



Rapport final v1.1

CARTHAFORUM

MISSION SUR LA FAISABILITE D'UNE CARTOGRAPHIE REGULIERE DES HABITATS FORESTIERS ULTRAMARINS ET DU SUIVI DES EVOLUTIONS

Convention MEEM / ECOFOR

N° 2101646739 du 28/08/2015

Paris, Juin 2017

Expertise : Anaïs Jallais, Anoumou Kemavo, Samira Mobaied, Jean-Paul Rudant, Stéphane Guitet
Rédaction : Stéphane Guitet
Relecture : Arnault Lalanne
Chef de projet : Bernard Riera

GIP ECOFOR
42, rue Scheffer
75116 Paris cedex 16
tél : 01 53 70 21 70
fax : 01 53 70 21 54

www.gip-ecofor.org

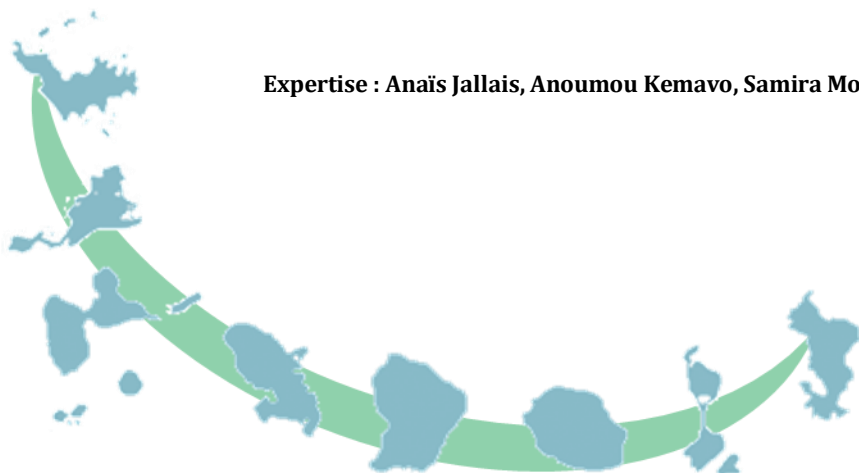


TABLE DES MATIERES

1.	Introduction.....	7
1.1.	Présentation de l'étude	7
1.1.1.	Objectifs	7
1.1.2.	Contexte de réalisation	8
1.3.	Organisation de l'étude.....	9
1.3.1.	Planning de réalisation	9
1.3.2.	Equipe projet, comité de pilotage et interactions.....	10
1.4.	Périmètres de l'étude.....	11
1.4.1.	Périmètre géographique	11
1.4.2.	Périmètre thématique	13
2.	Matériels et méthodes	15
2.1.	Etat des lieux par prospection multi-sources	15
2.2.	Etat de l'art par étude bibliographique	16
2.3.	Essais prospectifs par télédétection spatiale	17
2.4.	Enquete auprès des acteurs du territoire	18
3.	Résultats et synthèse.....	19
3.1.	Etat des lieux	19
3.1.1.	Cartographies disponibles.....	20
3.1.2.	Disponibilité des données terrain.....	22
3.1.3.	Dispositifs de surveillance territoriale.....	26
3.1.4.	Dispositifs d'accès aux images	29
3.1.5.	Observatoires thématiques en lien avec la forêt.....	31
3.1.6.	Portails de diffusion opérationnels	36
3.1.7.	Synthèse des éléments recueillis.....	37
3.2.	Etat de l'art et perspectives.....	40
3.2.1.	Méthode de cartographie des habitats et formations végétales	40
3.2.2.	Méthodes de suivi des changements forestiers	60
3.2.3.	Méthodes de cartographie de la biomasse forestière.....	70
4.	Analyse et propositions	81
4.1.	Déclinaisons locales des problématiques forestières	81
4.1.1.	Priorisation locale des enjeux globaux.....	81
4.1.2.	Attentes communes des territoires en terme de cartographie et de suivi	82
4.1.3.	Synthèse des attentes centrales et territoriales	84
4.2.	Propositions techniques.....	85
4.2.1.	Compléter la cartographie des formations végétales dans les ROM-COM.....	86

4.2.2.	Assurer un suivi des changements forestiers pour faciliter contrôles et rapportage	89
4.2.3.	Améliorer l'estimation des stocks et flux de carbone forestier	91
4.2.4.	Développer des méthodes de suivi régulier des Espèces Exotiques Envahissantes végétales en forêt.....	93
4.2.5.	Assurer une animation et des échanges techniques inter OUTRE-MER sur les problématiques de cartographie et de suivi des habitats forestiers.....	94
5.	Conclusions de l'étude	96
5.1.	Synthèse des propositions et chronogrammes	96
5.2.	Articulation globale des actions	96
6.	Références	98
Annexe 1 : Liste des personnes ressources		109
Annexe 2 : Liste des initiatives et projets de niveau national, inter-régional ou local en lien avec le sujet (<i>extraits sites web</i>).....		116
Annexe 3 : Rapport de stage Master 2R d'Hakim Bennacer		125
Annexe 4 : Formulaire de l'enquête en ligne.....		171
Annexe 5 : Synthèse des résultats de l'enquête en ligne.....		179
Annexe 6 : L'Observatoire de l'activité minière en Guyane : un outil intégré et efficace pour le suivi de l'environnement.....		191
Annexe 7 : Présentation et CR du 1 ^{er} COPIL étendu 09/11/2016		201
Annexe 8 : Présentation et CR du 2 ^{eme} COPIL étendu 27/11/2016		231
Annexe 9 : Présentation et CR du 3 ^{eme} COPIL étendu 18/01/2017		243
Annexe 10 : Fiches actions.....		259

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - carte de localisation des territoires concernés par CARTHAFORUM.....	11
Figure 2- cartes de distribution de la biomasse forestiere et du carbone organique des sols en Guyane, d'après Fayad et al [22] et Guitet [23].	21
Figure 3-réseau de placettes permanentes GUYAFOR (extrait de http://paracou.cirad.fr)	23
Figure 4 -localisation des réseaux de placettes permanentes récemment installés en Guadeloupe en forêt humide et en forêt sèche, d'après ONF [24,25]	23
Figure 5-recensement des données forestières anciennes disponibles pour la Guyane extrait de Guitet et al [34]	25
Figure 6 - exemple d'informations spatiales produites par l'OAM en 2014 extrait de ONF [35] ..	26
Figure 7- exemple d'informations spatiales produites par AGRIPAG sur la période 2009-2012 autour de maripasoula, extrait de Parc Amazonien de Guyane 2013 [36]	27
Figure 8 - suivi statistique des changements de couvert forestier en Guyane réalisé par imagerie satellitaire entre 1990 et 2012, extrait de Lefebvre et Verger [38])	28
Figure 9 : image Sentinel2 produite en fin de chaîne de prétraitement muscate au niveau 2A accompagnée des masques nuages, ombres et correction de réflectance tiré de http://www.cesbio.ups-tlse.fr	31
Figure 10 – niveau d'exhaustivité de la liste des espèces connues dans les Outre-mer (extrait de http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/tous)	34
Figure 11 – nombre d'espèces présentes dans au moins un des territoires ultramarins parmi la liste de 100 espèces considérées par l'UICN comme les plus envahissantes au monde (extrait de http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/tous)	34
Figure 12 – représentation graphique du tableau 11 par des profils radar synthetisant l'état des lieux sur les différents ROM-COM.....	39
Figure 13 – résultats de la chaîne de traitement iota2 appliquée sur des images LANDSAT8 acquises en 2014 sur la Réunion d'après Gaetano et Laventure 2016 [62]	42
Figure 14 – diversité des outils disponibles pour la cartographie des habitats naturels et de l'occupation des sols à partir de télédétection	45
Figure 15 – différentes méthodes de fusion de données d'après Pohl & Van genderen [79]	46
Figure 16 - évolution de la statistique kappa en fonction du nombre et de la nature des images exploitées d'après Inglada et Vincent [61]	46
Figure 17 – carte des formations forestières de Trinidad réalisée à partir d'une mosaïque LANDSAT de 2007 et d'une série de trois mosaïques saisonnières des années 1985-1986-1987, d'après Helmer et collègues [81].....	47
Figure 18 –mosaïques d'images LANDSAT 5 et 7 corrigée des effets de BRDF et non corrigee tirées de cherrington 2016 [42]	48
Figure 19 – discrimination des pinotières et formations à palmiers bâches sur les images SENTINEL2 a l'aide des bandes du proche et moyen infra-rouge, extrait de Perbet et al [83]	49

Figure 20 – adaptation de la carte de Cherrington 2016 [42] et comparaison avec les cartes de Perbet et al [83] et celle de Guitet et al 2015 [13] dans la zone de la Waki avec formations à <i>Parinari</i>	50
Figure 21 – cartographie des formations secondaires et forêts ouvertes à bambous (cambrouses) et lianes adaptée de Cherrington [42] sur le secteur minier de Lucifer Dekou-Dekou et comparaison avec les photo-interprétation du SCAN50 ®.....	51
Figure 22 – proportion des différents types d’occupation du sol cartographiés par cherrington [42] en fonction de l’âge d’ouverture des secteurs miniers.....	52
Figure 23 – couvert par strates de hauteur et correspondance théorique avec les classes FRA pour les classes « végétation colonisatrices » et « ligneux bas » de la carte des formations forestières de Guadeloupe [10].	53
Figure 24 – illustration des écarts constatés entre la carte des formations forestières issus de photo-interprétation [10] et les Statistiques de couvert et hauteur de végétation issues de la Litto3D sur une zone très ennuagée de Guadeloupe (secteur de la Soufrière)	53
Figure 25 – carte des principales formations végétales de Mayotte obtenue à partir d’une classification supervisée par SVM d’images SENTINEL2 d’après Bennacer (annexe 3)	54
Figure 26 – diversité des productions cartographiques actuelles par territoires en fonction des données sources utilisées pour la discrimination des formations végétales et des différentes dimensions intégrées dans la typologie.	55
Figure 27 – proposition de processus d’analyse pour une cartographie optimale des formations végétales sur les ROM-COM	56
Figure 28 – illustration de la richesse thématique qui peut être obtenue à partir d’une classification multi-source issue de données satellitaires (extrait des travaux de G. Viennois et collègues sur le Bas-Ogoue – en cours de publication)	58
Figure 29 – comparaison des bilans nets d’évolution de la couverture forestière en Guyane pour les périodes 1990-2000-2008-2012 selon différentes sources	64
Figure 30 – dynamique d’évolution forestière sur le secteur de Cacao en Guyane rapporté par Hansen et al [109] et comparée aux données OAM et ONF [37].	65
Figure 31 – taux de surfaces non forestieres détectées par hansen en 2012 [109] sur les sites miniers guyanais.....	66
Figure 32 – taux de surfaces ouvertes selon Hansen [109] par type d’occupation des sols selon onf [37] en Guyane	66
Figure 33 – détection des changements à partir d’images radar Terrasar X en zone d’activité minière en Guyane.....	67
Figure 34 – détections des impacts d’exploitation sur la parcelle HK0096 réalisées par C. Bedeau à partir de LiDAR, d’images radar Terrasar X et d’images Spot5.....	68
Figure 35 - schéma des étapes d’élaboration d’une cartographie de biomasse aérienne, tiré de Clark and Kellner [115]	71
Figure 36 – illustration de la capacité du LiDAR à améliorer la précision des allométries h:d par croisement avec les données in situ, tirée de G.Vincent (non publié)	73
Figure 37 – échantillonnage adopté et sources de données utilisées pour la réalisation d’un modèle de prédiction spatiale de la biomasse au Pérou tirées de Mascaro et al [162]	75

Figure 38 - comparaison des estimations de biomasse de la carte globale d'Avitabile et collègues [163] avec les données <i>in situ</i> collectées en Guyane par Guitet et collègues [21] , tiré de Fayad et collègues [22].....	76
Figure 39 – exemple de suivi des changements de biomasse entre 2007 et 2010 à l'aide d'images alos-palsar au Cameroun dans un contexte de faibles biomasses (<150 T/ha), tiré de Le Toan [168]	77
Figure 40 - évolution du stock de biomasse aérienne à l'échelle Amazonienne sur le réseau de placettes RAINFOR tirée de Brien et al [174].....	78
Figure 41 - bilan carbone des forêts exploitées du Domaine Forestier Permanent de Guyane tiré de Cabon et al [176]	79
Figure 42 - résultats des réponses à la question à choix multiple n°5 du questionnaire en ligne : quelles sont les sources d'informations utilisées actuellement pour la réalisation de vos missions ?	83
Figure 43 - résultats des réponses aux questions n°6 (en haut) et 7 (en bas) du questionnaire en ligne : quelle doit être la résolution spatiale et la fréquence de mise à jour pour que les informations cartographiques répondent à vos besoins ?.....	83
Figure 44 - résultats des réponses à la question n°13 du questionnaire en ligne : quelles sources de données privilégier pour le suivi cartographique ?	83
Figure 45 : schéma d'articulation des actions dans le cadre d'un programme complet	97

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 : chronogramme de l'étude	9
Table 2 : contextes spécifiques aux différents territoires à travers quelques chiffres-clefs	12
Table 3 : principaux textes internationaux et nationaux relatifs à la forêt, à la biodiversité et au climat en lien avec l'étude.....	14
Table 4 : organisation des analyses bibliographiques	16
Table 5 : nombres de personnes contactées lors de l'enquête en ligne par territoires et par type de public.....	18
Table 6 : résultat de la revue des cartographies adapté de Poncet <i>et al.</i> 2016	20
Table 7 : cartographies disponibles concernant les stocks de carbone forestier	21
Table 8 : études de suivi de la dynamique d'occupation des sols sur les ROM-COM et millésimes renseignés	28
Table 9- principales campagnes de prises de vue aériennes disponibles sur les ROM-COM pour les 30 dernières années d'après le portail IGN	29
Table 10 : estimation des stocks et flux de carbone relatif au secteur forestier et aux changements d'usage des sols forestiers dans les DOM d'après les BEGES régionaux et CITEPA.....	32
Table 11 : synthèse de l'état des lieux par territoire	38
Table 12 : diversité des données analysées en télédétection et de leur usage pour la caractérisation de la végétation.....	45
Table 13 : diversité des données analysées pour la cartographie des formations végétales sur le bas-Ogooué par G. Viennois et collègues (en cours de publication)	58
Table 14 : estimation du coût des différentes étapes pour la réalisation des cartographies des formations végétales dans les ROM-COM (en euros).....	87
Table 15 : rapport qualité coûts des différentes options cartographiques.....	87
Table 16 : éléments constitutifs de l'option A (complémentarité spatiale entre photo-interprétation et analyse satellitaire).....	87
Table 17 : éléments constitutifs de l'option B (complémentarité méthodologique entre photo-interprétation et analyse satellitaire).....	88
Table 18 : éléments constitutifs de l'option B (complémentarité méthodologique entre photo-interprétation et analyse satellitaire).....	89
Table 19 : coûts des prestations pour la constitution du dispositif de suivi des changements	89
Table 20 : coûts des différentes options pour la constitution du dispositif de suivi des changements.....	90
Table 21 : éléments constitutifs de l'option 3A	91
Table 22 : éléments constitutifs de l'option 3B	92
Table 23 : éléments constitutifs de l'option 3C.....	93
Table 24 : estimations budgétaires et proposition de programmation sur 5 ans	96

1. INTRODUCTION

1.1. PRESENTATION DE L'ETUDE

L'étude CARTHAFORUM (CARTographie régulière des Habitats FOrestiers Ultra-Marins) a été commandée au GIP ECOFOR par le Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (MEEM - Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature / Direction Eau et Biodiversité / Sous-direction de la Protection et de la valorisation des Espèces et de leurs Milieux) par voie de convention N° 2101646739 signée le 28/08/2015.

1.1.1. OBJECTIFS

L'étude vise à évaluer la **faisabilité d'une cartographie régulière des habitats forestiers dans les outre-mer** permettant de répondre à plusieurs besoins :

- (1) besoin de rapportage en lien avec les **accords internationaux** en matière de conservation de la biodiversité et de politique climatique (Convention sur la Diversité Biologique et sur le Changement Climatique, processus liés au cycle du carbone, Stratégie Mondiale de la Conservation des Plantes, Processus d'Aichi,) ;
- (2) besoin de production d'indicateurs, en lien avec l'Observatoire National de la Biodiversité (ONB), permettant le pilotage des **politiques environnementales nationales** définies par la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB) ;
- (3) besoin de données et d'outils de base pour les politiques de **gestion des territoires** et choix stratégiques d'aménagement mis en œuvre par les administrations et élus locaux.

Les productions attendues consistent en :

- (4) un état des connaissances relatives à cette problématique (au niveau local, national et international) ;
- (5) une expertise prospective quant aux technologies et méthodologies en cours de développement sur le sujet ;
- (6) une proposition de méthodes précises pour la réalisation de ces cartographies régulières (cahier des charges, scénarii et chiffrage) sur les territoires des ROM-COM de la zone Atlantique (St Pierre et Miquelon, Guadeloupe, St Barthélemy, St Martin, Martinique, Guyane) et Océan Indien (la Réunion, Mayotte, îles éparses) ;
- (7) une réflexion sur le fonctionnement et la gouvernance d'un tel programme de cartographie.

Le projet aborde aussi bien les aspects techniques que les questions de gouvernance. Il s'agit donc de définir les contours d'un « observatoire » (*sensu lato*) des forêts d'outre-mer permettant de mieux organiser la collecte de données sur ces territoires afin de **faciliter les reportages liés aux engagements internationaux** (Convention Diversité Biologique, différents accords relatifs aux Changements Climatiques et REDD¹...) et **appuyer les politiques de gestion et de conservation de la biodiversité forestière outre-mer**.

Dans la suite du rapport, pour raison de commodité on utilisera le terme « observation » et « observatoire » en lieu et place de «cartographie régulière et suivi ».

¹ REDD : Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation : réduction des émissions (de gaz à effet de serre) par la déforestation et la dégradation des forêts

1.1.2. CONTEXTE DE REALISATION

Cette étude accompagne une série d'initiatives récemment lancées par le MEEM et par le MAAF (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt) concernant les forêts d'outre-mer :

- (1) l'étude *Intégration des Outre-mer dans les Indicateurs de gestion durable des forêts françaises* (IGDOM), lancée en septembre 2013 par le MEEM et réalisée par le GIP ECOFOR (Chef de projet : Viviane Appora), qui vise à produire et à renseigner une liste d'indicateurs permettant de rendre compte de l'état de la gestion des forêts ultra-marines dans une publication quinquennale comparable à celles des IGDF (indicateurs de Gestion Durable des Forêts Françaises métropolitaines) ;
- (2) l'étude *Biodiversité et Indicateurs à l'Outre-Mer* (BIOM) lancée en 2014 par l'Observatoire National de la Biodiversité (ONB) et suivie par le GIP ECOFOR (Chef de projet : Jean-Luc Peyron), visant à collecter et standardiser les informations concernant les stratégies, acteurs et indicateurs relatifs à la gestion de la biodiversité outre-mer ;
- (3) l'étude lancée par le MAAF en février 2016 et menée par IGN-Conseil (Chef de projet : Thierry Saffroy) concernant les *productions de données forestières pérennes sur l'outre-mer*, qui vise à proposer des scénarii de production de données nouvelles permettant de répondre à l'article 151-3a de la loi d'Avenir pour l'Agriculture, l'Alimentation et la Forêt (LAAF), qui impose d'étendre l'inventaire permanent des ressources forestières nationales sur les territoires d'outre-mer ;
- (4) la *revue des typologies et cartographies de végétations et habitats terrestres d'outre-mer*, lancée fin 2015 par le MEEM et menée par le Service du Patrimoine Naturel du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN - Chef de Projet : Rémy Poncet), en charge de la coordination scientifique de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN), visant à recenser et à évaluer les outils typologiques et cartographiques disponibles sur les territoires d'outre-mer ;
- (5) la *cartographie des mangroves* lancée par l'IFRECOR en 2014 et portée par le Pôle-relais mangroves et zones humides d'outre-mer, renommé récemment Pôle-relais zones humides tropicales, dans le cadre d'une thèse (PhD : Florent Taureau), visant à développer une méthodologie de cartographie reproductible et harmonisée des mangroves à l'échelle de l'Outre-mer afin de suivre l'évolution de ces écosystèmes ;
- (6) la *cartographie des zones humides d'outre-mer* lancée en 2015 par un groupe de travail réunissant Conservatoire du Littoral, ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques), la DEB (Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer), les DEAL d'outre-mer (Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement) et le MNHN (Chef de projet : Hélène Udo), visant à fournir une méthode de délimitation des zones humides nécessaire à la mise en application de nombreuses réglementations relatives à la gestion de l'eau.

Ces initiatives constituent autant de volets complémentaires avec lesquels une étroite coordination a été assurée, tout au long de cette étude, sous la forme de réunions d'échanges, de concertations et de synthèses, dans le but d'éviter toute redondance et garantir la meilleure synergie possible entre les projets.

1.3. ORGANISATION DE L'ETUDE

1.3.1. PLANNING DE REALISATION

L'étude a été organisée autour de 4 volets qui ont été autant d'étapes dans l'avancement du projet :

(1) ETAT DE L'ART : synthèse bibliographique concernant les technologies et méthodologies basées sur la télédétection (*sensu lato*) permettant de répondre aux besoins de cartographie et de suivi des forêts notamment dans le contexte tropical ;

(2) ETAT DES LIEUX : recensement des initiatives de recherche, de développement et dispositifs déjà mis en œuvre sur les territoires outre-mer pour répondre aux besoins de cartographie et de suivi des forêts ;

(3) PROSPECTIVES ET ANALYSE : analyse critique des différentes expériences recensées en termes techniques, financiers et organisationnels et tests de nouvelles méthodes s'appuyant sur les produits et technologies récemment apparus sur le marché ;

(4) SYNTHESE, PROPOSITIONS ET CHIFFRAGES : élaboration d'un programme d'actions et d'un cahier des charges pour la réalisation effective de la cartographie et du suivi régulier des forêts ultra-marines, intégrant des propositions méthodologiques et de gouvernance.

Ces quatre étapes se sont déroulées selon l'échéancier suivant (tableau 1) :

TABLE 1 : CHRONOGRAMME DE L'ETUDE

Etapes	4^e trim	1^{er} trim	2^e trim	3^e trim	4^e trim	1^{er} trim	2^e trim
1-Etat de l'art	x	x	x	x	x		
2-Etat des lieux		x	x	x	x		
3-Prospective		x	x	x	x	x	
4a- Synthèse			x	x	x	x	
4b-Propositions				x	x	x	x
4c - Chiffrages						x	x
Consultations		CopilR		CopilR	CopilE	terrain	CopilE

Le projet s'est accompagné de plusieurs phases de consultations formalisées :

- Réunion d'un Comité de Pilotage Restreint (COPIL-R) les 12/02/2016 et 19/07/2016 ;
- Consultation du Comité de Pilotage Etendu (COPIL-E) du projet les 09/11/2017, 08/12/2017 et 20/01/2017 lors de réunions organisées à Paris ;
- Consultation des acteurs des territoires au cours d'une enquête en ligne ouverte entre le 15/01/2017 et le 31/01/2017.

La convention d'étude (N°2101646739) a été signée par le MEEM (Direction Eau et Biodiversité – Bureau Connaissance et Stratégie Nationale pour la Biodiversité) le 28/08/2015 pour un rendu initialement prévu le 31/12/2016. Cette convention a été prolongée jusqu'au 30/04/2017 par avenant signé le 17/11/2016.

1.3.2. EQUIPE PROJET, COMITE DE PILOTAGE ET INTERACTIONS

L'équipe-projet constituée pour mener à bien cette étude comprend :

- Bernard Riéra (CNRS - GIP ECOFOR), chef de projet ;
- Stéphane Guitet (ONF - GIP ECOFOR), expert en écologie et gestion des forêts tropicales ;
- Anaïs Jallais (GIP ECOFOR) documentaliste ;
- Jean-Paul Rudant (Université de Marne la Vallée), Aimé Kemavo (ONFI) et Samira Mobaied (MNHN) experts en télédétection ;
- Hakim Bennacer (étudiant Master 2 de l'Université de Marne-la-Vallée).

L'étude a aussi bénéficié de la collaboration de partenaires extérieurs au GIP ECOFOR, impliqués dans le développement et le test de méthodes d'observation des forêts :

- Caroline Bedeau (ingénieure R&D à l'Office National des Forêts ONF Direction Régionale de Guyane) ;
- Pauline Perbet (ingénieure géomatique au Parc Amazonien de Guyane – PAG) ;
- Gaëlle Viennois (ingénieure d'étude au CNRS - UMR Amap à Montpellier).

Le COPIL restreint (COPIL-R) est constitué d'Arnault Lalanne, représentant le MEEM, Jean-Luc Peyron, représentant le GIP-ECOFOR ainsi que l'ensemble de l'équipe-projet.

Le COPIL étendu (COPIL-E) réunit le COPIL-R et les représentants suivants :

- Pauline Camus et Bruno Iratchet, pour l'ONF ;
- Claire Morlot, pour le MAAF ;
- Sandra Hakkoun, pour le MOM ;
- Julie Marsaud, pour FNE ;
- Thierry Saffroy et Loïc Commagnac pour l'IGN, accompagnés d'Edith Mérillon et Stéphanie Wurpillot lors du COPIL de restitution ;
- ainsi que Pascale Vizy de la DGEC/SCEE/DLCES/EPM et Elisabeth Pagnac-Farbiaz de la DGEC/SCEE/DLCES/PCA du MEEM lors du COPIL de restitution.

L'étude s'est aussi appuyée sur un réseau de personnes ressources, basées en outre-mer ou en métropole, dont les avis et renseignements ont été régulièrement ou ponctuellement sollicités. La liste exhaustive des personnes ressources consultées informellement ou lors de la web-enquête est fournie en [annexe 1](#).

Le rapport de synthèse a été rédigé par Stéphane Guitet et validé par Bernard Riéra.

1.4. PERIMETRES DE L'ETUDE

1.4.1. PERIMETRE GEOGRAPHIQUE

La commande vise initialement l'ensemble des Régions d'Outre-Mer (ROM), les Collectivités d'outre-mer (COM) de la zone Atlantique (St Pierre et Miquelon, St Barthélémy, St Martin) ainsi que les îles éparses de l'Océan Indien faisant partie des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), à l'exclusion des autres Collectivités et Territoires d'Outre-Mer situés dans le bassin Pacifique ou Antarctique (Figure 1). Compte-tenu de leur très faible couverture forestière et superficie, les îles éparses n'ont finalement pas été traitées dans cette étude afin de ne pas alourdir les travaux. Par souci de commodité, cette sélection de territoire sera désignée par l'abréviation ROM-COM dans la suite du document, bien que tous les COM ne soient pas concernés.

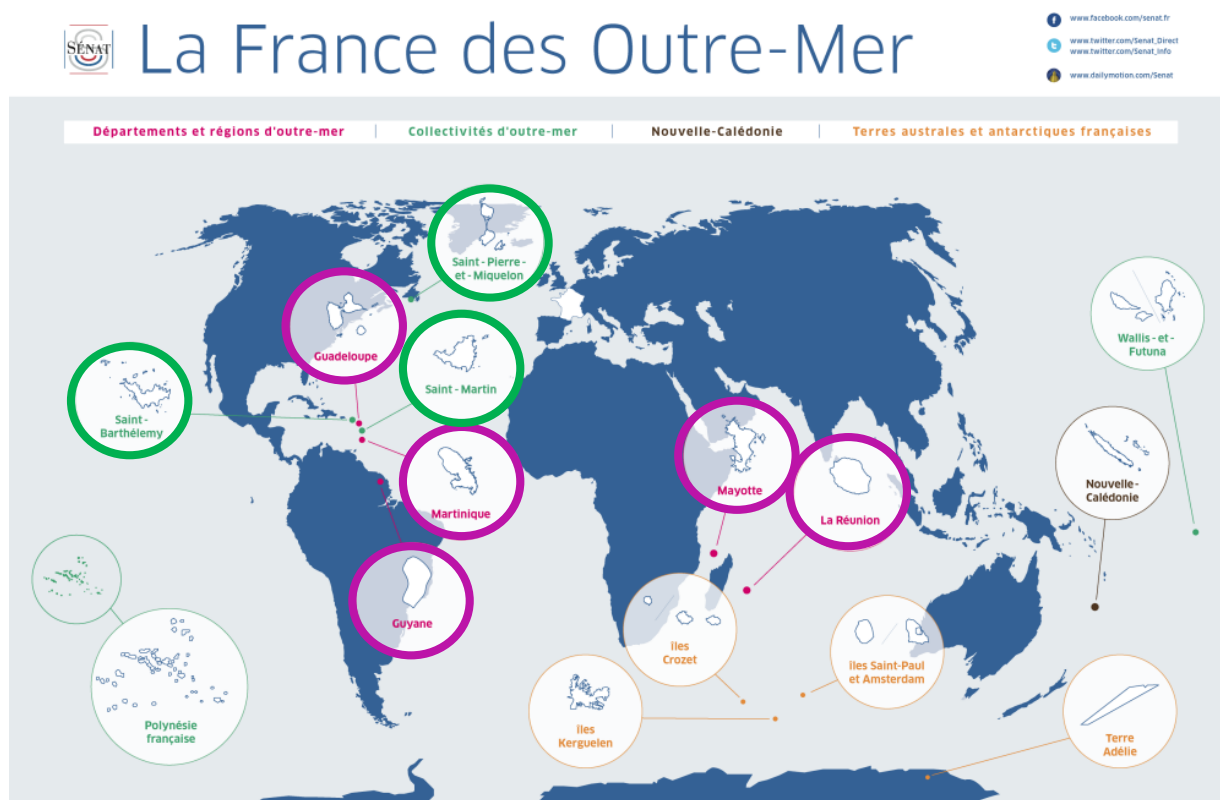


FIGURE 1 - CARTE DE LOCALISATION DES TERRITOIRES CONCERNES PAR CARTHAFORUM
Les territoires concernés sont cerclés de violet (pour les DROM) et de vert (pour les COM)

Ce périmètre géographique couvre une grande diversité de contextes géographiques, climatiques, géologiques, anthropiques, qui ne seront pas détaillés ici [1], mais résumés en quelques chiffres (voir Table 2). On distinguera ainsi au sein de ces ROM-COM quatre profils particuliers :

- **le contexte guyanais** : vaste territoire continental (82 500 km²) au climat équatorial présentant une saison humide très longue associée à une forte nébulosité, très peu peuplé (<3 hab/km²), avec un fort taux de boisement (>98%) et présentant des milieux naturels dans un très bon état de conservation ;
- **les petites îles tropicales** (Mayotte, St Martin et St Barthélémy) : petits territoires insulaires (25 à 374 km²) sous un climat tropical présentant une alternance de saisons sèches et humides de durée à peu près égale, avec une densité de population très forte

(380 – 672 hab/km²), un taux de boisement variable (18 à 57 %) et présentant des milieux naturels réduits ou dégradés par une pression anthropique forte ;

- **les grandes îles tropicales** (Guadeloupe, Martinique, Réunion) : territoires insulaires de taille moyenne (1 128 à 2 512 km²) sous un climat tropical présentant une alternance de saisons sèches et humides de durée à peu près égale, avec une densité de population moyenne (248 – 334 hab/km²) avec un taux de boisement assez fort (47 à 56%) et des milieux naturels relativement préservés ;
- **le cas de St Pierre-et-Miquelon** : seul territoire sous un climat boréal océanique de petite taille (242 km²) à faible densité de population (26 hab/km²) et faible taux de boisement (12%) actuellement confronté à un fort déséquilibre forêt-gibier sous la pression d'espèces herbivores envahissantes, le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*) et le lièvre d'Amérique (*Lepus americanus*).

Cette variété de territoires et diversité de contextes forestiers représente une richesse considérable pour l'Etat français notamment en termes de :

- **Surface forestière** : les 8,1 millions d'hectares de la forêt guyanaise représentent l'équivalent de la moitié de la superficie forestière métropolitaine et amènent la France au deuxième rang des pays de l'Union Européenne en termes de surface forestière avec 24,6 M ha, devant la Finlande et après la Suède [2] ;
- **Carbone forestier** : la biomasse forestière guyanaise constitue le plus important stock de carbone forestier aérien de l'Union européenne avec 1,6 GtC ce qui représente avec les 1,4 GtC de la France métropolitaine près d' 1/3 du stock de l'Union Européenne [3] ;
- **Diversité spécifique** : les forêts des ROM-COM représentent le principal réservoir de diversité avec environ 3 fois plus d'espèces terrestres qu'en métropole pour une surface 7 fois inférieure [4] hissant la France au 4e rang mondial pour la richesse de son patrimoine naturel (<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/index.html>) ;
- **Conservation biologique** : Ce réservoir comprend 85% de la flore endémique française - 98% en comptabilisant la totalité des ROM-COM [4] - dont une forte proportion concentrée sur les îles tropicales des Mascareignes et des Caraïbes qui font parties intégrantes de deux des 34 « hot-spots » de biodiversité [5].

TABLE 2 : CONTEXTES SPECIFIQUES AUX DIFFERENTS TERRITOIRES A TRAVERS QUELQUES CHIFFRES-CLEFS

Territoires	971	972	973	974	975	976	977	978
<i>Surface de terres émergées En 1000 ha d'après [3]</i>	168	106	8 242	250	23	38	2	5
<i>Densité de population (hab/km²) d'après INSEE 2013</i>	248	344	3	334	26	566	380	672
<i>Taux boisement (en % de surface) d'après [3]</i>	49,5	46,8	98,6	55,6	12,2	18,3	23,8	57,3
<i>Nb d'espèces terrestres d'après [4]</i>	6 513	6 584	143 000	2 399	1 001	1 328	633	578
<i>Endémisme des phanérogames (%) d'après [4]</i>	2%	3%	3%	37%	nd	6%	nd	<1%
<i>Stock de biomasse forestière d'après [3] (en Mt/ha)</i>	22	14	2 846	11	0	nd	0	0

1.4.2. PERIMETRE THEMATIQUE

Les forêts des ROM-COM concentrent de fait d'importants enjeux en termes de **conservation de la diversité biologique** et de **lutte contre les changements climatiques**, deux enjeux globaux qui ont fait l'objet de plusieurs engagements internationaux, que la France a décliné en plans stratégiques nationaux et régionaux et qui entrent explicitement dans les motivations exprimées par le MEEM lors du lancement de cette étude (Table 3 ci-après).

- (1) **Développer, partager et valoriser les connaissances** concernant la biodiversité forestière en outre-mer (objectif F de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité - SNB) ;
- (2) Assurer la cohérence des politiques et l'efficacité de l'action en faveur de la biodiversité, (objectif E de la SNB), *via* **une information géographique facilitant la gestion** des espaces forestiers et leur intégration dans l'aménagement du territoire ;
- (3) Assurer un usage durable et équitable de la biodiversité (objectif D de la SNB), en contribuant à une **meilleure connaissance des impacts** des usages sur la diversité des habitats forestiers.
- (4) Améliorer le **suivi des surfaces forestières** pour le rapportage du secteur UTCF de l'inventaire national des émissions des gaz à effet de serre imposé par la CCNUCC, centralisé au niveau national par le Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) et réalisé annuellement ;
- (5) Participer à la mise en place d'un **système de suivi permanent** satisfaisant les principes de Mesures/Rapportage/Vérification (MRV) du REDD+ en produisant des données plus précises et contextualisées en matière d'évaluation des stocks et flux de carbone forestier dans les ROM-COM ;
- (6) Produire des connaissances et diminuer les incertitudes liées aux changements climatiques en participant à **l'observation et au suivi des forêts d'outre-mer** conformément au Programme National de la Forêt et du Bois (PNFB).

Les trois premières orientations doivent aussi permettre de répondre au besoin de renforcement de la **préservation de la biodiversité** par une planification participative, une gestion des connaissances et un renforcement des capacités des acteurs locaux (Objectifs E d'Aïchi). Les trois dernières orientations doivent aussi permettre de répondre à la nécessité **d'amélioration des rapports Carbone**, nécessité récemment exprimée par les experts du CCNUCC lors de l'audit du rapport national (19-24/09/2016) qui ont expressément demandé à la France de s'engager sur un plan de travail pour une mise à niveau du système de rapportage en outre-mer. Ces deux enjeux sont repris explicitement dans les **chapitres II1c et II1e du récent PNFB** [6].

L'étude de faisabilité pour la cartographie régulière des habitats forestiers d'outre-mer procède donc directement des besoins de pilotage de ces stratégies et de la nécessité de rapportage auprès des instances internationales sur les thématiques *Diversité* et *Carbone*. Elle doit répondre par ailleurs au manque évident de production régulière de statistiques dans les forêts d'outre-mer, problème soulevé par la nouvelle **Loi d'Avenir pour l'Agriculture, l'Alimentation et la Forêt** (LAAF) d'octobre 2014 qui impose dans son article 151-3a la prise en compte des bois et forêts d'outre-mer dans l'inventaire permanent des ressources forestières nationales [7]. Cette absence de système de suivi se révèle particulièrement pénalisant notamment pour le rapportage quinquennal **FRA (Forest Resources Assessment) de la FAO** qui met en évidence le manque de robustesse et d'homogénéité des indicateurs fournis par l'outre-mer français (étude IGDOM en cours de publication).

TABLE 3 : PRINCIPAUX TEXTES INTERNATIONAUX ET NATIONAUX RELATIFS A LA FORET, A LA BIODIVERSITE ET AU CLIMAT EN LIEN AVEC L'ETUDE

Textes	Principes - Objectifs
<i>CDB, Rio 1992</i>	• Conservation de la biodiversité • Utilisation durable des espèces et des milieux naturels • Partage juste et équitable des bénéfices issus de l'utilisation des ressources génétiques
<i>Objectifs d'Aichi, Nagoya 2010</i>	A- Gérer les causes sous-jacentes de l'appauvrissement de la diversité en intégrant la diversité biologique dans l'ensemble du gouvernement et de la société B- Réduire les pressions directes exercées sur la diversité biologique et encourager son utilisation durable C- Améliorer l'état de la diversité biologique en sauvegardant les écosystèmes, les espèces et la diversité génétique D- Renforcer les avantages retirés pour tous de la diversité biologique et des services fournis par les écosystèmes E- Renforcer la mise en œuvre au moyen d'une planification participative, de la gestion des connaissances et du renforcement des capacités
<i>SUEB</i>	• Faire reculer d'ici à 2020 le taux très élevé d'extinction des espèces • Rétablir autant que possible les écosystèmes naturels dans l'Union européenne (UE) • Contribuer davantage à la lutte contre la perte de biodiversité au niveau mondial
<i>SNB 2012</i>	A- Susciter l'envie d'agir pour la biodiversité B- Préserver le vivant et sa capacité à évoluer C- Investir dans un bien commun, le capital écologique D- Assurer un usage durable et équitable de la biodiversité E- Assurer la cohérence des politiques et l'efficacité de l'action F- Développer, partager et valoriser les connaissances
<i>CCNUCC, Rio 1992</i>	Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC)
<i>Protocole de Kyoto, 1997</i>	Application de la CCNUCC - Premiers objectifs contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la période 2008 -2012 (ratifié en 2002 par la France) intégrant le secteur UTCF (Utilisation des Terres, leurs Changements et la forêt) et des mécanismes d'échanges de quota et mécanismes de développement propre (MDP)
<i>REDD, Bali 2007</i>	Mise en place de compensations financières pour les pays en développement poursuivant un objectif de Réduction des Emissions dues à la Déforestation et Dégradation des forêts.
<i>REDD+, Cancun 2010</i>	Objectif de réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts intégrant les activités de gestion forestière, des actions de conservation et augmentation des stocks de carbone forestier, ainsi que le renforcement du transfert technologique vers les pays en développement, et précisant les principes de Mesure, Rapportage et Vérification (MRV).
<i>Programme National de la Forêt et du Bois 2017</i>	1c) DIMINUER LES INCERTITUDES LIÉES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (i) en développant l'observation et les suivis notamment par la mise en place des systèmes de suivi, de veille et d'alerte associés à différentes échelles spatiales et temporelles 1e) CONNAÎTRE, PRÉSERVER ET VALORISER LA BIODIVERSITÉ en (i) améliorant les connaissances notamment par la mise en place de protocoles harmonisés transversaux aux DOM ; (ii) en préservant la biodiversité notamment dans les DOM par le maintien d'un haut niveau de surveillance en utilisant l'analyse d'imagerie ; (iii) en améliorant le suivi du réseau des aires protégées forestières par une intensification du suivi de l'évolution de la biodiversité forestière au sein des réseau des aires forestières protégées, particulièrement le Réseau Ecologique d'Outre-Mer (REDOM)

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. ETAT DES LIEUX PAR PROSPECTION MULTI-SOURCES

L'état des lieux a été réalisé par Stéphane Guitet et intègre trois niveaux d'informations qui ont été prospectés parallèlement :

- les **initiatives nationales** susceptibles d'interagir avec le projet, **en lien avec les problématiques d'observation** des territoires et de la végétation en général, que ce soit dans le domaine de la gestion, de la recherche ou de la gouvernance. Ces initiatives ont été recensées *via* le web et mises à jour *via* les informations fournies par le comité de pilotage étendu ;
- les **initiatives nationales spécifiquement centrées sur les ROM-COM** et en lien avec les objectifs du projet, notamment celles listées en introduction. La coordination avec ces études, l'analyse de leurs interactions avec le projet et la synthèse de leurs résultats ont été réalisées au cours de plusieurs réunions de travail, rencontres et échanges avec les pilotes de ces études ;
- les **réalisations locales** (projets de recherche, développement techniques, études et cartographies) **ou en cours de développement** sur les ROM-COM. Cet inventaire a été réalisé à partir de recherche web, des contacts établis avec les personnes ressources des territoires et lors d'une mission effectuée en Guyane du 13 au 18 avril 2016.

La méthode adoptée pour cet inventaire s'est appuyée sur le principe de **saturation** des informations, c'est-à-dire la recherche d'informations jusqu'à ce qu'aucun élément nouveau d'importance ne soit trouvé, sur le principe de **recoupement** des informations, par confrontation des éléments recueillis sur le web avec les informations fournies par les personnes ressources, et sur le principe de **mise à jour** régulière des informations, par une relance des recherches à mi-parcours du projet, la réalisation d'une enquête en ligne en fin de projet (voir plus loin), et la participation à des colloques et séminaires en lien avec les objectifs du projet :

- Symposium 2016 « Living Planet » de l'European Spatial Agency (ESA) à Prague du 9 au 13 Mai (Bernard Riera et Jean-Paul Rudant) ;
- Séminaire 2016 « Géoinformation pour les surfaces continentales au service de la recherche et des politiques publiques » de Théia à Montpellier du 3 au 4 Octobre 2016 (Stéphane Guitet) ;
- Journée Floris'Tic « La botanique à l'ère du numérique » le 8 Novembre 2016 (Stéphane Guitet) ;
- Les 26^e journées de la recherche à l'IGN, les 23-24 mars 2017 (Bernard Riera et Stéphane Guitet).

La liste des initiatives inventoriées est fournie en [annexe 2](#). Le compte-rendu de la mission Guyane est fourni dans le rapport de mi-parcours [8].

2.2. ETAT DE L'ART PAR ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'état de l'art a mobilisé l'ensemble du groupe de travail et s'est appuyé sur une analyse bibliographique large effectuée de deux façons. D'une part, à l'aide de requêtes par mots-clés dans des revues indexées dans la base de données Web of science (Thomson Reuters), d'autre part, pour le cas des revues non indexées, en effectuant une recherche articles par articles directement dans les revues identifiées comme pertinentes. Dans le premier cas, 3 ensembles de requêtes croisées ont été effectuées (l'une avec l'association de mots clefs « remote sensing and forest », l'autre avec « mapping and forest » la dernière avec « monitoring and forest ») avec une limite temporelle (2011-2015) et thématique (environmental sciences ecology, forestry, biodiversity conservation, remote sensing, imaging science photographic technology, plant sciences, geography, geochemistry geophysics).

Ces récoltes ont permis la création de trois listes bibliographiques :

- une liste des travaux réalisés par au moins une équipe française (il s'agit ici d'une liste exhaustive de l'ensemble des références dont les travaux ont été portés par au moins une équipe française) ;
- une liste des travaux les plus cités et réalisés à l'international (il s'agit ici de la liste des références des travaux ayant au moins 20 citations) ;
- la liste de la littérature scientifique non indexée.

Ces trois listes ont par la suite été transmises au groupe d'expert afin d'effectuer une première sélection *via* le titre et le résumé de l'article. Cette première sélection a permis la création d'une unique liste de 162 références. Ces références bibliographiques ont été par la suite réparties vers les experts selon la nature des articles en vue de l'analyse (Table 4 : organisation des analyses bibliographiques fournies dans le rapport intermédiaire de juin 2016) :

- articles thématiques en lien avec les objectifs : suivi et changement, biomasse, cartographie et modélisation, typologie ;
- articles de « reviews » et d'opinions en lien avec les objectifs : enjeux, méta-analyses ;
- articles méthodologiques en lien avec les problématiques de : traitement des signaux, sources des données images, résolution.

Une liste supplémentaire de 37 articles relatifs aux méthodes de photo-interprétation et de photogrammétrie a aussi été constituée afin de compléter le champ de prospection de l'étude par les méthodes habituellement employées par l'IGN, peu représentées dans les bases de données consultées. Une actualisation de ces références pour l'année 2016 a aussi été réalisée en cours d'étude, début 2017. Chaque thème identifié a été traité par un expert et a fait l'objet de fiches de lecture, d'une analyse et de rapports bibliographiques fournis dans le rapport de mi-parcours [8].

TABLE 4 : ORGANISATION DES ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUES

Thèmes	Expert	Nombre d'articles analysés	Rapport
<i>Changement et suivi</i>	Guitet S	104	80 pages
<i>Typologie</i>			
<i>Biomasse</i>			
<i>Reviews</i>			
<i>Modèle cartographique</i>	Mobaied S	58	49 pages
<i>Photo-interprétation</i>			
<i>Traitement du signal</i>	Rudant JP	37	8 pages
<i>Image</i>			
<i>Résolution</i>			

2.3. ESSAIS PROSPECTIFS PAR TELEDETECTION SPATIALE

Plusieurs essais méthodologiques ont été engagés en matière de cartographie des habitats naturels terrestres et de suivi des changements forestiers à partir de télédétection. Ces essais visent à tester des types de données peu abordés par la bibliographie car fournies par des capteurs commerciaux et/ou récemment mis en fonction :

- (1) images radar en bande X de TerraSAR produites par le consortium FOREST et fournies gracieusement par Felicitas Poncet d'AIRBUS-Astrium dans le cadre du programme Climate-KIC (<http://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2015/11/FOREST-Leaflet-Version-Nov2015.pdf>) ;
- (2) images radar en bande C SENTINEL1 et images optiques multi-spectrales haute résolution SENTINEL2 disponibles gratuitement via le programme Européen Copernicus (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4) ;
- (3) images optiques multi-spectrales très haute résolution SPOT6/7 disponibles via le programme SEAS-Guyane phase2 et fournies gratuitement par la Collectivité Territoriale (http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/policy/themes/outermost-regions/pdf/project_guyane_seas_fr.pdf).

Ces essais se sont principalement concentrés sur deux zones d'études, la Guyane et Mayotte, dans le cadre :

- (1) d'un **stage de Master 2** effectué par Abdelhakim Bennacer au sein du GIP-ECOFOR co-encadré par Bernard Riera (GIP-ECOFOR), Anoumou Kemavo (ONFI) et Jean-Paul Rudant (Université de Marne-la-vallée) ;
- (2) de **travaux pilotes opérationnels** menés par Caroline Bedeau (ONF-Guyane) et Pauline Perbet (Parc Amazonien de Guyane) suivis par Stéphane Guitet (GIP-ECOFOR) ;
- (3) de **travaux de recherche et de développement** menés au sein de l'UMR Amap par Gaëlle Viennois (CNRS) et Emil Cherrington (IRD) suivis par Stéphane Guitet (GIP-ECOFOR).

Les essais réalisés couvrent les domaines suivants :

- (1) **Détection des déforestations** liées à l'orpaillage et **dégradations** liées à l'exploitation forestière en Guyane – à partir de données radar, optiques et LiDAR (travaux de Caroline Bedeau) ;
- (2) **Détection de formations végétales particulières** en Guyane à partir d'images optiques (Travaux de Pauline Perbet) ;
- (3) **Cartographie des formations végétales** à Mayotte à partir de données radar et optiques (travaux d'Abdelhakim Bennacer et d'Anoumou Kemavo), en Guyane à partir d'images LANDSAT et de séries temporelles MODIS (travaux d'Emil Cherrington) et en Afrique Centrale à partir de données multi-sources (travaux de Gaëlle Viennois).

Le rapport de stage de M. Bennacer est fourni en [annexe 3](#). Les résultats obtenus dans le cadre de ces essais sont présentés dans la partie résultats du présent rapport.

2.4. ENQUETE AUPRES DES ACTEURS DU TERRITOIRE

Un questionnaire à l'attention des acteurs des territoires a été conçu et diffusé par Stéphane Guitet en janvier 2017 à partir de la plateforme *Google Forms* (voir [annexe 4](#)). Les objectifs de cette enquête étaient d'actualiser l'état des lieux réalisé en début de projet, de recueillir les attentes des territoires en termes de productions cartographiques régulières utiles à leurs missions et de rassembler les points de vue quant aux outils à privilégier pour cette production.

Le formulaire était constitué de 13 questions simples ou multiples, pouvant être renseignées en quelques minutes et complétées par des remarques en rubriques libres. L'enquête a été ouverte du 15 janvier 2017 au 1^{er} février 2017 et diffusée à une liste de 138 contacts visant à couvrir l'ensemble des territoires et les différents publics concernés par l'étude. Ces listes ont été préalablement visées par une personne ressource de chaque territoire afin de s'assurer de la mise à jour effectives des informations concernant les personnes et fonctions au sein des différents organismes sondés (Table 5). La liste des contacts est incluse dans l'Annexe 1 : Liste des personnes ressources. La principale difficulté rencontrée lors de l'établissement de cette liste de contacts a été liée à l'absence d'organigramme précis dans certains territoires suite aux récentes réorganisations des Collectivités Territoriales (constitution des Collectivités Uniques en Martinique, en Guyane et à Mayotte).

TABLE 5 : NOMBRES DE PERSONNES CONTACTEES LORS DE L'ENQUETE EN LIGNE PAR TERRITOIRES ET PAR TYPE DE PUBLIC

<i>Territoires / Public</i>	971	972	973	974	975	976	Autres*	Total
<i>Administrations (DAF, DEAL)</i>	6	9	6	8	1	6	1	37
<i>Collectivités territoriales</i>	4	2	4	3	1	1		15
<i>Etablissements Publics (ONF, Parcs, Conservatoires ...)</i>	10	10	12	10		4	1	47
<i>Expertise – Recherche (Laboratoires, Universitaires ...)</i>	5	5	6	5				21
<i>ONG (locales et nationales)</i>	3	3	3	2		4	3	18
<i>Total général</i>	28	29	31	28	2	15	5	138

La représentativité de l'enquête en termes de territoires, de catégories professionnelles et de catégories d'acteurs est assez bien assurée grâce à un pré-ciblage des contacts et à un taux de participation satisfaisant (44%). Les avis collectés rendent compte essentiellement du point de vue des producteurs de données et des utilisateurs directs des données (qui souvent se confondent) et dans une moindre mesure des utilisateurs indirects des données. La complémentarité avec les avis du COPIL-E est donc assurée.

La synthèse des résultats obtenus est fournie en [annexe 5](#). Ces résultats ont été diffusés aux participants le 16 mars 2017, et sont repris dans la partie synthèse du présent rapport.

3. RESULTATS ET SYNTHÈSE

3.1. ETAT DES LIEUX

Résumé :

- Des couvertures cartographiques hétérogènes et incomplètes ([chap 3.1.1](#)) :

- ☐ cartes récentes à très haute résolution des formations végétales en Guadeloupe, Martinique et à Mayotte ; cartes récentes à moyenne résolution des formations végétales et des habitats en Guyane ; cartes récentes mais incomplètes des végétations à la Réunion ; pas de carte disponible sur les petits territoires (projet en cours à Saint-Pierre et Miquelon).
- ☐ cartes de biomasse forestière en Guyane et sur la Basse-Terre de Guadeloupe ; cartes du carbone organique des sols en Martinique et en Guyane.

- Des données forestières de terrain trop rares en dehors de la Guyane ([chap 3.1.2](#)) :

- ☐ placettes permanentes forestières : 235 ha en Guyane, 10 ha en Guadeloupe, 3 ha à la Réunion ;
- ☐ campagnes d'acquisition de données récentes (<10 ans) : plus de 700 ha de placettes forestières cumulés en Guyane, 2491 relevés phyto-sociologiques de 200-400 m², dont environ 180 en forêt à la Réunion.

- Des méthodes de surveillance du territoire forestier assistées par satellites bien développées en Guyane mais non déployées ailleurs ([chap 3.1.3](#)) :

- ☐ des suivis annuels en Guyane avec l'Observatoire de l'Activité Minière et le suivi AGRIPAG ;
- ☐ des suivis périodiques de l'occupation du sol en Guyane ;
- ☐ des études ponctuelles de la dynamique d'occupation du sol aux Antilles et à la Réunion.

- Des facilités d'accès aux images pour tous les territoires excepté St Pierre et Miquelon ([chap 3.1.4](#)) :

- ☐ Des couvertures aériennes et des orthophotos produites régulièrement par l'IGN (plus difficilement en Guyane)
- SEAS-Guyane pour la Guyane et les Antilles, SEAS-OI dans l'Océan Indien ;
- ☐ Théia-GéoSud en support national et Copernicus en nouvelle opportunité ;

- Des observatoires thématiques variés et en plein développement ([chap 3.1.5](#)) :

- ☐ Observatoires carbone (O-GEC) et diversité (O-BAG) de la Collectivité Territoriale en Guyane, observatoire des espèces invasives (GEIR) à la Réunion, réseau de suivi des sols (RMQS) en déploiement aux Antilles et en Guyane, réseau mangroves et zones humides sur les ROM-COM (Pôle relai zones humides tropicales) ;
- ☐ Herbiers de Cayenne et de la Réunion, Conservatoire Botanique National de Mascarin et Conservatoires en cours de montage aux Antilles.

- Des portails et plateformes d'échanges de données nombreux et opérationnels ([chap 3.1.6](#)) :

- ☐ des géo-portails SINP à large spectre géo-Guyane, géo-Martinique, géo-Mayotte ;
- ☐ des géo-portails SINP spécialisés Karunati et Mascarine-Cadetiana ;
- ☐ des géo-portails autonomes et spécialisés en Guyane : Guyane-SIG, faune-Guyane, portail CEBA.

3.1.1. CARTOGRAPHIES DISPONIBLES

3.1.1.A. CARTOGRAPHIE DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE

Un état des lieux complet et récents des cartographies de végétations et habitats terrestres d'Outre-mer, intégrant la partie forestière, a été effectué en 2016 par le Service du Patrimoine Naturel (SPN) du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN). Le SPN définit plusieurs niveaux typologiques plus ou moins emboîtés :

- les végétations (communautés végétales, associations phyto-sociologiques) ;
- les habitats (compartiment écologique défini par des conditions abiotiques et des espèces associées) ;
- les formations végétales (grands types physionomiques de végétation) ;
- l'occupation du sol (classification basée sur l'affectation des surfaces) ;
- les unités paysagères (ensemble cohérent de végétation et d'usage définissant un paysage).

Les conclusions de ce rapport font état d'une « **forte hétérogénéité des niveaux de connaissance** et de l'**accessibilité de l'information entre les territoires** » [1]. Les territoires d'outre-mer possèdent des **référentiels typologiques d'habitats complets** mais les référentiels de végétation sont, pour la plupart des territoires, relativement anciens (Guadeloupe et Martinique) ou inexistant. **Seule la Réunion sera dotée d'un référentiel de végétation** mis à jour à l'horizon de 2021 (étude en cours). La majorité des territoires, possèdent des **cartes de formations végétales** doublées soit au niveau Végétation, soit au niveau Habitat (Table 6). St Pierre et Miquelon est en train de s'en doter. Mais ces productions cartographiques ne satisfont que partiellement les usagers du fait notamment d'un niveau typologique jugé insuffisamment précis.

Le SPN préconise le « **déploiement de campagnes de cartographies modernes mêlant techniques de télédétection, de photo-interprétation, de classification semi-automatique et inventaires de terrain (...)** afin de doter les territoires de documents mis à jour et fonctionnels ». Il propose la mise à disposition de ces produits sous forme numérique *via* des plateformes de consultation web, telles que l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN) ainsi qu'une revue permanente de ces outils à travers un catalogue de référentiels pour l'Outre-mer. Un travail de compilation et d'harmonisation des typologies auxquelles ces cartes font référence est actuellement en cours de réalisation par le SPN. Ces travaux sont consultables en ligne sur le site de l'INPN (<https://inpn.mnhn.fr/telechargement/referentiels/habitats>).

TABLE 6 : RESULTAT DE LA REVUE DES CARTOGRAPHIES, ADAPTE DE PONCET ET AL. 2016 - COMPLETE POUR LA REUNION

Territoire	Carte de végétation	Carte d'habitats	Carte des formations végétales
<i>Guadeloupe</i>	Rousteau 1996 [9]	Ø	CG971-IGN 2014 [10]
<i>Martinique</i>	Portecop 1979 [11]	Ø	CR972-IFN 2008 [12]
<i>Guyane</i>	Ø	Guitet et al 2015 [13]	Gond et al 2011 [14]
<i>Réunion</i>	Lacoste et al 2011 et 2014 [15,16]	Strasberg et al 2005 [17]	Ø
<i>Mayotte</i>	Ø	Ø	Lainé et al 2010 [18]
<i>St Pierre et Miquelon</i>	Ø	ONFI en cours	
<i>Autres</i>	Ø	Ø	Ø

3.1.1.B. CARTOGRAPHIE DES STOCKS DE CARBONE

Des cartes de **stock de carbone** couvrant le compartiment sol (dont les sols forestiers) et la biomasse aérienne (essentiellement forestière) sont aussi disponibles sur plusieurs territoires (tableau 7) : Guyane, Martinique et Guadeloupe (partie Basse Terre). Ces cartes ont pour la plupart été élaborées en s'appuyant sur des covariables prédictives permettant l'extrapolation de mesures ponctuelles. Elles relèvent donc de la modélisation spatiale apte à rendre compte des principaux patrons de variation (large échelle), mais elles sont peut précises lorsqu'il s'agit de fournir une estimation à une échelle locale ($<1\text{km}^2$). La carte de biomasse de la Guadeloupe et la dernière version de la carte de biomasse de la Guyane intègrent dans leur modèle des données relatives à la hauteur de canopée tirées de données LiDAR² permettant de rendre compte plus précisément des variations spatiales de la structure forestière et en conséquence d'atteindre une meilleure précision à l'échelle locale. Les informations géographiques disponibles pour les ROM-COM concernant les stocks de carbone forestiers restent donc très incomplètes tant spatialement que thématiquement excepté en Guyane (Figures 2).

TABLE 7 : CARTOGRAPHIES DISPONIBLES CONCERNANT LES STOCKS DE CARBONE FORESTIER

Territoire	Carte de biomasse	Carte de stock carbone organique des sols (SOC)	Précisions
<i>Guadeloupe</i>	Rousteau en cours de publication	Ø	$\pm 120 \text{ t.ha}^{-1}$ à résolution 1 ha uniquement sur Basse Terre
<i>Martinique</i>	Ø	Blanchart et al 2015 Venkatapen 2012 [19,20]	SOC sur profondeur de 30cm et 1m
<i>Guyane</i>	Guitet et al 2015 Fayad et al 2016 [21,22]	Guitet 2015 [23]	$\pm 60 \text{ t.ha}^{-1}$ à résolution 4km^2 $\pm 50 \text{ t.ha}^{-1}$ à résolution 1km^2 SOC à sur profondeur de 1m

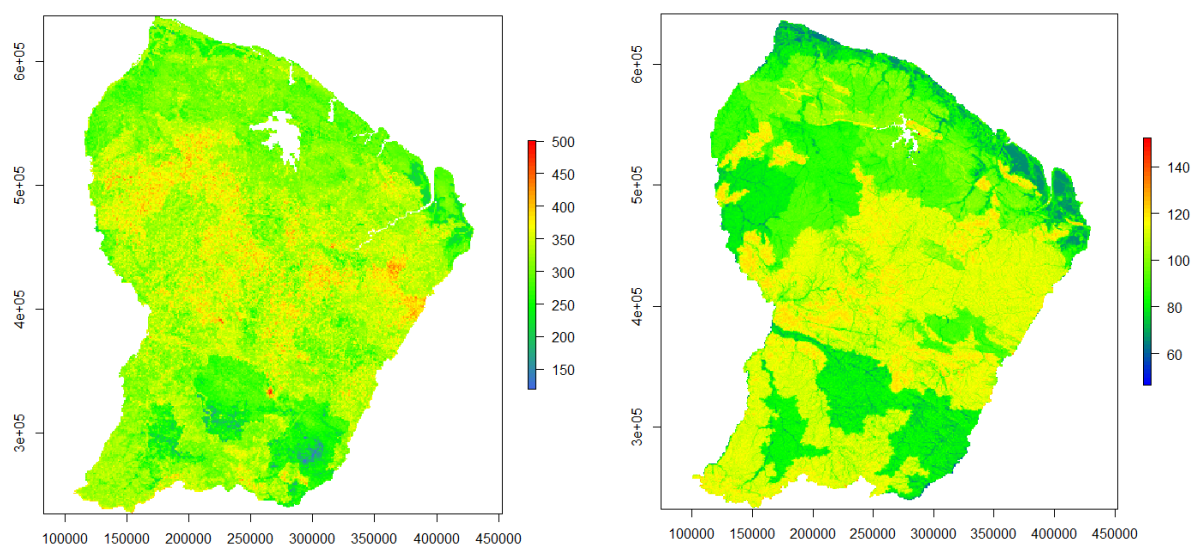


FIGURE 2- CARTES DE DISTRIBUTION DE LA BIOMASSE FORESTIERE (A GAUCHE) ET DU CARBONE ORGANIQUE DES SOLS EN GUYANE (A DROITE), D'APRES FAYAD ET AL [22] ET GUITET [23].

NB : le passage des tonnes en matière sèche en tonnes de carbone s'effectue avec un facteur multiplicatif de 0.475 – le stock du carbone organique des sols est estimé en T de carbone/ha sur une profondeur d'un mètre.

² LiDAR : pour Light Detection and Ranging, système d'écholocation basé sur des émissions laser permettant de reconstruire la structure 3D du relief et de la végétation sus-jacente (voir le chapitre « Méthodes de cartographie de la biomasse forestière » pour plus de détails)

3.1.2. DISPONIBILITE DES DONNEES TERRAIN

Plusieurs types de relevés *in situ* ont été collectés sur les ROM-COM et peuvent être utilisés comme sources de données aussi bien pour la caractérisation des différents types de formations forestières, l'estimation des stocks de biomasse et de leur variation spatio-temporelle ou l'élaboration de produits cartographiques.

3.1.2.A. RESEAUX DE PLACETTES PERMANENTES POUR LE SUIVI DE LA DYNAMIQUE FORESTIERE

Historiquement, c'est en Guyane que les premiers dispositifs de suivi de la dynamique forestière ont été mis en place, en 1968 dans la région de St Laurent, sur le site du BAFOG constitués de 4 placettes de 4 ha dédiés à l'étude de la dynamique forestière. D'autres dispositifs expérimentaux ont par la suite été installés par l'ORSTOM (Arbocel en 1978), le MNHN (Arataye en 1985), le CIRAD (Paracou 1984), le CNRS (Nouragues en 1993) et enfin l'ONF (Forêt pilotes en 1995-2001) pour l'étude de la dynamique des forêts naturelles et exploitées. A partir de 2003 le CIRAD et l'ONF suivi par le CNRS et l'INRA s'appuient sur ces dispositifs éclatés pour constituer un réseau coordonné et harmonisé, le réseau GUYAFOR, qui sera complété par l'installation de nouvelles placettes permettant de mieux assurer la représentativité régional (variabilité écologique et modalités d'exploitation). Ce réseau rassemble aujourd'hui plus de 45 placettes de 1 à 16 ha sur 16 sites différents totalisant 235 ha (Figure 3 ci-après) sur lesquels près de 160 000 arbres de plus de 10 cm de diamètre à 1m30 sont régulièrement mesurés (<http://paracou.cirad.fr/experimental-design/guyafor-network>). Ce dispositif est labellisé en tant que Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche sur l'Environnement (SOERE) et s'inscrit pour parti dans des dispositifs très actifs à l'échelle internationale (réseaux RAINFOR <http://www.rainfor.org/> et TmFO <http://www.tmfo.org/>). Le réseau est complété par des relevés pédologiques systématiques et des équipements lourds tels que des tours à flux³ sur les dispositifs focaux de Paracou et des Nouragues.

Le Parc National de Guadeloupe (PNG), l'Université des Antilles (UA) et l'ONF de Guadeloupe ont mis en place un système semblable à partir de 2008 en s'appuyant sur des placettes permanentes historiquement installées par l'INRA entre 1981 et 2005 dans le cadre du dispositif « Forêt Dense Humide ». Une sélection et une complémentation des placettes ont été réalisées entre 2008 et 2010 pour aboutir à un réseau constitué de 9 placettes de 1 ha, toutes situées sur la partie Basse Terre, sur lesquelles près de 8 500 arbres de plus de 10 cm de diamètre à 1m30 sont équipés de dendromètres et régulièrement suivis (Figure 4 ci-après). Un réseau de moindre envergure a été parallèlement mis en place en 2012 par l'ONF, l'UA et le Conseil Général de Guadeloupe sur les forêts sèches dégradées de Grande-Terre suivant une méthodologie différente : 12 petites placettes de 200 à 400 m² sur lesquelles tous les arbres de plus de 10 cm de circonférence, sont régulièrement mesurés.

En Martinique, un projet de réseau comprenant 40 placettes de 2 400 m² couvrant le gradient altitudinal et climatique du territoire a été lancé en 2008, cependant seules 9 placettes ont pu être installées à ce jour.

A Mayotte, les Orientations Forestière évoquent dans ses programmes la mise en place d'un réseau de placettes permanentes couvrant les différents milieux naturels y compris agro-forêts et forêts secondarisés (action 3.10.2) sans plus de détails.

³ Tour à flux : dispositif permettant d'enregistrer en continu les échanges gazeux entre végétation et atmosphère par suivi automatique des turbulences et mesure des concentrations atmosphériques.

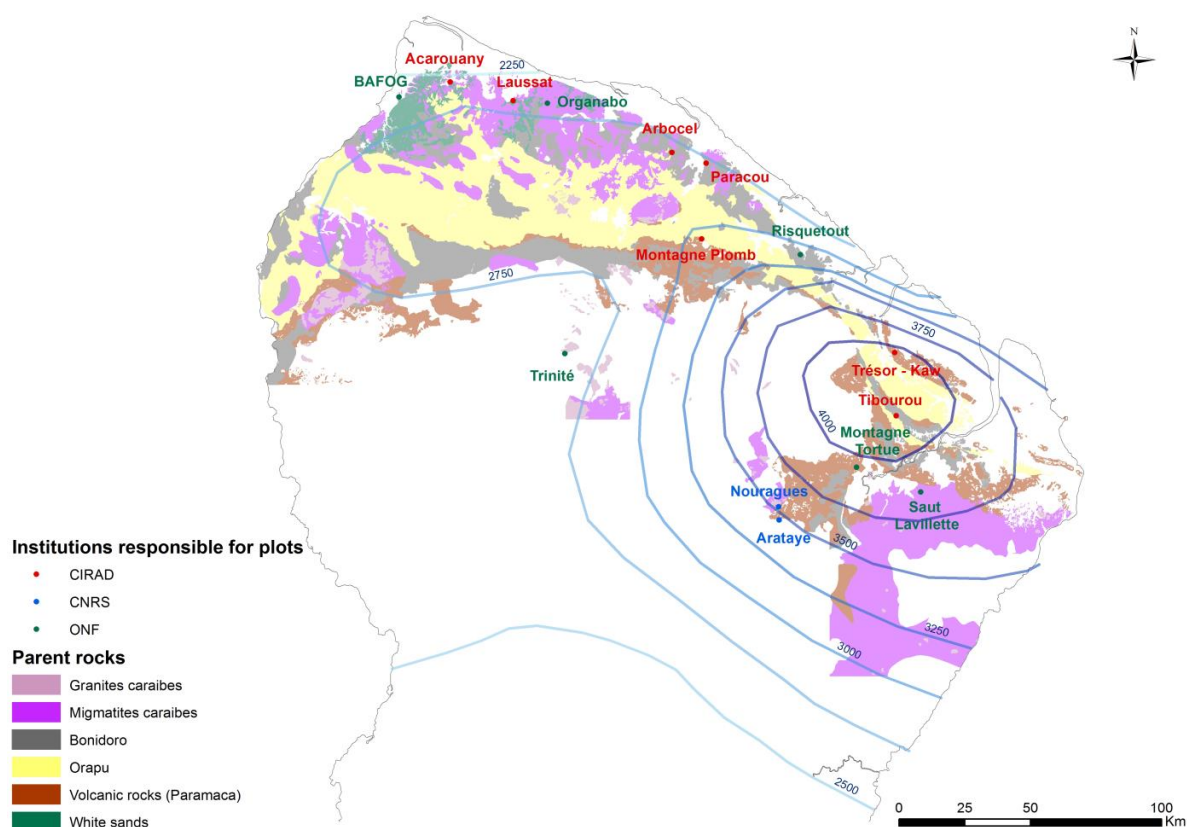


FIGURE 3–RESEAU DE PLACETTES PERMANENTES GUYAFOR (EXTRAIT DE [HTTP://PARACOU.CIRAD.FR/EXPERIMENTAL-DESIGN/GUYAFOR-NETWORK](http://paracou.cirad.fr/experimental-design/guyafor-network))

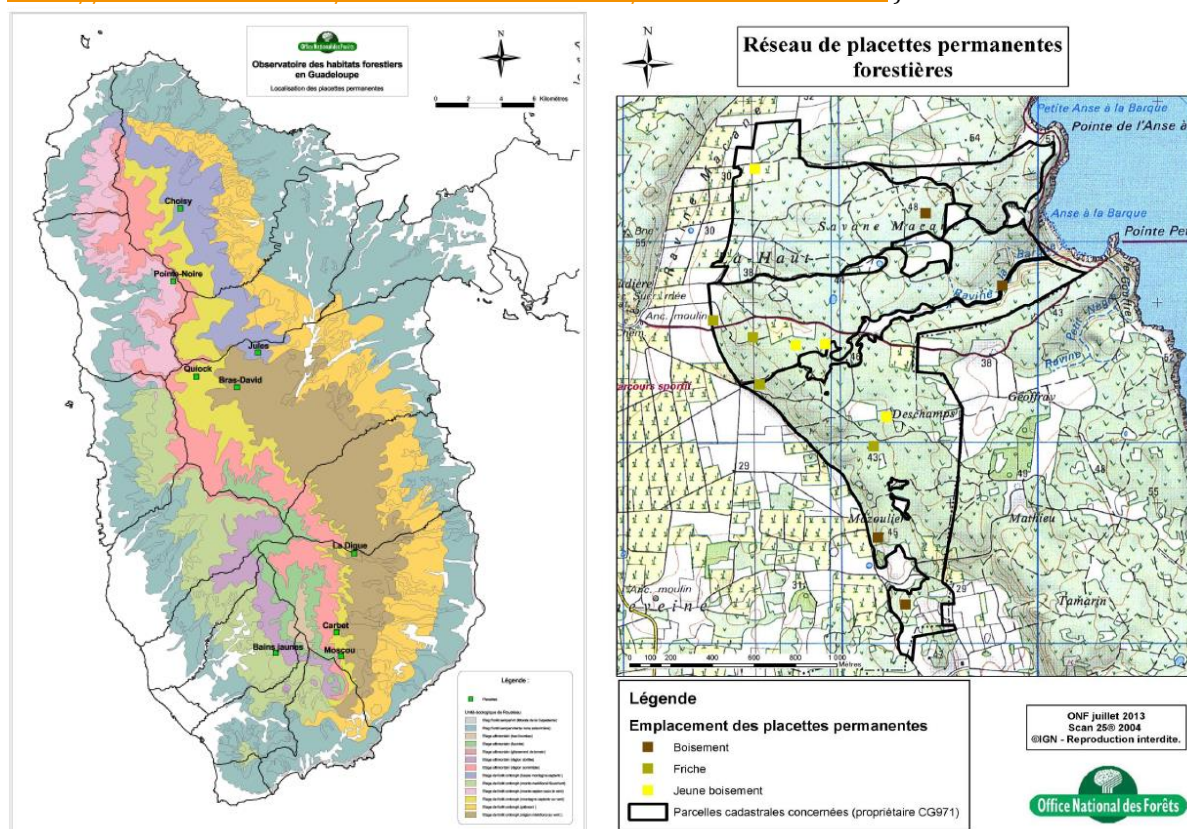


FIGURE 4 –LOCALISATION DES RESEAUX DE PLACETTES PERMANENTES RECEMMENT INSTALLES EN GUADELOUPE EN FORET HUMIDE (A GAUCHE) ET EN FORET SECHE (A DROITE), D'APRES ONF [24,25]

A la Réunion, un dispositif embryonnaire a été constitué avec une placette permanente de 1 ha installée en 1990 dans la Réserve Naturelle de Mare-Longue puis étendue à 3 ha entre 2000 et 2003 par l'Université de la Réunion en collaboration avec l'ONF, le Parc National de la Réunion et la Région. Un inventaire régulier des Bryophytes et Ptéridophytes est aussi effectué depuis 2008 sur un gradient altitudinal de 2 600 m dans le cadre d'un réseau international nommé MOVECLIM (Montane Vegetation as listening posts for Climate change) financé jusqu'en 2016 par le programme européen Net-Biome, dans le but d'observer les effets des changements climatiques sur les formations végétales d'altitudes et particulièrement les forêts tropicales d'outre-mer. Ce réseau inclut aussi le suivi d'un gradient de 1 150 m en Guadeloupe (<http://moveclim.blogspot.fr/>).

3.1.2.B. RESEAU DE PLACETTES DE RELEVES NON PERMANENTES

Plusieurs autres sources de données forestières peuvent être utilisées pour la caractérisation de la diversité forestière d'outre-mer, la calibration/validation des produits cartographiques ou plus généralement le renseignement des statistiques forestières, telles que les enquêtes FRA de la FAO. Ces données forestières peuvent provenir de campagnes d'inventaires forestiers statistiques, d'inventaires d'aménagement forestiers, ou de programmes de recherche forestière. En outre-mer, ces données coûteuses, techniquement lourdes à acquérir dans des environnements difficiles, sont relativement rares, souvent anciennes, et incomplètes. La qualité des produits cartographiques et des suivis à l'échelle régionale dépend pourtant en grande partie de leur disponibilité, de leur représentativité et de leur précision.

La plupart de ces données ont été recensés lors du rassemblement des références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national des gaz à effet de serre pour la Guadeloupe, la Martinique, la Réunion [26] et pour la Guyane [27]. En Guyane, dans les années 1972-1976 plusieurs inventaires ont été réalisés par le CIRAD (ex CTFT) et l'ONF sur des massifs forestiers de plusieurs dizaine de milliers d'hectares selon des protocoles statistiques systématiques réguliers avec des taux de sondage allant de 0.2% à 0.8%. Ces inventaires historiques intègrent toutes les essences forestières et classes de diamètre. Les données brutes concernant la Guyane ont récemment été numérisées pour partie par l'ONF, géo-localisées, rassemblées dans une base de données et utilisées pour le développement de modèles cartographiques. D'autres inventaires plus anciens dits « au millième » ont été partiellement numérisés mais sont peu précis plus difficiles d'exploitation. Aux Antilles, des inventaires similaires suivant des taux de sondage de 0.4 à 1.2% ont été réalisés mais ces données ne couvrent que la forêt ombrophile, sont peu précises (regroupement d'un grand nombre d'essences – larges classes de diamètre) et ne sont pas numérisées (Figure 5).

D'autres types de données ont été produits par l'ONF dans le cadre des études d'aménagements à partir des années 1990. Ces données couvrent de petites surfaces, sont hétérogènes et n'ont jamais été rassemblées en base de données exploitables exceptées les données d'inventaires dits « à 5% » produites en Guyane entre 1993 et 1997, dont une grande partie a été numérisée par l'ONF (1 750 ha inventoriés couvrant 39 500 ha – données non publiées). Plus récemment, des inventaires forestiers ont été réalisés par ONF-International sur Saint-Pierre et Miquelon dans le cadre du projet d'aménagement des forêts de la Collectivité Territoriale selon un plan échantillonnage statistiquement exploitable : 750 placettes circulaires temporaires de 200 m² ont été mesurées en 2015 et 600 placettes en 2016, soit l'équivalent de 27 ha en plein.

Le dernier type de données exploitables correspond aux relevés forestiers et/ou floristiques rassemblés dans le cadre de campagnes d'études ou de recherche récentes, visant spécifiquement à documenter et cartographier la diversité des habitats naturels terrestres ultra-marins et particulièrement les habitats forestiers. A la Réunion, ce sont plus de 2 491 relevés

phyto-sociologiques qui ont été effectués entre 2011 et 2014 dans le cadre de la réalisation des cahiers d'habitats (étages littoral, altimontain, mégatherme semi-xérophile et zones humides – [15,16,28], dont environ 180 relevés effectués en zone forestière sur des placettes de 100 à 200m². Dans ce cadre les acteurs de la Réunion ont développé une expertise à la pointe en termes de relevés numériques et digitalisation directe des informations sur le terrain à l'aide de technologies nomades. En Guyane, le réseau de placettes botaniques GUYADIV mis en place par l'IRD totalise environ 95 ha de relevés floristiques sur 25 sites, suivant des protocoles très variables (en termes de taille et répartition des placettes) mais intégrant systématiquement tous les arbres de plus de 10 cm de diamètre à hauteur de poitrine avec une détermination à l'espèce sur plus de 90% des individus. Ce dispositif est intégré au réseau international ATDN [29] et à contribuer à l'élaboration de la liste des espèces d'arbres de Guyane [30]. Le réseau HABITATS a été mis en place par l'ONF et totalise 3 132 placettes de 0.2 ha distribuées sur 33 sites forestiers. Les déterminations botaniques y sont moins précises et le diamètre de pré-comptage relevé à 17,5 cm mais le protocole d'installation est homogène sur l'ensemble des sites [31]. Enfin en Guadeloupe et en Martinique des réseaux de placettes floristiques ont aussi été décrits dans le cadre de travaux de recherche : 71 stations de 1 ha en forêt hygrophile de Martinique [32] et 75 stations en forêt sèches [33] ; 43 stations de 800m² en Guadeloupe [9]. L'ancienneté et l'hétérogénéité de ces dispositifs en termes de surface de placettes, de diamètre de pré-comptage, et de protocoles compliquent leur exploitation qui est cependant toujours possible aujourd'hui.

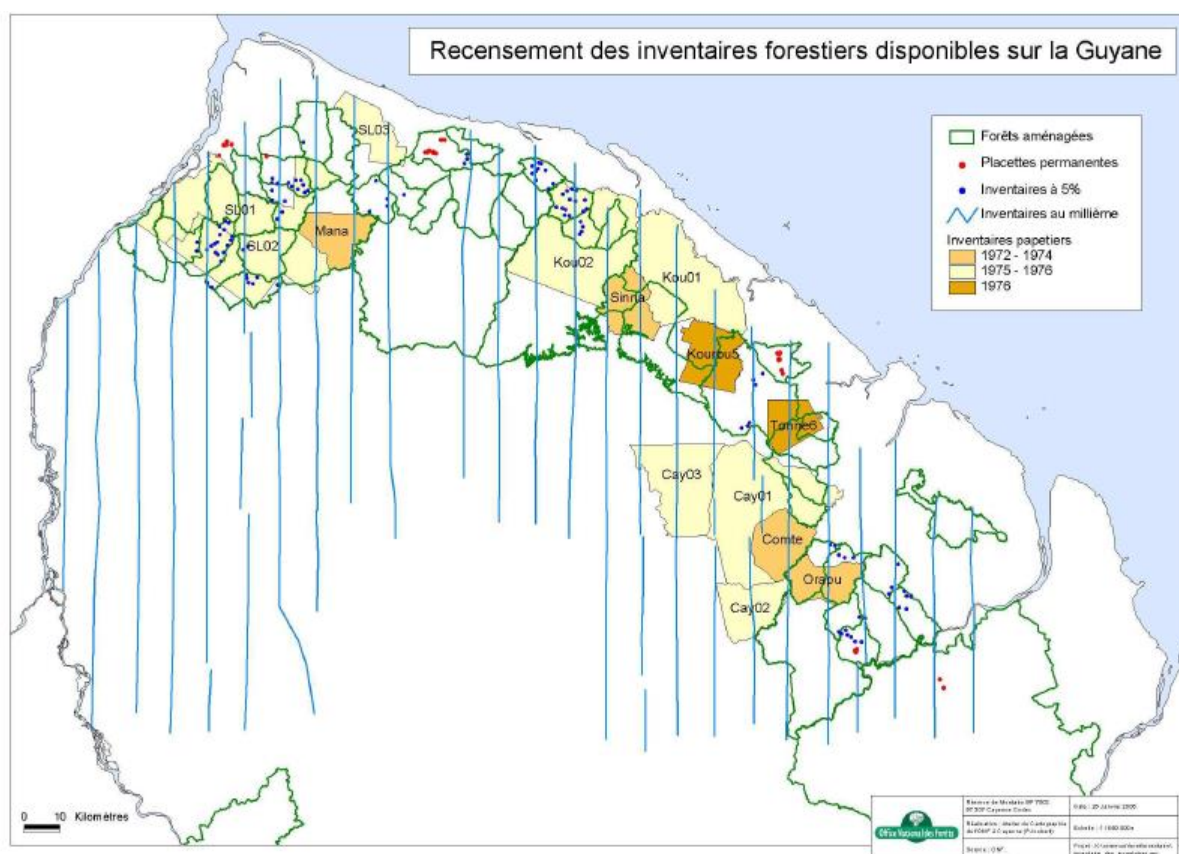


FIGURE 5–RECENSEMENT DES DONNEES FORESTIERES ANCIENNES DISPONIBLES POUR LA GUYANE
EXTRAIT DE GUITET ET AL [34]

3.1.3. DISPOSITIFS DE SURVEILLANCE TERRITORIALE

Plusieurs dispositifs de suivi ont été mis en place en Guyane et en Guadeloupe, afin d'assurer une surveillance des impacts anthropiques sur les territoires forestiers à partir de télédétection ou de rendre compte des dynamiques forestières naturelles après perturbation.

3.1.3.A. OBSERVATOIRE DE L'ACTIVITE MINIERE (OAM) EN GUYANE

L'OAM a été mis en place en 2008 à l'initiative de la Préfecture, de l'ONF, de la Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DEAL), de la Gendarmerie nationale et des Forces Armées de Guyane (FAG) pour faire face aux enjeux liés au développement très rapide de l'activité minière en forêt guyanaise. Ce dispositif de surveillance vise à produire des informations spatialisées pour la coordination des actions de lutte contre l'orpaillage illégal, à élaborer des données de synthèse spatialisées sur les impacts de l'orpaillage légal et illégal sur l'environnement forestier et à échanger ces données *via* un serveur dédié et partagé par les acteurs de l'OAM auquel s'est rapidement joint le Parc Amazonien de Guyane (PAG) à sa création. Le système de surveillance se fonde sur une articulation entre télédétection, survols aérien hélicoptérés et contrôle de terrain. Les déforestations et la turbidité des cours d'eau provoquées par l'orpaillage sont détectées par le traitement semi-automatique et en continu d'images optiques multi-spectrales des capteurs LANDSAT et SPOT4-5-6-7⁴. Ces détections orientent l'organisation de mission de survol permettant de confirmer et de préciser l'intensité des activités et leur emprise spatiale. Des opérations de lutte ou de contrôle sont alors lancées sur le terrain sur la foi de ces constatations. L'ensemble des informations recueillies sont consolidées dans un SIG partagé et font l'objet d'une synthèse annuelle permettant de quantifier et localiser les déforestations constatées (Figure 6). Une description précise de ce dispositif exceptionnel à de nombreux points de vue est fournie en [annexe 6](#).

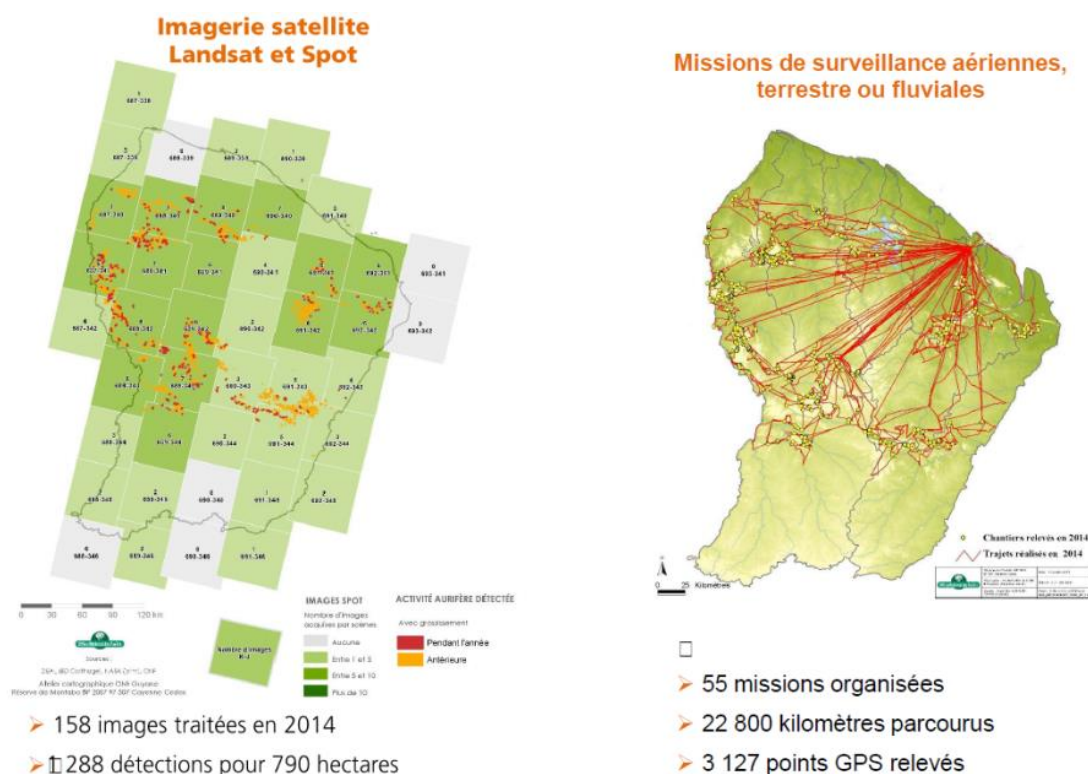


FIGURE 6 - EXEMPLE D'INFORMATIONS SPATIALES PRODUITES PAR L'OAM EN 2014 EXTRAIT DE ONF [35]

⁴ Plus récemment les premières images Sentinel2 ont aussi été utilisées, et la photo-interprétation tend à remplacer le traitement automatique (Bedeau C. comm. pers.)

3.1.3.B. OBSERVATION DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL

En Guyane, le PAG s'est doté d'un dispositif de surveillance, nommé AGRIPAG, qui vise à améliorer la connaissance des pratiques agricoles des communautés et leurs impacts sur le milieu forestier omniprésent sur le territoire du PAG. Ce système s'appuie sur le traitement de photographies aériennes BDOrtho®, pour la réalisation du premier état des lieux, puis sur l'exploitation d'images satellitaires panchromatique à haute résolution SPOT5 et SPOT6 afin de détecter les déforestations liées au développement des abattis⁵.

Les données sont produites annuellement par photo-interprétation d'une sélection des meilleures images disponibles en saison sèche, c'est-à-dire pendant la période usuelle de déforestation (Figure 7). L'information produite à l'année "n" permet donc de valider les observations réalisées l'année "n-1" (post-interprétation).

