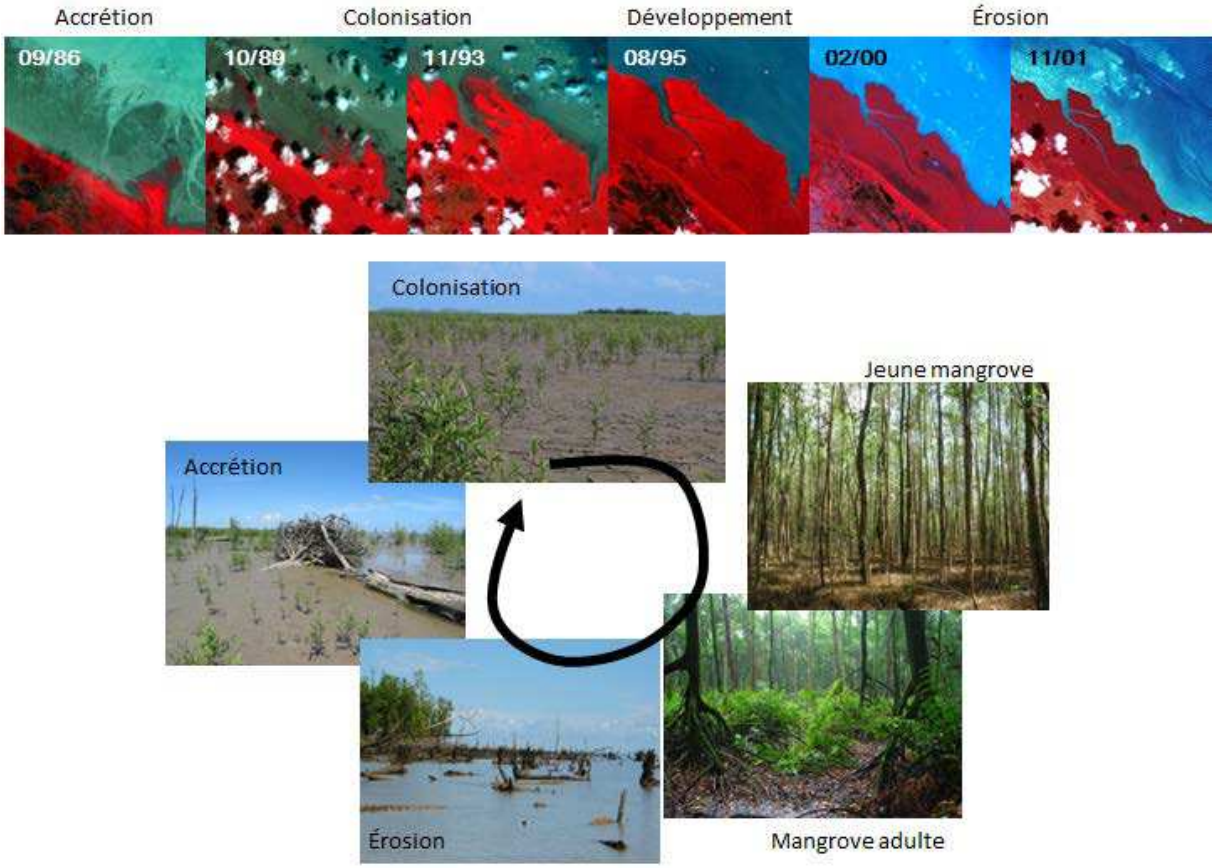


Figure 9: En haut: séquence d'images SPOT (largeur égale à 6 km) sur une portion du littoral guyanais. En bas, évolution du paysage côtier et des mangroves littorales (adapté de Fromard et Proisy, 2011).

En phase d'érosion, la houle atteint les peuplements de palétuviers. La destruction de la mangrove semble venir de l'action mécanique des houles sur le substrat vaseux plutôt que sur les arbres directement. Ceux-ci tombent en un seul morceau avec leur système racinaire (cf. 'Érosion', Fig. 9). Durant la phase d'accrétion vaseuse, la charge sédimentaire des eaux en partie subtidale du banc amortit l'énergie de la houle, la partir intertidale se charge et s'élève en se consolidant au gré des régimes de marées et des périodes d'exondation.

La mangrove semble pouvoir coloniser rapidement ces grandes surfaces de vase nue. On ne parle pas de quelques hectares colonisés en quelques années, mais de centaines d'hectares colonisés en une année (Proisy et al. 2009; Fig. 9). Les processus de colonisation peuvent apparaitre aussi bien en proximité de zones de mangroves adultes que dans des zones exsangues de formations de palétuviers importantes (c'était le cas de Cayenne dans les années 2000).

Je reviendrai sur les hypothèses que nous avons formulées pour expliquer cette capacité à coloniser si rapidement et si extensivement (Proisy et al. 2009). En tout cas, le résultat est une mosaïque de peuplements de palétuviers, et donc de structures forestières, que l'on peut observer dans une seule

image (10 x 10 km à 50 x 50 km). L'intérêt est fort pour les recherches en télédétection radar (Proisy, 1998; Mougin et al. 1999; Lucas et al. 2007), optique (Fromard et al. 2004; Proisy et al. 2007) et lidar (Anthony et al. 2008; Proisy et al. 2009).

3.1.3 Logistique, collaborations et budgets

En Guyane Française, la présence d'organismes de recherche notamment l'IRD depuis plusieurs décennies rend possible des expérimentations sophistiquées de description des structures forestières et des propriétés de la végétation (tachéomètre laser, lidar terrestre, campagnes aéroportées, etc.) qui ne pourraient être menées aussi facilement dans un pays étranger.
L'éventail des situations rencontrées en mangroves guyanaises depuis 1996 me permet d'envisager avec une certaine sérénité (voire un certain instinct?) la faisabilité de missions et les meilleurs chemins en mangrove. Conditions météorologiques (pluies, vents, orages, houles formées), temps d'accès au site, proximité de la mer, état de marée, abeilles, forment une cohorte de paramètres à bien évaluer avant de s'engager dans la réalisation d'une mission d'inventaire forestier. Pour les études de colonisation végétale sur bancs de vase en cours de consolidation, une certaine expérience pour avancer avec un minimum d'efforts sur les bancs de vase néoformés, très visqueux et meubles est acquise (Fig. 10).



Figure 10: De gauche à droite, en haut vers le bas: transport de matériel sur un banc de vase meuble avec une luge, générateur électrique à énergie solaire pour alimentations d'instruments disséminés sur le banc de vase, transport d'embarcation en aluminium dans une jeune mangrove, accès rampant aux instruments disséminés à marée basse.

En Guyane, les étendues de mangroves sont vastes (Fig. 11). On ne peut pas se permettre d'arriver en bordure de mangrove sans cartographie fine de la physionomie de la région voire des peuplements forestiers: un préalable indispensable est la disponibilité de photographies aériennes ou d'images satellitaires à très haute résolution spatiale (THRS; cf. l'approche grain de canopée §4.2).

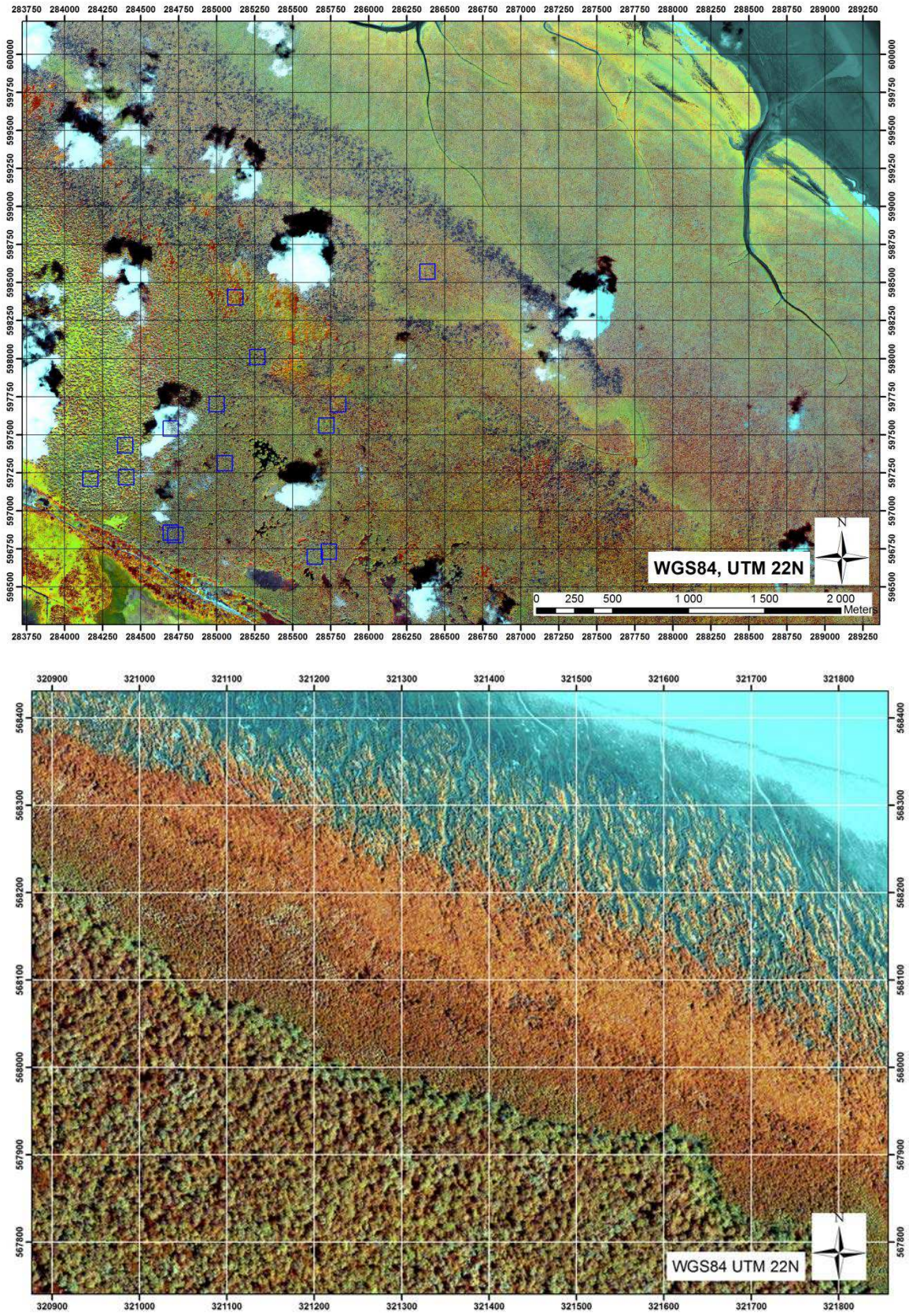


Figure 11: En haut: Positionnement des placettes (les carrés en bleu) inventoriées dans la région de Sinnamary sur une image Geoeye. La grille est réglée à 250m. L'accès se fait par la piste de l'Anse (en bas à gauche). En bas: Zoom de largeur 1 km dans la région de Kourou-Tonate à partir d'une image Geoeye. La grille est réglée 100m. Les différentes physionomies de mangroves (stades de développement) sont clairement visibles (cf. §4.2).

Réaliser des inventaires forestiers en mangrove nécessite de tracer des layons, depuis la piste ou depuis le point d'ancrage du bateau. Plus les images sont récentes et résolues, plus l'expérimentation est facilitée. Enfin, pénétrer sur plusieurs kilomètres dans une forêt inondée parfois jusqu'en haut des cuisses nécessite d'avoir un œil permanent sur l'état physique, moral et la préservation de la sécurité de ses équipiers[2]. Dans les cas les plus faciles, la vitesse de marche se situe autour de 3 km/h alors qu'elle peut descendre à 100 mètres par heure dans les peuplements ouverts avec sous-bois à fougère de type *Acrostichum aureum*. Tout cela a un coût. Répondre à des appels à projets et obtenir des financements pour payer les frais d'essence et d'utilisation des matériels nautiques et voitures (>100€/jour) est donc un souci permanent. Cela prend du temps mais, en contrepartie, cela renforce le réseau de collaborations.

Suite à mon affectation en Guyane Française, en 2001, les collaborations nationales se sont renforcées notamment avec l'UMR ECOLAB (Toulouse; écologie forestière) et l'Université Côte d'Opale (Wimereux; dynamique côtière). Les relations avec les partenaires locaux comme la DEAL ou la Région Guyane sont également solides. Mais, comprendre la dynamique des mangroves guyanaises et prédire leur évolution dans les prochaines années passe par une meilleure compréhension des processus générés en amont, c'est-à-dire sur les côtes de l'Amapá. En 2001, j'avais la ferme intention de développer un partenariat avec le Brésil. Je peux dire que c'est chose faite: les échanges scientifiques sont permanents (accueil de chercheurs, de doctorants, conférences invitées). L'emploi de la télédétection est probablement un des aspects fédérateurs de mes collaborations depuis plus de dix ans avec mes collègues brésiliens du IEPA et de l'UFPA (Polidori & Proisy, 2003; Proisy et al. 2003a; Proisy, 2005). Je pense que ces collaborations durent car nous avons une fascination partagée pour une région côtière hors du commun. Je reparlerai des côtes et des mangroves brésiliennes dans la présentation de mes travaux futurs.

3.2 Terrain

L'étude de la dynamique des mangroves nécessite la caractérisation des processus environnementaux et côtiers. La position des zones de mangroves est importante à resituer longitudinalement et transversalement à la ligne côte.

3.2.1 Prémices de stations locales d'observation

La météorologie c'est-à-dire le vent, la pluviométrie et l'éclairement solaire peuvent rapidement changer au cours de la journée, au cours des saisons et d'un site à l'autre. Or, ces conditions ont des effets à la fois immédiats (chute de branches, ennoiement) et à long terme (consolidation du banc de vase; Gardel et al. 2009). Sur un banc de vase néoformé, l'équipe de l'ULCO a démontré qu'il était possible d'implanter des stations de mesures (météorologique, hauteurs d'eau, courants de marées, photographies cadencées) permettant de réaliser des analyses couplées des transformations du substrat vaseux (accrétion, dessiccation), du régime d'ennoiement-exondation et de l'apparition de la végétation de mangrove.

[2] Je tiens à saluer (et à faire connaître) la formation aux premiers secours en zone isolée organisée par le Service de Médecine de Prévention de l'IRD avec le concours des sauveteurs professionnels de l'UDPS13 sur une semaine. Cette formation financée par la DRH IRD est de la plus grande utilité pour le terrain en mangrove et ouvre même des possibilités de montage de plus grosses expéditions.

Les données sont enregistrées localement directement dans la mémoire des appareils. Il faut passer les décharger régulièrement. Des panneaux solaires peuvent être installés pour assurer l'apport d'énergie nécessaire à des expérimentations sur du long terme (Fig. 10).

3.2.2 *Topographie du banc de vase*

Un banc de vase n'est pas une surface plate. En Guyane Française, la surface intertidale affiche une élévation d'un peu plus de 1 mètre pour une distance de 3 kilomètres de la mer vers la terre (Anthony et al. 2008). Il n'y a pas de gradient continu d'élévation de la mer vers la terre: c'est plutôt un réseau hydrologique constitué de nombreux chenaux de marée, d'affaissements localisés et des variations microtopographiques (Fig. 12).

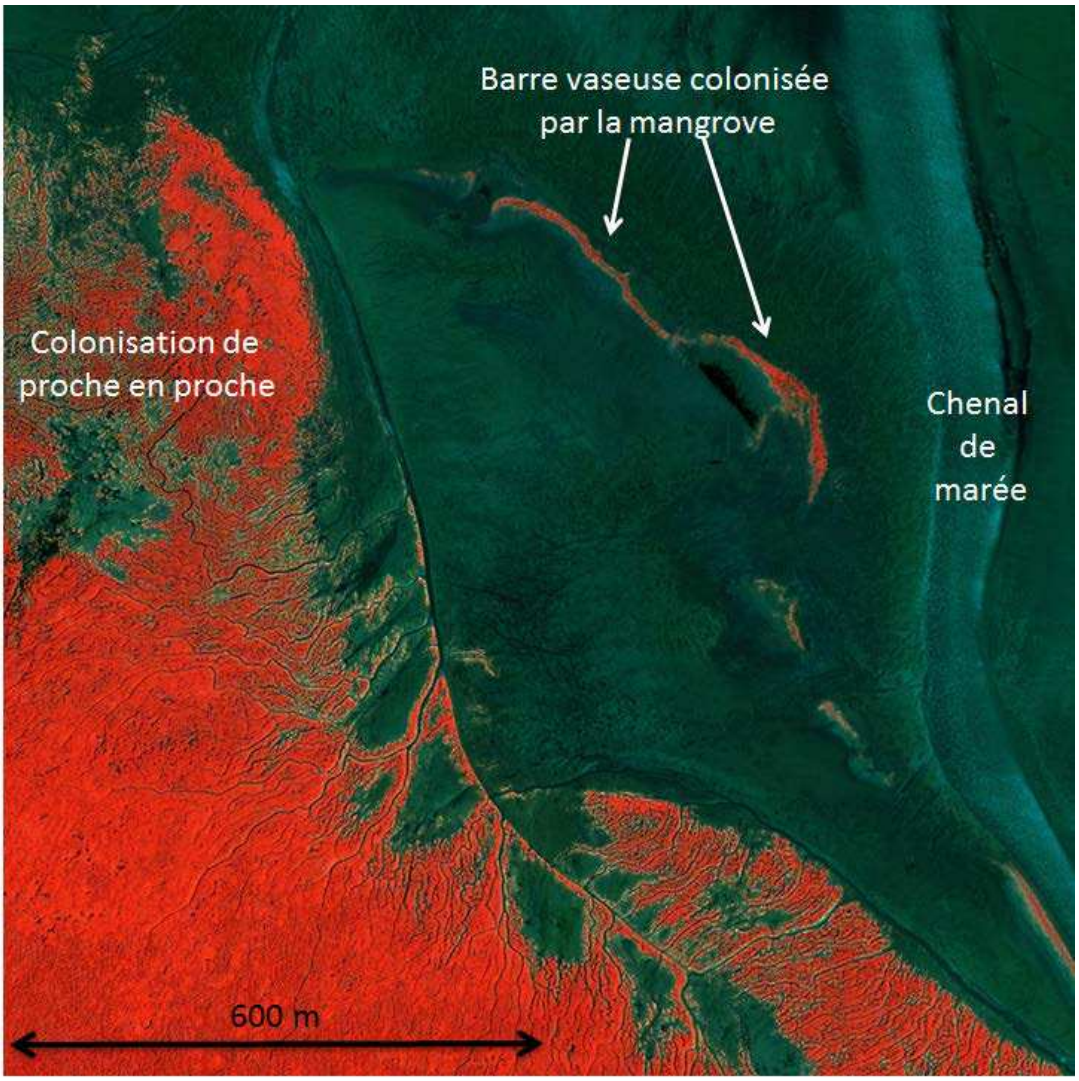


Figure 12: Extrait d'une image IKONOS (région de Sinnamary, Guyane Française) couvrant un banc de vase en cours de colonisation. Les chenaux de marées sont clairement visibles. Ils se forment dans les parties les plus hautes. La mangrove (en rouge) est capable de coloniser les parties les plus élevées, y compris celles distantes des peuplements déjà formés (suggérant des flux importants de graines et une bonne dispersion).

Quelques dizaines de centimètres de différence peuvent modifier complètement le régime d'ennoiement d'une zone (Knight et al. 2008; Gardel et al. 2009; Proisy et al. 2009), limiter ou favoriser l'enracinement des propagules.

La topographie des zones intertidales serait donc un paramètre clé à systématiquement mesurer et suivre au cours des expérimentations car l'élévation du substrat conditionne l'hydrologie, le fonctionnement, la composition spécifique et la structuration des mangroves (Gensac et al. 2011). Obtenir cette information sur des zones de grande superficie relève d'un véritable challenge physique et technologique car à la difficulté de déplacement sur banc de vase meuble se combine la nécessité de faire des relevés topographiques avec une précision altitudinale meilleure que 10 cm (cf. §5.2.1). Avec un tachéomètre laser ou infrarouge, on peut parcourir raisonnablement un bassin versant sur 10 ha environ en suivant un maillage décamétrique (assez irrégulier) alors qu'avec une acquisition de données Lidar (Anthony et al. 2008; Proisy et al. 2009) la totalité du banc de vase pourra être cartographié avec un maillage métrique régulier (mais un coût de plusieurs dizaines de milliers d'euros). À titre indicatif, des séries temporelles (sur des périodes temporelles réduites) d'images optiques peuvent être utilisées pour calculer des courbes de niveau (Gratiot et al. 2005).

3.2.3 Données forestières

Les parcelles forestières sont préalablement localisées dans les images à THRS (cf. Fig. 11). Une fois sur place, une zone d'inventaire forestier est délimitée. Les surfaces d'inventaires sont ajustées en fonction du stade de développement et de l'homogénéité du peuplement. Plus le peuplement est jeune, dense et homogène, moins l'inventaire nécessite une surface importante (entre 500 et 1000m² généralement). Pour les peuplements adultes, une surface d'inventaire sur un hectare devient notre standard. Dans chaque parcelle, les informations minimales sont l'identification de l'espèce et la mesure du DBH pour chaque individu. À partir de ces relevés, on calcule généralement une surface terrière (m²/ha), paramètre intégrateur des caractéristiques de la placette puisqu'il correspond à la somme des sections d'arbres mesurés à hauteur de DBH. Pour les faciès adultes, on commence généralement à compter les arbres de DBH > 5 cm. Quelques hauteurs totales d'individus et de première insertion de branches complètent en général cet inventaire. Pour ces mesures, on utilise un télémètre laser à main levée et l'erreur sur la mesure de hauteur de l'apex est de l'ordre de quelques mètres pour les arbres de taille supérieure à 30 m. Les positions d'arbres sont systématiquement mesurées depuis 2007 avec un télémètre laser (précision à 50 cm environ) relativement à un coin de la parcelle. Ce coin est localisé géographiquement avec une précision de 1 à quelques mètres suivant le modèle de GPS. L'inventaire sur un hectare de mangrove peut nécessiter jusqu'à 3 jours de terrain. Nous n'avons pas installé en Guyane Française de dispositifs permanents qui permettraient de suivre, depuis les stades pionniers jusqu'à des stades adultes, l'auto-éclaircie et le taux de mortalité, les vitesses de croissance en hauteur et le développement des architectures. La raison principale vient probablement du manque de moyens humains pour installer et suivre en continu les parcelles (plusieurs kilomètres à pied et/ou dizaines de kilomètres en bateau). Au total et pour l'instant, c'est une soixantaine de parcelles inventoriées depuis 1996 en Guyane Française soit environ une quinzaine d'hectares (Fig. 13). Les parcelles de 2013 ont été réalisées en commun avec mes collègues brésiliens.

Malgré l'instabilité côtière, les biomasses épigées peuvent atteindre les niveaux les plus élevés constatés dans le monde pour les mangroves. Les valeurs estimées en Guyane peuvent dépasser 400 tonnes de matière sèche par hectare (Fromard et al. 1998; Mougin et al. 1999; Proisy et al. 2007). Pour obtenir des (évaluations de) valeurs de biomasse à l'hectare, on somme la biomasse de chaque arbre de la parcelle et on extrapole si besoin à l'hectare. L'application de relations allométriques entre la biomasse de l'arbre et son DBH est donc nécessaire. J'utilise les relations mises au point par F. Fromard en Guyane Française (Fromard et al. 1998) pour les 3 espèces de palétuviers rencontrés, *Avicennia germinans*, *Rhizophora spp* et *Laguncularia racemosa*. Elles ont été obtenues à partir de coupes d'arbres, de pesées in situ des poids frais et de l'obtention du rapport poids sec/poids frais. Ont été distinguées la biomasse des feuilles, des branches et des troncs (Fig. 15). Le diamètre maximal d'arbre abattu et pesé est de 42 cm pour *Avicennia germinans* et 32 cm pour *Rhizophora spp* (on imagine assez bien l'effort demandé). Or, les peuplements de palétuviers en Guyane Française comportent souvent des individus au-delà de ces diamètres de tronc avec des records mesurés à 125 et 75 cm pour ces deux espèces dominantes. Dans les résultats thématiques (§5.1), je présenterai les expérimentations non destructives que je réalise pour décrire les palétuviers adultes.

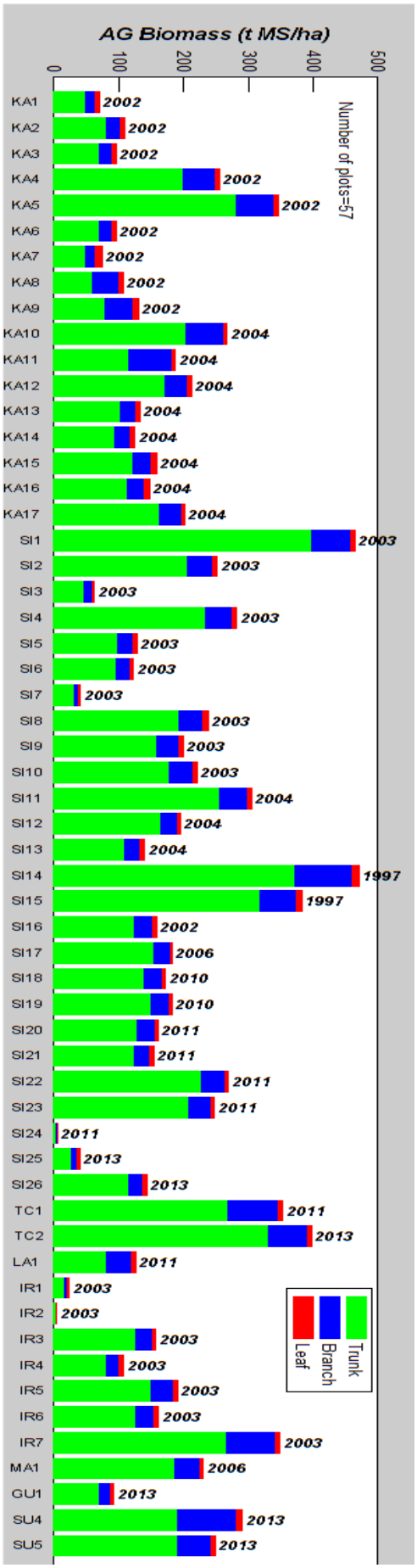


Figure 13: Biomasses des parcelles inventoriées en Guyane et en Amapá, Brésil. Les codes donnés en ordonnées indiquent le site d'étude (ex. SI=Sinnamary).

3.2.4 Sur l'importance des bases de données et observatoires

Il est bon de savoir prendre du recul dans toute expérimentation de terrain. Parmi les moyens très utiles pour situer ses travaux de recherches à la fois spatialement et temporellement, l'interface Web de Google Earth (GE) et, notamment son mode historique, fournissent des informations de qualité sur la dynamique des littoraux dans le monde. Quand des images à THRS sont disponibles, c'est parfois même l'occasion de tester des méthodes spatiales (Barbier et al. 2010; Ploton et al.

2012a; b). Les fournisseurs d'images qui permettent de rechercher dans des archives via des interfaces Web sont maintenant bien identifiés. Citons, DigitalGlobe, GeoFuse, GeoStore pour rechercher la disponibilité d'images à très haute résolution spatiale. Les prix pour l'achat d'images à THRS archivées (pixel de 50cm à 1m) varient de 10 (Ikonos, Geoeye) à 30€/km² (Worldview-2, 8 bandes). Pour des programmations, il faut multiplier le budget par 2.

Les données de télédétection apportent également des informations sur l'hydrologie des grands bassins fluviaux, les courants et les houles océaniques. Pour l'étude des côtes sous influences amazoniennes, je citerais deux sources de données qui permettre d'introduire dans nos analyses des signaux de forçage régionaux (bassin amazonien, océan Atlantique).

1) La première source de données vient des travaux de l'ORE Hybam sur le bassin amazonien, notamment le résultat de Martinez et al. (2009) qui suggèrent une augmentation des sédiments en suspension d'environ 20% entre 1995 et 2007. Tôt ou tard, une partie de ces sédiments atteindra l'embouchure de l'Amazone puis sera transportée le long du littoral de l'Amapá et des Guyanes. L'augmentation de la masse sédimentaire pourrait engendrer des modifications sur les processus d'envasement mais aussi d'érosion tels qu'on les connaît (encore trop peu) maintenant (Anthony et al. 2013). Le couplage des recherches sur le bassin amazonien avec les recherches sur les côtes sous influences amazoniennes est donc indispensable.

2) La seconde source de données gratuites concerne le climat et la circulation des masses d'eau sur l'océan Atlantique (Fig. 14).

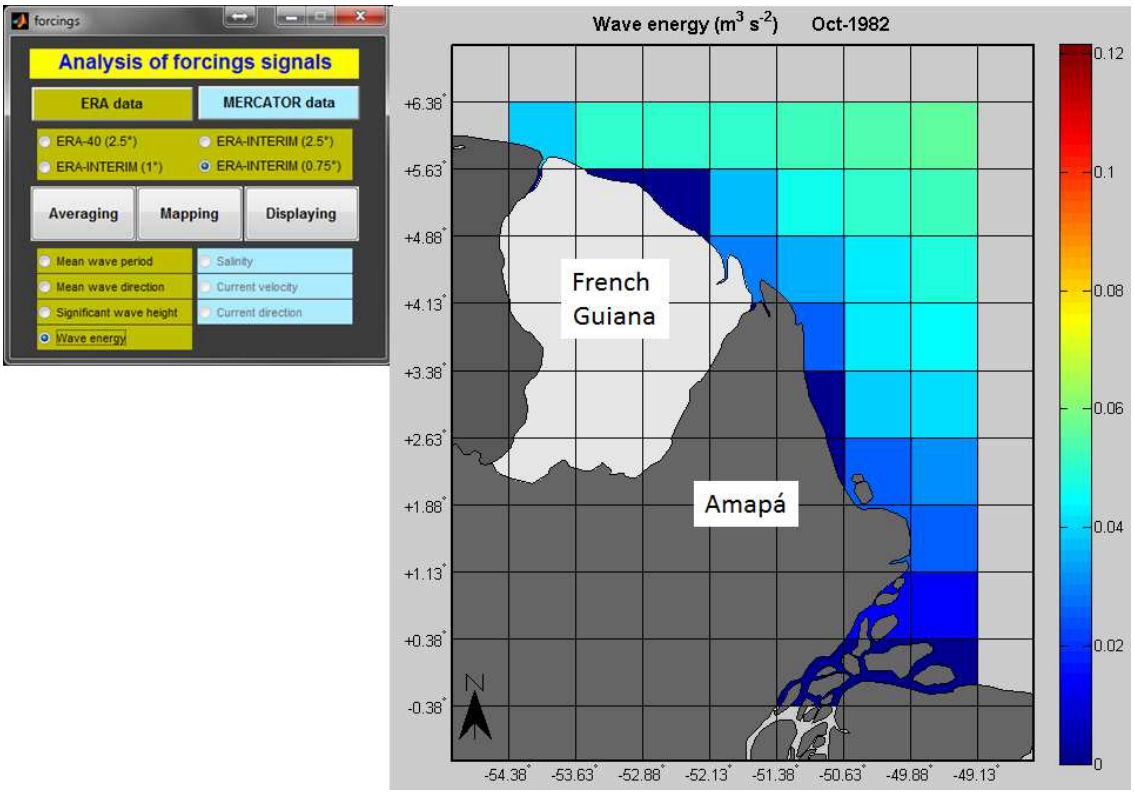


Figure 14: A gauche: Interface utilisateur (développement personnel) de contrôle et d'analyse des données ERA et MERCATOR-OCEAN. À droite: cartographie de la sortie 'Énergie de Houle' (cf. Gratiot et al. 2007 pour la signification de ce paramètre) au large des côtes de l'Amapá et de la Guyane Française (capture d'écran correspondant à une moyenne d'octobre 1982).

D'une part, le centre européen de prévisions météorologiques (ECMWF) met à disposition des données ERA-INTERIM (Dee et al. 2011) qui sont des sorties de modèles atmosphériques fournissant des estimations d'intensité des vents, directions et hauteurs des houles (maille de 0.75°; à partir de 1979). Pour des analyses décennales entre 1957 et 2002, il y a toujours les données ERA-40 (Uppala et al. 2005). D'autre part, MERCATOR-OCEAN fournit des données sur les courants et la bio-géochimie océanique. Même si les signaux côtiers restent désynchronisés des signaux sédimentaires dans le bassin amazonien et même si la bathymétrie côtière en Amapá et en Guyane (pratiquement inconnue parce que très changeante) modifiera signaux de houles et courant estimés plus au large, on peut faire l'hypothèse que les forçages locaux sont fortement dépendants des masses sédimentaires disponibles en amont et des processus océaniques générés au large. Un travail de simulation en cours avec l'UMR TETIS tend à montrer l'importance du signal 'houles océaniques' sur la morphologie des bancs de vases (cf. 5.2).

3.3 Télédétection

Dans la présente section, je compare les avantages et inconvénients des systèmes passifs et actifs. Je rappelle comment obtenir les grandeurs physiques à partir des intensités observées dans les images avant de présenter les principes de l'analyse des signatures spatiales et spectrales en fonction des paramètres forestiers. Pour éviter la dispersion, je ne présenterai ni les techniques de géo-référencement des images, ni les techniques de corrections géométriques nécessaires à l'utilisation des images radar aéroportées.

3.3.1 Télédétections passive et active

Il faut distinguer les systèmes de télédétection dits 'passifs' des systèmes dits 'actifs' (qui incluent radar et lidar) car les chaines de traitement et d'analyse pour l'étude des forêts sont complètement différentes.
Les premiers sont dépendants de l'éclairement solaire et de l'atmosphère. Suivant l'altitude et la température de la couche atmosphérique, les gaz (H20, C02, 02, 03) absorbent et les aérosols diffusent plus ou moins le rayonnement solaire. L'atmosphère compromet donc la stabilité temporelle et la cohérence spatiale des mesures optiques. Des méthodes empiriques tentent de corriger les comptes numériques des images et les indices de végétation associés comme le NDVI (correction en relatif) pour permettre de détecter des changements à partir de l'analyse de séries d'images issues du même satellite (Song et al. 2001; Hadjimitsis et al. 2010).
Les instruments actifs émettent leur propre signal et sont capables de mesurer la partie réfléchie par la surface-cible. Dans le cas de système radar, on utilise la matrice de diffusion S qui permet de relier le champ électrique incident E_i et le champ électrique rétrodiffusé E_s par l'équation:

$$E_s = \frac{e^{jkr}}{r}\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} E_i \quad \text{(Equation 1)}$$

où k est le vecteur d'onde, r la distance instrument-cible, H et V les polarisations. La matrice de diffusion [S] est une matrice 2x2 complexe qui caractérise une surface–cible par la façon dont elle modifie le champ électrique incident lors d'une diffusion. Elle contient donc toutes les grandeurs physiques d'intérêt en vue

de la caractérisation de la cible. Le potentiel des systèmes radar pour l'établissement de méthodes robustes et reproductibles d'estimation de paramètres forestiers apparait vraiment intéressant à tester. Ceci dit, les coûts de développement et de mise en orbite des satellites radar (en raison du besoin d'énergie, de la masse supplémentaire à envoyer, des conflits de bandes d'émission, etc.) sont plus élevés que pour les instruments passifs. Excepté les missions de la navette spatiale SIR-X/XSAR dans les années 90, il n'y a pas d'instrument radar à multiples fréquences en orbite actuellement.
Pour le Lidar, beaucoup de systèmes aéroportés existent alors, qu'à ma connaissance, il n'y a, actuellement, qu'un seul satellite qui embarque un instrument Lidar (ICESAT).

3.3.2 Des comptes numériques aux grandeurs physiques

Pour passer des comptes numériques *CN* (niveau d'intensité des pixels dans les images) à des grandeurs physiques, des transformations sont nécessaires.

- **Pour obtenir des images de réflectance**

Les réflectances sont calculées dans chacune des bandes spectrales λ de l'image, à partir de la luminance $L(\Omega_v)$ exprimée en W.m^{-2}.sr^{-1}. Elle correspond à la quantité de flux par angle solide Ω_v (en stéradians). Cette dernière est obtenue en utilisant des coefficients (le gain G, le biais B) de correction généralement fournis dans les fichiers de métadonnées (Eq. 2):

$$L(\Omega_v) = G \text{ x } CN + B \text{ (Equation 2)}$$

Connaissant l'éclairement solaire moyen $E_{solaire,\lambda,J}$ (en W.m^{-2}) au niveau du site d'étude pour la date d'acquisition J à partir, par exemple, des tables de la NOAA, la réflectance mesurée par le capteur satellitaire s'écrit alors avec θ_s l'angle zénithal solaire (Eq. 3).

$$\rho_\lambda(\Omega_v) = \frac{\pi \, \mathrm{L}(\Omega_v)}{E_{solaire,\lambda,J}(\cos\theta_s)} \text{ (Equation 3)}$$

La valeur obtenue est non corrigée des effets atmosphériques, c'est-à-dire que 1) une zone supposée de propriétés optiques stables n'aura pas la même réflectance d'un jour à l'autre si les conditions atmosphériques ont changé et 2) on ne pourra pas comparer les réflectances de deux zones différentes avant d'appliquer une correction des effets atmosphériques. Des modèles de correction atmosphérique existent comme, par exemple, MODTRAN (Berk et al. 1998) ou 6S (Vermote et al. 1997; Kotchenova et al. 2007). Mais en région tropicale, le paramétrage de ces modèles reste délicat en raison de la variabilité tant spatiale qu'en cumuls des colonnes d'eau ou de teneur en aérosols dans les différentes couches atmosphériques.
Dans mon travail, je me sers des images optiques de deux façons. La première est très basique et s'affranchit totalement d'un calcul de réflectance: c'est de l'interprétation visuelle qui me permet de délimiter des types de surface, comme par exemple un trait de côte (cf. Fromard et al. 2004; Gratiot et al.

2008, etc.). La seconde est une analyse de texture, c'est-à-dire la variation locale des comptes numériques ou des réflectances au sein d'une fenêtre de plusieurs pixels (cf. la méthode FOTO. Proisy et al. 2007). Sous l'hypothèse de conditions d'observation assez homogènes au sein d'une même image, l'analyse de texture reste potentiellement moins dépendante des variations atmosphériques au sein d'une image ou d'une série d'images.

- **Pour obtenir des images de coefficients de rétrodiffusion radar**

Le coefficient de rétrodiffusion radar $\sigma°$ (m^2 m^{-2}) est l'analogue à la réflectance bidirectionnelle utilisée dans le domaine optique. C'est le rapport entre le champ rétrodiffusé et le champ incident. Dans le cas d'une cible naturelle étendue, il s'exprime à partir des termes de la matrice [S] (Eq. 1) selon la relation (Eq. 4):

$$\sigma° = \frac{4\pi}{A}\langle|S_{pq}|\rangle \quad \text{(Equation 4)}$$

où *A* est l'aire de la surface ciblée par le faisceau (en mètres) avec p et q égaux à H ou V (polarisations). La moyenne <> réalisée sur plusieurs pixels est nécessaire compte tenu du bruit (dit 'speckle') inhérent aux images radar. Le coefficient de rétrodiffusion est généralement exprimé en décibels (Eq. 5):

$$\sigma°(dB) = 10\ log_{10}\sigma° \text{ (dB)} \quad \text{(Equation 5)}$$

Il suffit alors d'appliquer des facteurs de corrections fournis dans les fichiers de métadonnées (les données sont fournies maintenant presque systématiquement dans un format CEOS) pour transformer les CN en coefficients de rétrodiffusion.

Différence de phase et degré de cohérence sont d'autres grandeurs utilisées en polarimétrie (pour comparer des signaux de polarisation différente mais acquis par la même antenne) ou en interférométrie (pour comparer des signaux de même polarisation acquis avec un décalage spatial). J'invite le lecteur à se référer à mes résultats obtenus avec la polarimétrie (Mitchell et al. 2005; Mougin et al. 1999; Proisy, 1999; Proisy et al. 2000b; 2001a; 2002) et en interférométrie (Proisy et al. 2000c; Ruiz et al. 2000; Proisy et al. 2001b). Ces documents sont téléchargeables depuis ResearchGate.

Enfin, je conseille d'utiliser le logiciel POLSARPRO disponible en téléchargement gratuit depuis le site de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Il permet de lire la plupart des données aéroportées et de satellite radar et d'effectuer des analyses en polarimétrie. Il rend obsolète les milliers de lignes de codes développées dans les années 1990 par de nombreux télédétecteurs radaristes (moi compris) et c'est tant mieux.

3.4 Mise en œuvre d'une chaine d'analyse

Je présente ici la façon dont j'organise mes analyses. Mon souci majeur est d'arriver à faire de chaque analyse expérimentale une pierre de l'édifice 'Caractérisation de la dynamique des structures forestières tropicales'. La solidité des fondations de cet édifice repose sur ma capacité à mener 1) des travaux

théoriques permettant d'interpréter les relations expérimentales signal-végétation et 2) une démarche à long terme intégrative de chaque résultat obtenu sur le terrain ou en télédétection.

3.4.1 Approche expérimentale

Étudier la dynamique des forêts par télédétection nécessite de passer un nombre certain d'heures à observer les peuplements, à mesurer les arbres et à rendre compte des propriétés de l'environnement. Il y a également un important travail de traitement et d'analyse du flux de données d'origines et de natures diverses avant de mettre en évidence d'éventuelles relations entre signaux et propriétés de la végétation (Fig. 15).

Pour mettre en vis-à-vis caractéristiques forestières et signatures spatiales, le choix des paramètres forestiers n'est pas anodin. La surface terrière et la biomasse aérienne sont des paramètres intégrateurs bien adaptés. Par contre, l'utilisation de valeurs de DBH moyen, de densité de tiges à l'hectare et de hauteur d'arbres risque d'être biaisée dans le cas de peuplements d'arbres non-équiennes. Couteron et al. (2005) récapitulent au travers une analyse de texture sur forêt tropicale les fondamentaux de la confrontation des données de terrain avec des données spatiales.

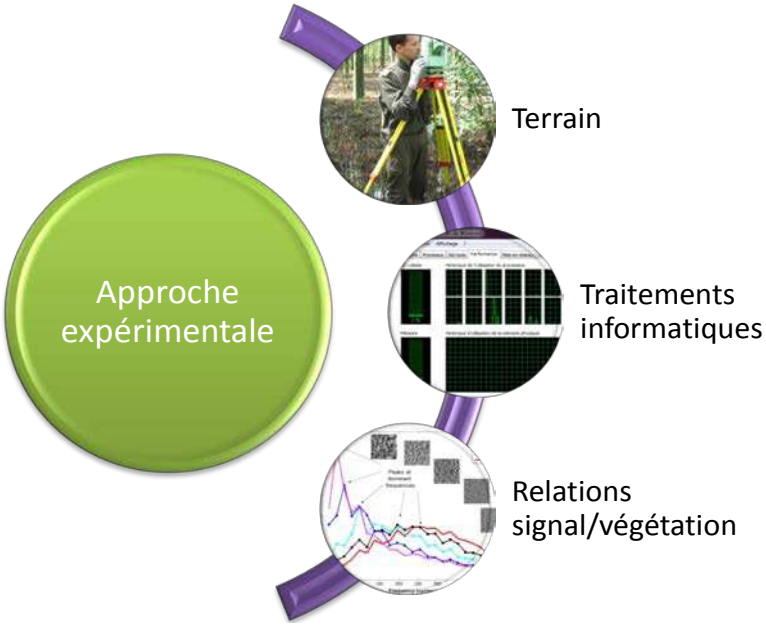


Figure 15: Démarche expérimentale.

Ensuite, les signatures de réflectance ou de rétrodiffusion radar pour chacune des parcelles forestières inventoriées et/ou chacune des dates d'observation sont obtenues en moyennant les comptes numériques de tous les pixels couvrant la parcelle d'inventaire. Attention, la réflectance mesurée sur un pixel n'est pas seulement due à la surface sous-jacente mais également à son voisinage, quelles que soient les résolutions spatiales, en optique comme en radar. Autrement dit, il faut un certain nombre de pixels, notamment en radar, pour estimer correctement une signature physique.

La mise en relation des signatures de télédétection observées sur un gradient structural et/ou temporel de paramètres forestiers est réalisée grâce à l'ajustement des coefficients de modèles statistiques simples, souvent linéaires (Eq. 6):

$$F = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i S \text{ (Equation 6)}$$

où F et S sont, respectivement, le paramètre forestier et le(s) signaux mesurés. La qualité de ces relations semi-empiriques est évaluée classiquement à partir du calcul de coefficient de corrélation, d'erreur quadratique moyenne ou absolue.

3.4.2 Approche théorique

On sent bien que l'approche expérimentale ne peut offrir une garantie sur la stabilité temporelle et spatiale des relations obtenues (aucun jeu de données expérimentales ne peut d'ailleurs prétendre à cela). Des bonnes statistiques ne font pas des bonnes relations physiques! La sensibilité du signal peut être 1) due à la variation d'un paramètre concomitant (p. ex. l'humidité dans le sol. cf. §4.1) et/ou 2) la combinaison de plusieurs phénomènes (le feuillage atténue la réponse du sol, cf. §4.1 ou les canopées à trouées peuvent avoir la même texture que des canopées à gros arbres, cf. §4.2.3). À chaque carte de paramètres forestiers, il faudrait donc associer une étude des interactions signal-végétation qui ont généré la réponse totale mesurée par le satellite (Fig. 16). Des modèles d'analyse des signaux de télédétection sont disponibles.

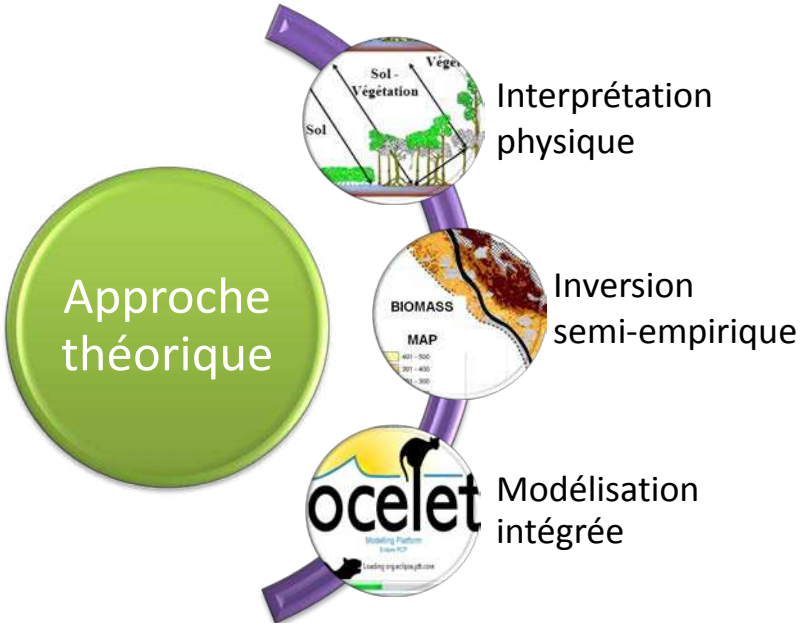


Figure 16: Démarche théorique combinant interprétation physique de la diffusion des signaux de télédétection dans les couverts forestiers, proposition de modèles (simples) permettant d'estimer des paramètres forestiers (on parle d'inversion) et approche de modélisation intégrative spatialement et temporellement des résultats obtenus. OCELET est OCELET est un nouveau langage de modélisation développé au sein de l'UMR TETIS (Degenne, 2012), potentiellement prometteur pour l'étude du fonctionnement des systèmes complexes (cf. §5.2).

Pour s'informer sur les modèles de transfert radiatif, de suivi de rayons optique et radar, le lecteur pourra partir des articles de Karam et al. (1995), Sun et Ranson. (1995), Lin et Sarabandi (1999), Picard et al. (2004) ou Garestier et al. (2010) en télédétection radar et de North (1996) ou Gastellu-Etchegorry et al. (1996; 2004) en télédétection optique. Certains diront que la simulation physique est un lourd travail réservé à des connaisseurs. Je répondrai que ce n'est pas toujours le cas. Pour s'en convaincre, il suffit de télécharger le modèle 3D DART développé à l'UMR CESBIO. Il permet de simuler et d'analyser la diffusion des rayonnements optiques (en passif et Lidar) au sein d'une maquette forestière.

Les modèles physiques permettent de simuler la diffusion du signal dans le couvert forestier et de quantifier les contributions respectives de différents mécanismes d'interactions signal-végétation dans la réponse totale mesurée par l'instrument (Fig. 17). Ils peuvent, en particulier, préciser l'importance de la réponse du sol, de la végétation et des multiples diffusions dans la végétation ou entre la végétation et le sol. L'analyse peut être poussée jusqu'à la quantification des réponses par catégorie de diffuseurs.

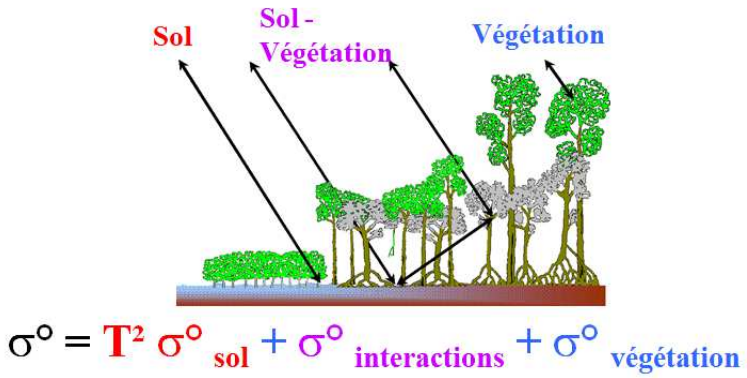


Figure 17: Exemple de décomposition de signatures radar (coefficient de rétrodiffusion) obtenue avec un modèle physique.