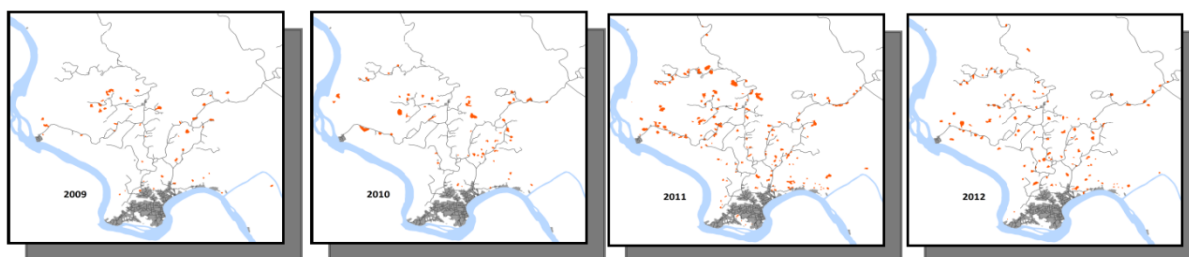


FIGURE 7- EXEMPLE D'INFORMATIONS SPATIALES PRODUITES PAR AGRIPAG SUR LA PERIODE 2009-2012 AUTOUR DE MARIPASOULA, EXTRAIT DE PARC AMAZONIEN DE GUYANE 2013 [36]

Aucun autre système d'observation régulière de la dynamique d'occupation des sols, permettant de documenter l'évolution des surfaces forestières n'a été mis en place sur les autres ROM-COM si ce n'est des études cartographiques rétrospectives réalisées au cours des 10 dernières années dans les Antilles, en Guyane et à la Réunion (tableau 8). En Guadeloupe et Martinique, ces études ont été réalisées à l'initiative des collectivités territoriales (Conseil Généraux) par les services de l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN *ex* IFN) en se basant sur la photo-interprétation de prises de vues aériennes. Ces productions restituent des informations sur une résolution très fine (<0.5 ha) et remontent jusqu'aux années 1950 mais s'appuient sur des images dont les caractéristiques techniques diffèrent selon les millésimes (noir et blanc, panchromatique, infra-rouge couleur). En Guyane, les mêmes types d'analyses rétrospectives ont été réalisés sur la bande littorale en 2008 par l'ONF suite à une sollicitation de la Direction Agriculture et Forêt (DAF) dans le cadre des Missions d'Intérêt Général (MIG) assurées par l'ONF pour le compte de la DAF. Cette étude se fonde sur l'interprétation de matériel encore plus hétérogène intégrant les prises de vues aériennes de la BDortho® pour les années 2001 et 2005 (seuls millésimes disponibles en Guyane⁶) et l'exploitation d'images satellitaires Landsat (1990) ou Spot5-6 (2008 et 2011). Cette étude a été complétée en 2011 afin de couvrir les principaux villages de l'intérieur de la Guyane. La surface unitaire des polygones numérisés sur ces couches ne descend pas en-dessous de 2.5 ha. A la Réunion, la seule étude du genre a été effectuée dans le cadre de travaux de thèse remonte aux années 2002 et 1988 et s'appuie exclusivement sur une classification automatique d'images satellitaires des capteurs SPOT1-4. Ces initiatives disparates de par leur mode de réalisation, leur commanditaire, leur irrégularité temporelle sont actuellement en cours de structuration autour du projet de production de l'Occupation des Sols à Grande Echelle (OCS-Ge) mené par l'IGN et qui vise à couvrir l'ensemble des territoires français

⁵ Abattis : système agricole traditionnel des communautés guyanaises caractérisé par une mise en culture de petites surfaces (<1ha) après brûlage du couvert forestier, suivie d'une mise en repos longue (plusieurs décennies) dans le cadre de système de rotation et/ou d'itinérance

⁶ Le millésime 2015 basé sur les orthophotographies complétées par des images Pléiades et SPOT 6 n'est pas encore disponible à ce jour (C Bedeau, comm. pers.)

par un produit standardisé répondant à cet objectif de suivi des occupations des sols et ouvrant la possibilité de produire par la même occasion des statistiques plus robustes et régulières d'évolution des surfaces forestières.

TABLE 8 : ETUDES DE SUIVI DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DES SOLS SUR LES ROM-COM ET MILLESIMES RENSEIGNES

Millésime Etude de référence	1950	1951		1988	1989	1990		2001	2002	2003	2004	2005		2008	2009	2010	2011	2012
Martinique [12]		x									x							
Guadeloupe [10]	x			x							x					x		
Guyane [37,38]						x		x				x		x			x	x
La Réunion [39]				x					x									

En Guyane, un système de suivi statistique des changements d'occupation des sols complémentaire a été mis sur pied par l'IGN et l'ONF afin de répondre aux besoins de rapportage du secteur UTCF pour l'inventaire des émissions des gaz à effet de serre, et faire face à l'absence d'un suivi spatialement exhaustif (Figure 8). Ce système s'appuie sur la production d'orthomosaïques d'images LANDSAT (pour l'année 1990) et SPOT (pour les années 2008 et 2012) couvrant l'ensemble du territoire. Une interprétation de l'occupation des sols est effectuée sur un échantillonnage ponctuel stratifié distinguant une zone soumise à forte pression anthropique (strate renforcée à forte densité de point), une zone dite normale (à faible densité de point où l'activité humaine est réduite) et une dernière zone autour du barrage de Petit Saut.

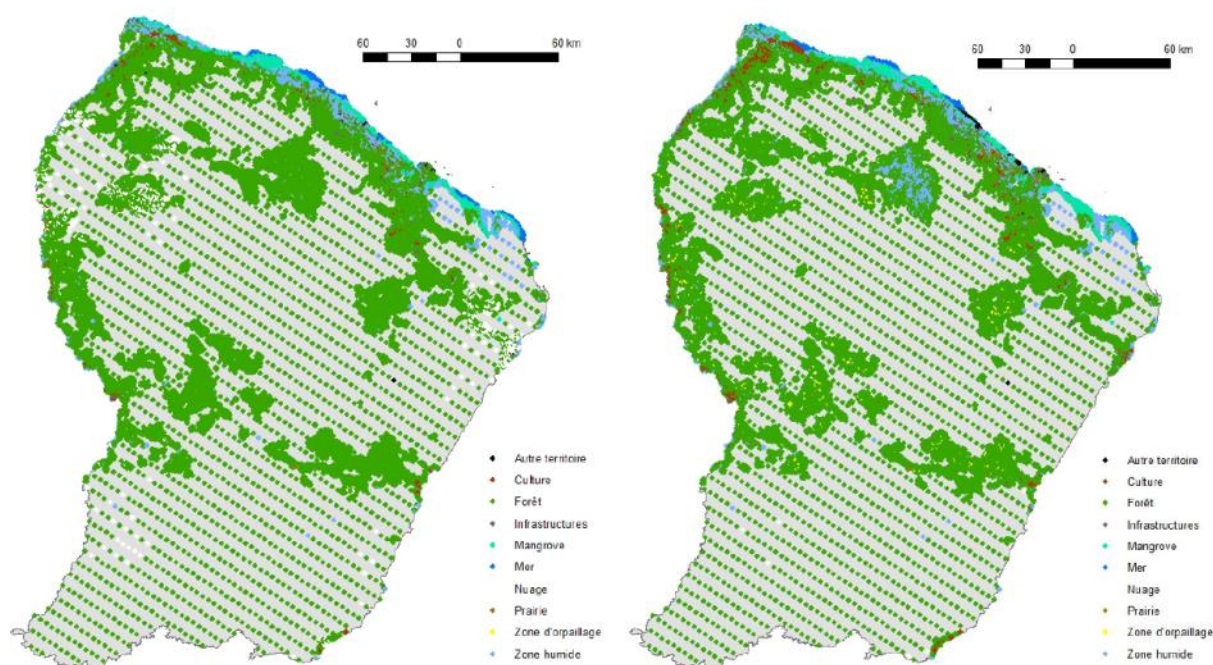


FIGURE 8 - SUIVI STATISTIQUE DES CHANGEMENTS DE COUVERT FORESTIER EN GUYANE REALISE PAR IMAGERIE SATELLITAIRE ENTRE 1990 (A GAUCHE) ET 2012 (A DROITE, EXTRAIT DE IGN ET ONF [38])

3.1.4. DISPOSITIFS D'ACCES AUX IMAGES

Les productions cartographiques et dispositifs de suivis mis en place dans les ROM-COM s'appuient pour la plupart sur l'exploitation d'imageries satellitaires et/ou de prises de vues aériennes disponibles dans le cadre de missions de services publics ou de programmes d'acquisition mutualisées.

3.1.4.A. LES PRISES DE VUES AERIENNES DE L'IGN

Les prises de vues aériennes (PVA) exploitées proviennent des campagnes d'acquisition d'orthophotographies réalisées par l'IGN, notamment celles réalisées pour la production des orthophotographies constituant la BDOrtho© (disponibles sur <https://remonterletemps.ign.fr/>) et pour les périodes anciennes, des clichés de l'ORSTOM ou du Ministère de la Guerre (période 1919-1958 disponible sur <http://sextant.ifremer.fr/fr/web/photos-anciennes-littoral/outre-mer#>). En outre-mer, les campagnes d'acquisition de l'IGN ont théoriquement lieu tous les 3 ans depuis 2010 (tous les 5 ans précédemment) afin notamment de faciliter les déclarations des parcelles agricoles dans le cadre de la Politique Agricole Commune. Dans les faits les productions sont plus irrégulières qu'en métropole (tableau 9), dépendant de conditions climatiques parfois difficiles et des négociations partenariales avec les collectivités locales. Les dernières PVA présentent une très haute résolution (20 à 35 cm en règle générale), intègrent une bande infra-rouge (PIR) et des acquisitions stéréoscopiques facilitant l'interprétation des informations.

TABLE 9- PRINCIPALES CAMPAGNES DE PRISES DE VUE AERIENNES DISPONIBLES SUR LES ROM-COM POUR LES 30 DERNIERES ANNEES D'APRES LE PORTAIL IGN ([HTTPS://REMONTERLETEMPS.IGN.FR/](https://remonterletemps.ign.fr/) ET [HTTP://PROFESSIONNELS.IGN.FR/SITES/DEFAULT/FILES/TABLEAU BDORTHO DEP 50CM JP2E080.PD E](http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/tableau_bdortho_dep_50cm_jp2e080.pdf))

Territoire	Millésimes des PVA (couvertures 20 ou 50cm)					
<i>Guadeloupe</i>	1988	1993	1999	2004	2010	2013
<i>Martinique</i>	1988	1992	2000	2004	2010	2013
<i>Guyane (littoral)</i>	Ø	1992	1999-2001	2006	Ø	Ø
<i>Réunion</i>	1989	Ø	1997	2003	Ø	2013
<i>St Pierre et Miquelon</i>	1990	Ø	2000	2005	Ø	2012
<i>Mayotte</i>	1989	Ø	1997	2003	2008	2013
<i>St Martin</i>	Ø	Ø	1999	2004	2010	2013
<i>St Barthélemy</i>	Ø	Ø	1999	Ø	2010	2013

NB : de nouvelles campagnes d'acquisition ont eu lieu en 2016 (Mayotte et St Barth) et en 2017 (Guadeloupe, Martinique, St Martin et Guyane) et seront très prochainement disponibles

3.1.4.B. LES DISPOSITIFS SEAS ET THEIA-GEOSUD

Les images satellitaires, qui ont été exploitées jusqu'à présent sur les ROM-COM, ont pour la plupart été mises à disposition par les dispositifs SEAS (Surveillance de l'Environnement Assisté par Satellites) portées par l'IRD : SEAS-Guyane (opérationnelle depuis 2005 et rétrocédée en 2014 à la Collectivité de Guyane - <http://www.guyane-sig.fr>), et SEAS-océan Indien (opérationnelle depuis 2012 - <http://www.seas-oi.org/>). Ces plateformes technologiques comprenant des antennes de réception des images SPOT facilitent la mise en production d'images multi-spectrales haute résolution pour les territoires (Antilles comprises *via* la Guyane). Les données satellites acquises et traitées à partir de la station sont mises à disposition des collectivités, des établissements publics et de la communauté scientifique gratuitement grâce à des programmes de financements mutualisés s'appuyant notamment sur les aides de l'UE. Des activités de formation, de renforcement des capacités, de transfert de technologies sont également mises en place autour de ces projets.

Depuis cette année, les dispositifs SEAS sont intégrés au Pôle de Données et de Services Théia-GEOSUD (https://www.theia-land.fr/sites/default/files/imce/theia/ART_20151005_Theia.pdf), structure interinstitutionnelle regroupant 11 organismes impliqués dans l'observation des surfaces continentales, permettant de fédérer et d'organiser la filière télédétection à l'échelle nationale afin de mutualiser les coûts, matériels et développement méthodologique mais aussi de promouvoir l'utilisation des données satellitaires par les acteurs publics en facilitant transferts et formations. En Guyane, le dispositif SEAS a permis la production et la diffusion d'environ 700 images SPOT par an, dont une part importante a été utilisée à des fins de surveillance de la forêt par les acteurs publics (notamment par l'ONF et le PAG dans le cadre de l'OAM).

Le dispositif SEAS-Guyane était relayé dans les Antilles par le programme CARIBSAT visant la mise en place d'un Observatoire sur l'Environnement à l'échelle des petites Antilles et la constitution d'un Atlas géographique dynamique alimenté par l'acquisition et le traitement d'imageries satellitaires (fournies par le SEAS), de données terrains et hydrométéorologiques (<http://www.martinique.ird.fr/les-activites/projets-de-recherche/projet-caribsat>). Celui-ci a pris fin en 2013.

3.1.4.C. L'OPEN SOURCE

De nombreuses images satellitaires produites et diffusées gratuitement sont aussi utilisées par les territoires pour leur besoin de cartographie et de suivi. En premier lieu, ce sont les images multi-spectrales haute résolution LANDSAT produites par la NASA et l'USGS, dont les archives remontent à 1972 et sont gratuitement accessibles depuis 2009, qui font l'objet des usages les plus fréquents (principalement les images des capteurs Thematic Mapper TM, ETM ou ETM+ à résolution de 30m, disponibles depuis 1982 avec LANDSAT4 et suivant). Ces produits sont disponibles *via* des plateformes internet libres d'accès comme le GLCF (Global Land Cover Facility) ou GloVis (<http://glovis.usgs.gov/>) et sont très utilisés en Guyane pour réaliser des cartographies rétrospectives (ex : occupation du sol en Guyane [37] – suivi de la dynamique des mangroves en Guyane [40]) ou pour compléter spatialement des couvertures SPOT incomplètes (ex : surveillance des impacts de l'exploitation aurifère sur le plateau des Guyanes [41]). La fréquence de passage des satellites LANDSAT est de l'ordre de 18 à 16 jours selon les secteurs ce qui assure une bonne disponibilité ses images.

Depuis 2014, le programme COPERNICUS de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) met à disposition gratuitement toutes les images produites par la toute nouvelle constellation de satellites SENTINEL comprenant images radar et multi-spectrales. Des chaînes de traitements automatiques ont été mise place par le CNES pour mettre à disposition gratuitement des images standardisées, ortho-rectifiées et corrigées des effets atmosphériques (Niveau 2A) dans le cadre du pôle Théia (Chaîne MUSCATE - <https://www.theia-land.fr/fr/projets/muscate>). Peu d'images sont pour le moment disponibles sur les outre-mer, la priorité ayant été donnée dans un premier temps à la mise en production des données concernant le territoire européen et le bassin méditerranéen. Plusieurs tests de production ont cependant déjà été menés sur la Réunion (Figure 9) et une mise en production systématique sur les autres ROM-COM est maintenant enclenchée depuis le lancement du satellite SENTINEL2B qui vient compléter la constellation. Depuis 2015, le CNES met aussi à disposition gratuitement les images SPOT1-5 de plus de cinq ans dans le cadre du programme « Spot World Heritage ». Cette série permet de remonter à 1986 et est mise à disposition *via* le portail de Théia (www.theia-land.fr).

De nombreux autres produits open-source sont aussi disponibles et utilisés en outre-mer comme les images à très hautes résolutions spatiales disponibles *via* GoogleEarth (GeoEye) utilisées pour la validation cartographique, ou les images à haute fréquence de suivi temporelle

et basse résolution comme MODIS ou SPOT-Vegetation utilisé pour la cartographie des types forestiers en Guyane [14,42]

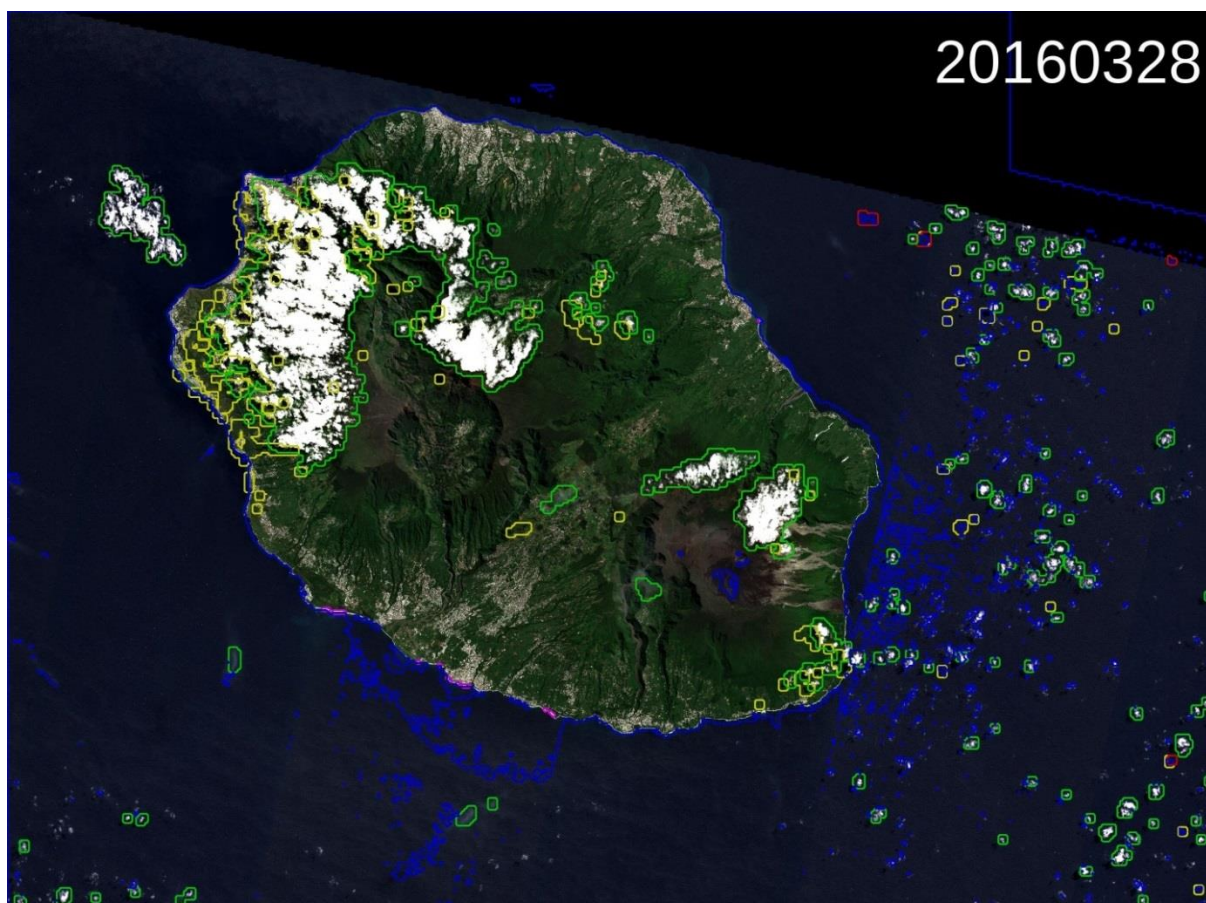


FIGURE 9 : IMAGE SENTINEL2 PRODUITE EN FIN DE CHAÎNE DE PRETRAITEMENT MUSCATE AU NIVEAU 2A ACCOMPAGNÉE DES MASQUES NUAGES (EN VERT), OMBRES (EN JAUNE) ET CORRECTION DE RÉFLECTANCE (EN BLEU) TIRÉE DE [HTTP://WWW.CESBIO-UPS-TLSE.FR/MULTITEMP/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/01/SENTINEL2A_20160328-063507-463_L2A_T40KCB_D_V1-3_SRE_B2.JPG](http://www.cesbio-ups-tlse.fr/multitemp/wp-content/uploads/2017/01/SENTINEL2A_20160328-063507-463_L2A_T40KCB_D_V1-3_SRE_B2.JPG)

3.1.5. OBSERVATOIRES THEMATIQUES EN LIEN AVEC LA FORET

3.1.5.A. LE POLE-RELAIS ZONES HUMIDES TROPICALES

Le pôle-relais zones humides tropicales (anciennement pôle-relais mangroves et zones humides d'outre-mer) fait partie des 5 pôle-relais zones humides labellisé à l'échelle nationale pour la préservation des milieux humides à travers des actions de mutualisation de connaissances et d'organisation d'échanges au sein d'un réseau d'acteurs engagés dans la conservation et la gestion de ces milieux naturels. Ce consortium regroupe l'IFRECOR (Initiative française pour les récifs coraliens), l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques aujourd'hui intégré dans l'AFB), le Conservatoire du Littoral, les Offices de l'eau de Guadeloupe et de Martinique ainsi que l'UICN en charge depuis cette année du portage de la structure (<http://www.pole-zh-outremer.org/pole-relais-mangroves-zones-humides-doutre-mer>).

Parmi les projets en cours de ce réseau figure la cartographie des mangroves d'outre-mer menée dans le cadre d'une thèse de doctorat démarrée en 2013 à partir d'images satellites. Des essais méthodologiques ont été réalisés dans ce sens pour aboutir à un guide méthodologique [43] qui doit être suivi très prochainement par une première production cartographique harmonisée des

mangroves d'outre-mer. Parallèlement le pôle-relais s'investit dans la cartographie des zones humides, y compris forestières, rendue nécessaire par l'arrêté du 24/06/2008 qui impose un zonage très précis des zones humides qui puisse être opposable réglementairement. Ces travaux sont menés en partenariat avec les DEAL des ROM, le MNHN et le Ministère de l'Environnement (en plus des membres pôle) et n'en sont qu'à leur prémisse.

3.1.5.B. DISPOSITIFS DE SUIVI DU CARBONE FORESTIER

Depuis 2012, chaque région a pour obligation de suivre ses bilans d'émission de gaz à effet de serre (BEGES) selon une périodicité de 3 ans. Ces bilans sont réalisés par les Régions mais sont généralement sous-traités à des bureaux d'étude et centralisés par l'ADEME. La part de la forêt et du secteur forestier dans ce bilan représente généralement moins de 10% du bilan global excepté en Guyane où le secteur UTCF représente plus de la moitié du bilan régional. On note que plusieurs études mentionnent un potentiel effet puits lié à la séquestration du carbone au sein des massifs forestiers gérés et en croissance (tableau 10 ci-dessous). On notera cependant que ces estimations reposent sur des hypothèses très incertaines⁷ et s'assoient sur des périmètres parfois inadéquats (intégrant des effets puits qui ne peuvent être attribués à une action humaine directe).

TABLE 10 : ESTIMATION DES STOCKS ET FLUX DE CARBONE RELATIF AU SECTEUR FORESTIER ET AUX CHANGEMENTS D'USAGE DES SOLS FORESTIERS DANS LES DOM D'APRES LES BEGES REGIONAUX ET CITEPA.

Territoire (référence)	Bilan Agriculture/ Sylviculture (teq CO2)	Bilan UTCF (teq CO2)	Secteur agricole → avec UTCF	Estimation effet puits (teq CO2)	Biomasse forestière (Mteq CO2)
Martinique [44]	5 000	nd	0% → nd		nd
Guadeloupe [45](Colomb & Martel 2012)	209 000	266 000	5% → 10%	- 240 000*	580
La Réunion [46]	304 000***		7%	- 696 000*	21
Guyane [47]	28 000	1 400 000	4% → >66%	- 770 000**	4 957
Mayotte [48]	74 300***	nd	9.5%***		nd

* considérant un effet puits dans les forêts naturelles non-exploitées ; ** considérant un effet puits dans les seules zones déforestées depuis 1990 puis recolonisées par la forêt ; *** le secteur sylvicole est quasi-nul

En 2008 la Région Guyane met en place l'OREDD, Observatoire Régional de l'Energie et du Développement Durable, par la suite intégré à l'O-GEC (Observatoire Guyane Energie Climat) avec pour vocation de centraliser les informations sur la problématique Energie-Climat, d'améliorer les connaissances et de les mettre à disposition des collectivités locales. La nouvelle Collectivité Territoriale de Guyane (CTG) pilote aujourd'hui cette association qui rassemble de nombreux membres participants dont l'ADEME et l'ONF et qui préfigure un prototype d'Agence Régionale de l'Energie et de l'Environnement pour la Guyane. L'O-GEC inclut spécifiquement un volet Carbone qui s'intéresse particulièrement au secteur UTCF. Il est pour cela assisté par le CIRAD et par l'ONF qui fournissent un appui méthodologique et des données concernant le secteur forestier. Il inclue aussi la mise en ligne en temps réel des données des tours à flux Guyaflux (INRA à Paracou) et Nouraflux (CNRS aux Nourages). La dernière production concerne le bilan carbone de l'exploitation forestière sur le DFP (Zoogones and Dourdain 2016). Ces bilans peuvent s'appuyer sur l'ensemble des informations développées pour la Guyane sur ce sujet,

⁷ voir le chapitre « Méthodes de cartographie de la biomasse forestière » pour plus de détails

principalement les cartes de biomasse [21,22], le suivi de l'occupation des sols [38] et le dispositif de suivi forestier GUYAFOR, cités précédemment.

Le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols mis en place au niveau national pour suivre l'évolution des sols et de leurs usages a été déployé en 2006-2007 en Guadeloupe par l'INRA (10 sites installés) et est en cours de déploiement à Mayotte, à la Réunion et en Guyane sur une maille de 16km x 16km. Ce dispositif est piloté par le GIS-Sol qui regroupe INRA, IRD, ADEME, IGN, MAAF et MEEM. Ces données ne sont pour le moment pas accessibles en ligne. Elles concernent pour partie les sols forestiers et fournissent notamment des informations quant aux quantités de carbone organique stockés dans les sols et leur évolution dans le contexte des changements climatiques et des changements d'usage des terres.

3.1.5.C. DISPOSITIFS DE SUIVI DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE

Plusieurs initiatives et outils variés relatifs au suivi de la biodiversité ont été mis en place dans les ROM-COM. A la Réunion, le GEIR (Groupe Espèces Invasives⁸ de La Réunion) est constitué d'un ensemble d'institutions, d'agences, d'associations, de professionnels et de personnes ressources travaillant sur les espèces invasives qui menacent le patrimoine naturel de l'île. Le GEIR favorise la coordination des acteurs locaux, la planification et la mise en œuvre de la stratégie de lutte contre les espèces invasives à La Réunion dans le cadre du Programme Opérationnel des Lutte contre les Invasives (<http://www.especiesinvasives.re/geir/qu-est-ce-que-le-geir/>). Le GEIR est animé par la DEAL et diffuse ses informations *via* un portail-web incluant un dispositif de signalement d'espèces invasives par fiche de saisie en ligne. La Réunion bénéficie par ailleurs de la présence du Conservatoire Botanique National de Mascarin (CBNM) qui étend son activité sur l'ensemble des îles de l'archipel y compris Mayotte qui a pour mission d'inventorier et de suivre l'évolution de la flore régionale et des habitats naturels qui l'abrite, avec une approche territoriale. Des CBN sont aussi en cours de structuration et d'agrément dans les Antilles, l'un pour la Martinique, l'autre pour les îles de la Guadeloupe.

Deux herbiers, membres du réseau international des herbiers, sont aussi implantés dans les ROM-COM, l'un à la Réunion (Herbier Universitaire sous acronyme REU) et l'autre en Guyane (Herbier IRD de Cayenne sous l'acronyme CAY). REU renferme plus de 20 000 spécimens de planches d'herbier, plus de 1 000 spécimens humides, environ 500 échantillons en silicagel et 400 spécimens d'ADN (<http://www.mnhn.fr>). Il est intégré au réseau E-RecolNat du MNHN, qui travaille à la numérisation de ce patrimoine. CAY, géré par l'IRD à l'UMR Amap, a été créé en 1965, et rassemble aujourd'hui plus de 200 000 références, dont 134 000 géo-localisées, principalement en Guyane. Une interface web a été récemment développée afin de faciliter la consultation des données spatialisées, des listes taxonomiques et des spécimens. Le réseau GUYADIV, géré lui aussi par l'UMR Amap, a fortement contribué à l'alimentation de l'Herbier au cours des dernières années. Ce réseau est constitué de plus de 80 placettes botaniques d'un hectare en moyenne réparties sur 27 localités sur lesquelles plus de 75 000 arbres de plus de 10 cm de diamètre ont été répertoriés. GUYADIV est intégré au réseau amazonien ATDN assurant une visibilité et une contribution forte de la Guyane dans les efforts internationaux d'inventaire de la biodiversité amazonienne (<http://atdn.myspecies.info/>).

Ces dispositifs constituent les principales sources d'informations pour l'Observatoire National de la Biodiversité. Ils structurent la poursuite des efforts d'acquisition de connaissances et

⁸ Issu d'un anglicisme, le terme d'espèces invasives a été précisé par l'UICN pour désigner les espèces envahissantes (c'est-à-dire qui agrandissent leur aire de répartition naturellement ou suite à une modification anthropique) qui ont été introduites sur un territoire intentionnellement ou non (donc exotiques), et qui se révèlent nuisibles pour la biodiversité ou les activités humaines.

d'inventaires sur des territoires dont la biodiversité encore largement méconnue (Figure 10) est soumise à d'importantes transformations (Figure 11).

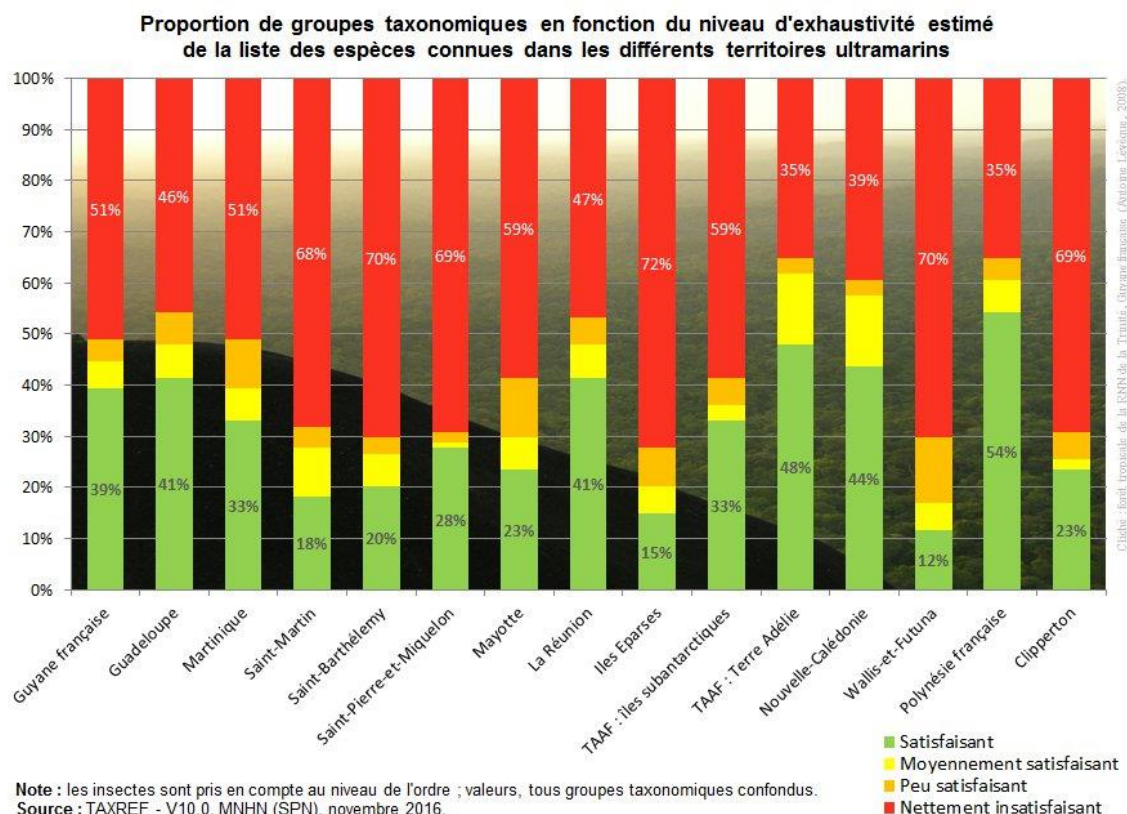


FIGURE 10 – NIVEAU D'EXHAUSTIVITE DE LA LISTE DES ESPECES CONNUES DANS LES OUTRE-MER (EXTRAIT DE [HTTP://INDICATEURS-BIODIVERSITE.NATUREFRANCE.FR/INDICATEURS/TOUS](http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/tous))

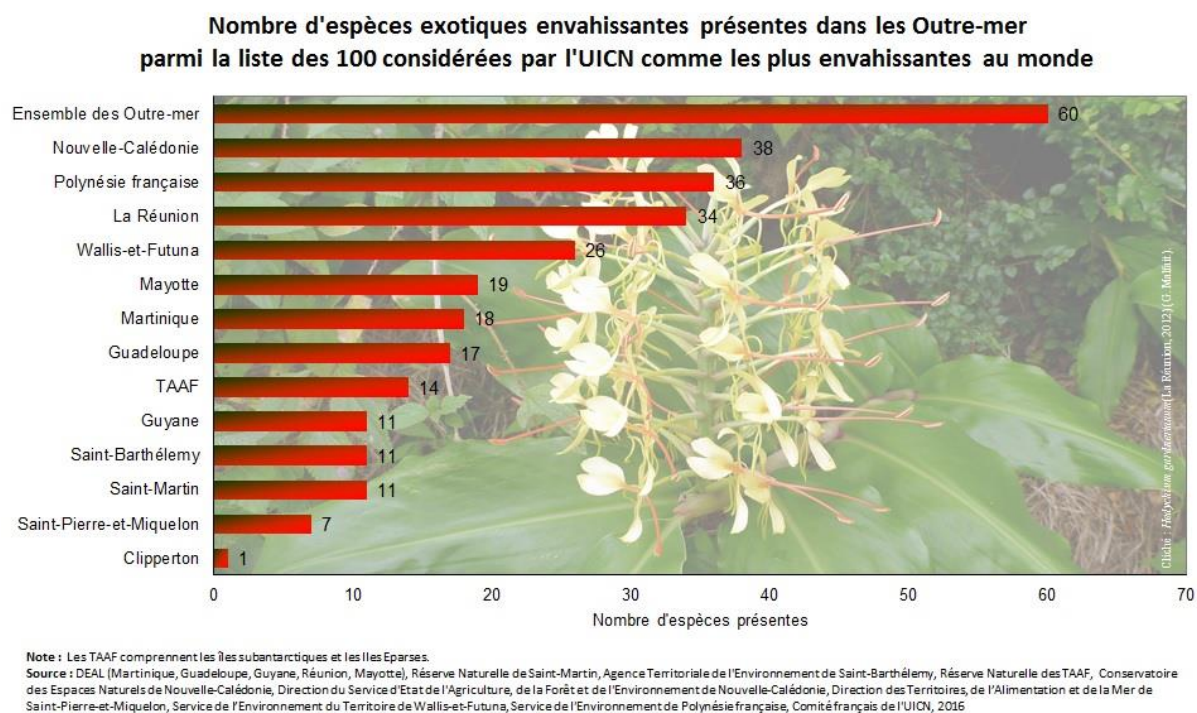


FIGURE 11 – NOMBRE D'ESPECES PRESENTES DANS AU MOINS UN DES TERRITOIRES ULTRAMARINS PARMI LA LISTE DE 100 ESPECES CONSIDEREES PAR L'UICN COMME LES PLUS ENVAHISSANTES AU MONDE (EXTRAIT DE [HTTP://INDICATEURS-BIODIVERSITE.NATUREFRANCE.FR/INDICATEURS/TOUS](http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/tous))

En Guyane, un projet d'Observatoire de la Biodiversité Amazonienne de Guyane a été initié en 2008 suivant d'une part la volonté de l'Etat de mettre en place un Office de la Biodiversité pour faciliter l'inventaire et la valorisation de la biodiversité guyanaise, et d'autre part, la volonté de créer un Conservatoire botanique par la Région. De ces deux démarches est né le projet d'OBAG qui rassemble aujourd'hui derrière lui la CTG, les services de l'Etat et les ONG. Ces acteurs soutiennent de façon unanime la proposition de l'OBAG comme Agence Régionale de la Biodiversité. Ce projet attendait la promulgation de la loi « Biodiversité » pour être officiellement créé avec le statut d'Etablissement Public de Coopération Environnementale (EPCE). La CTG pilote sa mise en place et financerait partiellement l'Observatoire à l'aide de la redevance minière (taxe de 0.5% sur la production aurifère).

L'ensemble de ces dispositifs contribuent à l'alimentation de l'INPN (Inventaire National du Patrimoine Naturel - <https://inpn.mnhn.fr/accueil/presentation-inpn>) organisé par le MNHN, en lien avec le SINP (Système d'Information sur la Nature et les Paysages - <http://www.naturefrance.fr/>) et l'ONB (Observatoire National de la Biodiversité) qui a développé des indicateurs spécifiques Outre-mer intégrant notamment des indices d'exhaustivité des connaissances des espèces d'outre-mer, ou encore l'évolution des principales espèces exotiques envahissantes sur les ROM-COM.

Enfin, une plate-forme spécifique pour le suivi des espèces envahissantes dans les ROM-COM est portée par l'UICN dans le cadre de l'Initiative sur les espèces exotiques envahissantes en outre-mer (<http://www.especes-envahissantes-outremer.fr/>) depuis 2005. Ce site internet rassemble l'ensemble des documents spécifiques à cette thématique sur l'outre-mer (dont cinq études diagnostics et stratégiques concernant Mayotte, la Guyane, les Antilles et la Réunion), la mise à jour des listes et statuts des espèces envahissantes, les programmes d'actions et guides techniques développés sur ces territoires, etc.

3.1.5.D. SCIENCE PARTICIPATIVE ET NOUVELLES TECHNOLOGIES

De nouveaux types d'observatoires se mettent actuellement en place dans le cadre des sciences participatives et du développement des nouvelles technologies nomades s'appuyant sur la téléphonie mobile et autres objets connectés. Dans les ROM-COM, des initiatives de ce type ont été déployées en s'appuyant sur la suite logiciel Pl@ntNet, dont le principe est de permettre la reconnaissance des espèces végétales par l'image et de faciliter la collecte de données d'occurrence par les non-botanistes (<http://www.plantnet-project.org/papyrus.php>). La suite-logicielle Pl@ntNet développée par le CIRAD et l'INRIA en partenariat avec TelaBotanica rassemble tout un système numérique qui a été en partie déployé sur la Réunion (2014), la Guyane (2015) et la Guadeloupe (2017) dans le cadre du projet Floris'Tic (<http://floristic.org/>). L'application mobile gratuite permet aux utilisateurs d'effectuer des requêtes de reconnaissance à partir de photographies de l'individu ou d'organes de la plante, qui seront comparées à une banque d'images afin de proposer une liste d'espèces potentielles. Les images envoyées et partagées par les utilisateurs viennent enrichir la banque d'images de référence. Les déploiements effectués dans les ROM-COM consistent en la collecte de jeux de données images permettant d'amorcer la reconnaissance des principales espèces végétales (environ 1200 espèces à la Réunion, 900 en Guyane), et l'organisation d'échanges avec les acteurs locaux pour la définition de modalités d'animation et de participation. Ces outils permettent de collecter rapidement et gratuitement une grande quantité de données géo-localisées en impliquant le grand public. Des travaux de thèse sont actuellement en cours à l'UMR Amap pour mettre au point des méthodes permettant l'exploitation non biaisée de ces données pour l'étude des aires de distribution des espèces et le suivi des dynamiques de populations. L'outil initialement développé pour le contexte métropolitain a dépassé les 3.2M de téléchargement et les 10M de données collectées en 4 ans et suit une dynamique de progression très rapide.

3.1.6. PORTAILS DE DIFFUSION OPERATIONNELS

Dans le cadre de la mise en place du SINP qui vise à la réduction de la dépense publique en permettant le partage ou l'acquisition de données mutualisées, le décloisonnement des systèmes d'informations et le développement d'outils partagés générateurs d'économies d'échelle, plusieurs portails de diffusion régionaux ont été mis en place et regroupent l'essentiel des informations concernant l'environnement en général et les données forestières en particuliers. Cette démarche est centralisée par les DEAL mais co-construite avec une grande variété d'acteurs principalement les collectivités locales, les établissements publics et les associations en lien avec l'environnement. Chaque territoire possède aujourd'hui son géo-portail propre qui assure une standardisation des données selon la norme européenne INSPIRE et une mise en ligne des données.

A la Réunion, c'est le portail d'information très spécialisé, Mascarine-Cadetiana du CNBM (<http://mascarine.cbnm.org/mascarine/>) qui permet la mise en ligne des données flore et habitats. En Guadeloupe, le portail Karunati (<http://karunati.fr/>) lié à la plate-forme open-data KaruGéo (<http://www.karugeo.fr/accueil>) centralise l'ensemble des informations cartographiques et observations d'espèces sur le territoire. GéoMartinique (<http://www.geomartinique.fr/accueil>), GéoMayotte (<http://www.geomayotte.fr/accueil>) et GéoGuyane (<http://www.geoguyane.fr/accueil>) sont des portails qui proposent un catalogue de données, une cartothèque, et un navigateur cartographique qui dépassent largement le cadre des données environnementales *stricto sensu* pour centraliser l'ensemble des données publiques spatialisées disponibles sur ces territoires.

En Guyane, la CTG a aussi mis sur pied sa propre plate-forme *Guyane-SIG* (<http://www.guyane-sig.fr/>), en 2014 qui vise à faciliter la diffusion des données spatialisées auprès des collectivités, mais aussi à compléter les référentiels IGN incomplets sur le territoire comme la BDparcellaire ou la production de mosaïque Pléiades-SPOT 2015 pour suppléer au manque de couverture BDortho© (dont la plus récente date de 2006). Depuis la rétrocession du dispositif SEAS par l'IRD, ce portail intègre aussi le dispositif d'accès aux images satellitaires produites par ce dispositif pour la Guyane et les Antilles. Les données sont accessibles aux collectivités et acteurs publics partenaires. Cependant d'importantes difficultés d'accès aux images sont déplorées par les utilisateurs, depuis cette phase de transition. Le Labex CEBA (Centre d'Etude de la Biodiversité Amazonienne), qui rassemble l'essentiel des acteurs de la recherche en Guyane, a aussi mis en place un géoportail qui a pour but d'inventorier les données produites par les organismes de recherche et de les organiser dans un catalogue de méta-données spatialisées, les données accessibles n'étant accessibles que sur demande. Ce portail finalisé en 2014 est géré et hébergé par l'UMR Amap à Montpellier (<http://vmcebagn-dev.ird.fr/geonetwork/srv/eng/search>).

Le monde associatif a aussi produit son propre géoportail dédié au suivi de la faune sauvage : Faune-Guyane mis en place fin 2011 dans le cadre du projet LIFE+DOM (<http://www.faune-guyane.fr/>). Le portail est issu d'une collaboration entre 4 ONG spécialisées dans le suivi de groupes différents : le GEPOG (Groupe d'Etude et de Protection des Oiseaux de Guyane) pour les oiseaux, le Groupe Chiro pour les Chiroptères, Kwata pour les autres mammifères, et la Société Herpétologique de France pour les reptiles et les amphibiens. Ce portail participatif est ouvert à tout contributeur. Les données d'observation naturaliste, après validation par un expert-référent d'une des associations membres, sont mises à disposition du public. Ce dispositif connaît un grand succès avec plus de 500 contributeurs et 350 000 données accumulées en 5 ans.

Aucun géo-portail spécifique n'est développé pour le territoire de St Pierre-et-Miquelon. Au niveau national, le géo-portail de l'IGN propose quant à lui une visualisation des informations cartographiques forestières produites par l'IGN sur la Guadeloupe.

3.1.7. SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS RECUEILLIS

L'ensemble des éléments recensés ci-dessus ont été utilisés pour fournir un diagnostic synthétique quant à la capacité des territoires à réaliser un suivi régulier des habitats forestiers au regard des outils actuellement à leur disposition (sans préjuger des ressources humaines disponibles pour cette réalisation). Chaque dimension précédemment abordée a été notée suivant les conventions indiquées sur le tableau 11 et schématisée sur la figure 12.

De façon générale, les territoires disposent de **bonnes facilités d'accès aux images** soit aériennes *via* les produits IGN (excepté la Guyane) soit satellitaires *via* les dispositifs ThéoGéoSud-SEAS (excepté SPM) et de **portails de diffusion et d'échanges de données opérationnels** développés dans le cadre de la démarche SINP (excepté les petites îles). La plupart des territoires disposent aussi de **référentiels typologiques et floristiques consistants** couvrant bien la diversité des habitats forestiers, mais les **productions cartographiques** permettant de renseigner la distribution spatiale de cette diversité sont **globalement hétérogènes et typologiquement limitées** (cartes de végétation anciennes ou incomplètes). Les cartes de distribution des stocks de carbone forestiers sont encore plus rares exceptées aux Antilles et en Guyane, qui disposent de plusieurs cartes récentes, mais améliorables. De fait, les **données de terrain** servant de base de calibration et validation aux productions cartographiques sont généralement **insuffisantes notamment aux Antilles** alors que la Guyane, la Réunion, Mayotte et SPM ont récemment entrepris des campagnes de collecte en ce sens. Les **dispositifs permanents** permettant un suivi de la dynamique forestière sont encore plus **mal répartis entre les territoires** (bien développés en Guyane et en Guadeloupe), mais absent ou balbutiant ailleurs. Enfin, **seule la Guyane dispose de dispositifs de surveillance** régulière de l'évolution du couvert forestier, alors que les autres territoires disposent au mieux de quelques études ponctuelles sur des pas de temps très espacés.

TABLE 11 : SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES LIEUX PAR TERRITOIRE

Thèmes Notes <i>Territoires</i>	Cartes de « diversité forestière »	Cartes carbone forestier	Suivi évolution surface	Suivi dynamique forestière	Données terrain	Référentiels floristiques	Accès images aériennes	Accès images satellites	Portails de diffusion et d'échange
3	cartes récentes de végétation, d'habitats et des formations végétales disponibles (-0.5/ carte manquante)	cartes biomasse et carbone des sols récentes (< 5ans) et accessibles (-0.5 point si imprécise)	suivi régulier et exhaustif	dispositif ancien plutôt représentatif	données quantitatives et qualitatives récentes, assez structurées, assez représentatives	Herbiers, conservatoires et flore de référence	couverture complète et régulière par IGN (tous les 4-5 ans)	accès gratuit à l'image via un dispositif territorial ancien	un portail centralisant toutes les données écologiques stricto sensu
2	Au moins une carte récente et une carte ancienne disponible parmi ces trois items (-0.5 point si incomplète)	Au moins une carte récente et précise (-0.5 point si incomplète ou difficilement accessible)	suivi régulier sur une thématique	dispositif récent plutôt représentatif	données qualitatives récentes et structurées (-0.5 points si difficilement accessibles)	Deux de ces éléments disponibles	couverture complète mais irrégulière (tous les 6-10 ans)	accès gratuit à l'image via un dispositif local récent	plusieurs portails thématiques sur des données écologiques stricto sensu
1	Seulement une carte disponible (-0.5 point si ancienne)	Une carte ancienne (>5 ans) ou données disponibles pour développement	suivi irréguliers	dispositif récent non représentatif	données quantitatives ou qualitatives structurées anciennes	Un de ces éléments disponible	couverture régulière mais incomplète	accès gratuit à l'image via un dispositif voisin	un portail local pour données environnementales sensu lato
0	Pas de cartes disponibles	aucune carte disponible	pas de suivi	pas de dispositif permanent	très peu de données quantitatives et qualitatives	Aucun (+0,5 si en cours de montage)	couverture irrégulière incomplète	pas de dispositifs particuliers	pas de portail local
<i>Guyane</i>	2	2,5	2,5	3	3	2,5	0,5	3	2,5
<i>Guadeloupe</i>	1,5	1,5	1,5	2	1	1,5	3	1,5	3
<i>Martinique</i>	1,5	1,5	1	0	1	1,5	3	1,5	1
<i>Réunion</i>	2	0	0,5	1	2	3	1,5	2	2,5
<i>Mayotte</i>	1	0,5	0	0	1,5	1	3	1,5	1
<i>St Pierre et M</i>	1,5	0	0	0	2,5	1	1,5	0	0
<i>St Martin</i>	0	0	0	0	0	1,5	2	1,5	0
<i>St Barthélemy</i>	0	0	0	0	0	1,5	1,5	1,5	0
<u>Moyenne</u>	<u>1,19</u>	<u>0,75</u>	<u>0,69</u>	<u>0,75</u>	<u>1,38</u>	<u>1,68</u>	<u>2,00</u>	<u>1,56</u>	<u>1,25</u>



FIGURE 12 – REPRESENTATION GRAPHIQUE DU TABLEAU 11 PAR DES PROFILS RADAR SYNTHETISANT L'ETAT DES LIEUX SUR LES DIFFERENTS ROM-COM

3.2. ETAT DE L'ART ET PROSPECTIVES

3.2.1. METHODE DE CARTOGRAPHIE DES HABITATS ET FORMATIONS VEGETALES

Résumé :

- L'analyse bibliographique met en évidence plusieurs approches possibles pour la cartographie des habitats naturels et formations végétales à large échelle... :

❑ la classification d'images multi-spectrales à haute résolution particulièrement efficace sur séries temporelles et récemment améliorée grâce aux développements de nouveaux "classifieurs" ([chap 3.2.1.A.I](#)) ;

❑ l'analyse orientée objet des images à très haute résolution spatiale très efficace mais beaucoup plus complexe à mettre en œuvre sur de grandes surfaces ([chap 3.2.1.A.II](#)) ;

- ... et des méthodes moins adaptées aux approches régionales ou toujours en cours de développement...(chap 3.2.1.A.III) :

❑ l'imagerie hyper-spectrale qui présente un fort potentiel pour une caractérisation fine des végétations en terme de compositions mais avec des coûts encore très importants et une forte exigence de technicité ;

❑ les relevés LiDAR aéroportés qui permettent une caractérisation fine de la structure des peuplements qui peut venir compléter une approche spectrale, mais qui est insuffisante en elle-même pour la cartographie des formations végétales.

❑ des produits radar plus efficaces pour la cartographie des milieux ouverts que pour celle des milieux forestiers

❑ l'analyse de texture sur les prises de vues aériennes et images à très haute résolution pour une caractérisation des formations végétales de transition.

- Les essais effectués confirment plusieurs points mis en avant par l'étude bibliographique (chap 3.2.1.A.IV) :

❑ l'importance de l'acquisition de données dans les bandes spectrales du proche et du moyen-infra rouge pour discriminer les formations forestières et la bonne adaptation des produits LANDSAT et SENTINEL2 pour la détection des formations forestières particulières ([chap 3.2.1.B.I](#) et [3.2.1.B.III](#)) ;

❑ l'intérêt d'intégrer des variables contextuelles dans les approches cartographiques (modèle numérique de terrain, carte géologique, etc...) pour éviter les confusions lors des classifications automatiques ([chap 3.2.1.B.II](#) et [3.2.1.B.III](#)).

- Une cartographie spatialement précise, typologiquement robuste et détaillée nécessite des approches multi-sources, qu'il est envisageable de réaliser compte-tenu de la disponibilité et de la gratuité de nombreux produits (chap 3.2.1.C) :

❑ Images THR, telles que BDOrtho®, pour assurer la cohérence topologique, la précision spatiale ;

❑ Séries d'images multi-spectrales intégrant le moyen infra-rouge, tels les LANDSAT ou les SENTINEL2, permettant de discriminer les compositions spécifiques dans les classifications ;

❑ Modèles Numériques de Canopée, tels que ceux développés à partir de LiDAR, pour qualifier la structure des formations (hauteur et couverture) base des typologies ;

❑ Données in situ indispensable à la validation, la qualification et la caractérisation des types discriminés.

3.2.1.A. ANALYSE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Plusieurs articles de synthèse récents traitent spécifiquement de la cartographie des habitats naturels et comparent exhaustivement les types de produits disponibles et méthodes récemment développées [49-51]. D'autres articles de synthèse traitent plus généralement de la cartographie des occupations du sol, en comparant les méthodes ou en focalisant sur un type de produit ou une méthode en particuliers [52-57]. L'analyse des études de cas et les conclusions de ces synthèses s'accordent pour mettre en avant deux types de produits permettant d'obtenir de bons ou très bons résultats en termes de cartographie des habitats naturels et/ou occupation des sols : méthodes de classification sur séries d'images optiques multi-spectrales moyenne à haute résolution (MHR) et méthodes de détection orientées objets sur des images optiques à très haute résolution (THR). Mais c'est **la fusion et l'analyse de différentes sources de données complémentaires à différentes résolution qui assurent les résultats les plus efficaces en termes de richesse typologique.**

3.2.1.A.I. CLASSIFICATION DES TYPES DE VEGETATION ET D'OCCUPATION DES SOLS A PARTIR D'IMAGES MULTI-SPECTRALES

Les méthodes basées sur les images optiques MHR multi-spectrales sont généralement considérées comme les plus efficaces pour cartographier les grands types d'habitats [51] à large échelle. De fait, les produits MHR s'imposent actuellement comme le meilleur compromis coût-efficacité que ce soit pour une cartographie/suivi de l'occupation des sols, des grands types de végétation ou plus spécifiquement des types forestiers. Parmi leur atouts on note la fréquence de retour sur zone qui permet le développement de méthode de classification sur série-temporelle (Hansen and Loveland 2012, Corbane, Lang et al. 2015) et la richesse spectrale des capteurs MHR leur conférant une capacité à discriminer des catégories d'habitats relativement détaillés allant même jusqu'à la distinction de la composition en cas d'espèces dominantes (Corbane, Lang et al. 2015). Les séries temporelles fournies permettent de moyenniser les signaux en évitant les artefacts et/ou de caractériser les changements d'état réguliers comme la déciduité, la rotation de culture [58] ou les changements conjoncturels comme les coupes et dynamiques de recolonisation [59]. Le développement récent de nouvelles techniques de classification (telle que les SVM (Support Vector Machine), RF (Random-Forest) et réseaux de neurones) pouvant s'appuyer sur l'augmentation importante des capacités de calcul informatique a significativement amélioré les performances de ces classifications sur imageries multi-spectrales [60].

La méthode de classification sur série temporelle d'images multi-spectrales a déjà été mise en œuvre en Guyane par Gond et collègues [14], mais sur des produits basse résolution de type SPOT végétation (1km). Cette technique a été récemment reprise par Cherrington [42] sur des séries MODIS (à 500 m de résolution) aboutissant à une cartographie moins aboutie. Les images à basse, moyenne ou haute résolution, peuvent cependant poser des problèmes spécifiques à certaines catégories d'habitats de dimensions restreintes ou distribuées en bandes étroites et allongées [50]. De façon générale, les produits de type LANDSAT TM sont jugés plus performants que les produits SPOT du fait de leur plus grande richesse spectrale [50]. De fait, de nombreuses publications démontrent que le proche et le moyen infra-rouge, utilisées dans le calcul de plusieurs indices relatifs à l'état de la végétation, sont des bandes particulièrement importantes pour la discrimination des différents types de végétation [43]⁹.

Cette méthode de classification est celle actuellement déployée en France métropolitaine par le laboratoire CESBIO, pour la réalisation de cartes d'occupation des sols et le suivi des évolutions

⁹ Ces bandes NIR et SWIR sont présentes sur les capteurs LANDSAT et SENTINEL2 mais seule une bande NIR est présente sur les SPOT6/7 ou les Pléiades.

[61]. La chaîne de traitement **iota2** en *Open access* s'appuyant sur la technologie OTB (OrfeoToolBox) a été développée et abouti aujourd'hui à la production et l'amélioration progressive de couvertures complètes du territoire. Cette chaîne de traitement a été très récemment testée à la Réunion par le CIRAD avec des résultats encourageants en ce qui concerne la cartographie des formations naturelles (Figure 13) mais plus de difficultés pour la discrimination des couvertures agricoles et de l'urbain disséminé [62].

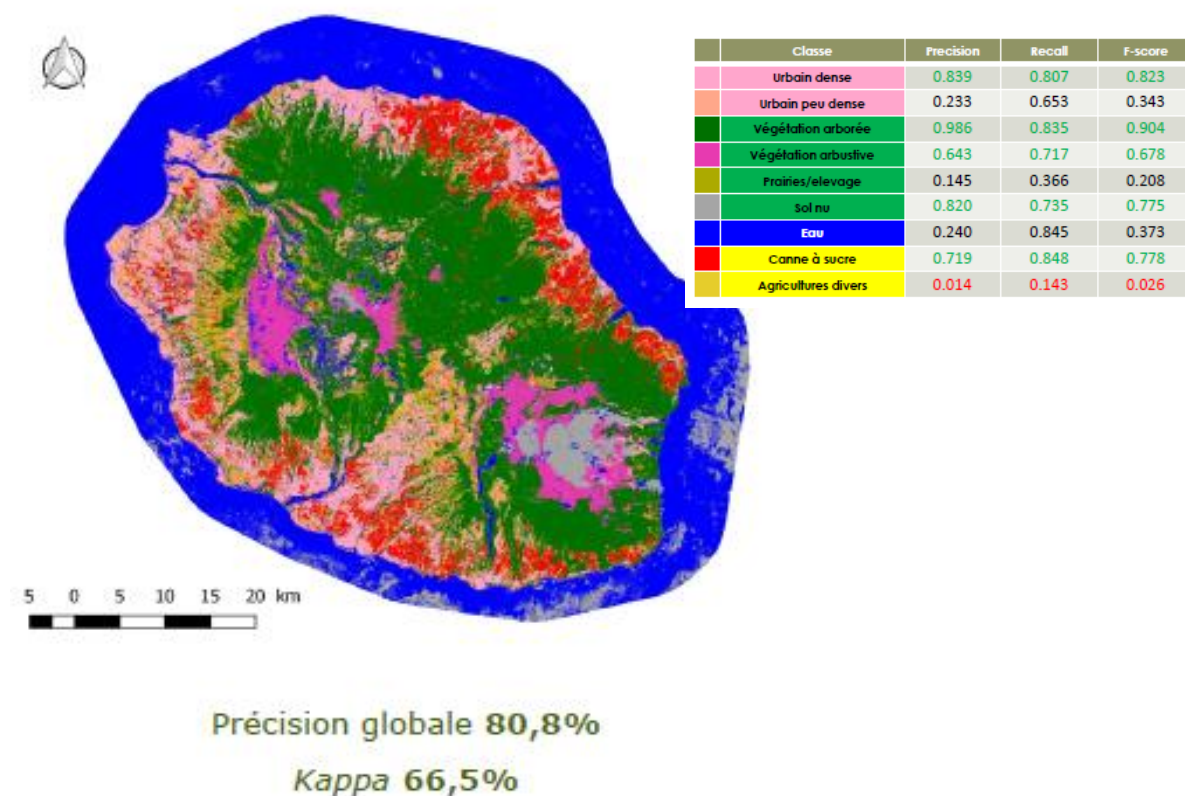


FIGURE 13 – RESULTATS DE LA CHAÎNE DE TRAITEMENT IOTA2 APPLIQUÉE SUR DES IMAGES LANDSAT8 ACQUISES EN 2014 SUR LA REUNION D'APRES GAETANO ET LAVENTURE 2016 [62]¹⁰

3.2.1.A.II. LES APPROCHES ORIENTÉES OBJETS ET LES ANALYSES DE TEXTURE SUR LES IMAGES A TRES HAUTE RESOLUTION

Les mêmes analyse sur images THR présentent aussi de bons résultats en termes de discrimination des formations végétales et types forestiers et permettent d'obtenir potentiellement plus de détails comme la différenciation des stades de végétation et des compositions [49], la densité de biomasse [53] etc... Cependant plusieurs inconvénients sont évoqués à leur sujet. Premièrement, la profusion de détails peut être un frein à leur applicabilité dans des milieux complexes comme les FTH [54]. La très haute résolution implique aussi un bruit important dû aux ombres, expositions, etc [51]. La plus grande complexité de l'information contenue dans ces images nécessite de développer de nouvelles approches de types OBIA pour Object-based Identification Algorithm [53] plus intégratives que les approches par pixel généralement utilisées sur les MHR. Des méthodes de traitement en routines de type OBIA ont

¹⁰ La statistique KAPPA est un test non paramétrique qui mesure le degré d'accord ou de désaccord entre différentes sources de données qualitatives représentant la même variable (dans le cas présent entre deux cartes – la carte produite versus la carte de référence). Une valeur de 1 indique une complète concordance entre les deux sources. Une valeur de 0 indique de fortes discordances.

récemment été développées pour être mise à disposition des opérateurs, avec par exemple e-Cognition [53], le système EODHaM [56] ou encore OrfeoToolBox [63], cependant leur utilisation pour la discrimination de types d'occupations ou de formation végétale n'est pas encore passée à des échelles régionales et nécessitent d'importantes puissances de calcul. Enfin, la moindre richesse spectrale d'une majorité de capteurs THR (tels SPOT6-7 ou Pléiades), peut-être véritablement limitante pour la séparabilité des habitats [49-51].

Les photographies aériennes, à résolution décimétrique, sont globalement peu considérées dans la bibliographie, sauf dans quelques revues très spécialisées. Elles sont souvent sortie du champ de la télédétection, car essentiellement basée sur l'interprétation [49,52] alors qu'elles sont souvent employées pour les cartographies forestières notamment en Europe, du fait de leur grande flexibilité en termes de modalités d'acquisition (intégration fréquente d'une bande infra-rouge en plus du panchromatique, acquisition stéréo, etc...), de leur très bonne résolution spatiale, et d'une longue expérience et intégration dans les systèmes d'inventaires forestiers nationaux [64]. Ces méthodes ont été utilisées dernièrement par l'IGN pour réaliser les cartes forestières de Martinique et de Guadeloupe. En milieu tropical, les photographies aériennes et images THR sont souvent utilisées pour les phases de validation ou de post-traitement [51,65] mais rarement en traitement automatisés sur de larges échelles. Les approches orientées objet peuvent aussi s'appliquer aux prises de vues aériennes (PVA) à des résolutions décimétriques. Ces méthodes OBIA ont été testées sur des systèmes forestiers simples comme les forêts boréales pour améliorer les processus de photo-interprétations souvent jugés trop coûteux et subjectifs [66] et récemment en forêt tropicale sur de petites surfaces [67]. Cette approche reste marginale et généralement limitée à une première phase de segmentation automatique (sur-segmentation) nécessitant ultérieurement le post-traitement d'un interprète pour la classification et l'assemblage des objets assurant une cohérence spatiale.

Les analyses de texture sont de plus en plus promues et appliquées sur les images THR [55] afin d'apporter une information contextuelle concernant spatiale l'agencement spatiale des objets étudiés à travers la variabilité, la répétition et l'autocorrélation du signal à différentes échelles. Les analyses de texture ont montré leur capacité à améliorer significativement les classifications des cartes d'occupation des sols [57] en caractérisant les propriétés structurales d'objets pouvant être confondu d'un point de vue optique. Différents outils et algorithmes ont été développés pour faciliter ces analyses et appliquées à la cartographie forestière : par GLCM (Gray-Level Cooccurrence matrix), distinction des compositions en forêt tempérée sur des images Ikonos [68] et de formations végétales en Guyane sur des prises de vues aériennes et Pléiades [69] ; avec FOTO (Fourier transform Textural Ordination), type de canopée en Amazonie sur QuickBird [70] et types de formation végétale en Nouvelle-Calédonie sur Pléiades [71], etc. Ces approches n'ont jusqu'à présent été appliquées que sur des surfaces relativement réduites et rarement employées dans des cartographies forestières mais elles sont très complémentaires aux analyses spectrales et présentent en cela un très fort potentiel d'amélioration des produits cartographiques [57].

3.2.1.A.III. HYPERSPECTRAL, LIDAR ET RADAR : DES METHODES EN DEVELOPPEMENT

Les images hyper-spectrales combinent à la fois la haute résolution spatiale et richesse spectrale par l'enregistrement de bandes étroites et continues hors du domaine visible à l'aide d'un spectromètre. Les données fournissent pour chaque pixel une signature spectrale, qui permet une discrimination thématiquement et spatialement très précise allant jusqu'à la mesure de concentration chimique, la détection d'espèces au niveau individuel ou à la caractérisation de l'état sanitaire des végétations [50,72]. Cependant cette technologie repose encore sur une communauté de chercheurs réduite et ne peut pas être considérée comme véritablement

opérationnelle pour des gestionnaires [50,73] notamment à des échelles régionales. Le LiDAR¹¹ présente lui aussi un véritable intérêt pour la cartographie des types de végétation et particulièrement des types forestiers. Il permet de caractériser la structure de la végétation à une résolution infra-métrique et fournit des informations précises pour la classification des formations telles que hauteur, densité, couverture... [73]. Mais il doit être combiné à des données spectrales pour une approche typologique complète [43]. Par ailleurs, ces deux techniques basées sur des acquisitions aéroportées souffrent de coûts surfaciques incomparablement supérieurs à ceux des données satellitaires, qui limitent leur répétabilité et leur emprise.

L'imagerie radar¹², comme le LiDAR, fournit une information essentiellement structurale. Malgré leur grande diversité dépendant des bandes d'acquisition (C, X, L, ...) et des méthodes de traitement (polarimétrie, interférométrie...) les techniques de type radar sont moins fréquemment utilisées pour la cartographie des formations végétales et aboutissent généralement à des résultats moins efficaces que l'optique [49,74]. Le radar présente un réel intérêt dans la discrimination des milieux ouverts et des milieux humides du fait de la sensibilité du signal à la texture et à l'humidité des formations [75]. Bien que moins dépendant des problèmes d'enneigement, les produits radar couvrent cependant des étendues temporelles et spatiales bien moins importantes que les produits optiques et présentent d'autres types de limites techniques comme le chatoiement [76]. La faible capacité de pénétration des radars actuels au travers de la canopée limite aussi sa capacité à discriminer les formations forestières denses. Parmi les images radar, celles du capteur ALOS-PALSAR en bande L relativement pénétrantes sont parmi les plus utilisées pour la cartographie forestière, mais ce satellite a été désorbité en 2011 et n'a été remplacé qu'en 2015.

3.2.1.A.IV. CONCLUSIONS

Ces articles de synthèse et études de cas concluent de façon générale sur deux principaux points. Premièrement, les données de télédétection ne sont pas substituables aux données de terrain *in situ* qui sont indispensables à la qualité des produits finis [49,50,52,73,77]. Par ailleurs, les problèmes de capacité technique (formation des opérateurs, capacité de calcul, accès aux images, contraintes financières) sont les principaux freins à la mise en application des méthodes de cartographie par télédétection aux échelles opérationnelles [51,73]. Une approche collaborative et interactive entre écologues, gestionnaires et télédéTECTEURS est donc absolument nécessaire pour la réussite des projets opérationnels intégrant la télédétection [49,51]. L'interdisciplinarité est incontournable.

Deuxièmement, pour la cartographie des types d'occupation du sol et/ou des formations végétales, les approches multi-sources par fusion de données s'appuyant sur des capteurs de différentes natures (Figure 14 et tableau 12) fournissent les meilleurs résultats du fait de leur complémentarité [43,76]. La fusion radar-optique se révèle très efficace de par la complémentarité des deux outils et permet par exemple de distinguer les stades d'évolution des formations végétales en ajoutant une information structurale à l'analyse spectrale [78]. Très simplement, l'intégration dans les processus d'analyse et de classification, de variables complémentaires aux données issues de l'imagerie (type MNT, cartes géologiques, parcellaire cadastrale, ...) permet aussi d'améliorer très significativement la précision des cartographies en

¹¹ LIDAR : (Light Detection And Ranging) est un capteur-récepteur qui émet un faisceau laser et analyse le signal retourné par les surfaces rencontrées (temps de retour, nombre de retour, énergie perdue ...) afin de produire une information 3D, renseignant sur la distance, la forme et la structure des objets étudiés.

¹² RADAR : (Radio Detection and Ranging) fonctionne comme le LiDAR sur un principe d'émission réception mais utilise l'écho d'ondes radio, à forte capacité de propagation, pour mesurer la distance et la structure des objets étudiés. La nature et la taille des objets détectables dépendent directement de la longueur d'onde utilisée à l'émission.

se rapprochant des notions d'habitats [56,57]. Enfin, l'association d'images THR et HR permet de dépasser l'inévitable compromis entre résolution spatiale, essentielle à la précision cartographique, et résolution spectrale, essentielle à la précision topologique.

TABLE 12 : DIVERSITE DES DONNEES ANALYSES EN TELEDETECTION ET DE LEUR USAGE POUR LA CARACTERISATION DE LA VEGETATION

Bandes	Longueur d'onde	Sensibilité	Principales utilisations
<i>Bleu</i>	0.45 – 0.51 μm	Sol / eau	Déciduité, dégradation
<i>Vert</i>	0.52 – 0.60 μm	Végétation	Vigueur de la végétation
<i>Rouge</i>	0.61 – 0.70 μm	Activité photosynthétique	Type de végétation, composition
<i>Proche Infra-rouge</i>	0.8 -0.9 μm	Structure foliaire	Densité du couvert végétal, composition
<i>Moyen IR</i>	1 – 2.4 μm	Humidité du couvert	Etat de la végétation
<i>Bandes thermiques</i>	10 – 13 μm	Chaleur	Humidité du sol
<i>Radar bande X</i>	~3cm (8–12 Ghz)	Structure de surface (faible pénétration)	Modèles de hauteur
<i>Radar bande C</i>	~5cm (4–8 Ghz)		Type formation ouverte
<i>Radar bande S</i>	~10 cm (2–4 Ghz)	Structure superficielle (moyenne pénétration)	Types formation ouverte
<i>Radar bande L</i>	~30 cm (1–2 Ghz)		Types forêt claire, biomasse
<i>Radar bande P</i>	~1m (<300 MHz)	Forte pénétration	Biomasse, forêt dense (?)

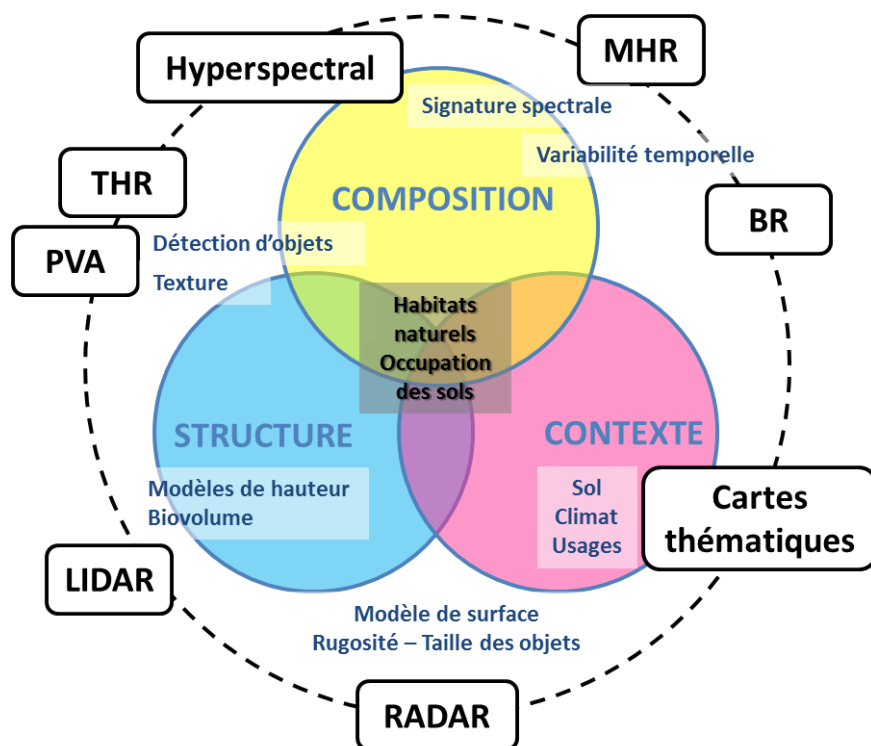


FIGURE 14 – DIVERSITE DES OUTILS DISPONIBLES POUR LA CARTOGRAPHIE DES HABITATS NATURELS ET DE L'OCCUPATION DES SOLS A PARTIR DE TELEDETECTION

La fusion de données issues de multiples sources d'acquisition présentent des avantages conceptuels historiquement reconnus depuis les premières heures de la télédétection [79]. Plusieurs méthodes de fusion de données sont possibles, certaines associant les approches orientées objet et les méthodes de classification classiques par pixels. (Figure 15). Une revue bibliographique récente démontre qu'une très large majorité des études adoptant ces approches

(28 sur 32) aboutissent à des précisions bien meilleures qu'en adoptant des approches mono-capteur [76]. Mais la plupart des travaux de ce type ont été menée en Europe et sur de petites régions ($< 3\,000\text{ km}^2$). Leur mise en œuvre en zone tropicale sur de larges surfaces ($> 10\,000\text{ km}^2$) reste donc une gageure que l'on peut cependant considérer comme toute à fait réalisable compte-tenu des rapides évolutions technologiques actuelles. La solution de fusion de données radar et optique et d'exploitation de séries temporelles est actuellement celle envisagée pour améliorer les performances de la chaîne de traitement iota2 du CESBIO pour la cartographie de l'occupation des sols. L'utilisation simultanée des séries d'images optiques de LANDSAT8 et radar de SENTINEL1 permet effectivement d'améliorer significativement la fiabilité des produits cartographiques obtenus (Figure 16). Les essais actuellement en cours dans le cadre du programme CarHab (Cartographie des Habitats en France métropolitaine) s'orientent eux aussi vers l'exploitation combinée de différentes sources de données : images THR de type SPOT6/7 pour une pré-segmentation et une discrimination des végétations basses par analyse de texture (FOTO) ; séries temporelles d'images LANDSAT pour discrimination des cultures ; intégration de la pente pour discrimination des sols nus sur éboulis des sols nus agricoles ...[80].

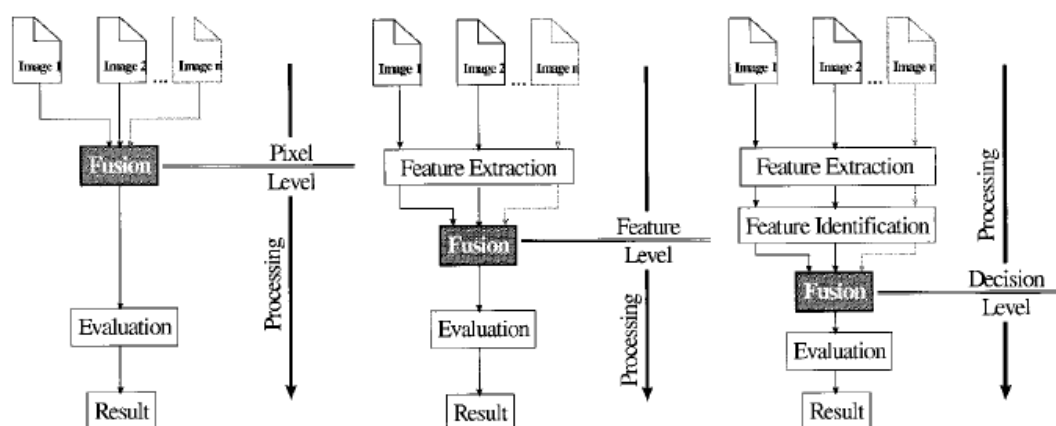


FIGURE 15 – DIFFERENTES METHODES DE FUSION DE DONNEES D'APRES POHL & VAN GENDEREN [79]

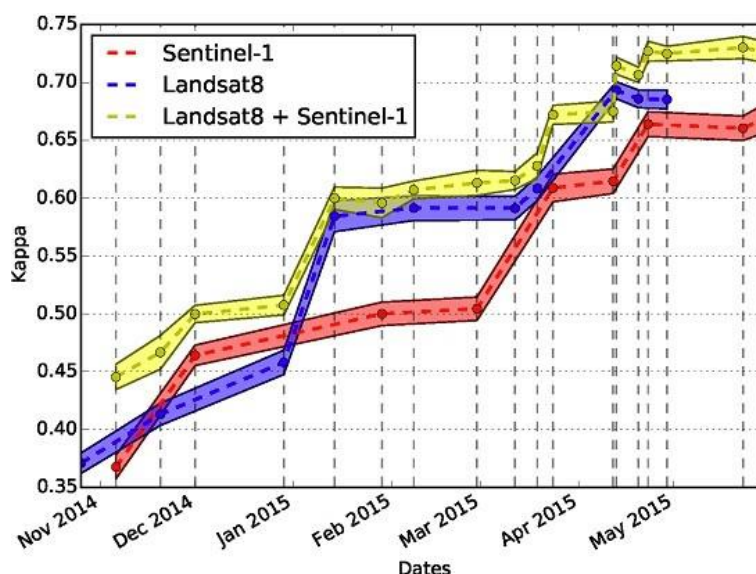


FIGURE 16 - EVOLUTION DE LA STATISTIQUE KAPPA¹³ EN FONCTION DU NOMBRE ET DE LA NATURE DES IMAGES EXPLOITEES D'APRES INGLADA ET VINCENT [61]

¹³ La statistique KAPPA est un test non paramétrique qui mesure le degré d'accord ou de désaccord entre différentes sources de données qualitatives représentant la même variable (dans le cas présent entre deux

La carte des formations forestières de Trinidad et Tobago [81] constitue en la matière la réalisation multi-source la plus exemplaire et la plus aboutie (Figure 17). Cette cartographie opérationnelle sur plus de 5 000 km² exploite des données à très haute résolution de type IKONOS couvrant la totalité du territoire ainsi que plusieurs mosaïques LANDSAT TM à haute résolution multi-saisonnières et pluriannuelles, auxquelles s'ajoutent des variables environnementales complémentaires. Elle s'appuie sur une méthode de classification simple par arbre de décision intégrant une grande diversité d'informations et aboutissant à une typologie riche de plus de 30 types forestiers.

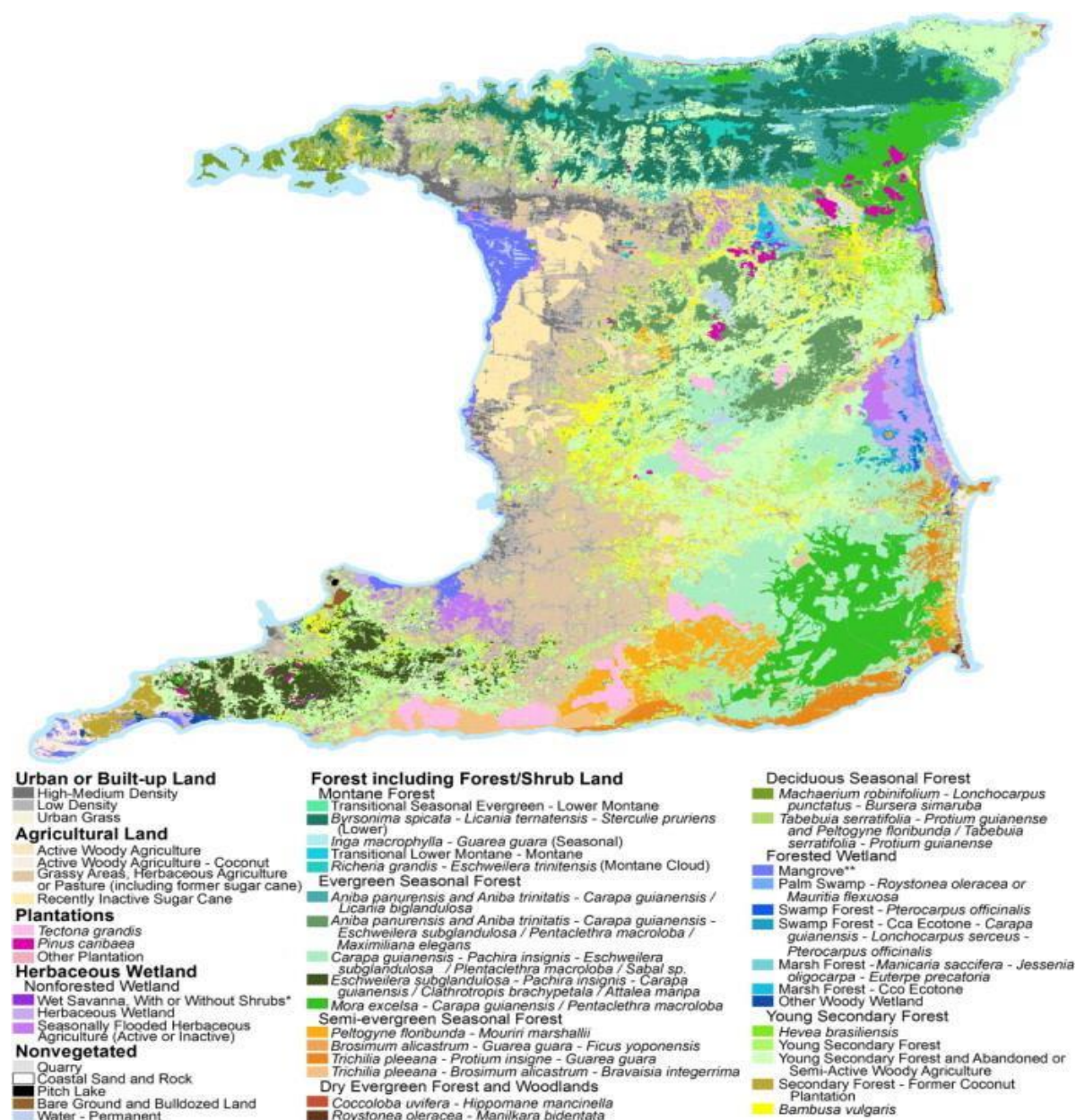


FIGURE 17 – CARTE DES FORMATIONS FORESTIERES DE TRINIDAD REALISEE A PARTIR D'UNE MOSAIQUE LANDSAT DE 2007 ET D'UNE SERIE DE TROIS MOSAÏQUES SAISONNIERES DES ANNEES 1985-1986-1987, D'APRES HELMER ET COLLEGUES [81].

cartes – la carte produite versus la carte de référence). Une valeur de 1 indique une complète concordance entre les deux sources. Une valeur de 0 indique de fortes discordances.

3.2.1.B. ESSAIS PROSPECTIFS

3.2.1.B.I. COMPARATIFS SPOT5, LANDSAT7 ET SENTINEL2 POUR LA CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES EN GUYANE

En Guyane, une première cartographie des principaux habitats forestiers a récemment été réalisée en combinant (i) la cartographie des formations végétales produite par [14] à partir d'une série temporelle à basse résolution d'images SPOT-végétation, avec (ii) des modèles géomorphologiques et hydrologiques, développées à partir de radar SRTM à haute résolution en variables complémentaires [13], et (iii) un réseau de relevés terrain de 3 132 placettes réparties sur l'ensemble du territoire. Ce produit fournit une cartographie prédictive des habitats déterminés par les variations de reliefs et de sols, mais n'intègre pas les formations végétales de faibles surfaces, et dont la distribution est plus aléatoire (végétation basses de savane-roche, forêts de palmiers, forêt mono-dominante à *Parinari*...).

Des travaux ont été menés par Pauline Perbet et Nicolas Karasiak du Parc Amazonien de Guyane [82,83] pour détecter ces formations particulières à partir d'interprétation d'images panchromatique à très haute résolution (SPOT6/7) et de traitement automatisé d'images multi-spectrales haute résolution (SPOT5) basé sur une classification supervisée par SVM. Un test a aussi été effectué avec les premières images SENTINEL2 disponibles pour la Guyane. Parallèlement, le même objectif a été poursuivi par Emil Cherrington (UMR Amap) à partir de longues séries temporelles d'images MODIS et d'une mosaïque multi-temporelle désennuagée et corrigée de tout effet artefactuel (notamment des effets de BRDF – Bi-directionnal Reflectance Distribution Function -) d'images multi-spectrales haute résolution de type LANDSAT7 (Figure 18).

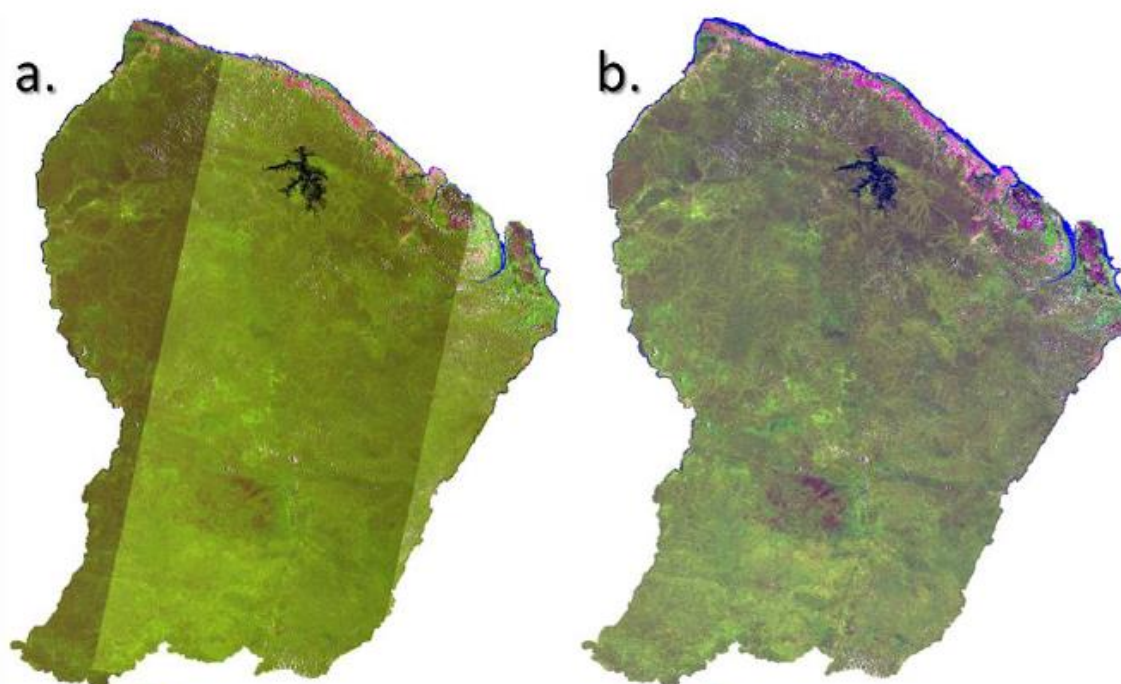


FIGURE 18 – MOSAÏQUES D'IMAGES LANDSAT 5 ET 7 CORRIGEE DES EFFETS DE BRDF (A DROITE) ET NON CORRIGEE (A GAUCHE) TIREES DE CHERRINGTON 2016 [42]

Les travaux de Perbet et Karasiak ont permis de cartographier précisément les formations non forestières, comme les affleurements rocheux et végétation basses, avec bon niveau de fiabilité : 71-78% en précision producteur et 100% en utilisateur lorsque l'on compare les traitements automatiques à partir de SPOT5 avec les photo-interprétations réalisées sur SPOT6-7 sur des zones focales. Les formations forestières particulières à *Parinari* sont aussi bien distinguées des

formations forestières communes (81-84% de précision en comparaison avec les relevés de terrains), mais elles sont fréquemment confondues avec les formations à palmiers-bâches. Les pinotières sont quant à elle mal discriminées à partir de SPOT5, mais les premiers essais avec le SENTINEL2 montrent une bien meilleure séparabilité grâce à la présence des bandes du moyen et lointain infra-rouge sur ces images (Figure 19). Un plug-in en open-source a été développé en quelques mois par Nicolas Karaziak [82] assurant la répétabilité de ces analyses dans l'espace (extension hors zone PAG) et dans le temps (analyses de séries temporelles).

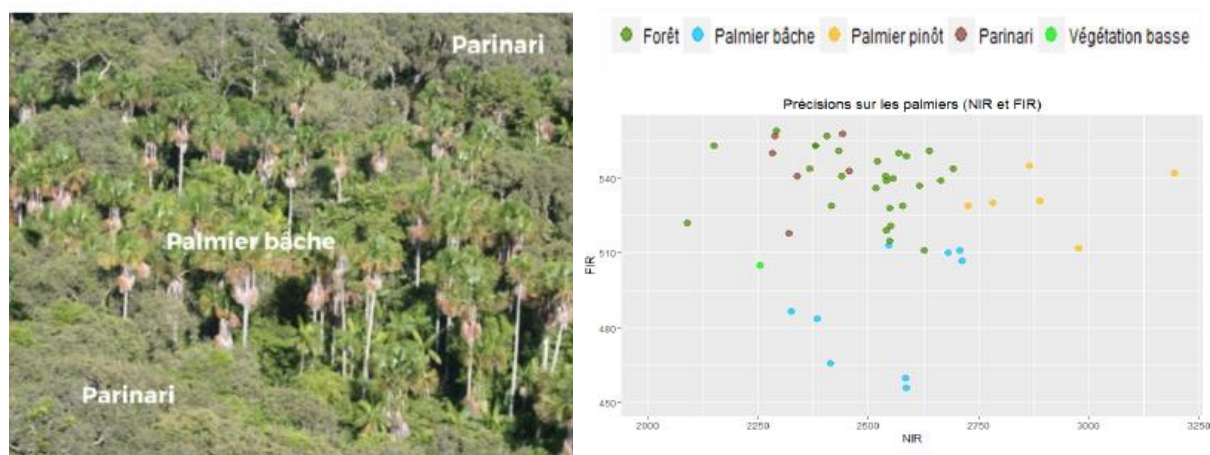


FIGURE 19 – DISCRIMINATION DES PINOTIERES ET FORMATIONS A PALMIERS BACHES SUR LES IMAGES SENTINEL2 A L'AIDE DES BANDES DU PROCHE ET MOYEN INFRA-ROUGE, EXTRAIT DE PERBET ET AL [83]

La classification réalisée à partir d'une mosaïque d'images LANDSAT7 de 2008 par Cherrington [42] abouti à des résultats très cohérents en termes de cartographie des formations à *Parinari* (98% de correspondance avec Perbet), des roches affleurantes et savane-roches (99 et 93% de correspondance avec Perbet) avec cependant des emprises généralement plus réduites (Figure 20). Les variations d'emprises entre les deux produits peuvent s'expliquer par les différentes périodes d'acquisition des images et les variations climatiques interannuelles pouvant modifier la signature des végétations (notamment des végétations basses), ou bien par des différences dans l'appréciation du degré de dominance des *Parinari*.

La carte de Cherrington discrimine par ailleurs plusieurs types au sein des végétations basses : cambrouses (42%), forêts à lianes (22%) et forêts secondaires (11%), ces typologies nécessitant cependant une poursuite des efforts de validation. Le croisement de sa cartographie avec les informations de l'OAM sur les secteurs miniers est cependant très concordant d'un point de vue spatial avec des formations à lianes et à bambous sur les pentes dégradées du massif de Dékou-Dékou (indiqué en formation basse par l'IGN sur le SCAN50®) ainsi que dans les anciens secteurs orpaillés et des formations secondaires sur les secteurs récemment exploités (Figure 21). Le suivi de statistiques de distribution des différents types d'occupation du sol cartographié par Cherrington en fonction de l'ancienneté de l'exploitation minière est aussi très cohérent : on observe en effet un pic des surfaces de sol nu sur les secteurs ouverts à l'exploitation depuis 3-4 ans, une augmentation de la surface des forêts secondaires et une diminution des sols nus avec l'ancienneté des sites à partir de ce pic (Figure 22).

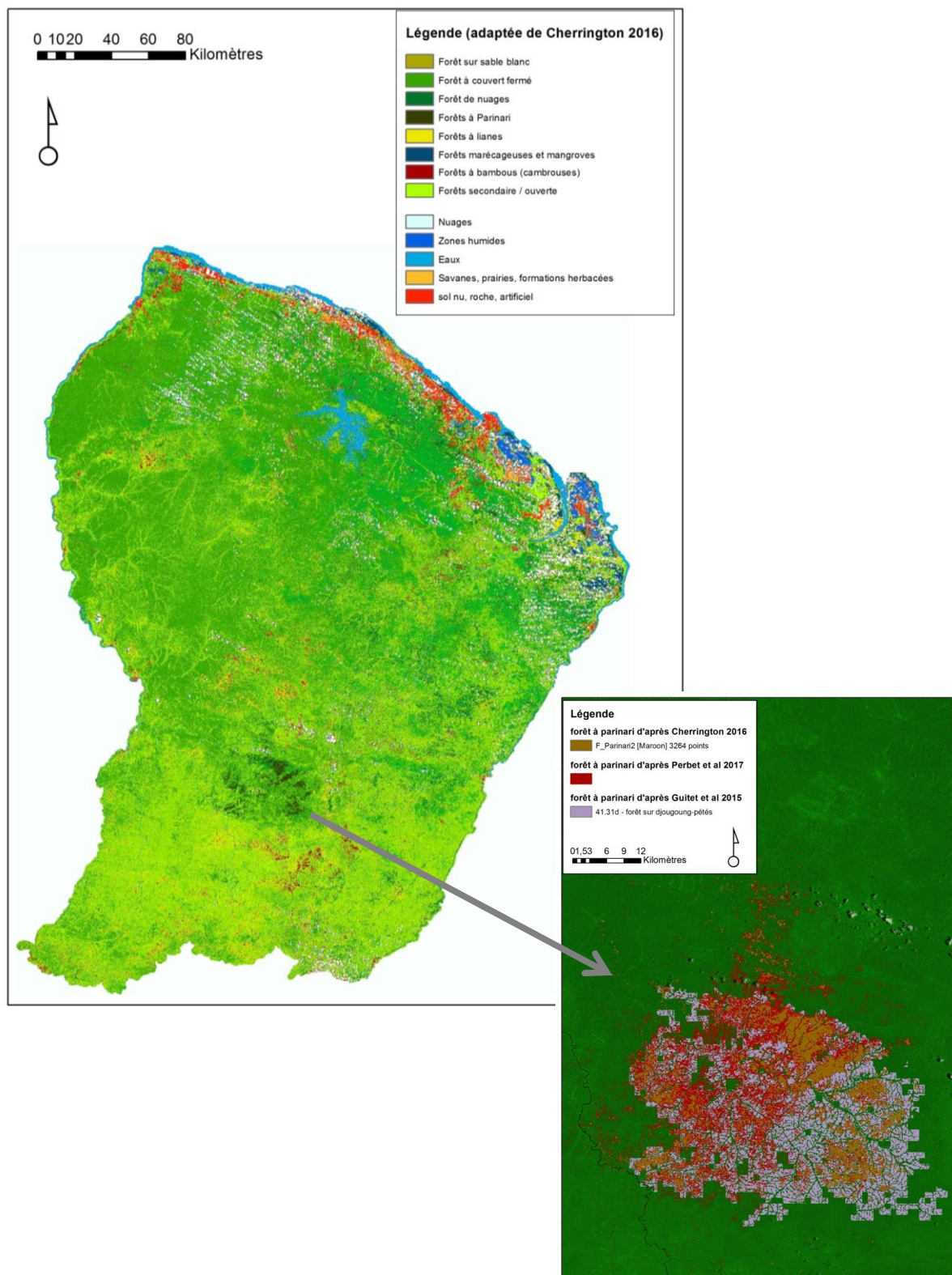


FIGURE 20 – ADAPTATION DE LA CARTE DE CHERRINGTON 2016 [42] ET COMPARAISON AVEC LES CARTES DE PERBET ET AL [83] ET CELLE DE GUITET ET AL 2015 [13] DANS LA ZONE DE LA WAKI AVEC FORMATIONS A *PARINARI*.

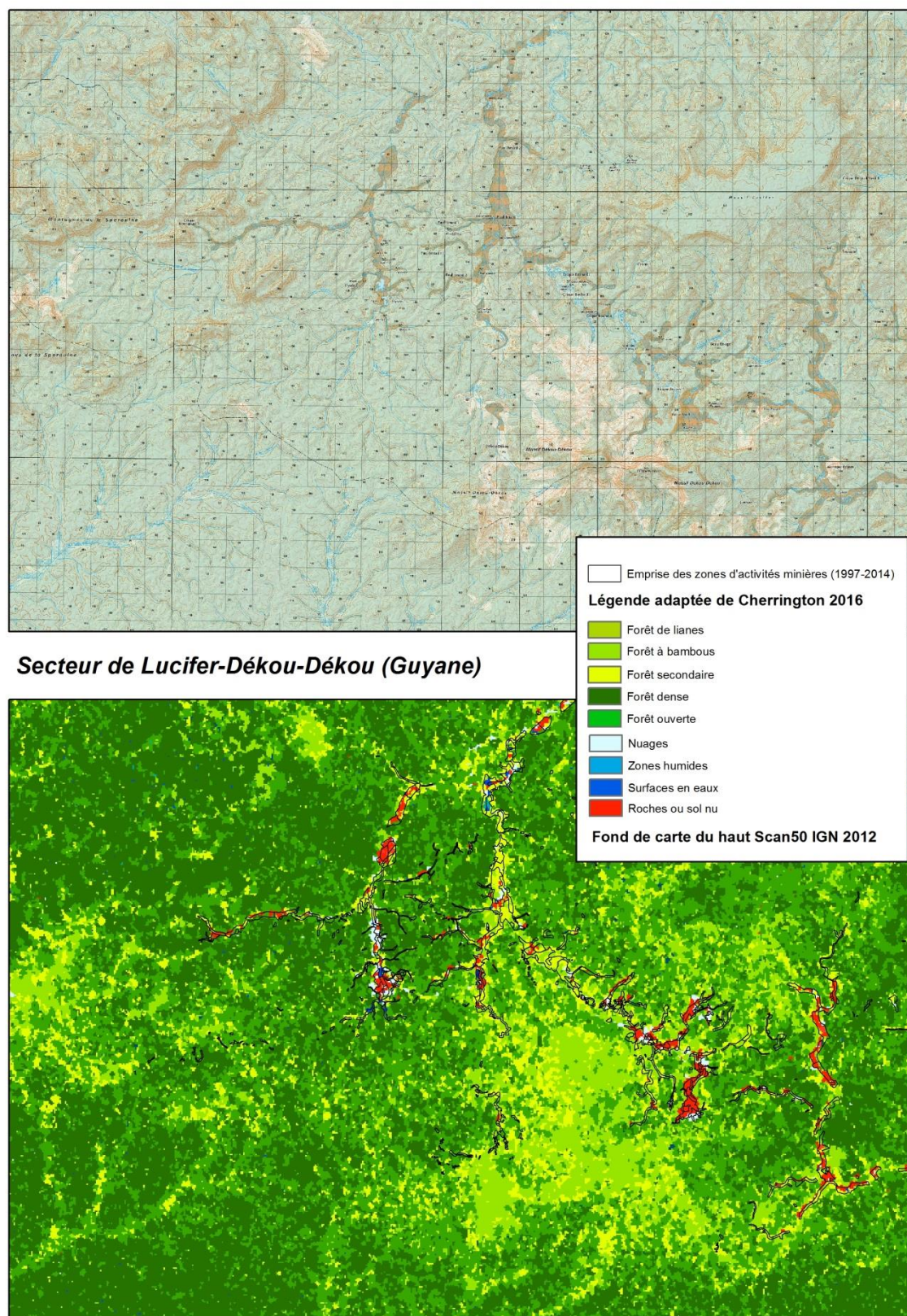


FIGURE 21 – CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS SECONDAIRES ET FORETS OUVERTES A BAMBOUS (CAMBROUSES) ET LIANES ADAPTEE DE CHERRINGTON [42] SUR LE SECTEUR MINIER DE LUCIFER DEKOU-DEKOU ET COMPARAISON AVEC LES PHOTO-INTERPRETATION DU SCAN50 ®.

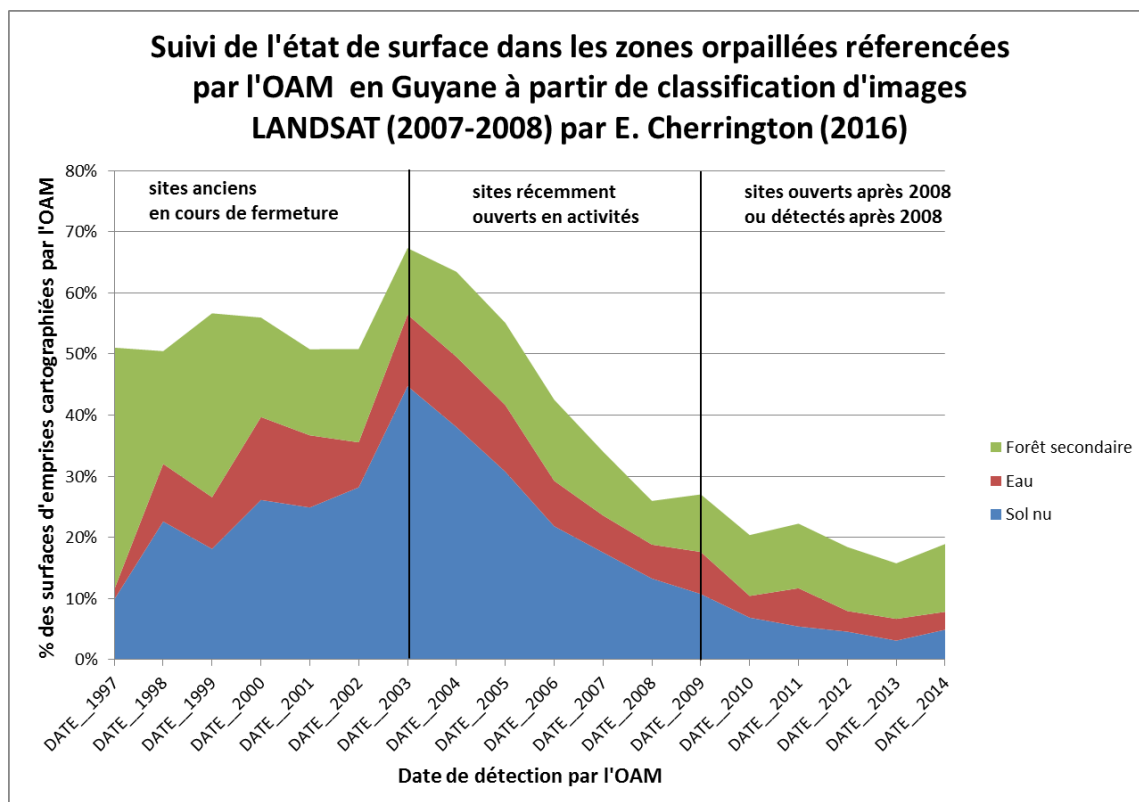


FIGURE 22 – PROPORTION DES DIFFERENTS TYPES D'OCCUPATION DU SOL CARTOGRAPHIES PAR CHERRINGTON [42] EN FONCTION DE L'AGE D'OUVERTURE DES SECTEURS MINIERES.

Les travaux de Perbet et Cherrington confirment l'efficacité des classifications automatiques supervisées sur des images multi-spectrales haute-résolution de type LANDSAT7-8, SPOT4-5 ou SENTINEL2 pour la cartographie des formations particulières de types formations ouvertes (savane-roche), végétations basses (cambrousses), forêts secondaires, forêts à forte dominance (*Parinari*, lianes), avec une résolution spatiale tout à fait acceptable <0,5 ha. Ils confirment l'importance des bandes du moyen infra-rouge pour la discrimination des variations de compositions des formations végétales. Ils démontrent la possibilité d'obtenir des mosaïques désennuagées à plus de 96% de bonne qualité spectrale y compris sur des secteurs à fort ennuagement comme la Guyane.

3.2.1.B.II. CONFRONTATION DES DONNEES LIDAR ET DES CARTOGRAPHIES DES FORMATIONS FORESTIERES EN GUADELOUPE – LIMITES DES METHODES DE PHOTO- INTERPRETATION

Les données LIDAR même acquises à faible densité (1-2 pts/m²) fournissent des informations très précises sur les structures des formations végétales notamment la hauteur de canopée à travers un modèle numérique de canopée (MNC), la distribution des différentes strates et par conséquent la densité de couverture locale. Hauteur et densité du couvert d'arbres sont les deux critères à la base des définitions internationales adoptées par la FAO pour désigner les types de formations forestières. En Guadeloupe, la confrontation de la carte des formations végétales [10] avec les couches MNC et densité de couverture arborée dérivées du LIDAR Litto3D montre des écarts importants entre interprétation et critères de définition des classes forestières. Par exemple, les classes « ligneux-bas » et « végétation colonisatrice » considérées dans les « autres terres » comprennent en moyenne 25% et 33% de couvert arborée respectivement (i.e. végétation de plus de 5 m de hauteur) et devraient donc en toute logique être majoritairement classées en « forêt » (>10% de couvert arboré) avec une qualification de « forêt secondaire ou

dégradée » (Figure 23). De fait, l'homogénéité des interprétations au sein du territoire et la qualification des types pourraient être significativement améliorée en intégrant les données LiDAR dans le processus cartographique (voir les hétérogénéités au sein des zones 1, 2 et 3 de la figure 24).

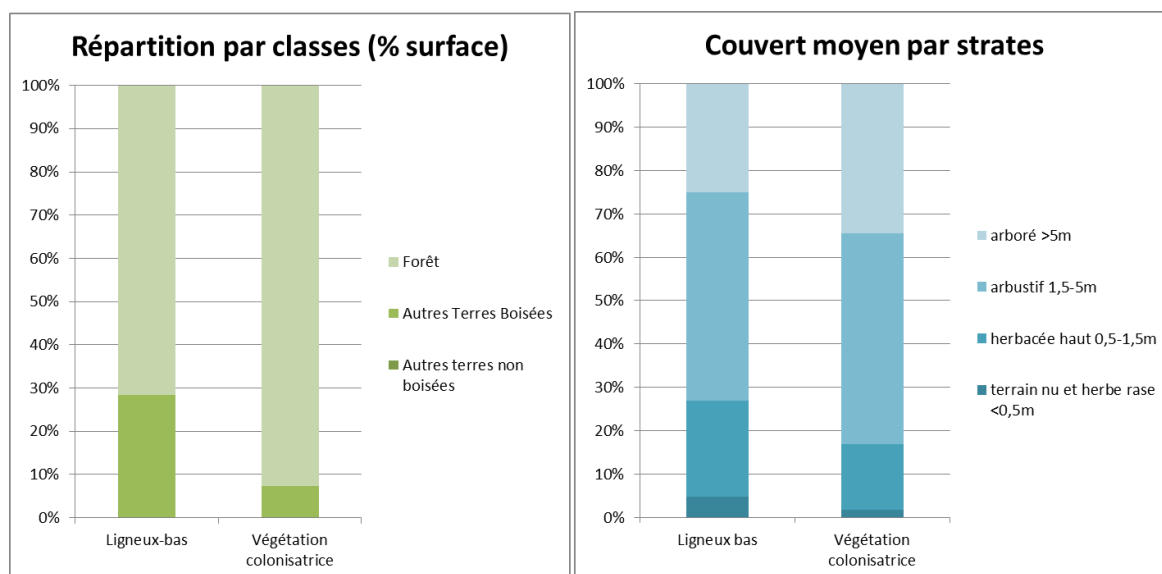


FIGURE 23 – COUVERT PAR STRATES DE HAUTEUR (A GAUCHE) ET CORRESPONDANCE THEORIQUE AVEC LES CLASSES FRA (A DROITE) POUR LES CLASSES « VEGETATION COLONISATRICES » ET « LIGNEUX BAS » DE LA CARTE DES FORMATIONS FORESTIERES DE GUADELOUPE [10].

Les statistiques sont calculées à partir du MNC de la litto3D et comparées aux seuils de couverts adoptés dans les définitions officielles de la FAO.

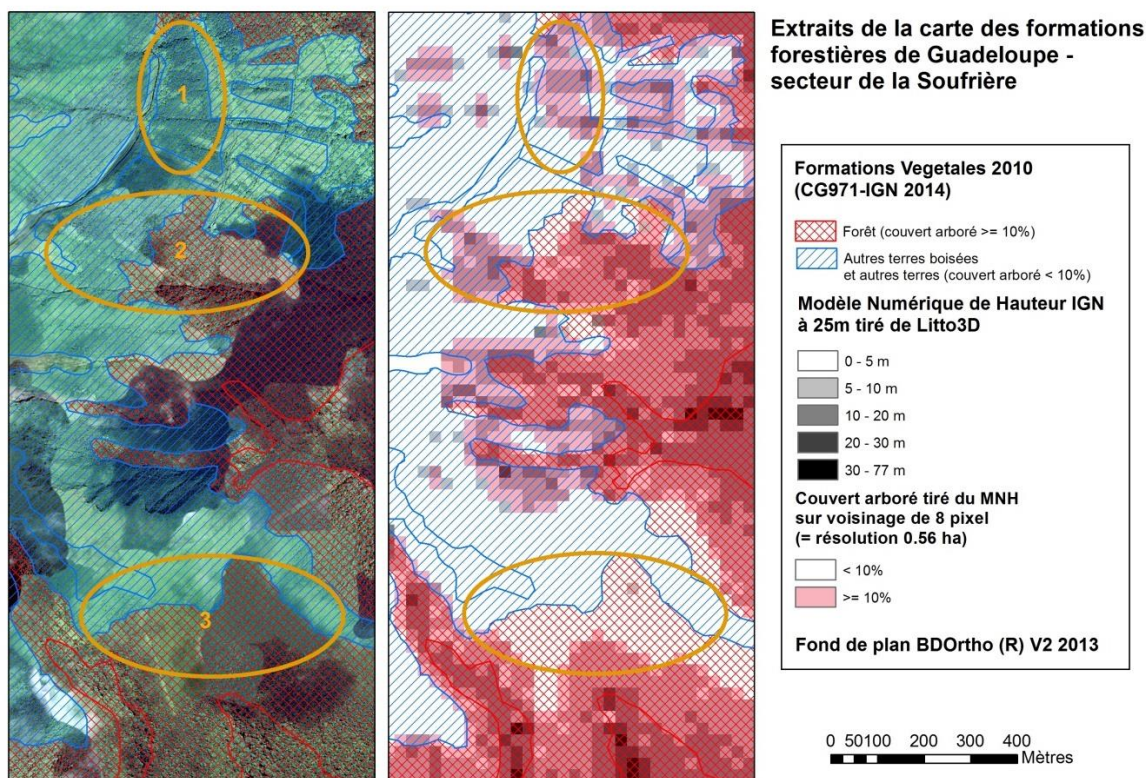


FIGURE 24 – ILLUSTRATION DES ECARTS CONSTATES ENTRE LA CARTE DES FORMATIONS FORESTIERES ISSUS DE PHOTO-INTERPRETATION [10] ET LES STATISTIQUES DE COUVERT ET HAUTEUR DE VEGETATION ISSUES DE LA LITTO3D SUR UNE ZONE TRES ENNUAGEE DE GUADELOUPE (SECTEUR DE LA SOUFRIERE)

3.2.1.B.III. TEST DE CARTOGRAPHIE DES GRANDS TYPES DE FORMATIONS VEGETALES A PARTIR DES DONNEES SENTINEL SUR MAYOTTE – LIMITES DES METHODES DE CLASSIFICATION

Plusieurs essais d'exploitation des données Sentinel pour la cartographie des formations végétales ont été réalisés sur Mayotte par Hakim Bennacer (GIP ECOFOR), puis par Anoumou Kemavo (ONF-International), afin de mesurer les avantages mais aussi les limites des méthodes de classification basée sur l'imagerie satellitaire. Ces essais ont été limités par le peu d'images Sentinel 2 disponibles à ce jour sur Mayotte, la priorité du programme COPERNICUS ayant été dans un premier temps portée sur la production d'images sur la zone Europe et Méditerranée. Les premiers essais de classification supervisée réalisés sur les images multi-spectrales Sentinel2 lors du stage de Master 2 ont été comparés à une carte d'occupation des sols de référence réalisée à partir de SPOT6 (Figure 25) et aboutissent à une précision globale de l'ordre de 85% sans post-traitement. Les confusions observées entre « mangroves » et « forêts denses » ou « forêts peu denses » peuvent être facilement évitées en ajoutant des variables contextuelles complémentaires comme l'altitude ou l'exposition. Plusieurs méthodes de classifications ont ensuite été comparées en termes de performances : Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), etc. Ces essais mettent en évidence la meilleure fiabilité de la méthode SVM, qui permet d'atteindre une précision moyenne de l'ordre de 95%. Ces résultats confortent les choix méthodologiques effectués par N. Karaziak et P. Perbet pour la cartographie des formations forestières particulières en Guyane. Ils mettent cependant en évidence les limites d'une approche mono-capteur trop simpliste, qui aboutit à des confusions grossières sur certaines classes.

Des essais ont aussi été lancés sur des images radar Sentinel1 ainsi que sur une série temporelle constituée à partir de ces mêmes images. Ces analyses n'ont pas été concluantes du fait la résolution spatiale des produits Sentinel1 disponibles sur Mayotte (40 m pour des données uniquement en EW – les données à 5 m en SM ou WV n'étaient pas disponibles). Cette définition était trop limitante dans le cas de l'étude d'un petit territoire tel que Mayotte.

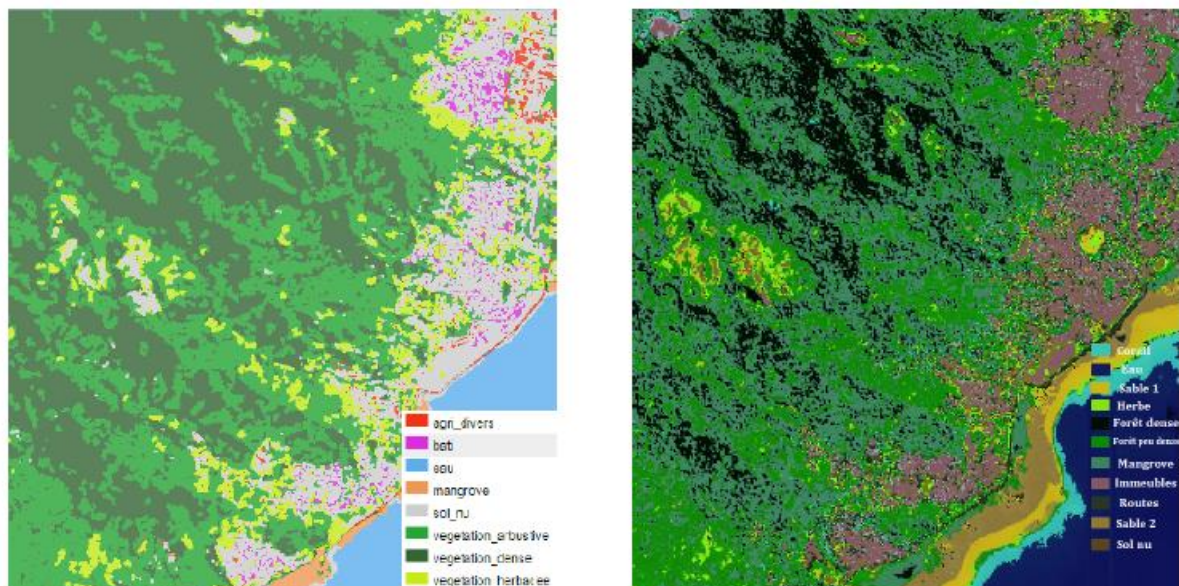


FIGURE 25 – CARTE DES PRINCIPALES FORMATIONS VEGETALES DE MAYOTTE OBTENUE A PARTIR D'UNE CLASSIFICATION SUPERVISEE PAR SVM D'IMAGES SENTINEL2 D'APRES BENNACER ([ANNEXE 3](#))

3.2.1.C. QUELLE METHODE ADOPTEE POUR UNE CARTOGRAPHIE DES HABITATS FORESTIERS DANS LES ROM-COM ?

Les cartographies des habitats forestiers et/ou formations végétales actuellement disponibles sur les ROM-COM ont été établis en intégrant de façon plus ou moins structurée plusieurs types et sources de données, exploitées de différentes méthodes. Elles fournissent de fait des produits relativement hétérogènes en termes de précision spatiale et de contenu typologique (Figure 26).

La carte des formations végétales de Mayotte à 24 classes a été établie principalement à partir **d'une classification de variables issues de données LiDAR**, et dans une moindre mesure d'images SPOT5, de BDOrtho et parcellaires [18]. Sa typologie s'appuie essentiellement sur des notions de structure. Les cartes des formations forestières de la Martinique à 15 classes [12] et de Guadeloupe à 17 classes [10] ont été établies par **photo-interprétation de PVA** et dans une moindre mesure par l'exploitation informelle de données LiDAR pour la Guadeloupe. Leur typologie s'appuie majoritairement sur des notions de structure et d'étages de végétation, et secondairement sur des critères de composition et contexte stationnel. A l'opposée, la carte des végétations de la Réunion à 19 classes s'appuie essentiellement sur **l'interprétation de variables contextuelles écologiques** croisée à l'occupation des sols [17]. Enfin la carte des habitats forestiers de Guyane intègre à la fois des notions de composition et de contexte écologique en **exploitant plusieurs sources et approches** : une **classification de données SPOT-végétation** [14], l'occupation des sols appréciée par **photo-interprétation de BDOrtho** [37] et une **analyse morpho-métrique de données SRTM** [84]. Elle s'appuie par ailleurs formellement sur **l'analyse de données de terrain**. On notera qu'aucun des produits actuels ne valorisent les informations apportées par les images LANDSAT pourtant mises en avant dans la bibliographie scientifique.

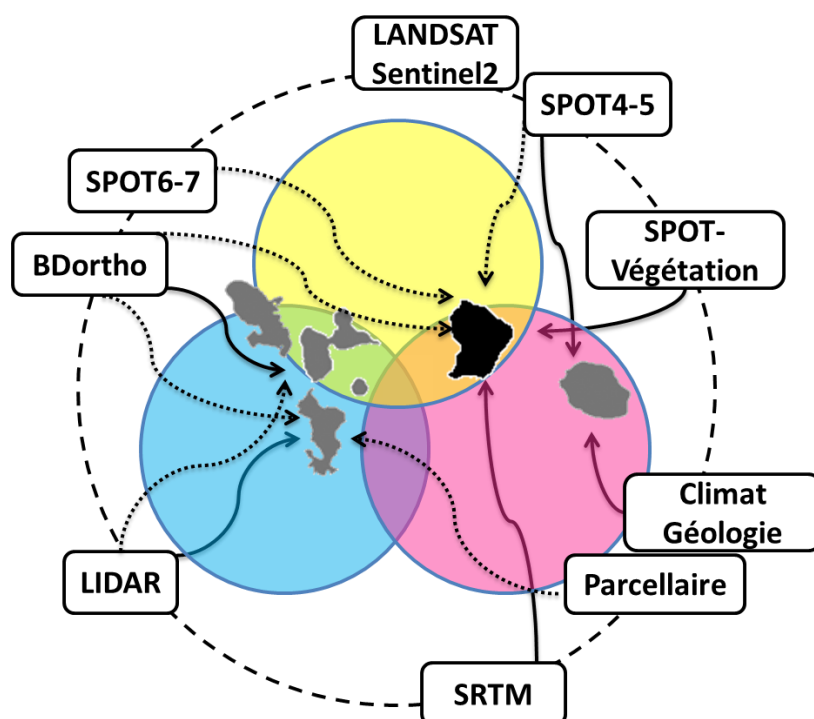


FIGURE 26 – DIVERSITE DES PRODUCTIONS CARTOGRAPHIQUES ACTUELLES PAR TERRITOIRES EN FONCTION DES DONNEES SOURCES UTILISEES POUR LA DISCRIMINATION DES FORMATIONS VEGETALES ET DES DIFFERENTES DIMENSIONS INTEGREES DANS LA TYPOLOGIE (STRUCTURE, COMPOSITION ET CONTEXTE SUIVANT LE MEME CODE COULEUR QUE LA [FIGURE 14](#)).

En noir les cartes pouvant s'appuyer sur un jeu de données in situ détaillé et exhaustif

L'harmonisation et l'enrichissement thématique de ces produits passe donc nécessairement par un **rapprochement des méthodes d'analyse d'images et une diversification des données-sources exploitées**.

3.2.1.C.1. COMBINER APPROCHE ORIENTEE OBJET ET CLASSIFICATION AUTOMATIQUE POUR ASSURER LA PRECISION TOPOLOGIQUE ET TYPOLOGIQUE

Deux méthodes différentes sont adoptées actuellement pour les productions. La première adoptée par l'IGN se fonde sur une analyse orientée objet des PVA permettant de segmenter les espaces forestiers en zone topologiquement cohérentes (applications SEVE® et CartoPrepa® de l'IGN – [85], suivie d'une interprétation et de fusion manuelle des objets en types forestiers. La seconde se fonde sur des méthodes de classification supervisée permettant de constituer des groupes spectralement, contextuellement et/ou structurellement homogènes éventuellement nettoyés par un post-traitement manuel. Une méthode optimale consisterait à combiner les deux approches pour assurer à la fois une cohérence topologique et une homogénéité typologique (Figure 27), comme cela est aussi envisagé dans le cadre des essais CarHab pour la France métropolitaine [80].

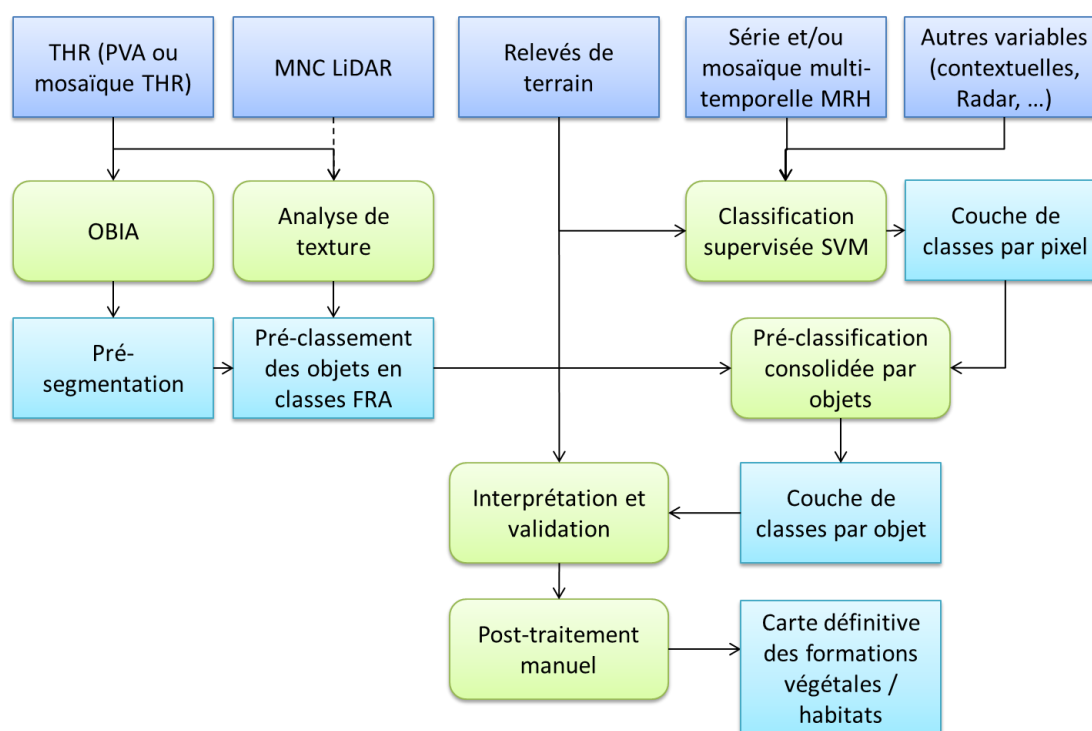


FIGURE 27 – PROPOSITION DE PROCESSUS D'ANALYSE POUR UNE CARTOGRAPHIE OPTIMALE DES FORMATIONS VEGETALES SUR LES ROM-COM

Une première étape consisterait à consolider la phase de production de la brique1 (option 2) proposées par l'IGN (carte des grands types de formations végétales selon les classes FRA : forêt, autres terres boisées, autres terres dotées de couvert d'arbres et autres terres) à l'aide d'une analyse de texture et/ou d'une analyse des MNC disponibles (tel que réalisé par AGRIFOR à Mayotte), de façon plus systématique et automatique. Une deuxième étape consisterait à effectuer une classification automatique par pixel en utilisant l'ensemble des sources de données disponibles et gratuitement exploitables à l'aide de classifieurs de type SVM aujourd'hui disponibles dans la plupart des logiciels de traitement d'images. La pré-classification par pixel obtenu pourrait ensuite être utilisée pour caractériser les objets produits lors de la

première phase de la brique 1 selon un processus de consolidation similaire à celui utilisé par Lagabrielle [86] pour la carte d'occupation des sols de la Réunion.

3.2.1.C.II. MOBILISER DES SOURCES DE DONNEES THEMATIQUEMENT COMPLEMENTAIRES

Une approche cartographique optimale devrait donc mobiliser des sources complémentaires permettant d'assurer une très haute résolution spatiale mais aussi de renseigner à la fois sur la composition, la structure et le contexte écologique des formations végétales. On visera :

- + pour la composition : des séries temporelles SENTINEL2 et/ou LANDSAT8 à haute résolution couvrant à minima une saison sèche, intégrant les bandes NIR et SWIR – ces données ont jusqu'à présent été peu exploitées dans les ROM-COM ;
- + pour la structure et la très haute résolution spatiale : des couvertures LiDAR si disponible (telle que Litto3D) et/ou des PVA types BDOrtho ou pour les territoires non couverts, des mosaïques Pléiades ou SPOT6-7 à 1.5m permettant une analyse texturale ;
- + pour le contexte écologique : à *minima* un modèle numérique de terrain (tel qu'issu de Litto3D ou du SRTM pour les territoires non couverts) en plus des cartes géologiques et climatiques et si possible des données radar en bande C (type SENTINEL1) et en bande L (type ALOS-PALSAR) renseignant sur l'humidité locale.

Toutes ces sources sont théoriquement gratuites (ou déjà financées pour les acteurs publiques) excepté les images ALOS-PALSAR, produites par l'agence japonaise et qui ne sont disponibles que sur certaines zones.

Les travaux actuellement réalisés par G. Viennois à l'UMR Amap pour la cartographie du site RAMSAR du Bas Ogooué au Gabon (20 000 km² intégrant le troisième plus grand delta côtier d'Afrique) illustrent le potentiel de cette approche et démontre la faisabilité d'une analyse exhaustive de différentes sources de données pour une cartographie précise et détaillée des formations végétales dans une zone forestière tropicale extrêmement diversifiée (Figure 28 et tableau 13). Cette recherche s'inscrit dans le cadre de la rédaction d'un livre commandité par l'Agence Nationale des Parcs Nationaux du Gabon auprès d'un consortium regroupant le Jardin Botanique du Missouri, l'Université Libre de Bruxelles et l'Institut de Recherche pour le Développement. Ces travaux se basent sur une première étape d'analyse orientée objet s'appuyant sur une mosaïque d'images SPOT6/7 et une série temporelle de SENTINEL 1 permettant une pré-segmentation (avec le logiciel e-Cognition), suivie d'une caractérisation spectrale (bande NIR) et texturale selon la méthode FOTO [70] aboutissant à une pré-classification, secondairement précisée par des variables contextuelles (SRTM – PALSAR) pour la discrimination de sous-types, puis validée et nettoyée manuellement dans une dernière phase de post-traitement en s'appuyant sur des relevés terrain et des prises de vues aériennes ponctuelles effectuées à l'aide d'un drone. Cette méthodologie optimale mixant analyse orientée objet, caractérisation spectrale et contextuelle pourrait tout à fait s'appliquer aux contextes ultra-marins pour une cartographie détaillée des formations végétales.

TABLE 13 : DIVERSITE DES DONNEES ANALYSES POUR LA CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES SUR LE BAS-OGOUE PAR G. VIENNOIS ET COLLEGUES (EN COURS DE PUBLICATION)

Sources	Type d'analyse	Résultats
Sentinel 1	Série temporelle de la bande C en HH analysée par ACP	Discrimination savanes sèches- savanes humides
SPOT6-7	Analyse de texture + bande NIR	Discrimination des mangroves, marais, marécages boisés, forêts marécageuses ouvertes ou fermées
SRTM	Modèle numérique de terrain et d'écoulement de surface	Discrimination des forêts de terre ferme et forêts inondables
ALOS-PALSAR	Humidité	Discrimination des variations saisonnières d'inondation et types de forêts inondables

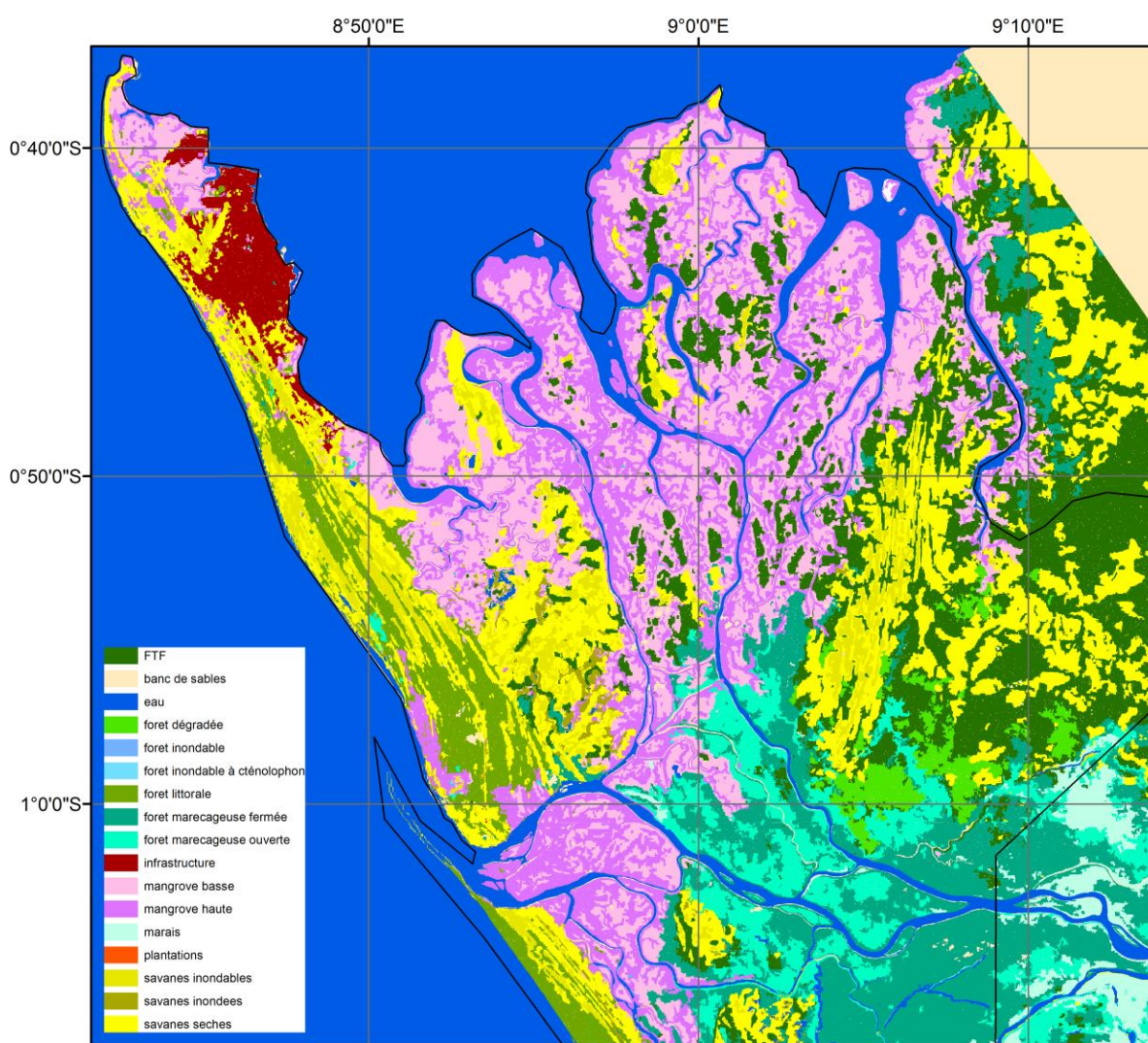


FIGURE 28 – ILLUSTRATION DE LA RICHESSE THEMATIQUE QUI PEUT ETRE OBTENUE A PARTIR D'UNE CLASSIFICATION MULTI-SOURCE ISSUE DE DONNEES SATELLITAIRES (EXTRAIT DES TRAVAUX DE G. VIENNOIS ET COLLEGUES SUR LE BAS-OGOUE – EN COURS DE PUBLICATION)

3.2.1.C.III. ACQUERIR DES DONNEES TERRAIN STRUCTUREES POUR LA SUPERVISION DES CLASSIFICATIONS ET LA VALIDATION DES CARTOGRAPHIES

Les cartographies réalisées à ce jour se sont en règle générale appuyées sur des jeux de données terrain restreints et peu formalisés, ne permettant pas d'assurer une validation véritablement solide des produits : 200 points de validation seulement pour la Guadeloupe, soit 13 points de validation par classes en moyenne ; 250 points de validation à Mayotte, soit 10 points par classes en moyenne ; 72 en Martinique, soit 5 points par classes. Si la Guyane dispose de jeux de données conséquents pour la partie forestière avec 3132 placettes pour 21 types d'habitats forestiers de l'intérieur, aucun réseau de référence formel n'a été développé pour caractériser et contrôler la classification des formations non forestières et des mangroves côtières. Seule la Réunion développe un réseau de référence conséquent dans le cadre de ces cahiers d'habitats avec 2 491 relevés phyto-sociologiques, avec pour le moment un déficit inverse à celui de la Guyane (seulement 169 relevés en milieu forestiers d'après R. Poncet comm. pers.). Pour comparaison la production de la BD Forêt version 2 en métropole peut s'appuyer sur le contrôle annuel de 7 500 sites visités pour 32 postes typologique [85,87].

Une étape primordiale devrait donc être de constituer des réseaux de relevés de référence d'au moins 30 à 50 points par postes typologiques permettant d'assurer la supervision des classifications, l'apprentissage des photo-interprètes et la validation des cartographies à partir de jeux de données indépendants.

Ces jeux de données devraient s'appuyer sur :

- le rassemblement des données existantes, leur mise à jour et leur mise à disposition selon des formats harmonisés au niveau national ;
- la complémentation des réseaux actuels par la collecte de nouvelles données *in situ* en s'appuyant sur les contributeurs locaux dans le cadre d'un financement régulier ad hoc.

Cette collecte pourrait s'effectuer lors d'une campagne à façon ou pourrait s'envisager en coordination avec d'autres campagnes de collectes régulières, telles que les campagnes TERUTI¹⁴ organisées par les DAF en Guadeloupe, Martinique et Réunion (13 111 points de contrôle sur ces trois territoires – selon un échantillonnage systématique sur des grilles de 2km x 2km).

¹⁴ NB : Une nouvelle méthode d'enquête Teruti est actuellement en cours d'élaboration par le MAAF

3.2.2. METHODES DE SUIVI DES CHANGEMENTS FORESTIERS

Résumé :

- L'analyse bibliographie met en évidence une meilleure efficience des méthodes utilisant :

- ☐ la détection des changements sur des images optiques multi-spectrales haute-résolution plutôt que sur des images à très haute résolution ou des images radar ([chap 3.2.2.A.I](#)) ;
- ☐ l'analyse de séries temporelles plutôt que des comparaisons par couple d'images – notamment pour les longues périodes ([chap 3.2.2.A.II](#)) ;
- ☐ les techniques de démixage de type CLASlite ou les mesures de variations d'indice de type NDVI pour la détection des pertes/gain de couvert forestier ([chap 3.2.2.A.III](#)).

- Les méthodes de suivi des changements déjà déployées à des échelles régionales démontrent ([chap 3.2.2.A.III](#) et [3.2.2.A.IV](#)) :

- ☐ une extrême fiabilité estimée à 90% par leurs auteurs ;
- ☐ une précision spatiale compatible avec les critères de rapportage REDD.

- La méthode la plus opérationnelle déployée par Hansen et collègues (2013) à l'échelle globale, confrontée aux données de validation disponibles sur les ROM-COM fait preuve d'une remarquable efficacité ([chap 3.2.2.B.I](#)) :

- ☐ forte cohérence en terme de mesure de dynamique globale de déforestation/reforestation à l'échelle des territoires ;
- ☐ bonne capacité de détection des déforestations liées aux activités minières ;
- ☐ bonne capacité de caractérisation des niveaux de dégradation.

- Les premiers essais de détection des changements menés à partir d'images radar TerraSarX par l'ONF en Guyane confirment à ce jour ([chap 3.2.2.B.II](#)) :

- ☐ que les méthodes de détection basées sur l'imagerie radar souffrent d'un manque de maturité ;
- ☐ que l'efficacité des méthodes testées est moindre que celle des techniques basées sur l'optique.

En conclusion, il est d'ores et déjà possible de suivre automatiquement l'évolution des couverts forestiers à partir de l'exploitation de séries temporelles d'images multi-spectrales à haute résolution. La méthode publiée par Hansen et collègues (2013) ou celle relativement similaire développée par l'IRSTEA pour la métropole peuvent être adaptée aux nouvelles images SENTINEL2 produites gratuitement dans le cadre du programme COPERNICUS pour assurer la surveillance et le rapportage des évolutions de couvert forestier dans les ROM-COM à une résolution de 10m en complément des dispositifs existants ([chap 3.2.2.C](#)).

3.2.2.A. ANALYSE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Une trentaine de références a été analysé sur ce thème, dont plus de la moitié (57%) concerne les changements en milieu forestier tropical, majoritairement (53%) sur une échelle régionale de l'ordre de grandeur de la Guyane ou à une échelle locale (34%) plus proche du cas de figure des autres ROM-COM.

3.2.2.A.I. DE L'OPTIQUE DANS 80% DES CAS

Malgré les problèmes d'enneuagement, ce sont majoritairement les images optiques (spectre visible et infra-rouge) qui sont utilisées pour les suivis y compris en zone tropicale. Parmi les produits optiques, les images LANDSAT sont les plus fréquemment employées. La répétitivité des passages (tous les 16-17 j pour les LANDSAT) et la gratuité des images permettent de compenser les zones non visibles ou bruitées par l'enneuagement à l'aide de composition d'images multi-dates pouvant s'étaler sur des périodes d'un an [88,89] ou de plusieurs années en fonction de l'étendue à couvrir [90-94]. Plusieurs types d'images issues de différents capteurs peuvent être fusionnés en cas de besoin [95]. Les images de la série SPOT, et celles à plus haute résolution telles que QuickBird, Ikonos, Pléiades ne sont employées que ponctuellement pour des suivis à emprise très locale ou comme moyen de validation de traitements automatiques d'images de moindre résolution [96,97]. Les images radar ne sont pour le moment utilisées que dans 20% des cas. Elles ont pour avantage de ne pas être perturbées par l'enneuagement. Cependant les effets d'ombrages dus au relief et les précipitations peuvent être aussi pénalisant [71]. Ce sont les images ALOS-Palsar qui sont le plus souvent employées, mais ce capteur en bande L a été désorbité en 2011 [94]. Alors que l'analyse des changements sur images optiques font intervenir les variations d'intensité de signal (i.e. variation de réflectance) cette méthode est plus rarement employée sur les images radar car bien moins adaptée [98].

Pour l'étude des changements, les classifications automatiques supervisées ou non-supervisées sont très largement utilisées : il s'agit de séparer une classe forêt d'une classe non-forêt (sol nu, plantations de palmiers, ...) et de détecter des changements de classe entre deux dates. Plusieurs types de classifieurs statistiques peuvent être mis en œuvre : clustering conventionnel de type k-mean [99], ou MLC pour Maximum Likelihood Classifier [98] ; algorithme de type CART pour arbre de régression [89,93] ou RF pour random forest [100] ; ou des traitements plus complexes de type réseau de neurones [95] ou SVM pour support vector machine [101]. Plusieurs méthodes de classification spécifiquement adaptées aux traitements d'images multi-spectrales ont aussi été développées, la plus fréquemment employées étant la classification ISODATA¹⁵ [90,102]. Ces différentes méthodes ont fait l'objet de comparaisons qui semblent démontrer la plus grande fiabilité des méthodes de type SVM¹⁶ [103]. Pour les détections d'objets bien distincts basées sur une classification binaire (ex : forêt vs sol nu) un simple filtre [104] ou un seuil de déviation à un spectre de référence [94,105,106] peut aussi être employé pour distinguer des classes. La classification manuelle ou semi-automatique basée en grande partie sur l'interprétation visuelle et très dépendante de l'expérience de l'opérateur est encore largement employées notamment lors de l'utilisation d'images à très haute résolution (THR) pour la classification *per se* et le suivi des évolutions [40,69] ou dans la phase d'apprentissage des classifications supervisées pour le pré-classement des données de calibration [93]. La classification manuelle est longue mais très fiable lorsque les objets étudiés sont bien distincts

¹⁵ ISODATA : méthode de classification proche du conventionnel K-mean mais qui intègre un processus itératif de fusion/ fractionnement des groupes suivant des paramètres de seuillage (effectif minimal par classes, distance minimale entre classe, nombre maximal d'itération). De fait le nombre de classe n'est pas prédéterminé contrairement au k-mean.

¹⁶ SVM : Support Vector Machine ou Séparateurs à Vaste Marge – technique d'apprentissage artificiel permettant une optimisation de la classification en permettant une discrimination non linéaire des classes.

(ex : forêt vs savane ou mangrove vs terre nue). Les méthodes semi-automatiques font appel à des algorithmes de classification ou des filtres qui nécessitent un post-traitement par un opérateur avec validation visuelle [91].

3.2.2.A.II. COMPARAISON PAR PAIRE OU ANALYSE DE SERIES TEMPORELLES

Le suivi des changements peut s'opérer soit simplement par comparaison de paires d'images représentant une même scène à deux dates différentes et préalablement classifiées selon les mêmes méthodes [89,93], soit par l'analyse de séries temporelles permettant de détecter des variations ou des profils particuliers liés à un changement [92,100,107]. Les analyses de séries temporelles présentent l'avantage d'être moins sensibles aux données manquantes ou aux bruits, liés à la phénologie par exemple, que l'analyse des tendances permet de détecter et corriger [88,89]. Pour être efficace, elles nécessitent cependant des séries longues, au moins 10 images sur la période [108] et une puissance de calcul très importante [100]. Elles sont cependant beaucoup plus performantes pour le suivi des déforestations, qui peuvent être fortement sous-estimées par des analyses ponctuelles sur de longs pas de temps du fait de la repousse [88]. Un compromis consiste à combiner les deux approches dans une analyse multiple de comparaisons bi-temporelles sur des séries longues [90,109] : chaque pas de temps élémentaire fait alors l'objet d'une comparaison par paire d'images pour reconstituer la séquence forêt-déforestation-reforestation et corriger les éventuels artefacts.

3.2.2.A.III. LES PRECISIONS ET FIABILITES OBSERVEES

La fiabilité et la précision obtenue par ces différentes méthodes sont très variables et touchent à la fois des problèmes de définition de l'objet « forêt », des problèmes d'échelle et des problèmes d'erreur de classement. La plupart des images optiques (hormis celles à très haute résolution peu employées à cet usage pour le moment) ne permettent pas de vérifier strictement les critères de définition de la forêt au sens FAO [110], à savoir la hauteur minimale (5m), le taux de couverture minimal (>10%) et la surface minimale (0.5 ha). Cette question est très généralement éludée mais de fait dans la majorité des cas, les pixels classés comme forêt ont un pourcentage de recouvrement répondant plutôt à un seuil de 25 ou 30% [88,110]. Ce problème a été historiquement isolé lors des négociations du Protocole de Kyoto, qui a assoupli la définition pour le suivi des émissions de gaz à effets de serre liés aux déforestations : des fourchettes de 0.05 à 1 ha, de 2 à 5 m de hauteur et de 10 à 30% de couvert sont acceptées pour ce type de suivi [110]. Des méthodes dites « de démixage » ont aussi été élaborées pour estimer le plus finement possible le pourcentage de couvert végétal au sein de chaque pixel en fonction des signatures spectrale et affiner ainsi les classements [111].

La résolution des images utilisées est généralement inférieure à la surface minimale de 0.5 ha (ex 0.09 ha pour du LANDSAT). Le grain adopté par les traitements est le plus souvent calé sur la résolution des images excepté pour les analyses de texture qui exigent de travailler sur des fenêtres couvrant plusieurs pixels pour une étude des variations locales : exemple sur des images PALSAR à 5 m traitée sur fenêtres de 250 m x 250 m et 650 m x 650 m [101] ou sur des images TerrasarX <1 m traitée en 25 m x 25 m [74]. Une haute précision spatiale ne signifiant pas pour autant une bonne fiabilité thématique (cf. ci-dessus), une stratégie fréquemment adoptée consiste à agréger les pixels ce qui évite par ailleurs les détections de faux changements dues à de légers décalages spatiaux ou à des artefacts ponctuels qui sont atténués par les moyennes locales : exemple sur des images LANDSAT agrégée en 60 m x 60 m [92] ou en 500 m x 500 m [104]. Au regard des assouplissements accordés par le Protocole de Kyoto, une agrégation jusqu'à 1 ha (100 m par 100 m) semble un bon compromis pour un suivi des déforestations visant un objectif carbone.

Les études basées sur des classements binaires (forêt-non forêt) font état de fiabilité de l'ordre de 90% dans la plupart des cas [69,90,91,102]. Cependant la fiabilité réelle des analyses de changements d'état avec ces deux classes comparée à des données terrain sont plutôt de l'ordre de 60 à 80% [88,93]. Les études détaillant plusieurs classes, typiquement de type « landcover », avancent des fiabilités de l'ordre de 65 à 80% à l'échelle globale [95,103] et de l'ordre de 75 à 90% à des échelles régionales [89,92,94]. Dans le meilleur des cas, les détections de changements basés sur des analyses de séries temporelles sont jugées fiables à 90% [100] mais quelques soit la méthode employée, un contrôle poussé des produits de traitement automatique par des experts de terrain est jugé nécessaire pour s'assurer de la fiabilité des traitements [110].

3.2.2.A.IV. CONCLUSIONS

Les méthodes de suivi de changements rapportées dans la bibliographie scientifique sont dominées par le traitement d'images à haute résolution de la série LANDSAT, soit par comparaison paire à paire de composites multi-dates sur de large pas de temps (pour un suivi périodique de type FRA ou rapportage Carbone) soit en analyse de séries temporelles (pour un suivi continu ou un suivi a posteriori des changements). Cette domination s'explique par la gratuité, la qualité et la fréquence d'acquisition des images qui confère aux produits LANDSAT le meilleur compromis coût/qualité.

Le traitement d'images LANDSAT à l'aide des techniques les plus performantes de pré-traitement, de classification (SVM) et d'analyse (en séries temporelles) permet d'atteindre potentiellement une bonne fiabilité statistique (90%) et des précisions thématiques et spatiales très acceptables. Les productions les plus emblématiques en la matière sont celles développées pour le suivi régional des déforestations et dégradations en forêt tropicale par la méthode du démixage dite CLASlite [111] et le suivi des changements forestiers à l'échelle globale entre 2000 et 2012 par analyse du NDVI pour Normalized Difference Vegetation Index [109]. Malgré une résolution plus fine (10-20 m) et une résolution spectrale proche des LANDSAT, les séries SPOT restent marginalement utilisées si l'on s'en tient à la littérature scientifique. Les différences de politique commerciale de diffusion expliquent très certainement ce décalage. Les capteurs SENTINEL 2, récemment mis en orbite, ont des caractéristiques spectrales très proches des LANDSAT, avec une résolution plus fine et un temps de repassage plus fréquent (5 jours versus 16 jours). La gratuité de ces images via le programme Européen COPERNICUS ouvre la possibilité d'une adaptation rapide des méthodologies d'analyse de séries temporelles développées sur LANDSAT à ces nouveaux produits. Très récemment, l'IRSTEA a mis au point pour la métropole l'application dite « coupe-rase » permettant de traiter automatiquement tout type d'images optiques présentant une bande infra-rouge (Spot 5, Spot 6/7, Pléiades, RapidEye, Landsat 8, Sentinel 2...) permettant le calcul de l'indice NDVI et la détection des déboisements par analyse de séries temporelles [112].

De fait, un suivi régulier quantitatif (déforestation) et qualitatif (dégradation) de massifs forestiers est matériellement réalisable à partir d'images optiques à haute résolution (LANDSAT, SENTINEL) ou très haute résolution (SPOT) malgré les problèmes d'ennuagement. L'adoption de méthodes avancées, de type « analyse de séries temporelles », nécessite un bon niveau d'expertise, mais peut permettre d'atteindre un excellent degré de fiabilité pour un suivi à moindre coût (financier et temporel) sur de larges surfaces (i.e. échelle du massif guyanais), d'autant plus si la diversité des objets non-forêt restent limitée.

3.2.2.B. ESSAIS PROSPECTIFS

3.2.2.B.I. TEST DE FIABILITE DES DETECTIONS DE CHANGEMENTS A PARTIR DE LANDSAT

Les données produites par Hansen et collègues, rapportant les changements forestiers détectés sur la série LANDSAT de 2000 et 2012 [109] ont été téléchargées et comparées sur ArcGIS aux données d'occupation des sols [37] et aux données minières disponibles sur la Guyane pour cette même période (S. Allo comm. pers). On observe une très grande cohérence à la fois d'un point de vue spatial et d'un point de vue statistique entre ces différentes sources.

A l'échelle régionale, en Guyane, Hansen rapporte une évolution nette du couvert forestier entre 2000 et 2012 de -3 325 ha/an très cohérente avec les chiffres officiels [38] compris entre -3 282 ha/an pour la période 2008-2012 et -3 025 ha/an entre 1990-2008 (hors mise en eau de Petit Saut – Figure 29). De même en Guadeloupe, le bilan net constaté par Hansen est de -66 ha/an contre -67 ha/an annoncé par l'IGN entre 1988-2004 et -80 ha/an entre 2004-2010 [10]. L'écart plus important peut provenir de variations interannuelles, d'une sur-détection de gains forestiers côté Hansen (confusions avec des plantations agricoles par exemple) ou d'une sous-estimation de la surface forestière 2010 côté IGN (voir précédemment les [figures 20 et 21](#)). A la Réunion, Hansen rapporte un bilan nul en accord avec les déclarations FRA2015 alors que pour la Martinique le bilan net donné par Hansen est de -141 ha/an à l'encontre de la complète stabilité annoncée par le FRA2015, qui paraît peu plausible.

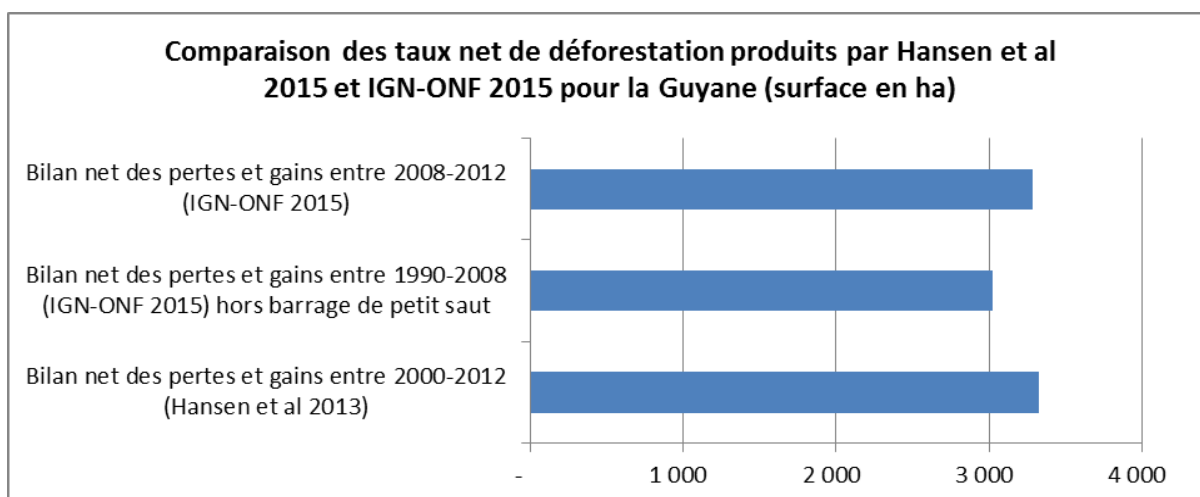


FIGURE 29 – COMPARAISON DES BILANS NETS D'EVOLUTION DE LA COUVERTURE FORESTIERE EN GUYANE POUR LES PERIODES 1990-2000-2008-2012 SELON DIFFERENTES SOURCES

En Guyane, le croisement des informations d'Hansen [109] et de l'OAM démontre une grande cohérence spatiale illustrée sur la région de Cacao (Figure 30) et une très bonne sensibilité à la détection des surfaces orpaillées (Figure 31) :

- une détection efficace des principaux sites d'orpaillage avec 85% de détection pour les sites de plus de 2ha ouverts sur la période 2000-2012 et 51% pour les sites de taille moyenne entre 0.5-2 ha ;
- des taux d'ouverture de l'ordre de 42% sur les grands sites miniers récents, cohérents avec les pratiques connues des miniers et les observations de l'OAM (P. Joubert comm. pers.) ;
- une concentration des gains forestiers sur les sites anciens réduisant le taux d'ouverture à 27%, suivant une dynamique cohérente avec les expertises menées sur ce sujet précédemment [113].

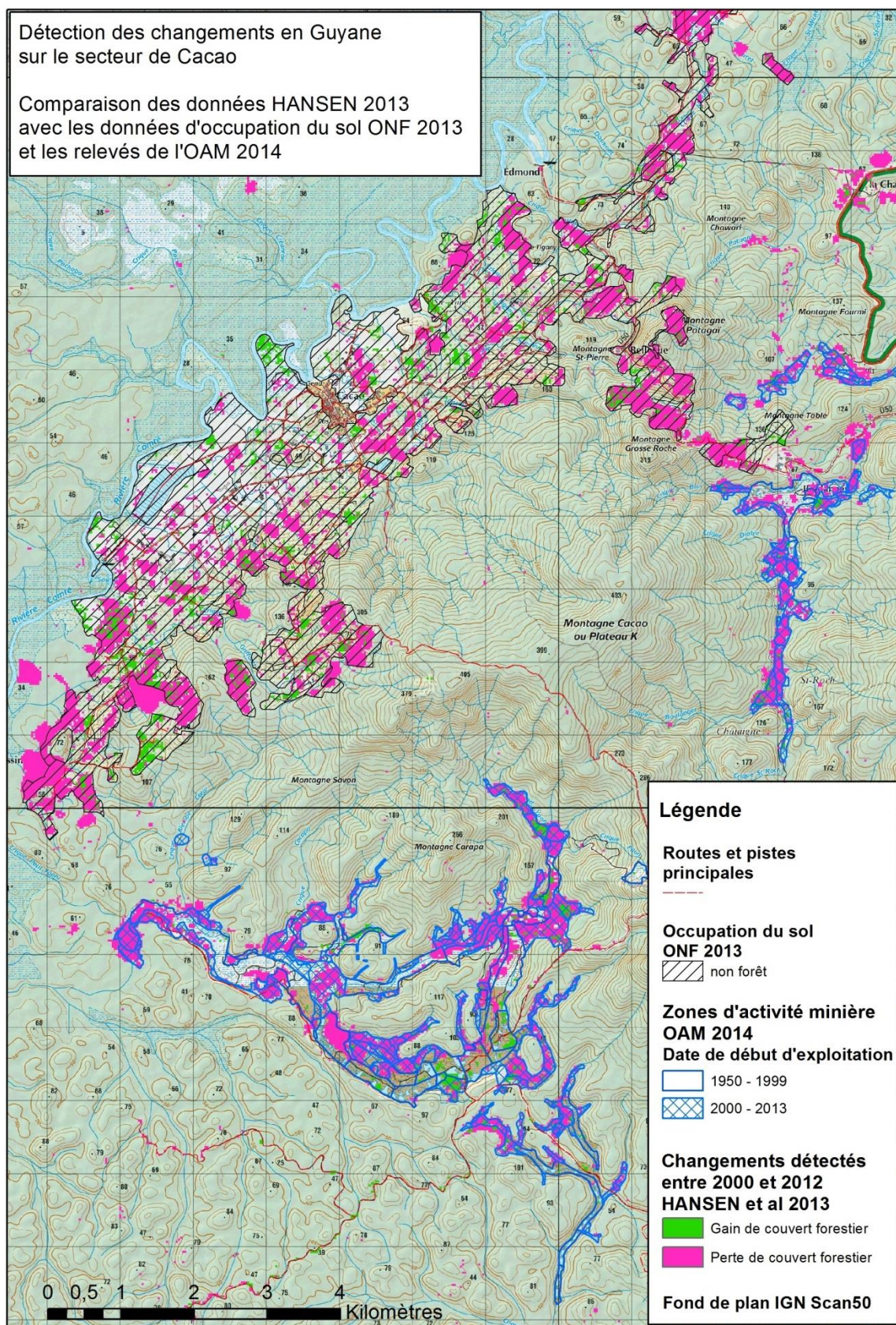


FIGURE 30 – DYNAMIQUE D'ÉVOLUTION FORESTIÈRE SUR LE SECTEUR DE CACAO EN GUYANE
RAPPORTE PAR HANSEN ET AL [109] ET COMPAREE AUX DONNÉES OAM ET ONF [37].

Enfin, la confrontation des zones ouvertes détectées par Hansen en 2012 [109] avec les couches d'occupation des sols de l'ONF en 2011 [37] (dont les informations sont synthétisées sur des polygones de surface unitaire > 2.5 ha) démontre aussi la robustesse de la méthode, capable de mettre en évidence les variations de taux moyen de couverture arborée en fonction du niveau de dégradation des formations naturelles (de 94% en moyenne dans les zones forestières littorales à 26% dans les végétations arbustives). Elle rend aussi compte des variations de couvert en fonction du niveau d'intensification de l'activité agricole (de 49% en moyenne dans les zones agricoles hétérogènes, c'est-à-dire les zones d'abattis jusqu' à 8% sur les terres arables – Figure 32).

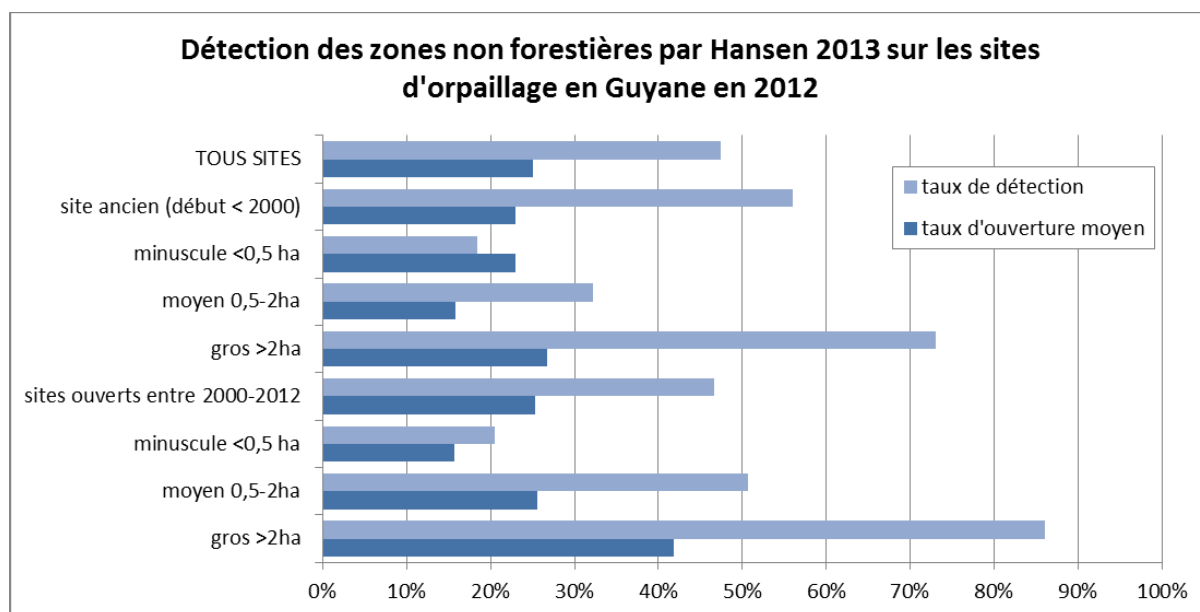


FIGURE 31 – TAUX DE SURFACES NON FORESTIERES DETECTEES PAR HANSEN EN 2012 [109] SUR LES SITES MINIERES GUYANAIS

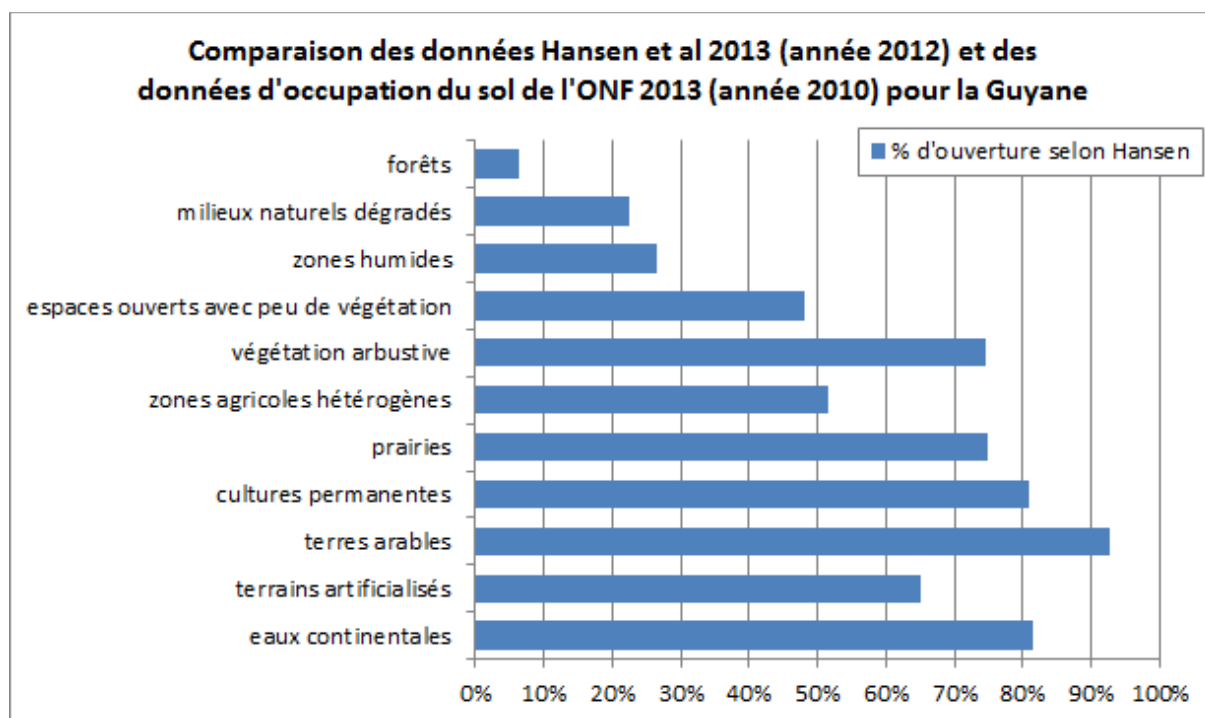


FIGURE 32 – TAUX DE SURFACES OUVERTES SELON HANSEN [109] PAR TYPE D'OCCUPATION DES SOLS SELON ONF [37] EN GUYANE

3.2.2.B.II. TEST COMPARATIF DE CAPTEURS RADAR ET OPTIQUE POUR LA DETECTION DES DEGRADATIONS LIEES A L'EXPLOITATION FORESTIERE

Au cours du second semestre 2016, un essai a été piloté par Caroline Bedeau de l'ONF Guyane, sur deux secteurs forestiers, l'un faisant l'objet d'exploitation minière et l'autre faisant l'objet d'exploitation forestière. Des couples d'images TerraSar X de type StripMap en polarisation HH ont été fournies et traitées par Félicitas Poncet du consortium Airbus-Astrium après une mise en contact des deux parties en avril 2016 dans le cadre du programme KIC-Forest. Les résultats obtenus ont permis de tester l'efficacité du radar en bande X de TerraSar pour la détection des déforestations et dégradation.

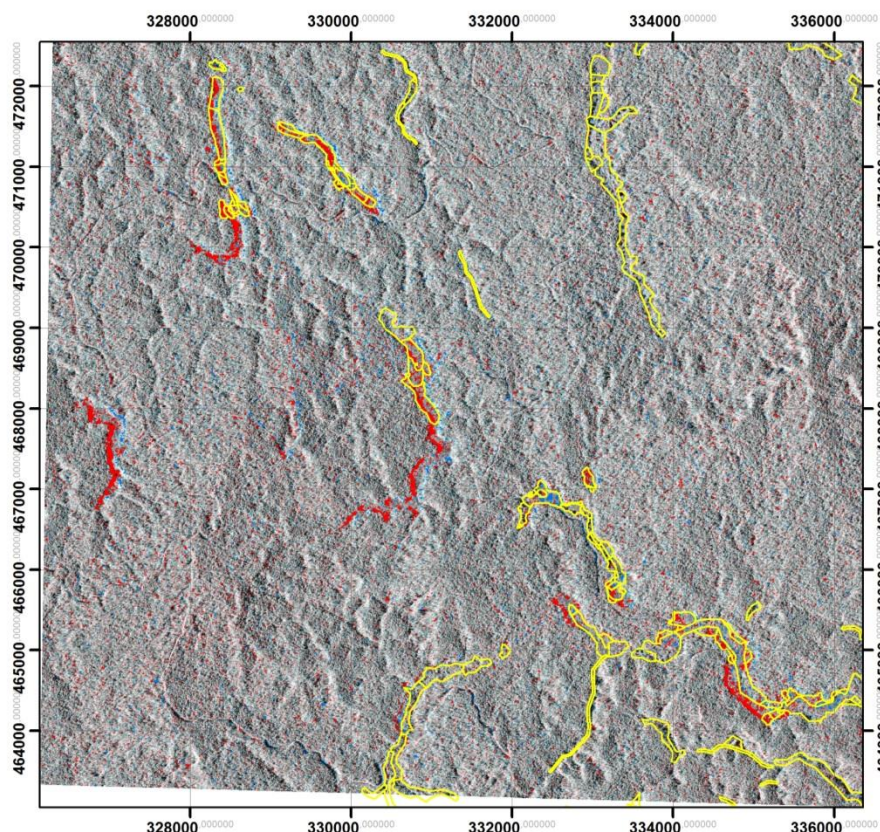


FIGURE 33 – DETECTION DES CHANGEMENTS A PARTIR D'IMAGES RADAR TERRASAR X EN ZONE D'ACTIVITE MINIERE EN GUYANE (PERTE DE COUVERT EN ROUGE – GAIN EN BLEU – EMPRISE DES CONCESSION MINIERE EN JAUNE)

Deux couches sont produites à partir de couples d'images acquises selon des configurations les plus comparables possibles (en termes d'angle d'incidence et orientation de la prise de vue) : une couche pour les réductions de la hauteur de canopée, correspondant aux pertes de couvert et une couche pour les augmentations de hauteur de canopée correspondant aux zones de recolonisation forestière. Les premiers essais obtenus sur le secteur minier font apparaître de franches zones de réduction de couvert entre 2013 et 2016 dans et en périphérie des zones d'activités minières relevées par l'OAM jusqu'en 2014, ainsi que de franches zones de repousses forestières dans ces mêmes secteurs. Cependant les couches présentent aussi de très nombreuses informations isolées pouvant correspondre soit à de réels changements de hauteur de canopée (chablis, volis...), soit à des artefacts liés à des difficultés de calage ou à une extrême sensibilité aux paramètres d'acquisitions (Figure 33). A l'inverse, certaines zones d'impacts connues (en grande majorité des petites surfaces, < 0.5 ha) ne ressortent pas sur l'analyse de

changement. Le fort bruit intrinsèque à la donnée radar et la forte sensibilité au relief, qui nécessite une correction basée sur un modèle de surface précis, souvent indisponible, peuvent expliquer en partie ces non-détections. On observe par ailleurs d'autres artefacts liés aux pluies et aux variations d'humidité, ce qui vient contrebalancer un des forts atouts du radar en zone tropicale : la supposée opérationnalité en toute saison. Des développements complémentaires sont donc nécessaires pour filtrer ces bruits dans un post-traitement avant de pouvoir exploiter ces informations.

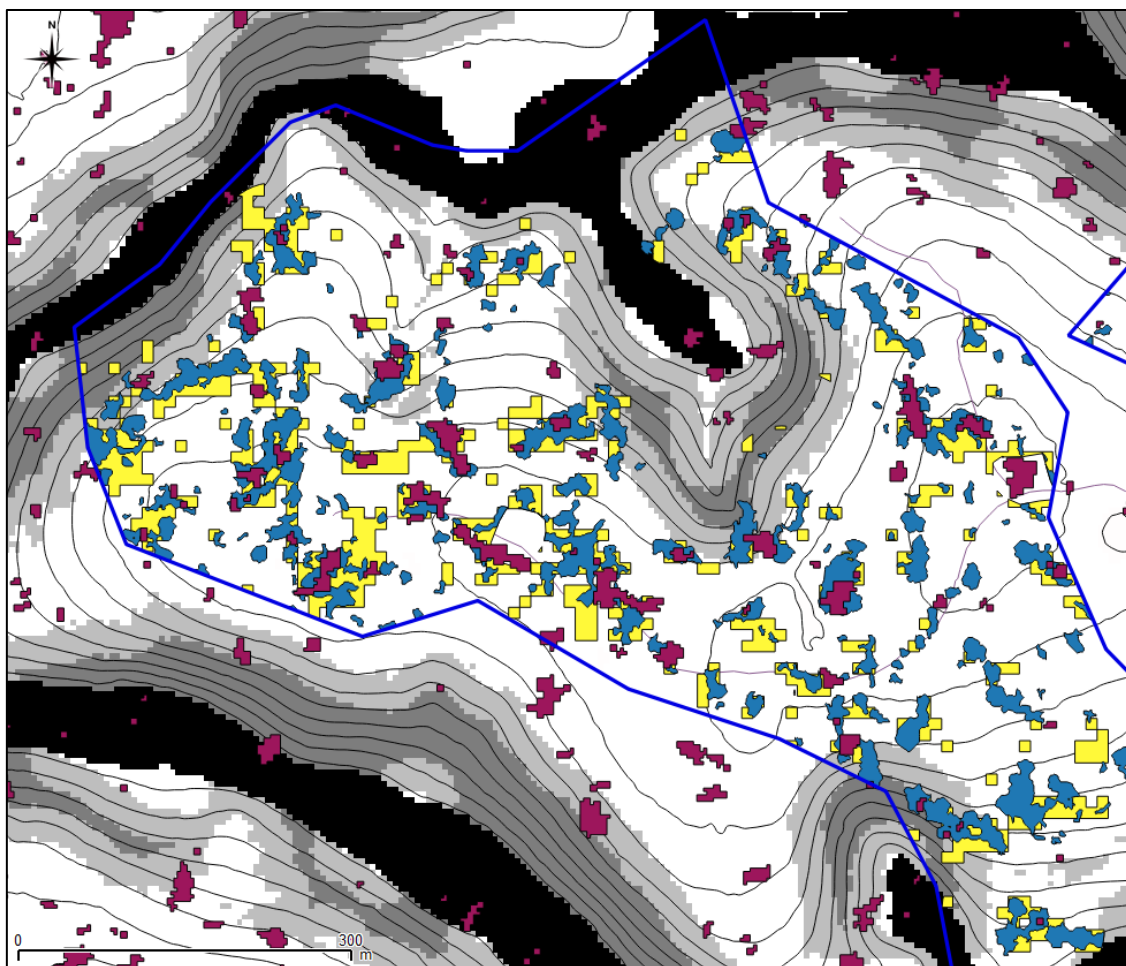


FIGURE 34 – DETECTIONS DES IMPACTS D'EXPLOITATION SUR LA PARCELLE HK0096 REALISEES PAR C. BEDEAU A PARTIR DE LIDAR (EN BLEU) D'IMAGES RADAR TERRASAR X (EN ROUGE) ET D'IMAGES SPOT5 (EN JAUNE)

Le trait bleu délimite les secteurs exploités et non enneugés sur spot5

Le deuxième essai réalisé sur un secteur forestier de 14 parcelles à vocation d'exploitation vise à détecter les impacts générés par l'abattage des bois d'œuvre et leur débardage afin de mesurer les dégradations consécutives à l'exploitation forestière, à partir d'acquisitions espacées de 3 ans (29/03/2013 – 07/06/2016) correspondant à la durée maximale des exploitations. Les résultats obtenus rapportent des pertes de couvert variant de 0.5 à 1.1% de la surface dans les parcelles témoins non exploitées entre les deux dates – variations que l'on suppose correspondre au bruit de fond causée par la dynamique naturelle des chablis et volis. Des taux de dégradation variant entre 1.1 et 1.6% pour les parcelles ayant fait l'objet d'un simple abattage et des taux de 1.6 à 3.4% pour les parcelles abattues et débardées sont mesurés entre ces deux dates. Ces taux d'impacts, réduits ou non des 1% liés à la dynamique naturelle, paraissent relativement faibles au regard des références disponibles rapportant des taux d'impacts mesurés à partir de méthodes alternatives basées sur l'analyse d'images SPOT5 plus proches des 15 à 20 % [96]

(Descroix & Bedeau non publié). Une comparaison plus approfondie a été réalisée sur une parcelle de 341 ha exploitée entre octobre 2012 et octobre 2013 sur laquelle deux acquisitions LiDAR (pré et post-exploitation) étaient disponibles pour une cartographie précise des trouées d'abattage et des emprises de pistes créées pour le débardage (Figure 34). Un couple d'images TerraSar X StripMap datées du 19/05/2010 et 29/03/2013, ainsi qu'une série d'images SPOT 5 acquises sur la même période, ont permis de comparer l'efficacité de la méthode radar au regard des méthodes de suivis d'exploitation précédemment développées à partir d'optique multi-spectral [96,105,114]. Le taux d'impact mesuré précisément par LiDAR est de 14.4% contre 13.4% mesuré à partir des images SPOT5 et seulement 3% à partir des images TerraSarX sur la même zone. Malgré une moindre résolution spatiale et de fréquents décalages dus à l'imprécision du géo-référencement des images SPOT, la détection des dégradations à partir d'images optiques multi-spectrales se révèle donc bien plus efficace que les comparaisons de couple d'images radar en bande X. Des analyses toujours en cours sur une modalité d'acquisition plus fine et plus adaptée à la reconnaissance d'objets (SpotLight) laissent envisager de meilleurs résultats pour la détection de petites surfaces comme les trouées d'exploitation forestière ou les surfaces minières illégales.

3.2.2.C. QUELLES STRATEGIES POUR SUIVRE L'EVOLUTION DES HABITATS FORESTIERS DANS LES ROM-COM ?

Des **méthodes opérationnelles de suivi des pertes et gains de couvert forestier à partir d'imageries satellitaires existent déjà et démontrent une très bonne efficacité**. Celle proposée par Hansen s'appuyant sur l'analyse de **série temporelle d'images multi-spectrales haute-résolution de type LANDSAT** peut facilement être utilisée et adaptée pour la surveillance et les rapportages concernant l'évolution du couvert forestier dans les ROM-COM. Les tests effectués à partir des résultats bruts de Hansen, sans aucun post-traitement, sont tout à fait convaincants. L'information fournie pourrait être améliorée de différentes façons :

- (1) En effectuant des post-traitements faisant appel à des processus automatiques (nettoyage des pixels isolés, synthèse des informations à la résolution de 0.5ha) et à une révision par des experts locaux (vérification/validation/nettoyage) ;
- (2) En adaptant la méthodologie aux images SENTINEL2 qui présentent les mêmes caractéristiques spectrales que les LANDSAT8 mais bénéficient d'une résolution plus fine (10m versus 30m) ;
- (3) En appliquant la méthodologie de Hansen sur des séries temporelles suivant un pas de temps plus serré (a minima trimestriel ou mensuel plutôt qu'annuel) voire sur l'ensemble des images produites et disponibles, suivant des chaînes de traitement automatiques.

Ce type d'approche pourrait orienter les contrôles dans les ROM-COM dépourvus de système de surveillance et pourraient compléter les dispositifs existants en Guyane actuellement basés sur la photo-interprétation pour le suivi des impacts de l'orpaillage (OAM) ou le suivi des extensions agricoles (AGRIPAG) présentés précédemment.

Résumé :

- L'analyse bibliographie met en évidence que :

- ❑ le développement d'allométries locales Hauteur-Diamètre pour les différents contextes géographiques et écologiques permet de réduire l'incertitude sur les estimations de biomasse aérienne ([chap 3.2.3.A.I](#)) ;
- ❑ l'utilisation du LiDAR aérien facilite le développement de ces allométries mais améliore aussi significativement les estimations de biomasse à l'échelle des peuplements ([chap 3.2.3.A.II](#)) ;
- ❑ les méthodes de cartographie de la biomasse les plus précises et opérationnelles sur de grandes surfaces s'appuient sur la combinaison de transects LIDAR aéroportés et d'imagerie satellitaire permettant extrapolation spatiale et changement d'échelle ([chap 3.2.3.A.III](#)) ;
- ❑ les différentes cartes de biomasse disponibles à l'échelle globale ne sont pas suffisamment fiables pour des utilisations locales ([chap 3.2.3.A.IV](#)).

- Les suivis des changements de stocks de biomasse et flux de carbone inhérent ([chap 3.2.3.A.V](#)) :

- ❑ se basent rarement sur des mesures directes de variation de stock mais sont actuellement estimés sur la base des changements d'occupation des sols ;
- ❑ sont encore très imprécis et n'atteignent jamais les niveaux de précisions visés dans les rapports internationaux y compris pour les pays considérés comme les mieux documentés ;
- ❑ pourraient être directement mesurés à l'horizon 2020 grâce au satellite BIOMASS basé sur la technologie radar en bande P ;
- ❑ intègrent rarement les évolutions liées à la dynamique forestière naturelle ou après perturbation bien que celles-ci puissent avoir un poids important ([chap 3.2.3.A.VI](#)).

- L'état des lieux révèle ([chap 3.2.3.B](#)) :

- ❑ une grande disparité entre les territoires (seule la Guyane est à jour de références) ;
- ❑ un manque crucial de données terrain ne serait-ce que pour assurer un rapportage au Tier 2.

En conclusion, plusieurs actions peuvent être menées pour améliorer la fiabilité des estimations de stocks de biomasse et le suivi de leur évolution et flux de carbone consécutifs dans les ROM-COM ([chap 3.2.3.B](#)) :

(1) fiabiliser les estimations de biomasse à l'échelle de l'arbre notamment en développant des allométries H:D propres à chaque contexte si possible en s'appuyant sur des acquisitions LiDAR ;

(2) appliquer les méthodes de cartographie de biomasse les plus abouties s'appuyant sur les processus de changement d'échelle et permettant d'atteindre le Tier3 : mesures de quelques dizaines de placettes de terrain permettant la calibration de transects LiDAR couvrant une partie du territoire, puis extrapolation sur la totalité du territoire à l'aide de co-variables basées sur l'imagerie satellitaire ;

(3) acquérir des données dans les autres compartiments de l'écosystème forestier et particulièrement des mesures de stocks de carbone organique des sols afin de viser le Tier2 pour ces composantes.

3.2.3.A. ANALYSE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

La cartographie et le suivi de biomasse nécessitent des changements d'échelle, qui font toute la difficulté de l'exercice. Classiquement les estimations de biomasse sont effectuées à l'échelle de l'individu pour être ensuite sommées à l'échelle de placettes, qui servent ensuite d'unités de calibration pour des produits issus de télédétection permettant une extrapolation spatiale (Figure 35) [115]. L'analyse qui suit est organisée en fonction de ces différentes étapes. Elle s'appuie sur la sélection d'articles qui ont fait l'objet d'une fiche de lecture mais aussi sur d'autres références plus anciennes ou plus générales apportant des éclairages importants sur le sujet abordé.