Le paramétrage des modèles physiques est une étape fondamentale qui nécessite une grande variété de mesures de terrain à obtenir, si possible, en parallèle à l'acquisition d'images réelles qui vont servir de comparaison pour analyser les réponses simulées (cf. §4.1). Il faudrait mesurer, par exemple, des teneurs en chlorophylle dans les feuilles à différentes hauteurs (Demarez et al. 1999), évaluer un indice foliaire (LAI, m^2/m^2), des propriétés optiques des feuilles, branches, troncs et sols, etc. De plus, en radar, les modèles nécessitent d'affecter aux éléments du couvert des propriétés diélectriques (Ulaby et El-Rayes, 1987 ; Hallikainen et al. 1985) dépendantes de la teneur en eau dans la végétation, de l'humidité et de la salinité des sols (Lasne et al. 2008).

La résolution spatiale des données s'améliorant, le niveau de description géométrique du couvert forestier devient plus exigeant. Or, obtenir des descriptions 3D de couverts forestiers tropicaux, ne serait-ce qu'à des fins de paramétrage de modèles physiques reste difficile. C'est sur ce verrou que nous travaillons à AMAP. Dans Proisy et al. (2000a; 2000b; 2002), j'explique comment je passe d'un inventaire forestier, c'est-à-dire d'un relevé des diamètres de tronc et de quelques hauteurs d'arbres, à une distribution (aléatoire) de diffuseurs dans 3 couches superposées (Fig. 18). Dans Proisy et al. (2012) et Barbier et al. (2012), nous expliquons comment on peut construire des maquettes forestières constituées d'arbres représentés par des sucettes (une tige pour le tronc sur laquelle repose une enveloppe pour le houppier) à partir de relations allométriques théoriques (West et al. 2009). Ce niveau de description, aussi simpliste soit-il, est

bien adapté au paramétrage du modèle DART/CESBIO et permet d'améliorer notre compréhension de la variabilité des indices de texture (cf. Fig.2; Barbier et al. 2011) dans les images à THRS en fonction de la structuration des peuplements forestiers (Barbier et al. 2010; 2012; Couteron et al. 2012; Proisy et al. 2012).

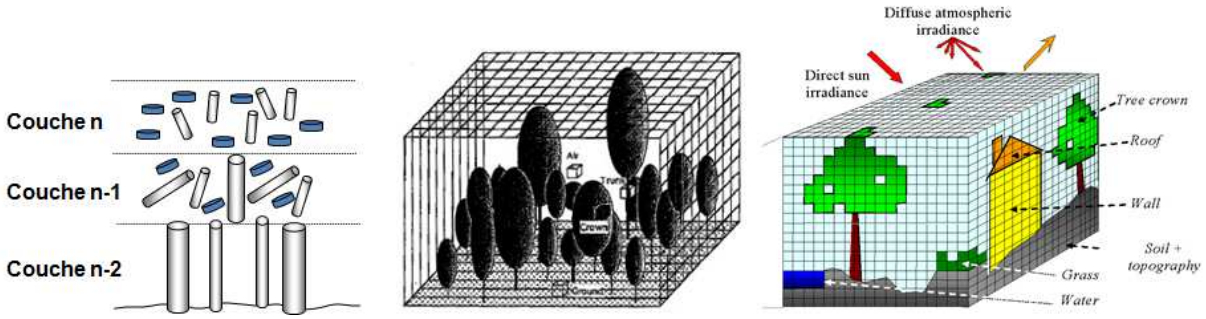


Figure 18: Différentes représentations physiques de couverts forestiers ou scènes complexes. De gauche à droite: représentation en couches superposées dans lesquelles sont distribuées aléatoirement des diffuseurs (Karam et al. 1995; Ulaby et al. 1990); représentation 3D en sucettes où le calcul de transfert radiatif radar est réalisé dans chaque cellule (Sun & Ranson, 1995); représentation 3D d'une scène constituée de plusieurs types d'objets sous DART (Gastellu-Etchegorry et al. 1996).

Ces compétences dans l'interprétation physique des signatures de télédétection et la simulation d'images de forêts (Fig. 19) permettent de tester des potentiels de futurs instruments à mettre en orbite et, donc, d'avoir des collaborations directes avec les agences spatiales comme le CNES (cf. projets TOSCA-FOTO_METRICS; BIOMASS).

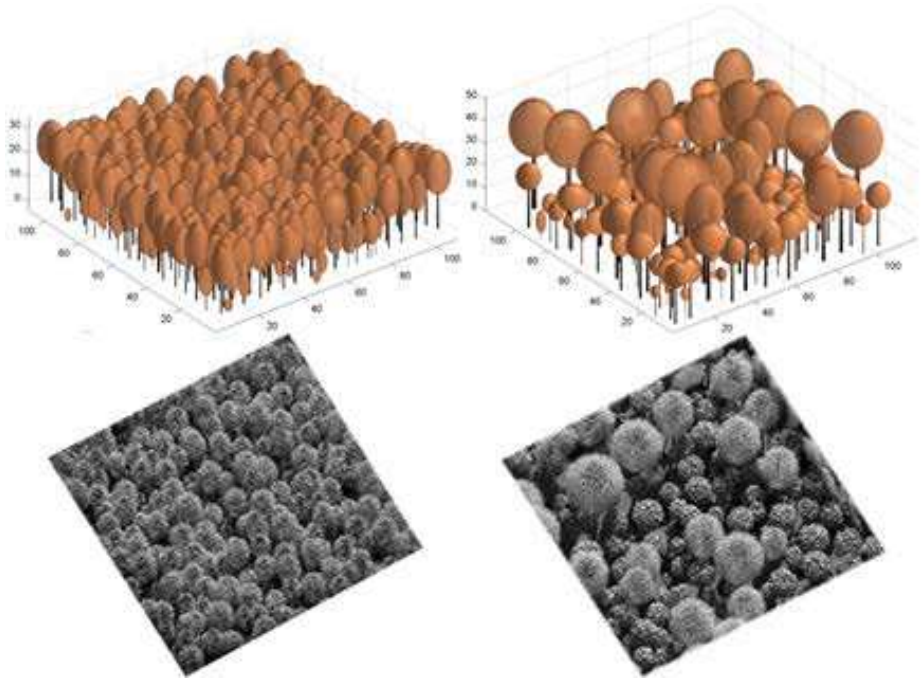


Figure 19: En haut, maquettes en sucettes, représentations issues directement des inventaires forestiers en mangrove (arbres placés, formes de houppiers extrapolées à partir de mesures au tachéomètre laser; cf. 5.1.2). En bas, images panchromatiques simulées par le modèle DART avec une résolution de 50 cm. Projet TOSCA/CNES 'FOTO_METRICS'.

3.4.3 Couplages

Les avancées se font donc pas à pas en couplant les techniques de terrain et les techniques de télédétection (Fig. 20). L'analyse de l'*évolution des forêts tropicales au cours des dernières décennies* peut profiter des archives d'images et des bases de données déjà disponibles avec un recul d'une trentaine d'années environ (Fig. 20, 1). Il faut en permanence acquérir des nouvelles données car les milieux changent vite (Fig. 20, 2). Le nombre d'images satellitaires augmente, la résolution spatiale s'améliore, les configurations d'acquisitions s'étoffent: il y a un potentiel croissant pour la validation et le développement de méthodes (Fig. 20, 3). Ces trois points contribuent à rendre compte des changements dans les forêts au cours des dernières décennies (Fig. 20, 4). C'est la première étape.

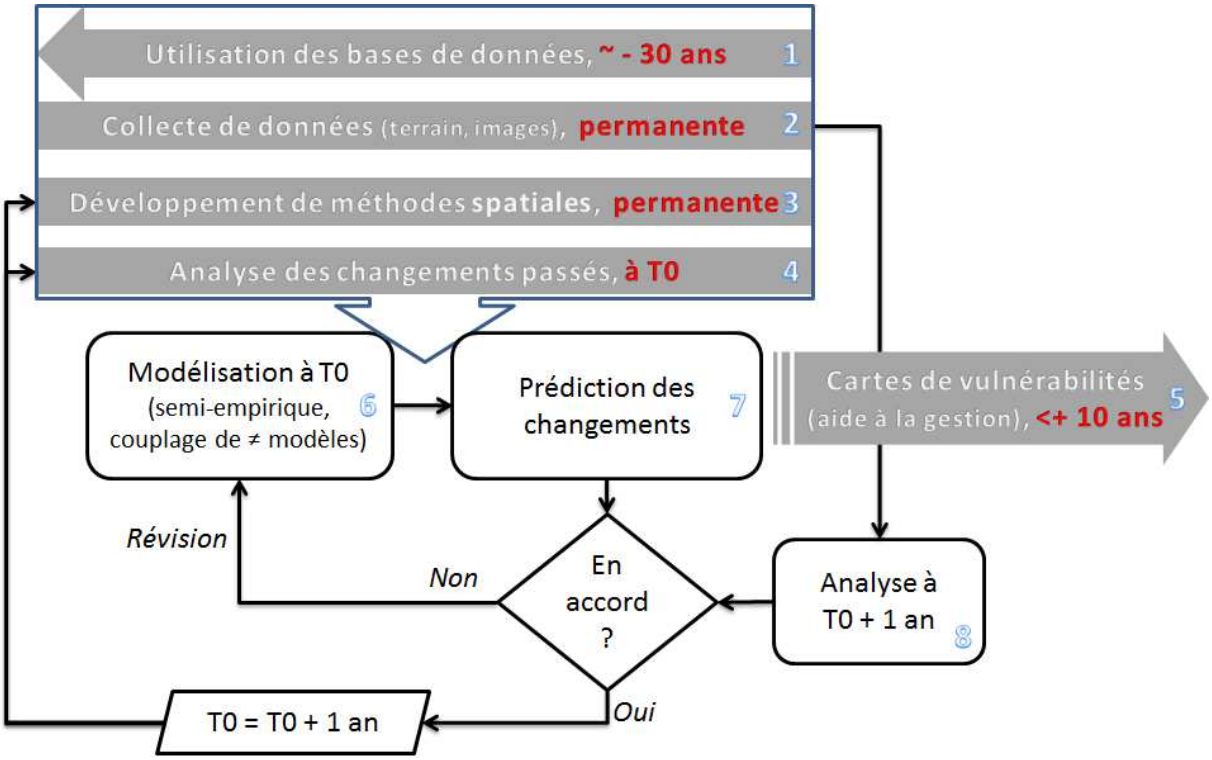


Figure 20: Approche asservie pour prédire des changements futurs dans les forêts. T0 signifie la dernière date de collecte de données et d'analyse. Le processus de modélisation inclut à la fois le développement d'équations semi-empiriques (Eq. 6) et l'utilisation de modèles physiques existants.

La seconde étape viserait à prédire *comment vont évoluer les écosystèmes forestiers à court terme*, disons dans une perspective à 10 ans (Fig. 20, 5) à partir de la date de la dernière observation *T0*. Prédire à long terme (> 10 ans) me parait spéculatif car les processus à l'origine des changements forestiers ne sont pas stationnaires et ont des origines diverses, elles-mêmes variables. L'établissement de relations semi-empiriques entre paramètres forestiers et signatures de télédétection devra intégrer (le chantier est encore peu avancé) une dimension temporelle (Fig. 20, 6) qui ne pourra se passer du couplage avec des modèles de différentes natures (changements environnementaux, pressions socio-économiques, par exemple). Je parle de semi-empirisme car je prends les observations spatiales comme un constat de l'état de l'écosystème à un moment donné et les modèles ou équations linéaires comme des tendances permettant

de passer d'un état observé à un instant t de structure forestière à un état antérieur ou postérieur. Cette tendance modélisée sur les années passées pourrait être 'poussée' quelques années dans le futur (Fig. 20, 5 et 7) en faisant varier, par exemple, les paramètres des modèles de forçage environnemental.

Chaque année, l'analyse de l'écart entre les changements prédits dans les structures forestières et ceux observés réellement peut servir à ajuster les tendances futures voire corriger les modèles de manière rétrospective (Fig. 20, 8).

C'est avec cette vision que je développe mes travaux de recherche. La mise en œuvre de cette chaine d'analyse requiert un minimum de prévoyance (renouvellement des matériels et des compétences), la volonté de développer des programmes, outils ou méthodes robustes et réutilisables par soi-même ou par un nouveau doctorant ou, mieux par des chercheurs, y compris extérieurs à l'équipe. C'est cet ensemble qui fait durer ma motivation de chercheur.

4. DES RESULTATS METHODOLOGIQUES

Dans cette partie, je présente un extrait de mes résultats d'ordre méthodologique. J'entends par résultats méthodologiques des avancées substantielles qui ont permis de préciser l'apport de données et de techniques de télédétection. Ils concernent les forêts tempérées, les plantations d'Eucalyptus, les mangroves, la télédétection radar et la télédétection optique.

4.1 Sur les observations radar

4.1.1 Résultat 1. Bilan des simulations

Résultat marquant: ***les signatures radar de mangroves se simulent.***

Cf. Annexe: Proisy, C., Mougin, E., Fromard, F., & Karam, M.A. (2000). Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sensing of Environment, 71*, 56-66.

L'utilisation d'un modèle de transfert radiatif en couches superposées (Fig. 18; gauche) 'suffit' à retrouver les réponses radar multifréquences et multipolarisations mesurées dans les images aéroportées et satellitaires de résolution spatiales comprises entre 10 et 25m. Les dimensions et la distribution des diffuseurs dans 3 couches sont réglées à partir des mesures d'inventaires forestiers et des estimations de biomasse par compartiments (tronc, branches, feuilles). Par exemple, le nombre de tiges à l'hectare donne le nombre de cylindres dans la couche du bas alors que la biomasse foliaire divisée par la masse moyenne d'une feuille permet d'obtenir le nombre d'ellipsoïdes à distribuer dans les couches supérieures. La hauteur de chacune des couches est à ajuster mais la somme des hauteurs des couches correspond à la hauteur de canopée. L'approche est assez rustique mais s'avère assez bien adaptée à des peuplements de structure interne homogène (sans trouées): c'est le cas de peuplements tempérés gérés dans la forêt de Fontainebleau, c'est le cas aussi de la plupart des mangroves guyanaises.

J'ai démontré que l'on pouvait simuler les variations saisonnières du signal en bande C d'une hêtraie en faisant varier uniquement les paramètres du feuillage en même temps que l'humidité dans le sol et la végétation mais en gardant fixe la représentation géométrique de la biomasse 'bois' (Proisy et al. 2000a).

Les simulations de réponses totales s'ajustent assez bien avec celles observées au cours d'une année par les instruments RSO d'ERS-1/2 (Fig. 21).

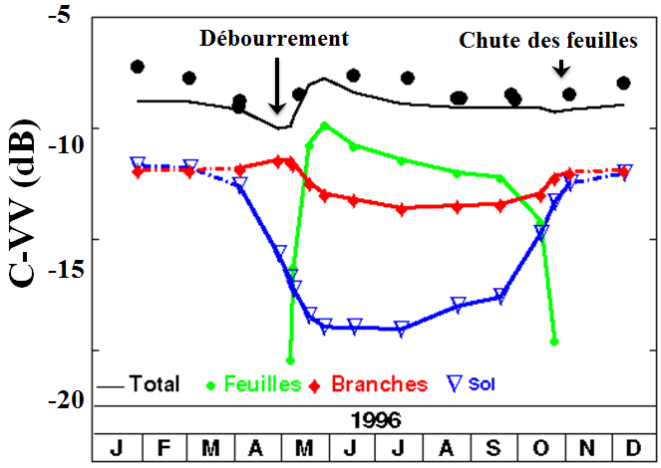


Figure 21: Variations saisonnières d'un signal bande C sur un peuplement de hêtres (forêt de Fontainebleau) au cours d'une année. Les points ronds en noir indiquent les mesures réelles, c'est-à-dire les valeurs des coefficients de rétrodiffusion radar obtenues des images ERS-1/2.

Le modèle nous indique que le signal en hiver est majoritairement dû à la contribution du sol alors qu'en été, la contribution majeure vient des feuilles. Sur une année, le signal en bande C reste assez plat même s'il n'est pas influencé par les mêmes parties de la forêt. L'intérêt de la bande C reste donc limité pour l'étude du fonctionnement saisonnier des forêts tempérées. J'ai utilisé le même paramétrage pour calculer cette fois-ci la réponse en bande X (Fig. 22). La sensibilité au feuillage est nettement marquée pour un angle d'incidence de 23° alors qu'elle s'atténue rapidement avec une visée plus rasante. C'est un résultat intéressant qui mériterait d'être exploré maintenant en utilisant des images acquises en bande X par TERRASAR-X, par exemple (Baghdadi et al. 2009).

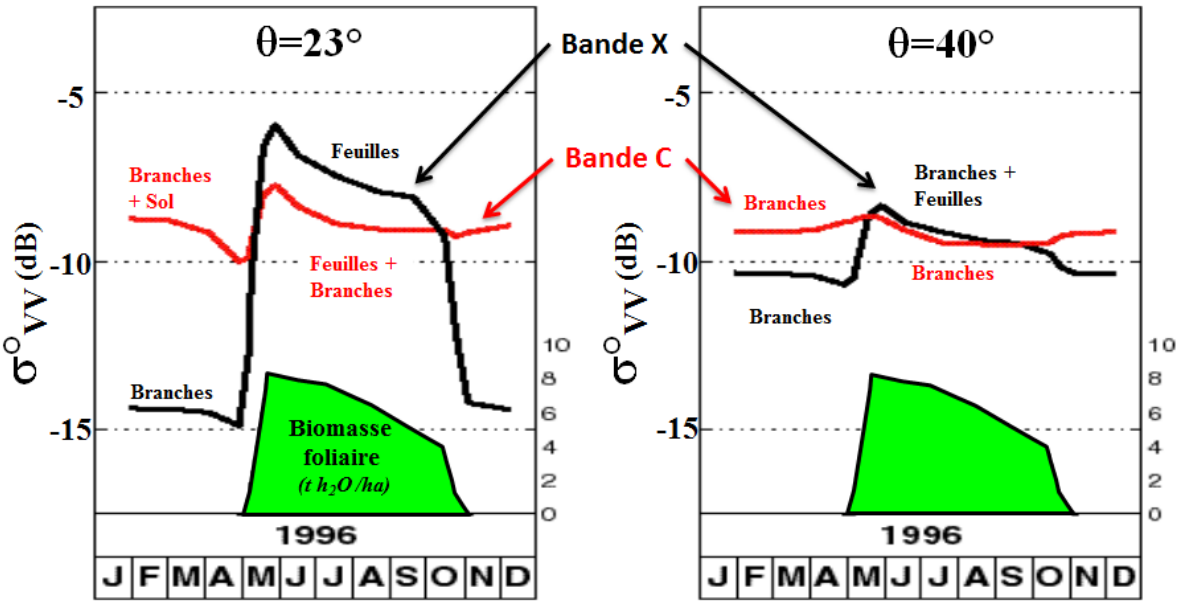


Figure 22: Simulations des réponses saisonnières en bande X aux angles d'incidence de 23 et 40° (sans comparaison possible aves des données réelles).

Pour les mangroves, j'ai démontré qu'à partir d'une unique représentation géométrique de peuplement forestier calibrée sur la valeur de biomasse épigée, on pouvait simuler de manière convenable les réponses dans les trois bandes de fréquences C, L et P des principaux stades de développement (Proisy et al. 2000b). Le signal en bande C reste assez plat (Fig. 23) pour toutes les polarisations et les stades de développement (ou niveaux de biomasse épigée). En bandes L et P, la sensibilité est plus marquée avec, pour les polarisations parallèles, une contribution des interactions sol-végétation dominante pour des forêts de biomasse atteignant 150 et 200 t.MS/ha, respectivement. Pour des forêts plus denses, le signal vient de la végétation. En polarisation croisée HV, les contributions du sol et des interactions sol-végétation restent faibles. Les réponses radar d'un peuplement ouvert et hétérogène où la sénescence est prononcée (Fig. 23 et Proisy et al. 2002) sont différentiables de celles de peuplements fermés de même biomasse, notamment pour les basses fréquences. La contribution des interactions sol-végétation est plus prononcée en canopée ouverte et élève significativement le niveau du signal total.

Ceci dit, simuler des images radar avec une résolution fine (< 5m) pour rendre compte d'une dynamique naturelle de la forêt ou d'une dégradation ne peut se faire avec des modèles radar en couches superposées où les éléments sont répartis aléatoirement dans ces couches. Sun & Ranson (1995) ont

développé un modèle qui calcule, à partir d'une représentation en peuplements 'sucettes' (Fig. 18), le transfert radiatif par cellules cubiques (tronc, houppier, sol, air). L'intérêt du couplage avec des modèles forestiers est évident et démontré (Ranson et al. 1997).

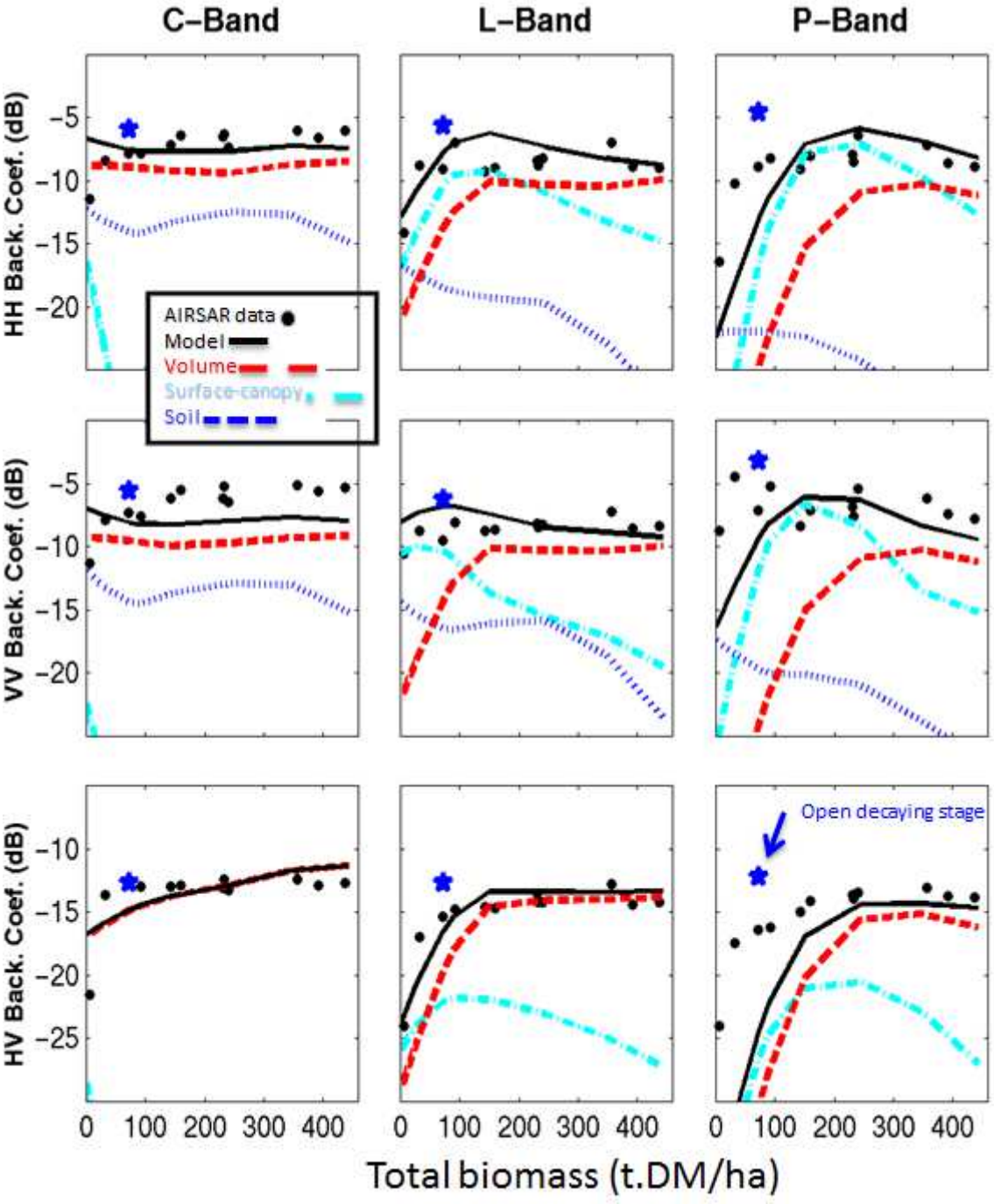


Figure 23: Analyse multifréquence des signatures radar en mangrove (adapté de Proisy et al. 2001a).