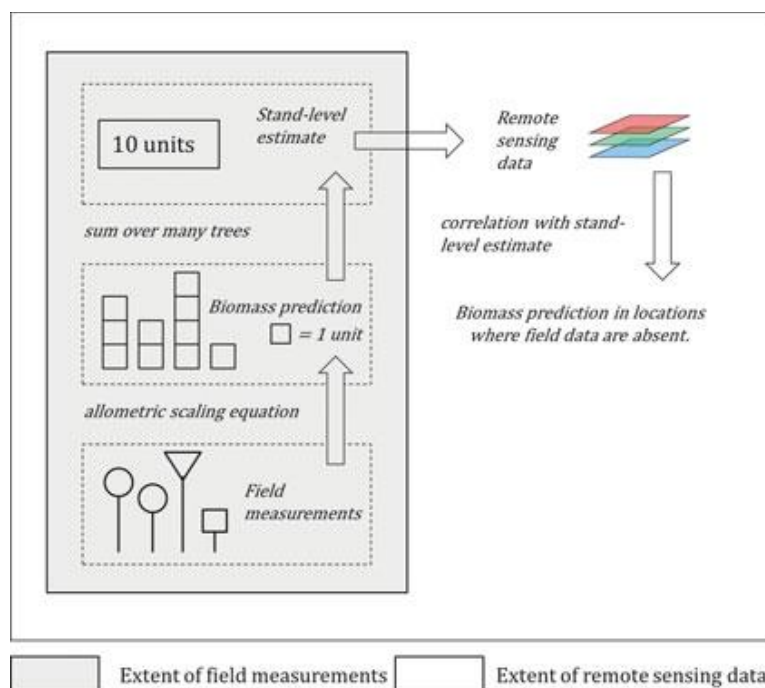


FIGURE 35 - SCHEMA DES ETAPES D'ELABORATION D'UNE CARTOGRAPHIE DE BIOMASSE AERIENNE, TIRE DE CLARK AND KELLNER [115]

3.2.3.A.I. ESTIMER LA BIOMASSE D'UN ARBRE : LES ALLOMETRIES

Les estimations de biomasse à l'échelle de l'individu concernent la plupart du temps sa seule partie aérienne (AGB pour Above-Ground Biomass), la partie racinaire (Below-Ground Biomass) étant difficilement accessible. Même pour cette partie visible, les valeurs de biomasse se basent très rarement sur des mesures directes du volume et de la densité des différents composants de l'arbre (troncs, branches, feuilles), mais plus généralement sur des allométries permettant d'approcher la biomasse à partir d'indicateurs facilement mesurables que sont le diamètre à hauteur de poitrine (DBH pour Diameter at Breast Height), la hauteur totale de l'arbre (H) et la densité moyenne du bois (WSG pour Wood Specific Gravity) correspondant à l'espèce concernée [116]. Plusieurs types d'allométries ont été développées au cours de dernières années pour différentes régions du monde [117], différents types de forêts [116], différents groupes végétaux [118] ou différentes espèces [119].

Les comparaisons des allométries génériques, utilisables à l'échelle mondiale pour des grands types forestiers, avec les allométries régionales, montrent que ces dernières ne sont pas forcément plus performantes [117]. De fait, ces allométries se basent sur un nombre de mesures effectives souvent très faible au regard de la variabilité naturelle inter-individu, y compris pour des individus de même taille au sein d'une même espèce ou d'une même population. Par ailleurs, les très gros arbres (DBH>50cm) posent plus de difficultés de mesures et sont donc peu

échantillonnés malgré leur poids dans la biomasse totale et leur grande variabilité [116]. Aux Antilles comme dans les autres contextes insulaires, où les arbres sont plutôt de dimensions faibles comparativement à d'autres peuplements forestiers [120], l'ajustement d'allométries locales s'avère absolument nécessaire (Rousteau et al en cours de publication).

On observe cependant en forêt tropicale humide des variations régionales très fortes non seulement dans la composition des forêts mais aussi dans la relation H:D (rapport hauteur sur diamètre) [121]. Dans un contexte régional donné, la stratégie la plus efficace pour aboutir à des estimations de biomasse précises à l'échelle des individus consiste donc à utiliser des allométries génériques (paramétrées sur un grand nombre d'individus) faisant intervenir plusieurs variables d'entrées (classiquement DBH, H et WSG) qui permettront d'introduire un maximum de mesures à l'échelle individuelle ou bien des sous-modèles régionaux (notamment des allométries H :D développables localement à moindre coût). Même dans cette configuration optimale, l'incertitude d'estimation liée à l'imprécision du modèle allométrique reste très importante à l'échelle individuelle et se propage sans totalement s'atténuer aux échelles supérieures [122,123]. La diversité des formes de couronnes des grands arbres représente actuellement la plus grande part de la variabilité non contrôlée par les allométries [124].

Assurer des estimations fiables et surtout non biaisées, dans un contexte régional donné, nécessite donc de développer des modèles allométriques H:D dans les différents types forestiers rencontrés ou pour les principales essences dominantes. Ces allométries ont généralement déjà été développées par les forestiers et chercheurs dans les différents territoires d'outre-mer. L'acquisition et l'analyse de données LiDAR à forte densité dans ces différents contextes peut cependant permettre d'améliorer significativement la précision des allométries H:D et celles du ratio entre masse de la couronne et masse du tronc en fournissant des mesures volumétriques et allométriques individuelles très précises [125,126]. Les principes et l'intérêt du LiDAR sont développés dans le paragraphe suivant.

3.2.3.A.II. DE L'ARBRE A LA PLACETTE : LES APPORTS DU LIDAR

Le passage de l'arbre à la placette est effectué par une simple addition des estimations individuelles sur une placette de forme et de surface donnée. Cette placette servira par la suite d'unité expérimentale pour la calibration d'un modèle spatial. La surface unitaire des placettes est un paramètre important qui influence fortement la précision des estimations à l'échelle locale [127]. En effet, plus la placette est grande, plus les erreurs d'estimations à l'échelle individuelle sont susceptibles de s'équilibrer [128]. Par contre, l'hétérogénéité environnementale, qui augmente avec la taille, risque d'apporter une source de variabilité supplémentaire mal contrôlée. A l'inverse, plus la placette est petite, plus les effets de bord peuvent être forts (poids de l'inclusion et exclusion d'arbres limites) mais plus le nombre d'unités expérimentales peut être important ce qui permet de mieux appréhender la variabilité à l'échelle d'un site [129]. De fait, à ce jour il n'y a pas vraiment de consensus sur la taille de placette optimale à adopter et si l'on observe en FTH une forte réduction de l'incertitude d'estimation à partir de surfaces > 0.25 ha [130,131], beaucoup d'études continuent d'utiliser des placettes de très petites tailles (i.e. 500 m² à 0.1 ha).

De fait, les variations de biomasse à l'échelle locale montrent une sensibilité beaucoup plus forte vis-à-vis des hétérogénéités de structures que vis-à-vis des variations environnementales [132], ce qui milite en la faveur de l'adoption de placettes de plus grande taille permettant de mieux appréhender la structure moyenne des peuplements. Par ailleurs, la structure est un facteur très dynamique dépendant des événements de mortalité susceptibles d'entraîner des variations brutales et locales de la biomasse. L'adoption de larges placettes permet, dans une certaine mesure, de moyenniser les effets de cette dynamique temporelle qui apporte un bruit important dans le cas inévitable de décalage temporelle entre les prises de données de terrain et leur

utilisation [127]. D'un autre côté, la structure très complexe des FTH et la faible dépendance aux conditions environnementales implique une forte variabilité locale de la biomasse accompagnée d'une faible autocorrélation spatiale [21]. Cette distribution spatiale peu structurée impose de multiplier les unités expérimentales de taille raisonnable (autour de 0,5 ha) avec une répartition spatiale régulière si l'on souhaite assurer une bonne représentativité des estimations à l'échelle locale et à celle des paysages.

Le LIDAR aéroporté fourni depuis peu les moyens de multiplier les unités expérimentales à moindre coût pour répondre à ce problème. Le LIDAR (Light Detection And Ranging) est un système de télédétection « actif » basé sur la mesure du temps de retour d'un rayon laser émis par le LiDAR et réfléchi par les objets opaques. Ce système d'écholocation, proche de celui du radar mais basé sur une onde lumineuse, permet d'obtenir un nuage de points signalant la position des éléments constitutif de l'environnement forestier : feuilles, branches, troncs, végétation basse, sol. En fonction de la quantité d'énergie du laser et de la densité de pulses émis et enregistrés, le LIDAR permet d'obtenir un relevé plus ou moins exhaustifs des volumes occupant l'espace forestier [133]. Les points formant ces nuages peuvent être catégorisés en fonction de leur position spatiale, de leur ordre de réception, de leur intensité, de leur agencement et peuvent ainsi être classés a priori selon leur nature. Plusieurs types de produits peuvent ainsi être dérivés de ces relevés : (1) des surfaces de type Modèle Numérique de Terrain (MNT), Modèle Numérique de Canopée (MNC) ; (2) des profils de densité de points délimitant les strates (sous-étage, canopée, sursol), (3) des objets par délimitation des couronnes, individualisation des troncs, ...



FIGURE 36 – ILLUSTRATION DE LA CAPACITE DU LIDAR A AMELIORER LA PRECISION DES ALLOMETRIES H:D PAR CROISEMENT AVEC LES DONNEES IN SITU, TIREE DE G.VINCENT (NON PUBLIE)

Le LIDAR couplé à des placettes de relevés terrain, permet ainsi d'obtenir des mesures complémentaires susceptibles d'améliorer les estimations individuelles (Figure 36), comme des mesures de hauteurs, de volume de couronne, mais aussi le biovolume de végétation basse, etc [134,135]. Le LIDAR permet aussi de produire directement des estimations de biomasse à l'échelle de la placette à partir d'indicateurs de peuplement sans passé par l'échelle individu [136,137]. Des « allométries » génériques ou locales ont ainsi été développées pour prédire AGB à partir du TCH (Top of Canopy Height), du MCH (Mean of Canopy Height) ou d'autres variables dérivées de la distribution verticale des points en « full-waveform » [138]. Ces modèles peuvent fournir des estimations très fiables tout en étant calibrés sur quelques dizaines de placettes de taille moyenne [136,137]. La fiabilité des estimations obtenus à partir des relevés LIDAR et de ces méthodes sont excellentes avec des coefficients de corrélations $R^2 > 0.9$ et des erreurs de prédictions $RMSE^{17} < 40 \text{ Mg.ha}^{-1}$, soit environ 15% d'erreur relative [139,140]. La réalisation de transects LiDAR sur de grandes surfaces peut ainsi permettre de mieux couvrir le territoire pour suppléer au manque de données terrain et ainsi améliorer la représentativité des unités

¹⁷ RMSE : la Root Mean Square Error ou erreur quadratique moyenne

expérimentales. Bien que les coûts d'acquisition de ces données tendent à diminuer (i.e. de l'ordre de 0,1 €/ha selon [118] mais plutôt de l'ordre de 3 à 2,5 €/ha dans les ROM-COM actuellement) aucune cartographie exhaustive (« wall-to-wall ») de la biomasse n'a été réalisée jusqu'à présent à l'échelle d'une région tropicale à partir de LiDAR.

La plupart des produits LiDAR mis en œuvre sont des LiDAR aéroportés de qualité très variables en termes de paramètres d'acquisition, tels que la densité de points au sol, la quantité d'énergie émise, les modalités de réception des échos, l'empreinte au sol, l'angle de scan... [141,142]. La précision des résultats obtenus est cependant peu sensible à ces variations [143]. Malgré des caractéristiques extrêmes (large empreinte de 70m tous les 170m), le seul LiDAR embarqué, capteur GLAS du satellite ICE-SAT, demeure efficace dans la mesure des biomasses [144]. Sa couverture est limitée à des trajectoires disjointes plus espacées près de l'équateur et revisitées 2 à 3 fois par an. Ces données ont fréquemment été combinées à des relevés LIDAR selon un plan expérimental emboîté : calibration d'empreinte GLAS à partir de relevés LIDAR eux même calibrés à partir de placettes terrain. Ces fructueuses applications ne doivent cependant pas cacher que les incertitudes qui entachent ces estimations sont encore >20% à la résolution de 1ha soit bien au-delà des 10% attendus dans le cadre des processus REDD [145]. Ce type de dispositif a été plusieurs fois mis en application à l'échelle globale pour suppléer à l'absence de données terrain sur de nombreux territoires peu documentés [146,147]. En Guyane, cette approche a aussi été récemment adoptée pour développer une carte de biomasse détaillée [22].

3.2.3.A.III. DE LA PLACETTE AU TERRITOIRE : APPORT DE L'IMAGERIE OPTIQUE SATELLITAIRE

A ce jour, la réalisation de cartes régionales de biomasse ne peut s'obtenir par une mesure directe de la variable. Le passage des estimations ponctuelles (placettes) ou linéaires (transects LIDAR) à une extrapolation régionale passe obligatoirement par le développement de modèles de prédiction basés sur des variables accessoires indirectes issues soit de cartes thématiques (carte pédologique, carte de végétation...), soit d'images satellites en couverture complète (Figure 37). L'utilisation d'images satellites se fonde sur deux méthodes : l'analyse de réflectance ou l'analyse de texture. La réflectance (intensité de réflexion des ondes lumineuses) est directement impactée par l'indice de surface foliaire LAI (Leaf Area Index), qui renseigne sur la nature du couvert végétal [148]. La réflectance des objets dépend non seulement de leur nature mais aussi des longueurs d'onde de telle sorte qu'il est possible par analyse du spectre de réflectance de développer des indices de végétation tel que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [149,150], ou bien de « démixer », pour chaque pixel d'une image, la part de couvert végétal, de sol nu, de surface en eau, ...[111,151]. Les variations de réflectance permettent donc d'approximer les franches variations de végétation (milieux ouverts ± fermés) avec cependant des effets de saturation qui limite les capacités de distinction au sein des forêts les plus denses [152]. L'analyse des textures permet d'acquérir une information sur la taille des objets qui constituent le couvert [153] : appliquée aux écosystèmes arborés et à des images à très haute résolution (THR), elle permet de déterminer la taille des couronnes elle-même liée à la grosseur de l'arbre et donc à son volume total. L'analyse de texture peut-être compliquée par les effets de reliefs et d'ombrage [154], mais ces effets peuvent être corrigés pour une application à large échelle [155] avec une bonne robustesse et fiabilité ($R^2 \approx 0.85$ – erreur moyenne $\leq 15\%$). L'analyse de texture peut être réalisée sur images satellites THR ou sur photographies aériennes. Les reconstitutions stéréoscopiques à partir d'images optiques sont aussi utilisables pour obtenir des modèles de hauteurs de canopée et en dériver des modèles de biomasse [156,157] mais on atteint alors des niveaux de complexité beaucoup plus lourds rendant ces approches difficilement réalisables sur de grandes surfaces.

Les radars embarqués, principalement de type SAR (Synthetic Aperture Radar), sont aussi largement utilisés. Ils sont basés sur le même principe d'écholocation que le LIDAR mais

utilisent des ondes radio de fréquences variables pouvant être polarisées. Ils peuvent ainsi pénétrer plus ou moins profondément sous le couvert et fournir une information très riche sur le volume des objets [158] et de nombreuses variables dérivées. Plusieurs applications ont déjà été développées à des échelles régionales principalement à partir des produits ALOS-PALSAR [159,160], mais elles se limitent aux formations sèches de faible biomasse du fait de problème de saturation sur les forêts les plus stockées [160]. Ce problème de saturation rencontré lors de l'utilisation des bandes X et L est en passe d'être dépassé avec l'utilisation d'un SAR en bande P plus pénétrante [161] qui sera prochainement embarqué dans le satellite BIOMASS dont le lancement est programmé par l'UE en 2020. Cette avancée technique devrait permettre d'atteindre un niveau de prédiction de la biomasse très satisfaisant y compris en FTH avec des erreurs moyennes < 20% à une résolution de 4 ha. Ce nouveau satellite devrait aussi accroître la concurrence dans le domaine et abaisser les coûts d'achat des produits radar, qui sont encore très élevés [158].

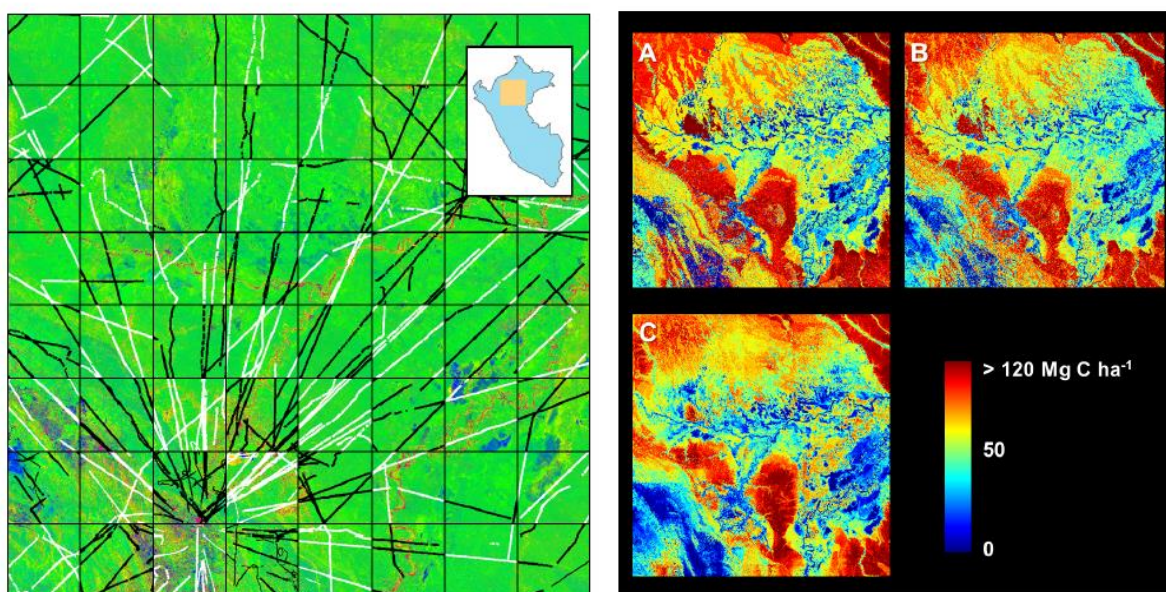


FIGURE 37 – ECHANTILLONNAGE ADOPTÉ ET SOURCES DE DONNÉES UTILISÉES POUR LA RÉALISATION D'UN MODÈLE DE PRÉDICTION SPATIALE DE LA BIOMASSE AU PÉROU TIRÉES DE MASCARO ET AL [162] *Analyse du couvert de végétation photosynthétique sur images LANDSAT (fond vert) combinée à des relevés LiDAR sur transects (en noir pour calibration – en blanc pour validation) – à gauche les résultats obtenus par différents modèles de prédiction sur la même zone.*

L'intégration de variables prédictives environnementales dans les modèles d'extrapolation spatiale répond à deux stratégies. La première vise à stratifier l'espace forestier par grands types de végétation présentant des caractéristiques fonctionnelles, structurales et environnementales plus homogènes. Cette approche typologique permet de réduire la variabilité et d'améliorer ainsi la précision des allométries utilisées pour les changements d'échelles [98,118]. La deuxième vise à capturer les tendances liées à des changements de composition et de structure contrôlés par des modifications de reliefs, de sol, d'usages ... [162]. L'intégration dans les modèles spatiaux de variables environnementales et de tendances géographiques en sus des variables issues d'images optiques ou radar permet d'améliorer significativement la qualité des modèles pour atteindre en FTH à forte biomasse des niveaux de précisions de l'ordre de 50 à 65 t.ha⁻¹ pour des échelles allant de 100 m à 2 km de résolution [21,162]. La précision finale de ces cartes est cependant bien loin des ambitions initialement fixées par les groupes d'experts internationaux pour les cartographies de biomasse aux échelles nationales. Dans bien des cas, des estimations moyennes par type de forêts, fournissent des estimations aussi fiables (ou tout du moins avec le même degré d'incertitude) que des modèles spatialement explicites.

3.2.3.A.IV. QUEL USAGE DES CARTES DE BIOMASSE A L'ECHELLE GLOBALE ?

Les techniques décrites précédemment ont été combinées et mises en œuvre pour produire des couvertures globales de la biomasse aérienne terrestre. Plusieurs cartes ont été produites pour la bande intertropicale en suivant des procédures assez proches [146,147]. Dans le cas de ces cartographies globales, quelques centaines de placettes terrains permettent de calibrer des relevés provenant d'un LIDAR embarqué (capteur GLAS embarqué dans le satellite ICESat). Ces empreintes de 70 m de diamètre sont ensuite utilisées comme des pseudo-unités de mesures pour in fine développer un modèle d'extrapolation spatiale sur la base d'images satellitaires optiques à couverture globale de type MODIS, et radar de type SRTM (pour un modèle de surface) ou QSCAT (pour la structure de végétation). Ces produits aboutissent à des estimations assez fiables lorsqu'elles sont agrégées à des échelles nationales, cependant leur cohérence spatiale est très faible [163]. A l'échelle amazonienne, elles ne rendent pas bien compte des grandes tendances géographiques [164]. A l'échelle régionale, ces modèles de distribution sont très mal corrélés aux relevés de terrain et présentent des erreurs moyennes > 100 Mg. ha⁻¹ [21]. Leur amélioration requiert des méthodes de débiaisement local complexes et peu convaincantes (Figure 38) [163].

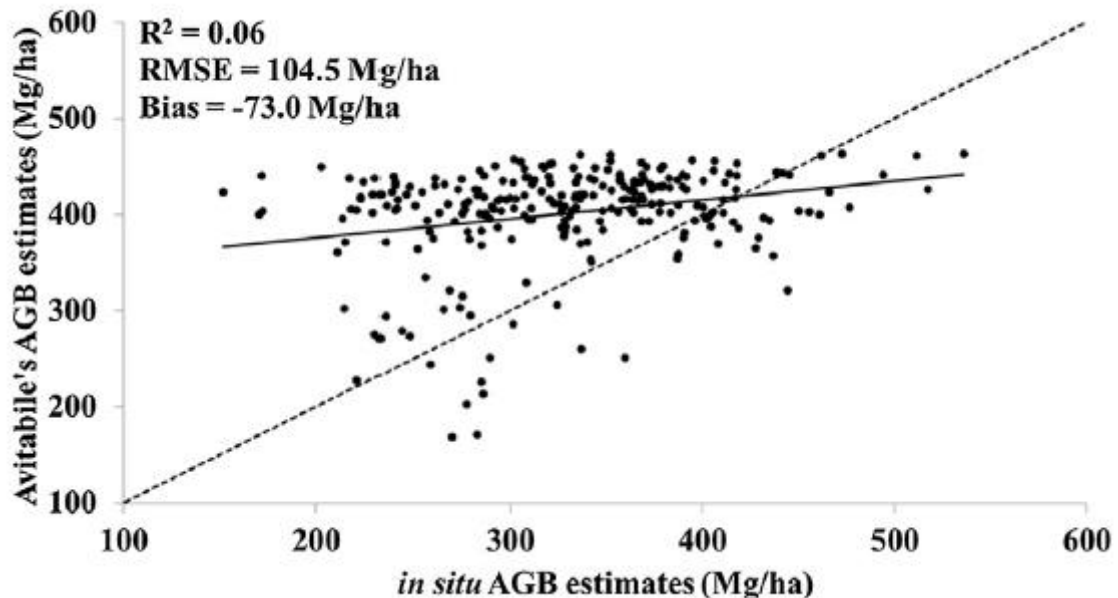


FIGURE 38 - COMPARAISON DES ESTIMATIONS DE BIOMASSE DE LA CARTE GLOBALE D'AVITABILE ET COLLEGUES [163] AVEC LES DONNEES *IN SITU* COLLECTEES EN GUYANE PAR GUITET ET COLLEGUES [21], TIRE DE FAYAD ET COLLEGUES [22]

Ce manque de fiabilité et de précision peut s'expliquer par différents facteurs, notamment l'insuffisance de points de calibration au regard de la variabilité des écosystèmes considérés [163], l'incertitude des estimations sur ces points de calibration [115] mais aussi le manque de cohérence spatio-temporel entre les relevés LIDAR satellitaires et les placettes de terrains servant à la calibration [130]. Il en résulte des erreurs importantes (80- 120 Mg.ha⁻¹) mais aussi des biais entrainant de fortes surestimations locales > 100 Mg. ha⁻¹. **L'utilisation de ces cartes globales à des échelles infranationales n'est donc pas recommandable.**

3.2.3.A.V. SUIVI DES CHANGEMENTS DE BIOMASSE

Les évolutions de biomasse sont essentiellement liées aux phénomènes de déforestation et de dégradation, qui entraînent la disparition de tout ou partie de la biomasse forestière. Quelle soit brûlée, transformée informellement ou abandonnée au pourrissement, la biomasse est

généralement considérée comme immédiatement perdue et le carbone immédiatement relargué, ce qui n'est pas réellement le cas mais simplifie les suivis. De fait, ce ne sont pas les évolutions de biomasse qui sont directement mesurées, mais plus souvent les évolutions d'occupation des sols qui sont ensuite converties en estimation de réduction de biomasse [110,118], soit par croisement avec les cartes de stocks de biomasse, soit par application de matrices de passage entre des stocks moyens estimés pour chaque type d'occupation.

Il existe cependant plusieurs expériences de suivi direct des évolutions de biomasse à partir de LiDAR multi-date [141], mais celles-ci restent encore du domaine de la recherche et concernent des surfaces très restreintes. Les radars polarimétriques embarqués (en bande L) visant à fournir une information 3D des structures forestières pour une mesure directe de la biomasse et de ces changements sont pour le moment insuffisamment précis pour fournir ce suivi en dehors des végétations à faible biomasse (Figure 39) [165]. La fusion des données radar à large couverture (de type PolSAR) avec des données LiDAR plus locales renseignant sur le profil 3D de canopée est susceptible de produire une mesure directe de la biomasse et de ces changements sur de grands territoires [165], mais requiert une solide maîtrise technique. Cette technique a été partiellement déployée en forêt boréale [166] avec des résultats plus ou moins concluants et n'a pour l'instant jamais été réellement mise en œuvre à une échelle régionale. Le suivi direct des changements de biomasse est un des principaux objectifs du radar en bande P, qui sera embarqué en 2020 dans le satellite BIOMASS. Il vise un suivi des FTH sur un pas de temps annuel et un suivi des autres forêts sur un pas d'environ 5 années avec un seuil de détection des changements > 30% à la résolution de 1 ha [167] ramené plus récemment à 4 ha.

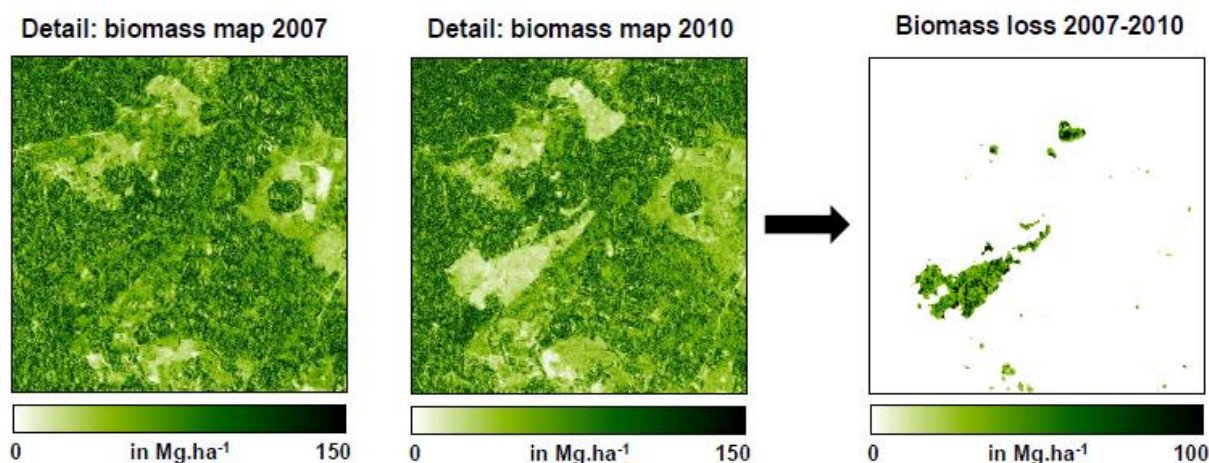


FIGURE 39 – EXEMPLE DE SUIVI DES CHANGEMENTS DE BIOMASSE ENTRE 2007 ET 2010 A L'AIDE D'IMAGES ALOS-PALSAR AU CAMEROUN DANS UN CONTEXTE DE FAIBLES BIOMASSES (<150 T/HA), TIRE DE LE TOAN [168]

3.2.3.A.VI. LA DYNAMIQUE FORESTIERE NATURELLE ET APRES PERTURBATION

Les articles sélectionnés dans cette première vague d'analyse bibliographique n'abordent pas du tout la problématique de suivi des dynamiques forestières de reconstitution de biomasse après perturbation. Cette dimension rentre effectivement dans un volet facultatif des accords REDD (article 3.4 du protocole de Kyoto), cependant elle peut peser fortement sur les bilans globaux à l'échelle d'un territoire. Jusqu'à récemment par exemple, la FTH guyanaise non perturbée était considérée à l'équilibre du point de vue variation de biomasse [27], mais les suivis de dynamique à plus long-terme et à plus large échelle semblent révéler des tendances à l'accumulation de biomasse (effet puits) que l'on retrouve aussi sur une grande partie du massif Amazonien, mais qui seraient en cours d'atténuation sous les effets des changements

climatiques (Figure 40) [169-171]. Ces tendances font cependant encore débat, compte-tenu des incertitudes qui entourent ces résultats et des questions autour de la représentativité des réseaux de placettes utilisées pour l'étude de ces tendances [172,173].

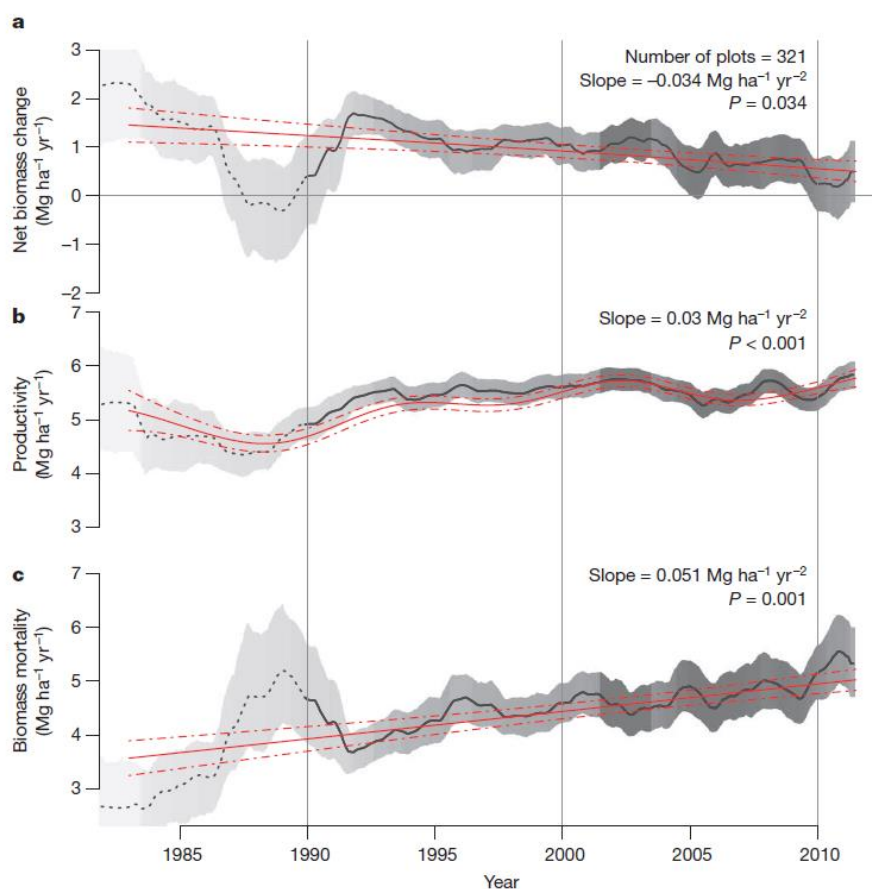


FIGURE 40 - EVOLUTION DU STOCK DE BIOMASSE AERIENNE A L'ECHELLE AMAZONIENNE SUR LE RESEAU DE PLACETTES RAINFOR TIREE DE BRIENEN ET AL [174]

Le bilan net est positif mais tend à se réduire au cours des dernières décennies.

Par ailleurs, si l'exploitation forestière entraîne d'importantes émissions de carbone sur le moyen terme suite à la décomposition de la nécromasse et à l'augmentation de la mortalité consécutive à l'exploitation [175,176], les modèles de reconstitution de biomasse indiquent que les stocks de biomasse en forêt exploitée sont susceptibles de rapidement se reconstituer voire de dépasser leur niveau initial et produire à terme un substantiel effet puits (Figure 41) [177]. En Guyane, le stockage de carbone lié aux phénomènes de reforestation après déprise (abandon des sites miniers ou de zones agricoles) représenterait au moins l'équivalent de 40 à 50% des émissions du secteur UTCF [47] en ne tenant compte que des seules surfaces perturbées au cours des 20 ans dernières années (les seules bien renseignées). **La décision d'inclure ou non les processus de séquestration par reforestation et les phénomènes de « dégradation » liés aux activités de gestion forestière dans les suivis « carbone » n'est donc pas sans conséquence.** Ces effets « puits » ont de fait été (plus ou moins adroitement) abordés dans les bilans Carbone de plusieurs ROM-COM (voir le chapitre [Etat des lieux](#)). L'acquisition de données sur les dynamiques naturelles et après perturbation devraient donc entrer dans le périmètre de l'observatoire à la fois pour mieux appréhender le rôle puits-source des massifs forestiers sous responsabilité française mais aussi pour pouvoir répondre autant que faire se peut à des changements de décisions concernant le positionnement de la France sur cet article 3.4 du protocole de Kyoto.

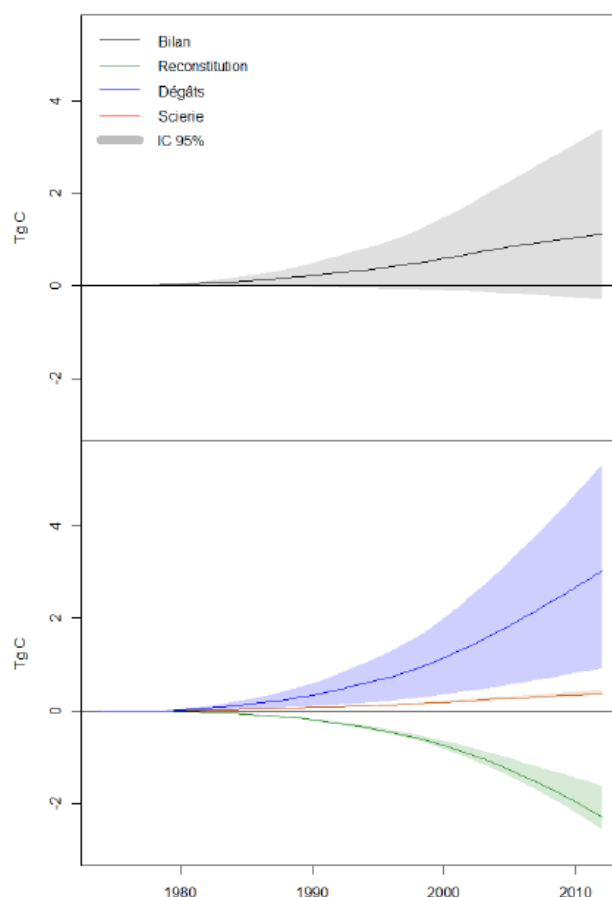


FIGURE 41 - BILAN CARBONE DES FORETS EXPLOITEES DU DOMAINE FORESTIER PERMANENT DE GUYANE TIRE DE CABON ET AL [176]

3.2.3.B. QUELLE STRATEGIE POUR AMELIORER LA FIABILITE DES ESTIMATIONS DE BIOMASSE DANS LES ROM-COM ?

Les instances internationales reconnaissent différents niveaux de qualité dans les estimations des stocks de carbone [178]. Le standard recherché dans les démarches REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation) et MRV (Measuring, Reporting, and Verification system) est une précision de l'ordre de +/- 10% pour un intervalle de confiance de 95% sur une résolution spatiale de 1 ha, mais force est de constater que les meilleurs produits développés jusqu'à présent sont encore loin de cet objectif [77].

Pour atteindre ces objectifs de précisions, l'IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) a défini plusieurs approches méthodologiques présentant une complexité et une fiabilité croissante : (1) le Tier 1 estime les stocks de carbone à partir de valeurs moyennes génériques données à-dire-d'expert sans contrôle de l'incertitude ; (2) le Tier 2 estime les stocks à partir de données recueillies sur le territoire permettant de mieux aborder la distribution des valeurs et les incertitudes associées ; (3) le Tier 3 se base sur des suivis et des modèles spatio-temporels permettant de mieux capter la variabilité au sein du territoire et d'intégrer les incertitudes dans les suivis. Actuellement, le secteur forestier est généralement suivi selon les modalités du Tier2 pour la biomasse aérienne ou du Tier1 pour les autres compartiments : les estimations de la majeure partie de la biomasse aérienne (hors lianes, sous-bois ...) se basent sur des données recueillies localement avec des incertitudes mal maîtrisées en dehors de la Guyane. Même pour des pays bien renseignés comme le Panama, considéré dans la moyenne haute en termes de qualité de suivi, l'incertitude des émissions liées au secteur forestier est de l'ordre de 40%, au

seuil de 5% [179]. En règle générale, la majeure partie des incertitudes concernant le suivi de ce secteur proviennent [123,180] :

- (1) **pour environ ~20-50% de l'imprécision des estimations terrains ;**
- (2) **pour ~15-35% du manque de cohérence temporelle des cartes d'occupation des sols réalisées à partir de mosaïques pluriannuelles ;**
- (3) **pour ~20% du délai temporel (généralement pluriannuel) entre deux suivis ;**
- (4) **pour ~20% du manque de données sur les secteurs en déprise ;**
- (5) **pour ~0-20% des erreurs de détection des changements d'affectation des sols.**

A ce jour seule la Guyane s'est dotée des modèles cartographiques (voir [chap3.1.1.B](#)) et des systèmes de suivi des changements (voir [chap3.1.3](#)) permettant de se rapprocher du Tier 3. Les autres territoires sont très mal renseignés à ce jour avec des rapportages de niveau Tier 1 ou Tier 2. La fiabilisation des suivis carbone sur le secteur forestier dans les ROM-COM passe donc prioritairement par une collecte de données, une maîtrise des erreurs d'estimation des stocks de carbone en forêt (secondairement dans les autres terres forestières) et la mise en place d'un système de cartographie et de suivi sur un pas de temps régulier et relativement court (tel que vue précédemment). Plusieurs pistes sont possibles pour réduire les incertitudes des estimations de stocks en FTH :

- **réduire les incertitudes des estimations au niveau arbre** en collectant des données régionales sur la hauteur et la densité des bois et en développant des modèles H:D précis afin d'affiner les sorties obtenues à partir des modèles allométriques génériques [122] ; en recueillant ces données après avoir stratifié l'espace forestier en fonction des conditions environnementales et du niveau de perturbation/dynamique [181] pour mieux apprécier les stocks notamment sur les secteurs de forêt secondaire ; en améliorant l'estimation des biomasses des gros arbres en augmentant l'échantillonnage destructif pour cette catégorie [116,182] ;
- **atteindre un niveau Tier 2 pour les estimations des stocks dans les autres compartiments.** Bien que la biomasse épigée compose la majorité du stock de carbone forestier on peut ajouter la nécessité d'améliorer l'estimation des stocks de carbone dans les autres compartiments de l'écosystème forestier et particulièrement les stocks de carbone organique des sols qui participent fortement aux émissions dans le cadre des changements d'usages et des dégradations [183] ;
- **atteindre le niveau Tier3 pour les estimations de biomasse** en adoptant les méthodes de cartographies les plus abouties. La combinaison de transects LIDAR aéroportés couvrant environ 10% du territoire, dont quelques dizaines de placettes de calibration par types forestiers est suffisante pour établir des allométries robustes et acquérir des estimations de biomasse fiables sur de très grandes surfaces (> 1 000 ha). Ces données peuvent ensuite être extrapolées à l'échelle du territoire en s'appuyant sur de l'imagerie satellitaire et des données environnementales pour développer un modèle d'inférence spatiale (tel que réalisé au Pérou [162], ou en Guyane [22]). Sur les plus petits territoires présentant *a priori* de faibles niveaux de biomasse (tel St Pierre-et-Miquelon ou Mayotte), une cartographie détaillée peut aussi être envisagée à partir d'imagerie radar en bande L, ou de couverture LiDAR complète.

4. ANALYSE ET PROPOSITIONS

4.1. DECLINAISONS LOCALES DES PROBLEMATIQUES FORESTIERES

4.1.1. PRIORISATION LOCALE DES ENJEUX GLOBAUX

Les deux grands enjeux globaux que sont la préservation de la biodiversité et la réduction des émissions des gaz à effets de serre dus à la déforestation et à la dégradation, prennent une place plus ou moins importante dans les politiques locales des différents territoires étudiés, ce dont témoignent les documents stratégiques locaux et les résultats de l'enquête en ligne consultables en annexe 5.

A la Réunion et à Mayotte, les enjeux de biodiversité constituent clairement une priorité, affichée dans le cadre de **Stratégies Régionales pour la Biodiversité (SRB) applicables pour la période 2013-2020 [184]**. Celle de la Réunion met en avant deux enjeux majeurs au travers d'une « Stratégie de Lutte contre les Espèces Invasives à La Réunion » et une « Stratégie de conservation de la Flore et des Habitats de la Réunion » [185]. Elle peut s'appuyer sur la présence d'un Parc National et d'un Conservatoire Botanique, acteurs naturels de cette politique et prévoit de se concentrer sur les milieux et espèces les plus menacées, intégrant spécifiquement les espaces forestiers. L'acquisition de relevés de terrains pour la caractérisation des habitats et le suivi de l'extension des espèces invasives aux seins des habitats apparaissent logiquement comme deux actions attendues par les acteurs locaux, dans les résultats de l'enquête CARTHAFORUM. Plus de 75% des participants, de tous territoires, souhaitent par ailleurs que l'observatoire ne se limite pas aux espaces forestiers mais intègre les milieux non arborés et se satisferaient d'un suivi sur un pas de temps long (quadriennal ou quinquennal).

La SRB de Mayotte lie spécifiquement **Biodiversité et Développement Durable** [186] en se tournant ostensiblement vers le lagon et le domaine maritime. Ces enjeux croisés de préservation et de développement se concrétisent pour l'espace forestier mahorais, dans les efforts de maîtrise et de structuration du secteur agroforestier, notamment par l'adoption d'un **Code forestier** original [187], spécifique au territoire, **intégrant explicitement les agro-forêts** dans le périmètre des biens gérés par l'Etat. L'enjeu prioritaire consiste donc à suivre des activités agroforestières qui restent très largement informelles. De fait si l'extension des espèces invasives aux seins des habitats est toujours une information attendue par la moitié des acteurs locaux selon les résultats de l'enquête, un système de suivi avec une fréquence à minima annuelle est par ailleurs attendu par 80% des participants notamment pour faciliter le contrôle des infractions.

La position des Antilles se rapproche fortement de celle de Mayotte. Les SRB n'y sont pas encore complètement finalisées, cependant une Stratégie de Suivi et de prévention des invasions biologiques a été adoptée communément pour les territoires de Martinique, Guadeloupe et St Martin [188]. Les défrichements attirent aussi particulièrement l'attention des acteurs de Guadeloupe, qui ont récemment diffusés une doctrine en matière de contrôle [189]. Le suivi de l'extension des espèces invasives aux seins des habitats n'est attendu que par 40% des acteurs locaux, qui mettent l'accent sur un système de suivi à fréquence annuelle (40%) voire continu (30%).

En Guyane, c'est l'enjeu Carbone étroitement lié aux problématiques de développement énergétiques et d'aménagement du territoire inhérent à la dynamique démographique galopante qui a été priorisé par la Collectivité Locale avec la mise en place de la structure Guyane Energie Climat (GEC) et de ses Observatoires Carbone et Energie. Un Agenda des Solutions a été élaboré par le territoire afin de décliner les engagements pour le Climat spécifiquement à la Guyane dans

le cadre de la COP21 [190]. Aucune SRB n'est disponible pour la Guyane, mais les enjeux locaux d'acquisition des connaissances concernant la biodiversité s'affichent au travers d'un projet d'Observatoire de la Biodiversité Amazonienne en Guyane (OBAG) aussi porté par la Collectivité Unique et soutenu par les autres acteurs locaux, et plus largement à travers l'implantation en Guyane du labex CEBA (Center for the study of Biodiversity in Amazonia). Les informations prioritairement attendues concernent en premier lieu la biomasse forestière et les stocks de carbone des sols pour plus de 80% des acteurs interrogés par notre enquête, qui souhaitent par ailleurs à minima un système de surveillance annuel (40%) ou en continu (35%) permettant de mieux maîtriser l'évolution des usages et la dynamique d'occupation des sols.

Du fait de leur faible surface, les forêts des petites îles supportent dans l'absolu des enjeux Biodiversité et Carbone nécessairement moins importants que ceux des autres territoires. En forêt de St Pierre-et-Miquelon, la régénération de la seule forêt boréale française est cependant fortement menacée par un déséquilibre forêt-gibier très préoccupant, impliquant un enjeu Biodiversité non négligeable au niveau national.

4.1.2. ATTENTES COMMUNES DES TERRITOIRES EN TERME DE CARTOGRAPHIE ET DE SUIVI

L'enquête réalisée auprès des acteurs de territoires fait ressortir des attentes et des besoins communs malgré la diversité des contextes. Les besoins cartographiques concernent en premier lieu les grandes formations végétales (80%), mais les cartes de végétation et d'habitats sont aussi nécessaires à la majorité des acteurs (60%). Actuellement, ce sont essentiellement les prises de vues aériennes, les fonds de carte (topographique, géologique..) et les données terrain qui sont utilisées pour établir ces cartes et réalisés les suivis. La ressource télédétection n'est utilisée en routine que par une minorité d'acteurs, essentiellement en Guyane (Figure 42). La proposition de produits cartographiques basés sur l'imagerie satellitaire peut donc fournir une approche complémentaire aux usages habituels outre-mer.

La demande locale exprimée relève en premier lieu d'une cartographie annuelle, spatialement très résolue (<0.5 ha) et englobant toutes les formations végétales naturelles, y compris les formations non forestières (80% des demandes) afin d'avoir un meilleur contrôle des atteintes au couvert forestier (défrichements, etc...) et une meilleure approche de la dynamique des territoires (Figures 43 et 44). Concernant les informations associées à ce suivi, les demandes sont très variées mais de fait le suivi des EEE apparaît comme la première priorité, exprimée par 46% des répondants ; cette priorité n'était pas initialement explicitée dans la demande du MEEM.

Enfin, d'un point de vue organisationnel, les acteurs locaux expriment avant tout un besoin en termes d'appui technique et financier afin de pouvoir réaliser ces suivis depuis les territoires. Les priorités sont données à la facilitation d'accès aux images (avant tout aux PVA d'après 62% des répondants). Les attentes se portent aussi sur l'animation d'échange technique entre les territoires (62% des répondants) et sur l'augmentation des moyens permettant de réaliser les relevés de terrain (59%). Ces positions renforcent le diagnostic d'un manque avéré de données *in situ* (tant qualitative que quantitative) et d'un besoin de plus de régularité dans les PVA, qui ne sont pas renouvelées avec une fréquence aussi régulière que sur le territoire métropolitain. Sur ce point, les images satellitaires sont minoritairement considérées comme source de données alternatives au manque de PVA (seulement 38% d'attentes) alors même que la demande d'un suivi à haute fréquence (minimum annuelle) semble incompatible avec le coût d'acquisition des PVA (Figure 44). Il y a là une incohérence entre attentes et moyens envisagés.



FIGURE 42 - RESULTATS DES REPONSES A LA QUESTION A CHOIX MULTIPLE N°5 DU QUESTIONNAIRE EN LIGNE : QUELLES SONT LES SOURCES D'INFORMATIONS UTILISEES ACTUELLEMENT POUR LA REALISATION DE VOS MISSIONS ?

6- Quelle est selon vous la résolution spatiale nécessaire et suffisante pour que les informations cartographiques répondent à vos besoins ?



7- Quelle est selon vous la fréquence de mise à jour optimale pour que les informations cartographiques répondent à vos besoins ?

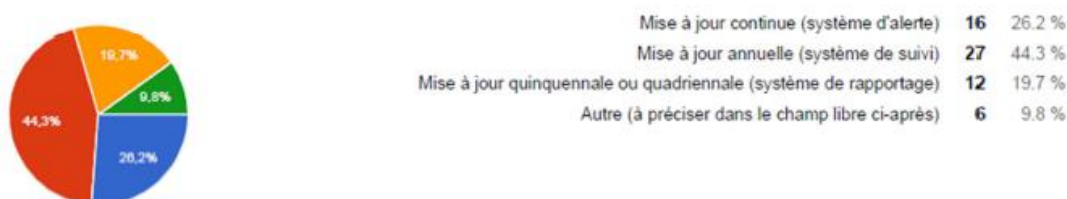


FIGURE 43 - RESULTATS DES REPONSES AUX QUESTIONS N°6 (EN HAUT) ET 7 (EN BAS) DU QUESTIONNAIRE EN LIGNE : QUELLE DOIT ETRE LA RESOLUTION SPATIALE ET LA FREQUENCE DE MISE A JOUR POUR QUE LES INFORMATIONS CARTOGRAPHIQUES REpondent A VOS BESOINS ?



FIGURE 44 - RESULTATS DES REPONSES A LA QUESTION N°13 DU QUESTIONNAIRE EN LIGNE : QUELLES SOURCES DE DONNEES PRIVILEGIER POUR LE SUIVI CARTOGRAPHIQUE ?

4.1.3. SYNTHÈSE DES ATTENTES CENTRALES ET TERRITORIALES

Les avis exprimés par l'enquête sont suffisamment nombreux et équilibrés pour être considérés comme représentatifs d'un ensemble de contextes certes hétérogènes, mais avec plusieurs points de convergence (priorisation à la préservation de la biodiversité, manque de moyens et/ou de compétences, éloignement problématique avec les facilités métropolitaines, etc...). Le contrôle des impacts à l'intégrité de l'écosystème forestier (défrichement, dégradation...) et la lutte contre les espèces envahissantes sont les objectifs principaux des acteurs.

Les acteurs ne recherchent pas un produit cartographique très détaillé typologiquement, mais avant tout une information très précise spatialement : ils semblent manquer des produits de base, ne serait-ce que de cartes d'occupation des sols intégrant une typologie des grandes catégories de formations végétales naturelles (et pas seulement forestières).

La demande exprimée vise la production annuelle d'une carte des formations végétales à 0.5ha de résolution à minima, qui intègre un suivi des principales EEE. Pour cela, les acteurs souhaitent des avancées dans deux domaines : (1) la délégation de moyens supplémentaires permettant de renforcer l'acquisition de relevés de terrain ; (2) l'organisation d'un soutien logistique sous forme de facilitation d'accès aux images, de formation, d'une veille et information technique. D'après les acteurs des territoires, le manque de produits cartographiques concernant les écosystèmes forestiers en outre-mer ne relèverait pas de problèmes méthodologiques ou techniques, qui nécessiteraient de plus amples développements, ni d'un manque de technicité en local, qui nécessiterait une assistance complète, mais plutôt d'un manque d'accès aux images et d'un manque de moyens financiers pour recueillir les données sur le terrain.

En réponse à la demande du MAAF, l'IGN a récemment proposé la production tous les 3-4 ans d'une carte des formations végétales à résolution de 0.5 ha, basée sur la photo-interprétation répondant aux besoins d'évaluation des ressources forestières et de suivi des surfaces (Briques 1 et 2 dans le rapport IGN du 20/01/2017). Les productions proposées répondent aux attentes de précision spatiale des acteurs locaux, mais la fréquence de mise à jour (inhérente à l'acquisition de couverture BDOrtho®) est insuffisante par rapport aux besoins de suivi exprimé par les territoires et aux besoins de rapports internationaux exigés par le COPIL. Par ailleurs, le mode de production de ces produits basés sur la photo-interprétation ne permet pas toujours d'assurer l'homogénéité des suivis dans le temps ni entre les territoires. Le déploiement d'un inventaire forestier régional proposé par l'IGN (Brique 3) peut aussi répondre pour partie au manque de données terrain exprimé par les territoires et par le COPIL.

Le COPIL-E de Carthaforum s'était orienté lors de sa deuxième réunion vers la mise en place d'un système de suivi des déforestations et dégradations en milieu forestier, basé sur le traitement d'images satellitaires optiques en continu, avec production cartographique à résolution de 0.5 à 1ha focalisée sur le seul espace forestier (présentations et compte-rendu des COPIL en [annexes 7 à 9](#)). La résolution spatiale envisagée était donc moins précise que celle attendue par les territoires, mais ce système visait en premier lieu à améliorer les rapports (notamment les bilans « carbone » régionaux), par une harmonisation des méthodes de suivi et une automatisation assurant robustesse et exhaustivité, tout en fournissant un système d'alerte aux gestionnaires de terrain pour faciliter la lutte contre les atteintes aux milieux forestiers.

4.2. PROPOSITIONS TECHNIQUES

Résumé des propositions :

ACTION 1 : Compléter la cartographie des formations végétales dans les ROM-COM

- ☐ **Option A** : extension de la cartographie des formations végétales sur les territoires non couverts par une BD-forêt récente, par exploitation d'imageries satellitaires à haute résolution (complémentarité spatiale avec les produits IGN) = 340 k€ sur 2 ans
- ☐ **Option B** : cartographie des formations végétales à très haute résolution par exploitation d'imageries satellitaires et prises de vues aériennes sur la totalité des territoires (complémentarité méthodologique avec les produits IGN) = 400 k€ sur 2 à 3 ans
- ☐ **Option C** : cartographie des formations végétales à très haute résolution par photo-interprétation assistée par satellites (complémentarité méthodologique et spatiale avec les produits IGN) = 620 à 850 k€ sur 5 ans.

- ACTION 2 : Assurer un suivi des changements forestiers facilitant les contrôles et le rapportage dans les ROM-COM

- ☐ **Option A** : suivi annuel des changements forestiers assistés par satellite = 50 k€ + 30 k€/an
- ☐ **Option B** : surveillance en continu des pertes de couvert forestier et consolidation annuelle du suivi = 50 k€ + 70 k€/an
- ☐ **Option C** : surveillance en continu des pertes et gains de couvert forestier = 85 k€ + 70 k€/an

- ACTION 3 : Améliorer l'estimation des stocks et flux de carbone forestier sur les ROM-COM

- ☐ **Option A** : Réalisation de mesures de terrain pour une estimation des principaux stocks de carbone forestiers au Tier 2 = 240 k€ sur 2 ans
- ☐ **Option B** : Elaboration de modèles de prédiction spatiale de la biomasse forestière pour une estimation carbone au Tier 3 = 230 k€ supplémentaires sur 3 ans
- ☐ **Option C** : Mise en place d'un réseau de placettes permanentes pour l'étude de la dynamique forestière et des stocks de carbone secondaires = 154 k€ supplémentaires sur 3 ans

- ACTION 4 : Développer des méthodes de suivi régulier des espèces exotiques envahissantes végétales en forêt

- ☐ **Option A** : Test de protocoles pour intégrer le suivi des principales EEE végétales terrestres dans un inventaire forestier régulier type IFN = 100 k€ sur 3 ans
- ☐ **Option B** : Développement d'outils numériques intelligents facilitant la reconnaissance et le signalement des EEE dans les ROM-COM = 150 k€ sur 2 ans
- ☐ **Option C** : Etude de faisabilité du suivi de populations d'EEE par imageries multi-spectrales ou hyper-spectrales = 240 k€ sur 3 ans

- ACTION 5 : Assurer une animation et des échanges techniques inter outre-mer sur les problématiques de cartographie et de suivi des habitats forestiers

- ☐ **Option A** : Organisation d'un séminaire technique annuel inter outre-mer = 30 k€/an
- ☐ **Option B** : Activation d'un appel à projets de recherche orienté vers l'étude des habitats forestiers ultra-marins = 475 k€ sur 5 ans
- ☐ **Option C** : Mise en place d'un pôle d'animation « Forêts ultra-marines » = 200 k€/an.

A la suite de ce constat plusieurs propositions techniques, permettant de concilier les attentes de robustesse (essentiel aux objectifs de suivis et rapportage du MEEM), les attentes de précisions spatiales et de fréquence temporelle (exprimés par les acteurs de terrain), et les propositions de production faites par l'IGN en réponses aux besoins du MAAF, ont été élaborées et présentées ci-après. Cinq grandes actions déclinées avec différentes options sont proposées en s'appuyant sur les expériences recensées lors de la phase préliminaire de l'étude (état des lieux, état de l'art) pour les différentes thématiques abordées :

- 1) compléter les cartographies des formations végétales proposées par l'IGN pour une couverture complète des ROM-COM ;**
- 2) assurer un suivi des changements forestiers assisté par satellites facilitant le contrôle des défrichements sur le terrain ;**
- 3) améliorer l'estimation des stocks et flux de carbone forestiers en synergie avec le déploiement de l'inventaire forestier national dans les outre-mer proposé par l'IGN ;**
- 4) développer des méthodes permettant l'intégration à moyen terme du suivi des EEE dans le dispositif de cartographie régulière ;**
- 5) animer des échanges techniques sur ces différents sujets entre les différents territoires.**

Chaque proposition et option technique est détaillée sous forme d'un cahier des charges simplifié et fait l'objet d'une évaluation en termes financiers (coûts et moyens nécessaires), opérationnels (fiabilité, faisabilité, ...) et organisationnels (intervenants potentiels et articulation), l'objectif étant de trouver le meilleur compromis entre les différents besoins, aux moindres coûts.

4.2.1. COMPLETER LA CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES DANS LES ROM-COM

Quatre principes ont orientés les propositions pour ce volet :

- (1) la recherche d'une complémentarité spatiale avec les produits proposés par l'IGN dans le cadre de l'étude MAAF (IGN 2017), qui quelques soient l'option ne peuvent couvrir l'intérieur de la Guyane ;
- (2) la recherche d'une complémentarité méthodologique avec les produits proposés par l'IGN, qui s'appuient sur l'information topologique apportée par la très haute résolution, mais intègrent peu les informations amenées par l'analyse multi-spectrale ;
- (3) la consolidation de moyen pour la collecte de données terrain de référence (points calibration / validation) constituant un jeu de données suffisamment conséquent pour assurer la qualité des produits cartographiques, que ce soit les productions issus d'approche satellitaires ou de photo-interprétations ;
- (4) l'objectif de réaliser une couverture complète de l'ensemble des territoires avant 2019, afin de pouvoir améliorer la qualité de la contribution de la France au rapportage FRA2020 de la FAO.

Dans ces propositions, il a été considéré que les briques 1¹⁸ et briques 2 de l'IGN [7] seraient disponibles avant 2019 sur les petits territoires (St Pierre et Miquelon, St Martin et St Barthélémy) et que l'analyse de données satellitaires avait bien moins d'intérêt sur les petites îles compte-tenu de leur résolution grossière, relativement aux surfaces concernées. Les fiches détaillées de chaque option sont disponibles en [annexe 10](#). Les coûts estimés se basent sur l'étude IGN [7] pour les briques 1 et 2, sur les expériences acquises en Guyane (S. Guitet) et à la

¹⁸ Brique 1 option 2 : délimitation de l'enveloppe des emprises forestières à partir de photo-interprétation de la BDortho® faisant la distinction entre Forêts, Autres Terres Boisées et Autres Terres dotées de couverts d'arbres (au sens FAO) - Brique 2 : Production d'une carte des formations végétales à partir de photo-interprétation de la BDortho®, équivalent à la BDForêt v2 de métropole.

Réunion [191] pour les coûts des relevés terrain, et l'expérience de télédéTECTEURS (G. Viennois et A. Kemavo) pour les coûts de traitement d'images satellitaires (Tableaux 14 et 15). Ces différentes options pourraient être réalisées par différents prestataires ayant développé l'expertise suffisante dans le domaine de la télédéTECTION, sous la supervision de l'IGN en charge de la qualification des produits et en lien avec les acteurs de terrain notamment pour assurer la collecte de données in situ et la validation des produits¹⁹.

TABLE 14 : ESTIMATION DU COUT DES DIFFERENTES ETAPES POUR LA REALISATION DES CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES DANS LES ROM-COM (EN EUROS)

Etapes / Territoires	971	972	973	974	975	976	977	978
Brique 1 IGN	13 400	9 000	6 700	16 400	4 000	4 000	4 000	4 000
Collecte terrain	20 000	18 000	60 000	45 000	4 500	15 000	3 000	3 000
Carto. Satellitaire	6 000	5 000	92 000	15 000	4 000	4 000		
Ou Brique 2 IGN	20 000	19 500	1 360 000	210 000	4 000	60 000	14 500	6 000

TABLE 15 : RAPPORT QUALITE COUTS DES DIFFERENTES OPTIONS CARTOGRAPHIQUES

Scénarii possibles	Coût k€	Résolution	Robustesse	Harmonisation
Option A : complémentarité spatiale	343	~	~	-
Option B : complémentarité spatiale & harmonisation méthodologique	403	+	+	~
Option C : complémentarité spatiale & méthodologique	628 à 854	++	++	++

4.2.1.A. OPTION A : EXTENSION DE LA CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES SUR LES TERRITOIRES NON COUVERTS PAR UNE BD-FORET RECENTE PAR EXPLOITATION D'IMAGERIES SATELLITAIRES A HAUTE RESOLUTION (COMPLEMENTARITE SPATIALE)

Il s'agit de produire des couvertures cartographiques des formations végétales à partir d'analyses d'images satellitaires, par classification multi-sources, afin de **compléter les produits IGN sur les territoires où aucune couverture récente ne serait disponible ou serait incomplète en 2019 (complémentarité spatiale)**. Le livrable correspond à une couche géo-référencée et qualifiée des postes de formations végétales naturelles, réalisée à partir de mosaïques d'images satellitaires standardisées permettant d'aboutir à une couverture complète des territoires. Cette couche sera accompagnée d'une mise à disposition des images ayant servies à sa production à l'ensemble des acteurs publics. Les territoires concernés sont la Guyane, Mayotte et la Réunion, considérant que des cartographies sont disponibles et devraient être mise à jour avant 2019 sur la Guadeloupe et Martinique dans le cadre des productions OCS-Ge actuellement en cours d'engagement (Tableau 16).

TABLE 16 : ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'OPTION A (COMPLEMENTARITE SPATIALE ENTRE PHOTO-INTERPRETATION ET ANALYSE SATELLITAIRE)

Etapes / Territoires	971	972	973	974	975	976	977	978
Brique 1 IGN	x	x			x		x	x
Collecte terrain	x	x	x	x	x	x	x	x
Carto. Satellitaire			x	x		x		
Ou Brique 2 IGN	x	x			x		x	x

Le coût de cette option serait de 343 k€, dont :

¹⁹ NB : La pertinence de cette organisation restera à discuter avec l'IGN par la suite si cette programmation était adoptée

- 64 k€ pour la production ou la mise à jour des Briques 2 ;
- 168 k€ pour la collecte de données terrain sur l'ensemble des territoires ;
- 111 k€ pour la collecte, le traitement et l'analyse des images satellitaires.

4.2.1.B. OPTION B : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A TRES HAUTE RESOLUTION PAR EXPLOITATION D'IMAGERIES SATELLITAIRES ET PRISES DE VUES AERIENNES SUR LA TOTALITE DES TERRITOIRES (COMPLEMENTARITE METHODOLOGIQUE)

Il s'agit de produire les couvertures cartographiques des formations végétales à partir d'images satellitaires comme précédemment, mais en intégrant les produits BDortho® et Brique1 de l'IGN dans l'analyse (segmentation d'objet à très haute résolution – analyse de texture). Cette option permettra de **combinaison la très haute résolution spatiale apportée par les produits IGN avec la robustesse et la richesse thématique de l'approche satellitaire multi-source (complémentarité méthodologique)**. L'ensemble des territoires est donc concerné (tableau 17). Cette option permettra de mieux apprécier les biais et complémentarités des différents produits issus de télédétection et de photo-interprétation sur les territoires où la Brique 2 sera disponible et mise à jour, dans une perspective d'amélioration et de rapprochement des deux types de produits (proposition de cartes de deuxième génération).

Le coût de cette option serait de 403 k€, dont :

- 91 k€ pour la production ou la mise à jour des Briques 1 ou 2 sur tous les territoires ;
- 168 k€ pour la collecte de données terrain sur l'ensemble des territoires ;
- 126 k€ pour la collecte, le traitement et l'analyse des images satellitaires auxquels s'ajouteraient 18 k€ pour l'étude comparative des Briques 2 et des cartes issues d'analyse satellitaire dans les Antilles.

TABLE 17 : ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'OPTION B (COMPLEMENTARITE METHODOLOGIQUE ENTRE PHOTO-INTERPRETATION ET ANALYSE SATELLITAIRE)

Etales / Territoires	971	972	973	974	975	976	977	978
Brique 1 IGN	x	x	x	x	x	x	x	x
Collecte terrain	x	x	x	x	x	x	x	x
Carto. Satellitaire	x	x	x	x	x	x		
Brique 2 IGN	x	x			x		x	x

4.2.1.C. OPTION C : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A TRES HAUTE RESOLUTION PAR PHOTO-INTERPRETATION ASSISTEE PAR SATELLITES (COMPLEMENTARITE METHODOLOGIQUE ET SPATIALE)

Il s'agit de produire les couvertures cartographiques des formations végétales par une double analyse combinant la très haute résolution spatiale apportée par les produits IGN avec l'analyse des images satellitaires apportant une plus grande richesse spectrale (complémentarité méthodologique telle que décrite dans le chapitre « *Méthode de cartographie des habitats et formations végétales* »). L'ensemble des territoires est donc concerné à la fois par l'analyse satellitaire et la production des briques IGN (sauf Guyane - voir tableau 18). Cette option optimale permettra de produire une nouvelle génération de cartes, harmonisées entre les territoires, de résolution spatiale optimale et intégrant un maximum d'informations disponibles pour une richesse thématique améliorée.

Le coût de cette option serait à minima de 854 k€ (628 k€ sans la brique 1 en Guyane), dont :

- 560 k€ pour la production ou la mise à jour des Briques 2 sur tous les territoires (334 k€ sans la brique 1 en Guyane) ;
- 168 k€ pour la collecte de données terrain sur l'ensemble des territoires ;
- 126 k€ pour la collecte, le traitement et l'analyse des images satellitaires.

TABLE 18 : ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'OPTION B (COMPLEMENTARITE METHODOLOGIQUE ENTRE PHOTO-INTERPRETATION ET ANALYSE SATELLITAIRE)

Etapes / Territoires	971	972	973	974	975	976	977	978
Brique 1 IGN	x	x	(x)	x	x	x	x	x
Collecte terrain	x	x	x	x	x	x	x	x
Carto. Satellitaire	x	x	x	x	x	x		
Brique 2 IGN	x	x		x	x	x	x	x

4.2.2. ASSURER UN SUIVI DES CHANGEMENTS FORESTIERS POUR FACILITER CONTROLES ET RAPPORTAGE

Quatre principes ont orientés les propositions pour ce volet :

- (1) la volonté de répondre non seulement aux besoins de rapportage (constatation *a posteriori*) mais aussi aux besoins de surveillance des territoires (détection précoce des changements) ;
- (2) la recherche d'une complémentarité temporelle avec les suivis proposés par l'IGN dans le cadre de l'étude MAAF [7] qui, quel que soit l'option choisie, ne peuvent être produits annuellement ;
- (3) la consolidation des dispositifs déjà existants en Guyane basés sur l'infrastructure SEAS et l'accompagnement de leur évolution en facilitant l'exploitation des sources de données nouvelles ou alternatives aux données SPOT ;
- (4) l'objectif d'une automatisation rapide du dispositif en s'appuyant autant que faire se peut sur des infrastructures, programmes et méthodes déjà opérationnelles.

Les propositions se focalisent sur l'exploitation des images multi-spectrales de type LANDSAT et SENTINEL2, deux types d'image très proches d'un point de vue spectrométrique, produites gratuitement et très régulièrement, avec une fréquence de quelques jours. On s'appuiera pour cela sur l'Infrastructure de Données Satellitaires de THEIA-GéoSUD, dispositif qui fédère toute la filière télédétection au niveau national (y compris les infrastructures SEAS), et qui a déjà développé les outils nécessaires à la mise en production, le prétraitement et l'exploitation d'images LANDSAT et SENTINEL2 en temps réel (outils en cours de transfert à SEAS-Guyane). L'estimation des coûts des différentes options s'appuient sur l'expérience de l'IRSTEA (K. Ose), qui a déjà développé récemment une méthode de suivi des coupes rases pour la France métropolitaine (tableaux 19 et 20).

TABLE 19 : COUTS DES PRESTATIONS POUR LA CONSTITUTION DU DISPOSITIF DE SUIVI DES CHANGEMENTS

Prestations constitutives des actions	Coûts
Adaptation méthodes de détection et chaînes de traitement (une fois)	35 000 €
Mise en œuvre d'un suivi annuel (par an tous territoires)	30 000 €
Mise en œuvre du suivi continu (volume d'images plus important)	+ 20 000 €
Gestion d'une plate-forme d'échange pour un suivi en continu	+ 10 000 €
Formation des agents de terrain (par sessions)	15 000 €

TABLE 20 : COUTS DES DIFFERENTES OPTIONS POUR LA CONSTITUTION DU DISPOSITIF DE SUIVI DES CHANGEMENTS

<i>Scénarii</i>	Option A	Option B	Option C
<i>Suivi des pertes</i>	annuel	continu	continu
<i>Suivi des gains</i>	annuel	annuel	continu
<i>Coût total première année</i>	50 k€	50 k€	85 k€
<i>Coût fonctionnement annuel</i>	30 k€	70 k€	70 k€

4.2.2.A. OPTION A : SUIVI ANNUEL DES CHANGEMENTS FORESTIERS ASSISTE PAR SATELLITES

Il s'agit de produire une couche de changements (pertes et gains de couvert forestier) sur la base d'une comparaison date-à-date de mosaïques annuelles basées sur une sélection d'images multi-spectrales haute résolution SENTINEL2 complétées par LANDSAT. Trois types de changements seront observés en forêt. Les pertes forestières qui comprennent les déboisements et déforestations et sont définies comme un passage d'un état boisé (détecté comme forêt sur les images satellitaires) à un état non-boisé (détecté comme non-forêt) sur une surface > 0.5ha d'un seul tenant ; les dégradations qui sont définies comme une réduction de plus de 50% du couvert forestier sur une surface > 0.5ha d'un seul tenant (i.e. déforestation diffuse sur plus de 50% de la surface) : les reboisements et reforestations qui sont définis comme un passage d'un état non-boisé à un état boisé sur une surface > 0.5ha d'un seul tenant.

La couche sera produite et transmises aux territoires en début d'année n+1, par comparaison de la mosaïque de l'année n avec celle de l'année n-1. Elle ne distinguera pas les déforestations (coupe rase du peuplement forestier pour un changement d'occupation du sol) des déboisements (coupe de la forêt sans changement d'occupation du sol), ni les pertes dues à une action humaine des événements naturels. Cette distinction sera effectuée *a posteriori* après validation et renseignement de la couche produite par les agents publics, qui pourront s'appuyer sur leur contrôle terrain ou sur l'exploitation de sources de données alternatives (images SPOT fournies par SEAS, ...).

4.2.2.B. OPTION B : SURVEILLANCE EN CONTINU DES PERTES DE COUVERT FORESTIER ET CONSOLIDATION ANNUELLE DES SUIVIS

Il s'agit de mettre en place un système d'alerte par détection des changements au fur et à mesure de la mise à disposition des images LANDSAT et SENTINEL2 (donc potentiellement sur un pas de temps mensuel ou trimestriel). Ce suivi en continu n'intégrera que les pertes forestières et les dégradations. Les informations produites seront transmises en temps réels aux territoires sur une plate-forme permettant un travail collaboratif (contrôle, validation et nettoyage des informations par les acteurs de terrain). L'ensemble des données collectées sur une année serait consolidées dans une couche millésimée en fin d'année. Les gains forestiers (reboisements et reforestations), processus beaucoup plus graduels ne feraient l'objet que d'un suivi annuel, comme dans l'option A. Cette option implique le traitement d'un nombre d'images beaucoup plus conséquent que l'option A.

4.2.2.C. OPTION C : SURVEILLANCE EN CONTINU DES CHANGEMENTS FORESTIERS (PERTES ET GAINS)

Il s'agit de mettre en place un système d'alerte similaire à l'option B mais **intégrant la détection des gains forestiers sur série temporelle** (méthode a priori plus efficace que la comparaison date à date) ce qui nécessiterait une phase de développement méthodologique supplémentaire à l'option B (chaîne d'analyse pour la détection des pertes + chaîne d'analyse pour la détection des gains).

4.2.3. AMELIORER L'ESTIMATION DES STOCKS ET FLUX DE CARBONE FORESTIER

Les trois options proposées correspondent à trois étapes différentes dans l'amélioration des estimations des stocks et flux. Elles ne sont donc pas exclusives, mais peuvent se cumuler ou s'envisager dans un plan d'évolution progressif du système de rapportage français dans les ROM-COM. Ces actions excluent la Guyane dans un premier temps compte-tenu d'un niveau de rapportage déjà supérieur aux autres territoires et des efforts d'amélioration qui ont été réalisés au cours de ces dernières années par les différents partenaires guyanais.

Ces propositions, qui consistent essentiellement en la collecte de données terrain, s'articulent avec la mise en place de la Brique 3 de l'IGN (dispositif d'inventaire forestier national dans les ROM-COM), dont elles préparent le déploiement. Ces actions impliqueraient donc une implication forte des acteurs de terrain (ONF, Parcs Nationaux, Universités et recherche) en collaboration avec l'IGN assurant la supervision des collectes et productions de données. Les estimations de coûts se basent sur l'expérience guyanaise récente (programme Habitats) ajustées par contexte en fonction des facilités de déplacements, accessibilités, et difficultés des terrains.

4.2.3.A. OPTION A : REALISATION DE MESURES DE TERRAIN POUR UNE ESTIMATION DES PRINCIPAUX STOCKS DE CARBONE FORESTIERS AU TIER 2 SUR LES ROM-COM

Il s'agit de collecter des données dendrométriques et pédologiques *in situ* sur une **vingtaine de placettes de 0.4 à 0.5 ha** sur les territoires où les estimations de stocks ne se basent actuellement que sur les dires d'experts. Cette campagne de collecte permettrait à la fois d'estimer les **principaux stocks de carbone forestiers (biomasse des arbres > 10 cm de diamètres et stocks de carbone des sols)** sur les territoires ne disposant d'aucune mesure fiable de ce type. Elle fournirait par la même occasion des informations essentielles sur la distribution de ces variables, permettant de calibrer un dispositif d'inventaire statistique plus fiable de type IFN (préparation de la Brique 3 [7]). Ce proto-réseau couvrirait les principaux gradients écologiques (selon les contextes). Les îles de St Barthélémy et St Martin seraient traitées comme une seule entité (tableau 21). Le nombre de placettes à mettre en place est grossièrement estimé en s'appuyant sur l'expérience guyanaise et en supposant des distributions de variables comparables dans les autres territoires. L'échantillonnage des sols pourra être revu à la baisse selon la disponibilité des données forestières produites par le RMQS. **Les coûts estimés totalisent 240 k€** et se basent sur : 5 HJ d'installation / placettes ; +10 à 25% pour les déplacements selon le contexte ; + 6 000 € pour la collecte, la préparation et l'analyse des échantillons de sols. L'investissement IGN déjà chiffré dans l'étude MAAF n'est pas intégré dans ces coûts mais rappelé dans le tableau 21.

TABLE 21 : ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'OPTION 3A

<i>Territoires / données nécessaires</i>	971	972	973	974	975	976	977+ 978
<i>Placettes dendrométriques existantes</i>	9	0	>20	1	>20	0	0
<i>Placettes à mettre en place</i>	11	20	0	19	0	20	20
<i>Mesure de carbone des sols disponibles</i>	>20	0	>20	0	0	0	0
<i>Coût total (k€)</i>	37	46	0	56	0	50	50
<i>Non comptabilisés pour rappel</i>							
<i>Coût Brique 3 IGN hors collecte (k€)</i>	100	100	300	130	30	50	40
<i>Coût total estimé Brique 3 IGN (k€)</i>	500	355	1 350	595	65	120	110

4.2.3.B. OPTION B : ELABORATION DE MODELES DE PREDICTION SPATIALE DE LA BIOMASSE FORESTIERE SUR LES ROM-COM POUR UNE ESTIMATION CARBONE AU TIER 3

Il s'agit de produire des cartes de distribution spatiale de la biomasse forestière sur les territoires qui en sont dépourvus, en suivant la méthodologie la plus opérationnelle intégrant (1) la réalisation d'une campagne d'inventaires de terrain rapides combinée (2) à des acquisitions de LiDAR aérien permettant la calibration de modèles allométriques locaux, suivie (3) de l'exploitation d'imageries satellitaires pour l'extrapolation de ce modèle à l'échelle du territoire. Sur les territoires dépourvus de couverture LiDAR récente, les acquisitions LiDAR couvriront environ 10% de la surface forestière de façon à représenter les principales formations naturelles dominantes et les principaux gradients environnementaux structurant la végétation selon le contexte (altitude / climat / géologie / relief).

Les relevés de terrain servant à la calibration du modèle seront implantés suivant 5 à 6 transects couverts par les empreintes LiDAR ou, dans le cas de l'utilisation de données LiDAR anciens, sur des secteurs n'ayant pas subi de profonds changements au cours des dernières années. Les placettes de relevés non permanentes devront être précisément géo-localisées et de taille suffisante pour permettre une calibration précise des données LiDAR ($S \geq 0.25$ ha, largeur ≥ 20 m). La Guyane, et la partie Basse Terre de la Guadeloupe déjà pourvues de modèles récents, ne sont pas concernées (tableau 22). Les territoires avec de très faibles stocks de biomasse (St Pierre-et-Miquelon, St Barthélémy, St Martin) ne sont pas concernés. **Le coût de cette option est de 230 k€ dont 192 k€ d'acquisition de données et 38 k€ d'ingénierie.**

TABLE 22 : ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'OPTION 3B

<i>Territoire</i>	971	972	973	974	975	976	977+978
<i>Surface d'acquisition LiDAR (km²)</i>	41,5	en cours	nc	139	2	7	nc
<i>Nb de placettes à mesurer</i>	20 - 30	30-40	nc	30-40	nc	30-40	nc
<i>Coût total des acquisitions (k€)</i>	35	36	0	78	0	43	0

4.2.3.C. OPTION C : MISE EN PLACE D'UN RESEAU DE PLACETTES PERMANENTES POUR L'ETUDE DE LA DYNAMIQUE FORESTIERE ET DES STOCKS DE CARBONE SECONDAIRES

Il s'agit d'inciter et faciliter la production de données sur la dynamique forestière et les stocks de carbone les plus mal connus (biomasse racinaire, nécromasse) afin de pouvoir compléter les bilans carbone en tenant compte des flux et stocks de carbone forestiers secondaires. Cette action donnerait lieu au financement d'un programme de recherche spécifique permettant la constitution d'un réseau de suivi du fonctionnement des écosystèmes forestiers couvrant les différents contextes outre-mer, s'appuyant sur les dispositifs anciens (Guyane), favorisant la consolidation et la standardisation des dispositifs récents (Guadeloupe) et aidant à l'installation de nouveaux dispositifs (Océan Indien, St Pierre et Miquelon).

Ce réseau serait mis en place par les universitaires, gestionnaires et chercheurs locaux avec une coordination qui pourrait prendre place dans le cadre du réseau national SOERE F-ORE-T²⁰. **Les coûts sont estimés à 154 k€** comprenant une aide ponctuelle au réseau Guadeloupéen pour aide à l'intégration du réseau F-ORE-T ; le lancement d'une thèse sur l'étude de la biomasse racinaire en Guyane pour 100 k€ ; et le financement de l'installation de placettes permanentes dans le cadre d'un appel à proposition de recherche pour 44 k€ (tableau 23).

²⁰ ORE labellisé en tant que Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement (SOERE) qui rassemble 15 sites forestiers fortement instrumenté et les deux réseaux précédemment listés <http://www.gip-ecofor.org/f-ore-t/index.php>

TABLE 23 : ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'OPTION 3C

Contexte	Guyane	Antilles	Océan indien	Nord-Atlantique
<i>Dispositifs</i>	GUYAFOR	PNG-ONF-UA	3-4 placettes à créer	3-4 placettes à créer
<i>Suivi biomasse aérienne</i>	oui	oui	oui	oui
<i>Suivi biomasse racinaire</i>	à intégrer	non	non	non
<i>Suivi nécromasse</i>	oui	à intégrer	à intégrer	à intégrer
<i>Suivi sol</i>	oui	à intégrer	à intégrer	à intégrer
<i>SOERE F-ORE-T</i>	oui	à intégrer	à intégrer	à intégrer

4.2.4. DEVELOPPER DES METHODES DE SUIVI REGULIER DES ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES VEGETALES EN FORET

A ce jour, aucune méthodologie totalement opérationnelle n'est à même de fournir des statistiques exhaustives et fiables concernant l'évolution des EEE dans les ROM-COM particulièrement en milieux forestiers. Les trois options proposées correspondent à prospecter trois pistes de développement possibles pouvant permettre à termes d'intégrer la thématique EEE dans le dispositif de suivi des forêts des ROM-COM. Les trois options proposées visent à appuyer les initiatives, recherches et dispositif déjà amorcées localement dans le but d'aboutir rapidement à des productions d'indicateurs robustes quant à la dynamique des EEE dans les ROM-COM.

4.2.4.A. OPTION A : TEST DE PROTOCOLES POUR INTEGRER LE SUIVI DES PRINCIPALES EEE VEGETALES TERRESTRES DANS UN INVENTAIRE FORESTIER REGULIER TYPE IFN

Il s'agit de réaliser une étude prospective sur l'efficacité des différents protocoles de suivi des EEE s'appuyant sur des relevés floristiques et/ou phytosociologiques, dans l'optique d'une intégration de ces suivis dans le cadre d'un dispositif de suivi type IFN. Cette action prendrait la forme d'un financement de travaux universitaires (2 à 3 ans dans le cadre d'une thèse ou d'un post-doc). Ces travaux comprendraient une synthèse bibliographique exhaustive sur le sujet et le rassemblement des données précédemment produites dans le cadre des campagnes de cartographie d'habitats, de caractérisation de végétation, ou de suivi ponctuel des EEE végétales dans les ROM-COM et leur environnement proche. Ils pourraient se poursuivre par des simulations de suivi *in silico* ou *in situ* aboutissant à la mise en place d'un premier dispositif expérimental. Cette action concernerait les milieux insulaires sujet aux phénomènes d'envahissement les plus massifs (préférentiellement la Réunion) et les espèces les plus répandues et dynamiques. **Le financement correspondant serait d'environ 100 k€.** Plusieurs organismes faisant partie du Groupe Espèces Invasives de la Réunion (GEIR) pourraient porter cette action.

4.2.4.B. OPTION B : DEVELOPPEMENT D'OUTILS NUMERIQUES INTELLIGENTS FACILITANT LA RECONNAISSANCE ET LE SIGNALEMENT DES EEE DANS LES ROM-COM

Il s'agit de développer une application pour smartphone, qui permette de faciliter la reconnaissance et la géolocalisation des EEE par les agents de police des territoires et de centraliser ces informations, afin d'augmenter très significativement la collecte des données d'occurrence essentielles au suivi des dynamiques. Cet outil pourrait s'appuyer sur l'écosystème numérique Pl@ntNet déjà déployé pour la reconnaissance des espèces locales sur certains territoires. Il s'agirait d'adapter cet outil pour la problématique spécifique aux EEE et de le coupler à une plate-forme permettant la visualisation et l'analyse des données collectées (en

termes d'aire d'extension et de dynamique d'occupation). Cette action impliquerait le consortium Pl@ntNet rassemblant INRIA, CIRAD, INRA, IRD en collaboration avec TelaBotanica et les acteurs de terrain notamment le GEIR à la Réunion. Le coût de cette action est **estimé à 180 k€ et aboutirait dans les 2 ans**.

4.2.4.C. OPTION C : ETUDE DE FAISABILITE DU SUIVI DE POPULATIONS D'EEE PAR IMAGERIES MULTI-SPECTRALES OU HYPER-SPECTRALES

Il s'agit de **développer une méthodologie de détection et de suivi des principales espèces exotiques envahissantes à partir d'images multi-spectrales et/ou hyper-spectrales** dans le contexte outre-mer. Cette action exploratoire, qui s'appuierait sur des travaux universitaires, viserait à déterminer le niveau de précision spatiale et le niveau de fiabilité qui peuvent être atteint pour une cartographie des EEE à l'aide de l'imagerie optique. Le projet fournirait une analyse de performance comparative entre 3 ou 4 types de capteurs (hyper-spectral sur drone et/ou aéroportés, multi-spectral très haute résolution type WorldView3 et/ou haute résolution type Sentinel2 ou Landsat8). Cette action très prospective nécessiterait l'acquisition d'images encore relativement onéreuses et la mobilisation de technologies de pointes sur des sites pilotes ainsi que le financement de travaux universitaires (post-doc ou thèses) **pour un coût estimé de l'ordre de 260 k€**. Les spécialistes du traitement du signal hyper-spectral sont rares en France et confinés au domaine de la recherche. Un réseau national a été structuré autour du Groupe de Synthèse Hyperspectral (GSH) piloté par le CNES, qui considère que la technologie est mûre pour des applications dans le domaine de la « végétation ». Parmi les spécialistes ayant acquis des compétences reconnues dans ce domaine, Jean-Baptiste Feret (IRSTEA) bénéficie d'une longue expérience du fait de sa collaboration avec le Carnegie Airborne Observatory de la NASA, laboratoire d'excellence dans ce domaine, à la pointe pour son développement en forêts tropicales.

4.2.5. ASSURER UNE ANIMATION ET DES ECHANGES TECHNIQUES INTER OUTRE-MER SUR LES PROBLEMATIQUES DE CARTOGRAPHIE ET DE SUIVI DES HABITATS FORESTIERS

L'état des lieux et l'enquête auprès des acteurs de terrain met en évidence le manque d'échanges entre les ROM-COM et la métropole d'une part, mais aussi entre les territoires, limitant ainsi de fait la diffusion des connaissances et des innovations. On constate aussi une forte attente d'appui et d'animation technique sur les thèmes abordés dans le but d'acquérir ou de maintenir des compétences sur les territoires. Les trois actions proposées visent à inciter et faciliter ces échanges à travers des séminaires, des appels à projets et l'animation d'un réseau technique, opérations qui pourraient être coordonnées par le GIP ECOFOR.

4.2.5.A. OPTION A : ORGANISATION D'UN SEMINAIRE TECHNIQUE ANNUEL INTER OUTRE-MER

Il s'agit de faciliter les échanges techniques et de favoriser le transfert technologique entre recherche et gestion dans les Outre-mer à travers **l'organisation d'un séminaire annuel de 2 jours rassemblant une centaine de personnes** et une vingtaine d'intervenants, parmi lesquels des opérateurs d'outre-mer, des experts métropolitains et des chercheurs de tous horizons autour de thématiques propres aux suivis des formations naturelles terrestres dans les contextes ultra-marins. Le financement de **cette action estimée à 30 k€** couvrirait l'organisation logistique, une aide aux frais de déplacements depuis les Outre-mer vers la métropole pour les intervenants, l'organisation d'une retransmission en ligne, l'élaboration et la diffusion d'une lettre d'information semestrielle sur des innovations technologiques ou méthodologiques pouvant répondre aux besoins spécifiques des Outre-mer.

4.2.5.B. OPTION B : ACTIVATION D'UN APPEL A PROJETS DE RECHERCHE ORIENTE VERS L'ETUDE DES HABITATS FORESTIERS ULTRA-MARINS

Il s'agit d'inciter l'innovation et la production de connaissances sur des sujets spécifiques outre-mer notamment sur les méthodes de caractérisation, de cartographie et de suivi des écosystèmes complexes et diversifiés que constituent les forêts d'Outre-mer et qui nécessitent de ce fait des adaptations méthodologiques ou des développements spécifiques. Cette incitation prendrait la forme **d'un appel à projet de recherche** qui viendrait compenser la disparition de l'APR ECOTROP (Ecosystèmes Tropicaux) anciennement financé par les Ministères, mais qui s'appuierait cette fois sur des sources de financements de l'UE (via des enveloppes BEST, EraNET ou autres)²¹. **Une enveloppe de 475 k€ sur 5 ans** pourrait permettre de financer 6 à 7 petits projets dont l'animation et le suivi pourrait se coordonner avec l'action précédente.

4.2.5.C. OPTION C : MISE EN PLACE D'UN POLE D'ANIMATION FORETS ULTRA-MARINES

Il s'agit de structurer un réseau d'échange entre acteurs concernés par la gestion et le suivi des espaces forestiers d'outre-mer sur le modèle du Pôle-Relais zones humides d'outre-mer et de son réseau d'observation des mangroves. Cet outil permettra la collecte et mise en ligne des ressources documentaires relatives au suivi et à la cartographie des écosystèmes forestiers d'outre-mer sur un site internet dédié, le maintien d'une veille active et l'organisation d'animations et de formations ciblées. Le financement d'une microstructure de ce type nécessite **environ 200 k€/an** couvrant deux salaires avec les frais de fonctionnements et de mission, des prestations externalisées notamment pour l'élaboration et la maintenance d'un site internet, et le financement d'un programme d'animations soutenu. Les actions précédentes 5A et 5B pourraient s'inscrire dans ce cadre. Un acteur, tel que le GIP ECOFOR, est susceptible de porter ce genre d'action.

²¹ en 2016 une ligne budgétaire d'un millions d'euros était proposée dans le budget de l'UE pour le financement de projets pilotes visant à répertorier les espèces et habitats dans les régions ultrapériphériques françaises – enveloppe qui n'a pas été mobilisée à notre connaissance.

5. CONCLUSIONS DE L'ETUDE

5.1. SYNTHÈSE DES PROPOSITIONS ET CHRONOGRAMMES

Les investissements proposés pour les principales actions visées par le COPIL-E (actions 1, 2 et 3) représentent un budget de l'ordre de 350 k€/an sur 2 à 5 ans selon les options retenues. Les investissements complémentaires proposés pour les actions 4 et 5 représentent un budget supplémentaire de l'ordre de 425 k€/an maximum. Ces investissements très modérés sont à mettre en relation avec les crédits alloués au récent fond stratégique de la forêt et du bois (28,2 M€ en 2017) ou au 1m€ de la ligne budgétaire 2016 de l'UE précédemment citée, par exemple. Il est proposé d'engager une part plus importante d'investissements au cours des deux premières années 2018-2019 (tableau 24) afin de pouvoir répondre avec une meilleure précision qu'actuellement aux besoins de rapports réguliers (FRA, CNUCC, Kyoto) dont les prochaines échéances sont programmées en 2020.

TABLE 24 : ESTIMATIONS BUDGETAIRES ET PROPOSITION DE PROGRAMMATION SUR 5 ANS

Actions	2018	2019	2020	2021	2022
1 - cartographie	340 à 400 k€ sur 2 ans (A ou B)		ou 630 k€ sur 3 ans		
2 - suivi	60 à 75 k€ /an sur 5 ans				
3 - carbone	(A) 240 k€ sur 2 ans		(B+C) 230 à 384 k€ sur 2 ou 3 ans		
4 - EEE	33 - 100 k€ / an selon les options				
5 - animation	(A+B) 125 k€ / an sur 5 ans				
	(C) 200 k€ / an				

Les financements des actions 1 à 3 pourraient être négociés dans le cadre des enveloppes interministérielles MAAF-MEEM-MOM. Les actions 3, 4 et 5 pourraient faire appel à des subventions européennes de types FEDER ou FEADER gérés au niveau régional, LIFE, BEST ou EraNet. Ces investissements pourraient *in fine* s'optimiser par une coordination étroite avec plusieurs autres actions à financement local ou national :

- déploiement de l'Inventaire Forestier National dans les DOM une fois engagé ;
- réalisation des inventaires réguliers Teruti-Lucas du MAAF²² ;
- réalisation des cartes d'occupation des sols à grandes échelles (OCS-Ge) par les régions d'outre-mer ;
- financement des Missions d'Intérêt Général DOM par le MAAF, le MEEM et le MOM.

5.2. ARTICULATION GLOBALE DES ACTIONS

L'IGN a pour vocation à la fois de décrire le territoire national et l'occupation de son sol, ainsi que d'élaborer et de mettre à jour l'inventaire permanent des ressources forestières nationales ce qui lui donne à ce titre un rôle central dans **la réalisation et l'encadrement de ces actions**.

N'ayant pas d'équipes de réalisation en propre sur les territoires d'outre-mer, l'IGN devra s'appuyer sur un partenariat avec les différents **établissements publics présents sur les territoires**, en charge de la gestion de la forêt et de l'environnement, et présentant des **capacités techniques pour les phases d'acquisition de données *in situ*** (actions 1 à 4) : **ONF** en charge de la gestion des forêts publiques, les **Parcs Nationaux** en charge du développement de la connaissance et de la protection de la biodiversité sur leurs périmètres, les

²² NB : d'après la Commission du label CNIS du 16/05/2017 L'inventaire TERUTI sera décorellé de l'enquête européenne LUCAS

Conservatoires Botaniques Nationaux en charge de la production de connaissance sur l'état et l'évolution de la flore sauvage et des habitats naturels et semi-naturels.

Deux domaines d'expertise sont particulièrement sollicités pour la réalisation de ces actions : le traitement d'images satellitaires (actions 1 et 2), la science des écosystèmes (actions 1, 3 et 4). La mise en œuvre des actions devrait donc impliquer l'engagement des structures de recherche les plus pointues dans ces deux domaines scientifiques : ceux de l'**IDS Théia-GEOSUD, spécialisés en télédétection** et bien implanté en outre-mer notamment *via* les plateformes SEAS, **les Unités de Recherche spécialisées en écologie et implantées localement (Universités, UMR,...)**. Cet engagement pourrait prendre la forme de contractualisation directe des Ministères avec les organismes de recherche, qui constituent ces structures, ou après délégation de maîtrise d'ouvrage à l'IGN. Suivant l'objectif de transfert de compétences et de continuité du service, cette contractualisation devrait aussi inclure dès que possible les établissements ONF, Parcs et CBN (par la constitution de consortium) lorsque ceux-ci sont en capacité de développer et de maintenir une expertise dans les domaines scientifiques en question.

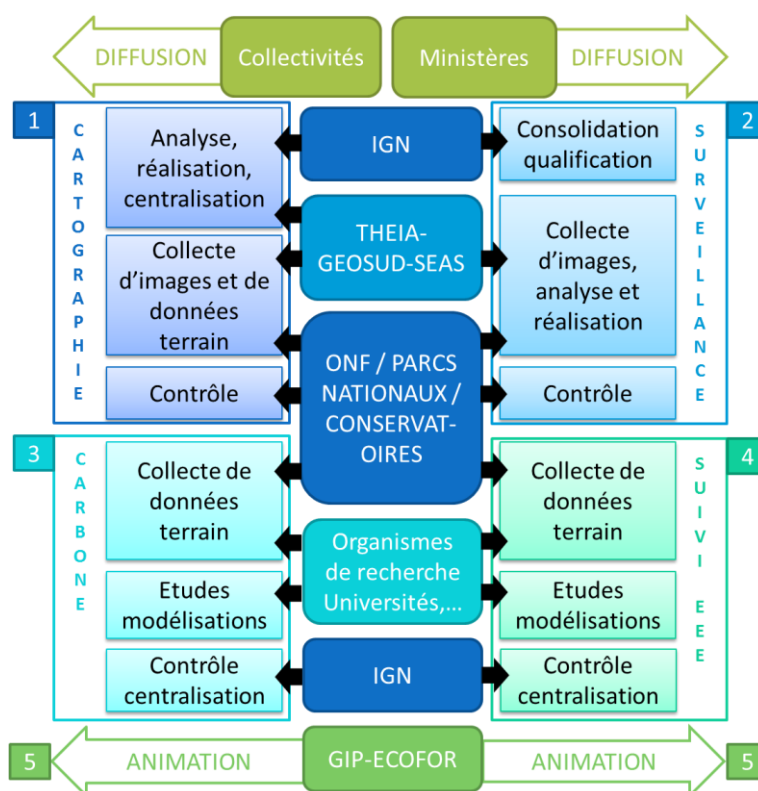


FIGURE 45 : SCHEMA D'ARTICULATION DES ACTIONS DANS LE CADRE D'UN PROGRAMME COMPLET

De par sa position proche des Ministères et de l'IGN, de par son statut de groupement d'intérêt public réunissant l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion, le suivi, la recherche et la politique forestière, et du fait de son expérience en matière d'animation de réseau et de suivi de programmes de recherche, le **GIP ECOFOR** semble être l'acteur le mieux placé pour porter **l'animation scientifique de ce programme d'actions** (concrétisé dans l'action 5). Enfin, compte-tenu de la multiplication des portails web au niveau national comme au niveau local pour la diffusion des informations spatiales concernant la forêt et l'environnement [192], aucune action spécifique de diffusion n'a été proposée. Logiquement, la centralisation et la diffusion des données publiques produites pourraient être assurées localement via les portails des collectivités et/ou des services de l'Etat mis en place dans le cadre du SINP, et relayés au niveau national par les Ministères via l'ONB d'une part et le géo-portail IGN d'autre part (Figure 45).

6. REFERENCES

1. Poncet R, Guadillat V, Touroult J, Poncet L (2016) Revue des typologies et cartographies de végétations et habitats terrestres d'Outre-mer : recensement, évaluation et synthèse. Paris: SPN-MNHN. 229 p.
2. FCBA (2015) Mémento 2015. pp. 48.
3. FAO (2015) Evaluation des ressources forestières mondiales 2015 : répertoire de données FRA 2015. Rome: Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. 253 p.
4. Gargominy O, Bocquet A (2013) Biodiversité d'Outre-mer. Paris: UICN France. 360 pp p.
5. Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
6. MAAF (2017) Programme National de la Forêt et du Bois 2016-2026. In: communication Dàliel, editor. Paris: Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. pp. 60.
7. IGNConseil (2017) Productions régulières et planifiées de données forestières sur les territoires ultramarins : état des lieux et perspectives. Paris. D2SI/SAI 16-0322 D2SI/SAI 16-0322. 94 p.
8. Guitet S, Jallais A, Kemavo A, Mobaied S, Rudant J, et al. (2016) Rapport intermédiaire CARTHAFORUM (Convention MEEM/ECOFOR n°2101646739 du 28/08/2015). Paris: GIP ECOFOR. 200 p.
9. Rousteau A, Portecop J, Rollet B (1996) Carte écologique de la Guadeloupe. ONF, UAG, PNG, CGG, Jarry, Guadeloupe.
10. IGN, CG971, ONF (2014) Diagnostic des Forêts de la Guadeloupe : rapport d'étude v2.2. 118 p.
11. Portecop J (1979) Phytogéographie, cartographie écologique et aménagement dans une île tropicale : le cas de la Martinique. Grenoble. 78 p.
12. CR972, ONF, IFN (2008) Inventaire des espaces forestiers et naturels de la Martinique. 90.
13. Guitet S, Brunaux O, Granville(de) JJ, S. G, Richard-Hansen C, editors (2015) Catalogue des habitats forestiers de Guyane: DEAL Guyane. 120 p.
14. Gond V, Freycon V, Molino JF, Brunaux O, Ingrassia F, et al. (2011) Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13: 357-367.
15. Lacoste M, Picot F (2014) Cahiers d'habitats de La Réunion : étage mégatherme semi-xérophile. Saint-Leu, Réunion: Conservatoire Botanique de Mascarin. 324 p p.
16. Lacoste M, Picot F (2011) Cahiers d'habitats de La Réunion : étage altimontain. Saint-Leu, Réunion, : Conservatoire Botanique de Mascarin. 173 p p.
17. Strasberg D, Rouget M, Richardson DM, Baret S, Dupont J, et al. (2005) An assessment of habitat diversity and transformation on La Réunion Island (Mascarene Islands, Indian Ocean) as a basis for identifying broad-scale conservation priorities. *Biodiversity & Conservation* 14: 3015-3032.
18. Lainé G, Dupuy S, Tassin J, Sarrailh J-M (2010) Etude de la typologie forestière de Mayotte: Rapport final, juillet 2010. Contrat Cadre EuropeAid/119860/C/SV/Multi. AGRIFOR Consult. 121 p.
19. Blanchart E, Bernoux M (2005) Déterminants des stocks de carbone des sols des petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés. IRD. 104 p.
20. Venkatapen C (2012) Étude des déterminants géographiques et spatialisation des stocks de carbone des sols de la Martinique: Antilles-Guyane. 334 p.
21. Guitet S, Hérault B, Molto Q, Brunaux O, Couteron P (2015) Spatial structure of above-ground biomass limits accuracy of carbon mapping in rainforest but large scale forest inventories can help to overcome. *PloS one* 10: e0138456.

22. Fayad I, Baghdadi N, Guitet S, Bailly J-S, Hérault B, et al. (2016) Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52: 502-514.
23. Guitet S (2015) Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française: distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques: Université de Montpellier. 350 p.
24. ONF (2013) Réseau de placettes permanentes forestières Anse-Bertrand. 2 p.
25. ONF, PNG, UAG (2012) Un observatoire des écosystèmes forestiers en Guadeloupe : mise en place d'un réseau de placettes permanentes. 243 p.
26. Durrieu De Madron L (2008) Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour les forêts de la Guadeloupe, de la Martinique et de la Réunion. ONFI, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. 82 p.
27. Guitet S, Blanc L, Chave J, Gomis A (2006) Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour la forêt guyanaise. In: n°59.02.G18/05 Rdc, editor: Ministère de l'Agriculture.
28. Lacoste M, Delbosc P, Picot F (2014) Typologie descriptive des habitats naturels et semi-naturels de La Réunion, version Octobre 2014. Saint-Leu, Réunion: Conservatoire Botanique de Mascarin. 137 p p.
29. ter Steege H, Vaessen RW, Cárdenas-López D, Sabatier D, Antonelli A, et al. (2016) The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. *Scientific Reports* 6: 29549.
30. Molino JF, Sabatier D, Prévost MF, Frame D, Gonzalez S, et al. (2009) Etablissement d'une liste des espèces d'arbres de la Guyane Française. IRD. pp. 59.
31. Guitet S, Pélissier R, Brunaux O, Jaouen G, Sabatier D (2015) Geomorphological landscape features explain floristic patterns in French Guiana rainforest. *Biodiversity and Conservation* 24: 1215-1237.
32. Fiard JP (1994) Les forêts du nord de la montagne Pelée et des édifices volcaniques du Piton Mont Conil et du Morne Sibérie (Martinique). Pointe-à-Pitre: Université des Antilles et de la Guyane. 520 p.
33. Joseph P (1997) Dynamique, bio-physiologie végétales en bioclimat sec à la Martinique: Université des Antilles et de la Guyane.
34. Guitet S, Chave J, Brunaux O, Blanc L (2006) Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour la forêt guyanaise : pré-rapport (exposé des méthodes de travail et premiers résultats). ONF, CNRS, CIRAD. 28 p.
35. ONF (2015) Bilan des impacts sur l'environnement des activités minières en Guyane. Cayenne, avril 2015. pp. 11.
36. PAG (2013) Note d'information sur l'observatoire de la dynamique de l'occupation du sol Parc Amazonien de Guyane. pp. 3.
37. ONF (2013) Projet "Expertise littorale 2011" occupation du sol et de sa dynamique sur la bande côtière de la Guyane de 2005 à 2011. Cayenne: ONF. 78 p.
38. Lefebvre JP, Verger G (2014) Suivi de l'occupation du sol et des changements d'occupation du sol en Guyane Française entre 1990 et 2012. IGN, ONF. 30 p.
39. Lagabrielle E, Metzger P, Martignac C, Lortic B, Durieux L (2007) Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002). M@ppemonde.
40. Walcker R (2015) Dynamique spatiale des mangroves de Guyane entre 1950 et 2014: forçage atmosphérique et conséquence pour le stock de carbone côtier. Toulouse: Université de Toulouse 3 Paul Sabatier. 175 p.
41. Rahm M, Jullian B, Lauger A, de Carvalho R, Vale L, et al. (2015) Monitoring the Impact of Gold Mining on the Forest Cover and Freshwater in the Guiana Shield. Reference year 2014. . REDD+ for the Guiana Shield Project and WWF Guianas. 60 p.

42. Cherrington E (2016) Towards ecologically consistent remote sensing mapping of tree communities in French Guiana : Are forest types identifiable from spatio-temporal canopy reflectance patterns? Montpellier: AgroParisTech. 124 p.
43. Taureau F, Robin M, Debaine F (2015) Guide méthodologique pour la cartographie des mangroves de l'Outre-mer français. IFRECOR. 83 p.
44. Soto S (2013) Inventaire spatialisé des émissions de polluants atmosphériques en Martinique. Madinair. 58 p.
45. Colomb V, Martel M (2012) Bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre de l'agriculture et la forêt pour le territoire de la Guadeloupe. IRD, ADEME. 34 p.
46. Grondin S (2012) Inventaire régional des émissions de gaz à effet de serre pour l'île de La Réunion en 2010. Agence Régionale Energie Réunion. 71 p.
47. Zoogones L, Dourdain A (2016) Secteur UTCF : utilisation des terres leurs changement et la forêt - Méthodologie d'inventaire de gaz à effet de serre. ECOFOG, Guyane Energie Climat. 68 p.
48. CITEPA (2016) Inventaire d'émissions de gaz à effet de serre en Outre-mer par territoire : format SECTEN.
49. Corbane C, Lang S, Pipkins K, Alleaume S, Deshayes M, et al. (2015) Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status-New opportunities and challenges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 37: 7-16.
50. Kuenzer C, Bluemel A, Gebhardt S, Quoc TV, Dech S (2011) Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing* 3: 878-928.
51. Nagendra H, Lucas R, Honrado JP, Jongman RHG, Tarantino C, et al. (2013) Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators* 33: 45-59.
52. Hansen MC, Loveland TR (2012) A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote sensing of Environment* 122: 66-74.
53. Hussain M, Chen D, Cheng A, Wei H, Stanley D (2013) Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 80: 91-106.
54. De Sy V, Herold M, Achard F, Asner GP, Held A, et al. (2012) Synergies of multiple remote sensing data sources for REDD+ monitoring. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4: 696-706.
55. Li M, Zang S, Zhang B, Li S, Wu C (2014) A review of remote sensing image classification techniques: The role of spatio-contextual information. *European Journal of Remote Sensing* 47: 389-411.
56. Lucas R, Blonda P, Bunting P, Jones G, Inglada J, et al. (2015) The earth observation data for habitat monitoring (EODHaM) system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 37: 17-28.
57. Khatami R, Mountrakis G, Stehman SV (2016) A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment* 177: 89-100.
58. Viennois G, Barbier N, Fabre I, Couteron P (2013) Multiresolution quantification of deciduousness in West-Central African forests. *Biogeosciences* 10: 6957-6967.
59. Carreiras JM, Jones J, Lucas RM, Gabriel C (2014) Land Use and land cover change dynamics across the Brazilian Amazon: Insights from extensive time-series analysis of remote sensing data. *PloS one* 9: e104144.
60. Ferreira MP, Zortea M, Zanotta DC, Shimabukuro YE, de Souza Filho CR (2016) Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 179: 66-78.
61. Vincent A, Inglada J. IOTA² Infrastructure pour l'Occupation des sols par Traitement Automatique Incorporant les Orfeo Toolbox (OTB) Applications; 2016 24/11/2016; Toulouse. CESBIO.

62. Gaetano R, Laventure S. Un retour d'expérience sur iota² : le cas de l'île de la Réunion; 2016 24/11/2016; Toulouse. CESBIO.
63. Inglada J, Christophe E. The Orfeo Toolbox remote sensing image processing software; 2009. IEEE. pp. IV-733-IV-736.
64. Koch B (2013) Remote Sensing supporting national forest inventories NFA. FAO knowledge reference for national forest assessments.
65. Olofsson P, Foody GM, Herold M, Stehman SV, Woodcock CE, et al. (2014) Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment* 148: 42-57.
66. Morgan JL, Gergel SE (2013) Automated analysis of aerial photographs and potential for historic forest mapping. *Canadian Journal of Forest Research* 43: 699-710.
67. Piazza GA, Vibrans AC, Liesenberg V, Refosco JC (2016) Object-oriented and pixel-based classification approaches to classify tropical successional stages using airborne high-spatial resolution images. *GIScience & Remote Sensing* 53: 206-226.
68. Kim M, Madden M, Warner TA (2009) Forest type mapping using object-specific texture measures from multispectral Ikonos imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75: 819-829.
69. Viennois G, Nicolini E, Borne F (2014) Spatiotemporal dynamics of coastal savannas nested in French Guiana space center from pléiades imagery and aerial photographs. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*: 89-95.
70. Barbier N, Couteron P, Proisy C, Malhi Y, Gastellu-Etchegorry JP (2010) The variation of apparent crown size and canopy heterogeneity across lowland Amazonian forests. *Global Ecology and Biogeography* 19: 72-84.
71. Blanchard E, Birnbaum P, Proisy C, Ibanez T, Vandrot H, et al. (2015) Prédire la structure des forêts tropicales humides calédoniennes: analyse texturale de la canopée sur des images Pléiades. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*: 141-147.
72. Laurin GV, Puletti N, Hawthorne W, Liesenberg V, Corona P, et al. (2016) Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment* 176: 163-176.
73. Henry M, Réjou-Méchain M, Jara MC, Wayson C, Piotto D, et al. (2015) An overview of existing and promising technologies for national forest monitoring. *Annals of Forest Science* 72: 779-788.
74. Benelcadi H, Frison P-L, Lardeux C, Capel A-C, Routier J-B, et al. Contribution of TerraSAR-X radar images texture for forest monitoring; 2012. IEEE. pp. 6427-6430.
75. Hess LL, Melack JM, Affonso AG, Barbosa C, Gastil-Buhl M, et al. (2015) Wetlands of the lowland Amazon basin: Extent, vegetative cover, and dual-season inundated area as mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar. *Wetlands* 35: 745-756.
76. Joshi N, Baumann M, Ehammer A, Fensholt R, Grogan K, et al. (2016) A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring. *Remote Sensing* 8: 70.
77. Zolkos SG, Goetz SJ, Dubayah R (2013) A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 128: 289-298.
78. Carreiras JM, Jones J, Lucas RM, Shimabukuro YE (2017) Mapping major land cover types and retrieving the age of secondary forests in the Brazilian Amazon by combining single-date optical and radar remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 194: 16-32.
79. Pohl C, Van Genderen JL (1998) Review article multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International journal of remote sensing* 19: 823-854.
80. Laventure S, Féret JB, Alleaume S, Lang M. Cartographie physiologique de la végétation naturelle; 2016 24/11/2016; Toulouse. CESBIO. pp. 28.
81. Helmer EH, Ruzycki TS, Benner J, Voggesser SM, Scobie BP, et al. (2012) Detailed maps of tropical forest types are within reach: Forest tree communities for Trinidad and Tobago

- mapped with multiseason Landsat and multiseason fine-resolution imagery. *Forest Ecology and Management* 279: 147-166.
82. Karasiak N (2016) Cartographie des végétations particulières du Parc amazonien de Guyane. Toulouse: Université de Toulouse. 55 p.
 83. Perbert P, Karasiak N, Joubert P (2017) Cartographie des formations végétales particulières observables via télédétection. Remire-Montjoly: Parc Amazonien de Guyane. 31 p.
 84. Guitet S, Cornu JF, Brunaux O, Betbeder J, Carozza JM, et al. (2013) Landform and landscape mapping, French Guiana (South America). *Journal of Maps* 9: 325-335.
 85. Py N. LaBD forêt version 2 : Contenu et mode de constitution initial. In: IGN, editor; 2014 02/12/2014. IGN. pp. 27.
 86. Lagabrielle E (2008) Planification de la conservation de la biodiversité et modélisation territoriale à l'île de la Réunion [Thèse de Géographie]: Université la Réunion. 166 p.
 87. IGN (2014) Les données de l'inventaire forestier : état des lieux et évolution. La feuille de l'Inventaire Forestier 34: 1-17.
 88. Broich M, Hansen MC, Potapov P, Adusei B, Lindquist E, et al. (2011) Time-series analysis of multi-resolution optical imagery for quantifying forest cover loss in Sumatra and Kalimantan, Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13: 277-291.
 89. Sexton JO, Urban DL, Donohue MJ, Song C (2013) Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the Landsat-5 record. *Remote Sensing of Environment* 128: 246-258.
 90. Baumann M, Ozdogan M, Kuemmerle T, Wendland KJ, Esipova E, et al. (2012) Using the Landsat record to detect forest-cover changes during and after the collapse of the Soviet Union in the temperate zone of European Russia. *Remote Sensing of Environment* 124: 174-184.
 91. Fichet L-V, Sannier C, Makaga EM, Seyler F, Mertens B. Monitoring forest cover change at national level in Gabon for 1990, 2000 and 2010 with optical imagery; 2012. IEEE. pp. 1668-1671.
 92. Margono BA, Turubanova S, Zhuravleva I, Potapov P, Tyukavina A, et al. (2012) Mapping and monitoring deforestation and forest degradation in Sumatra (Indonesia) using Landsat time series data sets from 1990 to 2010. *Environmental Research Letters* 7: 034010.
 93. Potapov P, Turubanova S, Hansen MC (2011) Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia. *Remote Sensing of Environment* 115: 548-561.
 94. Masek JG, Goward SN, Kennedy RE, Cohen WB, Moisen GG, et al. (2013) United States forest disturbance trends observed using Landsat time series. *Ecosystems* 16: 1087-1104.
 95. Camacho F, Cernicharo J, Lacaze R, Baret F, Weiss M (2013) GEOV1: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 2: Validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment* 137: 310-329.
 96. Guitet S, Pithon S, Brunaux O, Jubelin G, Gond V (2012) Impacts of logging on the canopy and the consequences for forest management in French Guiana. *Forest Ecology and Management* 277: 124-131.
 97. Caspard M, Yésou H, Selle A, Tinel C, Tessier P, et al. (2015) Forest recolonization monitoring based on hr and vhr imagery: The case of the maido forest fire exploiting pléiades and spot kalideos database. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* n 209: 149.
 98. Morel AC, Saatchi SS, Malhi Y, Berry NJ, Banin L, et al. (2011) Estimating aboveground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah, Malaysian Borneo using ALOS PALSAR data. *Forest Ecology and Management* 262: 1786-1798.
 99. Mialhe F, Gunnell Y, Ignacio JAF, Delbart N, Oganía JL, et al. (2015) Monitoring land-use change by combining participatory land-use maps with standard remote sensing techniques: showcase from a remote forest catchment on Mindanao, Philippines. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 36: 69-82.

100. Zhu Z, Woodcock CE (2014) Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote sensing of Environment* 144: 152-171.
101. Longépé N, Rakwatin P, Isoguchi O, Shimada M, Uryu Y, et al. (2011) Assessment of ALOS PALSAR 50 m orthorectified FBD data for regional land cover classification by support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49: 2135-2150.
102. Fichet L-V, Sannier C, Makaga EMK, Seyler F (2014) Assessing the accuracy of forest cover map for 1990, 2000 and 2010 at national scale in Gabon. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7: 1346-1356.
103. Gong P, Wang J, Yu L, Zhao Y, Zhao Y, et al. (2013) Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing* 34: 2607-2654.
104. Bourbier L, Cornu G, Pennec A, Brognoli C, Gond V (2013) Large-scale estimation of forest canopy opening using remote sensing in Central Africa. *Bois et Forêts des Tropiques*: 3-9.
105. Python S, Jubelin G, Guitet S, Gond V (2013) A statistical method for detecting logging-related canopy gaps using high-resolution optical remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 34: 700-711.
106. Oszwald J, Gond V (2012) Monitoring a pioneer front using SPOT-VEGETATION time series. *Bois et forêts des tropiques*: 77-83.
107. Ryan CM, Hill T, Woollen E, Ghee C, Mitchard E, et al. (2012) Quantifying small-scale deforestation and forest degradation in African woodlands using radar imagery. *Global Change Biology* 18: 243-257.
108. Kennedy RE, Yang Z, Cohen WB, Pfaff E, Braaten J, et al. (2012) Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan. *Remote Sensing of Environment* 122: 117-133.
109. Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova S, et al. (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *science* 342: 850-853.
110. Eva HD, Achard F, Beuchle R, De Miranda E, Carboni S, et al. (2012) Forest cover changes in tropical South and Central America from 1990 to 2005 and related carbon emissions and removals. *Remote Sensing* 4: 1369-1391.
111. Asner GP, Knapp DE, Balaji A, Páez-Acosta G (2009) Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing* 3: 033543-033543-033524.
112. Osé K, Deshayes M (2015) Détection et cartographie des coupes rases par télédétection satellitaire - Guide méthodologique version 5.0. . IRSTEA UMR Tetis. 72 p.
113. Guitet S (2009) Expertise minière : réseau de référence de sites désactivés. Cayenne: ONF. 178 p.
114. Gond V, Guitet S (2009) Remote sensing in post-logging diagnoses for forest management in French Guiana. *Bois Et Forets Des Tropiques*: 5-13.
115. Clark DB, Kellner JR (2012) Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *Journal of Vegetation Science* 23: 1191-1196.
116. Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, Chidumayo E, Colgan MS, et al. (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*.
117. Vieilledent G, Vaudry R, Andriamanahisoa SF, Rakotonarivo OS, Randrianasolo HZ, et al. (2012) A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models. *Ecological Applications* 22: 572-583.
118. Asner GP, Powell GVN, Mascaro J, Knapp DE, Clark JK, et al. (2010) High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 16738-16742.
119. Basuki T, Van Laake P, Skidmore A, Hussin Y (2009) Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management* 257: 1684-1694.

120. Blanchard E, Birnbaum P, Ibanez T, Boutreux T, Antin C, et al. (2016) Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. *Trees* 30: 1953-1968.
121. Feldpausch TR, Banin L, Phillips OL, Baker TR, Lewis SL, et al. (2011) Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences* 8: 1081-1106.
122. Molto Q, Rossi V, Blanc L (2013) Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution* 4: 175-183.
123. Bustamante MMC, Roitman I, Aide TM, Alencar A, Anderson LO, et al. (2016) Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Global Change Biology* 22: 92-109.
124. Ploton P, Barbier N, Takoudjou Momo S, Réjou-Méchain M, Boyemba Bosela F, et al. (2016) Closing a gap in tropical forest biomass estimation: taking crown mass variation into account in pantropical allometries.
125. Drake JB, Dubayah RO, Knox RG, Clark DB, Blair JB (2002) Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* 81: 378-392.
126. Ferraz A, Mallet C, Jacquemoud S, Gonçalves G, Soares P, et al. (2014) Estimation de la Biomasse Aérienne à partir de données lidar aéroporté. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* n 205: 59.
127. Rutishauser E, Wagner F, Herault B, Nicolini EA, Blanc L (2010) Contrasting above-ground biomass balance in a Neotropical rain forest. *Journal of Vegetation Science* 21: 672-682.
128. Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, et al. (2005) Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87-99.
129. Laumonier Y, Edin A, Kanninen M, Munandar AW (2010) Landscape-scale variation in the structure and biomass of the hill dipterocarp forest of Sumatra: Implications for carbon stock assessments. *Forest Ecology and Management* 259: 505-513.
130. Réjou-Méchain M, Muller-Landau H, Detto M, Thomas S, Le Toan T, et al. (2014) Local spatial structure of forest biomass and its consequences for remote sensing of carbon stocks. *Biogeosciences Discussions* 11: 5711-5742.
131. Wagner F, Rutishauser E, Blanc L, Herault B (2010) Effects of plot size and census interval on descriptors of forest structure and dynamics. *Biotropica* 42: 664-671.
132. Baraloto C, Rabaud S, Molto Q, Blanc L, Fortunel C, et al. (2011) Disentangling stand and environmental correlates of aboveground biomass in Amazonian forests. *Global Change Biology* 17: 2677-2688.
133. Lim K, Treitz P, Wulder M, St-Onge B, Flood M (2003) LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in physical geography* 27: 88-106.
134. Clark ML, Roberts DA, Ewel JJ, Clark DB (2011) Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors. *Remote Sensing of Environment* 115: 2931-2942.
135. Vincent G, Sabatier D, Rutishauser E (2014) Revisiting a universal airborne light detection and ranging approach for tropical forest carbon mapping: scaling-up from tree to stand to landscape. *Oecologia* 175: 439-443.
136. Asner GP, Mascaro J (2014) Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment* 140: 614-624.
137. Asner GP, Mascaro J, Muller-Landau HC, Vieilledent G, Vaudry R, et al. (2012) A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia* 168: 1147-1160.
138. Ioki K, Tsuyuki S, Hirata Y, Phua M-H, Wong WVC, et al. (2014) Estimating above-ground biomass of tropical rainforest of different degradation levels in Northern Borneo using airborne LiDAR. *Forest Ecology and Management* 328: 335-341.
139. Asner G, Clark J, Mascaro J, Galindo García G, Chadwick K, et al. (2012) High-resolution mapping of forest carbon stocks in the Colombian Amazon. *Biogeosciences Discussions* 9: 2445-2479.

140. Mascaro J, Detto M, Asner GP, Muller-Landau HC (2011) Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 115: 3770-3774.
141. Hudak AT, Strand EK, Vierling LA, Byrne JC, Eitel JU, et al. (2012) Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. *Remote Sensing of Environment* 123: 25-40.
142. Rosette J, Cook B, Nelson R, Huang C, Masek J, et al. (2015) Sensor Compatibility for Biomass Change Estimation Using Remote Sensing Data Sets: Part of NASA's Carbon Monitoring System Initiative. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* 12: 1511-1515.
143. Vincent G, Sabatier D, Blanc L, Chave J, Weissenbacher E, et al. (2012) Accuracy of small footprint airborne LiDAR in its predictions of tropical moist forest stand structure. *Remote Sensing of Environment* 125: 23-33.
144. Popescu SC, Zhao K, Neuenschwander A, Lin C (2011) Satellite lidar vs. small footprint airborne lidar: Comparing the accuracy of aboveground biomass estimates and forest structure metrics at footprint level. *Remote Sensing of Environment* 115: 2786-2797.
145. Chen Q, Laurin GV, Valentini R (2015) Uncertainty of remotely sensed aboveground biomass over an African tropical forest: Propagating errors from trees to plots to pixels. *Remote Sensing of Environment* 160: 134-143.
146. Baccini A, Goetz S, Walker W, Laporte N, Sun M, et al. (2012) Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change* 2: 182-185.
147. Saatchi SS, Harris NL, Brown S, Lefsky M, Mitchard ETA, et al. (2011) Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 9899-9904.
148. Sader SA, Waide RB, Lawrence WT, Joyce AT (1989) Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 28: 143IN1159-1156IN2198.
149. Carlson TN, Ripley DA (1997) On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment* 62: 241-252.
150. Mutanga O, Adam E, Cho MA (2012) High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18: 399-406.
151. Basuki TM, Skidmore AK, van Laake PE, van Duren I, Hussin YA (2012) The potential of spectral mixture analysis to improve the estimation accuracy of tropical forest biomass. *Geocarto International* 27: 329-345.
152. Lu D (2005) Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing* 26: 2509-2525.
153. Ploton P, Péliissier R, Proisy C, Flavenot T, Barbier N, et al. (2012) Assessing aboveground tropical forest biomass using Google Earth canopy images. *Ecological Applications* 22: 993-1003.
154. Barbier N, Couteron P (2015) Attenuating the bidirectional texture variation of satellite images of tropical forest canopies. *Remote Sensing of Environment* 171: 245-260.
155. Bastin J-F, Barbier N, Couteron P, Adams B, Shapiro A, et al. (2014) Aboveground biomass mapping of African forest mosaics using canopy texture analysis: toward a regional approach. *Ecological Applications* 24: 1984-2001.
156. Belouard T, Py N, Maillet G, Guyon D, Mérédiéu C, et al. (2014) Pinastéréo-Estimation de la hauteur dominante et de la biomasse forestière dans le massif des Landes de Gascogne à partir d'images stéréoscopiques Pléiades. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*: 133-139.
157. Okuda T, Suzuki M, Numata S, Yoshida K, Nishimura S, et al. (2004) Estimation of aboveground biomass in logged and primary lowland rainforests using 3-D photogrammetric analysis. *Forest Ecology and Management* 203: 63-75.

158. Sinha S, Jeganathan C, Sharma L, Nathawat M (2015) A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12: 1779-1792.
159. Carreiras JM, Vasconcelos MJ, Lucas RM (2012) Understanding the relationship between aboveground biomass and ALOS PALSAR data in the forests of Guinea-Bissau (West Africa). *Remote Sensing of Environment* 121: 426-442.
160. Mermoz S, Le Toan T, Villard L, Réjou-Méchain M, Seifert-Granzin J (2014) Biomass assessment in the Cameroon savanna using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing of Environment* 155: 109-119.
161. Minh DHT, Le Toan T, Rocca F, Tebaldini S, Villard L, et al. (2016) SAR tomography for the retrieval of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana. *Remote Sensing of Environment* 175: 138-147.
162. Mascaro J, Asner GP, Knapp DE, Kennedy-Bowdoin T, Martin RE, et al. (2014) A tale of two "forests": Random Forest machine learning aids tropical forest carbon mapping. *PloS one* 9: e85993.
163. Avitabile V, Herold M, Heuvelink G, Lewis SL, Phillips OL, et al. (2016) An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global change biology*.
164. Mitchard ET, Feldpausch TR, Brien R, Lopez-Gonzalez G, Monteagudo A, et al. (2014) Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. *Global Ecology and Biogeography*.
165. Hall FG, Bergen K, Blair JB, Dubayah R, Houghton R, et al. (2011) Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements. *Remote Sensing of Environment* 115: 2753-2775.
166. Næsset E, Gobakken T, Solberg S, Gregoire TG, Nelson R, et al. (2011) Model-assisted regional forest biomass estimation using LiDAR and InSAR as auxiliary data: A case study from a boreal forest area. *Remote Sensing of Environment* 115: 3599-3614.
167. Le Toan T, Quegan S, Davidson M, Balster H, Paillou P, et al. (2011) The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote sensing of environment* 115: 2850-2860.
168. Le Toan T. Biomasse forestière & changement couverture forestière; 2016 14/09/2016. pp. 16.
169. Brien R, Phillips O, Feldpausch T, Gloor E, Baker T, et al. (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519: 344-348.
170. Lewis SL, Phillips OL, Baker TR, Lloyd J, Malhi Y, et al. (2004) Concerted changes in tropical forest structure and dynamics: evidence from 50 South American long-term plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences* 359: 421-436.
171. Phillips OL, Lewis SL (2014) Evaluating the tropical forest carbon sink. *Global change biology* 20: 2039-2041.
172. Fisher JI, Hurtt GC, Thomas RQ, Chambers JQ (2008) Clustered disturbances lead to bias in large-scale estimates based on forest sample plots. *Ecology Letters* 11: 554-563.
173. Marvin DC, Asner GP, Knapp DE, Anderson CB, Martin RE, et al. (2014) Amazonian landscapes and the bias in field studies of forest structure and biomass. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: E5224-E5232.
174. Brien RJW, Phillips OL, Feldpausch TR, Gloor E, Baker TR, et al. (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519: 344-348.
175. Pioniot C, Cabon A, Descroix L, Dourdain A, Mazzei L, et al. (2016) A methodological framework to assess the carbon balance of tropical managed forests. *Carbon Balance and Management* 11: 15.
176. Cabon A, Pioniot-Laroche C, Dourdain A, Hérault B (2015) Bilan Carbone de l'Exploitation Forestière sur le Domaine Forestier Permanent de Guyane française. Cayenne: CIRAD. 40 p.
177. Rutishauser E, Hérault B, Baraloto C, Blanc L, Descroix L, et al. (2015) Rapid tree carbon stock recovery in managed Amazonian forests. *Current Biology* 25: R787-R788.

178. Baker DJ, Richards G, Grainger A, Gonzalez P, Brown S, et al. (2010) Achieving forest carbon information with higher certainty: A five-part plan. *environmental science & policy* 13: 249-260.
179. Pelletier J, Martin D, Potvin C (2013) REDD+ emissions estimation and reporting: dealing with uncertainty. *Environmental Research Letters* 8: 034009.
180. Pelletier J, Ramankutty N, Potvin C (2011) Diagnosing the uncertainty and detectability of emission reductions for REDD+ under current capabilities: an example for Panama. *Environmental Research Letters* 6: 024005.
181. Gibbs HK, Brown S, Niles JO, Foley JA (2007) Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2: 045023.
182. Goodman RC, Phillips OL, Baker TR (2014) The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecological Applications* 24: 680-698.
183. Qureshi A, Badola R, Hussain SA (2012) A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. *Environmental Science & Policy* 16: 81-89.
184. UICN (2015) Etat des lieux synthétique des politiques ou stratégies de préservation de la biodiversité des régions de France métropolitaine et en outre-mer. 4 p.
185. DEAL (2015) Stratégie régionale pour la Biodiversité (SRB) 2013-2020. In: Préfecture de la Réunion DdLR, Région Réunion, editor. pp. 19.
186. UICN (2016) Stratégie Biodiversité pour le Développement Durable de Mayotte : la société civile en action. 4 p.
187. LegiFrance (2006) Code Forestier de Mayotte. pp. 109.
188. DEAL (2013) Stratégie de suivi et de prévention sur l'invasion biologique aux Antilles françaises. DEAL Guadeloupe & Martinique. pp. 106.
189. DAF (2015) Doctrine sur le défrichement en Guadeloupe. In: Guadeloupe, editor: DAF Guadeloupe. pp. 102.
190. GEC (2016) La Guyane s'engage pour le climat : agenda des solutions. Observatoire Guyane Energie Climat. 20 p.
191. EcoDDen (2016) Inventaire et cartographie des habitats semi-xerophiles de la Réunion : rapport final. DEAL. 52 p.
192. Maulpoix A, Noucher M, Gourmelon F, Pissot O, Duféal M (2016) Fonctionnalités, gouvernance et animation des Infrastructures de Données Géographiques en France: vers un premier état des lieux: CNRS PASSAGES; CNRS LETG; CNRS PRODIG; CNRS LaBRI; UBM MICA.

ANNEXE 1 : LISTE DES PERSONNES RESSOURCES

Contact	NOM	Prénom	Territoire	Organisme	Fonction
EELR	AMBROISE	Nathalie	971	Conseil Général	Responsable exploitation informatique et SIG
EELNR	ANSELIN	Arnaud	973	DEAL	Chef de service milieux naturels, biodiversité, sites et paysages
I/M	APPORA	Viviane	métropole	ECOFOR	Chef de projet IGDOM
EELNR	ARDON	Bernadette	974	SREPEN (Réunion Nature Environnement)	Présidente
EELR	ARMENGAUD	Régis	977-978	Préfecture	Service territoire, mer, développement durable
EELR	BARET	Stéphane	974	Parc National de La Réunion	Chargé de mission flore
EELR	BARRE	Nicolas	971	Association guadeloupéenne orchidophilie	Président
EELR	BARTHELAT	Fabien	971	DEAL	Pôle biodiversité, adjoint service ressources naturelles
M/I	BEDEAU	Caroline	973	ONF	Ingénieur R&D « télédétection »
EELNR	BELFAN	David	972	Le Carouge	Naturaliste
EELNR	BELLOUARD	Manuella	974	DEAL	Chef de service « Connaissance, évaluation, transition écologique »
EELNR	BERANGER	Christelle	972	PNRM	Responsable de l'Observatoire Martiniquais de la Biodiversité
EELNR	BERGES	Jean-Michel	976	DAAF	Directeur
EELNR	BERISSON	Olivier	972	ASSAUPAMAR	Président
EELNR	BERNARD	Gwladys	973	DAAF Guyane	Chargé de mission forêt bois
EELNR	BERNARD	Jean-François	972	CSRPN	Spécialiste flore et végétation
EELR	BERRY	Gérard	971		Expert privé (ex ONF)
EELR/I	BLANCHARD	Frédéric	973	CTG (Collectivité Territoriale de la Guyane)	Directeur de projet mission biodiversité
EELNR	BLIN	Bérengère	973	Parc Amazonien de Guyane	Directrice-adjoint
EELNR	BOCQUET	Aurélié		UICN	Responsable outre-mer

EELNR	BOLLIGER	Ralph	976	Conservatoire Botanique National des Mascareignes	Antenne de Mayotte
EELNR	BON	André	971	Conseil Régional	Directeur général adjoint - direction du cadre de vie et de l'aménagement du territoire
EELR	BONJOUR	Isabelle	973	MFBG	Chargée de Mission Filière Bois de la CCIG
EELR	BONNAL	Vincent	971	CIRAD	CARIBSAT Antilles
I	BONNET	Pierre	métropole	CIRAD	Chercheur chef de projet « Pl@ntNet »
EELR	BOUVAREL	Luc		Forêt privée française	
EELR	BROSSARD	Michel	973	IRD	Responsable centre IRD - directeur de recherche
EELNR	CHANTEUR	Bénédicte	972	PNRM	Chargée de mission scientifique
EELNR	CHAULET	Gil	974	DAAF	Responsable information statistique et économie
I/M	COPPEL	Alain	973	ONF	Responsable « Brigade Nature »
EELNR	CORLET	Catherine	973	Conservatoire du littoral	
EELR	CORMIER	Vicky	975	Collectivité de SPM	Directrice du Pôle Développement Durable
EELNR	COURTIN	Daniel	976	DEAL	Directeur
EELNR	CREMADES	Caroline	976	UICN	Chargée de mission Stratégie Biodiversité Mayotte
EELNR	DAVY	Damien	973	CNRS	Responsable de l'Observatoire Homme-Milieu
EELR/I	DE PRACONTAL	Nyls	973	GEPOG	Directeur GEPOG
EELR	DE THOISY	Benoît	973	Kwata	Responsable scientifique de l'association Kwata
EELNR	DECALF	Guillaume	976	DEAL	Chargé de mission Faune et Flore
EELR	DECAT	Hélène	976	DEAL	Responsable milieux naturels
EELNR/M	DELNATTE	César	972	DEAL	Chargé de mission écologie végétale
EELR	DEMANGE	Véronique	972	DEAL	Administratrice SIG du service Paysages Eau et Biodiversité
EELNR	DESCROIX	Laurent	973	ONF	Pole R&D
EELNR	DESVALOGNE	Bruno	974	DAAF	Responsable Forêt et Filière bois
EELNR	DORE	Rodrigue	972	ONF	Chargé de mission environnement et biodiversité
EELR	DUBOIS	Eric	973	ONF	Directeur
EELR	UCROT	Alexandre	971	DAAF	Chef de service de l'information statistique et économique

EELR	DUPUY	Stéphane	974	CIRAD	SEAS-OI
EELNR	ETIFIER-CHALONO	Elisabeth	972	(ex CBMq)	(ex Directrice)
EELNR	FARCY	Rémy	976	DAAF	Chef du service « Développement des Territoires Ruraux »
EELR/I	FAURE	Jean-François	973	IRD	SEAS-Guyane
EELNR	FERCHAL	Alain	971	Parc National de Guadeloupe	Responsable SIG, gestionnaire portail karunati
EELR	FIARD	Jean-Pierre	972	CSRPN	Spécialiste flore et végétation
EELNR	FLEURY	Marie	973	MNHN	Directrice d'antenne du MNHN en Guyane - Présidente du CS PAG
EELR	FLORES	Olivier	974	Université de la Réunion	Chercheur
EELR	JAOUEN	Gaelle	973	AgroParisTech (ECOFoG)	Ingénieur de recherche à l'UMR EcoFoG
EELNR	GALDI	Béatrice	971	DEAL	Chargé de mission « Biodiversité terrestre »
EELNR	GARNIER	Laurent	973	Parc Naturel Régional de Guyane	Chargé de mission « Environnement »
I	GAUDILLAT	Vincent	métropole	MNHN	Chef de cellule « Habitats »
EELR/M	GAYOT	Marc	971	ONF	Chargé de mission « Biodiversité »
EELNR	GIFFARD	Pascal	973	Parc Naturel Régional de Guyane	Sous-direction Programmes-Opérations et développement Local
EELNR	GIGORD	Luc	974	CBNM	Directeur général
EELR	GILETTE	C.		Conservatoire du Littoral	
EELNR	GIRARD	Audrey	971	Conseil Général	Développement durable, patrimoine forestier
EELNR	GIROU	Denis	973	DEAL	Directeur
EELR/I	GOGUILLON	Bertrand	973	Parc Amazonien de Guyane	Chef du service « Patrimoines naturels et culturels »
EELR	GOMBAULD	Pascal	973	Parc Naturel Régional de Guyane	Directeur général des services
EELR	GOSSET	Mélodie	974	DEAL	Chargé de mission « Habitats »
I	GOUROUAYA-VANIER		973	Collectivité Unique	Responsable SEAS
EELNR	GRAND	Fabrice	972	DAAF	Chef de pôle territoire et forêt

EELNR	GROS- DESORMEAUX	Jean-Raphaël	972	UAG - Caribsat	CR UA-CNRS
EELNR	GUHUR	Frédéric	974	Conseil Général	Directeur agriculture, eau, environnement
M/I	HAGOLLE	Olivier	Métropole	CNES/CESBIO	Chercheur « télédétection » chaîne muscate
EELR	HAUUY	Michel	972	DEAL	Chef de service « Paysage Eau et Biodiversité »
I	HERAULT	Bruno	973	CIRAD	Chercheur en écologie - pilote « Guyafor »
EELNR	IMBERT	Daniel	971	UAG	Enseignant chercheur spécialiste des mangroves
EELR	INGADASSAMY	Eloïse	971	Conseil Général	Direction des politiques agricoles foncières et environnementales, patrimoine forestier
EELR/M	INGRASSIA	Florent	974	ONF	Responsable du service « Forêts et milieux naturels »
EELNR	JACCOMARD	Audrey	974	Conseil Général	Mission Aménagement
EELNR	JACQUIER	Thierry	971	DAAF	Chef de service, « Territoires agricoles, ruraux et forestiers »
EELNR	JALLAIS	Christine	972	DAAF	Chef du service « Agriculture et Forêt »
EELNR	JAMES	Olivier	974	ONF	Directeur
EELNR	JEANNE	François	976	GEPOMAY	
EELNR	JEREMIE	Stéphane	972	SEPANMAR	Président
EELNR	JOSEPH	Philippe	972	Université des Antilles	Professeur des Universités
EELR/I	JOUBERT	Pierre	973	Parc Amazonien de Guyane	Responsable SIG
EELR/M	JULLIOT	Catherine	974	GEIR	Responsable biodiversité (animation GEIR)
EELR/I	KELLE	Laurent	973	WWF	Directeur WWF
EELNR	KORDJEE	Cris	976	Conservatoire du Littoral	directrice
EELNR	KORYSKO	François	971	ONF	Ancien chargé de mission « Biodiversité », actuellement MEEM
EELR	LACOSTE	Marie	974	CBNM	Chargé de mission
EELNR	LAFONTAINE	Harry Ozier	971	INRA	Délégué régional
EELR	LAGABRIELLE	Erwann	974	SEAS-OI	Chercheur université associé IRD
EELR	LAMALFA-DIAZ	Miguel	976	ONF	?
EELNR	LAMBERT	Didier	971	Conservatoire du littoral	Chargé de mission

EELNR	LARTIGUE	Jeannette	976	CT Mayotte Service Forêt	Directrice SRF
EELR	LATREILLE	Catherine	974	Conservatoire du littoral	Adjointe Océan Indien, antenne de La Réunion
I	LEBOURGEOIS	Thomas	Métropole	CIRAD	Chercheur « Plantes envahissantes »
EELNR	LE FOL	Jérôme	973	CTG (Collectivité Territoriale de la Guyane)	Chef de projet de la cellule SIG
EELR	LE TELLIER	Valentin	974	DEAL	Chargée de mission « Stratégies, Connaissance et Trames écologiques »
EELNR	LEFEUVRE	Yvan	974	DAAF	Responsable Territoires et innovation
EELNR	LEONARD	Sylvain	972	ONF	Directeur régional
EELR	LEQUETTE	Benoît	974	Parc National de La Réunion	Responsable du service « Etude & Patrimoine »
EELR	LERIDER	Stephan	972	DEAL	Chargé de mission « Milieux protégés »
EELNR	LESUR	Daniel	976	DAAF	Chef de l'unité « Forêt bois biomasse »
EELR/I	LINARES	Sebastien	973	DEAL	Chef d'unité « Information géographique et diffusion des connaissances »
EELNR	LYONNAZ-PERROUX	Bernard	973	DAAF Guyane	Chef du service « Foncier, Economie Agricole et Forestière »
EELNR	MAGNIN	Hervé	971	Parc National de Guadeloupe	Chef de service « Biodiversité »
EELR	MAILLES	Julien	972	DEAL	Chargé de mission « Faune et flore terrestre »
EELR	MARCON	Eric	973	AgroParisTech (ECOFOG)	Directeur de l'UMR EcoFoG
EELR	MASLACH	Nicolas	977-978	RN St martin	Directeur
I	MAUREL	Pierre	Métropole	Théia-GEOSUD	Directeur Technique
EELR	MERCY	Laurent	976	ONF	Directeur
EELR	MIRA	Eléonore	971	Conservatoire botanique des îles de Guadeloupe	Responsable scientifique
EELR	MONTELLA	Frantz Fabien	971	Association des propriétaires forestiers privés	Président
I	MORNEAU	François	Métropole	IGN	Ingénieur statisticien
EELNR	MOREAU	Marie-Michelle	972	Conservatoire du littoral	Directrice régionale
EELR	nd	nd	976	Mayotte Nature Environnement	
EELNR	nd	nd	976	Les naturalistes de Mayotte	

EELR	nd	nd	971	Conservatoire Botanique Guadeloupe	
EELR	NEDELEC	Jean-François	974	DEAL	Unité SIG pôle connaissance et prospectives
EELR	NEGOUAI	Françoise	972	CTM	Chargée de mission Biodiversité
I	NOUCHER	Mathieu	métropole	UMR ADESS/PASSAGES	Chercheur géographe
EELR/I	OULIAC	Benjamin	973	OGE	Directeur de l'OGE (Observatoire Guyane Energie Climat)
I	OZE	Kenji	métropole	IRSTEA	Chercheur « télédétection »
EELR	PANCHOUT	Julien	973	ONF	Service Bois et Gestion Durable, Directeur Adjoint
EELNR	PARSEMAIN	Marie-CLaire	972	CTM	Directrice de l'Environnement
EELNR	PAVIS	Claudie	971	AEVA	Présidente
EELR	PESTOUR	Jean-Louis	971	ONF	Directeur régional
EELNR	PIBOT	Alain	971	Conservatoire du littoral	Délégué adjoint pour les Rivages français d'Amérique au Conservatoire du littoral
EELNR	PICOT	Frédéric	974	CBNM	Responsable Connaissance flore et habitats
I	PONCET	Rémy	métropole	MNHN	Chef de projet « Typologie »
EELR	PONS	Béatrice	972	ONF	Responsable SIG
EELNR	QUIMEBY	Alex	971	DAAF	Chargé de mission filière forêt-bois, service des territoires agricoles, ruraux et forestiers, unité développement forestier
EELNR	RAD/ASSEGARAN E	Soudjata	974	Conseil Régional	Directrice, Direction de l'Énergie, de l'Économie Circulaire et de la Biodiversité
EELNR	REMY	Yvonne	972	ONF	Responsable service Biodiversité Développement Durable
EELNR	REQUILLART	Thomas	973	DAAF Guyane	Chargé de mission « Foncier agricole »
EELR	RICHARD- HANSEN	Cécile	973	ONCFS	Délégation Etudes et Recherche Guyane
EELNR	RIVIERE	Eric	974	CIRAD	Chercheur
EELNR	ROUILLE	Jean- Christophe	972	DEAL	Administrateur de données SIG
EELR/I	ROUSTEAU	Alain	971	Université des Antilles - UMR EcoFoG	Enseignant chercheur spécialiste du milieu forestier

EELNR	ROUYER	Nicolas	974	DEAL	Chef de service eau et biodiversité
EELR	SIBILLE	Jean-Luc	973	ONF	Service Aménagement du Territoire
EELNR	SIN	Fabrice	971	ONF	Directeur adjoint <i>environnement</i>
I	SOUBEYRAN	Yann		UICN	Chargé de mission "Espèces exotiques envahissantes - Espèces menacées"
EELNR	STRASBERG	Dominique	974	UMR PVBMT	Chercheur
EELR	SUTTER	Emmanuel	972	DEAL	Chef de pôle Biodiversité Nature et Paysage
EELNR	TANASI	Michel	972	CTM	Biogéographe (ex ONF, ex PAG)
EELNR	TARNUS	Gisèle	974	CCEE	Conseil de la culture, de l'éducation et de l'environnement de La Réunion
EELR	TAUREAU	Florent	971	Université de Nantes	Spécialiste des mangroves
EELNR	TEILLAC-DESCHAMPS	Pauline		UICN	Responsable « Suivi écosystèmes »
EELNR	THONGO	Agnes	976	ONF	Chef de projet « Aménagement/biodiversité »
EELR	TRIOLO	Julien	974	ONF	Responsable pôle écologie
EELNR	TRUONG	Pascal	974	Parc National de La Réunion	Chef de projet LIFE+ « Forêt sèche »
M	UDO	Hélène	métropole	MNHM	Coordination des programmes de connaissance de l'eau et des milieux aquatiques pour l'Outre-mer
EELR	URTIZBEREA	Frank	975	DTAM	
EELNR/M	VANDERSARREN	Gaëlle	971	Conservatoire du littoral	Chargée de mission pôle-relais mangroves et zones humides d'outre-mer
EELNR	VANLAERE	Guy	971	Parc National de Guadeloupe	Chargé de mission « Ecosystèmes forestiers »
EELNR	VEILLEUR	Maurice	972	PNRM	Directeur de la Protection et de l'Aménagement du Territoire
EELNR	VERON	Isabelle	971	DEAL	Pôle Connaissance, territoires et paysages
I	VINCENT	Grégoire	métropole	IRD	Chercheur « LiDAR »
EELR	VISCARDI	Guillaume	972	CBMq	Directeur
I/M	WURPILLOT	Stéphanie	métropole	IGN	Responsable inventaires forestiers

EEL : enquête en ligne (EELR pour ayant répondu – EELNR pour n'ayant pas répondu ou ayant mutualisé sa réponse avec un autre contact) – I : interview – M : échanges de mails.

Annexe 2 : Liste des initiatives et projets de niveau national, inter-régional ou local en lien avec le sujet (*EXTRAITS SITES WEB*)

- i. [Adaptation de l'inventaire forestier national aux outre-mers](#)
- ii. [Best](#)
- iii. [CarHAB](#)
- iv. [CARIBSAT : système caribéen d'observatoire environnemental](#)
- v. [Cartographie des zones humides](#)
- vi. [EFESE](#)
- vii. [Expertise Littorale : suivi de l'occupation du sol en Guyane](#)
- viii. [GEIR Groupe espèces invasives de la réunion](#)
- ix. [GUYAFOR](#)
- x. [HABITATS : Typologie et cartographie des habitats forestiers en Guyane](#)
- xi. [Intégration des outre-mers dans les indicateurs de gestion durable des forêts françaises](#)
- xii. [LIFE+ CAPDOM](#)
- xiii. [Mascarine Cadetiana](#)
- xiv. [MOVECLIM](#)
- xv. [OAM Observatoire des activités minières en Guyane](#)
- xvi. [O-GEC : Observatoire guyanais du carbone et des gaz à effet de serre \(Guyane Energie-Climat ex OREDD\)](#)
- xvii. [ONB/SINP : Observatoire National de la Biodiversité et Système d'Information sur la Nature et le Paysage](#)
- xviii. [OPA-C : Observatoire des Pollutions aux Antilles](#)
- xix. [OTM : Observatoire territorial de Martinique](#)
- xx. [Pole relai mangroves et zones humides d'outre-mer](#)
- xxi. [THEIA-Géosud](#)
- xxii. [RAINWEBS](#)
- xxiii. [REDOM : réseau écologique dans les Outre-mer](#)
- xxiv. [Revue des typologies et cartographies des milieux terrestres d'outre-mer français](#)
- xxv. [SEAS : Satellite au service de l'environnement](#)

ADAPTATION DE L'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL AUX DOM (IGN)

« La LAAF, promulguée en octobre 2014, prévoit que l'inventaire forestier prenne en compte les particularités des DOM. Or, il n'y a pas actuellement d'inventaire forestier permanent sur ces territoires. Il n'y a pas non plus de procédure stable en place permettant à la France de remplir ses obligations en matière de rapportage international (reporting FAO et IGD pour les DOM) : hors métropole, les chiffres sont communiqués au coup par coup, sans réel suivi d'un rapportage à un autre. L'inventaire est entendu au sens large : il s'agit de toute donnée permettant d'établir des indicateurs concernant l'espace forestier. L'objectif final du projet consiste donc à trouver une solution pérenne pour les DOM permettant le rapportage quinquennal de la France auprès des instances internationales (Reporting FAO et IGD pour les DOM). Il n'est pas d'obtenir des données pour une gestion locale des forêts. (...) Le croisement des entretiens nationaux et locaux devra permettre [...] d'] apporter aux ministères concernés des éléments leur permettant de choisir l'organisation la plus pertinente à mettre en place pour les rapportages futurs. Les options retenues pourront être différentes d'un territoire à un autre. Le champ de l'étude comprend les territoires suivants : Guadeloupe, Martinique, Guyane, Réunion, Saint-Pierre-et-Miquelon, Mayotte, Saint-Barthélemy et Saint-Martin, qui sont les DROM-COM soumis au code forestier. La Nouvelle-

Calédonie, Wallis-et-Futuna et la Polynésie Française en sont exclus. ». (Document IGNConseil : CR-lancement étude forêts ultramarines 2016-02-19 v1.1.doc)

BEST

« Ce projet pilote vise à mettre en place, avec les mêmes outils que les programmes Corine Biotope et EUNIS, un répertoire des espèces et habitats et une catégorisation des zones sensibles dans ces régions qui constituent des points chauds de la biodiversité mondiale. La mise en place de cette nouvelle base de données commune est nécessaire pour identifier les lacunes et prendre, comme pour les autres régions de l'Union, un cadre de mesures adapté pour la conservation du biotope de ces régions. Cette initiative, qui a déjà prouvé sa faisabilité et son utilité pour les autres régions de l'Union, est donc une première étape pour adopter in fine des propositions législatives dédiées à la préservation de la biodiversité dans les régions ultrapériphériques françaises. Elle bénéficiera des possibles synergies avec les activités réalisées dans le cadre de l'action préparatoire BEST. » (http://ec.europa.eu/budget/biblio/documents/2016/2016_en.cfm L48/769, page 771)

CARHAB

« Dans le cadre de la stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020, le ministère en charge de l'Écologie, a initié un vaste programme de cartographie au 1/25 000 des habitats terrestres sur l'ensemble du territoire métropolitain à l'horizon 2025. Dans la pratique, le programme **CarHAB** (pour Cartographie des HABitats) se base sur la représentation de la végétation qui est considérée comme l'un des meilleurs intégrateurs des facteurs environnementaux et écologiques du milieu. En effet, une connaissance fine du tapis végétal permet non seulement de comprendre la distribution des habitats, leur fonctionnement dynamique et leur agencement dans le paysage mais également d'en évaluer la qualité et l'état de conservation. Pour ce faire, de nombreux experts sont mobilisés dans les domaines de la géographie (cartographie, télédétection...), de la phytosociologie (science qui étudie les communautés végétales) et de la gestion de l'information (système d'information, référentiels...). » (<https://inpn.mnhn.fr/actualites/lire/1241/>)

CARIBSAT : SYSTEME CARIBEEN D'OBSERVATOIRE ENVIRONNEMENTAL

« Le projet CARIBSAT consiste à concevoir et mettre en œuvre un Observatoire sur l'environnement à l'échelle des Petites Antilles basé sur un atlas géographique dynamique alimenté par l'acquisition et le traitement d'imageries satellitaires, de données environnementales sol et de chroniques hydrométéorologiques. A travers le projet CARIBSAT, la télédétection et l'approche spatiale constituent : une plateforme de collaboration multidisciplinaire de recherche scientifique ; un outil de formation d'étudiants et d'experts ; un outil d'évaluation, de gestion et d'aménagement des territoires considérés, un vecteur de rapprochement entre acteurs publics et privés dans chaque île, de collaboration régionale dans la caraïbe et d'ouverture à la coopération européenne et internationale. Le projet CARIBSAT utilise des images SPOT et radar (ENVISAT) acquises par la station SEAS de Guyane. La plateforme technique du projet est domiciliée à la Martinique. » (<http://www.martinique.ird.fr/les-activites/projets-de-recherche/projet-caribsat>)

CARTOGRAPHIE DES ZONES HUMIDES (INPN)

« L'arrêté interministériel du 24 juin 2008 modifié, précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides, s'applique en France métropolitaine et en Corse. Il n'est pas applicable en revanche en Outre-mer. Cette absence de base réglementaire pour définir et délimiter les zones humides dans les départements d'Outre-mer (DOM) pose de véritables problèmes en matière de prévention et de protection contre la destruction de ces sites, notamment lors de la réalisation de projets d'aménagement du territoire. C'est la raison pour laquelle un groupe de réflexion travaille depuis 2015 sur le contenu d'un nouvel arrêté interministériel spécifique à l'Outre-mer. Ce groupe est composé des chargés de mission compétents des DEAL (Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement) des cinq Outre-mer, du Conservatoire du Littoral, de l'Onema (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques), du Muséum National d'Histoire Naturelle et de la DEB (Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de

l'Environnement de l'Énergie et de la Mer). Cet arrêté interministériel (Ministère de l'Outre-mer, Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt, et le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer) comprendrait un socle commun à tous les DOM pour définir la méthodologie de délimitation des zones humides, à savoir un recours à un inventaire floristique et pédologique réalisé selon un protocole commun pour l'ensemble des DOM, et un renvoi à des arrêtés préfectoraux pris par chaque DOM pour définir les listes floristiques et pédologiques de référence adaptées à chaque territoire. » (<http://www.pole-zh-outremer.org/vers-un-arrete-interministeriel-permettant-de-definir-et-delimiter-les-zones-humides-dans-les-departements-doutre-mer/>)

EFESE

« Cette étude de plusieurs années mobilise des experts des principaux organismes de recherche nationaux dans un processus participatif impliquant également de nombreuses autres parties prenantes. Elle vise à la fois à dresser un état des écosystèmes, de leurs tendances d'évolution, et à estimer la valeur des services qu'ils produisent. La méthodologie, qui est en cours de validation, a vocation à permettre de procéder à une évaluation à différentes échelles depuis le niveau local jusqu'au niveau international. » (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-francaise-des.html>)

EXPERTISE LITTORALE - SUIVI DE L'OCCUPATION DU SOL EN GUYANE

« Suite à l'Expertise littoral (étude de l'occupation des sols sur la bande côtière guyanaise) qui devenue une base de référence et de réflexion propre à accompagner les documents d'urbanisme et d'aménagement du territoire, une nouvelle étude sur l'occupation des sols a été menée sur les territoires isolés de Guyane, à savoir Apatou, Grand Santi, Papaïchton, Maripasoula et Saül. Basée sur une cartographie, réalisée à partir de photo-interprétation de photographies aériennes et d'images satellite, et son analyse chiffrée, elle établit un état des lieux des modes d'occupation du sol (forêts, zones agricoles, zones urbaines) des territoires cités ci-dessus, entre 2005, 2008 et 2011. Cette approche géographique (par la cartographie) et quantitative (par les analyses chiffrées) de ce territoire permet ainsi d'intégrer la valeur des différentes occupations humaines et la connaissance écologique des milieux naturels dans les stratégies d'aménagement du territoire. Cette expertise a été commandée par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. »

(http://www.onf.fr/guyane/sommaire/mediaguy/++oid++4a34/++conf++138605452/@@display_media.html?datatype:int=6)

GROUPE ESPECES INVASIVES DE LA REUNION

« Le GEIR (Groupe Espèces Invasives de La Réunion) est un groupe de travail coordonné sur les espèces invasives à La Réunion (espèces végétales et animales introduites envahissantes, « pestes végétales », espèces nuisibles, ravageurs). Ce groupe est constitué d'un ensemble d'institutions, d'agences, d'associations, de professionnels et de personnes ressources travaillant sur les espèces invasives qui menacent le patrimoine naturel de l'île, mais aussi l'économie locale et la santé humaine. Le GEIR favorise la coordination des acteurs locaux, la planification et la mise en œuvre de la stratégie de lutte contre les espèces invasives à La Réunion dans le cadre du Programme Opérationnel des Lutte contre les Invasives. » (<http://www.especiesinvasives.re/geir/qu-est-ce-que-le-geir/>).

GUYAFOR

« Guyafor est un réseau de dispositifs forestiers permanents installés en Guyane Française. Il est dédié à l'étude à long terme de la dynamique forestière et de la biodiversité. Il a pour objectifs : de comprendre l'organisation structurale et floristique le long de gradients environnementaux ; de comprendre la dynamique forestière à long terme des forêts naturelles et exploitées en s'intéressant plus particulièrement : aux rôles des processus démographiques (régénération, croissance et mortalité) ; au cycle du carbone de la biomasse aérienne vivante ; aux effets des variations

climatiques. Ce réseau de dispositifs est une plate-forme de recherche à la disposition des chercheurs. Ceux-ci bénéficient à la fois des données acquises sur ces forêts et des infrastructures d'accueil sur ces sites leur permettant de développer leurs propres thématiques de recherche. Au-delà des thématiques poursuivies, cet observatoire des forêts guyanaises est un outil de surveillance à long terme des forêts et peut ainsi également jouer un rôle pour les actions d'aménagement du territoire et de développement local durable. Ce réseau est co-géré par des organismes de recherche (Cirad et Cnrs) et par le gestionnaire des forêts guyanaises (ONF). Outre l'acquisition de connaissances sur le fonctionnement des forêts tropicales humides, il fournit les bases scientifiques permettant de définir les règles de gestion durable des forêts guyanaises. » (<http://www.ecofog.gf/spip.php?article364>)

HABITATS - TYPOLOGIE ET CARTOGRAPHIE DES HABITATS FORESTIERS EN GUYANE

« Le catalogue des habitats forestiers de Guyane (...) est le fruit d'une longue collaboration entre instituts de recherche en écologie (UMR EcoFoG, Amap, Geode, IRD, Inra, Cirad, ONCFS) et organismes de gestion des milieux naturels de Guyane (ONF, PAG) menée au cours de deux programmes de recherches successifs : Le programme "Paysages et biodiversité en forêt guyanaise" (2006 -2010), financé par les fonds ECOSystèmes TROPicaux (Ecotrop) du ministère de l'Environnement et par le fonds pour l'environnement et le développement durable (Fedd) de l'Office national des forêts [rf: actu danbwa n°7] ; Le programme "Habitats" (2010 - 2012) financé par l'ONF et le Parc amazonien de Guyane (PAG), et soutenu par l'Union européenne sur les fonds PO-Feder. Le catalogue des habitats forestiers présente une synthèse de ces résultats sous la forme de fiches descriptives dressant un portrait précis des différents habitats naturels rencontrés en forêt guyanaise et des mécanismes qui les ont peu à peu façonnés. Un travail collectif important a été accompli pour fournir des éléments précis concernant les cortèges de grande faune, les peuplements d'arbres qui les abritent et la qualité des sols qui les supportent. (...) Cet outil s'adresse à l'ensemble de la communauté scientifique, aux bureaux d'études, mais aussi aux décideurs publics et privés en matière d'aide à la décision, en venant renforcer la connaissance de ce haut lieu de la biodiversité mondiale. » (http://www.onf.fr/lire_voir_ecouter/++oid++4cc4/@@display_media.html)

INTEGRATION DES OUTRE-MERS DANS LES INDICATEURS DE GESTION DURABLE DES FORETS FRANÇAISES (IGDOM)

« Ce projet a pour but d'analyser la faisabilité d'étendre la publication nationale des indicateurs de gestion forestière durable aux territoires ultramarins. Les forêts de l'Outre-mer français, situées majoritairement en zones tropicales (voir en annexe), s'étendent sur 9.3 millions d'hectares répartis dans douze départements, régions ou collectivités. (...)Le premier volet vise à : a. établir un état des lieux du sujet, b. analyser la faisabilité de la publication d'indicateurs ultramarins de gestion forestière durable, c. lancer la collecte et l'interprétation des données nécessaires à l'élaboration des indicateurs. Le second volet vient compléter le premier pour : d. rassembler les données commentées ; e. proposer une analyse des indicateurs susceptibles d'être élaborés ; f. proposer une synthèse de ces informations par territoire, pour l'ensemble des territoires ultramarins et en référence aux indicateurs métropolitains. » (http://docs.gip-ecofor.org/public/ProjetIGDOM_presentation.pdf)

LIFE+ CAPDOM

« Le programme « Life+ Cap DOM » vise à offrir des moyens humains, techniques et financiers pour agir concrètement et rapidement en faveur des oiseaux et des habitats menacés des DOM. Il propose des actions expérimentales, innovantes et reproductibles. C'est le tout premier projet Life+ impliquant la mise en réseau des associations d'outre-mer et la protection de la faune ultra-marine. Le Parc national de La Réunion est également co-pilote de ce projet, auquel de nombreux gestionnaires d'espaces naturels, institutions publiques et laboratoires participent. La mission internationale de la LPO assure la coordination nationale, en lien avec les coordinateurs locaux. » (<http://www.lifecapdom.org/le-programme/article/en-bref>)

MASCARINE CADETIANA

« À travers sa mission d'observatoire de la flore et des habitats, le Conservatoire Botanique National de Mascarin a vocation à fournir à l'État, aux collectivités locales, aux élus, à ses partenaires institutionnels et plus largement à l'ensemble des citoyens des outils de connaissance de la diversité végétale. Cette mission est assurée depuis ses débuts par des études de terrains, d'identification précise de la flore, de distribution des habitats et des plantes. L'ensemble des informations acquises et celles transmises par nos partenaires (réseau de naturalistes, Parc National, ONF, gestionnaires des ENS, etc.) alimentent Mascarine, le système d'information géographique du CBN-CPIE Mascarin. Mascarine Cadetiana III (MCIII) est un produit du système d'information Mascarine. Il s'agit d'une application web à forte composante cartographique dans le but d'interroger, d'exploiter et de restituer de l'information sur le thème de la flore et des habitats de la Réunion. Il permet notamment la saisie de l'information floristique(...). Le suivi du projet s'est effectué dans le cadre d'un comité de pilotage avec la participation de la DEAL, du Parc National et de l'Université de la Réunion. ». (<http://mascarine.cbnm.org/>).

MOVECLIM

« Dans le présent projet, il est proposé d'étudier et de promouvoir les bryophytes et fougères tropicales comme bio-indicateurs des changements climatiques. Ces groupes fortement diversifiés, largement reconnus comme des composantes essentielles des écosystèmes, figurent toujours parmi les groupes les moins connus. Ce projet constitue la première analyse comparative de leur diversité le long de gradients altitudinaux dans plusieurs îles tropicales : La Réunion (Mascareignes), Guadeloupe (Antilles), Pico (Açores), La Palma (Canaries) et Tahiti (Polynésie française). Il assemble un réseau international et multidisciplinaire de partenaires possédant une expertise dans les domaines de la recherche sur la biodiversité et de la conservation, parmi lesquels figurent des universités, des centres de recherche et des parcs nationaux. » (http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/environnement-et-ressources-biologiques/net-biome/fiche-projet-net-biome/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-EBIM-0007)

OBSERVATOIRE DES ACTIVITES MINIERES (OAM) EN GUYANE

« L'Etat, dans le cadre d'une mission d'intérêt général, demande à l'ONF d'assurer une surveillance de l'orpaillage et l'expertise de ses impacts sur l'environnement. Les ministères en charge de la Forêt, de l'Ecologie et de l'Outre-mer participent au financement de cette mission. L'expertise développée au fil du temps a abouti depuis quelques années à la mise au point par l'ONF d'un système efficace d'alerte et de suivi intégrant l'analyse périodique des images satellite "Spot 5" fournies par la station Seas (Surveillance de l'espace amazonien par satellite) à un véritable système d'information territorial cartographique. Les surfaces déforestées et les criques perturbées par les matières en suspension peuvent être repérées et suivies dans le temps. Par ailleurs des relevés de terrain complètent l'analyse d'image satellite. L'organisation de l'ONF Guyane permet de restituer sur SIG (voir l'article sur "L'information géographique") l'ensemble des informations relevées et d'assurer ainsi un suivi de la dynamique du développement de l'orpaillage. La connaissance des impacts de l'activité illégale permet de renseigner les services de l'Etat sur l'ampleur des atteintes aux milieux naturels et de quantifier l'étendue du passif. Cette synthèse des données est établie grâce à la mutualisation des informations recueillies au sein de l'Observatoire de l'activité minière auquel collaborent le Parc amazonien de Guyane, les Forces de gendarmerie, les Forces armées de Guyane et l'ONF. » (http://www.onf.fr/guyane/sommaire/guyane/missions/surveillance/20131025-130755-877346/@@index.html?search:int=1&search_source=L3d3dy9ndXlhbmU=&search_group:int=204916245&search_metatype=search-type-article)

OBSERVATOIRE GUYANAIS DU CARBONE ET DES GAZ A EFFET DE SERRE (GUYANE ENERGIE-CLIMAT EX OREDD)

« Guyane Energie- Climat (association loi 1901) a été créé en 2008 (alors Observatoire Régional de l'Energie et du Développement Durable) sous l'impulsion de la Région Guyane, des Collectivités Locales et des partenaires locaux de l'énergie et du développement durable. Ces objectifs principaux sont :- d'améliorer la connaissance de la situation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre - de centraliser les données énergies-climat et de faciliter leur mise à disposition auprès des acteurs régionaux. Les actions mises en œuvre ont consisté à développer une mission "observatoire de l'énergie" puis à partir de 2014 d'observatoire du carbone et des gaz à effet de serre". Les principales tâches auxquelles se consacrent les équipes de Guyane Energie-Climat dans leurs thématiques respectives consistent en particulier à : - recenser les installations de productions d'énergie du territoire - élaborer des bilans de production et de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre - mettre en place des indicateurs permettant d'évaluer l'impact des politiques mises en œuvre en cohérence avec ceux menés au niveau national - diffuser largement les données produites par le biais de ses publications. Depuis janvier 2015, Guyane Energie-Climat développe PRIME, la Plate-Forme Régionale d'Information sur la Maîtrise de l'Energie. » (http://www.gec-guyane.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=110)

OBSERVATOIRE BIODIVERSITE ET SYSTEME D'INFORMATION SUR LA NATURE ET LE PAYSAGE (ONB/SINP)

« L'ONB est un projet porté par la direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) du ministère en charge de l'écologie, appuyé par le service de l'observation et des statistiques (SOeS) du ministère et par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN). Il s'intègre dans la politique relative à la biodiversité présentée sur le site du ministère. L'ONB informe de manière synthétique sur l'état et l'évolution de la biodiversité ainsi que sur les interactions entre biodiversité et société. À ce titre, il est chargé de proposer des indicateurs de suivi – notamment pour la stratégie nationale pour la biodiversité (SNB) – et de les mettre à disposition de tous (...). Les engagements pris par la France aux niveaux international, européen et national doivent se traduire par des résultats effectifs sur la biodiversité. Pour s'en assurer, il est important de suivre la mobilisation des acteurs et ses effets par la mesure la plus objective possible de l'évolution de certaines composantes de la biodiversité et de la société, choisies pour leur représentativité. Pour faciliter leur appropriation, l'ONB présente ces indicateurs mobilisés en réponse à des questions. Ces questions sont proposées par l'ONB à partir des objectifs que se sont fixés les acteurs de la SNB, pour relever les défis décrits dans les orientations stratégiques. L'ONB produit progressivement des jeux d'indicateurs, afin de couvrir de manière cohérente chaque thématique retenue. Chaque jeu d'indicateurs a ainsi vocation à éclairer des questions posées sur la biodiversité et ses liens avec la société sur une thématique particulière. Trois jeux d'indicateurs sont d'ores et déjà proposés aujourd'hui : un jeu "Synthèse SNB", composé d'indicateurs renseignés au niveau national, relatifs à la biodiversité mais aussi aux différents aspects de la société en interaction avec la biodiversité : politiques, comportements, pressions, services écosystémiques... ; un jeu "Spécificités Outre-Mer", qui complète le précédent par quelques indicateurs traitant des éléments caractéristiques des territoires ultra-marins ; un jeu "Nature", qui regroupe des indicateurs d'état et d'évolution des principales composantes de la diversité biologique, ainsi que de leur connaissance. Certains indicateurs de ce jeu sont repris dans les deux jeux précédents. » (<http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/lonb>)

OBSERVATOIRE DES POLLUTIONS OPA-C AUX ANTILLES

« Mis en place par l'INRA, le CIRAD, l'IRD et le BRGM, l'Observatoire OPA-C est constitué par un dispositif de bassins versant instrumentés, en Guadeloupe, sur les rivières Pérou et des Pères à Capesterre-Belle-Eau, et en Martinique sur la rivière du Galion. En Guadeloupe, il est géré conjointement par l'INRA (UR ASTRO), le CIRAD et le BRGM. Ces dispositifs sont destinés à étudier les mécanismes de transfert de polluants et de remédiation possibles en interaction avec l'usage des

sols et les systèmes de culture.» (<https://www6.antilles.inra.fr/astro/Nos-recherches/Observatoire-OPA-C>)

OBSERVATOIRE TERRITORIAL DE MARTINIQUE

« L'Observatoire Territorial de Martinique (OTM) est un projet financé par plusieurs partenaires institutionnels (État, Région, Conseil général, CACEM, Espace Sud, Cap Nord) et avec les fonds européens (FEDER) pour donner aux acteurs de l'aménagement les moyens de répondre à leurs grandes préoccupations. La mise en œuvre a été confiée à l'Aduam, outil d'ingénierie partenarial martiniquais, et a mobilisé un très grand nombre de structures partenaires. À l'intersection de tous les dispositifs d'observation existants, de toutes les préoccupations publiques d'aménagement, l'observatoire permet de rendre visibles les indicateurs essentiels de chaque entité partenaire. Chacun a sélectionné les données qu'il possède, utiles aux autres. L'optimisation de la connaissance pertinente, sa focalisation sur des objectifs de développement durable, sa diffusion par un outil très simple traduisent la volonté politique martiniquaise de développer le territoire.» (<http://observatoire-territorial-martinique.com/>)

POLE RELAI MANGROVES ET ZONES HUMIDES D'OUTRE-MER

« Fruit d'une étroite collaboration entre l'Université de Nantes (UMR CNRS 6554 LETG) et le Conservatoire du littoral, la cartographie des mangroves de l'Outre-mer français fait l'objet d'une thèse de doctorat qui a démarrée à l'automne 2013. L'objectif de ce travail est de développer une méthodologie de cartographie reproductible et harmonisée des mangroves à l'échelle de l'Outre-mer afin de suivre l'évolution de ces écosystèmes. Les travaux se basent sur les données acquises sur le terrain (quatre sites pilotes en Guadeloupe, en Guyane, à Mayotte et en Nouvelle Calédonie) et le traitement d'images satellites haute résolution (constellation Pléiades) via une technique de télédétection innovante et encore peu utilisée (approche orientée objet). Cette première cartographie se basera sur une typologie harmonisée des mangroves à l'échelle de l'Outre-mer et permettra de faire un « état zéro » des surfaces et de l'état de santé (index de végétation, stade de développement, estimation de la biomasse aérienne) de l'ensemble des mangroves françaises, ce qui n'a encore jamais été fait. Les premiers résultats sont attendus pour fin 2014, avec la publication d'une typologie harmonisée pour la cartographie des mangroves de l'Outre-mer français. Suivront en 2015 un guide méthodologique de cartographie de ces milieux et en 2016 la première cartographie harmonisée des mangroves à l'échelle de l'Outre-mer. » (<http://www.pole-zh-outremer.org/les-actions-du-reseau-dobservation-des-mangroves/cartographie/>)

THEIA-GEOSUD

« Théia (Pôle thématique surface continental) est une structure interinstitutionnelle (regroupant le CEA, CIRAD, CNES, IGN, INRA, CNRS, IRD, Irstea, Météo France mais aussi l'ONERA et CEREMA), tournée vers la communauté scientifique et les acteurs publics pour promouvoir l'utilisation des données d'observation de la Terre. Cette structure est née du projet initiateur GéoSud (labelisé Equipex 2011-2019) et s'est développée autour des activités R&D du CNES et de l'expertise des laboratoires scientifiques français avec pour ambition de structurer et mutualiser les outils, les efforts de R&D, de transfert et de formation pour une meilleure valorisation des produits de télédétection et un rapprochement des spécialistes et des utilisateurs.

Théia-GéoSud est organisée autour d'une infrastructure de données et de services (IDS), de centres d'expertise scientifiques (CES) et d'un réseau d'animation régionale Théia (ART). L'IDS composé de 3 Pôle (CNES à Toulouse, IGN à Paris et GeoSud à Montpellier) centralise l'acquisition, le traitement, la distribution et l'archivage de données spatiales et de produits dérivés à travers un réseau de portails. Les CES regroupent des équipes scientifiques spécialisés sur des utilisations et des champs thématiques très précis (ex CES cartographie physiologie de la végétation naturelle, CES occupation des sols ou CES biomasse forestière...), qui mènent des actions de R&D et de formations en interaction avec les utilisateurs. Les ART sont organisés géographiquement afin de fédérer par région communauté scientifique et communauté des acteurs de la gestion des

territoires. L'ART GeoDEV animé par l'IRD (UMR EspaceDev), le CIRAD (UMR Tetis) et le CNES concerne les « Pays du Sud ». Les dispositifs SEAS-Guyane et SEAS-OI, animés par l'UMR EspaceDev devraient prochainement s'aligner sur le dispositif Théia et potentiellement constituer de nouvelles IDS.

Le système de mutualisation des données repose sur un modèle multi-utilisateurs : la structure dispose d'images d'archive (SPOT4-5-6-7, WorldHeritage, mais aussi LANDSAT, Pléiades, Kalideos, RapidEye...) et d'un certain volume d'acquisition de données sur budget dédié permettant de répondre aux demandes de production des adhérents. Une fois les images produites, celle-ci sont mises à disposition de l'ensemble des adhérents mais aussi des tiers sous-traitants (droits multi-utilisateurs). Le dispositif met aussi à disposition des algorithmes d'analyse (ex : application coupes rases) ainsi que des facilités de traitements facilitant l'exploitation des images (accès à des clusters de calcul). (...) Parmi les premières productions du dispositif Théia on trouve : les couvertures complètes de la France métropolitaine pour les années 2013-2014-2015-2016 à partir d'une mosaïque d'images Pléiades orthorectifiées et dénuagées, des couvertures 2013 et/ou 2014 sur la Guadeloupe, la Martinique, la Réunion et Mayotte. La couverture 2015 complète des ROM-COM (y compris Guyane) est en cours de production.

Ce dispositif structurant est exemplaire quant à sa capacité à structurer la filière de télédétection spatiale nationale depuis l'amont (pieds d'antenne) jusqu'aux utilisateurs finaux (gestionnaires et décideurs du domaine public). Un projet de structuration et de centralisation des données in situ est aussi en cours sous le pilotage du CNRS dans le cadre de Théia . »

https://www.theia-land.fr/sites/default/files/imce/theia/ART_20151005_Theia.pdf

RAINWEBS

« Changement climatique et réseaux trophiques le long d'un gradient latitudinal, (...) RAINWEBS s'inscrit dans le cadre d'un projet collaboratif à long terme, Bromeliad Working Group coordonné par Diane Srivastava, Univ. British Columbia, Vancouver, Canada. Les objectifs généraux de RAINWEBS sont : (1) de comprendre les interactions entre biogéographie et changement climatique, et (2) de disséminer une théorie multi-régionale robuste sur la façon dont le climat affecte les écosystèmes (...). (Le programme se concentre) sur les changements de précipitations car ceux-ci sont peu étudiés en comparaison aux changements de température, et auront des impacts potentiellement forts (et sur) sur les écosystèmes néotropicaux, qui risquent une plus forte érosion de biodiversité que les écosystèmes tempérés. (L'étude se base sur une altération des) précipitations qui alimentent les broméliacées à réservoir sur trois sites expérimentaux qui couvrent la gamme de diversité de la faune des Amériques : en Guyane (le centre de radiation des broméliacées et un hotspot de diversité), au Costa-Rica (pool d'espèces modéré), et à Puerto-Rico (Caraïbes, faune appauvrie). » (<http://rainwebs.univ-tlse3.fr/rainwebs-461598.kjsp?RH=1359384516162>)

REDOM RESEAU ECOLOGIQUE DES OUTRE-MERS

« Suite à l'engagement 177 du Grenelle de l'environnement d'engager ou soutenir la mise en place dans les départements d'outre-mer d'un réseau écologique, dans la continuité de la Stratégie nationale pour la biodiversité, la démarche REDOM a été déclinée en trois phases successives :

Phase I : méthode d'identification des espèces et des habitats dont la conservation présente un intérêt particulier ; Phase II : déterminer les zones les plus intéressantes au regard de la présence et de la conservation des espèces et habitats précédemment identifiés (zones d'intérêt particulier), en prenant notamment en compte les notions de continuité et fonctionnalité écologiques ; Phase III : identification des sites pressentis pour intégrer un réseau écologique, à partir des zones d'intérêt particulier déterminées au cours de la phase II, et contribuer à la détermination des modalités de préservation les plus appropriées. État d'avancement. L'ONF avait été mandaté pour porter au niveau local, avec les services de l'Etat et en association avec tous les partenaires intéressés, les travaux des phases I et II, le préfet devant reprendre la main pour la phase III. Fin 2010, la Réunion

et la Guyane étaient en phase II, l'objectif étant d'entrer en phase III en 2011. La Martinique et la Guadeloupe devraient achever la phase I en 2011 par la validation des listes d'espèces et d'habitats, afin de passer en phase II d'ici la fin de l'année. » (<http://www.trameverteetbleue.fr/entree-geographique/outre-mer/redom>)

REVUE DES TYPOLOGIES ET CARTOGRAPHIES DES MILIEUX TERRESTRES D'OUTRE-MER FRANÇAIS (INPN) :

« Dans le cadre d'une revue des typologies et cartographies des milieux terrestres d'Outre-mer français, le Service du Patrimoine Naturel (SPN-MNHN) souhaite évaluer le niveau d'adéquation entre le matériel disponible et les besoins des acteurs locaux. » L'enquête est en cours.