4.1.2 Résultat 2: Sensibilités aux paramètres forestiers

Résultat marquant: en mangroves, les *signaux radar sont influencés par le sol. Ils saturent à des niveaux de biomasse entre 30 et 250 tMS/ha suivant la fréquence utilisée.*

Cet important travail d'interprétation physique de la diffusion du signal radar dans les couverts forestiers me permet de dresser un bilan de sensibilité pour les différentes bandes de fréquence. La sensibilité des signaux radar à la biomasse forestière augmente quand les fréquences diminuent (table 2). C'est un résultat bien admis (Imhoff, 1995) à avoir en tête. J'indique dans la 2e colonne un seuil de biomasse à partir duquel on s'accorde pour dire que le signal sature et un pourcentage par rapport à une valeur maximale (pour les mangroves) égale à 500 t MS/ha. L'influence du sol reste de manière générale d'autant plus importante que la fréquence est basse, quelle que soit sa nature (podzolique, salins, ferralitique, etc.). À toutes les fréquences, l'humidité, la salinité, la rugosité vont influencer la rétrodiffusion radar (p. ex. Wang et al. 1995; Bindlish & Barros, 2000). Ces résultats démontrent qu'un signal à basse fréquence en polarisation parallèle (HH ou VV) n'est pas un signal qui peut s'inverser sans connaitre les propriétés de rétrodiffusion du sol. Pour s'affranchir de cette contribution gênante, l'utilisation d'une polarisation croisée (HV ou VH) est à préférer d'autant plus pour les forêts de faible biomasse. Privilégier des angles d'incidence supérieurs à 30° peut également aider à s'affranchir de la réponse sol mais peut être au détriment d'une perte de sensibilité aux structures forestières.

Bande de fréquence	Seuil de saturation (t MS /ha)	Sensibilité au feuillage	Influence du sol
X (9.6 GHz)	30 (6%)	Oui	Faible
C (5.3 GHz)	50 (10%)	Faible	Oui, en hiver
L (1.25 GHz)	100-150 (20-30%)	Faible	Oui
P (0.44 GHz)	250 (50%)	Très faible	Oui

Table 2 : Sensibilité des signaux radar aux caractéristiques d'un couvert forestier (adapté de Proisy, 1999).

4.1.3 Perspectives en radar

Fait marquant: un programme bande P 'BIOMASS' est lancé et la bande L en satellite s'avère prometteuse pour l'étude des côtes à mangroves.

Cf. Annexe: Nascimento Jr, W.R., Souza-Filho, P.W.M., Proisy, C., Lucas, R.M., & Rosenqvist, A. (2013). Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 117*, 83-93

Dans l'évaluation du potentiel de la télédétection radar pour l'étude des forêts tropicales, beaucoup reste à faire avec peu de satellites et des campagnes aéroportées multifréquences qui coûtent très chers.

Pour la bande P, l'autorisation d'émettre autour de 0.44 GHz pose problème en raison de conflits de fréquences et interférences avec les signaux de télécommunication. Par ailleurs, les modèles de transfert

radiatif à couches superposées ne suffisent plus pour expliquer les interactions signal-végétation en basses-fréquences à l'échelle d'une parcelle d'inventaire forestier (1 ha). Il faut passer à des modèles cohérents qui permettent de rendre de compte des changements de phase du signal quand il interagit avec la végétation.

Récemment, Liu et al. (2010b) ont proposé un modèle cohérent (intensité et phase de l'onde sont préservées dans le calcul) qui calcule les réponses de peuplements virtuels de conifères générés par un Lindenmaryer-système (Prusinkiewicz & Lindermayer, 1991). Mais comment paramétrer un modèle dans le cas de forêts tropicales pour lesquelles ne sont disponibles que des données d'inventaires classiques et des relations allométriques entachées d'erreur (Chave et al. 2004)? C'est autour de ce verrou que s'articule notre collaboration avec l'équipe radar de T. Le Toan au CESBIO dans le cadre de projets TOSCA financés par le CNES et la préparation du futur satellite bande P 'Biomass' (Le Toan et al. 2011). Les équipes du CESBIO et de l'ONERA (Toulouse) développent un modèle radar (MIPERS) travaillant en bande P (Villard et al. 2008) à partir de descriptions 3D de couverts forestiers.

En ce qui concerne la bande L, le contexte est assez prometteur. Elle apparaît bien adaptée au suivi des changements côtiers et des extensions de mangroves (Fig. 24). Les collaborations avec l'équipe ALOS Kyoto&Carbon Initiative (Ake Rosenqvist, Richard Lucas) sont très bonnes et les échanges assez fructueux (Mitchell et al. 2005; 2006; Lucas et al. 2007; 2008). Mes collèges brésiliens de l'UFPA sont associés (Nascimento et al. 2013). Dans cette bande de fréquence, le signal n'est que très peu rétrodiffusé par les surfaces vaseuses agglomérées à la côte (surface noires dans l'image) car elles peuvent être considérées comme lisses (cf. Fig. 8). On les distingue assez bien indépendamment du niveau de marée et contrairement à l'observation des images optiques (influence du niveau de marée, de la couleur de l'eau / réponse de la vase, etc.).

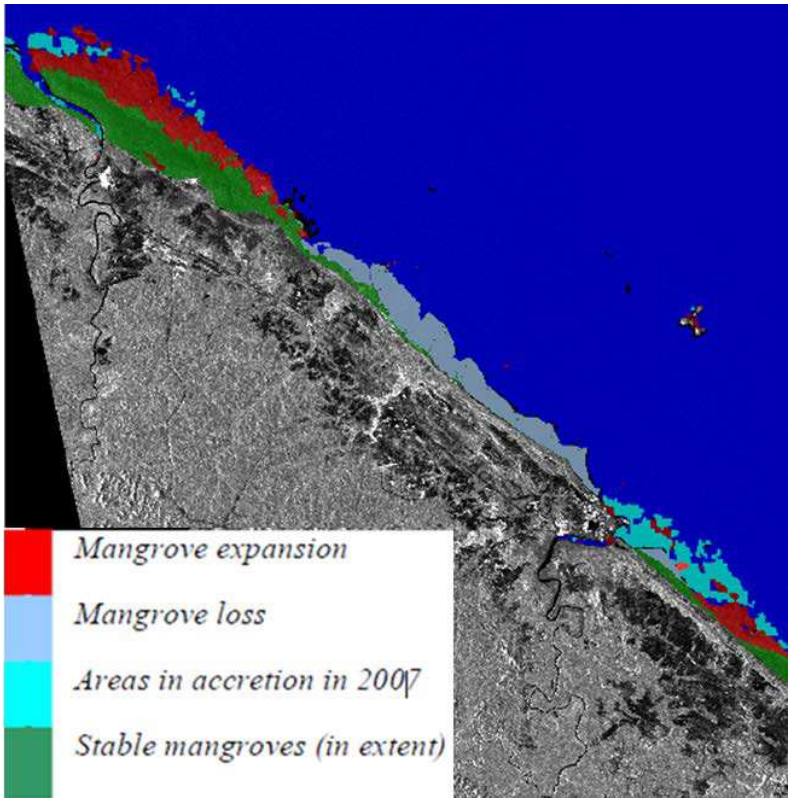


Figure 24: Dynamique des côtes guyanaises à partir de la bande L (adapté de Lucas et al. 2008).

Le lancement du 2e satellite radar travaillant en bande ALOS-2 par l'Agence Spatiale Japonaise (JAXA) prévu fin 2013 est de bon augure pour l'avenir. Il devrait permettre de générer des cartographies robustes des environnements côtiers et des surfaces de mangroves qui permettront de mettre à jour l'atlas

mondial des mangroves (Spalding et al. 2010) qui souffre toujours d'un manque de standardisation des méthodes employées pour cartographier l'étendue des mangroves au travers le monde. Dans le but de clarifier l'apport de la bande L pour caractériser des mangroves de forte biomasse, avec un collègue de CLS (filiale du CNES), j'ai soumis un projet (maintenant accepté) d'analyse des structures des mangroves en Papua Occidentale (Indonésie). Il fournira des données RSO en bande L issues d'ALOS-2. L'idée est de se servir d'images optiques THRS pour produire des cartes de grain de canopée (cf. section suivante) que l'on pourra prendre comme des références pour évaluer la sensibilité de la bande L à des gradients de structures forestières: les mangroves de Papua sont largement méconnues et ce serait déjà un travail préliminaire d'acquisition de connaissances.

4.2 Sur l'imagerie optique à THRS

La résolution spatiale des images est un paramètre important à prendre en compte dans l'étude des forêts. Depuis une dizaine d'années maintenant, des instruments optiques embarqués sur satellites peuvent fournir des images avec une résolution métrique et sub-métrique. A ces résolutions, les canopées forestières en régions tropicales apparaissent, non plus comme des surfaces où l'intensité sature mais comme un patchwork de granulométrie très variable et, parfois, de couleurs très contrastées: les houppiers qui atteignent la canopée sont distinguables les uns des autres sous l'effet des jeux d'ombre et de couleurs induits par une variabilité des hauteurs, des formes et des propriétés optiques entre chaque arbre.

4.2.1 Résultat 1. La méthode FOTO

Résultat marquant: ***une nouvelle méthode de mesure de l'organisation des canopées forestières.***

Cf. Annexe: Proisy, C., Couteron, P., & Fromard, F. (2007). Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment, 109*, 379-392

Rao et Lohse (1996) ont expliqué que la perception humaine d'images 'texturées' était en premier lieu sensible à la présence ou à l'absence d'une répétitivité de motifs. Dans le cas d'images spatiales de forêts tropicales suffisamment résolues, effectivement des motifs apparaissent (Fig. 25) et l'œil est capable de distinguer des zones présentant les mêmes motifs, c'est-à-dire des zones où taille de houppiers mais également effets associés d'ombre et de lumière présentent des propriétés communes (petit/gros houppiers, homogénéité/hétérogénéité, etc.).



Figure 25: Mosaïque de textures dans une région guyanaise. À gauche: image SPOT-5 en mode fusion (pixels de 2.5m, mais résolution autour de 4 m). À droite: une photographie de l'Avion Jaune (pixels de 20 cm environ). Adapté de Proisy et al. 2012.

Couteron et al. (2005) ont, d'une part, démontré que cette répétitivité de motifs pouvait s'observer sur des photographies aériennes de forêts tropicales de terre ferme, et d'autre part, ont proposé une méthode pour la mesurer. Il faut d'abord calculer des spectres de Fourier moyennés suivant toutes les directions azimutales pour chaque fenêtre d'une grille qui couvre la scène forestière. Ensuite, chaque spectre est empilé dans une table qui est soumise à une analyse en composante principale (Fig. 26).

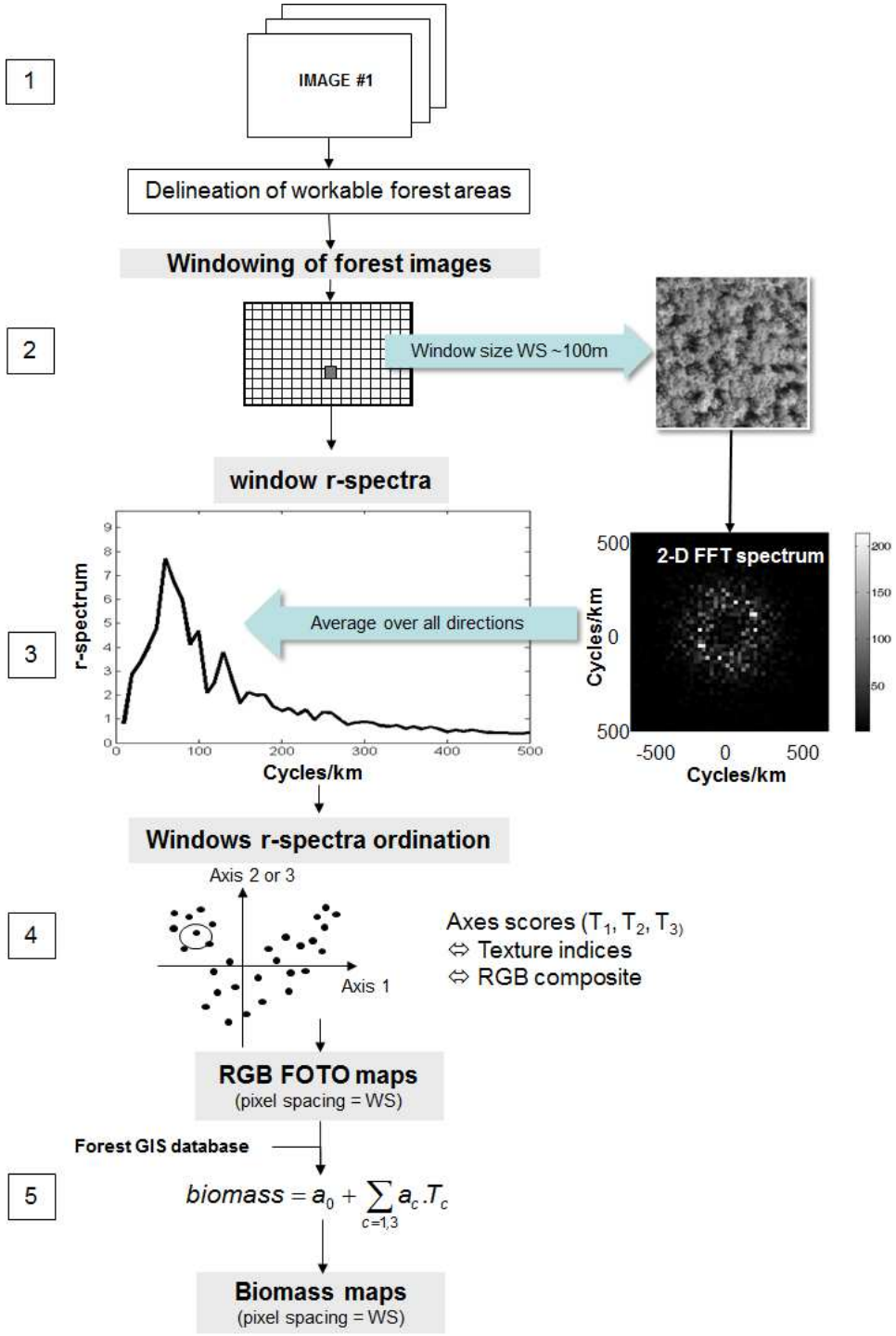
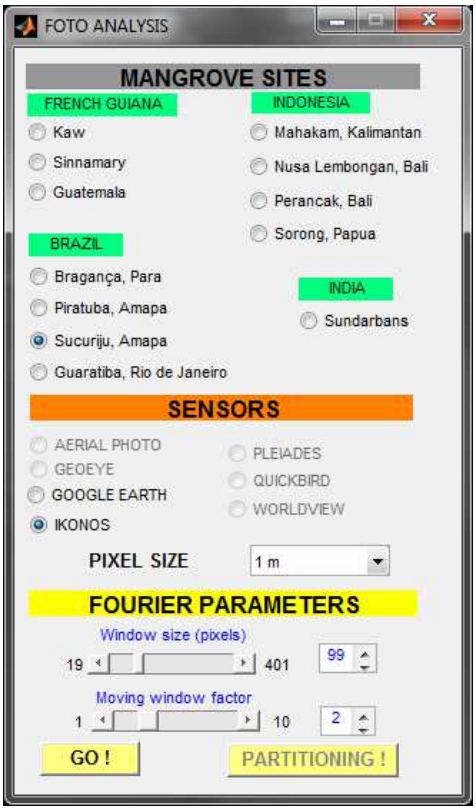


Figure 26: Les différentes étapes qui constituent la méthode FOTO (d'après Proisy et al. 2012).

J'ai repris les codes initiaux développés par Pierre Couteron (Couteron et al. 2005) pour produire un logiciel interfacé graphiquement et plus robuste (Fig. 27). Nous avons nommé la méthode 'FOTO' (FOurier-based Textural Ordination).

Dans Proisy et al. (2007), nous avons étudié le potentiel de cette méthode à prédire la biomasse en forêts de mangrove. Cet article a déjà un bon score de citations pour le domaine (64 fois), intérêt scientifique confirmé par plus de 2000 téléchargements de Proisy et al. (2012). L'approche grain de canopée me parait vraiment une méthode bien adaptée à l'étude des grandes étendues de forêts tropicales. Elle est simple, presque intuitive (ce que l'œil voit, la transformée de Fourier le détectera). Elle peut s'appliquer à des images Google Earth (Barbier et al. 2010; Ploton et al. 2012; 2013). Toutefois des travaux de simulation sont nécessaires pour bien comprendre comment les angles zénithaux du soleil θ_s, de la visée θ_v et la différence d'azimut Φ_{S-V} entre soleil et capteur influencent les indices de texture.

Dans Barbier et al. (2011), l'idée était de poser les premières bases d'une fonction bidirectionnelle (nommée BTF) $[\theta_v, \Phi_{S-V}]$ de texture sur images de forêts grâce à l'utilisation de données Lidar, plus exactement d'un modèle numérique de canopée échantillonné à 1m. Un modèle d'ombrage nous a permis de produire un jeu d'images pour différents angles solaires et configurations $[\theta_v, \Phi_{S-V}]$. De manière générale, pour un même type de forêt, l'analyse de la BTF (cf. Fig. 8 de Barbier et al. 2011) indique des textures plus fines quand le soleil se trouve derrière le satellite (les ombres disparaissent) et suggère de travailler par classe de configurations angulaires. Je reviendrai sur cette approche dans les perspectives méthodologiques et les résultats thématiques.



Je réponds chaque année à plusieurs demandes internationales pour utiliser le code Matlab® dans le cadre d'études scientifiques de différents types de forêts. Pour satisfaire cette demande, je vais avec le CNES (M. Grizonnet) intégrer le code FOTO (programmation en C++) dans la boite à outils (Open Source) dédiée à l'analyse d'images à THRS Orfeo-Toolbox.

En 2013, deux doctorants brésiliens (Paula de Almeida, Bruno Perreira) ont obtenu une bourse d'étude pour venir se former à AMAP aux fondamentaux de la méthode et à son application pour différentes régions de mangroves brésiliennes (Rio de Janeiro, Amapá).

Figure 27: Une partie des interfaces graphiques Matlab® disponibles pour utiliser la méthode FOTO.

4.2.2 Résultat 2. Processus ponctuels marqués pour détection de houppiers

Résultat marquant: on peut détecter des jeunes arbres plantés dans les images à THRS.

Cf. Annexe: Zhou, J., Proisy, C., Descombes, X., le Maire, G., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Viennois, G., Zerubia, J., & Couteron, P. (2013). Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. *Forest Ecology and Management, 301*, 129-141

En collaboration avec l'INRIA, dans le cadre d'une thèse co-encadrée (Zhou, 2012), nous avons examiné le potentiel de l'analyse par processus ponctuels marqués (PPM; Descombes et al. 2009: Descamps et al. 2009) sur différents types d'images THRS de réflectance optique et d'altimétrie lidar (Zhou et al. 2010) pour modéliser la distribution et la taille des houppiers d'arbres en forêts tropicales et en plantations d'Eucalyptus (Zhou et al. 2011; Zhou et al. 2013). Les images à THRS sont considérées comme des espaces à deux dimensions dans lesquels il faut chercher une configuration d'objets ayant des caractéristiques (les marques) géométriques liées à la nature des objets (oiseaux, arbres, voiture) et radiométriques liées au type d'image (contraste ente l'objet et son voisinage; Fig. 28). Dans notre travail, nous avons testé des représentations de canopée avec des objets de forme circulaire.

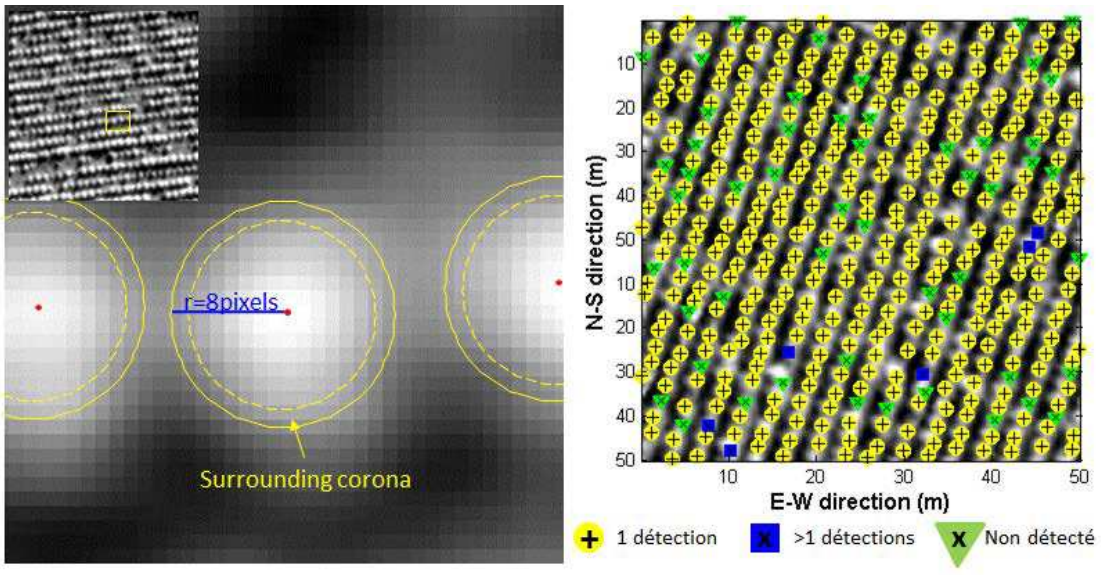


Figure 28: A gauche: Principes de fonctionnement de l'approche en processus ponctuels marqués. Les objets sont des cercles, les marques correspondent aux diamètres des cercles/houppiers. À droite: résultat de détection sur une jeune plantation d'Eucalyptus, d'après Zhou et al. (2013).

Pour les forêts naturelles, que ce soit à partir de modèle numériques de canopée ou d'images de réflectance THRS, les résultats obtenus restent mitigés. Une difficulté majeure à l'évaluation du potentiel de PPM et d'éventuelles futures améliorations réside dans le manque de données de terrain capables de fournir 1) des positions d'arbres avec une précision métrique et 2) des informations sur les tailles de houppiers très difficiles à mesurer en forêts naturelles pour beaucoup d'arbres. Ceci dit, en milieu tropical, variabilité des formes et complexité d'organisation de la canopée plaident pour l'utilisation de

configurations d'objets en ellipses et d'un paramétrage qui inclut non seulement des informations géométriques sur la canopée (p. ex. via la méthode FOTO) mais également des informations sur les caractéristiques de la configuration d'acquisition de l'image (incidence et azimut solaires). La méthode PPM a pourtant démontré une bonne capacité à détecter des jeunes Eucalyptus en plantation pour lesquels le houppier est de taille comparable à la taille du pixel (Zhou et al. 2013).

4.2.3 Perspectives en optique THRS

Fait marquant: ***vers des images simulées et réalistes de forêts.***

Le potentiel des données THRS pour décrire les canopées forestières est indéniable. Cependant, même si le flux d'images à THRS et l'agilité des instruments embarqués augmentent, il restera difficile de réaliser une analyse de sensibilité de l'influence des configurations angulaires et des propriétés de la canopée sur la texture des images. Des questions restent en suspens. Existe-t-il des patrons angulaires expliquant la variabilité du grain de canopée? Si oui, peut-on normaliser (transformer) n'importe quelle image dans une configuration angulaire donnée sans perte d'information? Avec des images simulées à partir de positions et de tailles d'arbres connues, peut-on tester voire améliorer les méthodes de détection d'arbres comme les PPM?

Je poursuis avec le CESBIO un travail théorique de simulation d'images panchromatiques à 50 cm pour une douzaine de parcelles de mangroves en Guyane et Brésil qui présentent des structures forestières très contrastées (Fig. 29).

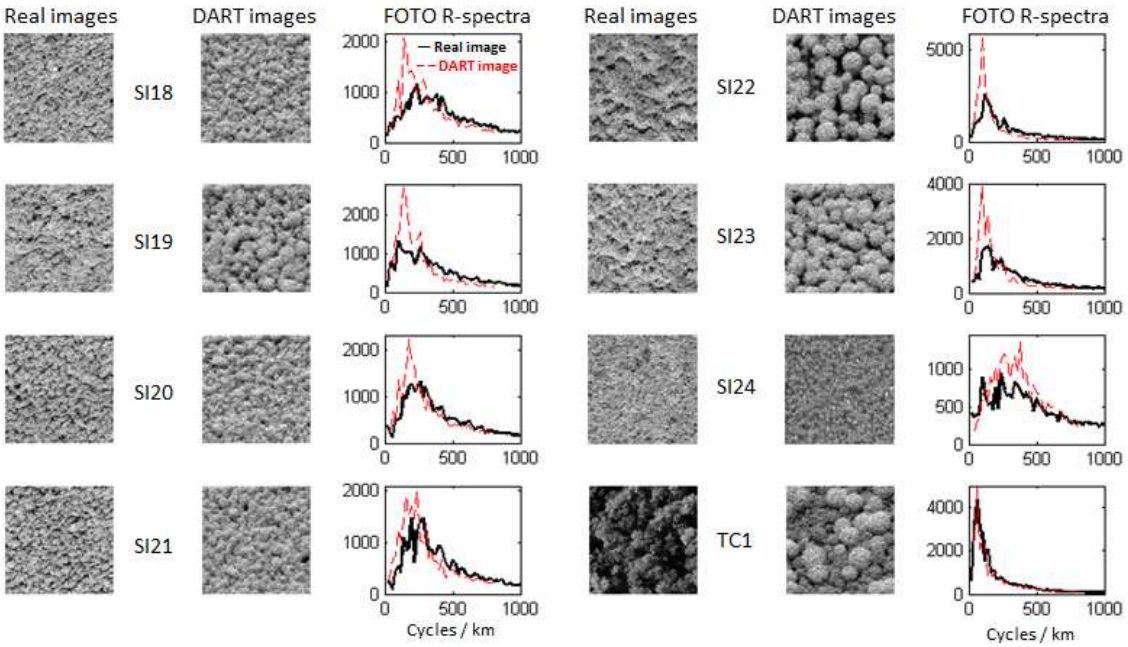


Figure 28: Comparaison des spectres FOTO d'images réelles (Geoeye) avec des images DART simulées à 50 cm (d'après Proisy et al., RSE, en préparation).

En travaillant entre 0.4 et 1.2 µm avec 21 bandes spectrales, je simule 16800 images de 130x130m (soit environ 220 Go par structure forestière). De ce jeu d'images, je produis des images dites 'capteur THRS' en modes panchromatique et multi-spectral à partir des réponses des capteurs embarquées sur Ikonos, Geoeye, Pleiades, Quickbird, Worldview. Les premiers résultats montrent une indépendance des spectres et des indices de textures aux conditions atmosphériques. De plus, l'utilisation de maquettes avec des arbres décrits en forme de sucette semble être suffisante pour faire des images simulées une bonne approximation du point de vue textural des images réelles (Fig. 29; comparaison des spectres FOTO).

4.3 Synthèse sur les recherches méthodologiques

Au travers la présentation de quelques résultats, j'ai tenté de montrer qu'on ne pouvait pas se contenter de prendre le contenu des images comme une information 'facile' à obtenir et directement corrélable à des caractéristiques forestières mesurées sur le terrain. Non, il s'agit de bien comprendre comment l'éclairement solaire ou des signaux émis par des instruments actifs diffusent à l'intérieur d'une grande variété de structures forestières dont les propriétés changeantes au cours de la journée vont influer sur les interactions signal-végétation.

La disponibilité croissante d'images de résolution métrique en plus des séries historiques de photographies aériennes plaide pour apprendre à aborder la structure des forêts par le haut. La lecture des propriétés de la canopée (surface supérieure de la forêt) au travers des réponses texturales et spectrales des images (Proisy et al. 2012) me semble être, à elle seule, une école de pensée interdisciplinaire qui attire et fédère la communauté des télédétecteurs (conférences invitée par l'INPE, Proisy, 2011a) et des écologues (conférence invitée par l'UERJ, Proisy et al. 2011b; cf. accueil de doctorants brésiliens).

Les signaux radar et leur capacité à pénétrer le couvert forestier présentent aussi des aspects séduisants pour l'étude des forêts tropicales: l'indépendance aux conditions atmosphériques, associé à l'étalonnage systématique des données permettrait de mettre au point des algorithmes d'inversion des paramètres forestiers à l'échelle d'un hectare et de les appliquer sur de grandes échelles spatiales.

Mais, quel que soit le type de forêt, aucun domaine électromagnétique ne peut prétendre fournir, seul, des estimations fiables et reproductibles de biomasse épigée (Richards, 2005; Goetz et al. 2009). L'utilisation en synergie de plusieurs types d'instruments et fréquences d'observation est nécessaire pour surmonter les limitations de chaque technique de télédétection dans la caractérisation des structures forestières et des biomasses épigées (Fig. 30).

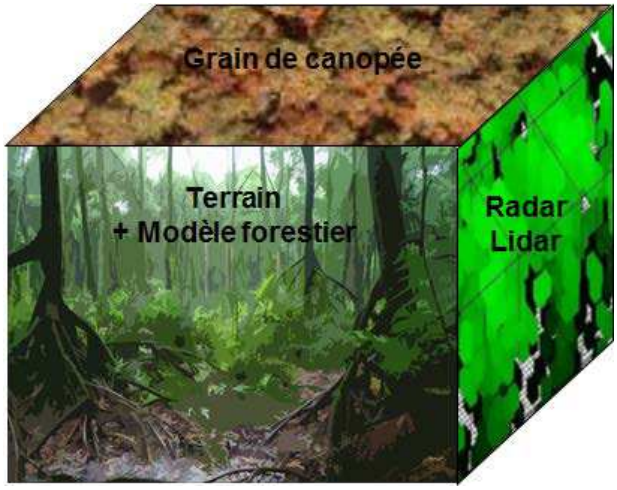


Figure 30: Démarche méthodologique pour appréhender un volume forestier en forêt tropicale.

Les signaux radar saturent à partir de différents niveaux de biomasse alors que les indices de texture rendent bien compte de canopées présentant une biomasse élevée. Réciproquement, les indices de texture ne seront pas sensibles à la présence d'un sous-bois (Proisy et al. 2012) alors que celui-ci influera fortement sur les signaux radar basses fréquences (Proisy et al. 2000; 2002) et lidar (Proisy et al. 2009). Le potentiel d'une analyse combinée d'images optiques à THRS et d'images radar bande L est une voie de recherche très intéressante (Fig. 31) car il semble y avoir une bonne corrélation entre les 2 approches sur forêts fermées.

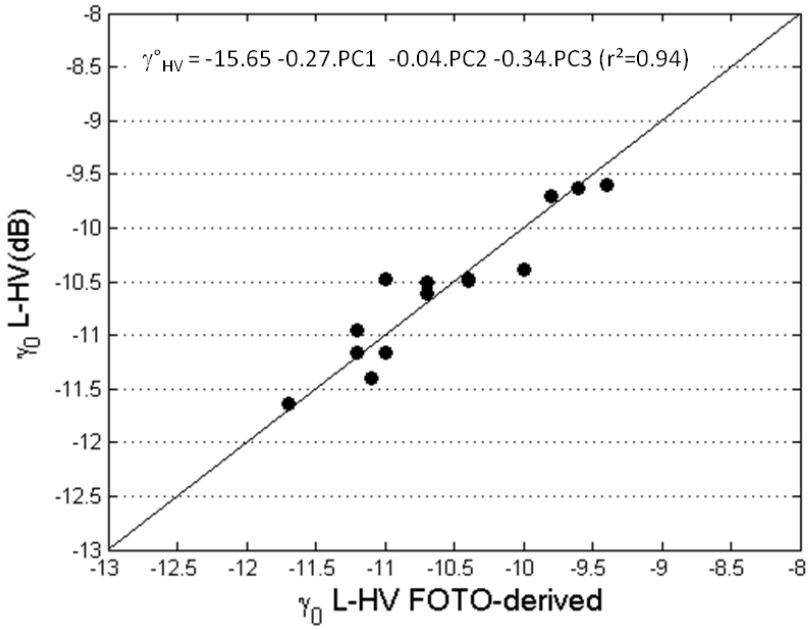


Figure 31: Relations entre coefficients de rétrodiffusion radar en bandes L et indices de textures FOTO (les 3 premiers axes) sur des mangroves dont la biomasse épigée varie de 70 à 350 t MS/ha (résultats du projet ALOS 'Combined radar and visible stereoscopic remote sensing of tropical forests').

5. DES RESULTATS THEMATIQUES SUR LES MANGROVES

Je vais aborder quelques résultats thématiques obtenus après analyse de télédétection en présentant une synthèse sur l'estimation des biomasses épigées en mangroves (cf. 5.1) et sa capacité à s'adapter aux changements côtiers (§5.2).

5.1 Structuration et biomasses épigées

5.1.1 Par observations spatiales

Résultat marquant: ***la biomasse épigée en mangroves peut être estimée à partir du grain de canopée mieux qu'avec une mesure radar basse fréquence.***

Les forêts de palétuviers s'élèvent jusqu'à 40 mètres avec des valeurs de biomasse épigée atteignant 450 tonnes de matière sèche à l'hectare, niveaux généralement constatés dans les forêts tropicales de terre ferme les plus développés. Comme présenté dans Mougin et al. (1999) et interprété dans Proisy et al. (2000), les signaux radar en bande L et bande P sont les plus adaptés pour rendre compte de ce gradient de biomasse. Avec une seule fréquence, le meilleur résultat est la configuration en bande P, polarisation croisée (r^2=0.86; rmse=73 tMS/ha; n=12; Fig. 32). En prenant toutes les fréquences (bandes C, L et P) et toutes les polarisations (HH, VV, HV), la précision de l'estimation ne s'améliore que légèrement (r^2=0.96; rmse=40 tMS/ha).

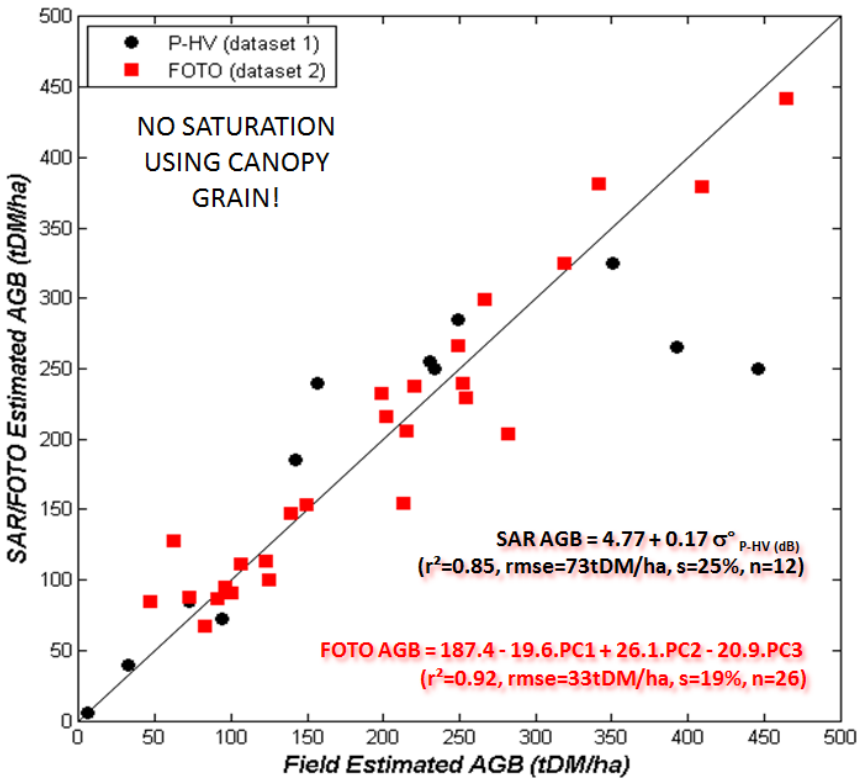


Figure 32: Estimations comparées de biomasses épigées en mangrove par radar (bande P, polarisation HV) et indices de texture FOTO.

Par ailleurs, comme présenté dans Proisy et al. (2007), la sensibilité des indices de texture FOTO s'avère bonne sur tout le gradient de biomasse avec peu de dispersion observée y compris pour les plus fortes valeurs de biomasse (r^2=0.92; rmse=33%; n=26). Autrement dit, l'organisation de la canopée (la surface supérieure de la forêt) s'avère donc corrélable à une densité de végétation dans le cas de forêts avec peu de sous-bois. C'est un résultat important pour l'étude des mangroves de grande taille (même si finalement assez intuitif). Pour les mangroves de plus petite taille se développant en limites latitudinales, la résolution spatiale sera déterminante de la sensibilité de la méthode à rendre compte des éventuelles variations dans la canopée. La méthode FOTO est basée sur une analyse par fenêtres et est donc bien adaptée aux grandes surfaces continues de mangroves. Réciproquement, son usage est limité pour étudier des côtes où la mangrove forme un rideau d'arbres. Une estimation de la densité d'arbres par PPM serait à tester.

5.1.2 Par observations de terrain

Fait marquant: une nouvelle méthode de description 3D des palétuviers adultes.

La description de la dynamique architecturale d'arbres adultes dans des forêts naturelles est un verrou et un enjeu écologique (ce sont les grands arbres qui constituent le principal de la biomasse et des échanges de flux avec le sol et l'atmosphère). Pour les mangroves, j'ai mesuré des individus des diamètres de tronc atteignant 125 et 75 cm pour Avicennia germinans et Rhizophora spp. Les estimations de biomasse par coupe d'arbre se sont arrêtées à 42 et 32 cm en Guyane et il apparait difficilement réalisable de faire plus avec des techniques destructives (Fromard et al. 1998).

De nouvelles techniques non destructives pourraient être utilisées. Il y a un engouement pour les systèmes terrestre de laser à balayage. En forêt dense, avec des arbres au-delà 25 mètres de hauteur, les signaux laser sont vite rétrodiffusés et la segmentation automatique de ces millions d'échos pour reconstituer un individu est problématique. Ceci dit, l'approche laser me semble être la bonne à condition de ne pas perdre de vue l'objectif de description de la structure des arbres adultes.

Mon idée est qu'on peut déjà avancer dans l'amélioration des relations allométriques DBH-biomasse des palétuviers 1) en améliorant les estimations des biomasses de (gros) troncs via des estimations de volume et de densité de bois, et 2) en intégrant la forme du houppier (dépendante et marqueur de la structure du peuplement) comme un terme supplémentaire de l'équation allométrique DBH-Biomasse. Les trajectoires de développement des espèces de palétuviers dans des régions comme la Guyane Française (conditions optimales?) sont peu nombreuses (Fromard et al. 1998). Un échantillonnage d'arbres sur les 2 espèces dominantes à différents stades de développement pourrait déjà fournir des jalons pour affiner des bilans de dynamique de biomasse.

Depuis 2010, je développe une approche laser 'point par point' réalisée avec un tachéomètre laser (Proisy et Guéroult, 2011; Couteron et al. 2012). La description de la structure arborée se fait à partir de plusieurs implantations autour de l'arbre choisi. C'est mon œil qui vise, identifie et affecte un attribut au point 3D visé. Cet attribut est une information sur les axes porteurs (tronc, branches d'ordre 1 et d'ordre 2) ou sur la position de feuilles. Au final, une silhouette d'arbre avec son houppier se dessine (Fig. 33).

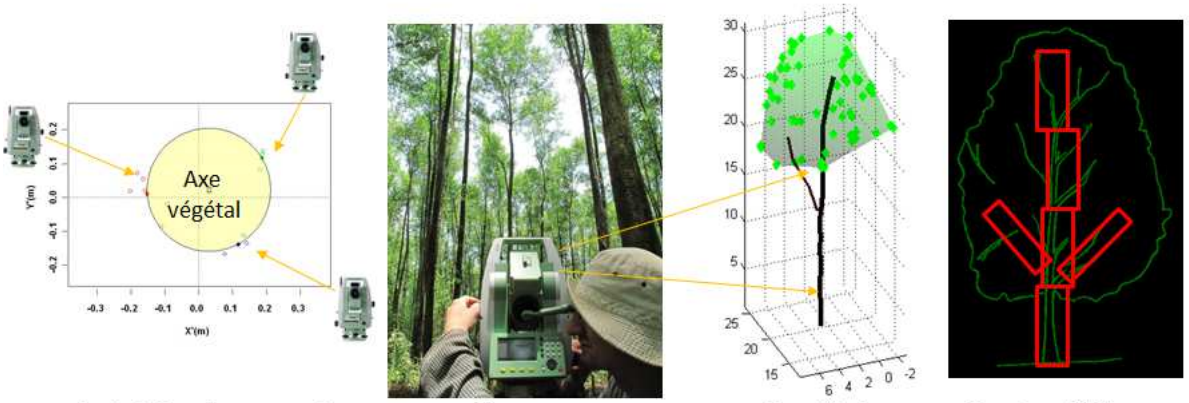


Figure 33: Description 3D de la structure principale de palétuviers adultes à partir de mesures au tachéomètre laser. Les données en sortie de l'instrument sont traitées pour obtenir un diamètre pour chaque cylindre composant la structure et une forme d'enveloppe de houppier. L'ensemble est exporté dans un format MTG (Multiscale Tree Graph; Godin et Caraglio, 1998) avant d'être importé dans XPLO/AMAP (Griffon & de Coligny, 2012).

Avec cette approche visuelle, je n'ai pas le problème de segmentation du nuage de millions de points laser en une forme végétale. Quelques développements méthodologiques restent à faire cependant pour transformer le nuage de points acquis sur la circonférence du tronc (de 200 à 1000 points) en un volume. Pour l'instant, nous avons décrit une quinzaine de palétuviers avec des DBH variant de 17 à 93 cm pour Avicennia et 39 à 73 cm pour Rhizophora spp. Ce travail préliminaire sera complété en coopération avec l'Université de Dresden, Allemagne avec qui je vais travailler en co-encadrant une thèse Erasmus Mundus (cf. 6.2.2).

5.2 Dynamique côtière

5.2.1 Processus de colonisation

Résultat marquant: mise en évidence de processus de colonisation rapide et extensive.

Cf. Annexe: Proisy, C., Gratiot, N., Anthony, E.J., Gardel, A., Fromard, F., & Heuret, P. (2009). Mud bank colonization by opportunistic mangroves: A case study from French Guiana using lidar data. *Continental Shelf Research, 29*, 632-641

Dans Proisy et al. (2009), nous avons mis en évidence les processus de colonisation d'un banc de vase par *Avicennia germinans.* Nous avons utilisé des données lidar pour obtenir deux modèles numériques d'élévation: le premier pour la topographie et le second pour la végétation. L'analyse rétrospective sur 3.5 ans a utilisé un taux de croissance annuelle de 3.20m (observé sur le terrain). L'ensemble nous permet de cartographier des périodes de germination en fonction de la taille des arbres ou de la hauteur de canopée (cf. Fig.6 de Proisy et al. 2009). Les résultats montrent différentes périodes de germination. Autrement dit,

de grandes surfaces de vase ont été colonisées en peu de temps. Ce travail confirme ce qui était pressenti au travers nos visites régulières sur le terrain et dans les images optiques à THRS (cf. §3.2.2; Fig. 12). Les barres vaseuses, sorte de bourrelets rectilignes en front de mer, sont colonisées dans la même période que des surfaces de vase situées en arrière (vers la terre ferme), en continuité du front de mangrove rémanente (Fig. 34). Or, nous avons observé que la plupart des individus colonisant ces barres deviennent des producteurs de graines en moins d'un an. Les conclusions de ce travail posent des nouvelles hypothèses, à la fois, sur les capacités de reproduction (néoténie) et de croissance d'Avicennia germinans, mais également sur le rôle de la morphodynamique du banc dans le piégeage des propagules et leur enracinement via des processus de dessiccation (Fig. 35). En trois ans, une nouvelle surface de vase peut être colonisée à 90% (Gensac et al. 2011). N'est-ce pas là un cas d'école d'écosystème bien adapté à son environnement? N'y a-t-il pas un grand intérêt à apprendre de ces processus naturels pour aider à réhabiliter des côtes de mangroves en péril?

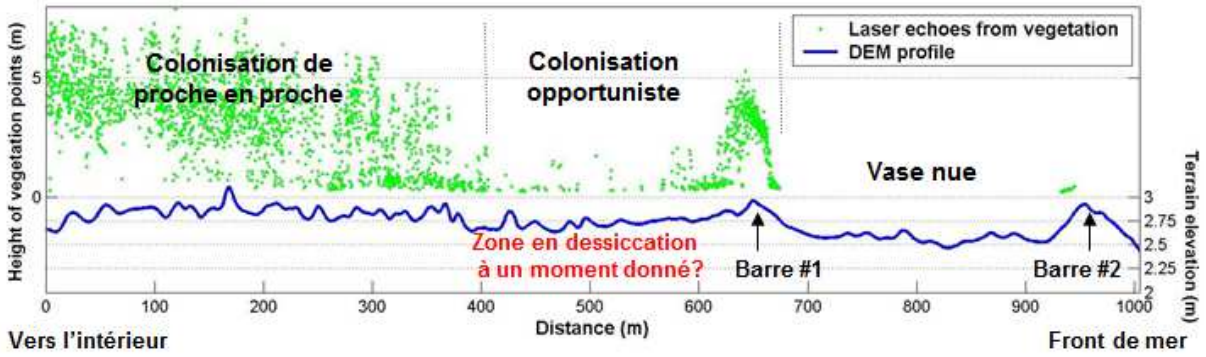


Figure 34: Variations topographiques d'un banc de vase (trait bleu, échelle d'élévation à droite) et nuages de points-échos laser permettant d'identifier les zones couvertes par la mangrove. Les niveaux moyens de marées varient entre 2.05 et 2.95 m. Schéma topographie + topologie des arbres (adapté de Proisy et al. 2009).



Figure 35: Phénomène extensif de dessiccation sur banc de vase. Conditions propices au piégeage de graines?

5.2.2 *Les mangroves comme marqueurs des changements côtiers*

Fait marquant: les mangroves marquent l'instabilité côtière. On peut les observer par télédétection. Profitons-en pour intégrer nos connaissances dans un outil de simulation des côtes à mangrove!

Le paysage de mangroves évolue presqu'aussi vite que les phases d'érosion et d'accrétion se déplacent le long du littoral guyanais vers le Nord-Ouest (Fig. 36; Fromard et al. 2004; Fromard et Proisy, 2010). Avec mes collègues travaillent sur le côtier, nous avons publié plusieurs résultats qui montrent l'étroite imbrication des processus côtiers avec le fonctionnement des mangroves. Dans un papier publié dans Nature Geoscience (Gratiot et al. 2008), nous avons montré comment la prise en compte de l'influence du cycle lunaire à 18.6 ans pouvait influencer la superficie des mangroves en Guyane et devait être prise en compte systématiquement pour expliquer l'avancée ou le retrait des mangroves sur les côtes tropicales. Dans un article publié dans Earth Sciences Reviews (Anthony et al. 2010), nous avons donné un bilan de notre compréhension des interactions vase-végétation sur les côtes sous influences amazoniennes.

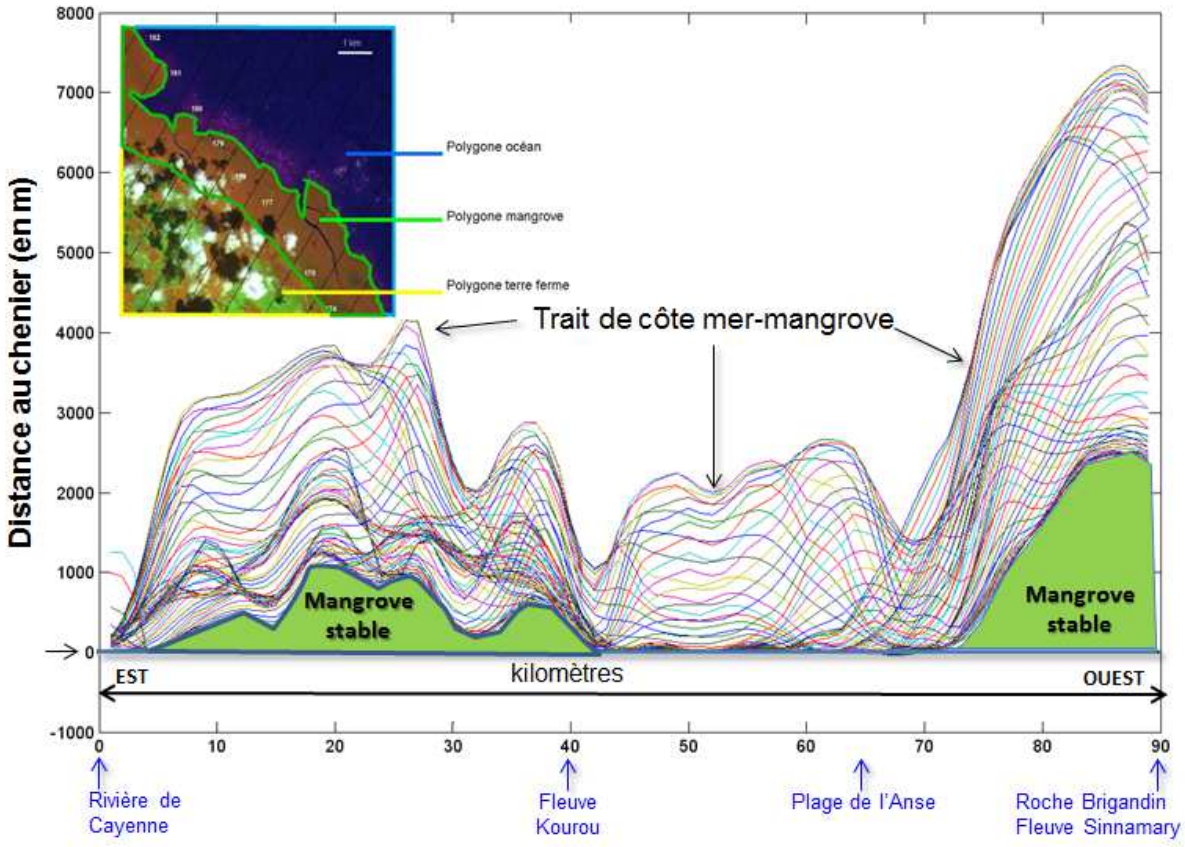


Figure 36: Dynamique du trait de côte mer-mangroves en Guyane depuis 1950. La ligne de référence indiquée par une flèche en bas à gauche correspond à la ligne de chenier (cf. Anthony et al. 2010). L'encart en haut à gauche illustre la méthodologie employée: délimitation visuelle sur images Spot et Landsat (adapté de Blanchard et al. 2013).