LE SATELLITE AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT (SEAS)

« Plusieurs stations de surveillance de l'environnement assistée par satellite (SEAS) sont portées par l'IRD. SEAS-Guyane, SEAS-Gabon, et SEAS-océan Indien permettent de disposer d'un véritable observatoire spatial pour la protection des forêts d'Amazonie et d'Afrique centrale ainsi que la surveillance de l'environnement marin et côtier du sud-ouest de l'océan Indien. Ces plateformes technologiques stimulent la production de connaissances scientifiques et de services innovants pour la gestion des ressources, l'aménagement et la surveillance des territoires. Combinées aux observations de terrain, les données satellites acquises et traitées à partir de la station sont mises à disposition des collectivités et de la communauté scientifique. Des activités de formation, de renforcement des capacités, de transfert de technologies sont également mises en place autour de ces projets. » (<https://www.ird.fr/la-recherche/infrastructures-et-moyens#chapitre1>)



Université Pierre et Marie CURIE
Faculté des Sciences et Technologies
Master de sciences de l'Univers, Environnement, Écologie
Mention Méthodes Physiques en Télédétection
Rapport de stage Master 2 R

Encadrants : Bernard RIERA et Jean-Paul RUDANT

Cartographie régulière des habitats forestiers des départements ultra-marins : cas de la Guyane et de Mayotte.

Abdelhakim BENNACER

GIP ECOFOR, le 2 juillet 2016

Table des matières

1	Introduction	8
1.1	Préambule	8
1.2	Introduction	8
1.3	Rappels	8
1.3.1	Ondes électromagnétiques	8
1.3.1.1	Polarisation des ondes électromagnétiques	9
1.3.1.2	Interaction des ondes électromagnétiques avec une cible	10
1.3.2	Notion de BRDF	12
1.3.3	Imagerie Radar	13
1.3.3.1	Équation Radar	13
1.3.3.2	Le SAR	14
1.3.4	Imagerie optique	14
1.4	Contexte	15
1.5	Le but	15
2	Méthode et données	16
2.1	Les ressources	16
2.1.1	Données Optiques	16
2.1.1.1	Sentinel2	16
2.1.1.2	Landsat8	18
2.1.2	Données RADAR	19
2.1.2.1	Sentinel1	19
3	Traitement des données	22
3.1	Traitement des données optiques	22
3.1.1	La calibration	22
3.1.1.1	La calibration des données de Sentinel 2	22
3.1.1.2	La calibration des données de Landsat8	23
3.1.2	Les corrections atmosphériques	23
3.1.2.1	Les corrections atmosphériques pour Sentinel 2	24
3.1.2.2	Les corrections atmosphériques pour Landsat8	25
3.1.2.3	Les corrections atmosphériques utilisées dans le projet	25
3.1.3	Les corrections géométriques	25
3.2	Traitement des données SAR	26
3.2.1	L'orthoréctification et les corrections géométriques	26
3.2.2	Le filtrage	26

3.2.3	La calibration des données	26
4	Exploitation des données et résultats	27
4.1	Donnée optiques	27
4.1.1	Détection des changements	27
4.1.2	Classification des scènes optiques	32
4.2	Données radar	34
4.3	Conclusion	36
A	Propriétés des feuilles	38
A.1	Les pigments foliaires	38
A.2	La structure cellulaire des feuilles	39
B	Les figures	40
C	S2 VS Landsat 8	43

Liste des tableaux

2.1	Bandes Spectrales de Sentinel 2.	18
2.2	Bandes Spectrales de Landsat 8.	19
C.1	Différents paramètres des instruments MSI de sentinel2 et de OLI de Landsat8	43

Table des figures

1.1	Représentation d'un champ électromagnétique en propagation. [11]	9
1.2	Les différents états de polarisation d'une onde électromagnétique [16].	10
1.3	Différents processus principaux d'interaction lumière-cible.	11
1.4	Schéma et grandeurs physiques et géométrique utilisées pour la définition de la BRDF	12
1.5	Représentation des paramètres d'un RADAR à visée latérale.[7]	13
2.1	Liste des corrections et des traitement effectués pour la génération d'un produit Level-1C de Sentinel 2 (ESA).	17
2.2	La chaîne de traitement des données Sentinel 1 (ESA).	20
2.3	Représentation du mode TOPSAR (ESA).	21
2.4	Différents modes d'acquisition de Sentinel 1(ESA).	21
4.1	Représentation de la zone d'étude sur une image de Mayotte en fausses couleurs prise par Landsat8 le 22 mai 2013(Bande IR dans le canal rouge, bande verte dans le vert et bande bleu dans le bleu).	28
4.2	Une image de la zone prise en septembre 2013(GoogleEarth).	29
4.3	Une image de la zone prise en novembre 2014(GoogleEarth).	30
4.4	Une image de la zone prise le 22 mai 2013 par Landsat8 en fausses couleurs. (Bande IR dans le canal rouge, bande verte dans le vert et bande bleu dans le bleu).	30
4.5	Une image de la zone prise le 14 mai 2016 par Landsat8 en fausse couleurs.	31
4.6	A gauche, la différence du NDVI des scènes de 2016 et de 2013 pour la région d'étude. A droite, la distribution de la différence du NDVI de Mayotte entre mai 2016 et mai 2013.	31
4.7	Image optique en couleurs naturelles de la région Est de Mayotte à classifier.	32
4.8	Capture d'écran de l'image GoogleEarth ayant servi de carte de fond pour la classification.	33
4.9	A gauche, l'occupation des sols de Mayotte (Géomayotte, 2015) faite avec une image Spot6 (1.5×1.5 m). A droite, l'occupation des sols réalisée grâce à une image de Sentinel 2 (10×10 m) acquise le 22 avril 2015.	33
4.10	La matrice de confusion ainsi que le coefficient Kappa de la classification effectuée.	34
4.11	Image de la section efficace RADAR σ_0 en double polarisation VH de la région de Cayenne en Guyane filtrée et calibrée.	35

4.12	A gauche, une image en fausses couleurs de la région de Cayenne (Guyane) avec σ_{VV}^0 dans le canal rouge, σ_{VH}^0 dans le canal vert et $\frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VH}^0}$ dans le canal bleu prise le 19/01/2016 (IW 5×20m). A droite une image GoogleEarth de la même région.	35
4.13	A droite une classification d'une image RADAR de Mayotte (EW 20×40m) en dual pol VH avec la méthode des K-moyenne. A gauche, Une carte d'occupation des sols de Spot6 (Géomayotte, 2015).	36
A.1	Spectre d'une feuille saine.[5]	38
A.2	La réflexion en fonction de l'état de la feuille.[5]	39
A.3	Variation de la réflectance en fonction de la morphologie de la feuille.[5]	39
B.1	Convention d'appellation des fichiers de S2 (ESA).	40
B.2	Convention de nomination des données Sentinel 1 (ESA).	41
B.3	Image Sentinel 2 de Mayotte en couleurs naturelles.	41
B.4	Image en fausses couleurs de Mayotte avec σ_{VV}^0 dans le canal rouge, σ_{VH}^0 dans le canal vert et $\frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VH}^0}$ dans le canal bleu.. . . .	42
C.1	Représentation des empreintes au sol pour différents satellites : Sentinel 2, Spot 6 et 7, Landsat8, Pléiades et Worldview 3 [6].	43

Avant propos

Remerciements

Je remercie plus particulièrement Bernard RIERA et Jean Paul RUDANT, sans qui ce projet n'aurait pas eu lieu. Pour leur disponibilité et leur assistance qui m'a été très utile à travers leur précieuses connaissances.

Je remercie également mes enseignants en Master 2 MPT qui m'ont appris beaucoup de choses et pour l'envie grandissante qu'ils m'ont inculquée au cours de ce master passionnant.

Un grand merci pour tous mes enseignants en Algérie qui m'ont appris à connaître et à aimer la physique.

Et enfin, tout mon entourage, qui, de loin ou de près a contribué à la réussite de mon projet.

Résumé

Le but du travail est d'estimer l'utilité de quelques ressources gratuites existantes à être utiles dans le suivi de la végétation, il entre dans le cadre du projet CARTHAFORUM pour le suivi et la cartographie forestière. Nous avons récupéré des images gratuites RADAR de Sentinel1, et optiques de Sentinel2 et Landsat 8 que nous avons également traité avec des logiciels gratuits SNAP de l'ESA, QGIS et Orfeo TOOLBOX. Après avoir effectué les corrections nécessaires nous avons par la suite fait un suivi d'une région à Mayotte où un changement, décelé avec des données de GoogleEarth, avait eu lieu entre 2013 et 2016 afin d'estimer l'utilité des données gratuites et accessibles dans le suivi des forêts et d'occupation des sols à déceler des changements. Le changement est l'apparition de quelques immeubles entre ces deux dates suivi d'une légère déforestation dans le voisinage immédiat. Avec la différence des NDVI entre les deux dates on a pu déceler ces changements grâce aux images LANDSAT8 d'une résolution de 30×30 m. Une deuxième partie est de faire un test sur la pertinence d'une classification de l'occupation des sols grâce à une image optique de Sentinel2 d'une résolution de 10×10 m pour une région à Mayotte et une image RADAR de Sentinel 2 d'une résolution de 20×40 m pour toute l'île de Mayotte avec comme carte de fond une image aérienne de GoogleEarth. Le résultat est une classification largement acceptable et fiable à l'aide de ces satellites. Une image de Sentinel 1 d'une résolution de 5×20 m nous permis d'estimer les détails visibles grâce à cette résolution sur la région de Cayenne en Guyane.

Abstract

The aim of this work is to estimate the value of free resources to be useful in vegetation monitoring, it is part of CARTHAFORUM project for monitoring and forest mapping. We download free RADAR images of Sentinel1, and optical of Landsat 8 and Sentinel2 which we also treated with free software as SNAP (ESA), QGIS and Orfeo TOOLBOX. After doing some corrections, we made a monitoring of a small region in Mayotte where a change had been detected with GoogleEarth images between 2013 and 2016 to estimate the value of free accessible data in forest monitoring and land use to detect changes. The change, seen with a GoogleEarth images, is the apparition of some new buildings in this period and a slight deforestation in the immediate vicinity of the buildings. We calculated the NDVI difference of the two images by using LANDSAT8 data with a spatial resolution of 30×30 m. The second part is to assess the reliability of a Sentinel2 scene classification of land occupation through an optical image with at 10×10 m spatial resolution applied to a medium region in Mayotte and a RADAR image of Sentinel 2 with a resolution of 20×40 m for the whole island. The result is a widely acceptable and reliable classification using these satellites. Another Seninel 1 image with a high spatial resolution (5×20 m) is used to estimate the visible and detectable details with these data applied to Cayenne region in French Guiana.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Préambule

Grâce à la place qu'il occupe dans les échanges d'énergies, la chaîne alimentaire et l'économie mondiale, le règne végétal est en quelque sorte la source de vie de tous les autres êtres vivants y compris les végétaux eux mêmes. La vie humaine est donc intimement liée aux végétaux dont il tire énormément de profits. Prendre soin des forêts dont l'homme dispose est un enjeu majeur et est indispensable au maintien, à long terme, d'une vie sur terre de qualité. Il est donc primordial d'avoir un suivi régulier des couverts végétaux pour prévoir et réagir à tout dysfonctionnement que ce soit d'origine anthropique, climatique ou dû aux maladies.

1.2 Introduction

Une forêt est définie selon la FAO¹ (FRA² 2010 [12]) comme étant « des terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectares avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à cinq mètres et un couvert arboré de plus de 10%, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils in situ »³. Le plus souvent, elles couvrent des surfaces très vastes à l'échelle humaine à l'instar des forêts tropicales. Leur suivi in situ, bien qu'il soit primordial, reste insuffisant. La télédétection qu'elle soit aéroportée ou par satellites devient donc un outils puissant et indispensable.

1.3 Rappels

1.3.1 Ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont le véhicule de l'information en télédétection. La maîtrise de leur propagation et des interactions auxquelles elles peuvent être soumises nous permet de mieux étudier les cibles et en extraire le plus d'informations.

1. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

2. Global Forest Resources Assessment

3. <http://www.fao.org/docrep/006/ad665e/ad665e06.htm>

Une onde électromagnétique est un champ électrique $\vec{E}$ et un champ magnétique $\vec{B}$ perpendiculaires l'un à l'autre qui se propagent dans la direction du vecteur d'onde $\vec{K}$ qui leur est perpendiculaire.

L'équation de propagation des champs électrique et magnétique dans le vide est la solution de l'équation d'onde 1.1 à l'aide des équations de Maxwell :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

où :

μ La perméabilité magnétique $\mu = \mu_r \mu_0$

ϵ La permittivité électrique $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

La solution dans le cas d'une onde plane progressive monochromatique pour le champ magnétique $\vec{B}$ et le champ électrique $\vec{E}$ s'exprime alors :

$$\vec{B}(t) = \vec{B}_0 \times \exp [i(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r} + \phi)] \quad (1.2)$$

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 \times \exp [i(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r} + \phi)] \quad (1.3)$$

où :

ω la pulsation $[\frac{rad}{s}]$

ϕ La phase du signal

$\vec{K}$ Vecteur d'onde qui représente la direction de propagation $[m^{-1}]$.

$\vec{B}_0$ L'amplitude et la direction du champ électrique.

$\vec{E}_0$ L'amplitude et la direction du champ électrique.

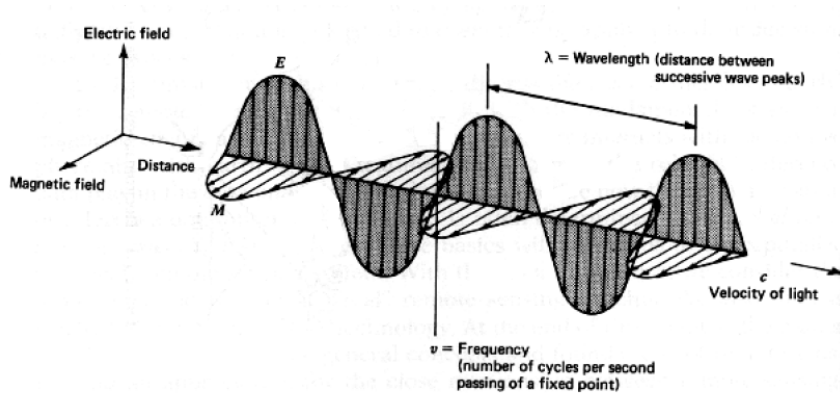


FIGURE 1.1 – Représentation d'un champ électromagnétique en propagation. [11]

1.3.1.1 Polarisation des ondes électromagnétiques

La polarisation d'une onde électromagnétique est la trajectoire décrite par la direction et de l'amplitude du champ électrique (et par conséquent du champ magnétique) en fonction du temps. C'est une propriété très utile en télédétection, spécialement en imagerie radar. En effet, certaines cibles ont tendance à polariser les ondes RADAR d'autres non. Il existe trois cas de figures de polarisation :

- La polarisation linéaire quand $\vec{E}$ varie dans une seule direction. Dans ce cas on a deux cas de figures : Polarisation horizontale (notée H), $\vec{E}$ est parallèle au plan d'incidence et la polarisation verticale (notée V), $\vec{E}$ est perpendiculaire au plan d'incidence ;
 - La polarisation circulaire, le champ électrique tourne autour de son axe en formant un cercle ;
 - La polarisation elliptique, le champ électrique tourne autour de son axe et change d'amplitude pour former une ellipse.
- Les deux dernières sont une combinaison d'une polarisation verticale et horizontale.

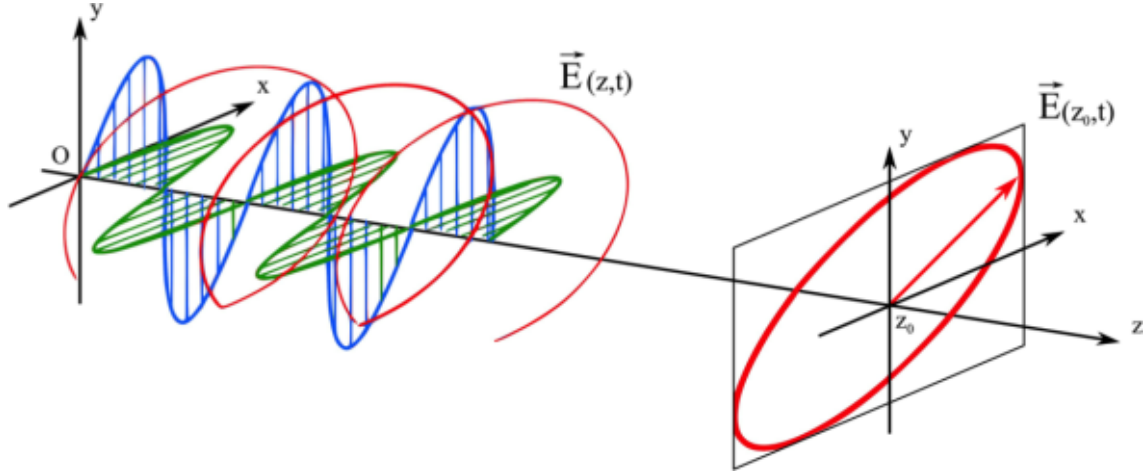


FIGURE 1.2 – Les différents états de polarisation d'une onde électromagnétique [16].

1.3.1.2 Interaction des ondes électromagnétiques avec une cible

Lorsqu'une onde électromagnétique rencontre un milieu, celle-ci interagit avec ce dernier et il peut y avoir plusieurs phénomènes gouvernés par la composition chimique et/ou biochimique de la cible ainsi que sa texture. Les principaux phénomènes utilisés en télédétection et qui nous permettent par la suite de caractériser notre cible sont résumés dans la figure 1.3 :

La réflexion

Une partie du rayonnement reçu est réfléchi par la cible. Le coefficient de réflexion régulière ρ et diffuse est donné par l'équation 1.4

$$\rho = \frac{d\Phi_{reflected}}{d\Phi_{incident}} \quad (1.4)$$

La transmission

Une partie du rayonnement sera transmise d'une manière régulière et diffuse et le coefficient de transmission est donnée par l'équation 1.5

$$\tau = \frac{d\Phi_{transmitted}}{d\Phi_{incident}} \quad (1.5)$$

L'absorption

Une partie sera également absorbée par la cible. Et le coefficient d'absorption α est donnée par l'équation 1.6 :

$$\alpha = \frac{d\Phi_{absorbed}}{d\Phi_{incident}} \quad (1.6)$$

L'émission

On peut avoir également la réémission d'une partie (corps gris) ou de toute l'énergie absorbée (corps noir $\epsilon = 1$), le plus souvent dans le IR thermique si la source de rayonnement est le soleil, suivant la loi de Planck :

$$d\Phi_{emitted} = \epsilon_{\lambda} \Phi_{absorbed} \quad (1.7)$$

d'où :

$$L_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \times B_{\lambda}(T) \quad (1.8)$$

L'émittance énergétique $M[W.m^{-2}]$ totale est donnée par l'équation 1.9 suivant la loi de Stefan :

$$M = \sigma T^4 \quad (1.9)$$

où :

$\Phi_{incident}$ le flux énergétique incident [W]

$\Phi_{absorbed}$ le flux énergétique absorbé [W]

$\Phi_{reflected}$ le flux énergétique réfléchi [W]

$\Phi_{emitted}$ le flux énergétique émis [W]

L_{λ} luminance spectrale [$W.m^{-2}.Hz^{-1}.sr^{-1}$]

ϵ_{λ} l'émissivité spectrale ($\epsilon = \alpha$ loi de Kirchhof)

B_{λ} la fonction de Planck [$W.m^{-2}.Hz^{-1}.sr^{-1}$]

T la température [K °]

σ constante de Stefan [$W.m^{-2}.K^{-4}$]

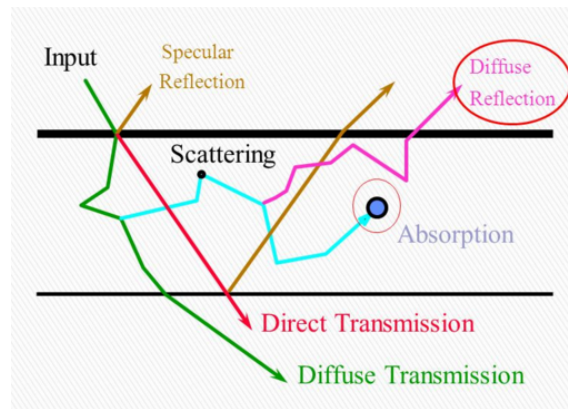


FIGURE 1.3 – Différents processus principaux d'interaction lumière-cible.

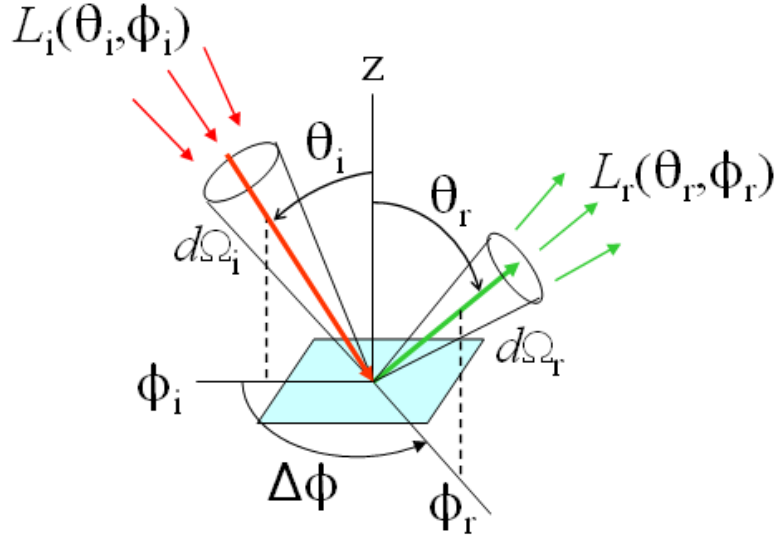


FIGURE 1.4 – Schéma et grandeurs physiques et géométrique utilisées pour la définition de la BRDF

1.3.2 Notion de BRDF

Les réflectances mesurées par un capteur dépendent, pour une même cible, de la position géométrique du capteur et de la source. Pour cette raison, la notion de BRDF⁴ a été introduite afin de prendre compte de la direction et de l'angle solide du rayonnement incidents et réfléchis mesurés. La figure 1.4 représente le trajet du rayonnement émis par une source et réfléchis par une cible permettant le calcul de la BRDF

$$BRDF(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r, \lambda) = \frac{L_r(\omega_r, \lambda)}{E_i} = \frac{dL_r(\omega_r, \lambda)}{dL_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1.10)$$

où :

L_i l'éclairement [$W.m^{-2}sr^{-1}$].

L_r la radiance [$W.m^{-2}sr^{-1}$].

(θ_i, Φ_i) direction d'incidence

(θ_r, Φ_r) direction de la réflexion

ω_i angle solide d'incidence [Sr]

ω_r angle solide de réflexion [Sr]

Dans le cas d'une surface lambertienne, la BRDF devient :

$$BRDF_{lambert}(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r, \lambda) = \frac{\rho}{\pi} \quad (1.11)$$

où :

ρ est la réflectance de la surface.

4. Bi-directional Reflectance Distribution Function [sr^{-1}]

1.3.3 Imagerie Radar

Dans l'imagerie radar, on mesure la réflectivité de la cible. Qui traduit l'efficacité de la cible à intercepter et envoyer une onde électromagnétique RADAR (non seulement par réflexion mais aussi la diffusion et la diffraction). Elle dépend de la taille, des propriétés diélectriques et du coefficient d'aspect de la cible. Pour les cible ponctuelles, elle est définie par la section efficace de rétrodiffusion RADAR, σ qui s'exprime :

$$\sigma = \frac{4\pi r^2 P_r}{P_t} \quad (1.12)$$

où :

σ Coefficient de rétrodiffusion [m^2]

r distance cible-antenne [m]

P_r énergie reçue par la cible [Watt]

P_t énergie rétrodiffusée par la cible [Watt]

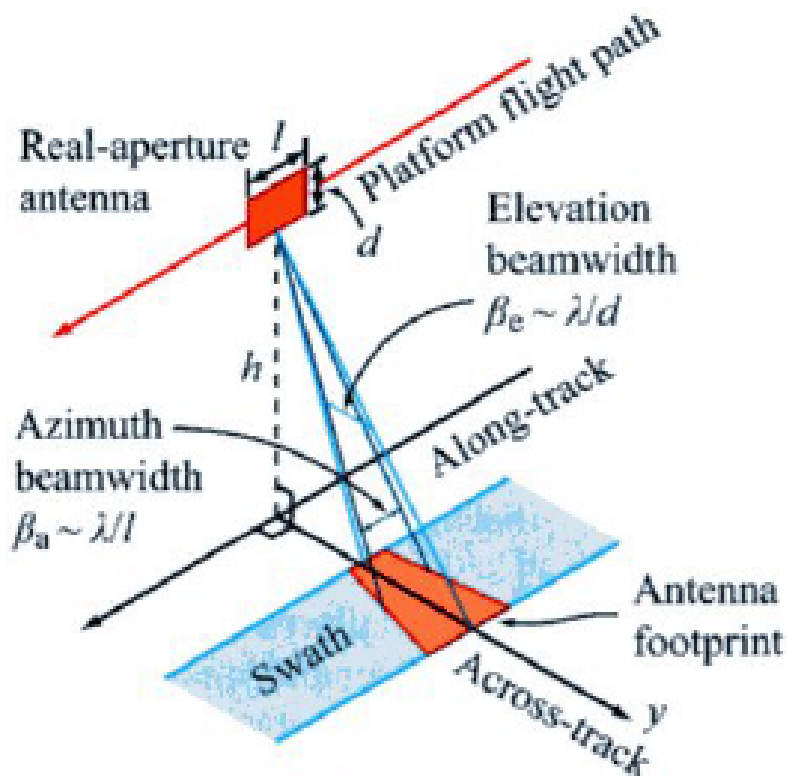


FIGURE 1.5 – Représentation des paramètres d'un RADAR à visée latérale.[7]

1.3.3.1 Équation Radar

L'équation du radar traduit l'influence de phénomènes physiques, techniques et géométriques sur la puissance rayonnée, la propagation de l'onde, et jusqu'à la réception du signal réfléchi (écho). Elle permet de réaliser une estimation des performances d'un système ra-

dar. L'équation RADAR est le bilan des puissances émise et reçue donnée par l'équation 1.13 :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma}{(4\pi)^3 R_t^3 R_r^3 L} \quad (1.13)$$

Où :

P_r La puissance reçue par l'antenne en Watts

P_t La puissance transmise en Watts

G_t Gain en transmission

G_r Gain en réception

σ Section efficace RADAR [m^2]

R_t Distance Antenne-Cible [m]

R_r Distance Cible-Radar [m]

L Facteur de perte

1.3.3.2 Le SAR

Le SAR⁵ est un RADAR à synthèse d'ouverture. Il tire profit du mouvement du satellite (ou d'un avion) par rapport à la cible et de l'effet Doppler pour acquérir des images avec une meilleure résolution spatiale qu'un RADAR. La résolution spatiale d'un SAR est déterminée en premier lieu par la taille de l'antenne en plus d'autres facteurs tels que la durée τ du pulse et la largeur de bande de l'antenne.

La résolution en range au sol :

$$RES_{range} = \frac{c\tau}{2 \sin(\theta)} \quad (1.14)$$

La résolution en azimuth :

$$RES_{azimuth} = \frac{L}{2} \quad (1.15)$$

où :

c : La vitesse de la lumière [$m.s^{-1}$]

τ La durée du pulse [s]

λ La longueur d'onde [m]

R : Distance Antenne-Cible [m]

L : Taille de l'antenne [m]

θ : L'angle d'incidence du faisceau

1.3.4 Imagerie optique

Contrairement à l'imagerie RADAR active, l'imagerie optique est une méthode passive. La source est principalement le soleil. C'est la lumière reçue par la cible et qui parviendrait aux capteurs CCD du satellite suites à sa réflexion, diffusion ou réémission qui nous permettra de la caractériser. L'avantage est le fait de pouvoir avoir une couverture multipectrale et ainsi avoir plus d'informations que le RADAR. L'inconvénient est qu'à ces longueurs d'ondes, l'atmosphère est un obstacle difficile à corriger.

5. Synthetic Aperture Radar

1.4 Contexte

L'objectif de ce stage s'inscrit dans le cadre du projet CARTHAFORUM. Ce projet est dirigé par GIP ECOFOR⁶ sur la demande du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer en lien avec les institutions concernées dans les Outre-mer : autorités locales (Etat - DEAL et DAAF et collectivités) et services dépositaires de données utiles à l'élaboration d'une cartographie et d'indicateurs pour le suivi forestier, et en interaction avec les ministères français en charge de l'Agriculture, de l'Ecologie et des Outre-mer, l'ONF, l'ONFI, l'IGN, IRD, CIRAD, CELRL, Conservatoires botaniques nationaux, Espaces protégés (parcs nationaux et régionaux, réserves naturelles, etc.), GIP-ATEN (cellule outre-mer) et autres équipes de recherche. Ce projet associera également les Conseils Scientifiques Régionaux du Patrimoine Naturel (CSRPN).

1.5 Le but

A l'aide des logiciels de traitement de données open source et des données satellites disponibles dont l'accès est gratuit (optique et radar), notre but est de contribuer à une partie de l'apport des ces images, principalement du point de vue de la résolution spatiale, pour cartographier des surfaces forestières et de détecter des changements au sein de la végétation dans le but de proposer de nouvelles méthodes de cartographie et de suivi des différents types de formations végétales adaptées aux nouveaux produits de télédétection actuellement disponibles. L'étude se portera sur le département de la Mayotte et de Guyane.

6. Groupement d'intérêt Public Écosystèmes Forestiers

Chapitre 2

Méthode et données

2.1 Les ressources

Au cours de ce stage, notre objectif est de d'exploiter des ressources gratuites (que ce soit les sources de données et les logiciels de traitement de données) malgré une résolution, généralement, plus faible que les données payantes comme SPOT et Terra-SarX. D'ailleurs notre but est aussi de juger l'apport d'information et la pertinence de ces données à être utiles dans ce projet. Nous avons donc opté pour les données optiques de Lndsat8¹ et de Sentinel2² et pour les images RADAR nous avons récupéré les données de Sentinel1³. Pour avoir accès à ces données une inscription est requise.

Ensuite, on a accès à une carte du globe où on peut choisir la région dont on souhaite récupérer les données. On peut également sélectionner les dates et le capteurs souhaités. Une fois les données disponibles sont générées, on peut télécharger celles qui nous intéressent le plus.

Pour le traitement des données nous avons utilisés des logiciels de cartographie et de traitement d'images, gratuits : QGIS⁴ qui est un logiciel SIG⁵, Orfeo TollBox⁶ pour la classification des scènes et SNAP⁷ développé par l'ESA pour le traitement d'images de plusieurs satellites et plus particulièrement des Sentinel, accessibles gratuitement.

2.1.1 Données Optiques

2.1.1.1 Sentinel2

Sentinel est le nom des satellites de la mission COPERNICUS (appelé aussi GMES⁸). C'est une mission cofinancée par l'Union Européenne et l'ESA⁹ dédiée à l'observation des surfaces continentales avec une résolution entre 10 et 60 m. Sentinel 2 est une constellation de 2 satellites, Sentinel 2A lancé le 23 juin 2015 et Sentinel 2B qui sera lancé fin

1. <http://earthexplorer.usgs.gov/>

2. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/\#/home>

3. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/\#/home>

4. <http://www.qgis.org/fr/site/>

5. Système d'Information Géographique

6. <https://www.orfeo-toolbox.org/>

7. <http://step.esa.int/main/download/>

8. Global Monitoring for Environment and Security

9. Agence Spatiale Européenne

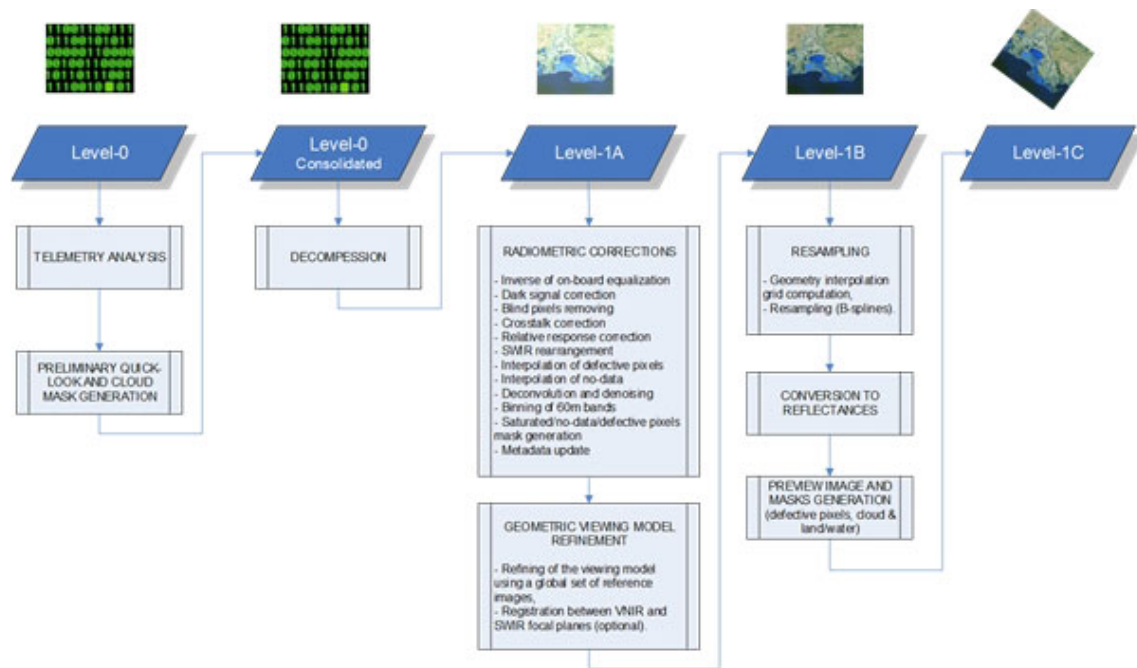


FIGURE 2.1 – Liste des corrections et des traitement effectués pour la génération d’un produit Level-1C de Sentinel 2 (ESA).

2016. Sentinel 2 est doté de capteurs optiques multispectraux MSI¹⁰ fonctionnant avec la technique de scan Pushbroom. C’est un instrument composé d’un télescope à 3 miroirs avec une pupille d’un diamètre de 150 mm et possède deux plans focaux (un pour les détecteurs VNIR et l’autre pour SWIR). Il est équipé d’un prisme pour la séparation des bandes. Sentinel 2A est sur une orbite héliosynchrone à une altitude de 786 km. En compagnie de Sentinel 2B, il y aura une séparation de 180° entre les deux satellites qui permettra d’avoir une meilleure couverture temporelle (la même région est visitée tous les 5 jours environ pour les deux satellites réunis). Il est équipé de capteurs multispectraux à 13 bandes (Tableau 2.1) ayant différentes résolutions spatiales et possède une résolution radiométrique < 5%. Son angle d’ouverture 20.6° permet l’acquisition d’images par la technique PUSHBROOM avec une fauchée de 290 km. Chaque pixel est codé sur 16 Bits.

Les données Sentinel 2 sont classées en différents niveaux [3]. L’instrument MSI acquière des données de niveau 0. Ces données suivent une chaîne de traitement à partir des reflectances mesurées jusqu’à l’obtention d’une image Level-1C, celles disponibles pour le téléchargement. Ce sont des images calibrées et géométriquement orthorectifiées comme montré sur la figure 2.1. Ces données peuvent être améliorées au niveau Level-2A par l’utilisateur en appliquant des corrections atmosphériques via l’utilisation de la Tool-Box SNAP de Sentinel 2. La résolution de ces images est alors rééchantillonnée à 60 m. La figure 2.1 résume les corrections effectuées sur le produit Sentinel 2 brut pour l’obtention d’un produit Level-1C auquel nous avons accès et la figure B.1 détaille la procédure d’appellation des fichiers de Sentinel 2.

10. MultiSpectral Instrument

TABLE 2.1 – Bandes Spectrales de Sentinel 2.

Bande	Centre de la bande (nm)	Largeur de la bande	Radiance de référence ($W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$)	SNR	Résolution (m)
B1	443	20	129	129	60
B2	490	65	128	154	10
B3	560	35	128	168	10
B4	65	30	128	142	10
B5	705	15	74.5	117	20
B6	740	15	68	89	20
B7	783	20	67	105	20
B8	842	115	103	172	10
B8a	865	20	52.5	72	20
B9	945	20	9	114	60
B10	1375	30	6	50	60
B11	1610	90	4	100	20
B12	2190	180	1.5	100	20

2.1.1.2 Landsat8

Landsat 8, lancé le 11 février 2013 est le dernier satellite du programme Landsat dédié à l'observation de la terre pour des fins civiles. Il a été développé par la NASA¹¹ et l'USGS¹² dont le premier a été lancé en 1972. L'objectif de cette mission se résume en 3 objectif principaux : Avoir une continuité de données à Landsat 4, 5 et 7 ; avoir une couverture globale de la terre en 16 jours et actualiser des régions terrestre sans couverture nuageuse afin d'avoir des images du globe pratiquement sans nuages de plus en plus récentes. Il possède deux instruments à bord : Operational Land Imager (OLI) et Thermal Infrared Sensor (TIRS). Les deux instruments totalisent 11 bandes spectrales calibrées avec une incertitude radiométrique $< 5\%$ (Tableau 2.2). OLI fonctionne avec 9 bandes VINIR (visible et infrarouge) et SWIR (courtes longueurs d'onde IR) et TIRS avec 2 bandes thermiques. Les bandes thermiques sont à une résolution de 100 m, les bandes visible (NIR, SWIR) à 30 m et a bande panchromatique 15m. Comme la plus part des satellites d'observation de la terre, il est sur une orbite héliosynchrone à 705 km d'altitude. Son angle d'ouverture de 15° lui permet d'avoir une fauchée de 185×185 km avec également la technique Pushbroom avec une visée au nadir. Chaque pixel est codé sur 16 bits. Un produit Landsat8 de niveau L1 est composé de 13 fichiers (11 images de la bande, un fichier de métadonnées spécifiques au produit, et une image d'évaluation de la qualité (AQ)). Les fichiers d'image sont toutes les images GeoTIFF codées sur 16 bits calibrées et géométriquement corrigée. Les bandes OLI sont les bandes 1-9. Les bandes TIRS sont les 10 et 11.

11. Agence spatiale américaine :National Aeronautics and Space Administration

12. Institut des études géologiques américain :US Geological Survey

TABLE 2.2 – Bandes Spectrales de Landsat 8.

Bande	Longueur d'onde en μm	Résolution (m)
B1 Aérosol	0.43-0.43	30
B2 Bleu	0.45-0.51	30
B3 Vert	0.53-0.59	30
B4 Rouge	0.64-0.6	30
B5 NIR	0.85-0.88	30
B6 SWIR1	1.57-1.65	30
B7 SWIR2	2.11-2.29	30
B8 Panchromatic	0.50-0.68	15
B9 Cirrus	1.36-1.38	30
B10 Thermique1	10.60-11.19	100×30
B11 Thermique2	11.50-12.51	100×30

Le fichier texte de métadonnées (MTL) contient l'identification des paramètres pour la scène, ainsi que l'étendue spatiale de la scène et les paramètres de traitement utilisés pour générer le produit de niveau 1 [1]. La convention d'appellation des fichier Landsat8 se fait selon l'exemple suivant :

Includes both OLI and TIRS : LC80390222013076EDC00

Includes only OLI : LO80390222013076EDC00

Includes only TIRS : LT80390222013076EDC00

L : Landsat

C/O/T : Instrument ; C=Combined, O=OLI, T=TIRS

8 : Satellite

039 : Path (WRS-2)

022 : Row (WRS-2)

2000 : Year

076 : Julian Day (Day 76 of the calendar year = 17 March)

EDC : Ground Station where the data was received

00 : Archive version number

2.1.2 Données RADAR

2.1.2.1 Sentinel1

Sentinel 1 fait partie du même programme que Sentinel 2, celui de Copernicus . C'est un système de deux satellite SAR : Sentinel 1-A, lancé le 03 avril 2014 et Sentinel 1-B lancé le 25 avril 2016. L'avantage principal des RADAR(antennes) par rapport aux capteurs optiques réside dans le fait que le premier étant un système actif à des longueurs d'onde n'interagissant pas avec l'atmosphère, il acquière des images à tout temps et nuit et jour. Les deux satellites, d'une longueur de 12 m, orbitent à une altitude 693 km sur une orbite héliosynchrone et une inclinaison de 98,19 ° . Chaque satellite fait le tour de la terre

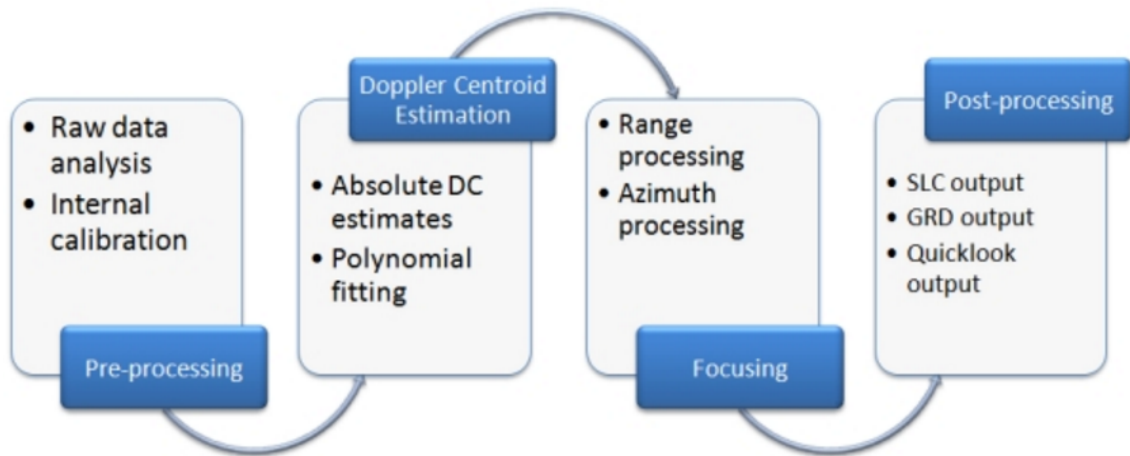


FIGURE 2.2 – La chaîne de traitement des données Sentinel 1 (ESA).

en 98.74 minutes avec une fréquence temporelle de 12 jours. Les deux radar CSAR fonctionnent en double polarisation (HH+HV, VV+VH) dans la bande C, sur une fréquence centrale de 5.405 GHz (soit une longueur d'onde de 5,5 cm). La fréquence temporelle d'environ 6 jour pour les deux satellites réunis. La figure B.2 représente la convention d'appellation des fichiers sentinel 1 et la figure 2.2 montre les étapes et les corrections effectuées sur les données brutes pour aboutir aux images de niveau L1 de Sentinel 1. Sentinel 1 possède deux modes principaux d'acquisition d'images [4] :

Le mode **Interferometric Wide Swath (IW)** et le mode **Wave (WV)**.

Le mode interférométrique est le mode par défaut des surfaces solides. Sa fauchée est de 250 km avec une résolution de 5×20 m en single look. Ce mode fonctionne en trois sous-bandes en utilisant un balayage par la technique TOPSAR¹³. Avec cette technique, le faisceau est piloté électroniquement et fait 3 balayage de l'arrière à l'avant dans la direction azimutale dans une seule fauchée (appelé sous-fauchées), le résultat est une meilleure qualité d'image qui est homogène sur toute la bande.

Le mode d'acquisition Wave (WV) est plutôt utilisé pour les surfaces océaniques. Il pourrait être utile pour déterminer la direction, la longueur d'onde et les hauteurs de vagues sur les océans ouverts. Dans ce mode, le SAR fait l'acquisition d'images chacune d'une fauchée de 20×20 km. Les images sont acquises en alternance toutes les 100 km avec deux angles d'incidence différents.

Sentinel 1 peut également fonctionner dans deux modes supplémentaires : Stripmap (SM) et Extra Wide Swath (EW).

Le mode Stripmap offre une continuité de l'ERS et Envisat, offrant une très bonne résolution de 5×5 m sur une étroite fauchée (80 km de large). L'une des six fauchées d'imagerie peut être sélectionnée en changeant l'angle d'incidence du faisceau et la largeur du faisceau d'élévation.

Le mode Extra Wide Swath, quand à lui, est destiné aux observations maritimes, la glace

13. Terrain Observation with Progressive Scans SAR

et les zones polaires où une large couverture spatiale et une courte couverture temporelle de revisite sont exigées. Ce mode fonctionne de manière similaire au mode Interferometric Wide Swath, d'ailleurs on peut également faire de l'interférométrie avec ce mode. Il utilise aussi la technique de TOPSAR, figure 2.3, en utilisant cinq sous-bandes au lieu de trois, ce qui entraîne une plus basse résolution spatiale ($20 \times 40\text{m}$) et une fauchée extrêmement large, 400 km.

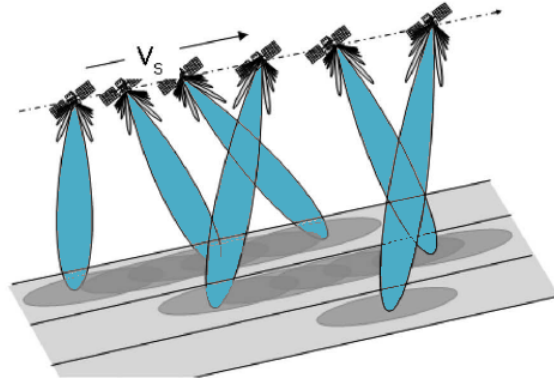


FIGURE 2.3 – Représentation du mode TOPSAR (ESA).

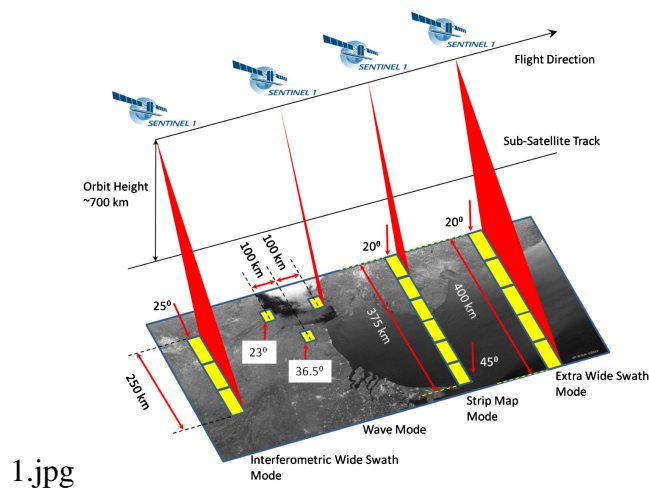


FIGURE 2.4 – Différents modes d'acquisition de Sentinel 1(ESA).

Chapitre 3

Traitement de données

3.1 Traitement des données optiques

3.1.1 La calibration

3.1.1.1 La calibration des données de Sentinel 2

[9] Sentinel 2 effectue une calibration du dark toutes les deux semaines en acquérant des images de l'océan de nuit et une calibration absolue tous les mois à l'aide de la diffusion solaire. Pour la conversion des données mesurées par Sentinel2, la valeur de chaque pixel est convertie reflectance spectrale suivant l'équation 3.1

$$\rho_{\lambda}(i, j) = \frac{\pi \times CN_{\lambda,NTDI}(i, j)}{A_{\lambda,NTDI} \times E_s \times d(t) \times \cos(\theta_s(i, j))} \quad (3.1)$$

où :

$\rho_{\lambda}(i, j)$ reflectance mesurée au niveau du satellite au niveau du pixel (i,j)

$CN_{\lambda,NTDI}$ la valeur digital du pixel

$A_{\lambda,NTDI}$ la calibration absolue de MSI

E_s radiance solaire sur une surface perpendiculaire au rayons solaires à l'extérieur de l'atmosphère [$W.m^2.\mu m$]

θ_s angle zénithale solaire

$d(t)$ est la variation de la distance terre-soleil en fonction du temps et qui est donnée par l'équation 3.2

$$d(t) = \frac{1}{(1 - 0.01673 \times \cos(0.0172 \times (t - 2)))^2} \quad (3.2)$$

où :

t le jour julien (date de référence 01/01/1950)

0.01673 l'excentricité de l'orbite terrestre

0.012 la vitesse angulaire terrestre [$\frac{rad}{s}$].

3.1.1.2 La calibration des données de Landsat8

Conversion en radiances [17]

La calibration des deux instruments de OLI et TIRS pour la radiance spectrale mesurée en haut de l'atmosphère (TOA¹) se fait à travers l'équation suivante :

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (3.3)$$

Où :

L_{λ} : La radiance spectrale TOA [$W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$].

M_L : Facteur multiplicatif spécifique à la bande qui se trouve dans le fichier de metadata (RADIANCE_MULT_BAND_x où x est le numéro de la bande)

A_L : Facteur additif spécifique à la bande contenu aussi dans les metadata (RADIANCE_ADD_BAND_x où x est le numéro de la bande)

Q_{cal} : Valeur du pixel quantifiée et calibrée

Conversion en Réflectances

$$\rho'_{\lambda} = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} \quad (3.4)$$

où :

ρ'_{λ} : Réflectance terrestre sans correction pour l'angle d'incidence solaire.

M_{ρ} : Facteur multiplicatif spécifique à la bande qui se trouve dans le fichier de metadata (REFLECTANCE_MULT_BAND_x où x est le numéro de la bande)

A_{ρ} : Facteur additif spécifique à la bande contenu aussi dans les metadata (REFLECTANCE_ADD_BAND_x où x est le numéro de la bande)

La reflectance en intégrant la correction de l'angle d'incidence solaire sera :

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho'_{\lambda}}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho'_{\lambda}}{\sin(\theta_{SE})} \quad (3.5)$$

où : ρ_{λ} : Réflectance corrigée

θ_{SZ} : L'angle d'élévation solaire locale. L'angle d'élévation solaire du centre de la scène est contenu dans les metadata (SUN_ELEVATION)

θ_{SE} : L'angle zénithale solaire local : $\theta_{SZ} = 90^{\circ} - \theta_{SE}$

3.1.2 Les corrections atmosphériques

Au moment où le RADAR (SAR) utilise la propriété de rétrodiffusion des surfaces à des longueurs d'ondes n'interagissant pas avec l'atmosphère, les capteurs optiques mesurent, eux, des rayonnements à des longueur d'ondes pouvant interagir plus au moins avec l'atmosphère. Elle constitue l'obstacle principale dans le traitement des images optiques. Les rayonnement n'étant pas absorbée d'une manière équivalente pour toutes les longueurs d'ondes il est de ce fait primordial d'avoir les profondeur optiques de toutes les

1. Top Of the Atmosphere

bandes spectrales pour pouvoir interpréter rigoureusement les données et surtout pouvoir comparer des images prises à des dates différentes. La radiance mesurée au niveau du satellite n'est pas exactement celle réfléchiée par les cibles se trouvant à surface terrestre. En effet, les rayons lumineux traversent l'atmosphère et subissent par conséquent des diffusion, des absorptions et des réémissions :

Une partie du rayonnement sera perdue par diffusion et absorption [13] :

$$dI(x) = -\sigma_e(x, \lambda)I(x)dx \quad (3.6)$$

Et une autre partie gagnée par diffusion et émission thermique :

$$dI(x) = \sigma_e(x, \lambda)J(x)dx \quad (3.7)$$

$$dI(x) = -\sigma_e(x, \lambda)dx(I(x) + J(x)) \quad (3.8)$$

La résolution de cette équation dans l'hypothèse d'un équilibre thermodynamique locale est :

$$I(\tau(\lambda)) = I_0 \exp\left(\frac{-\tau(\lambda)}{\mu}\right) + \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau(\lambda)} B(\tau'(\lambda)) \exp\left(\frac{\tau'(\lambda) - \tau(\lambda)}{\mu}\right) d\tau(\lambda) \quad (3.9)$$

où :

I l'intensité du rayonnement [$W.m^{-2}$]

σ_e le coefficient d'absorption et de diffusion [m^{-1}]

$\tau = \int_{x_1}^{x_2} -\sigma_e dx$ la profondeur optique

$J(x)$ la fonction source [$W.m^{-2}.Hz^{-1}.sr^{-1}$]

$B(\tau)$ la fonction de Planck [$W.m^{-2}.Hz^{-1}.sr^{-1}$]

$\mu = \cos(\theta)$ où θ est l'angle entre le rayon lumineux et la normale

3.1.2.1 Les corrections atmosphériques pour Sentinel 2

Sentinel 2 peut générer, grâce à des algorithmes, des images Level-2A où des corrections atmosphériques sont appliquées aux images Level-1C. Les réflectances ainsi obtenues en haut de l'atmosphère pour Level-1C sont corrigées pour le bas de l'atmosphère. La procédure de la mise en place de la correction atmosphérique se fait en deux étapes :

- Une classification de la scène dans le but de classer les pixels (nuages, végétation...)
- Ensuite la conversion des réflectances reçues au niveau du satellite à des réflectances qui seraient mesurées au niveau du sol.

Afin que l'algorithme soit exécuté des bandes dédiées aux aérosols et à l'atmosphère sont prévues pour ces corrections dans Sentinel 2. L'inconvénient c'est une perte en résolution car les images corrigées sont rééchantillonnées pour avoir une résolution de 60×60 m. Le programme est basé sur un algorithme proposé dans ATCOR (Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery) (Richter and Schläpfer, 2011 [15]). Cet algorithme repose sur le modèle de transfert radiatif LIBRADTRAN (Mayer and Kylling, 2005 [14]).

3.1.2.2 Les corrections atmosphériques pour Landsat8

Pour obtenir les réflectance au niveau de la surface pour les images Landsat 8, un modèle atmosphérique peut être utilisée pour tenir compte des effets de la diffusion et l'absorption dans l'atmosphère. Dans ARCSI le modèle de transfert radiatif 6S est utilisé. Un certain nombre de paramètres sont requis pour 6S comme :

- profil atmosphérique
- Profil Aerosol + profondeur optique des aérosols (AOD)
- Géométrie
- Altitude
- longueur d'ondes

Beaucoup de ces paramètres sont calculés au sein de ARCSI ou dérivées à partir du fichier header (Metadata) des données Landsat 8 (par exemple, la géométrie, l'altitude et la longueur d'onde). Il y a un certain nombre d'options prédéfinies pour le profil atmosphérique, le profil d'aérosols et les réflectances du sol dans ARCSI.

3.1.2.3 Les corrections atmosphériques utilisées dans le projet

L'accès aux données landsat8 atmosphériquement corrigées étant sur commande et n'étant pas parfaitement validée [8] et celle de sentinel pas encore au point avec SNAP, nous avons utilisé l'approximation utilisée par (Athos et al 2011 [10]). Dans cette méthode, la radiance/reflectance d'une cible sombre est supposée nulle. Les surfaces liquide (eau) ne sont pas vraiment des cibles sombres c'est pour ça qu'il est préférable d'avoir des données de terrain sur les surfaces sombres à choisir et dans notre cas nous avons utilisé l'ombre des nuages. En assumant cette hypothèse, qui nous permet d'éliminer la réflectance gagnée par diffusion, il est évident que la réflectance qui devrait être mesurée à la surface sera la différence entre celle mesurée au niveau du satellite et celle mesurée pour une cible sombre.

$$\rho = \frac{(\pi \times (L_{sat} - L_{darkesttarget} \times d^2))}{ESUN_{\lambda} \times \cos(\theta_s)} \quad (3.10)$$

où :

ρ reflectance spectrale à la surface [%]

L_{sat} la radiance (apparente) mesurée au niveau du satellite [$Wm^2sr\mu m$]

$L_{darkesttarget}$ la radiance de la cible la plus sombre [$Wm^2sr\mu m$]

d distance terre-soleil

$ESUN_{\lambda}$ radiance solaire sur une surface perpendiculaire au rayons solaires à l'extérieur de l'atmosphère [$Wm^2\mu m$]

θ_s l'angle zénithale solaire

3.1.3 Les corrections géométriques

Les problèmes liés aux distorsions géométriques ainsi qu'à la configuration géométrique de mesure sont corrigées automatiquement pour les données accessibles de niveau 1 et plus

3.2 Traitement des données SAR

3.2.1 L'orthoréctification et les corrections géométriques

Les variations topographiques dans la surface de la terre et l'inclinaison du satellite ou du capteur du satellite induisent des distorsion des pixels. Plus un pixel est éloigné du satellite, plus il est distordu. L'Orthorectification est le processus de correction de ces distorsions dues à la géométrie à l'aide de modèles numériques de terrains.

3.2.2 Le filtrage

Toutes les images radars contiennent une certaine quantité de *speckle* (chatoiement radar). Le *speckle* est produit par les interférences aléatoires, constructives et destructives, provenant des diffusions et réflexions multiples qui se produit dans chaque cellule de résolution. Le chatoiement cause une certaine in-homogénéité des scènes RADAR. Dans notre traitement de données nous avons utilisé le filtre Lee Sigma. Ce filtre permet de lisser une image en prenant une moyenne sur les pixels voisins, mais n'inclut que les pixels qui ont une valeur ne déviant pas du pixel courant par plus d'une plage donnée.

3.2.3 La calibration des données

Les produits de niveau Level1 de Sentinel 1 sont fournis avec des données de calibration nécessaires pour convertir la réflectivité radar en unités physiques. Le fichier Calibration Annotation Data Set (CADS) fournit quatre Look Up Tables (LUT). La calibration se fait avec les données intégrées dans les fichiers annexes suivant l'équation 3.11 [2].

$$\sigma_0 = \frac{DN^2}{A_{dn}^2 \cdot K} \sin(\alpha) \quad (3.11)$$

où :

α est l'angle d'incidence local

K la constante de calibration

DN la valeur du pixel

A_{dn} le coefficient de mise à l'échelle finale du pixel

La conversion de la réflectivité RADAR en section efficace radar se fait à travers l'équation suivante :

$$A_\sigma = \sqrt{\frac{A_{dn}^2 \cdot K}{\sin(\alpha)}} \quad (3.12)$$

La conversion de la réflectivité RADAR en β^0 se fait à travers l'équation 3.13 :

$$A_\beta = \sqrt{A_{dn}^2 \cdot K} \quad (3.13)$$

La conversion de la réflectivité RADAR en γ^0 se fait à travers l'équation 3.14

$$A_\gamma = \sqrt{\frac{A_{dn}^2 \cdot K}{\tan(\alpha)}} \quad (3.14)$$

Chapitre 4

Exploitation des données et résultats

4.1 Donnée optiques

L'un des problèmes principaux pour l'imagerie optique est de toute évidence l'atmosphère. Cependant, des corrections atmosphériques pouvant être effectuées, il reste celui des nuages. Au moment où environ 67% de la surface terrestre est couvert par des nuages cela conditionne la régularité d'un suivi spatiotemporel. Au cours de ce travail, la première étape est donc de choisir, parmi les données disponibles, des images les moins nuageuses. Nous avons pu avoir accès à des images avec un taux de couverture nuageuse entre 25 et 60% pour Landsat8 et entre 45 et 70% pour les images Sentinel 2.

Ces images ayant déjà subi toutes les corrections nécessaires d'un point de vue géométrique (orthoréctification, angle d'élévation du soleil...) nous avons appliqué la méthode de correction atmosphérique citée dans la partie 4.1.2.3 afin d'avoir des mesures les plus rigoureuses possibles.

4.1.1 Détection des changements

Au cours de cette première partie, notre but est d'évaluer la résolution des images de Landsat8 à être utile dans la détection de changements, dans le cas de déforestations par exemple, au sein d'une forêt. Pour ceci, nous avons constaté sur les photos aériennes de Google Earth, une zone où il y avait des changements (des immeubles y ont été construits entre deux différentes dates (entre septembre 2013 et novembre 2014)). Cette zone est représentée sur la figure 4.6 nous avons utilisé deux images Landsat 8 de Mayotte d'une résolution de 30×30 m. Une du 22 mai 2013 et une autre du 14 mai 2016. Nous avons choisi les mêmes mois pour pouvoir négliger les effets dus aux variations saisonnières. Une fois les corrections atmosphériques effectuées pour les deux images nous avons calculé les images du NDVI¹ (équation 4.1), qui traduit l'activité chlorophyllienne de la végétation, des deux scènes et par la suite la différence des NDVI entre l'image de 2016 et celle de 2013 afin de déceler un éventuel changement de cette activité. .

1. Indice de végétation normalisé

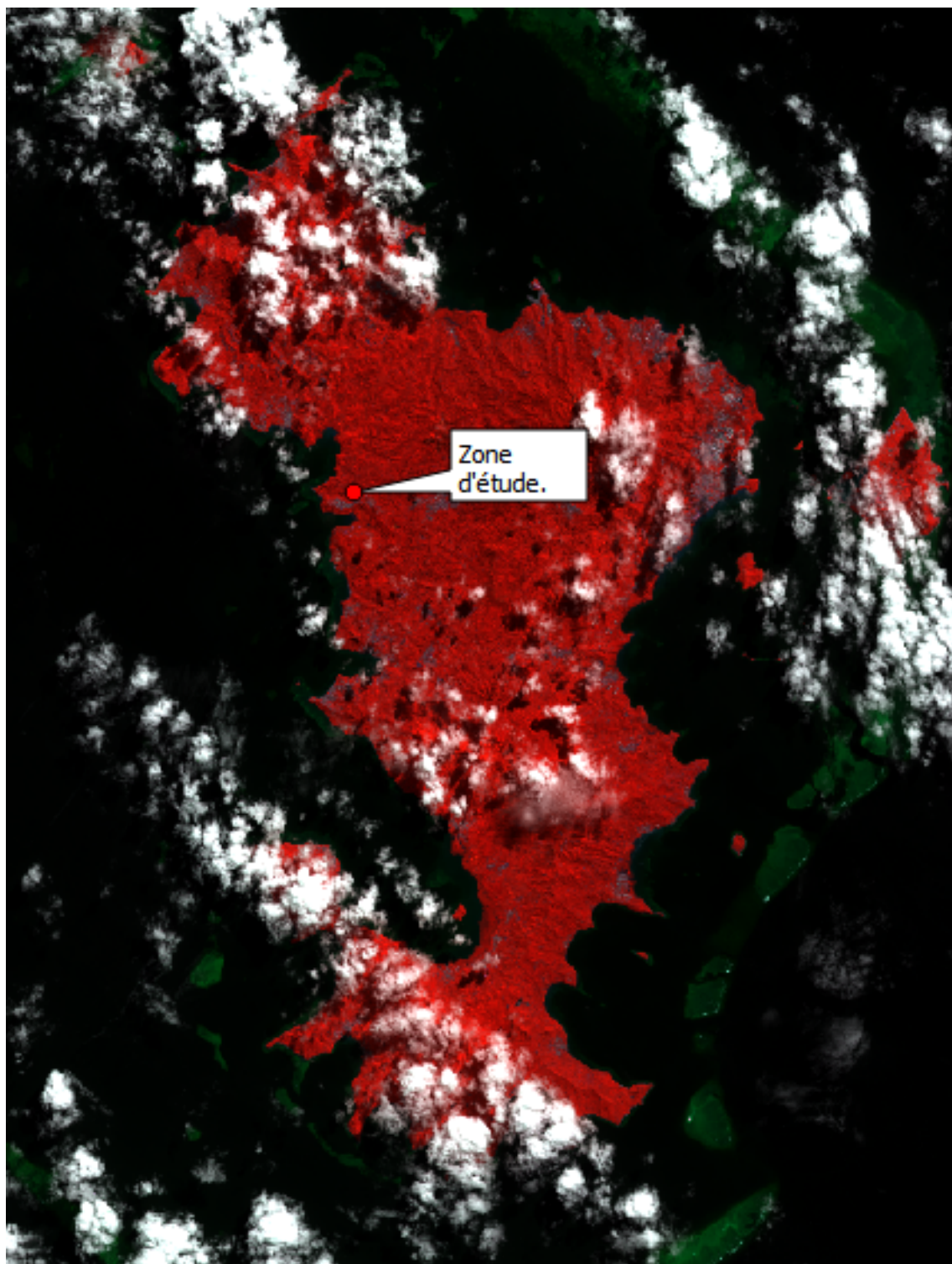


FIGURE 4.1 – Représentation de la zone d'étude sur une image de Mayotte en fausses couleurs prise par Landsat8 le 22 mai 2013(Bande IR dans le canal rouge, bande verte dans le vert et bande bleu dans le bleu).



FIGURE 4.2 – Une image de la zone prise en septembre 2013(GoogleEarth).



FIGURE 4.3 – Une image de la zone prise en novembre 2014(GoogleEarth).

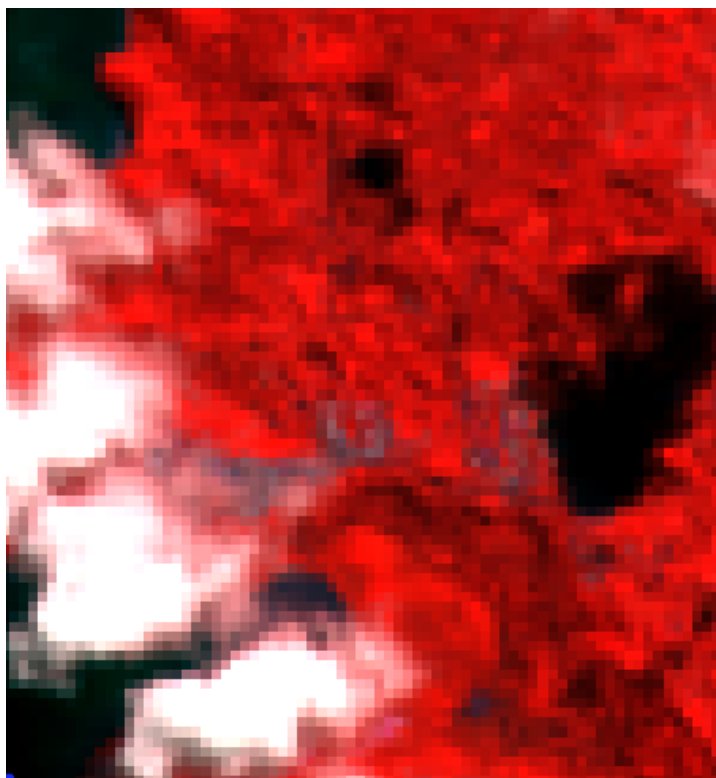


FIGURE 4.4 – Une image de la zone prise le 22 mai 2013 par Landsat8 en fausses couleurs. (Bande IR dans le canal rouge, bande verte dans le vert et bande bleu dans le bleu).

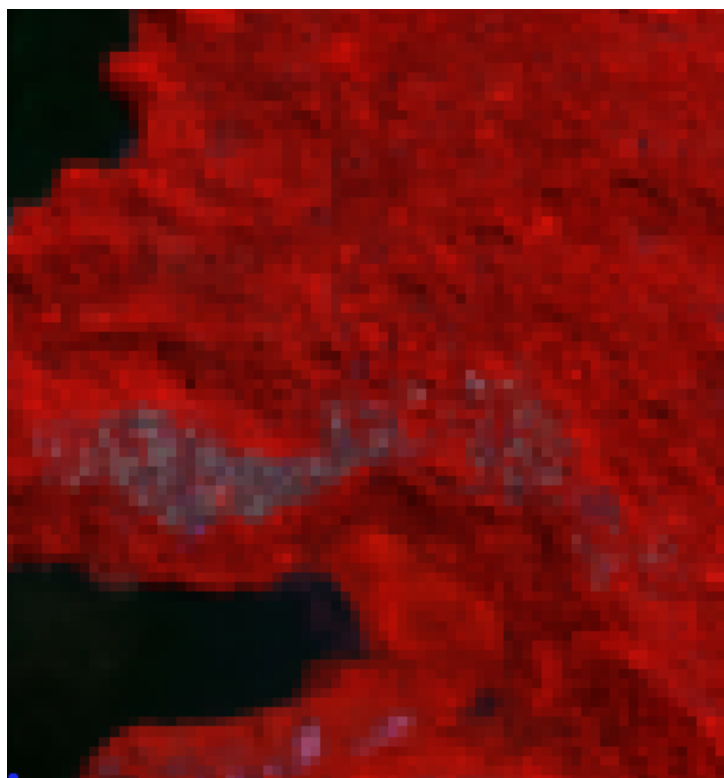


FIGURE 4.5 – Une image de la zone prise le 14 mai 2016 par Landsat8 en fausse couleurs.

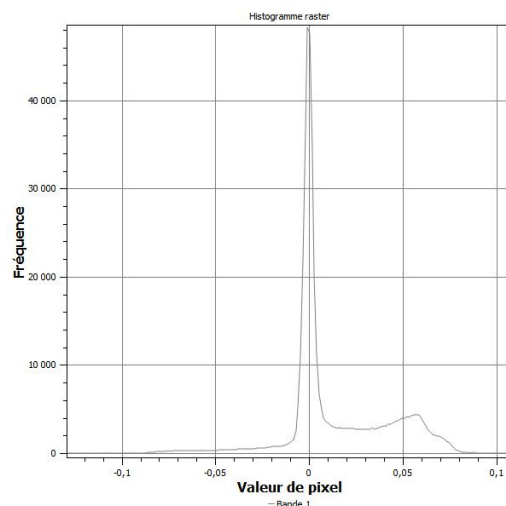
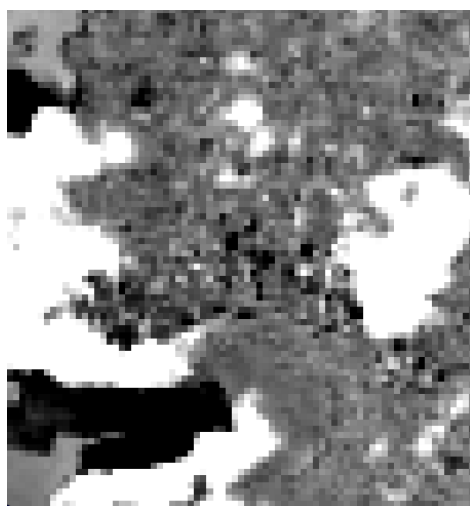


FIGURE 4.6 – A gauche, la différence du NDVI des scènes de 2016 et de 2013 pour la région d'étude. A droite, la distribution de la différence du NDVI de Mayotte entre mai 2016 et mai 2013.

L'histogramme représente la distribution de la différence du NDVI entre les deux dates pour toute Mayotte. La distribution étant centrée sur 0 avec une légère variabilité traduit une bonne estimation du NDVI. Cependant, l'image de 2013 étant plus nuageuse (20% contre 10% pour celle de 2016), la différence fait apparaître des zones plus claires sur les histogrammes. Les zones sombres correspondent à des NDVI négatifs, les zones claires à

des NDVI positifs et les zones grises à des NDVI proches de zéro. Les immeubles ayant pris place à de la végétation plus au moins dense, avec un NDVI beaucoup plus faible pour le sol nu (proche de 0) du au fait que le sol nu réfléchit autant dans le IR que dans le Rouge, la différence en cas de déforestation sera donc traduite par des pixels sombres, ce que nous observons à la places des immeubles apparus.

$$NDVI = \frac{R_{PIR} - R_R}{R_{PIR} + R_R} \quad (4.1)$$

où : R_{PIR} : Reflectance dans le proche infrarouge R_R : Reflectance dans le rouge

Dans les cas des bandes de Sentinel 2 le NDVI se calcule par :

$$NDVI_{Sentinel2} = \frac{Bande8 - Bande4}{Bande8 + Bande4} \quad (4.2)$$

Et dans le cas de Landsat 8 le NDVI est donnée par :

$$NDVI_{Landsat8} = \frac{Bande5 - Bande4}{Bande5 + Bande4} \quad (4.3)$$

4.1.2 Classification des scènes optiques

Afin de transformer les informations spectrales contenues dans les images en variables d'occupation des sols, nous avons effectué une classification d'une scène en fonction des réflectances spectrales. L'échantillon est une image de Sentinel 2 de Mayotte, d'une résolution de 10×10 m, acquise le 22 avril 2016. Nous avons choisi une zone dégagée à l'Est de l'île qui présente une large variabilité spectrale. L'identification des classe a été faite à l'aide d'une image aérienne de GoogleEarth combinée à une image d'occupation des sols de la même région faite par Géomayotte qui nous ont servi comme indicateurs.



FIGURE 4.7 – Image optique en couleurs naturelles de la région Est de Mayotte à classer.

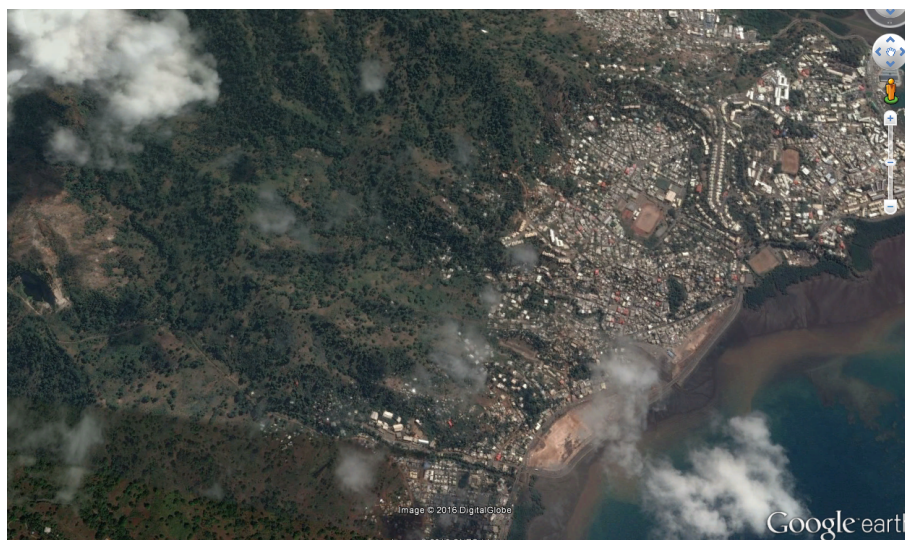


FIGURE 4.8 – Capture d'écran de l'image GoogleEarth ayant servi de carte de fond pour la classification.

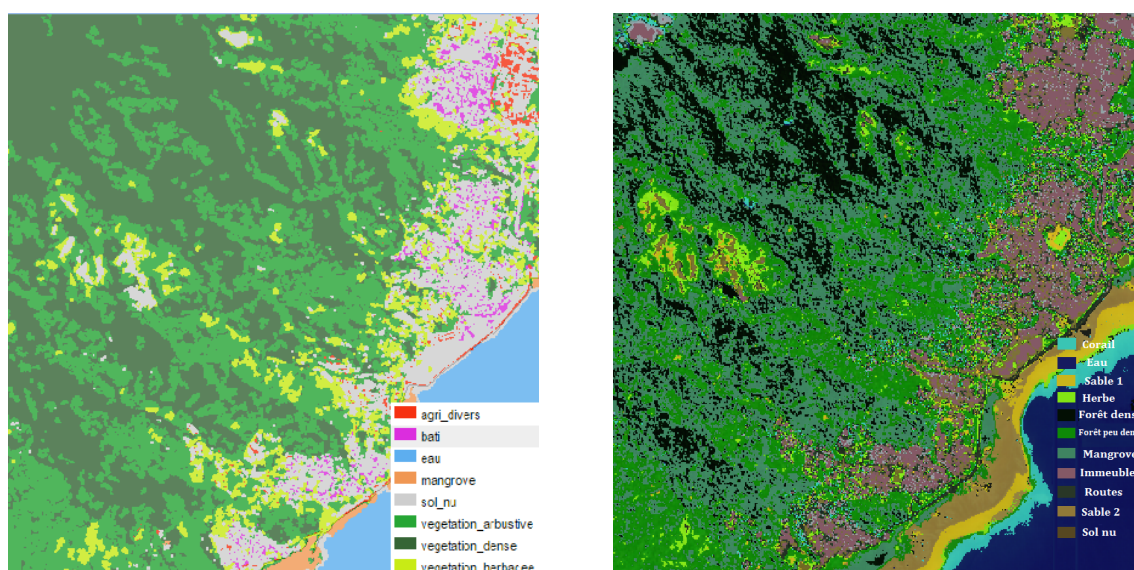


FIGURE 4.9 – A gauche, l'occupation des sols de Mayotte (Géomayotte, 2015) faite avec une image Spot6 (1.5×1.5 m). A droite, l'occupation des sols réalisée grâce à une image de Sentinel 2 (10×10 m) acquise le 22 avril 2015.

Confusion matrix													
	Eau	Immeubles	Routes	Nuages	Herbes	Forêt dense	Forêt peu dense	Mangrove	Sable 1	Sable 2	Sol nu sec	Corail	Sum
Eau	15 (78.95%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	4 (13.33%)	0 (0.00%)	19
Immeubles	0 (0.00%)	18 (94.74%)	0 (0.00%)	1 (4.55%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	19
Routes	1 (5.26%)	0 (0.00%)	3 (75.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	4
Nuages	0 (0.00%)	13 (68.42%)	0 (0.00%)	9 (40.91%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	22
Herbes	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	8 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	8
Forêt dense	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	48 (97.96%)	0 (0.00%)	1 (4.76%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	49
Forêt peu dense	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	1 (2.04%)	26 (92.86%)	1 (4.76%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	28
Mangrove	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	3 (6.12%)	17 (80.95%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	21
Sable 1	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	28 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	28
Sable 2	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	40 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	40
Sol nu sec	14 (73.68%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	16 (53.33%)	0 (0.00%)	30
Corail	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	28 (100.00%)	28
Sum	30	31	3	10	8	52	27	19	28	40	20	28	

Accuracy	
Kappa	0.8495
Overall Accuracy	0.8649

FIGURE 4.10 – La matrice de confusion ainsi que le coefficient Kappa de la classification effectuée.

Afin de pouvoir juger la pertinence de notre classification, on calcule la matrice de confusion et le coefficient Kappa de la classification supervisée. Ils sont automatiquement générés par le logiciel de classification de Monteverdi de OTB((figure4.10). La matrice de confusion compare la classification supervisée à la réalité. Kappa exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification, comparée à l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard . Si $Kappa = -1 \Rightarrow$ la concordance est nulle ; si $Kappa \pm 0 \Rightarrow$ la concordance est peu significative ; si $Kappa = +1 \Rightarrow$ la concordance est très forte. En clair, dans notre cas, le Kappa de 0,85 signifie que 85% des bonnes classification ne sont pas dus au hasard ! Le coefficient Kappa est un estimateur de qualité qui tient compte des erreurs en lignes et en colonnes. Le constat que nous pourrions faire c'est que la résolution de S2 permet de bien définir et situer les biomes qui peuplent l'île de Mayotte

4.2 Données radar

Dans le cas des images RADAR de Sentinel 1, notre objectif est de discuter de leur apport du point de vue résolution et les structures qu'elles nous permettraient d'identifier.

Nous avons récupéré des images de Mayotte et de Guyane de différentes dates et le premier constat est que pour la Guyane des données IW sont disponibles avec une résolution de $5 \times 20m$ alors que pour Mayotte nous n'avons que des données EW, d'une résolution spatiale de $20 \times 40m$ qui sont disponibles. Les images sont acquises en double polarisation HV et simple polarisation VV (double polar VV et HV). Les données RADAR sont orthoréctifiées mais sont inversées. Les images étant également très volumineuses, le premier traitement préférable est de sélectionner une zone d'intérêt sur laquelle on va travailler. Ensuite on effectue un géocodage de de la scène, un filtrage avec un filtre *Lee* pour la réduction du *speckle* et enfin une calibration pour avoir les sections efficaces de rétrodiffusion. Le logiciel SNAP dispose de tous les algorithmes nécessaires pour effectuer ces traitements et télécharger les modèles de terrains nécessaires. Afin de générer

des images en fausses couleurs pour les images radar nous avons fait une composition colorée avec les différentes polarisations. La végétation ayant tendance à polariser les ondes électromagnétiques, le fait d'avoir attribuer la double polarisation au canal vert fait que sur cette image radar la couleur verte représente la végétation. En comparant cette image RADAR avec une image de GoogleEarth, on peut voir quasiment tout les détail et même plus finement dans l'image RADAR surtout pour les surfaces liquides. L'image RADAR nous permet d'avoir un aperçu de la topographie du paysage.

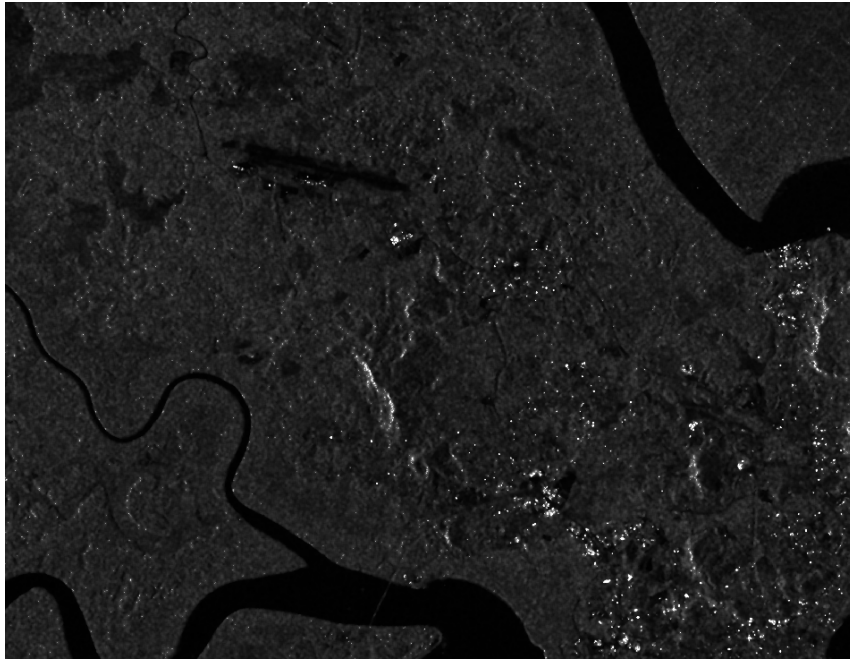


FIGURE 4.11 – Image de la section efficace RADAR σ_0 en double polarisation VH de la région de Cayenne en Guyane filtrée et calibrée.

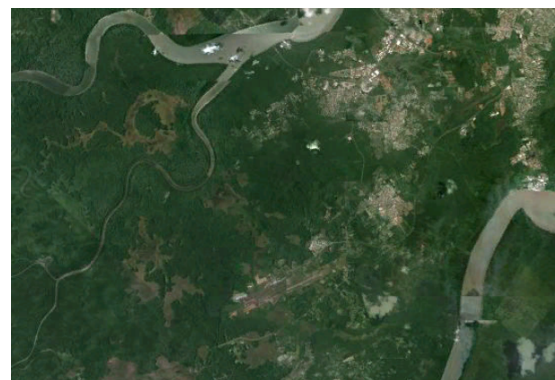


FIGURE 4.12 – A gauche, une image en fausses couleurs de la région de Cayenne (Guyane) avec σ_{VV}^0 dans le canal rouge, σ_{VH}^0 dans le canal vert et $\frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VH}^0}$ dans le canal bleu prise le 19/01/2016 (IW 5×20 m). A droite une image GoogleEarth de la même région.

La seconde étape de l'utilisation des images RADAR est de faire une carte d'occupation des sols. Cette fois nous avons opté pour Mayotte, malheureusement de moins

bonnes résolution, car les images de Guyane n'arrive pas à être correctement traitées à cause de certains bugs. Après avoir fait les corrections nécessaires (géométriques, filtrage et calibration) nous avons effectué une classification avec la méthodes des K-moyenne de la scène pour une double polarisation. Ensuite nous avons pris une carte de fond de Géomayotte utilisée précédemment pour identifier les classes. Le résultats est la figure 4.13 gauche. Globalement l'occupation des sols est bien reproduite mais pas avec assez de détails comme sur l'images optiques. Cependant, des images avec une meilleures résolution (mode IW) traduiraient beaucoup mieux cette classification.

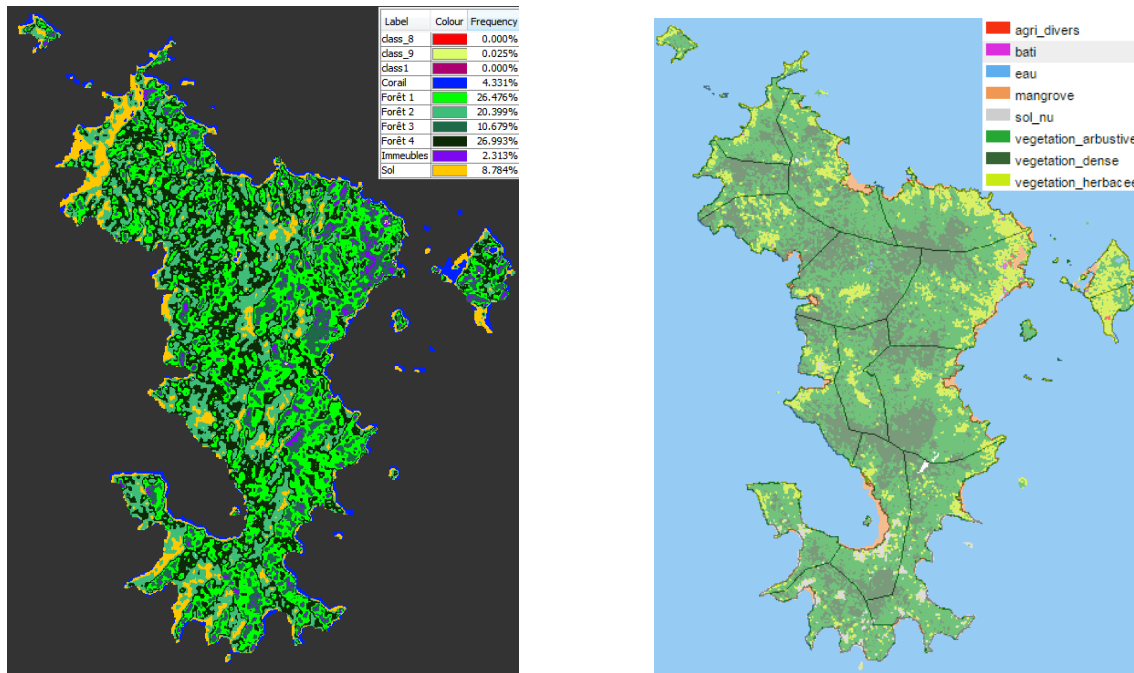


FIGURE 4.13 – A droite une classification d'une image RADAR de Mayotte (EW 20×40m) en dual pol VH avec la méthode des K-moyenne. A gauche, Une carte d'occupation des sols de Spot6 (Géomayotte, 2015).

4.3 Conclusion

En fonction de ce que l'on cherche à caractériser, il est nécessaire de choisir les meilleures variables représentatives de la cible. Dans le cas de la végétation, on peut suivre des maladies, de la déforestation, des changements dus aux changements climatiques... Dans notre cas, afin de suivre une légère déforestation nous avons opté pour le NDVI car c'est l'un des paramètres les plus utilisés et qui caractérisent le mieux la végétation à travers son activité chlorophyllienne. A travers cette exploitation des images Sentinel1, Sentinel2 et Landsat8 dont l'accès est libre, la conclusion qu'on peut tirer est bien sûr le fait que les images sont largement exploitables pour un suivi des forêts et d'occupation des sols. Malgré une résolution spatiale moyenne par rapport à d'autres satellites payant comme Spot, celle-ci n'est pas le seul critère qui conditionne le choix du satellite et son utilité. En effet, en plus des dimensions assez larges des zones qu'on cherche à caractériser et la surface occupée par chaque biome qui dépassent le plus souvent la sur-

face d'un pixel, la résolution radiométrique en est aussi un paramètre très important et, de ce côté, ces trois satellites possèdent une résolution parfaite ($<5\%$). Les corrections atmosphériques à venir et un traitement d'images approfondi avec l'utilisation de méthodes de rééchantillonnage avancées, va apporter encore plus de précision à ces données.

Annexe A

Propriétés des feuilles

Une feuille se compose à 90-95% d'eau. Le reste c'est de la matière sèche. Leurs propriétés optiques et radar sont régies par leurs propriétés biochimiques et structurales (teneur en pigments, structure cellulaire, teneur en eau, état physiologiques etc...). On peut différencier trois types d'éléments qui sont responsables des propriétés optiques des feuilles et qui correspondent aux grands domaines spectraux du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen. **la teneur en pigments ; la morphologie des feuilles et leur structure cellulaire ; la teneur en eau.** Ces trois caractéristiques varient au cours du temps. Que ce soit d'une manière saisonnière ou bien aléatoire suite aux changements climatiques, à des maladies, des poussières qui se déposeraient sur les feuilles... et entraînent par conséquent des changements dans le comportement spectral du couvert végétal. La figure A.1 représente le spectre de réflectance d'une feuille saine.