Dans le cadre du projet INFOLITTORAL-1, nous avons mis au point une méthode qui permet de calculer un indice de vulnérabilité (Blanchard et al. 2011; 2012) proportionnellement à la surface de mangrove

restante à l'Est d'un point donné sur le littoral guyanais. Nous allons publier ce travail dans une lettre d'information sur le littoral, éditée par la Région Guyane (Blanchard et al. 2013).

Enfin, il s'agit de valoriser et de mettre en synergie des connaissances interdisciplinaires acquises sur la dynamique des côtes à mangrove. Une nouvelle approche de modélisation spatio-temporelle a été mise au point (Degenne et al. 2010; Degenne, 2009) à l'UMR TETIS dans le cadre d'un projet ANR BLANC nommé 'STAMP' (responsable D. Lo Seen). L'approche me semble originale car elle permet de travailler sur la nature des interactions entre phénomènes ou entités quelles que soient leur nature et les échelles spatio-temporelles. En utilisant le potentiel offert par le nouveau langage OCELET, nous avons tenté de retrouver la morphodynamique littorale en Guyane Française (cf. Fig. 36), telle qu'observée dans une série temporelle d'images Spot et Landsat. Nous avons pris un signal de houle (données ERA-INTERIM; cf. 3.2.5) et un signal de courant (données MERCATOR-OCEAN; cf. 3.2.5) pour obtenir un signal de forçage sur le trait de côte (Fig. 37).

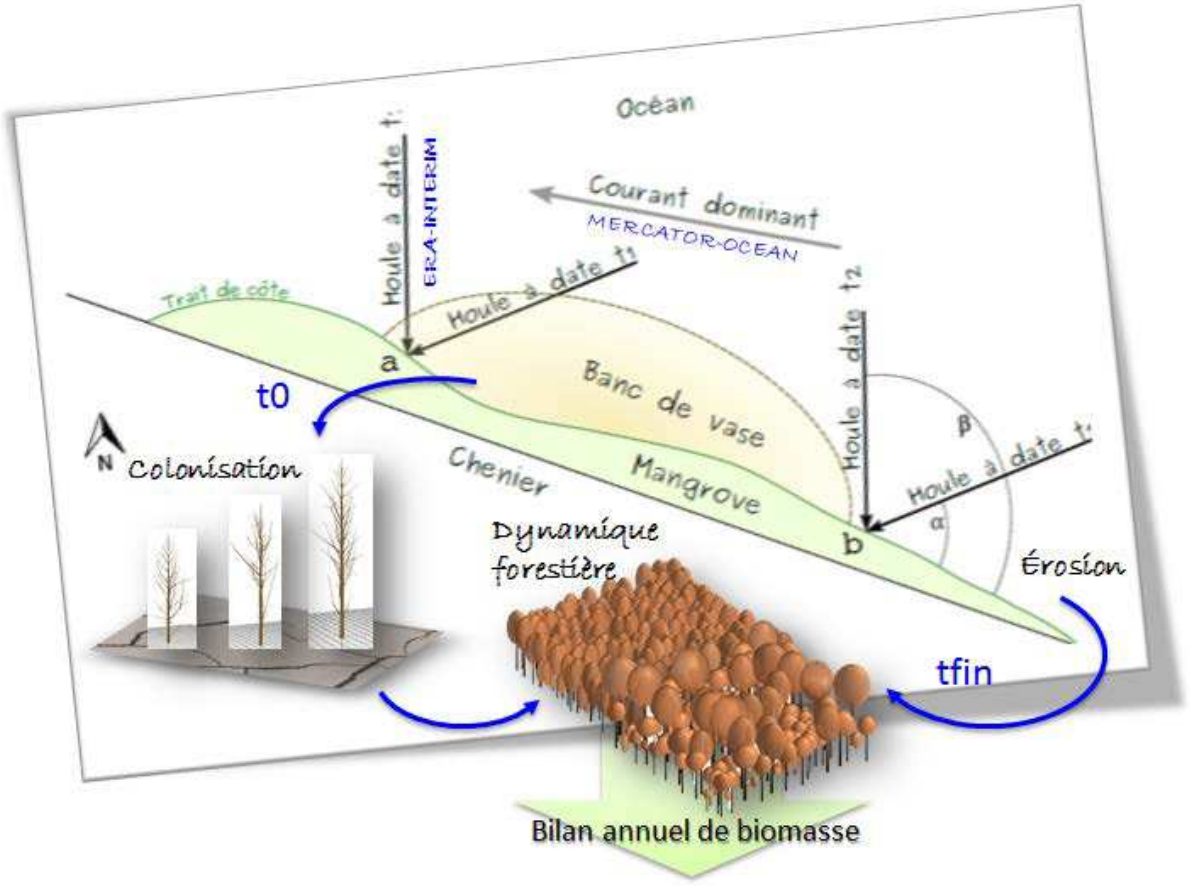


Figure 37: Principes généraux de fonctionnement du modèle MANG@COAST. La dynamique côtière contrôle la physionomie des côtes à mangroves guyanaises. Signaux de houle et courant (entité 'Océan') sont responsables du transport sédimentaire. Durant les phases d'accrétion, les substrats vaseux (entité 'Vase') se transforment jusqu'à devenir 'disponibles' à la colonisation. C'est l'instant t0 (environ 3 ans) et le démarrage des processus de colonisation (entité 'Mangroves'). Par contre, lors des phases d'érosion, le développement des peuplements de mangrove est stoppé (tfin). L'ensemble à terme doit aider à prédire la vulnérabilité des côtes à l'érosion et établir des bilans annuels de biomasse.

Des coefficients sont ajustés par itérations et comparaisons aux observations spatiales réelles sur 18 ans et 45 kilomètres de côtes avant un test sur 90 kilomètres. Les premiers résultats suggèrent que notre description des interactions 'océan', 'vase', 'mangrove' permet de simuler avec un bon réalisme les variations morphologiques du trait de côte mer-mangrove. Nous sommes en train de rédiger un article à soumettre à Environmental Modeling & Software (Proisy et al, EMS, en prép.). J'espère pouvoir présenter les tenants et aboutissants du modèle MANG@COAST lors de ma soutenance.

5.3 Synthèse sur les recherches thématiques

En résumé, mon travail sur les mangroves tente de caractériser des structures forestières de grande taille, des processus de colonisation en lien direct avec la mise en évidence de processus environnementaux (transformation de bancs de vase, signaux de houle et courants). Toutes les échelles spatiales et temporelles sont concernées car tous les processus sont interdépendants.

Les résultats s'obtiennent en partageant des expérimentations interdisciplinaires sur le terrain. Pourtant, le chantier mangroves amazoniennes n'est qu'à ses débuts. Tant de questions restent en suspens. Quel est le devenir des mangroves guyanaises face aux changements côtiers, à l'augmentation du rejet sédimentaire amazonien (Martinez et al. 2009)? Jusqu'à quelle fréquence et intensité d'érosion la mangrove peut-t-elle continuer à se maintenir? Les mangroves guyanaises sont-t-elles plus brésiliennes que guyanaises? Quelles sont les différences entre les mangroves de l'Amapá notamment à l'embouchure de l'Amazone et les mangroves guyanaises? Peut-t-on apprendre de ces côtes encore vierges pour aider à réhabiliter des côtes à mangroves en péril? L'implication de mes collègues brésiliens dans ces questionnements du IEPA, de l'UFPA et de l'UERJ est maintenant systématique.

6. UN PROJET DE RECHERCHE SUR LES MANGROVES

Mon projet de recherche pour les prochaines années s'inscrit en continuité directe des travaux présentés ci-dessus. Je détaille ci-dessous le cadre général de mise en œuvre d'un projet de recherche dédié à l'étude des mangroves.

6.1 Justification (si besoin était)

Pourquoi centrer mon projet de recherche sur l'étude des mangroves? Premièrement, parce ce que centrer ne veut pas réduire: ma motivation à travailler sur les mangroves me pousse à fédérer des connaissances acquises par différentes disciplines couvrant la physique de la mesure, l'écologie forestière, la géologie, la géomorphologie, l'informatique, etc. "*We are not limited by lack of knowledge, but by our failure to synthesize and distribute what we know.*", Pimm et al. (2001). Deuxièmement, parce chaque heure passée dans cet écosystème me ramène aux hypothèses avancées par Thompson dans le célèbre 'On Growth and Form' (Thompson, 1917): "*Physical forces, not heredity, may govern biological form"* et qu'avoir cette idée en tête explique mon positionnement au sein de l'UMR AMAP. La plasticité des formes végétales arborées est-t-elle, au même titre que la diversité spécifique, une composante majeure du fonctionnement et de la résilience de l'écosystème? À quels forçages et jusqu'à quel niveau de forçages l'écosystème forestier peut adapter sa morphologie de l'échelle de l'arbre au peuplement? Pour moi, l'enjeu de décrire les formes végétales, d'autant plus en mangroves, est passionnant et correspond bien à mes compétences de physicien de la mesure en forêts.

Enfin, l'étude des mangroves est un travail de longue haleine qui se construit autour et avec un réseau de collaborations de confiance. Cette dernière s'acquiert, en grande partie, sur un terrain aussi difficile que passionnant (souvent là où personne n'est encore allé). Ces exigences et cette ambiance correspondent à ma conception de ce que sont les recherches scientifiques au Sud.

6.2 Axes de recherche

6.2.1 Architectures végétales à l'hectare

La description de structures végétales de grande taille (arbres adultes et peuplements) est une composante indispensable pour l'estimation des stocks de biomasse et l'étude du fonctionnement des forêts naturelles: on ne peut plus se contenter de mesures de DBH. Mais, c'est un défi technique. De plus, la mise en évidence d'un modèle de croissance expliquant comment une espèce va pouvoir élaborer son architecture en fonction des paramètres endogènes et exogènes (Barthélémy et Caraglio, 2007) est un enjeu pour botanistes spécialistes des milieux tropicaux. Il faut chercher des règles d'édification de l'arbre à partir de mesures parcimonieuses, par exemple, des unités de croissance sur les branches terminales (Nicolini et al. 2012).

Il s'agirait de contribuer à la mise en évidence des règles d'édification des arbres au sein de différents types de peuplements forestiers, des stades pionniers aux stades adultes et sénescents. L'analyse des variabilités plastiques des espèces de palétuviers les plus importantes en fonction des conditions côtières

(salinité, régime de marées, etc.) pourrait informer sur la capacité des mangroves à coloniser de nouveaux substrats ou à s'adapter à la montée du niveau des océans.

Dans le cas des mangroves, un certain nombre de pistes peut être exploré, de l'échelle de l'arbre à l'échelle du peuplement forestier. Il s'agirait de tester le potentiel des méthodes botaniques expliquées ci-dessus pour aller vers un modèle de croissance architecturale des deux familles de palétuviers dominante en Guyane et à l'embouchure de l'Amazone (cf. §5.1.2 pour la description des formes d'arbres adultes).Des plus, des derniers résultats sur le potentiel des analyses de texture à suivre la dynamique naturelle (Fig. 38) vont dans le sens d'une meilleure caractérisation des processus de changements structuraux à l'échelle des peuplements forestiers.

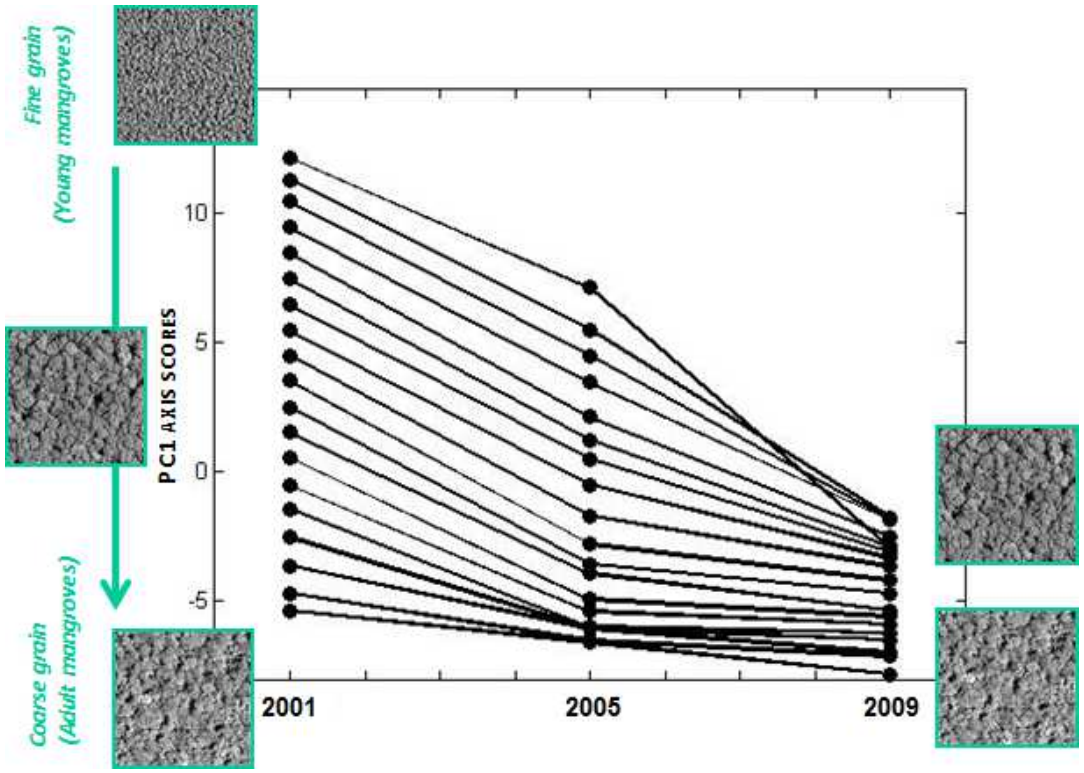


Figure 38: Évolution temporelle du grain de canopée de différents stades de développement forestiers en mangroves, tel que mesuré par le premier axe (PC1) de l'analyse FOTO appliquée sur 3 images à THRS acquises en 2001, 2005 et 2009, région de Sinnamary. On remarque la décroissance de PC1 plus rapide pour les jeunes peuplements que pour les mangroves adultes.

Ceci est de bon augure pour rapprocher les analyses menées à l'échelle de l'arbre de celles réalisées à l'échelle du peuplement forestier. Dans cette direction, je co-encadre depuis septembre 2013 avec Uta Berger (Univ. de Dresden, Allemagne), spécialiste de la modélisation de la dynamique des mangroves (p. ex. Berger et al. 2002; 2008), une thèse financée par le programme (très sélectif) Erasmus Mundus de FONASO. Le sujet de thèse de l'étudiant nigérian (A. Olagoke; cf. Olagoke et al. 2013) sélectionné est 'How are mangroves adapting their tree physiognomy to cope with environmental changes? Lessons from the Amazon-influenced coasts." Ce sera, également, une bonne occasion pour coupler les résultats à l'approche AMAP/TETIS MANG@COAST. L'ambiance est donc à la formalisation des connaissances

acquises sur le terrain. Mes collègues brésiliens de l'Amapá (Pr. V. F. dos Santos) et de Rio de Janeiro (Pr. Mario L. G. Soares) sont parties prenantes de ces actions. En parallèle, avec mes collègues développeurs informaticiens de l'UMR AMAP (F. de Coligny et S. Griffon), je tente de développer des logiciels-interfaces (saisie contrôlée d'inventaires forestiers, visualisation de peuplements en fonction de règles allométriques, exportations standardisées pour les modèles physiques) entre le monde de la télédétection et les modèles forestiers (cf. le projet Lollymangrove développé dans la suite logicielle AMAPStudio).

6.2.2 Sur les relations structures forestières - environnements

Au travers l'étude des changements de la structuration 3D des couverts forestiers, nous avons un moyen supplémentaire pour rendre compte des processus de transferts de matières organiques et minérales, des tendances climatiques et des cycles biogéochimiques. L'étude des mangroves amazoniennes est illustrative des interactions sédiments-végétation. Ce n'est pas le seul exemple visible depuis l'espace. L'observation avec Google Earth, des méandres du Rio Beni, par exemple, situé en aval des contreforts boliviens montre une mosaïque de peuplements forestiers révélateurs d'importants mouvements du lit de ce fleuve, mouvements à relier avec le climat global, régional et la pluviométrie (Espinoza et al. 2009) voire la tectonique récente de la région (Baby et al. 2009). Bref, en amont comme en aval des bassins fluviaux, l'observation spatiale de changements dans les structures forestières peut aider à mieux comprendre des processus environnementaux récents, parfois difficiles à mesurer à des échelles intermédiaires (i.e. entre la station locale et la tendance globale). Pour avancer sur ce thème, il faut des réseaux et des stations d'observation (cf. §6.3).

Enfin, la comparaison de structures forestières observées dans des zones préservées avec celles observées dans des zones en péril permettrait d'évaluer des écarts. On pourrait imaginer des cartes d'indices de dégradation ou de risques à tel processus côtier ou à telle activité humaine. Pour avancer sur ce thème 'Dégradation et vulnérabilités', je commence à travailler en Indonésie. En effet, la dégradation (pour ne pas dire la destruction) des mangroves indonésiennes est presque généralisée (cf. Google Earth en repérant les bassins d'aquaculture), sauf peut-être en Papua (anciennement Irian Jaya), sur le front des mers de Ceram et d'Arafura. Je démarre un projet nommé INDESO coordonné par CLS en partenariat avec le Ministère Indonésien des Pêches et des Affaires Maritimes. CLS m'a proposé de piloter l'application 'Mangroves & Integrated Coastal Zone Management'. Les zones d'étude sont situées sur Bali et j'espère, en Papua. L'ouverture vers l'Asie s'annonce moins dispersante que profitable: les connexions entre les travaux déjà réalisés en Guyane Française et au Brésil sont nombreuses tant méthodologiquement (apport de la télédétection pour le suivi des côtes indonésiennes) que thématiquement (les connaissances et leçons apprises en mangroves préservées servent directement à interpréter le niveau de dégradation ou la qualité de la réhabilitation en Indonésie). Le financement d'une bourse de thèse pour une ingénieure indonésienne et l'accès à un important jeu d'images optiques à THRS vont résolument dans le sens de mon souci à transférer des connaissances et des savoir-faire méthodologiques. De plus, je citerai les travaux d'expertise en cours avec CréOcéan et l'UMR ECOLAB sur le delta de la Mahakam, travaux qui visent à évaluer l'état et la capacité de régénération de mangroves perturbées par la culture intensive des crevettes et des activités d'extraction de gaz.

6.2.3 Synergies de télédétection

Point de salut sans interprétation physique des interactions signal-végétation. En optique THRS, on aurait tort de se priver (et de ne pas rendre justice à la qualité des développements informatiques de modélisation physique) du modèle DART développé à l'UMR CESBIO. Le modèle est déjà capable de simuler des images hyperspectrales à partir de maquettes de forêts contenant des arbres décrits dans un format 3D que nous ne sommes pas encore capables de fournir en forêts naturelles.
L'enjeu sera aussi dans l'analyse de séries temporelles d''images optiques à très haute résolution spatiale, analyse qui bénéficiera de l'agilité des capteurs à observer une même zone sous différents angles au cours de périodes restreintes (cf. missions Pleiades 1A et 1B). En radar, il faut suivre et participer à la préparation de la mission BIOMASS, bande P. L'idée serait d'utiliser les mêmes maquettes forestières pour simuler à la fois des images optiques à THRS et des images radar en bande P. Les collaborations avec l'UMR CESBIO sont essentielles aux recherches de l'équipe 3 de l'UMR AMAP, comme est essentielle la combinaison du potentiel des domaines électromagnétiques pour étudier des milieux aussi complexes et changeants que les forêts tropicales. Je souhaiterais, de plus, insister sur le potentiel de recherches communes ouvert par l'UMR TETIS suite au développement du langage OCELET et la conception d'un formalisme d'analyse multi-échelles des changements forestiers.

6.3 Vers un réseau de stations d'observations

6.3.1 Observations en réseaux

La nécessité de travailler en réseau de sites (cf. l'initiative australienne Mangrove Watch) ou au travers d'approches partagées sur différentes régions (cf. Kyoto & Carbon Global Mangrove Watch) apparait de plus en plus clairement. L'enjeu est de partager des informations sur le fonctionnement actuel des mangroves dans un contexte côtier donné (préservé/perturbé, estuaires, baies, côtes ouvertes, etc.). Du partage de ces informations sont attendues non seulement une meilleure sensibilisation d'un vaste public (décideurs compris) aux rôles socio-économiques et environnementaux des mangroves mais également, une meilleure compréhension du fonctionnement de l'écosystème voire des clés pour aider à sa réhabilitation.
Je souscris pleinement à ces idées aussi ambitieuses soient-elles car elles sous-entendent une vision à long terme de l'organisation des recherches, une vision qui fédère des partenaires nationaux et internationaux du Nord et du Sud. L'implantation de stations d'observation est un chantier au long cours sur lequel je vais m'investir avec le souci de proposer des mesures et méthodes standardisées dédiées à l'analyse du fonctionnement des mangroves, en prenant les structures forestières comme intégratives des processus côtiers ou pressions anthropiques.

6.3.2 Stations d'observation

Les mangroves sont 'les forêts de la mer' (Paskoff, 1994). On parle donc d'un écosystème forestier qui est influencé naturellement et avant tout par des processus hydrologiques dont dépendent les communautés végétales, animales et l'ensemble des processus biogéochimiques (Fig. 39).

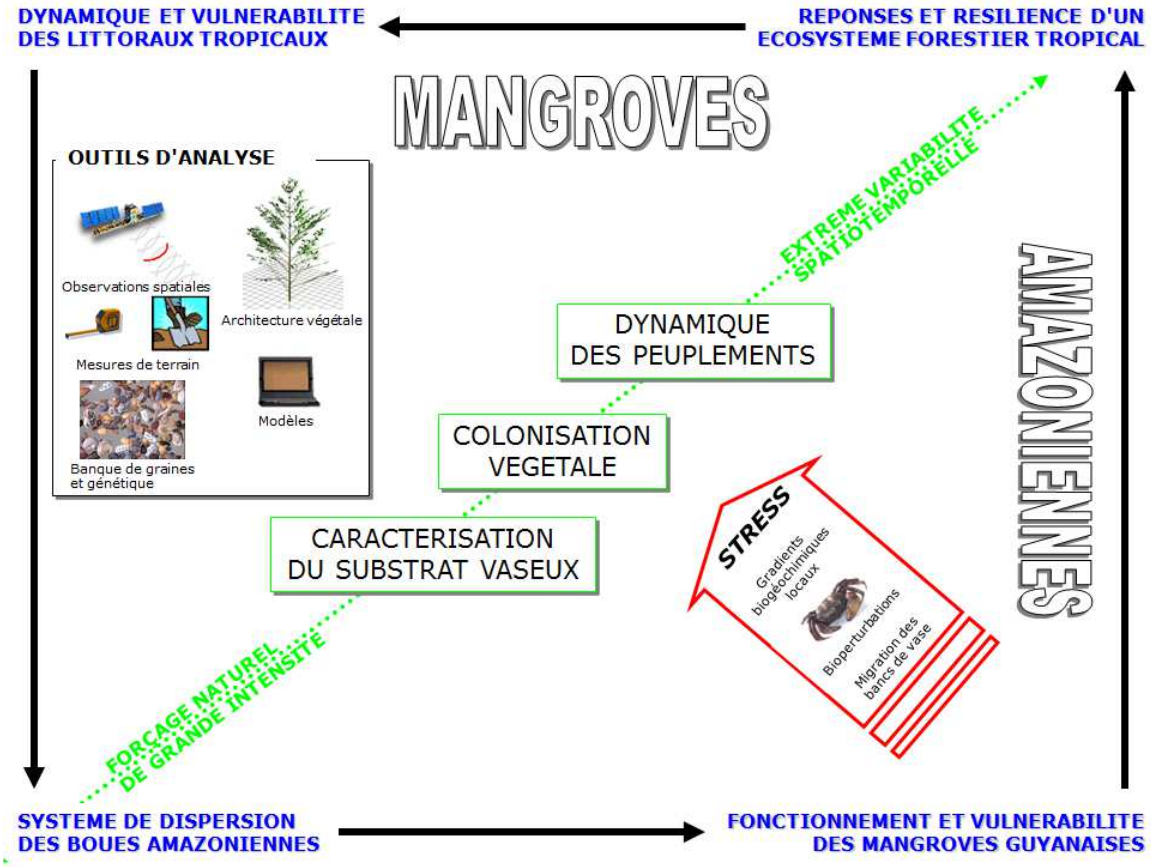


Figure 39: Exemple de questionnements abordés et d'outils d'analyse à mettre en œuvre dans une vision synthétique du fonctionnement des mangroves amazoniennes.

Les recommandations ou principes d'installation d'une station d'observation en mangroves pourraient être, par exemple, les suivants:

- Un minimum de connaissances au préalable est disponible. Une recherche sur Google Earth via le mode historique peut être extrêmement informative des changements apparus dans la dernière décennie.
- L'extension de la zone d'étude où seront disposés les instruments couvre plusieurs dizaines voire centaines d'hectares de zone intertidale.
- Des parcelles représentatives des dynamiques forestière et côtière voire des pressions anthropiques sont positionnées. Ces positions doivent être matérialisées pour perdurer.
- L'unité spatiale pour l'échantillonnage pourrait être l'hectare (il n'y pas que les inventaires forestiers à considérer). La mangrove peut apparaitre ou disparaitre à l'intérieur. Des sous-échantillonnages de structuration forestière peuvent être suffisants dans le cas de jeunes mangroves homogènes.

- L'enjeu est d'arriver à obtenir un modèle hydrologique d'ennoiement. Un réseau de points fixes (mires limnimétriques ou bâtons gradués) en nombre suffisant avec, au moins, un point par parcelle forestière est à implanter. Une difficulté est d'évaluer en relatif (mieux en absolu par rapport au niveau moyen de la mer) avec une précision centimétrique l'élévation de chaque mire. L'utilisation d'un tachéomètre est requise même si des techniques rudimentaires et astucieuses (cf. Lewis et al. 2006) peuvent être testées.
- Les variations de hauteurs d'eau en chaque point fixe en fonction de l'heure de marée peuvent être relevées visuellement sur des périodes de temps courtes ou plus ou moins automatiquement avec par exemple, des appareils photographiques visant les mires en déclenchements cadencés. Il faut trouver des compromis (autonomie électrique/ mémoire des instruments, risque de vol ou détérioration, budget, etc.). Dans les meilleurs des cas (budget conséquent, sites sécurisés, etc.), les technologies permettent maintenant de transmettre les informations en direct via le réseau GSM (encore faut-il un réseau téléphonique à portée).
- Chaque propagule ou arbre devra être étiqueté et positionné en relatif dans la parcelle. Des visites régulières dont le rythme dépend du stade de développement sont nécessaires. Les protocoles de mesures existent déjà, que ce soit pour les inventaires de peuplements adultes ou pour les descriptions de la croissance architecturale de jeunes arbres. La suite logicielle AMAPSTUDIO, notamment les outils XPLO et SIMEO (modèle Lollymangrove) peuvent assurer des contrôles de qualité à la saisie des données et proposent d'ores et déjà des formats standardisés de sauvegarde et d'archivage des relevés.
- Hydrodynamique de la zone côtière (p. ex. courants de marée; Chevalier et al. 2008), morphodynamique et transferts de sédiments (p. ex. Plaziat et Augustinus, 2004), processus biogéochimiques (Baltzer et al. 2004; Leopold et al. 2013; cf. le dispositif de mesures de flux de CO2 en Nouvelle Calédonie) et biologiques (p. ex. influence des crabes; Mchenga et al. 2007) nécessitent des instrumentations qui peuvent venir se greffer aux informations de base apportées par le couple 'Hydrologie' et 'Structures forestières'.

6.3.2 *En France et en Guyane Française*

La France est un pays à mangroves! L'éventail des situations rencontrées dans les Antilles, à la Réunion, dans les Iles Éparses, en Nouvelle Calédonie et en Guyane Française pourrait facilement plaider pour un observatoire national de l'habitat de mangroves (cf. Atlas des mangroves de l'Outre-Mer français, Roussel et al. 2010). L'action de l'état au travers l'IFRECOR en partenariat avec les collectivités locales va déjà un peu dans ce sens. Si l'on raisonnait à minima, l'utilisation d'images satellitaires à THRS pour évaluer et cartographier avec des protocoles identiques l'étendue et les caractéristiques des mangroves française permettrait de revoir les chiffres donnés dans les atlas voire de dresser un état zéro à l'échelle nationale de l'habitat de mangroves.

La Guyane, c'est-à-dire environ 68% des mangroves françaises (50000 ha environ suivant mes observations, 70000 indiqués) mérite un attention particulière vu l'étendue (320 km) de la côte et la diversité des situations littorales (influences des fleuves, des battures). Plusieurs stations seraient à implanter en aval (Nord-Ouest) et en amont (Sud-Est) du flux de sédiments qui s'initient autour du Cap

Orange à la frontière brésilienne (Fig. 40). Un site autour de la Montagne d'Argent (site du Conservatoire National) serait primordial. C'est dans cette région que les bancs de vase commencent à se former. Il y a peu d'information sur cette zone et à ma connaissance, les formations de mangroves qui s'y développent n'ont jamais été étudiées. Il faut une logistique importante (hébergements, bateaux de mer). Un peu plus au Nord-Ouest, dans la réserve naturelle de Kaw-Roura, l'implantation demanderait également du temps. Mais le gradient de structures forestières entre littoral maritime et marais est particulièrement intéressant à étudier. Il semble marqueur d'une stabilité côtière bien différente des régions en aval car il inclut des peuplements équiennes à Rhizophora (Proisy et al. 2007), famille de palétuviers généralement dominée par Avicennia sur le littoral amazonien. Un site proche de Cayenne, comme l'anse de Montabo devant l'IRD et/ou Petit Cayenne en amont du pont du Larivot permettrait de tester une instrumentation 'haute technologie'. Un site 'aval' entre Cayenne et Sinnamary permettrait de rendre compte de l'influence de l'alternance bien marquée des phases d'érosion et d'accrétion vaseuse. Entre Iracoubo et Mana, l'installation d'une station pourrait être hasardeuse vu l'intensité et la permanence de l'érosion.

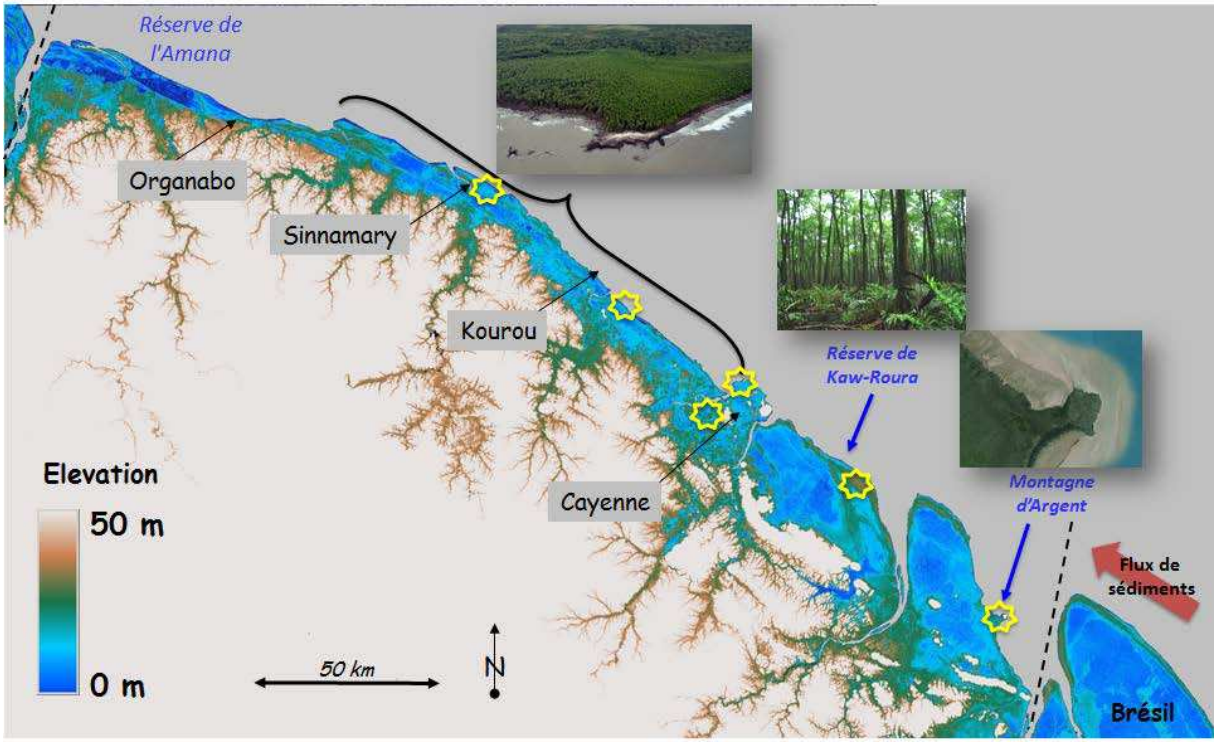


Figure 40: Littoral guyanais et proposition de sites d'implantations de stations d'observation. Le flux de sédiment part du Brésil (amont) et se propage vers le Nord-Ouest (aval).

6.3.3 Dans les dernières grandes régions de mangrove

Les régions préservées d'activités humaines intensives et destructives peuvent servir de régions 'étalons' (Moir, 1972) d'un fonctionnement 'normal' de l'écosystème car la capacité naturelle des espèces végétales à s'adapter à un régime de forçages environnementaux est encore observable. L'enjeu n'est-il donc pas de s'installer scientifiquement dans les dernières grandes régions de mangroves où les activités humaines les moins durables restent encore éloignées?

Les plus grandes régions continues de mangroves sont situées dans les Sundarbans (cf. le Parc National des Sundarbans) au Nord du Golfe du Bengale entre l'Inde et le Bangladesh (environ 6000 km²), en Indonésie, province de la Papua (environ 3000 km²) et au Brésil autour de l'embouchure de l'Amazone, notamment dans l'état du Pará (Nascimento et al. 2013; environ 7400 km²). L'application d'une législation de protection (Parcs Nationaux, Réserves) sur d'aussi grandes régions n'est pas facile. La préservation du milieu est plutôt proportionnelle à son éloignement des voies d'accès (Joppa et al. 2008).

En Amapá, autour du Cap Nord (Fig. 7) à l'embouchure de l'Amazone (cf. la réserve biologique des Lacs de Piratuba), ce sont environ 800 km² de mangroves, éloignées de plus de 200 kilomètres de Macapá (kilomètres à faire en bateau). Là-bas, amplitude de marées, courants, dépôts vaseux et sableux, modifications géomorphologiques au jour le jour sont impressionnants. Malgré ces forçages, les mangroves du Cap Nord sont splendides de vitalité. Tous les types physiographiques de mangrove sont présents (des forêts de bord de mer, de bord de fleuve, de bassin à l'intérieur jusqu'aux bosquets à Rhizophora dans les lacs légèrement salés; Fig. 41).

Je vais tenter avec mes collègues français et brésiliens du IEPA, de l'UERG et de l'ICMBIO (gestionnaire de la Réserve) de soumettre un premier projet d'implantation d'une infrastructure scientifique (carbet, moyens d'accès, autonomie énergétique et communication, etc.), base pour un projet de recherche intitulé 'Last Wild Mangroves' visant à accueillir de manière renouvelée des chercheurs de différentes disciplines voire des décideurs. Je souhaite faire de ce projet une première action concrète vers le rapprochement des recherches côtières amazoniennes avec les études en amont du bassin amazonien (ORE Hybam; proposition de Laboratoire Mixte International ANDA soumise à la mi-septembre 2013 à l'IRD par l'UMR GET).

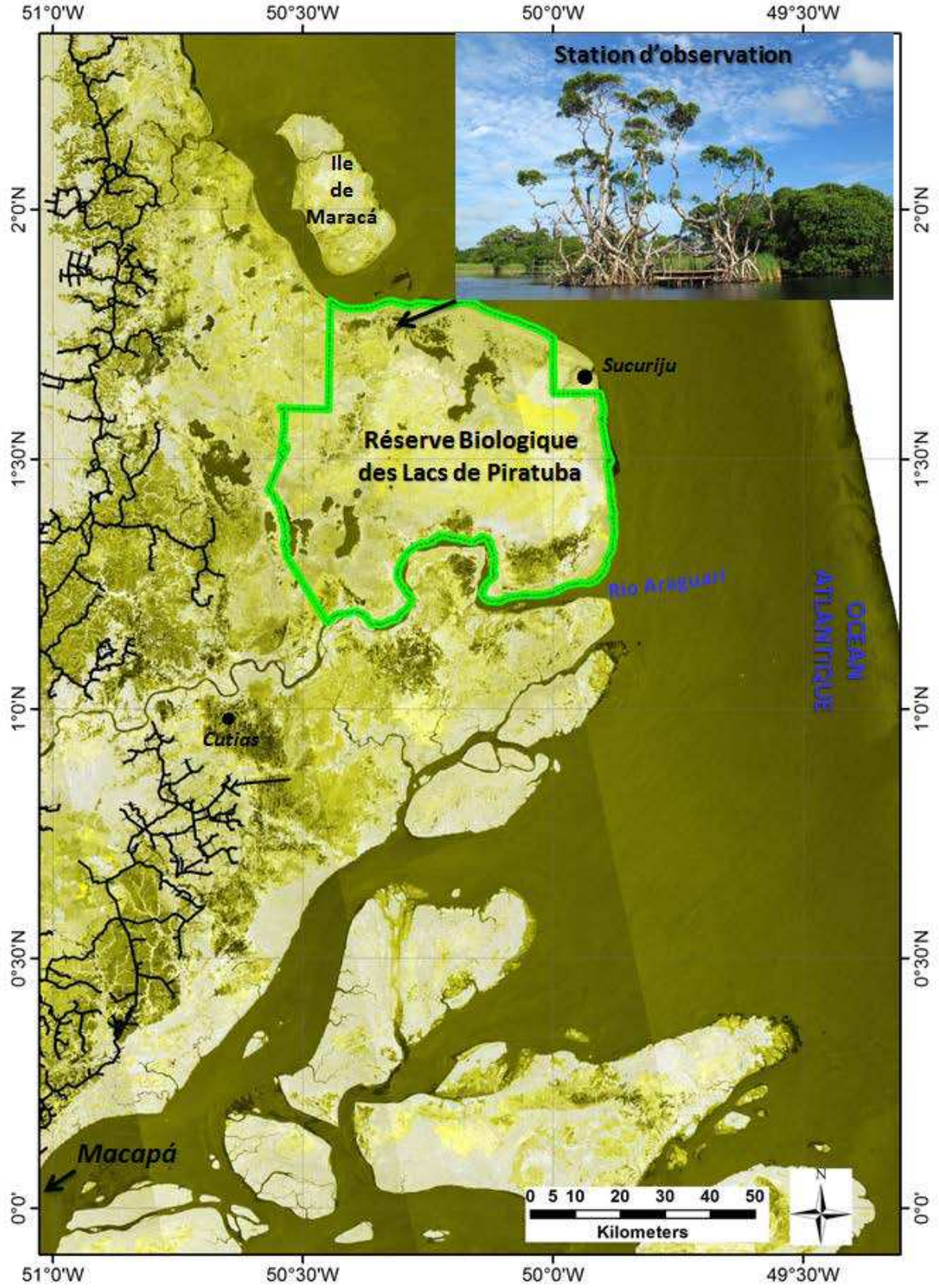


Figure 41: La région du Cap Nord, à l'embouchure de l'Amazone. L'implantation d'une station d'observation pourrait se faire dans les lacs supérieurs comme indiqué par la flèche noire. La situation est centrale d'un point de vue hydrologique et forestier. Des images à THRS sont également disponibles.

7. CONCLUSION GENERALE

Mon projet de recherche étudie la dynamique des forêts tropicales, en particulier les mangroves. J'essaie d'apporter ma contribution dans la mesure et le suivi des paramètres forestiers et environnementaux qui caractérisent cette dynamique forestière. Mes travaux commencent à l'échelle de l'arbre (description architecturale) pour aboutir à des résultats fournis à l'échelle de région forestière (carte de biomasse épigée, par exemple). La composante temporelle est, pour l'instant, traitée de manière semi-empirique à l'aide d'observations spatiales répétées.

C'est un projet qui s'inscrit dans les axes de recherche développés au sein de l'UMR AMAP, notamment au niveau de l'équipe 3 *"Organisation et Dynamique des Peuplements et des Paysages Végétaux"* et dans les thématiques abordées au sein de l'École Doctorale SIBAGHE.

Les compétences mises en œuvre relèvent de l'écologie forestière et des sciences de l'ingénieur, notamment de la physique de la mesure, disciplines abordées aussi bien expérimentalement que théoriquement. De plus, le tout ne pourrait pas fonctionner sans compétences algorithmiques multi-langages pour traiter, analyser et partager données et méthodes.

C'est un projet qui trouve son autonomie financière (assez facilement) au travers le financement d'actions de recherche au Sud (Guyane Française, Brésil, Indonésie) mais également aux travers de travaux d'expertise (projet du Fond Unique Interministériel 'INFOLITTORAL-1').

Par ailleurs, ce projet attire des étudiants du Nord (cf. encadrements de Master) et du Sud (Brésil, Indonésie, Nigéria pour des thèses): les mangroves fascinent, c'est certain, et probablement que les méthodes spatiales développées et publiées paraissent prometteuses.

Je tente de faire de ce projet un maillon fédérateur d'un réseau de collaborations nationales, internationales (Allemagne, Brésil, Royaume Uni, Indonésie) et interdisciplinaires autour de l'étude des mangroves. Ma vision est à long terme et le sentiment d'urgence à mieux connaître le fonctionnement des écosystèmes terrestres renouvelle ma motivation. C'est un privilège de pouvoir travailler dans la vase entre mer, terre et atmosphère.

8. REFERENCES

Adams, J.B., & Gillespie, A.R. (2006). *Remote sensing of landscapes with spectral images. A physical modeling approach*: Cambridge University Press. ISBN-13 978-0-521-66221-5

Anthony, E.J., Dolique, F., Gardel, A., Gratiot, N., Proisy, C., & Polidori, L. (2008). Nearshore intertidal topography and topographic-forcing mechanisms of an Amazon-derived mud bank in French Guiana. *Continental Shelf Research, 28*, 813-822

Anthony, E.J., Gardel, A., Gratiot, N., Proisy, C., Allison, M.A., Dolique, F., & Fromard, F. (2010). The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank-shoreline interactions. *Earth-Science Reviews, 103*, 99-121

Anthony, E.J., Gardel, A., Proisy, C., Fromard, F., Gensac, E., Peron, C., Walcker, R., & Lesourd, S. (2013). The role of fluvial sediment supply and river-mouth hydrology in the dynamics of the muddy, Amazon-dominated Amapá–Guianas coast, South America: A three-point research agenda. *Journal of South American Earth Sciences, 44*, 18-24

Baby, P., Guyot, J.L., & Hérail, G. (2009). Tectonic control of erosion and sedimentation in the Amazon Basin of Bolivia. *Hydrological processes, 23*, 3225-3229

Baghdadi, N., Boyer, N., Todoroff, P., El Hajj, M., & Bégué, A. (2009). Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment, 113*, 1724-1738

Baltzer, F., Allison, M., & Fromard, F. (2004). Material exchange between the continental shelf and mangrove-fringed coasts with special reference to the Amazon-Guianas coast. *Marine Geology, 208*, 115-126

Barbier, N., Couteron, P., Proisy, C., Malhi, Y., & Gastellu-Etchegorry, J.-P. (2010). The variation of apparent crown size and canopy heterogeneity across lowland Amazonian forests. *Global Ecology and Biogeography, 19*, 72-84

Barbier, N., Proisy, C., Véga, C., Sabatier, D., & Couteron, P. (2011). Bidirectional texture function of high resolution optical images of tropical forest: An approach using LiDAR hillshade simulations. *Remote Sensing of Environment, 115*, 167-179

Barbier, N., Couteron, P., Gastelly-Etchegorry, J.-P., & Proisy, C. (2012). Linking canopy images to forest structural parameters: potential of a modeling framework. *Annals of Forest Science, 69*, 305-311

Barthélémy, D., & Caraglio, Y. (2007). Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. *Annals of Botany, 99*, 375-407

Berger, U., Hildenbrandt, H., & Grimm, V. (2002). Towards a standard for the individual-based modeling of plant populations: self-thinning and the field of neighborhood approach. *Natural resource modeling, 15*, 39-54

Berger, U., Rivera-Monroy, V.H., Doyle, T.W., Dahdouh-Guebas, F., Duke, N.C., Fontalvo-Herazo, M.L., Hildenbrandt, H., Koedam, N., Mehlig, U., Piou, C., & Twilley, R.R. (2008). Advances and limitations of individual-based models to analyze and predict dynamics of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany, 89*, 260-274

Berk, A., Bernstein, L.S., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Robertson, D.C., Chetwynd, J.H., & Adler-Golden, S.M. (1998). MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment, 65*, 367-375

Bindlish, R., & Barros, A.P. (2001). Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation. *Remote Sensing of Environment, 76*, 130-137

Blanchard E., P.C., Anthony E.J., Fromard F., Gardel A., Gensac E., Walcker R (2011). Assessing mangrove biomass due to coastal dynamics in French Guiana. In, *Vulnerability of coastal ecosystems to global change and extreme events* (p. 58). Biarritz, France

Blanchard, E., Proisy, C., Anthony, E.J., dos Santos, V.F., Fromard, F., Gardel, A., Gensac, E., & Walcker, R. (2012). Quantifying and monitoring vulnerability of Amazon-influenced mangrove coasts. Case study from French Guiana In, *Meeting on Mangrove ecology, functioning and Management* Galle, Sri Lanka

Blanchard, E., Proisy, C., Le Fol, J., Galarraga, D., Eve, R., Gardel, A., Demarchi, M., & Walcker, R. (2013). Le littoral guyanais sous influences amazoniennes. Plate-forme SIG, Région Guyane (Eds). *La lettre d'Information sur le littoral guyanais* (p. 4 pages)

Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., Díaz, S., Dietz, T., Duraiappah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H.M., Perrings, C., Reid, W.V., Sarukhan, J., Scholes, R.J., & Whyte, A. (2009). Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106*, 1305-1312

Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, 359*, 409-420

Chevalier, C., Froidefond, J.-M., & Devenon, J.-L. (2008). Numerical analysis of the combined action of littoral current, tide and waves on the suspended mud transport and on turbid plumes around French Guiana mudbanks. *Continental Shelf Research, 28*, 545-560

Clark, D.A., Brown, S., Kicklighter, D.W., Chambers, J.Q., Thomlinson, J.R., & Ni, J. (2001a). Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications, 11*, 356-370

Clark, D.A., Brown, S., Kicklighter, D.W., Chambers, J.Q., Thomlinson, J.R., Ni, J., & Holland, E.A. (2001b). Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications, 11*, 371-384

Couteron, P., Barbier, N., Proisy, C., Pélissier, R., & Vincent, G. (2012). Linking Remote-Sensing Information to Tropical Forest Structure: The Crucial Role of Modelling. *Earthzine*

Couteron, P., Pélissier, R., Nicolini, E., & Paget, D. (2005). Predicting tropical forest stand structure parameters from Fourier transform of very high-resolution remotely sensed canopy figures. *Journal of Applied Ecology, 42*, 1121-1128. http://www.earthzine.org/2012/04/23/linking-remote-sensing-information-to-tropical-forest-structure-the-crucial-role-of-modelling/

Cox, P.M., Pearson, D., Booth, B.B., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jones, C.D., & Luke, C.M. (2013). Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature, 494*, 341-344

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137*, 553-597

Degenne, P., Lo Seen, D., Parigot, D., Forax, R., Tran, A., Ait Lahcen, A., Curé, O., & Jeansoulin, R. (2009). Design of a Domain Specific Language for modelling processes in landscapes. *Ecological Modelling, 220*, 3527-3535

Degenne, P. (2012). Une approche générique de la modélisation spatiale et temporelle : application à la modélisation des paysages. Manuscrit de Thèse, *Ecole Doctorale MSTI,* Université de Paris-Est, 196 pages

Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J.P., Dufrêne, E., LeDantec, V., Mougin, E., Marty, G., & Proisy, C. (1999). Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest. Inversion of the PROSPECT model. *International Journal of Remote Sensing, 20*, 879-894

Descamps, S., Descombes, X., Béchet, A., & Zérubia, J. (2009). Détection de flamants roses par processus ponctuels marqués pour l'estimation de la taille des populations. *Traitement du Signal, 26*, 95-108

Descombes, X., Minlos, R., & Zhizhina, E. (2009). Object Extraction Using a Stochastic Birth-and-Death Dynamics in Continuum. *Journal of Mathematical Imaging and Vision, 33*, 347-359

Didier, A. (2008). Caractérisation de l'état initial de la mangrove de Tumbak (Nord Sulawesi, Indonésie) et de ses usages. Rapport de Master 1 "Ingénierie en écologie et gestion de la biodiversité", Université de Montpellier 2, 74 pages.