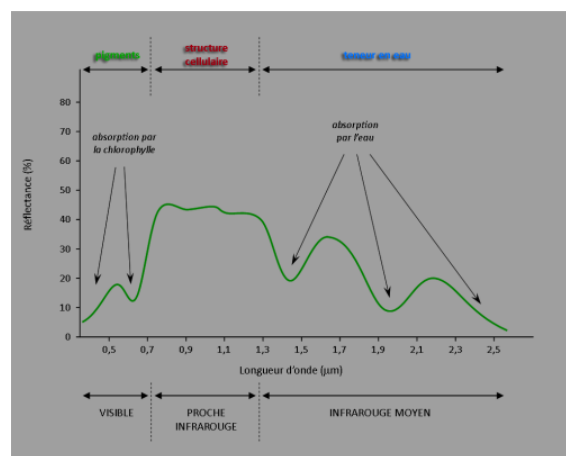


FIGURE A.1 – Spectre d'une feuille saine.[5]

A.1 Les pigments foliaires

Tous les végétaux sont principalement constitués de pigments : chlorophylles A et B (pigments verts), carotènes (pigment orangés) et anthocyanes (pigments bleus rouges), les pigments chlorophylliens étant de loin les plus abondants ils sont par conséquent dominants dans la signature spectrale des feuilles (avec les saisons, leur concentration décroît

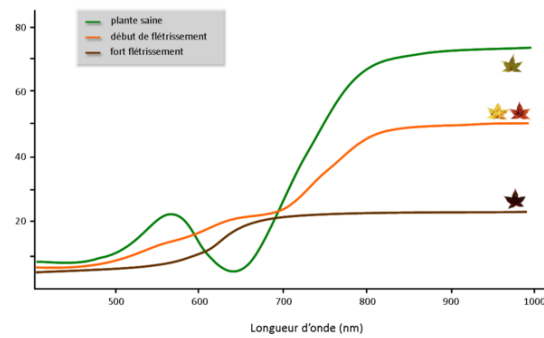


FIGURE A.2 – La réflexion en fonction de l'état de la feuille.[5]

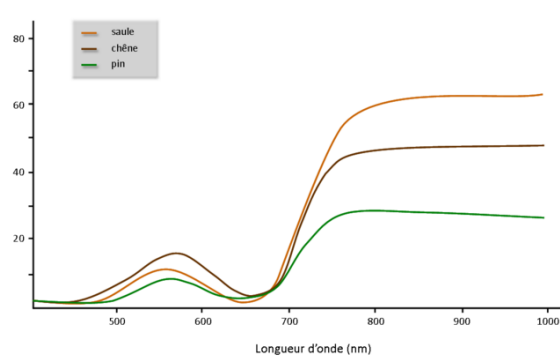


FIGURE A.3 – Variation de la réflectance en fonction de la morphologie de la feuille.[5]

au profit d'autres pigments). La chlorophylle possède deux bandes d'absorption dans le bleu (450 nm) et dans le rouge (660 nm). Les pigments foliaires présents dans les végétaux et leurs concentrations sont donc responsables de la forte absorption du rayonnement visible, avec un minimum d'absorption dans le vert (550 nm), d'où les plantes apparaissent vertes. La figure A.2 montre la variation de la réflectance de la feuille en fonction de la concentration des pigments qui la composent.

A.2 La structure cellulaire des feuilles

La structure anatomique des feuilles joue également un rôle pondérant dans la signature spectrale de la végétation. La majeure partie du rayonnement visible est absorbée par les pigments chlorophylliens mais ceux-ci sont en revanche totalement transparents au rayonnement de plus grande longueur d'onde. Le proche infrarouge traverse la feuille jusqu'à une couche cellulaire formée de cellules irrégulières et d'espaces intercellulaires (parenchyme lacuneux) dans lesquels sont stockés les gaz qu'échange la feuille avec l'atmosphère. C'est au niveau de cette couche, lieu d'échange entre l'oxygène et le dioxyde de carbone dans les processus de la photosynthèse et de la respiration, que le rayonnement proche infrarouge est fortement réfléchi. La réflexion de ces rayonnements IR dépend de l'état du développement du parenchyme lacuneux. La figure A.3 représente différentes réflectances pour différentes feuilles. La réflexion est proportionnelle à la taille de la feuille.

Annexe B

Les figures

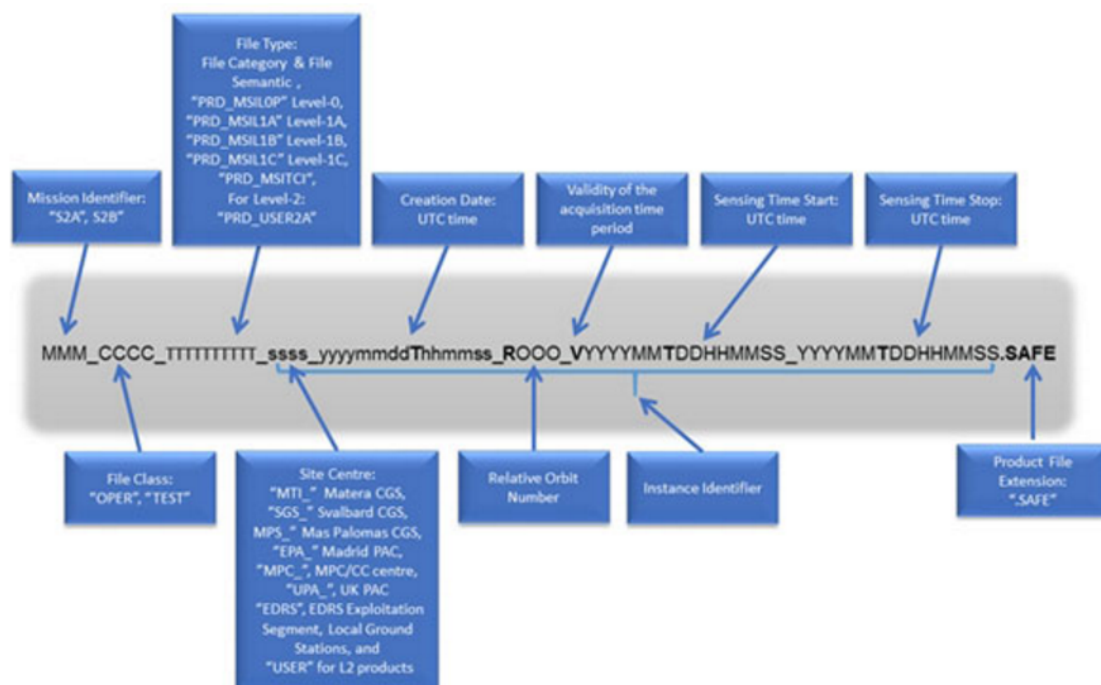


FIGURE B.1 – Convention d'appellation des fichiers de S2 (ESA).

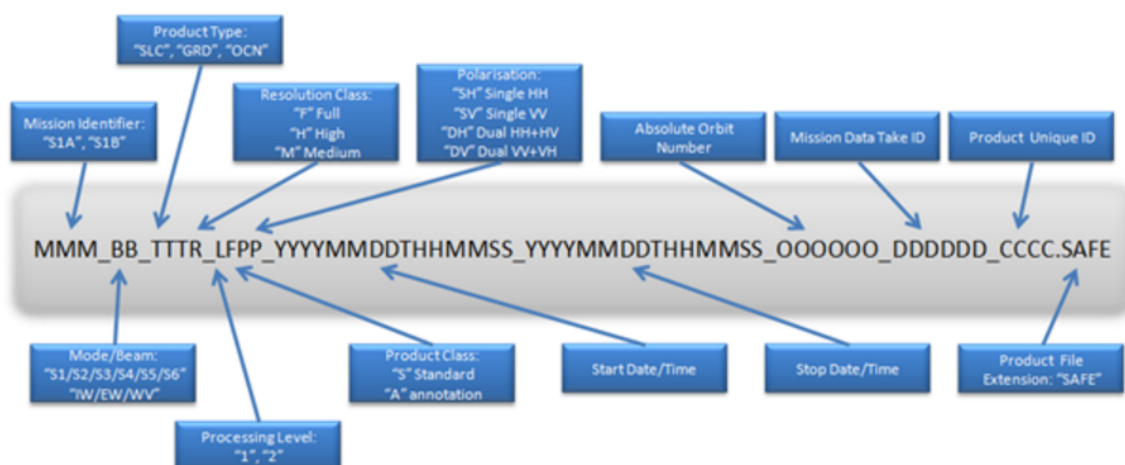


FIGURE B.2 – Convention de nomination des données Sentinel 1 (ESA).

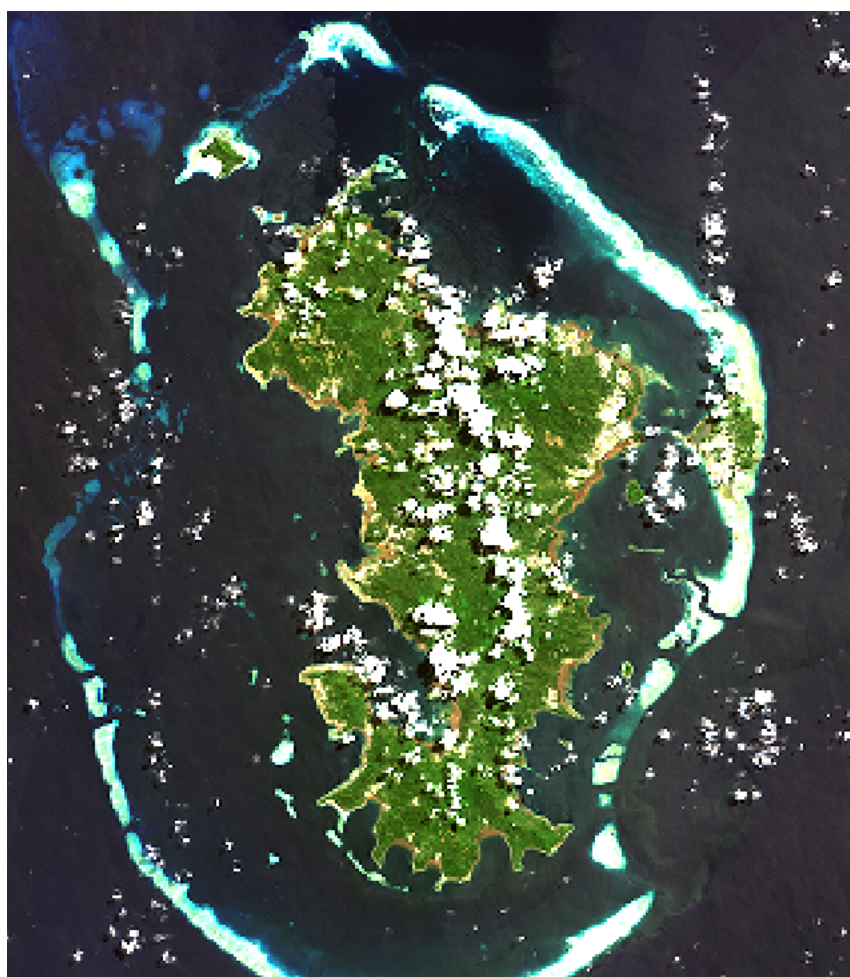


FIGURE B.3 – Image Sentinel 2 de Mayotte en couleurs naturelles.

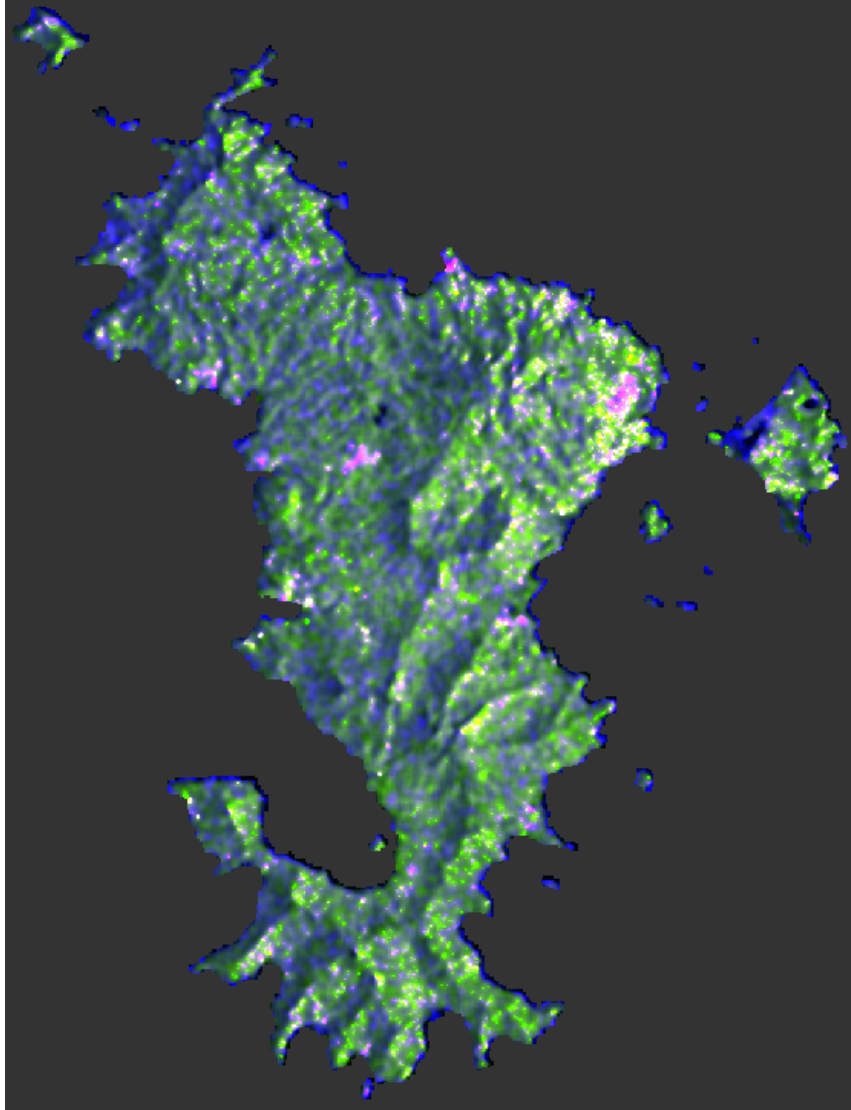


FIGURE B.4 – Image en fausses couleurs de Mayotte avec σ_{VV}^0 dans le canal rouge, σ_{VH}^0 dans le canal vert et $\frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VH}^0}$ dans le canal bleu..

Annexe C

S2 VS Landsat 8

Le tableau C.1 résume les caractéristiques des capteurs des satellites Sentinel2 et Landsat8. La figure C.1 est une représentation des empreintes de différents satellites.

TABLE C.1 – Différents paramètres des instruments MSI de Sentinel2 et de OLI de Landsat8

Paramètres	MSI	OLI
Fauchée	290 Km	185 Km
Cycle de répétition	10 jours (5 avec S1 et S2)	16 jours (8 avec L7)
Angle d'ouverture	20,6 °	15 °
Passage par l'équateur	10 :30 AM	10 :13 AM
Couverture spectrale	440-2300 nm	440-2300
Bandes spectrales	4 VNIR avec 10 m de résolution 6 bandes à 20 m 3 Bandes atmosphériques à 60 m	8 bandes à 30 m de résolution 1 bandes à 15 m
Codage pixel	16 bits	16 bits
Radiance de saturation	100% de la lumière solaire diffusée	100% de la lumière solaire diffusée

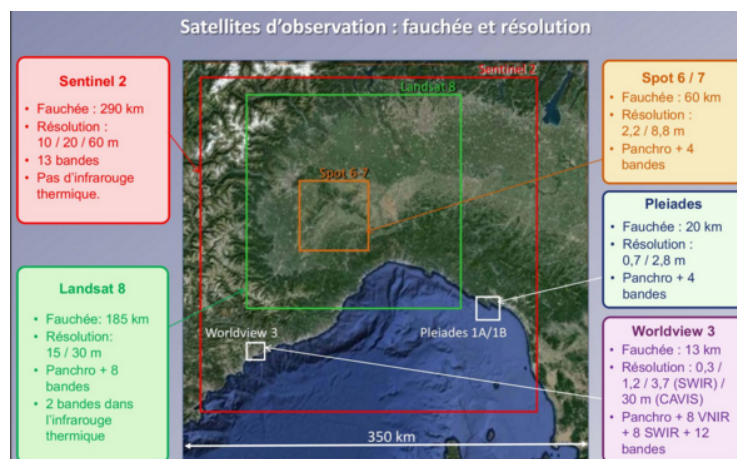


FIGURE C.1 – Représentation des empreintes au sol pour différents satellites : Sentinel 2, Spot 6 et 7, Landsat8, Pléiades et Worldview 3 [6].

Bibliographie

- [1] *LANDSAT Products Description Document 2015.*
- [2] *Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF.*
- [3] *Sentinel-2 Products Specification Document.*
- [4] *Sentinel1 Product Specification.*
- [5] Gadat Sébastien Anselme Brice. e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-7-signatures-spectrales.html. Cours en ligne.
- [6] Gédéon Blog. www.un-autreregard-sur-la-terre.org/document/bloguarst/satellites/sentinel-2/satellites%20d'observation%20-%20fauch%c3%a9e%20et%20r%c3%a9solution.jpg. ESA.
- [7] Monique DECHAMBRE. Cours master 2 mpt microondes. MO.
- [8] U.S. Geological Survey Department of the Interior. Landsat 8 surface reflectance (provisional) product guide : Earthexplorer version. Technical report, NASA, 2015.
- [9] ESA. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/algorithm>. .
- [10] Athos Agapiou et Al. The importance of accounting for atmospheric effects in the application of ndvi and interpretation of satellite imagery supporting archaeological research : The case studies of palaepaphos and nea paphos sites in cyprus. *Remote Sensing*, 2011.
- [11] Lillesand T. M. et Kiefer R. W. Remote sensing and image interpretation,. Wiley and Sons, 200.
- [12] Stéphane GUITET. *Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française Distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques*. PhD thesis, Montpellier, 2015.
- [13] Stéphane JACQUEMOUD. Cours master 2 mpt interaction rayonnement végétation. IRV.
- [14] B. Mayer¹ and A. Kylling. Technical note : The libradtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005.

- [15] R. Richter and D. Schläpfer. *Operational atmospheric correction for imaging spectrometers accounting the smile effect*.
- [16] Jean Paul RUDANT. <http://stream.ensg.eu:8800/teledetection/portail/3/1/res/schema11.png>. Cours en ligne.
- [17] USGS. http://landsat.usgs.gov/landsat8_using_product.php. .

ENQUETE CARTHAFORUM

Madame, Monsieur,

Nous vous consultons dans le cadre de l'étude de faisabilité concernant la « CARTographie régulière des HABitats FOREstiers Ultra-Marins » (CARTHAFORUM) lancée en mars 2016 par le Ministère de l'Environnement et confiée au GIP ECOFOR.

Cette commande s'inscrit dans une série de consultations dont : (i) la revue des typologies et cartographies des milieux terrestres d'outre-mer, récemment réalisée par le MNHN (Rapport SPN-MHNN du 01/12/2016), (ii) l'élaboration par le GIP ECOFOR de la première compilation des indicateurs de gestion durable des forêts d'outre-mer (Rapport en cours de finalisation), (iii) l'étude commandée par le Ministère de l'Agriculture et de la Forêt à l'IGN visant la production régulière et planifiée de données forestières sur les territoires ultramarins (Rapport IGN du 09/01/2017).

Si vous êtes concernés par l'utilisation ou la production de données concernant les habitats naturels forestiers, leur gestion ou l'observation de l'évolution de ces habitats, votre participation à cette enquête nous permettra de produire différents scénarii qui seront examinés pour proposition au Ministère de l'Environnement par le comité de pilotage du projet.

Le questionnaire qui suit est ouvert jusqu'au 31 janvier 2017. Le temps estimé pour répondre est approximativement de 10 minutes. Les résultats de ce questionnaire viendront compléter et actualiser l'état des lieux effectué à partir des précédentes enquêtes et de la première phase de l'étude comprenant recherches bibliographiques et prises de contact informelles. Il permettra de confronter les besoins des territoires aux orientations envisagées par les membres du comité de pilotage du projet.

***Obligatoire**

1.

Adresse e-mail *



IDENTIFICATION DES ACTEURS ET DE LEUR BESOINS

L'objectif de cette section est d'actualiser et de préciser l'état des lieux concernant les acteurs locaux et leurs besoins en termes de cartographie des habitats forestiers

2.

1- Par quel(s) territoire(s) êtes-vous concerné (choix multiples possible) ? **Plusieurs réponses possibles.*

- ☐ Guadeloupe
- ☐ Guyane
- ☐ La Réunion
- ☐ Martinique
- ☐ Mayotte
- ☐ Saint-Barthélemy
- ☐ Saint-Martin
- ☐ Saint-Pierre-et-Miquelon
- ☐ TAAF îles éparses

3.

2- Quelle est la nature de vos activités en lien avec les milieux forestiers (choix multiples et champ libre possible)? **Plusieurs réponses possibles.*

- ☐ Acquisition d'informations de terrain (inventaires, observations...)
- ☐ Acquisition d'informations numériques (LiDAR, imagerie et télédétection...)
- ☐ Traitement de l'information et production de données cartographiques
- ☐ Gestion et conservation des habitats forestiers naturels
- ☐ Aménagement de territoire comprenant des massifs forestiers
- ☐ Rapportage et suivi d'indicateurs concernant les habitats forestiers
- ☐ Diffusion et partage d'informations (gestion de géoportails, sites web...)
- ☐ Recherche et développement technique concernant les habitats forestiers
- ☐ Pilotage de politiques publiques forestières
- ☐ Autres (à préciser dans le champ libre ci-après)

4.

Champ libre pour précision concernant les activités effectuées

5.

3- Quel(s) est (sont) les principaux objectif(s) de vos actions concernant les milieux forestiers (choix multiples possible) **Plusieurs réponses possibles.*

- ☐ Préservation de la biodiversité
- ☐ Exploitation des ressources forestières
- ☐ Surveillance générale de l'environnement
- ☐ Lutte contre les espèces envahissantes
- ☐ Evaluation des émissions de gaz à effet de serre et suivi des impacts des changements climatiques
- ☐ Suivi de l'état sanitaire des milieux forestiers
- ☐ Acquisition de connaissances, recherche scientifique
- ☐ Maintien des services écosystémiques
- ☐ Autres (à précisez dans le champ libre ci-après)

6.

Champ libre pour précision concernant les objectifs principaux

7.

4- Quelle est le type d'informations cartographiques dont vous avez besoin pour la réalisation de vos objectifs en milieux forestiers (choix multiples possible) ? **Plusieurs réponses possibles.*

- ☐ Cartes des formations végétales (basées sur la physionomie - ex : grands postes proposés dans les cartes d'occupation des sols)
- ☐ Cartes des habitats potentiels (basées sur le contexte abiotique et association d'espèces attendues)
- ☐ Cartes de végétation (basées sur les relevés phyto-sociologiques de terrain)
- ☐ Cartes de structure forestière (ex : carte de hauteur de canopée, de couvert, de biomasse...)
- ☐ Autres (à préciser dans le champ libre ci-après)

8.

Champ libre pour précision concernant les besoins cartographiques

9.

5- Quels sont les sources d'informations que vous utilisez actuellement pour la réalisation de vos missions (choix multiples possible) ? *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Photographies aériennes
- ☐ Imageries satellitaires optiques (préciser lesquelles dans la rubrique libre svp)
- ☐ Imageries satellitaires radar (préciser lesquelles dans la rubrique libre svp)
- ☐ Relevés LiDAR aéroporté (par avion ou par drone)
- ☐ Relevés LIDAR terrestres
- ☐ Mesures quantitatives de terrain (inventaires, placettes, etc..)
- ☐ Observations qualitatives de terrain (liste d'espèces, classement de visu...)
- ☐ Cartes (topographiques, géologiques...)
- ☐ Autres (à préciser dans le champ libre ci-après)

10.

Champ libre pour précision concernant les sources d'information utilisées

QUESTIONS CONCERNANT LE CONTENU DU SYSTEME DE CARTOGRAPHIE REGULIERE

L'objectif de cette section est de recueillir les souhaits des acteurs locaux concernant le contenu de la production cartographique envisagée

11.

6- Quelle est selon vous la résolution spatiale nécessaire et suffisante pour que les informations cartographiques répondent à vos besoins ? *

Une seule réponse possible.

- ☐ < 0.5 ha
- ☐ 0.5 ha
- ☐ 1 ha
- ☐ 2 ha
- ☐ 5 ha
- ☐ > 5 ha

12.

7- Quelle est selon vous la fréquence de mise à jour optimale pour que les informations cartographiques répondent à vos besoins ? *

Une seule réponse possible.

- ☐ Mise à jour continue (système d'alerte)
- ☐ Mise à jour annuelle (système de suivi)
- ☐ Mise à jour quinquennale ou quadriennale (système de rapportage)
- ☐ Autre (à préciser dans le champ libre ci-après)

13.

Champ libre pour précision concernant la fréquence de mise à jour

14.

8- Les forêts sont définies au niveau international par des critères de hauteur potentielle de canopée (>5m), de largeur en cime (>20m), de vocation (ni agricole ni urbaine) et de couvert d'arbres (>10%). Dans votre contexte ce seuil de couvert vous semble-t-il suffisant ou doit-il être complété par d'autres seuils dans le but de discriminer certaines formations au sein de la classe forêt? (choix multiples possible – explicitiez l'usage de ce seuil dans la rubrique libre).

*

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Seuil de 10% de couvert adapté et suffisant
- ☐ Seuil de 10% à compléter par un seuil à 25% (forêts claires vs forêts denses)
- ☐ Seuil de 10% à compléter par un seuil à 40% (forêts ouvertes vs forêts fermées)
- ☐ Sans opinion
- ☐ Autres seuils

15.

Champ libre pour précision concernant le seuil de couvert

16.

9- La cartographie régulière peut-elle se limiter aux seules forêts ou doit-elle intégrer d'autres formations végétales pour répondre à vos besoins (précisez lesquelles svp) ?

Une seule réponse possible.

- ☐ Oui elle peut se limiter aux forêts telles que définies au niveau international par la FAO
- ☐ Non elle doit aussi inclure les autres formations arborées (autres terres boisées et autres terres dotées de couvert d'arbres à vocation non forestière)
- ☐ Non elle doit aussi inclure toutes les formations végétales même non arborées

17.

Champ libre pour précision concernant le périmètre cartographique

18.

10- Quelles sont les informations qu'il vous semble nécessaire d'associer à cette cartographie régulière pour qu'elle puisse répondre de façon suffisante à vos besoins? (choix multiples possibles) *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Des relevés terrains complémentaires à ceux existant pour la caractérisation des habitats (préciser lesquels svp)
- ☐ Des estimations spatialement explicites de la biomasse forestière
- ☐ Des prédictions spatialement explicites des stocks de carbone des sols forestiers
- ☐ L'extension des principales espèces envahissantes au sein des habitats forestiers (préciser lesquelles svp)
- ☐ Autres types d'information (à précisez svp)

19.

Champ libre pour précision concernant les informations annexes nécessaires

QUESTIONS CONCERNANT LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME DE CARTOGRAPHIE REGULIERE

L'objectif de cette session est de recueillir la vision des acteurs locaux sur le cadre institutionnel dans lequel pourrait s'inscrire cette production cartographique

20.

11- Pensez-vous que votre institution possède localement les ressources humaines et techniques suffisantes pour réaliser les cartographies visées ? *

Une seule réponse possible.

- ☐ Oui notre institution possède les compétences et les moyens techniques suffisants pour réaliser ce suivi
- ☐ Non mais notre institution pourrait acquérir les compétences et/ou les moyens techniques avec une aide extérieure
- ☐ Non mais d'autres institutions du territoire nous semblent posséder les compétences et les moyens techniques suffisants
- ☐ Non il semble indispensable de réaliser ces cartographies depuis la métropole ou depuis un autre territoire

21.

Champ libre pour préciser votre position

22.

12- Quel(s) mode(s) de fonctionnement doit(vent) être privilégié(s) pour la réalisation d'une cartographie régulière des forêts d'outre-mer (choix multiples possible) ? **Plusieurs réponses possibles.*

- ☐ Déléguer des moyens aux acteurs locaux pour l'acquisition de données de terrain nécessaire à la calibration/validation des cartographies
- ☐ Déléguer des moyens aux acteurs locaux pour la réalisation des productions cartographiques suivant un cahier des charges précis
- ☐ Faciliter l'accès aux images (satellitaires, photographiques...) et aux moyens techniques permettant la réalisation directe des cartographies par les acteurs locaux
- ☐ Animer un échange méthodologique et technique entre les différents territoire sur le thème de la cartographie des habitats forestiers
- ☐ Organiser des formations permettant l'acquisition et le maintien de compétences locales pour la cartographie des habitats forestiers
- ☐ Développer des méthodes de cartographies standardisées applicables sur l'ensemble des territoires d'outre-mer
- ☐ Déléguer des moyens aux acteurs nationaux pour une production cartographique centralisée suivie d'une validation et qualification par les acteurs locaux
- ☐ Maintenir une veille sur les évolutions techniques et informer les acteurs des progrès en termes de méthodes cartographiques

23.

13- D'après votre expérience, quelle(s) source(s) d'information(s) doit(vent) être privilégiée(s) pour la réalisation de ces cartes ? (choix multiples possibles - précisez les raisons dans la rubrique libre svp) *

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Photographies aériennes
- ☐ Images satellitaires optiques (précisez lesquelles dans la rubrique libre)
- ☐ Images satellitaires radar (précisez lesquelles dans la rubrique libre)
- ☐ Relevés LiDAR aériens (par drones ou avions)
- ☐ Relevés LiDAR terrestre
- ☐ Mesures quantitatives de terrain (inventaires, placettes...)
- ☐ Observations qualitatives de terrain (liste d'espèces, classement de visu...)
- ☐ Ne sais pas
- ☐ Autres sources d'information (à précisez dans la rubrique libre)

24.

Champ libre pour précision concernant les sources à privilégier

Merci pour votre participation !

Si vous avez rencontré des difficultés pour remplir ce formulaire ou si vous souhaitez vous exprimer plus en détail sur ces questions n'hésitez pas à me contacter en envoyant un mail à l'adresse suivante : stephane.quitet@cirad.fr .
N'hésitez pas à faire passer le lien de cette enquête à toute personne ressource qui aurait été oubliée dans le liste de diffusion jointe !

☐ M'envoyer une copie de mes réponses

Fourni par





SYNTHESE DES RESULTATS DE L'ENQUETE CARTHAFORUM

Nous vous remercions pour votre participation à l'enquête menée du 15 janvier au 1^{er} février dernier par le GIP-ECOFOR et le Ministère en charge de l'Environnement dans la cadre de l'étude de faisabilité concernant la « CARTographie régulière des HABitats FOREstiers Ultra-Marins » (CARTHAFORUM).

Veillez trouver ci-joint une synthèse des informations recueillies au cours de cette consultation, ainsi que les principales conclusions qui en ont été tirées. Leur confrontation avec les orientations envisagées par les membres du comité de pilotage (COFIL) du projet nous amène à envisager plusieurs scénarii de production qui seront proposés aux membres du COFIL dans les semaines qui viennent. Certains d'entre vous seront éventuellement à nouveau sollicités individuellement lors de la phase de finalisation de ces propositions.

Nous remercions les personnes ayant facilité l'organisation de la consultation par la mise à jour des listes de diffusion et vous invitons à nous faire de part de vos éventuelles remarques au cours de cette dernière phase de travail.

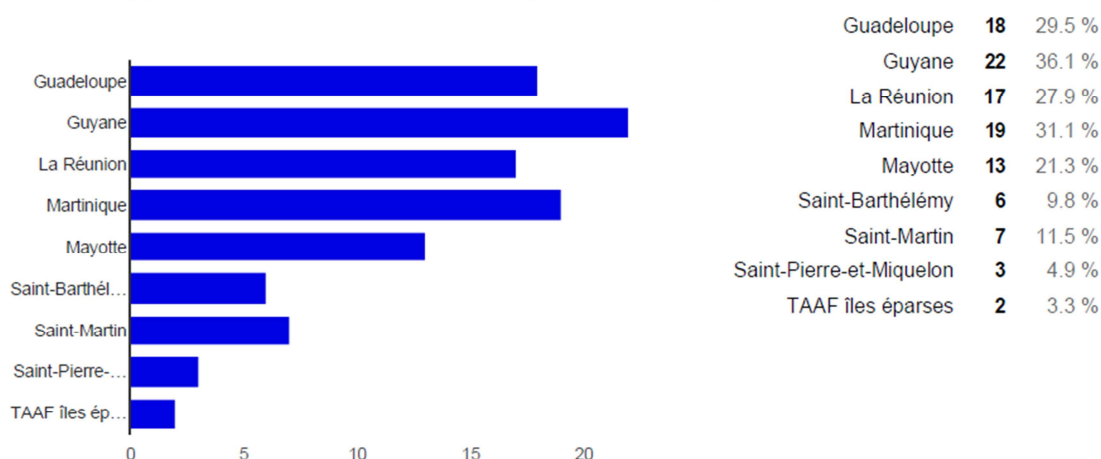
REPRESENTATIVITE DES INFORMATIONS RECUEILLIES

1- Représentativité de l'enquête en termes territorial et catégoriel

Au total, ce sont 61 réponses sur 138 contacts qui ont été enregistrées au 1^{er} février, soit un taux de participation de 44% pour un objectif initial de l'ordre de 33%. Deux réponses arrivées après le début du dépouillement n'ont pas été comptabilisées ni prises en compte dans l'analyse. Parmi ces 61 réponses, 5 proviennent de personnes qui n'avaient pas été initialement listées dans les contacts mais qui ont été sollicitées par l'un d'entre eux pour les remplacer ou compléter leur vision (taux de réponse de 42% si on ajoute ces 5 personnes à la liste de contact). Le taux de réponse par territoire est variable : 25% pour Mayotte, 33% pour la Martinique, 44% pour la Réunion, 47% pour la Guadeloupe, 61% en Guyane et 75% pour les petits territoires insulaires pris ensemble. Cependant 16 contacts ayant répondu, initialement ciblés pour un territoire particuliers, se sont déclarés concernés par plusieurs territoires à la fois (bassins Indien, Caraibéen ou Atlantique, voire tous territoires). Au final les 61 réponses obtenues représentent donc de façon à peu près équilibrée tous les territoires concernés (une vingtaine de réponses reçues pour chacun des grandes ROM-COM) avec cependant une sous-représentation du territoire de Mayotte.

L'analyse des réponses par catégories d'organismes montre aussi un taux de réponse relativement stable avec 35% de réponse des contacts de l'administration, 37% de réponse des ONG, 40% dans les collectivités, 45% dans les établissements publics (hors recherche) et 52% de réponse dans la catégorie expertise-recherche. Globalement, on peut donc considérer que les réponses obtenues permettent d'avoir des avis représentatifs à la fois des différents territoires et des différents types d'acteurs concernés.

1- Par quel(s) territoire(s) êtes-vous concerné (choix multiples possible) ?



2- Ciblage des acteurs en termes d'activités

L'objectif de l'enquête était de toucher à la fois des acteurs dans le domaine de la production de données (acquisition – traitement - recherche), de l'utilisation directe de données à des fins appliquées (gestion – aménagement) et de l'utilisation indirecte des données à des fins informationnelles (pilotage – rapportage - diffusion). Les réponses font apparaître une très forte implication des acteurs dans le domaine de la production de données (72% des acteurs impliqués dans les acquisitions terrain et 65% dans la production de données cartographiques), une forte implication dans le domaine de l'utilisation directe des données (64% impliqués dans la gestion et 46% dans l'aménagement du territoire), et une moindre implication dans l'utilisation indirecte (38% dans le rapportage et 49% dans la diffusion de l'information). Les acteurs ayant répondu sont en général beaucoup moins impliqués dans les activités recherche (26%) et dans les activités de pilotage des politiques publiques (26%). Les autres activités évoquées concernent entre autres la sensibilisation, la coopération régionale, la recherche de financement, le développement de filières. Les avis émis lors de cette enquête permettent donc de compléter efficacement les informations issues de la phase de synthèse bibliographique (1ère étape de l'étude, fortement orientée recherche), ainsi que les avis du Comité de Pilotage (où l'activité de pilotage des politiques publiques est prépondérante avec les représentants des trois ministères) en donnant voix au chapitre aux producteurs et utilisateurs de terrain.

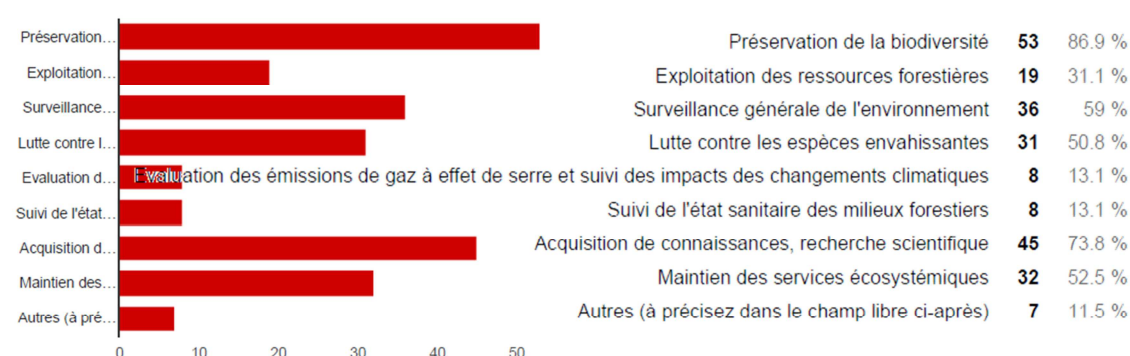
2- Quelle est la nature de vos activités en lien avec les milieux forestiers (choix multiples et champ libre possible)?



3- Ciblage des acteurs en termes d'enjeux

Les avis recueillis font valoir plusieurs enjeux prioritaires s'exprimant au travers des principaux objectifs mis en avant par les acteurs locaux : en premier lieu, un enjeu général attendu de préservation de la biodiversité (87%) ; en deuxième lieu un enjeu d'acquisition de connaissances concernant les milieux forestiers (74%) qui fait apparaître le besoin toujours très actuel de caractérisation et de compréhension des écosystèmes forestiers ; en troisième lieu un enjeu visant à garantir l'intégrité de l'écosystème (59% surveillance générale, 51% lutte contre espèces envahissantes, 53% maintien des services écosystémiques), les enjeux d'exploitation des ressources n'apparaissent qu'en quatrième plan à 31% ; les enjeux de suivi de l'état sanitaire et des émissions de GES ne viennent qu'en dernier lieu (13%). Les autres activités évoquées concernent en autres le suivi des populations d'espèces menacées, la sensibilisation à l'environnement, la protection des paysages, la police de l'eau...

3- Quel(s) est (sont) les principaux objectif(s) de vos actions concernant les milieux forestiers (choix multiples possible)



Conclusions :

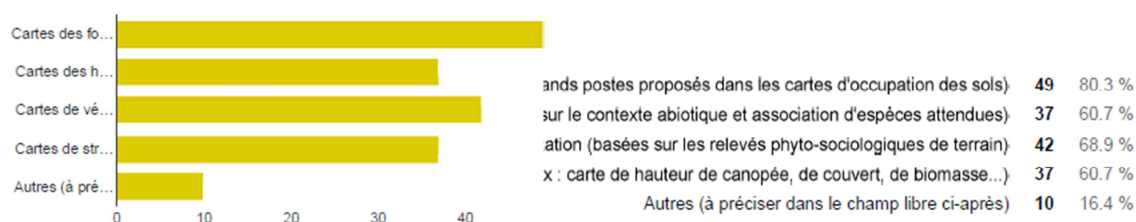
La représentativité de l'enquête en termes de territoires, de catégories professionnelles et de catégories d'acteurs est assez bien assurée grâce à un préciblage des contacts et à un taux de participation satisfaisant. Ces avis collectés rendent compte essentiellement du point de vue des producteurs de données et des utilisateurs directs des données (qui souvent se confondent) et dans une moindre mesure des utilisateurs indirects des données. La complémentarité avec les avis du COPIL est donc assurée. Les acteurs ayant répondu affichent des objectifs en cohérence avec les finalités affichés du projet concernant la préservation de la biodiversité, l'acquisition de connaissances encore lacunaires et le maintien de l'intégrité des écosystèmes forestiers. Contrairement aux positions prises par le COPIL qui mettent la problématique «évaluation des émissions de GES» dans les priorités de l'étude, cette question n'apparaît pas comme prioritaire pour la majorité des acteurs de terrain. A l'inverse, la lutte contre les espèces envahissantes est mise en avant comme un des grands enjeux par les acteurs de terrain alors que cette problématique a été mise de côté par le COPIL dans un premier temps, considérant qu'elle faisait l'objet d'un programme spécifique (mise en place d'une stratégie nationale EEE en cours).

BESOINS ET PRATIQUES CARTOGRAPHIQUES ACTUELLES

4- Besoins en termes cartographiques

Les réponses recueillies font apparaître un fort besoin cartographique quel que soit le niveau de précision typologique (grandes catégories de formations végétales, habitats forestiers, végétation, structures) avec un niveau d'attente >60% pour les quatre catégories. Cela retranscrit un manque certain d'information forestière

même à des niveaux relativement basiques (types formations végétales et catégories d'occupation des sols). Les autres besoins évoqués en termes cartographiques concernent la cartographie des services écosystémiques, de l'indigénat, des dégradations, des types de propriétés... Une remarque fait état du besoin de flux de données plutôt que de cartes établies.



5- Pratiques cartographiques

Les sources de données les plus employées actuellement par les acteurs sont les produits cartographiques génériques de type cartes topographiques (IGN), géologiques (BRGM), etc (80%), les photographies aériennes (74%) et les données terrain de nature qualitative (72%) et quantitative (67%). Les données issues de télédétection sont employées par moins de la moitié des acteurs avec en premier lieu les données satellites optiques (44%), les relevés LiDAR aéroportés (36%). Ce sont les produits SPOT et Pléiades qui sont les plus souvent cités dans la rubrique images optiques. Les images radar sont très peu employées (16%). Le LiDAR terrestre est encore très peu employé outre-mer (3% seulement). Les 10 réponses « autres » font référence à *toute source d'information disponible* (expertise, données participatives, rapport de surveillance ...) et montre encore une fois la nécessité d'exploiter la moindre information du fait de l'insuffisance des données et produits disponibles.

5- Quels sont les sources d'informations que vous utilisez actuellement pour la réalisation de vos missions (choix multiples possible) ?



Conclusions :

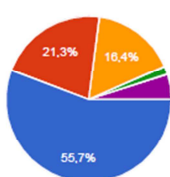
Les besoins cartographiques concernent en premier lieu les grandes formations végétales (80%), mais les cartes de végétation et d'habitats sont aussi nécessaires à la majorité des acteurs (60%). Actuellement, ce sont essentiellement les photographies aériennes, les fonds de carte (topographique, géologique..) et les données terrain qui sont utilisées. La ressource télédétection n'est utilisée que par une minorité des acteurs. La proposition de produits cartographiques basés sur l'imagerie satellitaire telle qu'envisagée par le COPIL peut donc fournir une approche complémentaire aux usages habituels outre-mer.

CONTENU CARTOGRAPHIQUE ATTENDU PAR LES ACTEURS DE TERRAIN

6- Résolutions spatiales et temporelles attendues

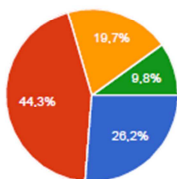
La résolution spatiale apparaît comme plus importante que la résolution temporelle pour les acteurs locaux ayant répondu à l'enquête. Une production annuelle paraît suffisante pour 44% des acteurs mais une majorité d'entre eux souhaite une information spatialement très résolue au moins à 0,5ha (21%) voire inférieure (56%). Une production en continu sur système d'alerte est considérée comme nécessaire par seulement 26% des acteurs cependant 12 autres acteurs (27%) n'ayant pas répondu en ce sens précisent dans la rubrique libre qu'un suivi en continu serait nécessaire sur partie du territoire ou pour partie de leurs activités (notamment la surveillance des infractions de déboisements).

6- Quelle est selon vous la résolution spatiale nécessaire et suffisante pour que les informations cartographiques répondent à vos besoins ?



< 0.5 ha	34	55.7 %
0.5 ha	13	21.3 %
1 ha	10	16.4 %
2 ha	1	1.6 %
5 ha	3	4.9 %
> 5 ha	0	0 %

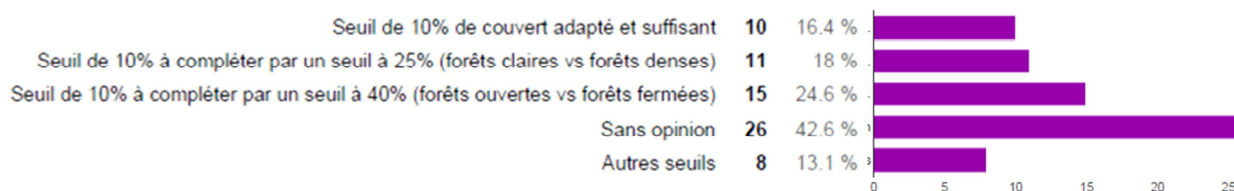
7- Quelle est selon vous la fréquence de mise à jour optimale pour que les informations cartographiques répondent à vos besoins ?



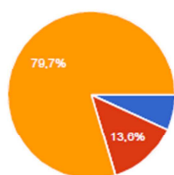
Mise à jour continue (système d'alerte)	16	26.2 %
Mise à jour annuelle (système de suivi)	27	44.3 %
Mise à jour quinquennale ou quadriennale (système de rapportage)	12	19.7 %
Autre (à préciser dans le champ libre ci-après)	6	9.8 %

7- Périmètre attendu

Le dispositif actuellement envisagé vise à suivre les habitats forestiers mais les acteurs locaux n'ont pas une définition très précise de ce qui doit être considéré comme formation forestière d'un point de vue seuil de couverture. 42% d'entre eux sont sans opinion précise sur la question de seuil de couverture à adopter et seulement 16% considèrent le seuil de 10% définie par la FAO comme adapté et suffisant. Quatre remarques font état d'un seuil de 10% trop bas correspondant aux savanes arborées. Par ailleurs, la très grande majorité des acteurs (80%) ne conçoit pas de séparer le suivi des forêts, du suivi des autres formations végétales naturelles, ce qui peut expliquer pour partie l'absence d'idée précise concernant cette question de seuil de couvert pour définir un périmètre forestier. Les motifs qui sont invoqués dans la rubrique libre pour justifier cette position sont majoritairement de deux ordres : (1) le fait que les « forêts gérées » englobent bon nombre d'autres formations végétales (savanes, pelouse, marais ...) sur lesquels existent le même besoin de connaissance et de cartographie ; (2) le fait qu'il ne peut pas y avoir de compréhension de la dynamique des territoires à enjeu sans un suivi intégrant aussi les autres formations végétales naturelles et perturbées.



9- La cartographie régulière peut-elle se limiter aux seules forêts ou doit-elle intégrer d'autres formations végétales pour répondre à vos besoins (précisez lesquelles svp) ?

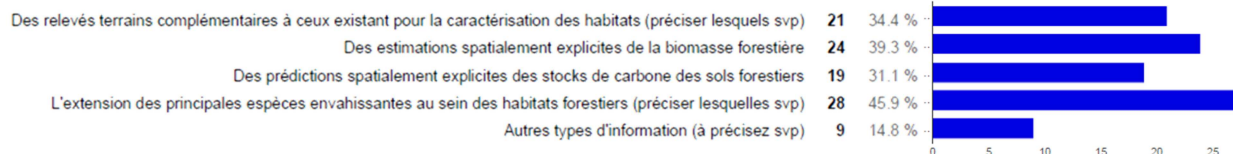


Oui elle peut se limiter aux forêts telles que définies au niveau international par la FAO	4	6,8 %
Non elle doit aussi inclure les autres formations arborées (autres terres boisées et autres terres dotées de couvert d'arbres à vocation non forestière)	8	13,6 %
Non elle doit aussi inclure toutes les formations végétales même non arborées	47	79,7 %

8- Informations associées attendues

D'après les acteurs locaux, la cartographie régulière des habitats forestiers doit s'accompagner en premier lieu d'un suivi des espèces envahissantes au sein de ces habitats (46%) cependant la liste de ces espèces est rarement précisée dans la rubrique libre (travaux du CNPN en cours sur ce point). Trois espèces sont citées en particuliers pour la Martinique : *Triphasia trifoliata*, *Bambusa bambusa*, *Spathodea campanulata*.... L'acacia de St Domingue (*Dichrostachys cinerea*) et le bambou sont cités pour la Guadeloupe. De très nombreuses espèces sont évoquées à la Réunion, avec une priorisation possible sur une dizaine d'espèces parmi les plus problématiques (*Psidium cattleianum*, *Hiptage benghalensis*, *Furcraea foetidia*, *Acacia mearnsii*, *Ulex europaeus*, *Tibouchina urvillinea*, *Cestrum sp*, *Casuarina spp*, *Fraxinus floribunda*, *Ravenala madagascariensis*, *Zanthedeshia aethiopica*). L'estimation spatialement explicite de la biomasse est la deuxième attente (39%) très vite suivie de la caractérisation des habitats (34%) la prédiction des stocks de carbone des sols (31%). Parmi les autres types d'information évoqués dans la rubrique libre on note la présence d'espèces protégées, les changements de composition spécifique, les impacts...

10- Quelles sont les informations qu'il vous semble nécessaire d'associer à cette cartographie régulière pour qu'elle puisse répondre de façon suffisante à vos besoins? (choix multiples possibles)



Conclusions :

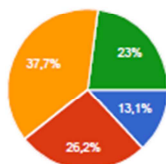
La demande locale exprimée relève en premier lieu d'une cartographie annuelle, spatialement très résolue et englobant toutes les formations végétales naturelles afin d'avoir un meilleur suivi des atteintes au couvert forestier (défrichements, etc...) et une meilleure approche de la dynamique des territoires. Cette vision diffère des orientations initialement choisies par le COPIL qui visait un suivi plus serré dans le temps (en continu) mais à une résolution spatiale moindre (comprise entre 0.5 et 1 ha). Une synthèse ou des propositions alternatives sont donc à envisager. Concernant les informations associées à ce suivi, les demandes sont très variées mais de fait le suivi des EEE apparaît comme une grande priorité alors que ce volet a été initialement écarté par le COPIL. Sa réintégration dans une réflexion globale paraît nécessaire.

MODE DE PRODUCTION ATTENDU PAR LES ACTEURS DE TERRAIN

9- Mode de fonctionnement attendu

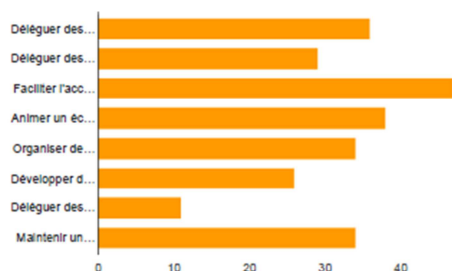
Moins d'un quart des acteurs des territoires (23%) considèrent que le suivi cartographique doit être réalisé depuis un autre territoire que le leur faute de compétence ou de moyens disponibles sur place. Ce sont principalement des acteurs de Mayotte et de la Martinique qui ont répondu dans ce sens. A l'inverse seuls 13% des acteurs considèrent avoir les ressources suffisantes en interne pour réaliser ce suivi. Il s'agit de l'ONF en Guyane, Guadeloupe et Réunion mais aussi du Conservatoire National Botanique des Mascareignes et de l'Université de la Réunion sur ce dernier territoire, et la DTAM à St Pierre et Miquelon. Globalement 63% des acteurs ayant répondu considèrent qu'il est possible de réaliser le suivi depuis leur territoire à condition qu'une aide technique extérieure et des moyens supplémentaires soient fournis. Parmi les atouts locaux mis en avant pour expliquer cette position on note en rubrique libre l'existence des stations SEAS, des ressources humaines limitées mais des partenariats possibles et le besoin de financements pour cette mission.

11- Pensez-vous que votre institution possède localement les ressources humaines et techniques suffisantes pour réaliser les cartographies visées ?



Oui notre institution possède les compétences et les moyens techniques suffisants pour réaliser ce suivi	8	13.1 %
Non mais notre institution pourrait acquérir les compétences et/ou les moyens techniques avec une aide extérieure	16	26.2 %
Non mais d'autres institutions du territoire nous semblent posséder les compétences et les moyens techniques suffisants	23	37.7 %
Non il semble indispensable de réaliser ces cartographies depuis la métropole ou depuis un autre territoire	14	23 %

12- Quel(s) mode(s) de fonctionnement doit(vent) être privilégié(s) pour la réalisation d'une cartographie régulière des forêts d'outre-mer (choix multiples possible) ?



Déléguer des moyens aux acteurs locaux pour l'acquisition de données de terrain nécessaire à la calibration/validation des cartographies	36	59
Déléguer des moyens aux acteurs locaux pour la réalisation des productions cartographiques suivant un cahier des charges précis	29	47
Faciliter l'accès aux images (satellitaires, photographiques...) et aux moyens techniques permettant la réalisation directe des cartographies par les acteurs locaux	47	77
Animer un échange méthodologique et technique entre les différents territoires sur le thème de la cartographie des habitats forestiers	38	62
Organiser des formations permettant l'acquisition et le maintien de compétences locales pour la cartographie des habitats forestiers	34	55
Développer des méthodes de cartographies standardisées applicables sur l'ensemble des territoires d'outre-mer	26	42
Déléguer des moyens aux acteurs nationaux pour une production cartographique centralisée suivie d'une validation et qualification par les acteurs locaux	11	18
Maintenir une veille sur les évolutions techniques et informer les acteurs des progrès en termes de méthodes cartographiques	34	55

Parmi les actions prioritaires pour mettre en route pour ce suivi, 77% des acteurs demandent avant tout des facilités d'accès aux images et aux moyens de traitement (des systèmes existent actuellement mais sont donc insuffisants ou imparfaitement mis en œuvre). Viennent ensuite l'animation technique (62%), la délégation de moyens pour l'acquisition de données de terrain (59%) et l'organisation d'une veille technique ainsi que

l'organisation de formations technique (55%). Le développement de nouvelles méthodes de cartographie, et la délégation de moyens aux acteurs nationaux pour le traitement cartographique n'apparaissent pas comme des actions prioritaires, la majorité considérant donc que les méthodes et les moyens d'analyse existent déjà au niveau national.

10- Source de données à privilégier

D'après les acteurs locaux, les sources de données à privilégier pour la réalisation cartographique sont en premier lieu les photographies aériennes (62%) et les mesures de terrain quantitatif ou qualitatif (56%). L'exploitation des ressources satellitaires optiques ou LiDAR aéroporté ne viennent qu'en second plan (38%). Radar et LiDAR terrestre ne sont que rarement cités (20 et 8% respectivement). Les photographies sont rarement considérées comme suffisantes à elles seules : l'association entre photographies aériennes et données terrain paraît suffisante pour 11% des acteurs ; l'association photos-LiDAR est préférée par 18% des acteurs et l'association photos-images satellitaires est mise en avant par 33% des acteurs.



Conclusions :

Les acteurs locaux demandent avant tout un appui technique et financier permettant de réaliser ces suivis depuis les territoires. Les priorités sont données à la facilitation d'accès aux images (avant tout photographiques), à l'animation d'échange technique entre les territoires et à l'augmentation des moyens permettant de réaliser les relevés de terrain. Ces positions renforcent le diagnostic d'un manque avéré de données in situ – ce qui serait lié d'après les acteurs de terrain à un manque de moyens financiers disponibles. Elles orientent vers un maintien et un renforcement des capacités de traitements sur plusieurs pôles outre-mers susceptibles de réaliser les productions.

CONCLUSION GENERALE DE L'ENQUETE

Les avis exprimés par l'enquête sont suffisamment nombreux et équilibrés pour être considérés comme représentatif d'un ensemble de contextes certes hétérogènes mais avec plusieurs points de convergence (priorisation à la préservation de la biodiversité, manque de moyens et/ou de compétences, éloignement problématique avec les facilités métropolitaines, etc...). Le contrôle des impacts à l'intégrité de l'écosystème forestier (défrichement, dégradation...) et la lutte contre les espèces envahissantes sont les objectifs principaux des acteurs.

Les acteurs ne recherchent pas un produit cartographique très détaillé typologiquement mais avant tout une information très précise spatialement : ils semblent manquer des produits de base, ne serait-ce que de cartes d'occupation des sols intégrant une typologie des grandes catégories de formations végétales naturelles (et pas seulement forestières).

La demande exprimée vise la production annuelle d'une carte des formations végétales à 0.5ha de résolution à minima qui intègre un suivi des principales EEE. Pour cela, les acteurs souhaitent des avancées dans deux domaines : (1) la délégation de moyens supplémentaires permettant de renforcer l'acquisition de relevés de terrain ; (2) l'organisation d'un soutien logistique sous forme de facilitation d'accès aux images, de formation, d'une veille et information technique. En tout état de cause, le manque de produits cartographiques concernant les écosystèmes forestiers en outre-mer ne relèverait pas de problèmes méthodologiques ou techniques qui nécessiteraient de plus amples développements ni d'une assistance complète faute de technicité en local mais plutôt d'un manque d'accès aux images et d'un manque de moyens financiers pour recueillir les données sur le terrain.

Deux conclusions importantes peuvent être tirées de cette enquête :

(1) un décalage entre les orientations du COPIL et les demandes des acteurs de terrain qui nécessite donc un rapprochement ;

(2) des orientations techniques exprimées par le terrain parfois difficilement tenables voire non conciliables entre elles.

Sur ce deuxième point, on note en effet que les acteurs souhaiteraient un suivi annuel avec une résolution très fine (<0.5ha) mais n'envisagent que minoritairement de s'appuyer sur les ressources satellitaires or il est tout à fait impossible financièrement parlant de produire et d'exploiter des couvertures photographiques complètes tous les ans pour une production cartographique (cf. rapport IGN du 09/01/2017 et position du MAAF). Ce hiatus est moins prégnant en Guyane que sur les autres territoires. Pour la Guyane, la résolution souhaitée est aussi de 0.5ha ou moins (70%) avec une fréquence attendue à peu près également répartie entre suivi continu (36%) et suivi annuel (41%) mais les données satellitaires optiques sont les premières sources de données évoquées (47%) en association avec les données terrain (35%) et les photographies aériennes (29%). Pour les autres territoires, hors Guyane, la résolution de 0.5ha a minima est souhaitée par 80% des acteurs - 45% souhaitent une mise à jour annuelle et 23% une mise à jour en continue, mais seulement 34% des acteurs considèrent les images satellitaires optiques comme utiles contre 43% citant le LiDAR aérien et 75% citant les photographies aériennes. Les besoins exprimés par les acteurs guyanais semblent donc plus en adéquation avec les moyens qu'ils envisagent pour les atteindre, alors que les besoins exprimés par les autres territoires paraissent en décalage avec les moyens raisonnablement envisageables.

MISE EN PERSPECTIVE AVEC LES ORIENTATIONS DES COPIL

Les besoins de terrain recueillis lors de cette enquête divergent partiellement avec les orientations prises en central par le COPIL du projet Carthaforum et avec les propositions faites par l'IGN suite à l'étude commandée par le MAAF pour le déploiement d'un inventaire forestier dans les DOM. Ces divergences doivent nous amener à proposer différentes options et scénarii qui fassent la synthèse des besoins, centraux et territoriaux.

En réponse à la demande du MAAF, l'IGN a proposé la production tous les 3-4 ans d'une carte des formations végétales à résolution de 0.5ha basée sur la photo-interprétation répondant aux besoins d'évaluation des ressources forestières et de suivi des surfaces (Brique 2 – rapport IGN du 20/01/2017). Les productions proposées répondent aux attentes de précision spatiale des acteurs locaux mais la fréquence de mise à jour (inhérente à l'acquisition de couverture BDortho) est insuffisante par rapport aux besoins de suivi exprimé par les territoires et aux besoins de rapportages internationaux exigés par le COPIL. Par ailleurs, la robustesse de ces produits basés sur la photo-interprétation n'est pas toujours assurée dans le temps ni entre les territoires. Le déploiement d'un inventaire forestier régional (Brique 3) doit répondre pour partie au manque de données terrain exprimé par les territoires et par le COPIL.

En réponse à la demande du MEEM, le COPIL Carthaforum s'était orienté vers la mise en place d'un système de suivi des déforestations et dégradations en milieu forestier, basé sur le traitement d'images satellitaires optiques en continu, avec production cartographique à résolution de 0.5 à 1ha focalisée sur le seul espace forestier. La résolution spatiale envisagée était moins précise que celle attendue par les territoires mais ce système visait en premier lieu à améliorer les rapportages (notamment les bilans « carbone » régionaux), par une harmonisation des méthodes de suivi et une automatisation assurant robustesse et exhaustivité, tout en fournissant un système d'alerte aux gestionnaires de terrain pour faciliter la lutte contre les atteintes aux milieux forestiers.

Les avis des acteurs des territoires orientent le projet vers une production cartographique mise à jour annuellement à résolution de 0.5ha ou mieux, elle aussi focalisée sur le suivi des déforestations et dégradations mais intégrant en plus les autres formations végétales (non forestières) et le suivi des espèces exotiques envahissantes prioritairement au suivi des stocks et flux de carbone (excepté en Guyane en décalage avec les autres territoires sur ce dernier point). Les acteurs souhaitent que cette production soit effectuée localement avec un appui technique extérieur.

A la suite de ce constat nous proposons donc de travailler à l'élaboration de plusieurs propositions techniques, permettant de concilier les attentes de robustesse (essentiel aux objectifs de suivis et rapportage du MEEM), les attentes de précisions spatiales et de fréquence temporelle (exprimés par les acteurs de terrain), et les propositions de production faites par l'IGN en réponses aux besoins du MAAF. Deux à trois options vont être proposées en s'appuyant sur les expériences recensées lors de la phase préliminaire de l'étude (état des lieux, état de l'art) pour les différentes thématiques abordées : (1) cartographies des formations végétales, (2) suivi des changements, (3) suivi des EEE, (4) suivi des stocks et flux de carbone. Chaque proposition technique sera détaillée dans la dernière phase de l'étude (mars-avril) et fera l'objet d'une évaluation en termes financiers (coûts et moyens nécessaires), opérationnels (fiabilité, faisabilité, ...) et organisationnels (intervenants potentiels et articulation). L'objectif est de trouver le meilleur compromis entre les différents besoins, aux moindres coûts.

PRESENTATION SUCCINCTE DES DIFFERENTES OPTIONS ENVISAGEABLES

A) Cartographie des formations végétales :

Option 1 : Complémentation de la couverture IGN actuelle (cartes forestières limitées à la Guadeloupe et à la Martinique) par classification multi-spectrale supervisée d'images satellitaires optiques disponibles gratuitement (LANDSAT8 et SENTINEL) incluant toutes formations végétales. Production et mise à disposition de mosaïques annuelles recalibrées et désennuagées et de chaînes de traitements.

Option 2 : Production de la brique 2 IGN sur les territoires insulaires actuellement non couverts (sauf Guyane couvert par classification multi-spectrale supervisée d'images satellitaires optiques).

Option 3 : Production de la brique 2 IGN sur tous les territoires y compris Guyane pour sa partie « fer-à-cheval » (l'intérieur restant abordé par imagerie satellitaire).

B) Suivi des changements (déforestation / dégradation) :

Option 1 : Production de mosaïques annuelles recalibrées et désennuagées (LANDSAT8 et SENTINEL2) pour analyse de changement entre deux millésimes.

Option 2 : Elaboration de séries temporelles par collecte et traitement de toutes les images (LANDSAT8 et SENTINEL2) disponibles. Production d'une synthèse annuelle par analyse des séries temporelles.

Option 3 : Collecte, calibration, traitement et transfert des images au fur et à mesure de leur production pour une détection des changements en continue (système d'alerte).

C) Suivi des Espèces Exotiques Envahissantes (EEE) :

Option 1 : Intégration de relevés phyto-sociologiques orientés EEE, nécessitant l'intervention d'experts-botanistes, dans le cadre de la production de l'inventaire forestier de l'IGN (brique 3).

Option 2 : Développement d'outils numériques portables pour la reconnaissance, la localisation et le relevé des EEE végétales par les agents en charge de la surveillance de l'environnement, et les associatifs.

Option 3 : Financement de projet de recherche pour le développement de méthodes de détection des EEE par imagerie hyper-spectrale.

D) Suivi carbone :

Option 1 : Complémentation de la brique 3 de l'IGN pour estimation des stocks de carbone (détermination botanique des espèces pour suivi biomasse – prélèvement d'échantillons de sols et analyses pour suivi du carbone organique des sols – relevés bois morts pour estimation de la nécromasse). Estimation des stocks par types forestiers (suivi niveau Tier2 pour les reportages REDD)

Option 2 : Production de modèles spatialement explicites sur les territoires insulaires (la Guyane étant déjà couverte) nécessitant la collecte de données spécifiques (option 1 ci-dessus) couplée à un échantillonnage LiDAR sur au moins 10% de la surface forestière (suivi niveau Tier 3)

Option 3 : Acquisition de données complémentaires concernant les stocks mal estimés (racines, nécromasse) et l'évolution des principaux stocks (biomasse, carbone des sols) sur dispositifs forestiers permanents.

DERNIERE PHASE DU PROJET

Les prestations et livrables attendus (fréquence, résolution...) seront détaillés pour chaque option. Les propositions de spécifications techniques seront développées sur la base de la synthèse bibliographique, des tests réalisés et des retours d'expériences analysés lors de la première phase de l'étude (rapport intermédiaire de juillet 2016 et éléments partagés lors des COPIL d'octobre, novembre et décembre 2016 - cette matière sera synthétisée dans le rapport final prévu pour avril 2017). Les coûts de développement technique et de mise en œuvre seront individualisés pour chaque option afin de pouvoir envisager différents scénarii de production (centralisée au niveau national, sur des pôles régionaux ou délocalisée sur chaque territoire). On se rapprochera des organismes nationaux et locaux reconnus dans chaque domaine d'expertise pour affiner les chiffrages financiers une fois les options détaillées.

Chaque option fera l'objet d'une évaluation en termes de robustesse, de précision, de sensibilité et d'opérationnalité vis-à-vis des attentes respectives des acteurs de terrain et du COPIL du projet.

ANNEXE 6 : L'OBSERVATOIRE DE L'ACTIVITE MINIERE EN GUYANE : UN OUTIL INTEGRE ET EFFICACE POUR LE SUIVI DE L'ENVIRONNEMENT

LE CONTEXTE REGIONAL EN QUELQUES LIGNES

Depuis les années 2000, la Guyane française et plus largement le Plateau des Guyanes dans son ensemble, sont confrontés à une explosion de l'activité d'orpaillage provoquée par la flambée des cours de l'or, elle-même consécutive à la dérégulation du marché international institué par l'abandon des accords de Breton-Woods (Hammond et al. 2007). Les prix d'échange de l'or ont été multipliés par un facteur 30 en une quarantaine d'année (au-dessus du seuil des 40 000 €/kg en 2012 il a récemment chuté à 33 000 €/kg), ce qui a rendu extrêmement rentable l'exploitation de gisements aurifères à faible teneur, particulièrement fréquents au sein des ceintures de « roches vertes », intrusions magmatiques, qui fragmentent le bouclier guyanais (Delor et al. 2003).

Depuis la publication en 1996 par le Bureau des Recherches Géologiques et Minières de la carte des potentialités minières en Guyane française, la production officielle d'or de la région serait ainsi passée de 500kg environ en 1989 à près de 4 000 kg dans les années 2000 (Gond et al. 2009). Cependant, du fait de la dispersion des gisements et de l'immensité du massif forestier guyanais, cette intensification exceptionnellement rapide de l'activité minière est difficilement contrôlable par les services étatiques et laisse la porte ouverte au développement de nombreuses filières clandestines alimentées par un flux migratoire puissant et qui représenterait un volume d'activité équivalent à celui de la filière légale (Taravella 2009). Ce développement exponentiel et anarchique d'activités minières en plein cœur de la forêt amazonienne n'est pas sans poser d'énormes problèmes écologiques, mais aussi sociétaux : déforestation non contrôlée, pollution des cours d'eau par le mercure, augmentation des trafics en tout genre et des foyers d'insalubrité menaçant la santé publique (Taubira 2000).

Dans ce contexte, le recours à de nouveaux moyens de surveillance et de contrôle s'est révélé comme absolument nécessaire et la télédétection s'est rapidement imposé comme un outil incontournable pour les acteurs locaux engagés dans l'encadrement de cette activité.

MISE EN PLACE DE L'OBSERVATOIRE DE L'ACTIVITE MINIERE (OAM)

ACTEURS CONCERNES

LES ADMINISTRATIONS ENGAGEES DANS LE CONTROLE DE L'ACTIVITE LEGALE

Les deux principaux acteurs publics engagés dans le contrôle de l'activité minière sont l'Office National des Forêts (ONF) au titre de gestionnaire du domaine forestier public et représentant de l'Etat propriétaire, et la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) au titre de ses missions régaliennes dans le domaine de la gestion durable du milieu naturel (activités de l'ex DIREN et missions Polices de l'eau de la DAF) et de la prévention des risques naturels et technologiques (activités de l'ex DRIRE).

Le contrôle de l'activité minière légale comprend la vérification des limites de permis en concessions accordés aux exploitants et le contrôle du respect des conditions réglementaires et contractuelles relatifs à l'exploitation des ressources et à la remise en état du site. A ce titre, l'ONF à travers son Unité Spécialisée Nature exerce notamment un suivi des surfaces déforestées et de la revégétalisation après exploitation, à partir de survols aériens hélicoptérés et de visite de terrain.

La Préfecture, la Gendarmerie Nationale et les Forces Armées de Guyane sont engagées depuis 2002 dans un vaste effort de lutte contre le développement de l'orpaillage illégal. Des opérations concertées de terrain visant au démantèlement des installations illicites sont organisées conjointement par ces différents services dans le cadre de campagnes très structurées (opérations « Anaconda », puis opérations « Harpie » à partir de 2008). Ces services sont appuyés par l'ONF et la DEAL, qui fournissent des informations aidant à la localisation des sites illégaux détectés au cours des survols aériens. Depuis la création du Parc Amazonien de Guyane (PAG) le 27 février 2007, ce nouveau partenaire participe aussi activement à la lutte contre l'orpaillage clandestin en organisant des patrouilles de surveillance sur les 3.3 M d'ha situé en cœur de Parc, ainsi que sur les zones de libre adhésion situées à proximité des villages, et en fournissant des informations aux instances régaliennes.

LES ORGANISMES DE RECHERCHE INVESTIS DANS LE DEVELOPPEMENT D'OUTILS DE CONTROLE

Dès 2005, le Centre de coopération Internationale de Recherche en Agronomie pour le Développement (CIRAD) s'est engagé dans des travaux scientifiques visant à évaluer le potentiel de la télédétection pour faciliter l'observation des activités minières sur le territoire guyanais (Gond and Brognoli 2005). Les premiers essais concluant sont effectués à partir d'images LANDSAT 5 et 7, libre d'accès. Ces travaux de recherche intéressent très rapidement la DEAL et l'ONF, qui collaborent avec le CIRAD pour aboutir au développement rapide de chaînes de traitement opérationnelles pour la détection des pollutions des eaux et des zones d'exploitation minières (Coppel et al. 2008), ce qui permet à l'ONF de réaliser un premier « bilan patrimonial » précis des surfaces et linéaires impactés par l'orpaillage de 1990 à 2006.

En parallèle, une plate-forme de réception et de traitement d'images SPOT voit le jour en Guyane dans le cadre du programme SEAS-Guyane (Surveillance de l'Environnement Amazonien par Satellite) porté par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en collaboration avec SPOT-Images et Envisat. Un protocole de mise à disposition gratuite d'images aux services de l'Etat est acté jusqu'en 2013, cette station ayant bénéficiée de financements européens dans le cadre du programme PO-FEDER 2007-2013. Sa propriété a depuis été transférée à la Région Guyane en Février 2014.

OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'OAM

Le premier « bilan patrimonial » réalisé par l'ONF grâce à l'exploitation d'images satellites, révèle le formidable avantage que constitue la télédétection à la fois pour le suivi de l'activité légale, mais aussi pour la détection précoce des sites illégaux (Joubert et al. 2008). Concomitamment, la mise en service de la station SEAS offre de nouveaux produits optiques à haute résolution avec les images de type SPOT 4 et 5. L'idée d'un observatoire de l'activité minière permettant de produire, de centraliser et de partager entre les différents acteurs les informations relatives à l'activité minière voit alors le jour à l'initiative de l'ONF avec l'appui de la Préfecture de Guyane (Nicolle and Leroy 2013).

OBJECTIFS DE L'OAM

Les objectifs de l'OAM sont de trois niveaux :

- **Echange de données via un serveur dédié (Partage)** : chaque partenaire de l'OAM, à savoir la Gendarmerie, les Forces Armées de Guyane, la DEAL, le Parc Amazonien de Guyane et l'O.N.F, renseignent une plate-forme d'échange de données à partir de leurs propres interventions et constats (l'ONF et le PAG constatent les occupations et les

Gendarmes et les Forces Armées de Guyane interviennent pour saisir et démanteler les camps d'orpaillage illégaux).

- **Production de renseignements pour la coordination des actions de lutte (Pilotage) :** les données d'opérations terrain menées par les différents acteurs sont standardisées et intégrées à un Système d'Information Géographique (SIG) pour faciliter la direction stratégique des opérations « Harpies ». Les images satellites traitées en routine, sont confrontées à ces informations et permettent de détecter de récents centres d'activités participant ainsi au dispositif d'alerte.
- **Elaboration de données de synthèses pour un suivi régulier et spatialisé (Bilan) :** L'ensemble de ces informations sont consolidés et analysés pour fournir des indicateurs quantitatifs fiables quant à l'efficacité des actions de lutte menées et leur répercussion en termes d'évolution de l'activité (densité des chantiers, répartition spatiale, taille...) et de réduction des impacts environnementaux (surfaces impactées, linéaires de rivières polluées...)

ORGANISATION DE L'OAM

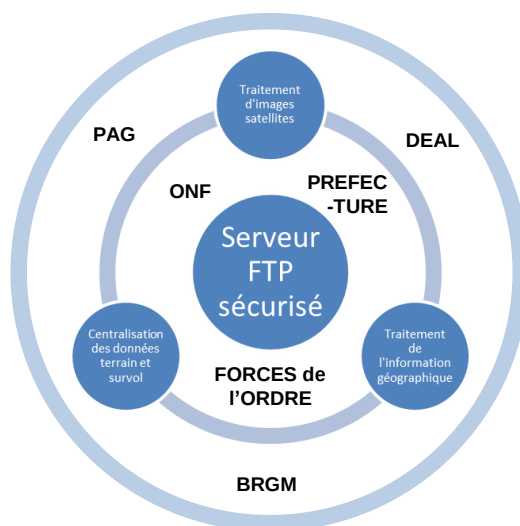


Figure 46: Les acteurs de l'observatoire de l'activité minière adaptée de (Nicolle and Leroy 2013)

L'OAM est sous le contrôle de la Préfecture de Guyane et sous le pilotage technique de l'ONF. La Gendarmerie, les Forces Armées de Guyane, la DEAL, le PAG, l'ONF et le BRGM sont partenaires de l'OAM en tant que producteur et utilisateur de données (excepté le BRGM qui n'est que producteur). L'ONF est chargé par la Préfecture de la gestion du serveur FTP, du traitement des images satellites et des informations géographiques dans un cadre de stricte confidentialité : les données ne sont disponibles à minima qu'après un temps de latence par demande à la Préfecture et les opérateurs doivent être habilités « secret défense » (Lotte 2012). Les informations sont tout d'abord partagées avec les forces de l'ordre suivant l'objectif d'alerte et de pilotage de la lutte contre l'orpaillage illégal (cercle restreint) puis mise à disposition de l'ensemble des membres après un embargo de quelques mois pour traitement et réalisation des bilans réguliers (Figure 46).

L'ONF joue donc un rôle central dans la production et le traitement des données satellitaires et géographiques, dans les processus d'alerte et de bilan. Ces actions impliquent 4 agents de l'Unité Spécialisée Nature et 2 personnels du service SIG pour un équivalent de 400-500 h/j (Coppel A, comm. pers.). Le PAG joue aussi un rôle important en termes de production de données pour le processus d'alerte et de traitement des informations géographiques pour les bilans. Ces actions impliquent les techniciens territoriaux du PAG chargés de surveillance, un technicien spécialisé

sur le dossier police de la nature et un personnel SIG pour un équivalent de 700h/j intégrant aussi un suivi de la qualité des masses d'eau (PAG 2015).

Chaque partenaire s'acquitte d'une participation financière annuelle de 5 000 € pour le fonctionnement de l'observatoire (Nicolle and Leroy 2013). L'animation de l'observatoire passe par une réunion de comité technique mensuelle, qui mobilise surtout les opérateurs SIG des différents organismes ainsi que l'administrateur réseau. Un Comité de Pilotage spécifique (COPIL) est aussi réuni une fois par an en plus des nombreuses réunions, qui rassemblent les différentes Directions dans le cadre du dispositif armé « Harpie » (Coppel A, comm. pers.).

METHODES DE PRODUCTION DES DONNEES

COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES TERRAIN

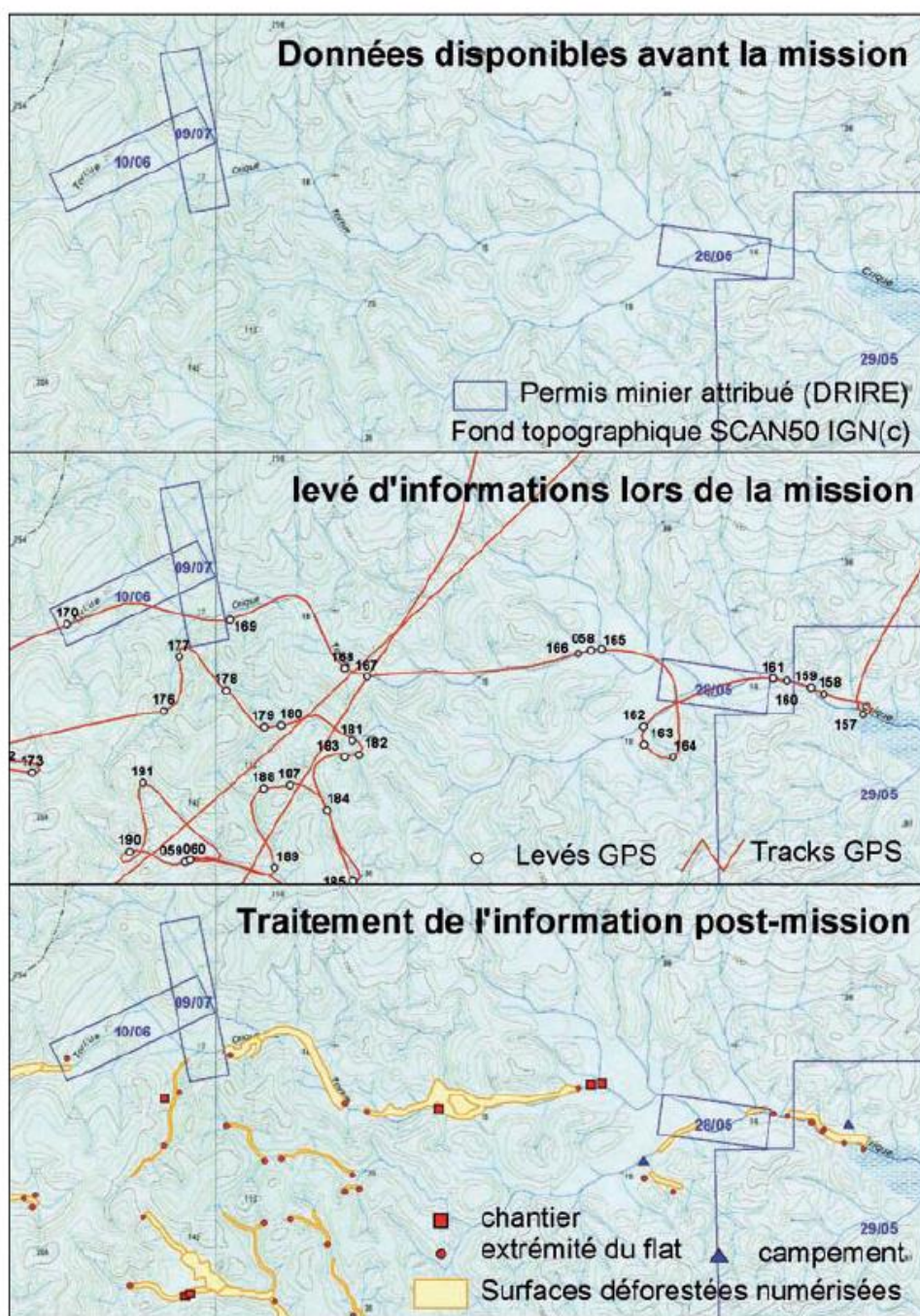
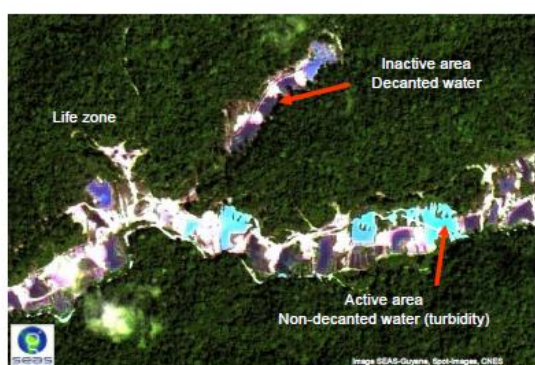


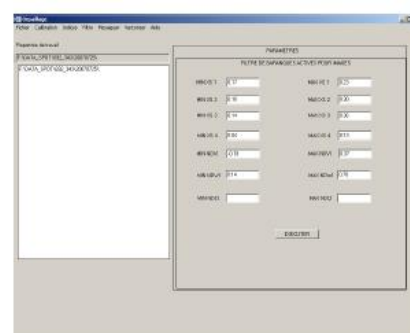
Figure 47 (tirée de Coppel et al. 2008) : Collecte des informations lors des missions héliportées
 Les données terrain sont collectées à l'occasion de missions fluviales, terrestres ou aériennes héliportées. Chaque relevé associe un levé GPS avec une description de l'élément relevé (nature de l'infrastructure, début ou fin de chantier, largeur de zone exploitée au point relevé, etc). La numérisation des surfaces travaillées se cale sur les points relevés, les détails descriptifs et les fonds cartographiques et images disponibles (Figure 47). L'ensemble des relevés effectués par les différents partenaires depuis 2001 ont été rassemblés, homogénéisés et numérisés (Coppel et al. 2008).

CHAÎNE DE TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

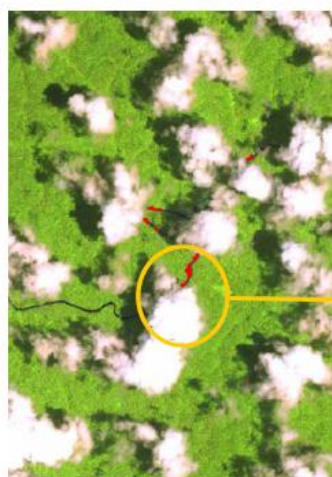
Les images LANDSAT 5 et 7 sont les premières à avoir été utilisées à cet usage de façon expérimentale par le CIRAD (Gond and Brognoli 2005). La simplicité et la robustesse des algorithmes utilisés pour détecter les sites orpaillés a facilité leur transcription aux images de la série SPOT (4 et 5). Les filtres de détection s'appuient sur les néo-canaux NDVI et NDWI (*Normalized Difference Vegetation Index* et *Normalized Difference Water Index* basés sur des combinaisons et rapports entre le Proche Infra-rouge, Moyen Infra-rouge et rouge visible).



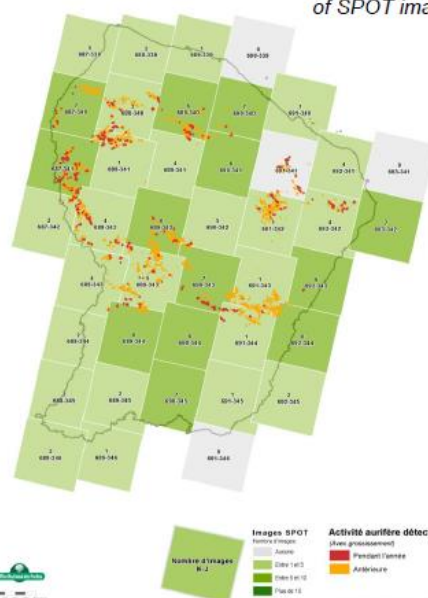
On a high resolution SPOT image (2.5m) detection of water turbidity is possible using spectral information. Photo (right) shows the impact of illegal gold mining in the forest.



Software interface for automatic processing of SPOT images



The process detects (in red on left) the pollution coming from creek going in the main river (right)



Annual mapping is provided and differentiate previous yearly activity (yellow) and annual supplementary activity (red)

Figure 48 tirée de (Joubert et al. 2008): Chaîne de traitement des images SPOT pour la détection des zones orpaillées.

Les traitements faits manuellement jusqu'en 2007 sur ENVI ont ensuite été en partie automatisés via un software de traitement dédié (PLATOT) élaborée par le CIRAD (Gond et al. 2014) comprenant une correction automatique des réflectances, le calcul des filtres et leur

combinaison ainsi que l'extraction des pixels pour transfert sur SIG (Figure 3). Un traitement manuel reste nécessaire pour l'élimination des artefacts et bruits liés à la confusion possible avec les roche-nues et glissements de terrain qui présentent des signatures proches. De fait, la chaîne de traitement automatique est principalement utilisée pour la détection des eaux turbides qui fournit un indice d'activité très efficace (Joubert et al. 2008). Une fois ces zones actives détectées, les surfaces déforestées sont alors traitées manuellement ce qui est aussi rapide que le nettoyage après traitement automatique (P Joubert, comm. pers.).

BILAN DE L'OAM APRES 8 ANS DE FONCTIONNEMENT

BILAN TECHNIQUE

L'OAM a bénéficié jusqu'en 2014 du dispositif SEAS-Guyane qui l'a approvisionné en images optiques de haute résolution et de grande qualité. Ce sont en moyenne 225 images SPOT, qui ont été traitées annuellement à ce jour (A Coppel, comm. pers.) avec cependant des variations interannuelles fonction de la disponibilité du capteur et de l'enneuagement (Table 25). La fiabilité de l'information est assurée par de nombreux croisements de données terrain (70 à 95% des points vérifiés selon les années) et sa précision spatiale est très fine (de l'ordre de 0.2 ha pour des tailles moyennes d'objet de l'ordre de 1 ha). Le grand nombre d'images disponibles a permis de dépasser les problèmes liés à la forte nébulosité.

Table 25 : Indicateurs annuels d'activité de l'OAM tirés de (Joubert et al. 2012)

Année	Nb d'images traitées	Nb d'objet numérisés	Taille moyenne	Pourcentage de validation
2008	219	2361	1.37	86.1%
2009	283	745	0.8	69.5%
2010	419	431	1.08	95.6%
2011	149	647	0.98	73.4%
2012	160	2100	0.54	nd

• Nombre de chantiers illégaux* relevés par l'ONF en 2013 : 774

*Chantiers constatés actifs sur l'année 2013

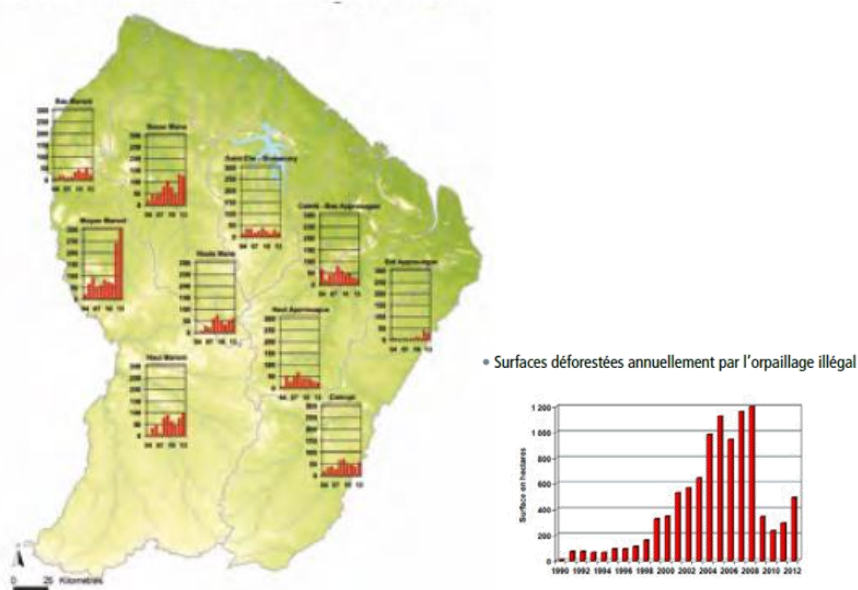


Figure 49 (tirée de ONF 2014) : bilan des surfaces déforestées sur la période 1990-2012

Des bilans annuels précis ont pu ainsi être produits par l'ONF pour l'ensemble de la Guyane et déclinés par le PAG sur son territoire (Figure 4). Les surfaces déforestées annuellement sont fortement variables : de moins de 100 ha avant 1997 à plus de 1200 ha en 2008, avec une chute brutale entre 2009 et 2012 démontrant l'efficacité de la lutte contre l'orpaillage clandestin et de son pilotage par l'OAM (ONF 2014). L'orpaillage contribue ainsi pour environ 12% de la déforestation constatée en Guyane sur la période 1990-2006 (Stach et al. 2009), ce qui peut sembler marginal en première approximation. Son impact sur le bilan carbone régional est cependant plus important si l'on considère les quantités de carbone organique libérées par les sols exploités, soit environ 70 t/ha pour les zones concernées (Guitet 2015), en sus de celles résultantes de la destruction de la biomasse forestière, de l'ordre de 160 t/ha pour les forêts concernées (Guitet et al. 2015).