Duke, N.C., Meynecke, J.O., Dittmann, S., Ellison, A.M., Anger, K., Berger, U., Cannicci, S., Diele, K., Ewel, K.C., Field, C.D., Koedam, N., Lee, S.Y., Marchand, C., Nordhaus, I., & Dahdouh-Guebas, F. (2007). A World Without Mangroves? *Science, 317*, 41 – 42

Espinoza Villar, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., de Oliveira, E., Ordoñez, J.J., & Vauchel, P. (2009). Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974-2004). *Journal of Hydrology, 375*, 297-311

FAO (2007). *The World's mangroves 1980-2005*. FAO Forestry Paper 153, Rome. ISBN: 978-92-5-105856-5

Fiot, J., & Gratiot, N. (2006). Structural effects of tidal exposures on mudflats along the French Guiana coast. *Marine Geology, 228*, 25-37

Froidefond, J.M., Lahet, F., Hu, C., Doxaran, D., Guiral, D., Prost, M.T., & Ternon, J.-F. (2004). Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. *Marine Geology, 208*, 153-168

Fromard, F., Puig, H., Mougin, E., Marty, G., Betoulle, J.L., & Cadamuro, L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia, 115*, 39-53

Fromard, F., Vega, C., & Proisy, C. (2004). Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys. *Marine Geology, 208*, 265-280

Fromard, F., & Proisy, C. (2010). Coastal dynamics and its consequences for mangrove structure and functioning in French Guiana. In M. Spalding, M. Kainuma & L. Collins (Eds.), *Revised World Atlas of Mangrove for Conservation and Restoration of Mangrove Ecosystems*, Earthscan Ltd, London, UK pp. 229-232.

Gardel, A., Proisy, C., Lesourd, S., Philippe, S., Caillaud, J., Gontharet, S., Anthony, E.J., & Brutier, L. (2009). A Better Understanding of Mud Cracking Processes Gained From in Situ Measurements on an Intertidal Mudflat in French Guiana. *Journal of Coastal Research, 1*, 424-428

Garestier, F., & Le Toan, T. (2010). Forest Modeling For Height Inversion Using Single-Baseline InSAR/Pol-InSAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48*, 1528-1539

Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V., & Zagolski, F. (1996). Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment, 58*, 131-156

Gastellu-Etchegorry, J.P., Martin, E., & Gascon, F. (2004). DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *International Journal of Remote Sensing, 25*, 73-96

Gensac, E., Lesourd, S., Gardel, A., Anthony, E.J., Proisy, C., & Loisel, H. (2011). Short-term prediction of the evolution of mangrove surface areas: The example of the mud banks of Kourou and Sinnamary, French Guiana. *Journal of Coastal Research, ICS 2011*, 388-392

Godin, C., & Caraglio, Y. (1998). A Multiscale Model of Plant Topological Structures. *Journal of Theoretical Biology, 191*, 1-46

Goetz, S., Baccini, A., Laporte, N., Johns, T., Walker, W., KellndorfeR, J., Houghton, R., & Sun, M. (2009). Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management, 4*, 2

Gratiot, N., Gardel, A., & Polidori, L. (2005). Remote sensing based bathymetry on the highly dynamic amazonian coast. In, *9th International Coastal Symposium*. Hofn, Iceland

Gratiot, N., Gardel, A., & Anthony, E.J. (2007). Trade-wind waves and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: Input from ERA-40 wave data and field investigations. *Marine Geology, 236*, 15-26

Gratiot, N., Anthony, E.J., Gardel, A., Gaucherel, C., Proisy, C., & Wells, J.T. (2008). Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes. *Nature Geoscience, 1*, 169-172

Griffon S., & F., d.C. (2012). AMAPstudio: a Software Suite for Plants Architecture Modelling. In D.Y. Kang M., Guo Y. (Ed.), *Plant Growth Modeling, Simulation, Vizualization and Applications* (p. 141:147). Shanghai, China: IEEE press

Hadjimitsis, D.G., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M.G., Retalis, A., Michaelides, S., Chrysoulakis, N., Toulios, L., & Clayton, C.R.I. (2010). Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 10*, 89-95

Hallikainen, M.T., Ulaby, F.T., Dobson, M.C., El-Rayes, M.A., & Wu, L.-K. (1985). Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil - Part I: Empirical Models and Experimental Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 23*, 25-34

Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics, 48*, RG4004

Hassan, R., Scholes, R., & Ash, N. (Eds.) (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millenium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press

Imhoff, M.L. (1995). Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33*, 511-518

Imhoff, M.L., Bounoua, L., Ricketts, T., Loucks, C., Harriss, R., & Lawrence, W.T. (2004). Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature, 429*, 870-873

Joppa, L.N., Loarie, S.R., & Pimm, S.L. (2008). On the protection of "protected areas". *Proceedings of the National Academy of Sciences, 105*, 6673-6678

Joseph, S., Murthy, M., & Thomas, A. (2011). The progress on remote sensing technology in identifying tropical forest degradation: a synthesis of the present knowledge and future perspectives. *Environmental Earth Sciences, 64*, 731-741

Karam, M.A., Amar, F., Fung, A.K., Mougin, E., Lopes, A., Le Vine, D.M., & Beaudoin, A. (1995). A microwave polarimetric scattering model for forest canopies based on vector radiative transfer theory. *Remote Sensing of Environment, 53*, 16-30

Knight, J.M., Dale, P.E.R., Dunn, R.J.K., Broadbent, G.J., & Lemckert, C.J. (2008). Patterns of tidal flooding within a mangrove forest: Coombabah Lake, Southeast Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*

Submarine groundwater discharge studies along the Ubatuba coastal area in south-eastern Brazil, 76, 580-593

Kotchenova, S.Y., Vermote, E.F., Matarrese, R., & Klemm, J.F.J. (2007). Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Applied Optics, 45*

Lasne, Y., Paillou, P., Freeman, A., Farr, T., McDonald, K.C., Ruffie, G., Malezieux, J.-M., Chapman, B., & Demontoux, F. (2008). Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: implication for soil moisture detection by means of remote sensing *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46*, 1674-1688

Leopold, A., Marchand, C., Deborde, J., Chaduteau, C., & Allenbach, M. (2013). Influence of mangrove zonation on CO2 fluxes at the sediment–air interface (New Caledonia). *Geoderma, 202–203*, 62-70

Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M.W.J., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., Plummer, S., Rocca, F., Saatchi, S., Shugart, H., & Ulander, L. (2011). The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment, 115*, 2850-2860

Lewis III, R.R. (2005). Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering, 24*, 403-418

Lewis, R.R., Quarto, A., Enright, J., Corets, E., Primavera, J., Ravishankar, T., Stanley, O.D., & Djamaluddin, R. (Eds.) (2006). *Five steps to successfull ecological restoration*: Mangrove Action Project, Yayasan Akar Rumput Laut, April 2006 - Yogyakarta, Indonesia

Lewis III, R.R. (2009). Knowledge overload, wisdom underload. *Ecological Engineering, 35*, 341-342

Lewis, S.L., Lloyd, J., Sitch, S., Mitchard, E.T.A., & Laurance, W.F. (2009). Changing Ecology of Tropical Forests: Evidence and Drivers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 40*, 529-549

Lin, Y.C., & Sarabandi, K. (1999). A Monte Carlo coherent scattering model for forest canopies using fractal-generated trees. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37*, 440-451

Liu, S., Costanza, R., Farber, S., & Troy, A. (2010). Valuing ecosystem services. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1185*, 54-78

Liu, D., Sun, G., Guo, Z., Ranson, K.J., & Du, Y. (2010b). Three-Dimensional Coherent Radar Backscatter Model and Simulations of Scattering Phase Center of Forest Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48*, 349 – 357

Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J.P., Hector, A., Hooper, D.U., Huston, M.A., Raffaelli, D., Schmid, B., Tilman, D., & Wardle, D.A. (2001). Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges. *Science, 294*, 804-808

Loreau, M., & de Mazancourt, C. (2013). Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms. *Ecology letters, 16*, 106-115

Lucas, R.M., Mitchell, A.L., Rosenqvist, A., Proisy, C., Melius, A., & Ticehurst, C. (2007). The potential of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: Case studies from the Tropics. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 17*, 245-264

Lucas, R.M., Carreiras, J., Proisy, C., & Bunting, P. (2008). ALOS PALSAR applications in the Tropics and Subtropics: characterization, mapping and detecting change in forests and coastal wetlands. In, *ALOS PI symposium*. Rhodes, Greece

Malhi, Y., Doughty, C., & Galbraith, D. (2011). The allocation of ecosystem net primary productivity in tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 366*, 3225-3245

Martinez, J.M., Guyot, J.L., Filizola, N., & Sondag, F. (2009). Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *CATENA, 79*, 257-264

Mchenga, I.S.S., Mfilinge, P.L., & Tsuchiya, M. (2007). Bioturbation activity by the grapsid crab Helice formosensis and its effects on mangrove sedimentary organic matter. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 73*, 316-324

Mitchell, A., Lucas, R.M., Proisy, C., & Melius, A. (2005). Sensitivity of radar backscatter to mangrove forest structure and AIRSAR imaging parameters. *IGARSS 2005,* Seoul, Korea, (pp. 2090-2093).

Mitchell, A., Lucas, R.M., & Proisy, C. (2006). Multifrequency SAR observations of mangroves in northern Australia and French Guiana. In, *PACRIM AIRSAR Significant Results Symposium*. Kuala Lumpur, Malaysia

Moir, W.H. (1972). Natural areas. *Science, 177*, 396-400

Mougin, E., Lopes, A., Frison, P.L., & Proisy, C. (1995). Preliminary analysis of ERS-1 wind scatterometer data over land surfaces. *International. Journal of Remote Sensing, 16*, 391-398.

Mougin, E., Proisy, C., Marty, G., Fromard, F., Puig, H., Betoulle, J.L., & Rudant, J.P. (1999). Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37*, 94-102

Nagelkerken, I., Blaber, S.J.M., Bouillon, S., Green, P., Haywood, M., Kirton, L.G., Meynecke, J.-O., Pawlik, J., Penrose, H.M., Sasekumar, A., & Somerfield, P.J. (2008). The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany, 89*, 155-185

Nascimento Jr, W.R., Souza-Filho, P.W.M., Proisy, C., Lucas, R.M., & Rosenqvist, A. (2013). Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 117*, 83-93

Nicolini, E., Beauchêne, J., Vallée, B., Ruelle, J., Mangenet, T., & Heuret, P. (2012). Dating branch growth units in a tropical tree using morphological and anatomical markers: the case of Parkia velutina Benoist (Mimosoïdeae). *Annals of Forest Science, 69*, 543-555

North, P.R.J. (1996). Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34*, 946-956

Olagoke, A.O., Bosire, J.O., & Berger, U. (2013). Regeneration of Rhizophora mucronata (Lamk.) in degraded mangrove forest: Lessons from point pattern analyses of local tree interactions. *Acta Oecologica, 50*, 1-9

Paskoff, R. (1994). Mangroves, les forêts de la mer. *Calipso log (Côtes en danger, Extrait de l'ouvrage 'Côtes en danger', Collection Pratiques de la Géographie', Paris, Masson, 1993, 250 pages. ISBN: 2-225-84009-1*, 4-7

Picard, G., Le Toan, T., Quegan, S., Caraglio, Y., & Castel, T. (2004). Radiative transfer modeling of cross-polarized backscatter from a pine forest using the discrete ordinate and eigenvalue method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42*, 1720-1730

Plaziat, J.-C., & Augustinus, P.G.E.F. (2004). Evolution of progradation/erosion along the French Guiana mangrove coast: a comparison of mapped shorelines since the 18th century with Holocene data. *Marine Geology, 208*, 127-143

Ploton, P., Pelissier, R., Proisy, C., Flavenot, T., Barbier, N., Rai, S.N., & Couteron, P. (2012a). Assessing aboveground tropical forest biomass using Google Earth canopy images. *Ecological Applications, 22*, 993-1003

Ploton, P., Pélissier, R., Barbier, N., Proisy, C., Ramesh, B. R. & Couteron, P. (2012b). Canopy texture analysis for large-scale assessments of rainforest stand structure and biomass. Chap. 24. In M. Lowman, Devy, S. & Ganesh, T. (Ed.), *Treetops at Risk? Challenges of Global Forest Canopies.* (pp. 237-245): Springer, New York. ISBN 978-1-4614-7161-5

Polidori, L., & Proisy, C. (2003). Potencialidades e limitações do sensoriamento remoto para o estudo das costas tropicais úmidas. In, *Mangrove 2003*. Salvador, Bahia, Brazil

Proisy, C., Mougin, E., Fromard, F., & Rudant, J.P. (1998). Télédétection radar des mangroves de Guyane Française. *Photo-Interprétation - Images Aériennes et spatiales, Numéro spécial Séminaire Télédétection et Végétation, 36*, 81-88

Proisy, C. (1999). Apport des données radar à synthèse d'ouverture pour l'étude de la dynamique des écosystèmes forestiers. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III.187 pages

Proisy, C., Mougin, E., Dufrêne, E., & Le Dantec, V. (2000a). Monitoring seasonal changes of a mixed temperate forest using ERS SAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38*, 540-552

Proisy, C., Mougin, E., Fromard, F., & Karam, M.A. (2000b). Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sensing of Environment, 71*, 56-66

Proisy, C., Sarti, F., Mougin, E., Lopes, A., Dufrene, E., LeDantec, V., Ruiz, C., Borderies, P., & Chenerie, I. (2000c). Temporal variations of interferometric coherence over a deciduous forest. In R.A. Harris & L. Ouwehand (Eds.), *CEOS SAR Workshop* (pp. 25-30)

Proisy, C., Mougin, E., & Fromard, F. (2001a). Radar remote sensing of mangroves: Results and perspectives. In, *IGARSS 2001: Scanning the Present and Resolving the Future* (pp. 3056-3058)

Proisy, C., Mougin, E., Martin, E., Borderies, P., Chenerie, I., & Thirion, L. (2001b). Seasonal variations of ERS Tandem coherence values over a mixed temperate forest. In, *IGARSS 2001: Scanning the Present and Resolving the Future* (pp. 3059-3061)

Proisy, C., Mougin, E., Fromard, F., Trichon, V., & Karam, M.A. (2002). On the influence of canopy structure on the polarimetric radar response from mangrove forest. *International Journal of Remote Sensing, 23*, 4197-4210

Proisy, C., Souza Filho, P., Prost, M.T., Fromard, F., Mendes, A.C., & de Coligny, F. (2003a). Monitoring the Dynamic of the Amazon Coast (Pará, Brasil and French Guiana) Using a Commom Methodology Based on a Spatial Analysis Coupled to a Simulation Tool. In, *Mangrove 2003*. Salvador, Bahia, Brazil

Proisy, C., 2005, Guiana Francesa: a continuidade da costa amazonica tão especifica, *IV Workshop PIATAM MAR*, Projecto Potenciais Impactos Ambientais do Transporte de petróleo e derivados na zona costeira amazônica, 14-19 February, Salinopolis, PA, Brazil. Invited presentation

Proisy, C., Couteron, P., & Fromard, F. (2007). Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment, 109*, 379-392

Proisy, C., Gratiot, N., Anthony, E.J., Gardel, A., Fromard, F., & Heuret, P. (2009). Mud bank colonization by opportunistic mangroves: A case study from French Guiana using lidar data. *Continental Shelf Research, 29*, 632-641

Proisy, C. (2010). Potential of L-band radar imagery for studying tropical forest dynamics: the international ALOS Kyoto & Carbon Initiative. In Agropolis International (Ed.), *Dossier Agropolis " Télédétection et Systèmes d'Information pour l'Environnement et les Territoires ", Montpellier, France. Vol. 9.* 64 pages. ISSN 1628-4240

Proisy, C. (2011a). Remote sensing of mangrove biomass: results and perspectives. In, *XV Brazilian Remote Sensing Symposium*. Curitiba, PR, Brazil. Invited conference

Proisy, C. (2011b). Monitoramento da biomassa de florestas de mangue associadas a costas com intensa dinâmica costeira. O caso da Guiana Francesa. In I. conference (Ed.), *XIV Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar*. Baneario Camboriu-SC, Brazil. Invited conference.

Proisy, C., & Guéroult, M. (2011). Description simplifiée de l'architecture de palétuviers adultes. *Lettre d'information de l'UMR AMAP, 23-24*

Proisy, C., Barbier, N., Guéroult, M., Pélissier, R., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Grau, E., & Couteron, P. (2012). Biomass prediction in tropical forests: the canopy grain approach. In T.E. Fatoyinbo (Ed.), *Remote Sensing of Biomass: Principles and Applications / Book 1*: INTECH publisher

Proisy, C., Degenne, P., Anthony, E.J., Blanchard, E., dos Santos, V.F., Gardel, A., & Lo Seen, D. (xxxx). Mang@coast: towards a modeling approach simulating changes of mangrove-fringed coasts using Ocelet. *Environmental Modelling & Software, en préparation*

Proisy, C., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Barbier, N., & Grau, E., Moura de Almeida, P. M., Soares, M. L. G. (xxxx). Simulation of texturally-realistic high resolution images of mangroves. *Remote Sensing of Environment, En préparation*

Propastin, P., & Erasmi, S. (2010). A physically based approach to model LAI from MODIS 250 m data in a tropical region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12*, 47-59

Propastin, P., Ibrom, A., Knohl, A., & Erasmi, S. (2012). Effects of canopy photosynthesis saturation on the estimation of gross primary productivity from MODIS data in a tropical forest. *Remote Sensing of Environment, 121*, 252-260

Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (1991). *The Algorithmic Beauty of Plants*: Springer-Verlag. 228 pages

Rahman, A.F., Dragoni, D., Didan, K., Barreto-Munoz, A., & Hutabarat, J.A. (2013). Detecting large scale conversion of mangroves to aquaculture with change point and mixed-pixel analyses of high-fidelity MODIS data. *Remote Sensing of Environment, 130*, 96-107

Ranson, K.J., Sun, G., Weishampel, J.F., & Knox, R.G. (1997). Forest Biomass from Combined Ecosystem and Radar Backscatter Modeling. *Remote Sensing of Environment, 59*, 118-133

Rao, A.R., & Lohse, G.L. (1996). Towards a texture naming system: Identifying relevant dimensions of texture. *Vision Research, 36*, 1649-1669

Regard, V., Lagnous, R., Espurt, N., Darrozes, J., Baby, P., Roddaz, M., Calderon, Y., & Hermoza, W. (2009). Geomorphic evidence for recent uplift of the Fitzcarrald Arch (Peru): A response to the Nazca Ridge subduction. *Geomorphology, 107*, 107-117

Richards, J.A. (2005). Analysis of remotely sensed data: The formative decades and the future. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43*, 422-432

Roussel, M., Duncombe, M., & Gabrié, C. (2010). Les mangroves de l'Outre-Mer français. Écosystèmes associés aux récifs coralliens. Conservatoire du Littoral & IFRECOR (Eds.) (p. 145 pages)

Rosenqvist, A., Milne, A., Lucas, R., Imhoff, M., & Dobson, C. (2003). A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy, 6*, 441-455

Ruiz, C., Borderies, P., Chenerie, I., Mougin, E., & Proisy, C. (2000). Modelling of electromagnetic waves interaction with forest canopies. In R.A. Harris & L. Ouwehand (Eds.), *CEOS SAR Workshop* (pp. 551-556)

Saenger, P. (1998). Mangrove vegetation: an evolutionary perspective. *Marine and Freshwater Research, 49*, 277-286

Saenger, P., & Snedaker, S.C. (1993). Pantropical trends in mangrove above-ground biomass and annual litter fall. *Oecologia, 96*, 293 – 299

Saenger, P. (2003). Mangrove Ecology, Silviculture and Conservation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL. 360 pages. ISBN: 1-4020-0686-1

Sathirathai, S., & Barbier, E.B. (2001). Valuing mangrove conservation in Southern Thailand. *Contemporary Economic Policy, 19*, 109-122

Schaffelke, B., Mellors, J., & Duke, N.C. (2005). Water quality in the Great Barrier Reef region: responses of mangrove, seagrass and macroalgal communities. *Marine Pollution Bulletin, 51*, 279-296

Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., & Macomber, S.A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment, 75*, 230-244

Spalding, M., Kainuma, M., & Collins, L. (Eds.) (2010). *World Atlas of Mangroves*. London, Washington D. C.: Earthscan

Sun, G., & Ranson, K.J. (1995). A three-dimensional radar backscatter model of forest canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33*, 372-382

Sun, G., & Ranson, K.J. (1998). Radar modelling of forest spatial patterns. *International Journal of Remote Sensing, 19*, 1769-1791

Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M., Jinadasa, K., & Homchuen, S. (2007). Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landscape and Ecological Engineering, 3*, 33-45

Thompson, D.W. (1917). *On growth and form*: Cambridge University Press. ISBN 0-486-67135-6

Tomlinson, P.B. (1994). *The botany of mangroves*: New York: Cambridge University Press. 419 pages. ISBN 0-521-46675-X

Ulaby, F.T., & El-Rayes, M.A. (1987). Microwave dielectric spectrum of vegetation - II: Dual dispersion model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-25*, 550-557

Ulaby, F.T., Sarabandi, K., McDonald, K., Whitt, M., & Dobson, M.C. (1990). Michigan microwave canopy scattering model. *International Journal of Remote Sensing, 11*, 1223-1253

UNEP-WCMC (2006). In the front line: shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs. In C. UNEP-WCMC, UK (Ed.), 33 pages.

Uppala, S.M., Kallberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D.C., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Berg, L.V.D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.F., Morcrette, J.J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., & Woollen, J. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 131*, 2961-3012

van der Werf, G.R., Morton, D.C., DeFries, R.S., Olivier, J.G.J., Kasibhatla, P.S., Jackson, R.B., Collatz, G.J., & Randerson, J.T. (2009). CO2 emissions from forest loss. *Nature Geoscience, 2*, 737-738

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., & Jean-Jacques Morcrette, J.-J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35*, 675-686

Villard, L., Borderies, P., & Hajnsek, I. (2008). Bistatic Pol-InSAR Scenario and Evaluation by Forest Scattering Simulations. In, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International* (pp. IV - 97-IV - 100)

Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature, 416*, 389-395

Wang, Y., Davis, F.W., Melack, J.M., Kasischke, E.S., & Christensen, J.R. (1995). The effects of changes in forest biomass on radar backscatter from tree canopies. *International Journal of Remote Sensing, 16*, 503-513

Webb, E.L., Friess, D.A., Krauss, K.W., Cahoon, D.R., Guntenspergen, G.R., & Phelps, J. (2013). A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise. *Nature Clim. Change, 3*, 458-465

West, G.B., Enquist, B.J., & Brown, J.H. (2009). A general quantitative theory of forest structure and dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106*, 7040-7045

Zelazowski, P., Malhi, Y., Huntingford, C., Sitch, S., & Fisher, J.B. (2011). Changes in the potential distribution of humid tropical forests on a warmer planet. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 369*, 137

Zhang, Y., Yu, G., Yang, J., Wimberly, M.C., Zhang, X., Tao, J., Jiang, Y., & Zhu, J. (2013). Climate-driven global changes in carbon use efficiency. *Global Ecology and Biogeography, in press*

Zhou, J., Proisy, C., Descombes, X., Hedhli, I., Barbier, N., Zerubia, J., Gastellu-Etchegorry, J.-P., & Couteron, P. (2010). Tree crown detection in high resolution optical and LiDAR images of tropical forest. In, *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII, Toulouse : France (2010)*. Toulouse

Zhou, J., Proisy, C., Couteron, P., Descombes, X., Zérubia, J., Nouvellon, Y., & Le Maire, G. (2011). Tree crown detection in high resolution optical images during the early growth stages of eucalyptus plantations in Brazil In, *Asian Conference on Pattern Recognition*. Beijing, China

Zhou, J. (2012). Application de l'identification d'objets sur images à l'étude de canopées de peuplements forestiers tropicaux : cas des plantations d'Eucalyptus et des mangroves. In, *Ecole Doctorale SIBAGHE*: Université de Montpellier 2. 191 pages.

Zhou, J., Proisy, C., Descombes, X., le Maire, G., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Viennois, G., Zerubia, J., & Couteron, P. (2013). Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. *Forest Ecology and Management, 301*, 129-141

PARTIE 3 - TEXTES DES PRINCIPALES PUBLICATIONS

1. Proisy, C., Mougin, E., Fromard, F., & Karam, M.A. (2000). Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sensing of Environment, 71*, 56-66. http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00064-4

2. Proisy, C., Couteron, P., & Fromard, F. (2007). Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment, 109*, 379-392 http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.009

3. Proisy, C., Gratiot, N., Anthony, E.J., Gardel, A., Fromard, F., & Heuret, P. (2009). Mud bank colonization by opportunistic mangroves: A case study from French Guiana using lidar data. *Continental Shelf Research, 29*, 632-641 http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2008.09.017

4. Zhou, J., Proisy, C., Descombes, X., le Maire, G., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Viennois, G., Zerubia, J., & Couteron, P. (2013). Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. *Forest Ecology and Management, 301*, 129-141. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.007

5. Nascimento Jr, W.R., Souza-Filho, P.W.M., Proisy, C., Lucas, R.M., & Rosenqvist, A. (2013). Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 117*, 83-93.http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2012.10.005