Du fait de son exemplarité et sa remarquable efficacité, plusieurs organismes internationaux comme le World Wildlife Fund (WWF) et ONF-International (ONFI) se sont appuyés sur l'OAM pour réaliser des suivis et bilans de même nature, sur d'autres territoires du Plateau des Guyanes (Debarros and Joubert 2010; Rahm et al. 2015). Cette réappropriation de l'outil à une échelle internationale pour des suivis périodiques prouve la qualité des techniques adoptées et leur robustesse.

DIFFICULTES RENCONTREES DANS LE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement de la station SEAS a jusqu'à présent constitué un atout considérable pour l'efficacité de l'OAM. Le désorbitage des satellites SPOT4 puis SPOT5, le changement de statut de la station SEAS en 2014 et le nécessaire temps d'adaptation des acteurs sont susceptibles de remettre en cause cette efficacité dans les mois qui viennent. En effet, d'importants investissements (environ 1 M€) sont nécessaires pour permettre la réception d'images SPOT6-7 par le pied d'antenne de Cayenne (A Coppel, comm. pers.). Par ailleurs, le principe de gratuité des images pourrait être remis en cause par les nouveaux partenaires de la station SEAS, que sont la Région Guyane et Airbus DS (P Joubert, comm. pers.). De fait l'OAM est dans une période de transition et cherche à diversifier les sources de données images afin que la continuité du suivi soit assurée.

La participation des forces militaires et de police à l'OAM peut être perçue au premier abord comme une difficulté du fait de la restriction dans la diffusion des données qu'elle entraîne (Nicolle and Leroy 2013). De fait, la diffusion des informations et bilans a périodiquement pu être limitée par la Préfecture de Guyane qui, à ce jour, semble cependant avoir changé de politique en la matière. Cependant, cette combinaison originale entre suivi écologique et surveillance régaliennne révèle aussi quelques avantages puisque les gestionnaires de l'environnement bénéficient ainsi des priorités accordées aux objectifs militaires (par exemple l'accès aux données du Shuttle Radar Topographic Mission à 30 m – SRTM30m - dès 2007 bien avant sa diffusion en libre accès). Ils participent aussi partiellement aux choix stratégiques permettant d'orienter la lutte dans les secteurs les plus sensibles d'un point de vue environnemental.

Le turn-over des personnels techniques dans les DOM est souvent mis en avant comme une difficulté pour le fonctionnement et le suivi des outils développés localement. Ce n'est que partiellement le cas de l'OAM qui bénéficie de la stabilité de ses acteurs principaux dont beaucoup sont en place depuis le démarrage du projet. Dans le cas présent, les acteurs du territoire ont fait preuve de leur capacité à acquérir les compétences techniques et la technologie nécessaire sur place, à construire un outil proche des besoins les plus immédiats et capable de produire dans le même temps des indicateurs réguliers pour des besoins nationaux. Il démontre aussi la possibilité d'assurer un suivi malgré le turn-over des opérateurs en bordant

les processus méthodologiques. Ces atouts n'excluent pas des phases de transitions parfois tendues, le recrutement des ressources humaines étant toujours une phase complexe et critique.

PERSPECTIVES

Actuellement, les priorités de l'OAM se porte vers l'acquisition et le test de nouvelles données images, de type SPOT6/7, Pléiades et Sentinel1/2. Ces nouveaux types d'images à très haute résolution peuvent faciliter le travail d'interprétation, mais peuvent se révéler beaucoup plus lourdes à gérer en termes de stockage et de temps de traitement. Par ailleurs, leur fauchée est beaucoup moins large que celle des SPOT4/5. L'utilisation d'images radar (PALSAR, COSMOSkyMed, Tandem X, Terrasar X...) est aussi envisagée, mais impliquerait un changement complet de l'approche et de la chaîne de traitement du signal. Un premier test d'images radar a été réalisé en 2014 en collaboration avec Télésnasio, opérateur privé spécialisé dans la gestion et le traitement de l'image, implanté en Guyane (C. Bedeau, comm. pers.). Un projet de mise au point de suivi opérationnel à partir d'un bouquet de nouveaux produits a récemment été déposé fin 2015 par l'ONF en collaboration avec Valéry Gond du CIRAD sur les fonds FEDER (en attente de réponse).

L'OAM est l'illustration exemplaire d'un observatoire efficace et proche du terrain permettant d'assurer un suivi fiable et régulier de l'évolution des surfaces forestières et de leur état de dégradation/conservation. Il s'applique sur une surface de plusieurs millions d'hectares avec une précision remarquable assurée par la proximité entre les services de traitement des données et les services en charge des validations terrain, systématiques et rationnellement organisées. Il démontre la capacité des territoires à développer, organiser et maintenir des outils de suivi de l'environnement efficaces et extrêmement précis du fait de cette intégration entre télédétection et connaissance du terrain. Une coordination entre cet observatoire thématique local et l'observatoire national des habitats forestiers ultra-marins plus global et générique ne peut être que bénéfique pour les deux parties. D'un côté, elle permettrait d'asseoir l'observatoire naissant sur un outil déjà éprouvé qui réunit l'ensemble des institutions locales en charge de la gestion de l'environnement en Guyane, région de première importance de par sa surface. Cette expérience guyanaise pourrait servir de socle ou de modèle pour le développement d'outils adaptés aux enjeux des autres ROM-COM. De l'autre côté, l'intégration de l'OAM dans un réseau plus vaste peut faciliter et consolider l'accès aux images dans les années à venir. Dans l'immédiat, il pourrait être intéressant d'axer une partie des tests de traitement de nouveaux produits prévu dans le projet CARTHAFORUM, vers cette application en coopération avec les équipes de l'OAM.

BIBLIOGRAPHIE

1. Coppel A, Gond V, Allo S (2008) Bilan de l'impact de l'orpaillage en Guyane: une étude fondamentale Rendez-vous techniques de l'Office National des Forêts 20:4-9
2. Debarros G, Joubert P (2010) Impact de l'activité aurifère sur le plateau des Guyanes : rapport final. WWF Guianas, Cayenne
3. Delor C et al. (2003) Transamazonian crustal growth and reworking as revealed by the 1:500,00-scale geological map of French Guiana (2nd edition) Géologie de la France 2-3-4:5-57
4. Gond V, Bluteau J, Kotchi S-O, Koné BB, Linarès S (2009) La géomatique, outil de surveillance de l'orpaillage clandestin en Guyane française Canadian Journal of Latin American and Caribbean Studies 34:177-193

5. Gond V, Brognoli C (2005) Aménagement du territoire: localisation et identification des sites d'orpaillage en Guyane française Bois For Trop:4
6. Gond V et al. How to mitigate small-scale gold mining activities impacts on the environment? In: Annual World Bank Conference on Land and Poverty, Washington DC, March 24-27 2014.
7. Guitet S (2015) Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française: distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémiques. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier. 364p.
8. Guitet S, Hérault B, Molto Q, Brunaux O, Couteron P (2015) Spatial structure of above-ground biomass limits accuracy of carbon mapping in rainforest but large scale forest inventories can help to overcome PloS one 10:e0138456
9. Hammond DS, Gond V, Thoisy Bd, Forget P-M, DeDijn BP (2007) Causes and consequences of a tropical forest gold rush in the Guiana Shield, South America AMBIO: A Journal of the Human Environment 36:661-670
10. Joubert P, Bourgeois U, Linarès S, Gond V, Verger G, Allo S, Coppel A L'observatoire de l'Activité Minière : Un outil adapté à la surveillance de l'environnement. In: XVe Symposium SELPER, Cayenne, 19 au 23/11/2012 2012.
11. Joubert P, Linarès S, Gond V (2008) Face à la ruée vers l'or en Guyane : un observatoire de l'activité minière Rendez-vous techniques de l'Office National des Forêts 20:10-14
12. Lotte A (2012) Programme de mesures : bilan à mi-parcours. DEAL Guyane, Service Milieux naturels, Biodiversité, Sites et Paysage, Cayenne
13. Nicolle S, Leroy M (2013) Stratégies de partage et diffusion de données publiques environnementales. Cas d'étude en Amazonie française et brésilienne Netcom Réseaux, communication et territoires:60-87
14. ONF (2014) Rapport d'activité 2013 de la Direction Régionale Guyane. Office National des Forêts Cayenne
15. PAG (2015) Rapport d'activité 2014. Parc Amazonien de Guyane, Remire-Montjoly
16. Rahm M et al. (2015) Monitoring the Impact of Gold Mining on the Forest Cover and Freshwater in the Guiana Shield. Reference year 2014. . REDD+ for the Guiana Shield Project and WWF Guianas, rapport.
17. Stach N et al. (2009) Land use monitoring by remote sensing in tropical forest areas in support of the Kyoto Protocol: The case of French Guiana Int J Remote Sens 30:5133-5149
18. Taravella R (2009) De la mine à la vitrine : état des lieux et perspectives de la traçabilité de l'or guyanais. WWF, rapport.
19. Taubira C (2000) L'or en Guyane : éclats et artifices. Rapport à Monsieur le Premier Ministre

ANNEXE 7 : PRESENTATION ET CR DU 1^{ER} COPIL ETENDU 09/11/2016



COPIL CartHaForUm

Cartographie régulière des Habitats
Forestiers Ultra-Marins



Paris, le 9 Novembre 2016
1

Déroulement du COPIL

- Introduction par A. Lalanne (10 min)
- Présentation de l'étude par B. Riera et S. Guitet (15 min)
- Etat d'avancement des différents axes et conclusions provisoires par S. Guitet (45 min)
- Questions - Avis – Commentaires – Décisions (80 min)

Fin programmée à 11h30



2

Objectifs

Réflexions pour la constitution d'un « observatoire » des forêts ultra-marines

- « Cartographie régulière des habitats forestiers des **départements ultra-marins, de Saint-Pierre-et-Miquelon, des îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy ainsi que des TAAF (Iles Éparses)** »
- « Mettre à disposition (du MEEM) une base de connaissances et de **travaux sur le suivi des habitats forestiers** »
- « Produire un **cahier des charges** et une **méthodologie** pour la réalisation d'une cartographie régulière des habitats ultra-marins par les Agences françaises locales de la Biodiversité ou tout autre structure en lien avec les élus »



3

Finalité

Un observatoire des forêts ultra-marines pour quoi faire ?

- « Fournir aux administrations et aux élus les éléments de base pour les **politiques de gestion du territoire** et les différents **choix stratégiques** en termes d'aménagement »
- Faciliter la « production de données notamment dans le cadre de l'**ONB** et de la **LOA** loi d'avenir sur l'Agriculture, l'alimentation et la forêt » (...) « Dans le cadre des engagements internationaux, européens et nationaux »

Thématiques abordées :

Biodiversité (CDB et accords Aïchi) : lutter contre la perte de biodiversité, fragmentation des habitats, espèces envahissantes, déforestation → **SNB**

Changements climatiques et Carbone (REDD+) : réduction des émissions de gaz à effets de serre due à la déforestation et à la dégradation (secteur UTCF), impact des CC → **CNUCC**



4

Rappels – définitions préalables

Forêts : définition internationale FAO

- Superficie >0,5 ha + couvert forestier >10% + hauteur potentielle > 5m + pas de vocation agricole ou urbaine (inclus mangroves) - **Rmq : France métropolitaine = couvert >25%**
- Autres terres boisées : couvert forestier 5-10% ou couvert mixte >10% + pas de vocation agricole ou urbaine (inclus formations arbustives)
- Autres terres dotées de couvert d'arbres : S>0,5ha + Hp>5m + vocations urbaines ou agricoles + arbres non forestiers (agroforêts)

Habitats (forestiers) : INPN

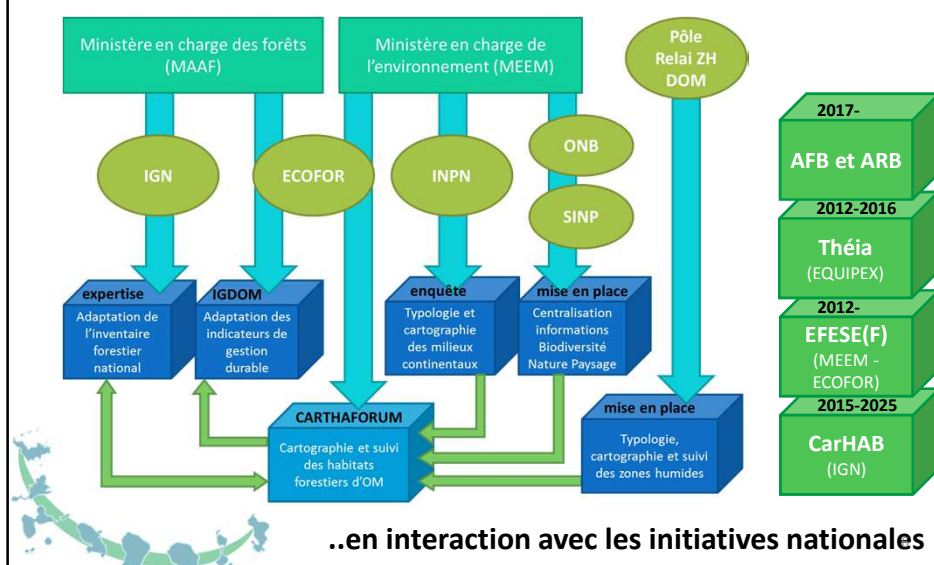
« un environnement particulier qui peut être distingué par ses **facteurs abiotiques** et ses **caractéristiques biologiques**, fonctionnant à des échelles spatiales et temporelles spécifiques mais dynamiques, dans un espace géographique reconnaissable (d'après les idées de Yapp, 1922) »

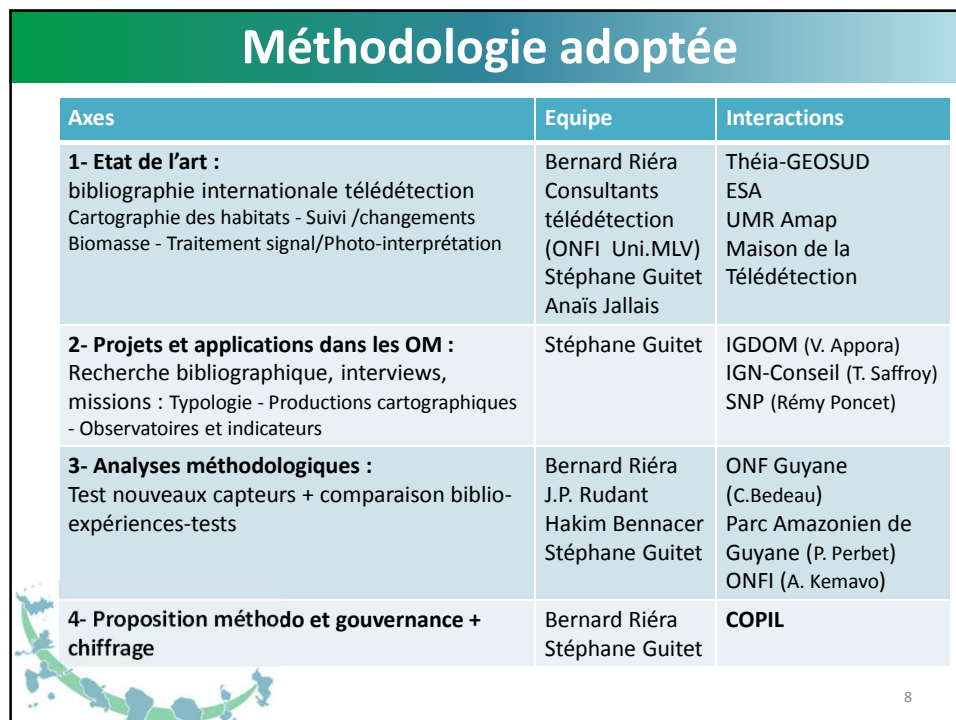
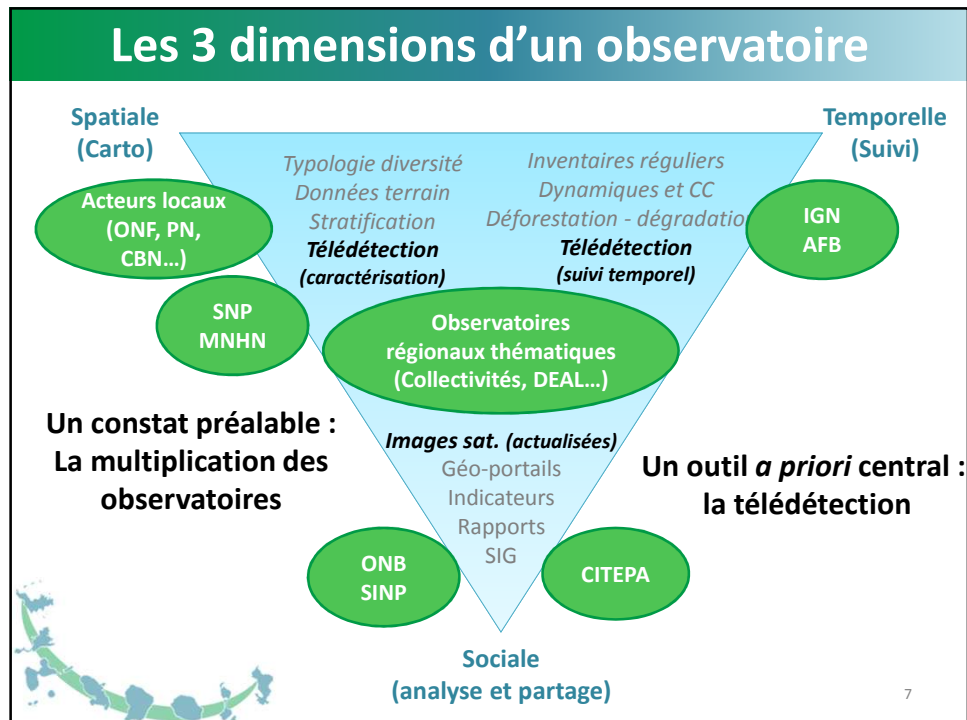


5

Interactions - Contexte

Plusieurs initiatives en cours centrées Outre-mer...





Axe 1 – état de l'art

Présentation des résultats provisoires

Trois thématiques retenues (IG-DOM) :

- Cartographie & modélisation de la diversité
- Suivi des changements : dégradation/déforestation
- Stocks et flux de carbone forestier

Sur chaque thème :

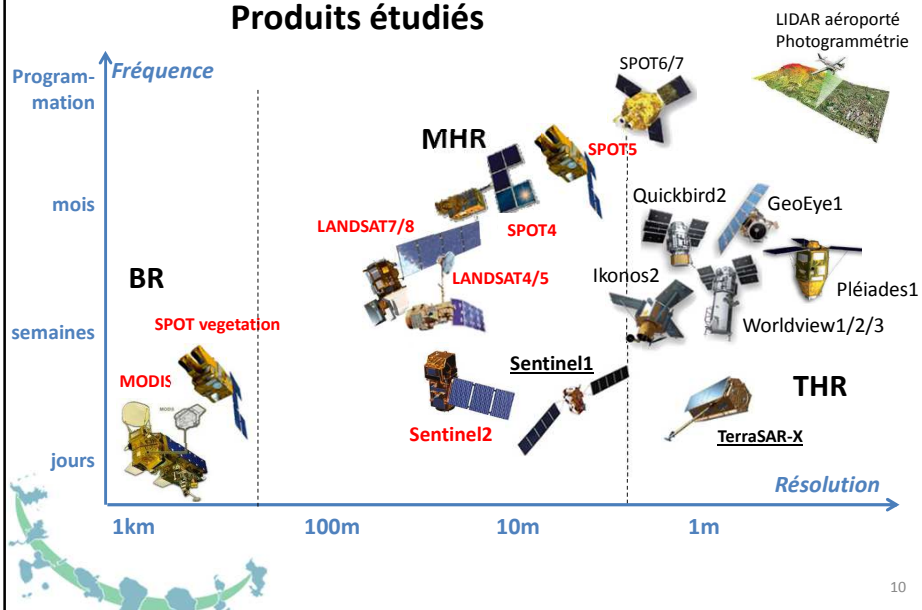
- Synthèse bibliographique – comparaison d'outils télédétection
- Travaux emblématiques : avance technologique et applicabilité

Conclusions provisoire : outils disponibles

9

Axe 1 – résultats provisoires

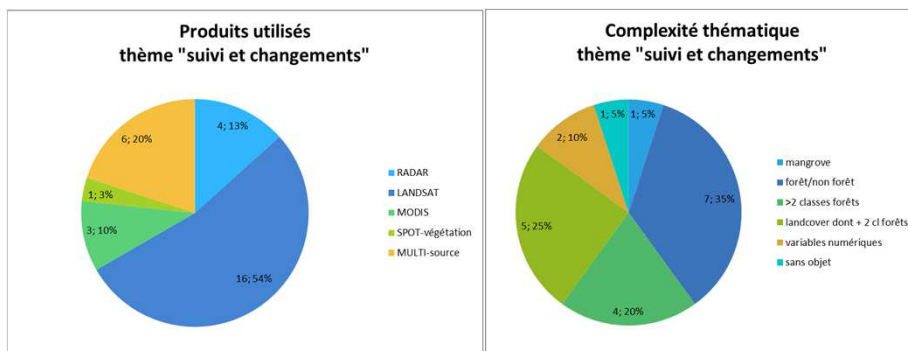
Produits étudiés



10

Axe 1 – résultats provisoires

Suivre les changements de couverture forestière

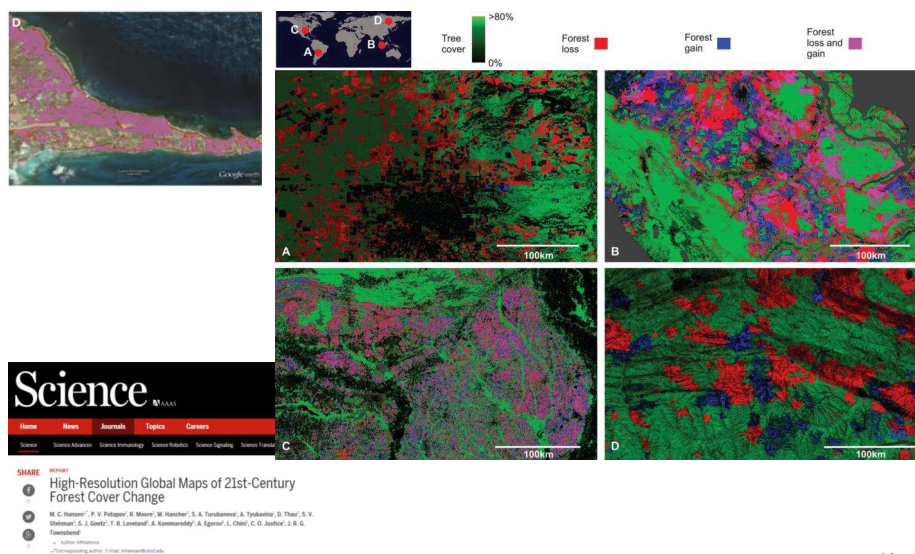


- 57% des études en zone tropicale
- Essentiellement basé sur du LANDSAT (gratuit et répétitivité)
- Généralement 1 ou 2 classes forestières (déforestation/dégradation)
- Analyse en série temporelle > comparaisons par paire d'images
- Analyses automatiques sur optique HR - uniquement manuelles sur THR
- Radar pas encore à maturité

13

Axe 1 – résultats provisoires

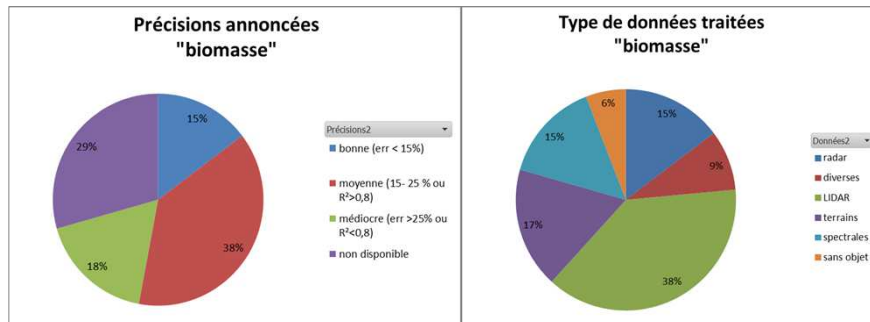
Exemple emblématique : suivi global annuel déforestation



14

Axe 1 – résultats provisoires

Estimer la biomasse et les flux de carbone



- ➔ Précision carto attendue : +/-10% à 1ha résolution = jamais atteint
- ➔ LiDAR outil central dans la majorité des cartographies à l'échelle locale
- ➔ **Combinaison de plusieurs outils pour les changements d'échelle :**
Terrain → LiDAR (local) → Radar (régional) → Spectrale (wall-to-wall)
- ➔ Besoin de données terrain précises et représentatives pour développer des modèles fiables (> 150 – 200 tms/ha)
- ➔ En développement rapide : analyse de texture sur optiques THR + satellite radar BIOMASS prévu en 2020

15

Axe 1 – résultats provisoires

Exemple emblématique : combinaison LiDAR-Landsat-SRTM

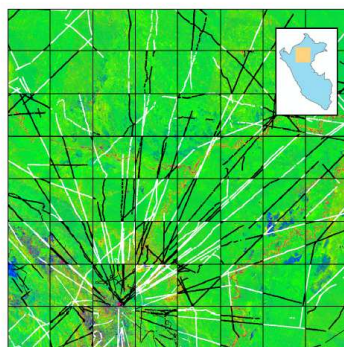


Figure 1. Fractional cover of photosynthetic vegetation (PV; green), non-photosynthetic vegetation (NPV; blue), and bare substrate (S; red) of our focal study region in Northern Peru. The inset shows the location of the focal area within Peru. The region spans 16 million ha of ecological heterogeneity within the Marañon and Ucayali Watersheds. For carbon modeling purposes, airborne LiDAR data from CAO were divided using a checkerboard configuration, with 694,243 ha of calibration data (white) and 669,943 ha of validation data (black).
doi:10.1371/journal.pone.0085993.g001

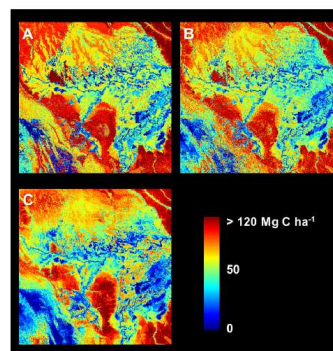


Figure 4. Predicted carbon stocks using three different methodologies. (a) Stratification and mapping of median carbon stocks in each class, (b) Random Forest without the inclusion of position information, (c) Random Forest using additional model inputs for position.
doi:10.1371/journal.pone.0085993.g004

OPEN ACCESS Freely available online

PLOS ONE

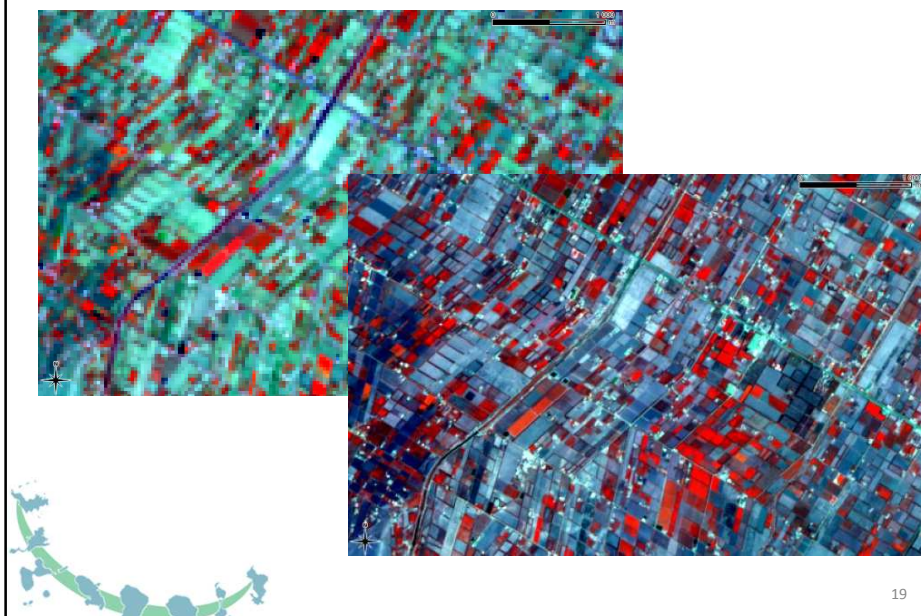
A Tale of Two "Forests": Random Forest Machine Learning Aids Tropical Forest Carbon Mapping

Joseph Mascaro¹, Gregory P. Asner, David E. Knapp, Ty Kennedy-Bowdoin, Roberta E. Martin, Christopher Anderson, Mark Higgins, K. Dana Chadwick

¹ Department of Global Ecology, Carnegie Institution for Science, Stanford, California, United States of America

16

Axe 1 – résultats provisoires



Axe 2 – situation outre-mer

Présentation des résultats provisoires

Situation par thématique

- Cartographie de la diversité
- Suivi des surfaces forestières
- Stocks et flux de carbone forestier

Gouvernance par territoire

- Variabilité des niveaux de structuration (en cours)
- Diversité des acteurs (en cours)

Quelle place pour un observatoire inter-régional ?



20

Axe 2 – cartographier la diversité

Données terrain récoltées et disponibles

Territoires	Réseau placettes permanentes	Campagne d'échantillonnage à valeur statistique	Autres inventaires
Martinique	Projet 40 x 2400m ²	(1974) na	Inventaires d'aménagement éparés
Guadeloupe	10x 1 ha + 12x 200-400m ²	(1970) 2 408 ha à 0,4% (1974) 14 112 ha à 1,2%	47 placettes floristiques 800 m ² (Rousteau 1996)
Guyane	45 x 1-25 ha	(1970) 3 Mha à 1/1000 ^e (1972-76) 120 000 ha 0,8% + 472 000 ha 0,2% (2006-2015) 3132 x 0,2 ha	49 045 ha à 5%
La Réunion	nd	(2014-2016) ~169 relevés phytosociologiques en forêt (100- 200m ²)	Inventaires d'aménagement éparés
Mayotte	Programmé ORF		(2010) 200 placettes AGRIFOR (np)



21

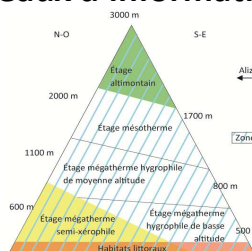
Axe 2 – cartographier la diversité

Plusieurs niveaux d'information

Exemple de la Réunion

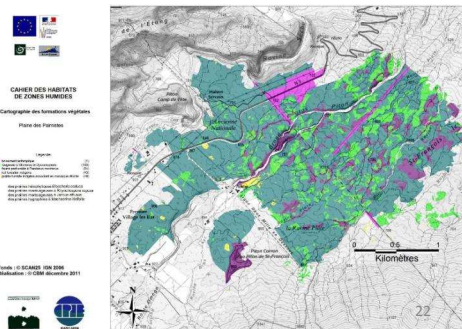


Niveau 1 : carte de végétation



Niveau 2 : les zonages écologiques (habitats potentiels)

Niveau 3 : habitats réalisés



Axe 2 – cartographier la diversité

Niveaux d'information produits

Territoires	Niveau 1 : végétation	Niveau 2 : zonage écologique	Niveau 3 : carte des habitats	Remarques
Guadeloupe	Diagnostic forestier (IGN, 2014)	Unités écologiques (Rousteau, 1996)	Habitats éco-régionaux (ONF, 2015)	Le niveau 3 résulte du croisement des niveaux 1 et 2 sans relevés complémentaires
Martinique	Diagnostic forestier (IFN, 2008)	Carte écologique (Portecop, 1978)	ND	Pas de carte écologique plus précise depuis 1978
Guyane	Expertise littorale et foncière (ONF, 2011)	Cartes géomorphologiques (Guitet et al 2013)	Cartes des habitats forestiers (ONF, 2014) Cartes des habitats particuliers (PAG, 2016)	Plusieurs autres cartes thématiques sont aussi disponibles
La Réunion	Occupation du sol (Lagabrielle 2008)	Carte des milieux naturels (Strasberg 2000 reprise PNR 2012)	Cartes des habitats littoraux (Bureaux d'étude 2013,14,15)	Les cartes des habitats littoraux couvrent moins de 1% du territoire
Mayotte	Carte AGRIFOR (CIRAD 2010)			La carte AGRIFOR intitulé typologie des espaces boisés intègre les différentes approches (voir ci-après)



23

Axe 2 – cartographier la diversité

Niveau formation végétale

CARTES de VEGETATION/OCCUPATION par photo-interprétation : Antilles & Guyane



← BDortho panchromatique (ONF Guyane 2011)

BDortho PIR (IGN Guadeloupe 2014) →

SPOT5 MIR/PIR/G (ONF Guyane 2011) ↓



Forêt semi-décidue

Deux essences caractéristiques de cette formation ont une signature radiométrique reconnaissable

← Tendre à caillou (acacia muricata)

← Campêche (haematoxylum campechianum)

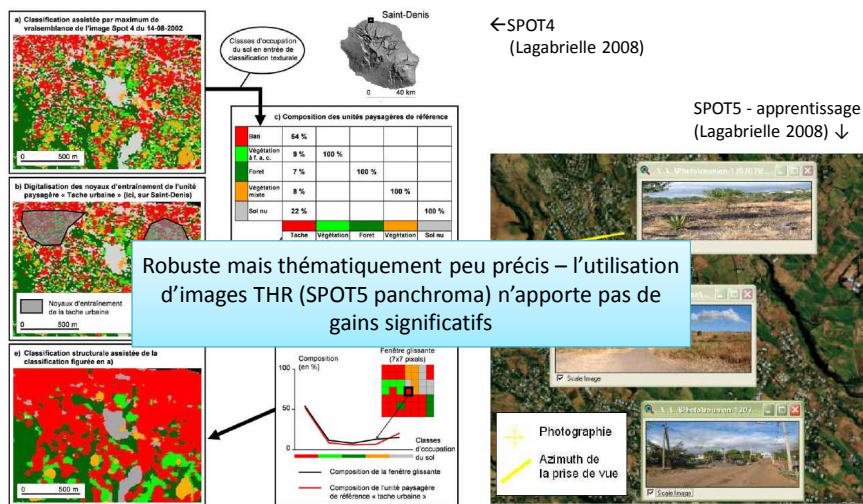
Spatialement et thématiquement précis mais robustesse discutable (manque de données validation)

24

Axe 2 – cartographier la diversité

Niveau formation végétale

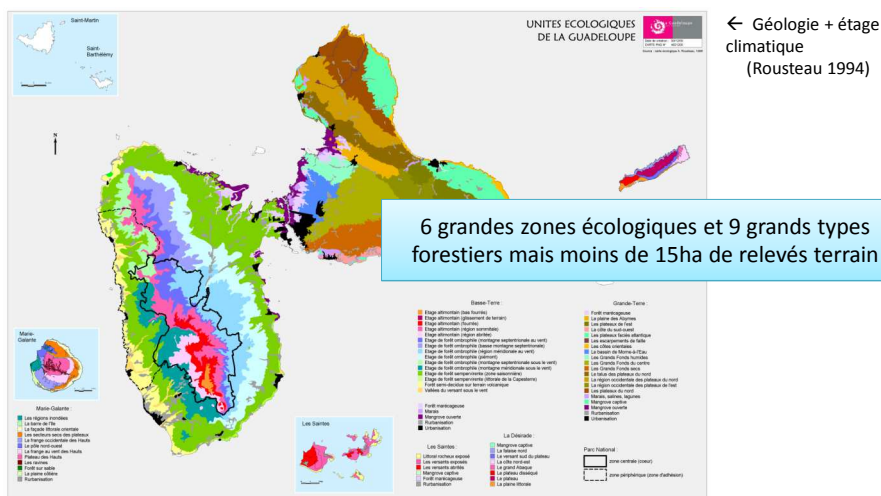
CARTES de VEGETATION/OCCUPATION par classification supervisée (Ile de la Réunion)



Axe 2 – cartographier la diversité

Niveau zonage écologique

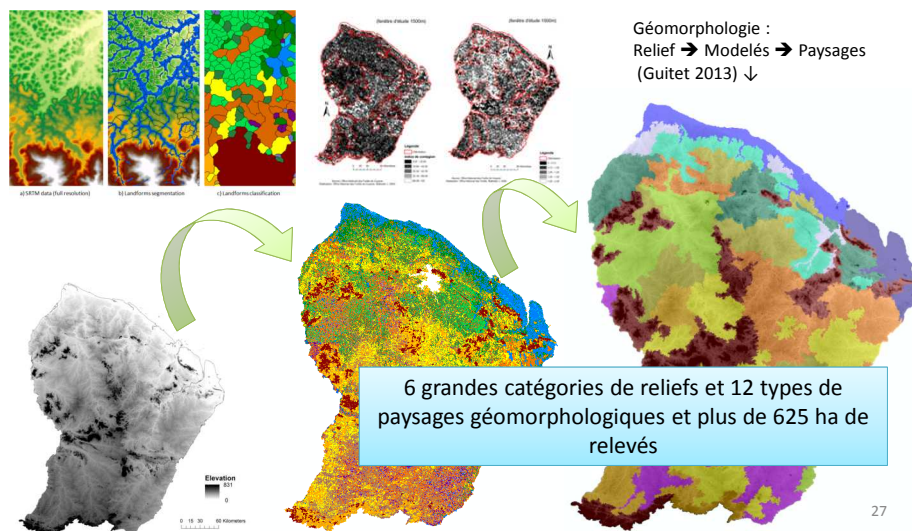
ZONAGE ECOLOGIQUE : approche experte (ex Guadeloupe, aussi île de la Réunion)



Axe 2 – cartographier la diversité

Niveau zonage écologique

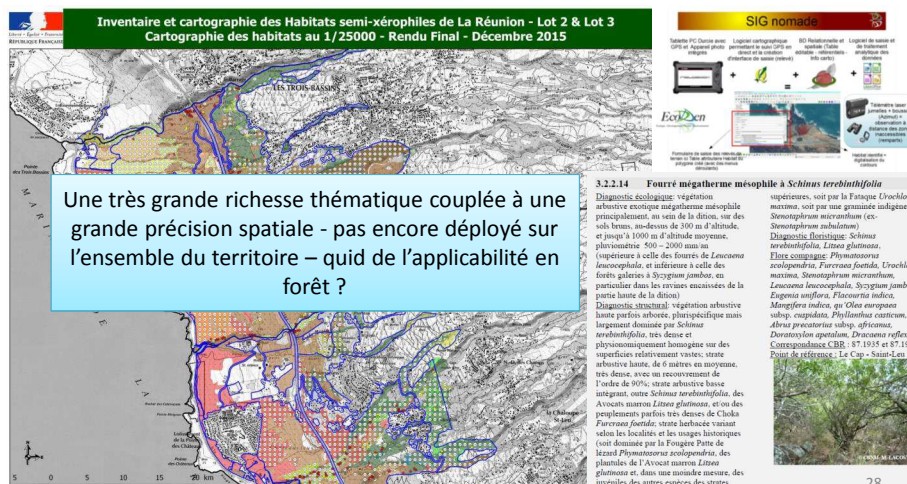
ZONAGE ECOLOGIQUE par modélisation



Axe 2 – cartographier la diversité

Niveau habitats

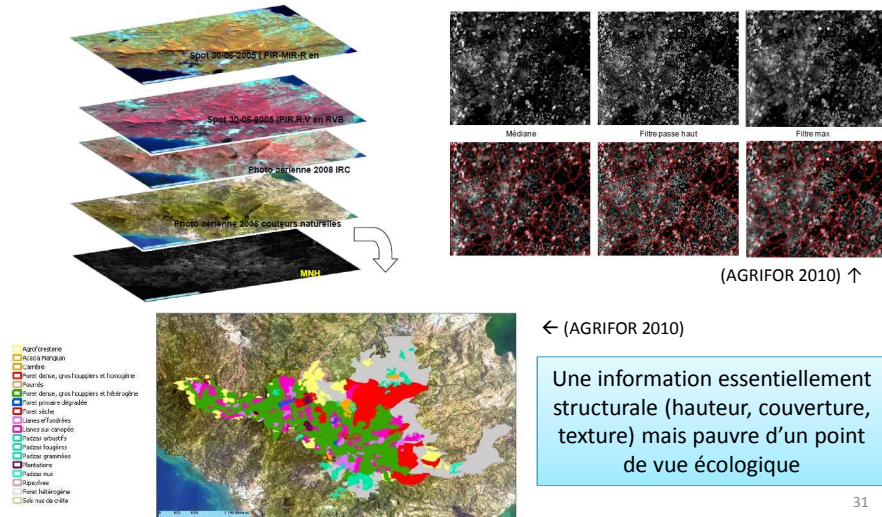
CARTOGRAPHIE des DIRECTE SUR le TERRAIN (La Réunion)



Axe 2 – cartographier la diversité

Niveau habitats

CARTOGRAPHIE des HABITATS par segmentation de relevés LIDAR et fusion avec images optiques (Mayotte)



Axe 2 – cartographier la diversité

Constat provisoire

- **Des niveaux de précisions variables :**
 - Habitats complets (Guyane, Mayotte)
 - Incomplets – en cours de déploiement (Réunion, Guadeloupe)
 - Incomplets – très anciens (Martinique)
- **Des entrées typologiques différentes :**
 - plutôt Structurale (Mayotte)
 - plutôt Phytosociologique (Réunion)
 - plutôt Abiotique (Guadeloupe)
 - Abiotique & Structure & Composition (Guyane)
- **Des méthodes /outils diversifiés :**
 - Expertise – interprétation (Guadeloupe)
 - Cartographie terrain (Réunion)
 - Télédétection (Mayotte)
 - Modélisation + télédétection (Guyane)
- **Une constante : trop peu de données terrain utilisables**
- **Des gradients écologiques partagés = lien entre les typologies**



Guyane	Martinique	Guadeloupe	Réunion	Mayotte
Mangroves	Mangrove	Mangrove		Mangrove (h < 3m)
				Mangrove (h 3 - 6 m)
				Mangrove (h 6 - 10m)
				Mangrove (h > 10m)
Forêts inondables ou inondées		Forêt de bas-fond sur substrat calcaire	Zones humides	
		Forêt marécageuse		
Forêts sur cordons sableux	Forêt de plaine	Forêt littorale	Végétation littorale	Tanne et mangrove supralittorale
Forêts littorales sur sols rocheux				
	Forêt sèche basse	Forêt semi-décidue	Forêt semi-sèche	Espace boisé (5-10m ou h>10m)
	Forêt sèche haute		Forêt semi-sèche des fonds de cirques	Peuplement à forte hétérogénéité horizontale (5-10m ou h>10m)
			(mégatherme semi-xérophile)	Tache de peuplement
Forêts de la plaine côtière ancienne	Forêt moyennement humide ou humide	Forêt sempervirente saisonnière	Forêt tropicale d'altitude (mégath. hygroph.)	
Forêts basses sur sable blanc, cuirasse ...		Forêt ombrophile	Forêt tropicale de moyenne altitude au vent	
Forêts hautes des collines et vallées / des plateaux / des montagnes ...		Forêt de vallée	Forêt tropicale de moyenne altitude sous le vent	
Forêt sub-montagnarde	Formation semi-arborée d'altitude	Forêt altimontaine	Forêt tropicale de montagne au vent (mégath. xéroph.)	
			Forêt tropicale sous le vent	
		Peuplement à mahogany		Peuplement acacia mangium
		Espaces sylvicoles divers	Forêt à acacia heterophylla	Plantation en autres essences

33

Axe 2 – suivre les surfaces forestières

Données et sources disponibles

Territoires	Etude	1950	1951	1988	1989	1990	2001	2002	2004	2005	2008	2010	2011	2012
Martinique	IFN 2008*		x						x					
Guadeloupe	IGN 2014*	x		x					x			x		
Guyane	ONF 2013**					x	x			x	x		x	x
La Réunion	Univ 2007			x				x						
Mayotte	Agritrop 2010										x			

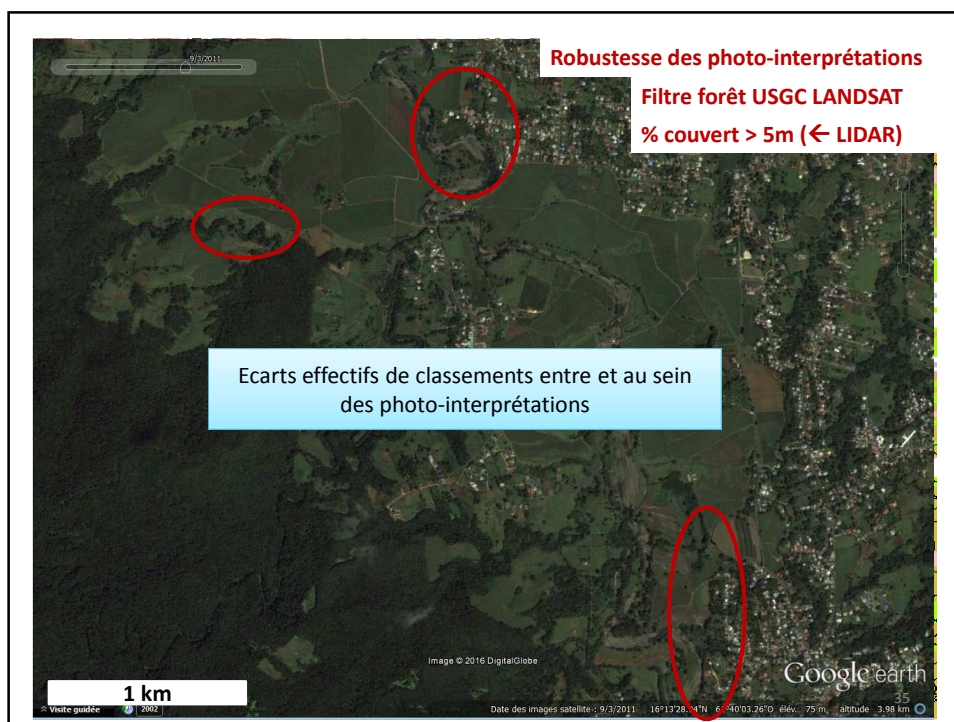
Sources :

- Photo-aériennes IGN : 1950-1951 (Martinique, Guadeloupe)
- BDOrtho : 2004-2005 (Martinique, Guadeloupe, Guyane) – 2010 (Guadeloupe)
- SPOT4-5 : 2001-2002-2008-2011-2012 (Réunion, Guyane, Mayotte)
- LANDSAT : 1990 Guyane

Autres sources disponibles : statistique AGRESTE (problème de biais)

Problème de régularité, de périodicité et de fréquence → sous-estimation des flux

34



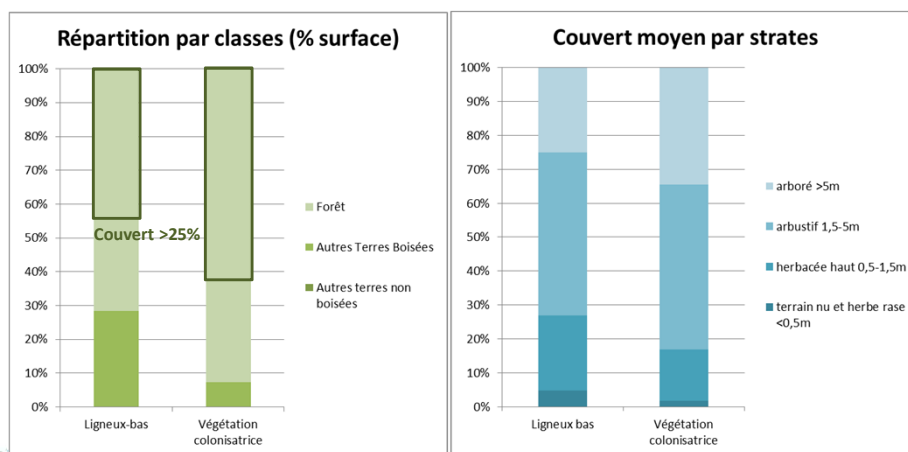
Axe 2 – suivre les surfaces forestières

	Guyane	Martinique	Guadeloupe	Réunion	Mayotte
mangroves	Mangroves	Mangrove	Mangrove		Mangrove (H moyen < 3m)
					Mangrove (H 3 - 6 m)
					Mangrove (H 6 - 10m)
					Mangrove (H > 10m)
agro-forêts	système cultural et parcellaires complexes (abattis)	Formation arborée avec habitations	Forêt des zones agricoles ou d'habitation (parfois confondu avec forêt)	Agroforêts, friches, etc.. non cartographiées mais 51 000 ha inscrits dans le FRA en ATB	Agroforêts comprises dans les espaces boisés (5-10m) mais ventilées dans les ATdca
	agriculture avec présence de végétation (abattis itinérants)	Formation arborée sur terrain agricole			
vég. dégradée	Milieux naturels dégradés	Friche avec fort couvert de ligneux bas	Friche à ligneux bas		Sol nu sur padza
		Friche après bananeraie			Prairie sur padza
		Friche après autre culture			Fougeraie sur padza
		Autres friches ou savanes			Buisson sur padza (hauteur moyenne < 1,5 m)
Formations basses	Savanes sèches / non-dables	Autre friche ou savane	Formation basse colonisatrice	Savane à latanier	Végétation basse (< 1,5m) ou arbustive claire
	Végétations basses ou arbustives ou fourrés		Fourré littoral et	Fourrés perhumides à	Végétation basse en réserve forestière.
		Hétérogénéité des classements dans les rapports FRA (voir IGDOM)			e Peuplement arbustif ou arboré très clair
	Roches nues, savanes-roches				
		Pelouse altimontaine	Bas fourré d'altitude	Prairie altimontaine	
		Autres	Fourré d'altitude	Végétation éricoïde	
				Végétation éricoïde sur lapillis	

Forêts AT Boisées AT dotées de couvert d'arbres AT non-boisé

Axe 2 – suivre les surfaces forestières

Ex Guadeloupe IGN 2014



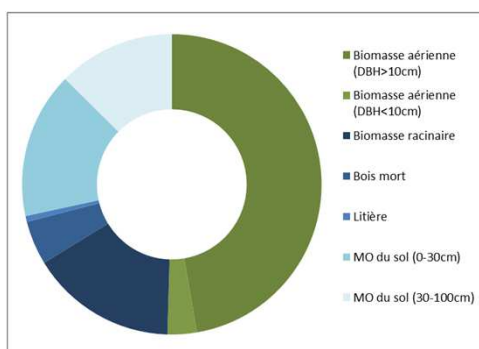
Des écarts importants entre définitions et pratiques : exemple des végétations basses

37

Axe 2 – évaluer stocks et flux de carbone

Rappels et définitions

Les différents bassins de carbone forestier



Les différents niveaux de précisions

TIER 1
Valeurs moyennes IPCC
TIER 2
Valeurs moyennes propres au territoire
TIER 3
Modèles et informations spatialement explicites

Les différents volets du secteur Forêt :

- UTCF : changements d'affectation des terres
- REDD : boisement, reboisement, déboisement
- REDD + : gestion, dégradation, restauration

38

Axe 2 – évaluer stocks et flux de carbone

Des enjeux très différents selon les territoires

Territoire	Bilan UTCF tot CITEPA (ktCO ₂)	Part bilan territoire	Rapportages locaux	Bilan UTCF forêt (ktCO ₂)	Précision
Martinique	127	5%	Madinair 2012	nd	nd
Guadeloupe	112	4%	Colomb & Martel 2012	266	Tier 2
Réunion	13	<1%	SRCAE 2013	0	Tier 1
Guyane	3 200	80%	OREDD 2016	1 800 (-700)	Tier 2-3
Mayotte	85	20%	ISODOM 2011	nd	nd
Métropole	-58 000	- 20%		-69 000	



Des incertitudes importantes dans les DOM – un rapportage à consolider (cf audit CNUCC) – des enjeux forts sur certains DOM (Mayotte - Guyane)

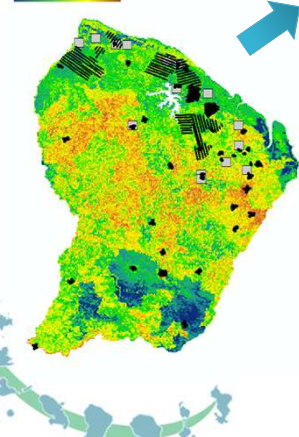
39

Axe 2 – évaluer stocks et flux de carbone

Méthodes d'estimation des stocks et flux en Guyane

1. Réseau de placettes à valeur statistique
2. Allométries régionales (Molto 2013)
3. Modèle spatial (Guitet et al 2015 SRTM + LiDAR Fayad et al 2016)

100tMS 500tMS



6. Emissions sur matrice de changement (OREDD 2016)
7. Modélisation des reconstitutions (CIRAD 2016)

$$Y = (-4.4748 + 0.0008412 \times T) \times 1.080305^{(T/100)} (T \geq 10)$$

Où T est le temps écoulé depuis la coupe à blanc en année

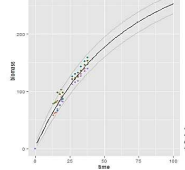
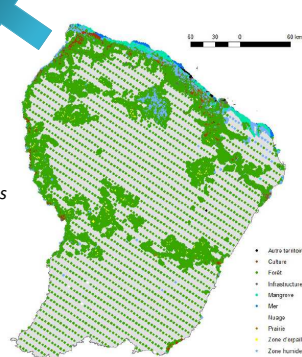


Figure 12: Reconstitution de la matrice de la biomasse à partir des données du dispositif OREDD

4. Réseau de points d'observation
5. Mosaïque d'image data à date
6. Matrice de passage inter-types (ONF-IGN 2015)

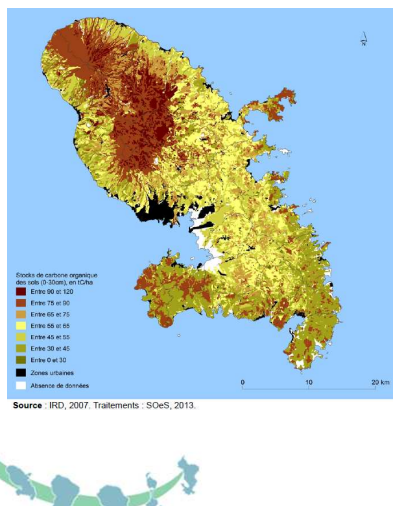


40

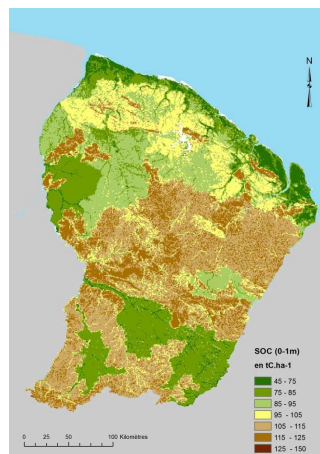
Axe 2 – évaluer stocks et flux de carbone

Estimation des stocks dans les sols

855 profils avec calcul de stocks C (0-30cm) en Martinique



450 profils et seulement 37 mesures de stocks C (0-100cm) pour la Guyane



41

Axe 2 – évaluer stocks et flux de carbone

Constat provisoire

- **Standardiser les mesures et rapportage dans les DOMs :**
 - Pas de suivi des normes IPCC (ex effet puit en forêt naturelle)
 - Tier 3 pour les territoires à enjeux (Guyane + Mayotte)
 - Tier 2 ou 3 ailleurs ? (Guadeloupe, Martinique, Réunion)
- **Améliorer la qualité du suivi et réduire les incertitudes :**
 - Besoin d'inventaires forestiers ad hoc (IFN) si on vise le Tier 3 (accroissement et statistiques de récoltes)
 - Trop faible fréquence des suivis (sous-estimation des flux)
- **Produire des connaissances sur les stocks des bassins secondaires**
 - Compartiment sol en premier lieu : mesures de stocks disponibles mais pas de mesure de dynamique (RMQS)
 - Bois mort non intégré dans les estimations
 - Partie racinaire non négligeable mais non étudiée

■ **Essai de mutualisation des méthodes et des données à poursuivre**

42

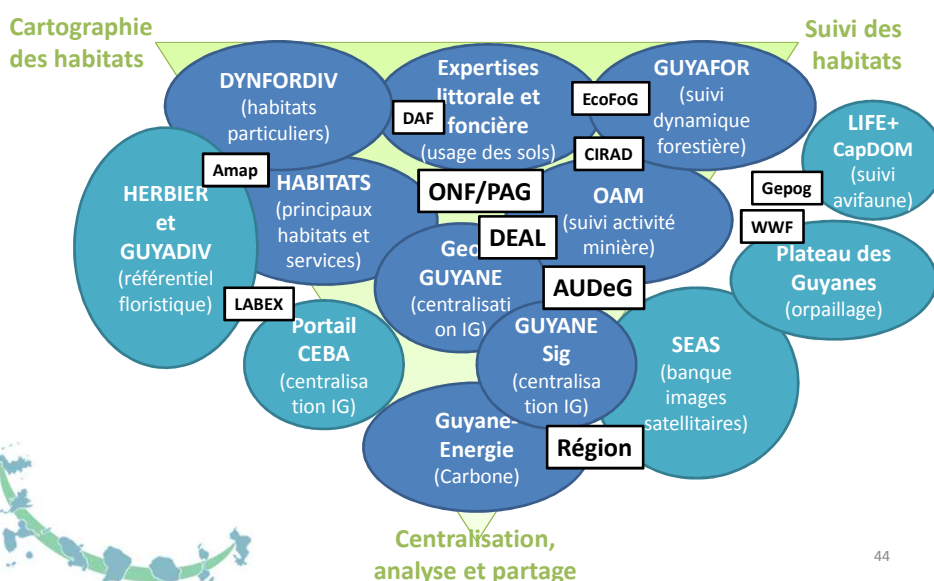
Axe 2 – constat général sur les productions

- **Les données LIDAR** fournissent des données utiles à la carto des végétations et à la caractérisation des types forestiers mais sont à eux seuls insuffisants pour une approche habitats
 - Assure robustesse et objectivité (relatives) aux cartes de végétation
- Seules les formations les plus simples et/ou extrêmes peuvent être cartographiées par **télédétection optique** : peuplements mono-dominants et homogènes ; formations très ouvertes...
 - la résolution spatiale est moins importante que la résolution spectrale : importance du MIR – résolution 20-30 m suffisante
- La cartographie des grands gradients de composition/structure liés aux zones écologiques implique nécessairement **la collecte de données terrain représentatives**
 - Échantillonnage insuffisant sur plusieurs territoires
 - Des gradients partagés entre les différents territoires
- **Complémentarité des approches développées dans les territoires** mais peu d'échanges méthodologiques mêmes entre voisins

43

Axe 2 – gouvernance par territoires

GUYANE : Des outils déjà en place et en évolution, de nombreux projets



44

Axe 2 – gouvernance par territoires

Les acteurs en place sur les territoires

Territoires	Guadeloupe	Martinique	Guyane	Réunion	Mayotte
Cartographie : - Diversité - Carbone	CG/IGN/ONF/UAG (CIRAD)	CG-IFN	ONF-PAG-Amap	CNBM/UR/DEAL Nd	CG/CIRAD Nd
Suivi : - Surfaces - Dynamique	(CG-IGN-ONF) PNG-ONF-UAG	Nd Nd	ONF-IGN EcoFoG-ONF (Guyafor)	Nd Nd	Nd Nd
Portails environnement	DEAL	Centralisation DEAL-SINP		DEAL → CNBM-CPIE (Mascarine Catediana)	DEAL (Geo-mayotte)
Observatoires - Carbone - Sol - Diversité	Nd INRA-CIRAD-IRD-BRGM (OPA-C) Nd		Des CT qui tardent à s'emparer des outils (sauf Guyane) OBAG	CNBM/GIER	CNBM
Accès images satellites	SEAS un outil transrégional en cours d'évolution		AS-Guyane)	IRD (SEAS-OI)	

45

Axe 2 – gouvernance par territoires

Les acteurs en place sur les territoires (à compléter)

Territoires	Guadeloupe	Martinique	Guyane	Réunion	Mayotte
Cartographie : - Diversité - Carbone	Harmonisation typologique – Guide méthodologique				SNP - MNHN
Suivi : - Surfaces - Dynamique	IGN-MAAF	Un suivi annuel complémentaire au suivi quinquennal ? Une aide à la mise en place des réseaux de suivi ?			
Portails environnement	Eviter les redondances avec le local et national = coordination entre portails				SINP - GeoPortail
Observatoires - Carbone - Sol - Diversité	ONB	Travailler avec les observatoires locaux – aider à l'émergence des ORE - compléter les thématiques – faciliter les échanges et transferts – spécialiser des pôles?			
Accès images satellites	Articulation SEAS-Collectivités – Animation technique				ESA - Théia

46

Axe 3 – analyse méthodologique

Présentation des résultats provisoires

Tests ECOFOR sur nouveaux capteurs (H. Bennacer - Mayotte)

- Détection de changements sur LANDSAT 8 (en cours)
- Cartographie des formations végétales avec SENTINEL2
- Apport du radar SENTINEL1 pour la cartographie des formations

Tests par les acteurs locaux sur nouveaux capteurs (Guyane)

- Détection de changements forestiers à partir de TerraSAR (ONF)
- Cartographie des formations végétales avec Sentinel2 (PAG)
- Analyses de grain de canopée sur SPOT 6 (Amap – en cours)

Expérience en cours sur St Pierre et Miquelon (ONFI)

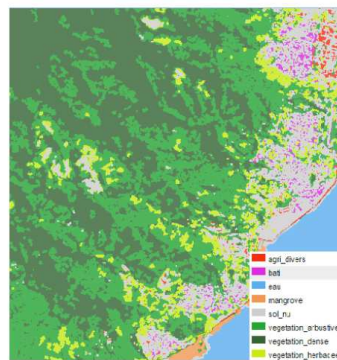
Conclusions concernant les outils télédétection



47

Axe 3 – tests nouveaux capteurs

Classification sur SENTINEL 2 (H. Bennacer ECOFOR)



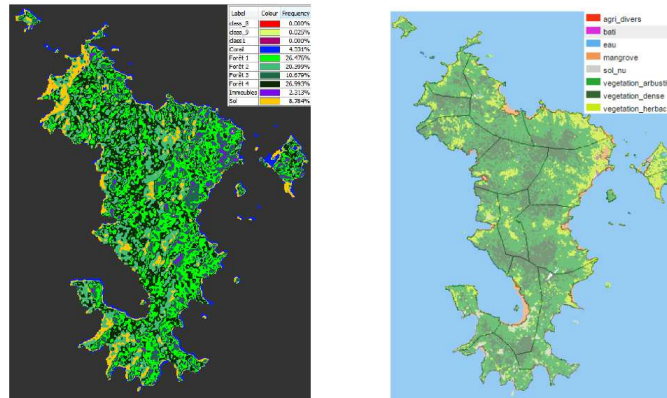
Fort potentiel – efficacité prometteuse (kappa 0,85) – des améliorations à poursuivre (confusion mangrove /sol nu / route)



48

Axe 3 – tests nouveaux capteurs

Classification sur SENTINEL 1 (H. Bennacer ECOFOR)



Résultats beaucoup moins satisfaisants – manque de détail et effets artefactuels – beaucoup de développement nécessaire

49

Axe 3 – tests nouveaux capteurs

Suivi des changements sur TerraSAR (C. Bedeau ONF)

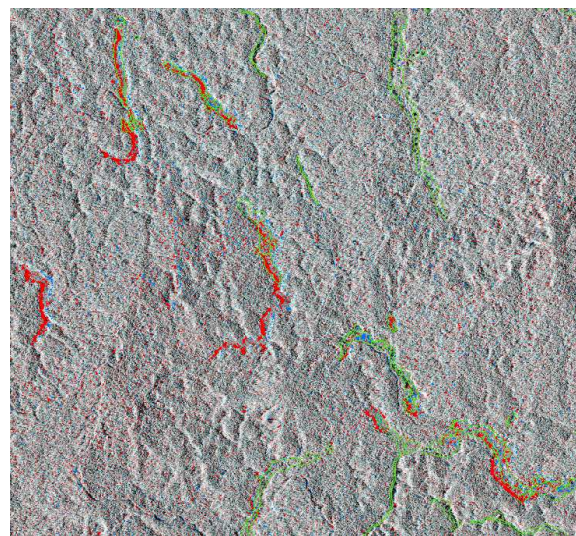
- Réduction de canopée
- Recru
- Limite exploitations minières (2014)

→ Efficacité excellente :

- Facilité d'accès à l'image
- Rapidité de traitement

→ Limites :

- Images payantes (négo)
- Sensible à la pluie (saisonnalité)
- Contrôle des conditions d'acquisition (identiques sur les deux images)
- Artefacts ou bruit lié à la dynamique naturelle ?



Axe 3 – tests nouveaux capteurs

Cartographie des formations avec SENTINEL 2 (N. Karaziak - P. Perbet PAG)

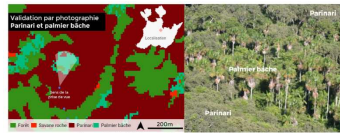
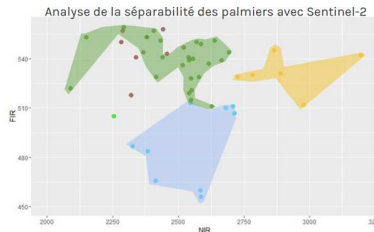
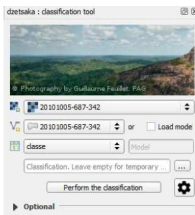


Figure 20 : Validation par photographie aérienne



- Palmier bêche
- Palmier pinôt
- Parinari
- Forêt

→ Développement d'un Plug-In par le PAG sur la base de leurs travaux sur SPOT5 :

- Rapidité et diversité de traitement : RF/SVM/GMM – gestion des masques
- Tests positifs sur images Sentinel 2 = séparabilité des formations de palmiers

→ Limites :

- Multiplier les acquisitions pour dépasser les pb de paramètres d'acquisition (BRDF)
- Problèmes de calage et de doublonnage sur certaines zones.

51

Axe 4 – propositions – suite à donner

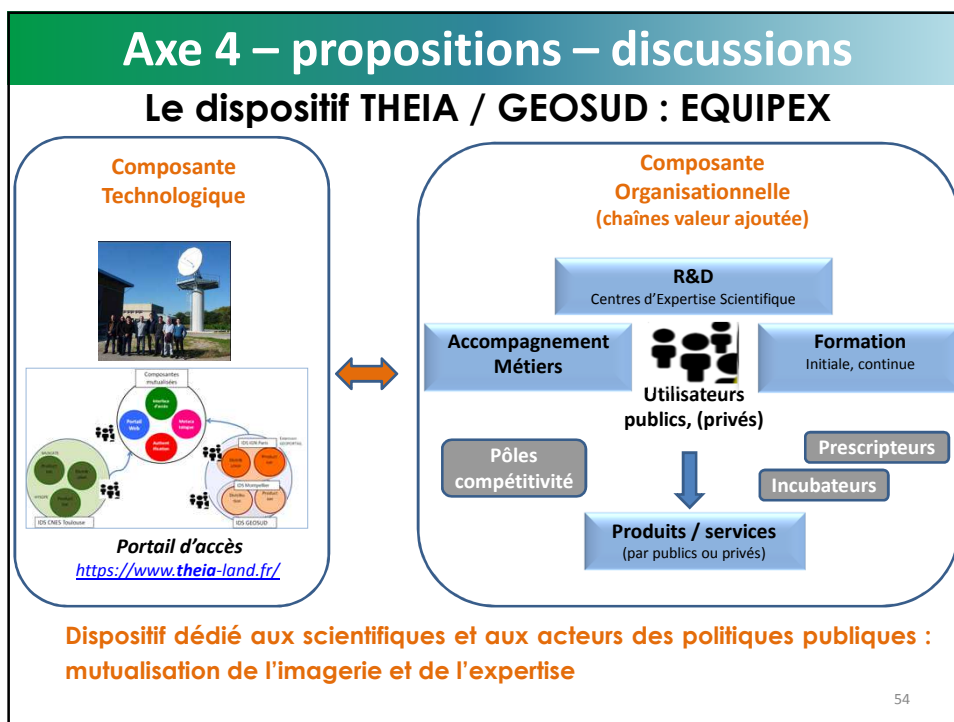
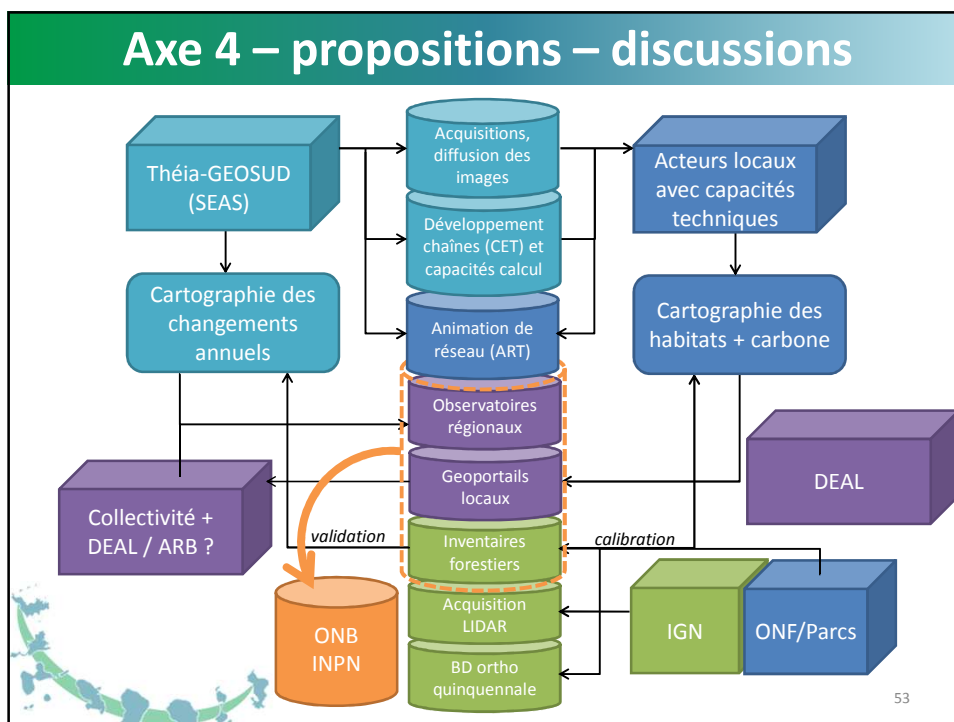
Outils et méthodes

- Besoin de **données terrain de référence** = renforcement des réseaux de placettes par les **acteurs locaux**
- **Formaliser et diffuser** aux acteurs locaux **les outils de cartographie** par télédétection : scripts existants → chaînes de traitement complètes
- Assurer une **acquisition régulière (pluri-annuelle) d'un bouquet d'images** (LANDSAT, Sentinel) et la mise à disposition des archives (SPOT5) niveau 2A
- Fournir des **capacités de traitement** (compétences & capacités informatiques)
- Harmoniser les méthodes et **animer les échanges** entre territoires

Gouvernance

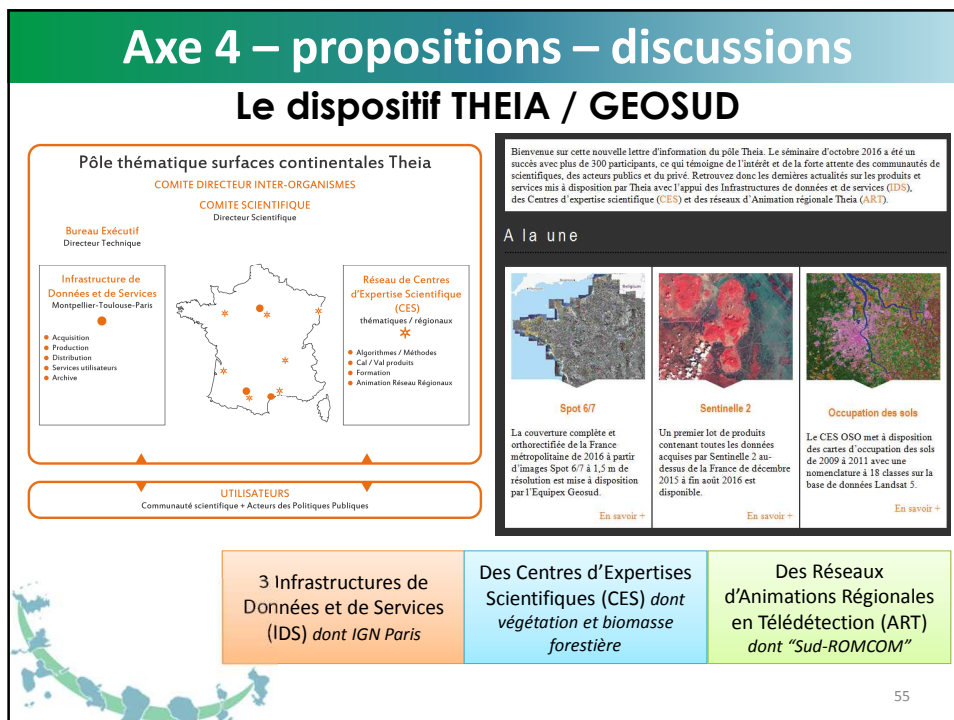
- De nombreux acteurs locaux légitimes pour prise en charge opérationnelle
- Des structures nationales sur lesquelles s'appuyer
- Un rôle **d'animation de réseau** et d'appui à la réalisation

52



Axe 4 – propositions – discussions

Le dispositif THEIA / GEOSUD



Axe 4 – propositions – discussions

Le dispositif Copernicus de l'ESA

EUROPEAN SPACE AGENCY ABOUT US OUR ACTIVITIES CONNECT WITH US FOR MEDIA FOR EDUCATORS FOR KIDS

copernicus
observing the earth

ESA OBSERVING THE EARTH COPERNICUS

+ About Copernicus

+ Sentinel satellites

+ Contributing Missions

+ Ground Segment Infrastructure

- Services through Copernicus

- Services overview
- Marine services
- Land services
- Atmosphere services
- Emergency services
- Security services
- Climate services

+ Multimedia

FAQs

Contact us

ESA > Our Activities > Observing the Earth > Copernicus

Search here

In depth

- Sentinel-2 overview
- Sentinel3
- GMES/Service Element

Related links

- Copernicus land monitoring services
- GSE Forest Monitoring
- GMFS

Forest cover from space
GMES
forest test sites

Forest monitoring

Access the video

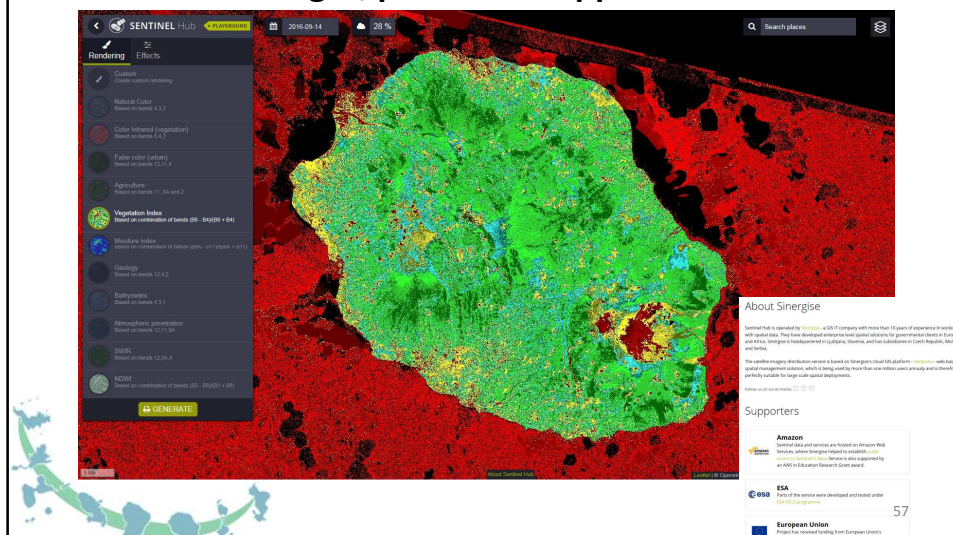
LAND SERVICES

The EU has established a series of environmental directives and policies such as the Water Framework Directive, Urban Thematic Strategy and Biodiversity Strategy to protect the natural environment and manage natural resources sustainably.

56

Axe 4 – proposition - discussions

SENTINEL Hub, un exemple à suivre pour la mise en ligne d'images, produits et applications ?



Axe 4 – propositions – discussions

Proposition de suite à donner - discussions

- **Rapprochement THEIA-GéoSud (partie télédétection)**
 - Ouvrir des discussions pour chiffrage
 - Détailler les contenus techniques – cahiers des charges
 - Discuter de cette articulation avec les acteurs locaux (création d'un ART DOM)
- **Rapprochement IGN-MAAF (partie données forestières)**
 - Articulation avec IGN – acquisition LiDAR ?
 - Articulation avec partie IFN et acteurs locaux – besoins de données de calibration
 - Chiffrage financements (MAAF-MEEM)
- **Organisation GIS et rapportage**
 - Rencontre INPN-ONB et discussion avec porteurs des géo-portails locaux
 - Discussion avec les porteurs des géoportails locaux

Des approfondissements nécessaires

- **Intégrer les petits territoires** (SPM, St Barth, St Martin, îles éparses)
- **Quid du suivi des espèces envahissantes → outils participatifs** (approfondissement des possibilités PI@nt-net)
- **Implication des territoires (rencontre acteurs)** → Approfondir l'enquête et échanger sur le projet - missions sur place ?

ANNEXE 8 : PRESENTATION ET CR DU 2^{EME} COPIL ETENDU 27/11/2016



2e COPIL CartHaForUm

Cartographie régulière des Habitats
Forestiers Ultra-Marins



Paris, le 8 Décembre 2016
1

Rappels Objectifs

Réflexions pour la constitution d'un « observatoire » des forêts ultra-marines

- « Cartographie régulière des habitats forestiers des départements ultra-marins, de Saint-Pierre-et-Miquelon, des îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy ainsi que des TAAF (Iles Éparses) »
- « Mettre à disposition (du MEEM) une base de connaissances et de travaux sur le suivi des habitats forestiers »
- « Produire un cahier des charges et une méthodologie pour la réalisation d'une cartographie régulière des habitats ultra-marins par les Agences françaises locales de la Biodiversité ou tout autre structure en lien avec les élus »



2

Rappels Finalités

Un « observatoire » pour quoi faire ?

- « Fournir aux administrations et aux élus les éléments de base pour les **politiques de gestion du territoire** et les différents **choix stratégiques** en termes d'aménagement »
- Faciliter la « **production de données** notamment dans le cadre de l'**ONB** et de la **LOA** loi d'avenir sur l'Agriculture, l'alimentation et la forêt » (...) « Dans le cadre des engagements internationaux, européens et nationaux »

Thématiques abordées :

Biodiversité (CDB et accords Aïchi) : lutter contre la perte de biodiversité, fragmentation des habitats, espèces envahissantes, déforestation → **SNB**

Changements climatiques et Carbone (REDD+) : réduction des émissions de gaz à effets de serre due à la déforestation et à la dégradation (secteur UTCF), impact des CC → **CNUCC**



3

Rappels 1^{er} COPIL

Présentation précédente

1 - Synthèse bibliographique thématique :

- Cartographie & modélisation des habitats forestiers
- Suivi des changements : dégradation/déforestation
- Stocks et flux de carbone forestier

2 – Etat des lieux sur la situation outre-mer :

- Cartographies et observatoires existants
- Acteurs en place et niveau de structuration

3 – Analyse méthodologique (reprise au 3^e COPIL) :

- Tests sur nouveaux capteurs
- Conclusions sur le potentiel des outils télédétection
→ Proposition d'un cahier des charges méthodologique

4- Proposition de Gouvernance et d'outils (sujet 2^e COPIL)

- Positionnement du COPIL avant contact / consultation territoire



4

Rappels 1^{er} COPIL – axe 1

Résultats principaux de la synthèse bibliographique

- La cartographie des habitats est techniquement possible par télédétection avec des approches multi-facteurs (classification) – la richesse spectrale des images (présence de MIR) est un facteur plus important que la résolution spatiale (résolution 20-30m suffisante).
- Pour le suivi des surfaces de nombreux protocoles à partir d'images LANDSAT ont déjà été développés et appliqués à large échelle – une haute fréquence d'acquisition des images (~10-15j) permet l'analyse de séries temporelles avec de bien meilleurs résultats que des comparaison date-à-date.
- En forêt tropicale à forte biomasse, la cartographie des stocks de carbone spatialement explicite nécessite l'acquisition de données LiDAR.

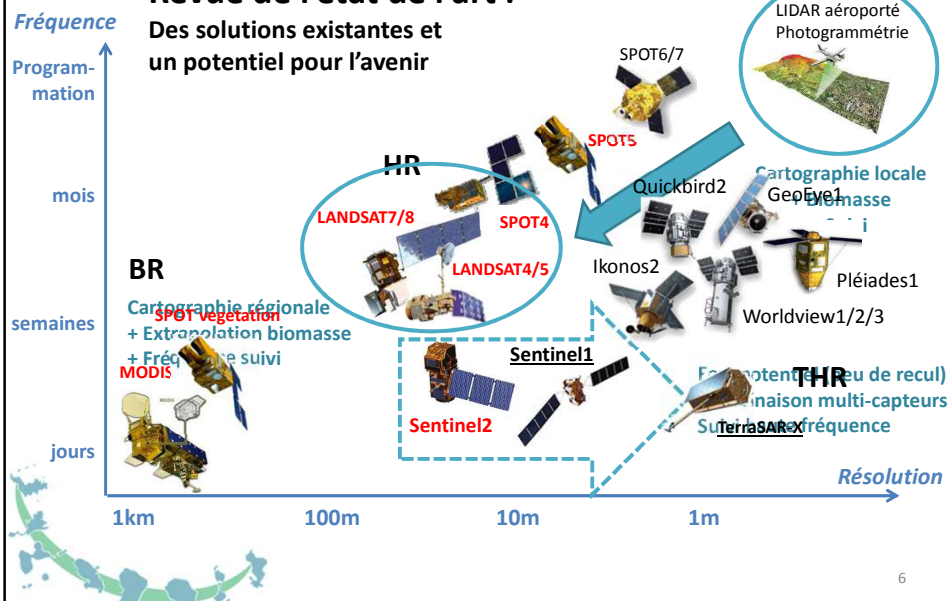


1

Rappels 1^{er} COPIL – axe 1

Revue de l'état de l'art :

Des solutions existantes et un potentiel pour l'avenir



•

Rappels 1^{er} COPIL

Discussions abordées (périmètre du projet)

- **Cartographie des habitats :**
 - *besoin d'harmonisation des principaux postes typologiques (nomenclature partagée pour les principales formations végétales – rapportage FRA)*
 - quelle **précision thématique** (notamment dans les postes de transition : friches, forêts secondaires...) ? Lien avec étude IGN
 - quelle **résolution spatiale** visée pour la restitution (0,1 / 0,5 / 1ha) ?
- **Suivi des habitats forestiers :**
 - Quelle **fréquence de suivi** (quinquennale, annuelle, double suivi) ?
 - Quelle limite adoptée pour la **définition des forêts** (FAO <> BD Forêt) ?
 - Doit-on inclure les **formations basses** peu ou non arborées (savanes, ...) ?
- **Rapportage carbone :**
 - *Le suivi Carbone (REDD et UTCF) doit être inclus dans le périmètre du projet*
 - Quel **niveau de précision attendu** (Tier) et doit-il dépendre des enjeux des territoires ?
- **Enjeu espèces envahissantes :**
 - *Doit-il être inclus dans le périmètre du projet ?*



9

Rappels 1^{er} COPIL – axe 4

Les acteurs en place sur les territoires (à compléter)

Territoires	Guadeloupe	Martinique	Guyane	Réunion	Mayotte
Cartographie : - Diversité - Carbone	Harmonisation typologique – Guide méthodologique				SNP - MNHN
Suivi : - Surfaces - Dynamique	IGN-MAAF	Un suivi annuel complémentaire au suivi quinquennal ? Une aide à la mise en place des réseaux de suivi ?			
Portails environnement	Eviter les redondances avec le local et national = coordination entre portails				SINP - GeoPortail
Observatoires - Carbone - Sol - Diversité	ONB	Travailler avec les observatoires locaux – aider à l'émergence des ORE - compléter les thématiques – faciliter les échanges et transferts – spécialiser des pôles?			
Accès images satellites	Articulation SEAS-Collectivités – Animation technique				ESA - Théia

10

Rappels 1^{er} COPIL

Discussions abordées (fonctionnement attendu)

- **Quel mode de fonctionnement avec les acteurs locaux ?**
 - Animer l'échange méthodologique entre les territoires (typologie, analyse du signal, classification)
 - Développer des méthodes *ad hoc* plus génériques et faciliter leurs réalisations par la mise à disposition de moyens sur les territoires (contractualisation) ?
 - Réaliser tout ou partie des carto en impliquant les territoires sur les phases terrain (structuration) ?
- **Quel support pour l'acquisition et la mise à disposition des images ?**
 - S'appuyer sur Théia-GéoSUD (Equipex – structure niveau national) ?
 - S'appuyer sur l'ESA et le projet Copernicus ?
- **Comment mutualiser les acquisition de données "terrain" :**
 - Intégrer des relevés "habitats" aux inventaires forestiers IGN-MAAF ?
 - Peut-on envisager l'acquisition mutualisée de couvertures LiDAR ?
- **Comment adapter le suivi aux espèces envahissantes ?**



11

Question 1 (précision thématique)

- **Cartographie des habitats : quel niveau de précision thématique ?**
 - **Niveau 1 : formations végétales (accent sur strates et vocations)**
 - Forêts** (feuillue décidue, feuillue sempervirente, conifère, mixte, mangroves, plantations), **Terres boisées** (savanes arborées, formations arbustives, friches agricoles), **Autres terres arborées** (agroforêts, jardins)
 - **Occupation du sol suffisante pour FRA** : Photo-interprétation THR et/ou classification HR avec validation terrain 'light'
 - **Niveau 2 : unités d'habitats naturels (accent sur dimension écologique)**
 - Zonage écologique** (étage climatique, géologie, géomorphologie ...), **contextes azonaux** (gradient drainage, immersion), **composition** (espèce dominante)
 - **Diversité des écosystèmes** : nécessite télédétection ET modélisation ET suffisamment de données terrain pour calibration/validation
 - **Niveau 3 : caractérisation de la végétation (accent sur qualité de l'habitat)**
 - Etat du couvert** : clair (< x%), incomplet, complet (> x%), **Hauteur de canopée** : forêt haute/basse, fourrés hauts/bas, **Stade sylv** : stade des formations colonisatrices
 - **Qualification pour aborder les notions de dégradation** : nécessite relevés LiDAR ou analyse de texture sur THR – analyse de série temporelle ...

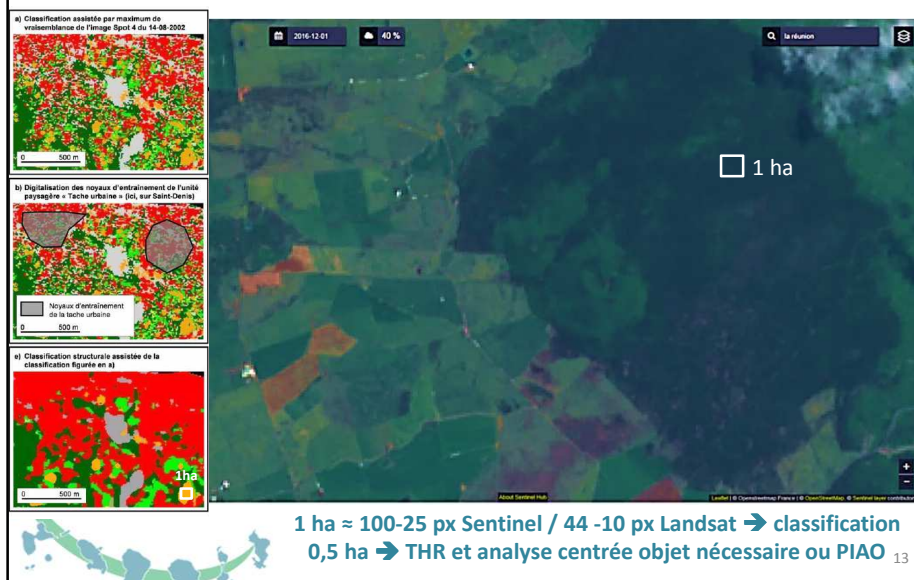


Rapport SNP du 07/12/2016

12

Question 2 (précision spatiale)

■ Cartographie des habitats : quelle résolution spatiale de restitution ?



Question 3 (fréquence des suivis)

■ Suivi des habitats : quelle fréquence de suivi des changements ?

En temps réel : modèle Observatoire de l'Activité Minière ou Hansen

1. système de veille sur les productions images
2. détection d'indices (ex NDVI) ou analyse de séries temporelles (ex ClasLite)
3. envoi des infos aux gestionnaires pour validation/interprétation/contrôle

Fréquence annuelle : modèle AgriPag

1. Sélection a posteriori des meilleures images produites
2. Détection des ouvertures
3. Numérisation, archivage et analyse de la dynamique

Fréquence quadri ou quinquennal : modèle IGN

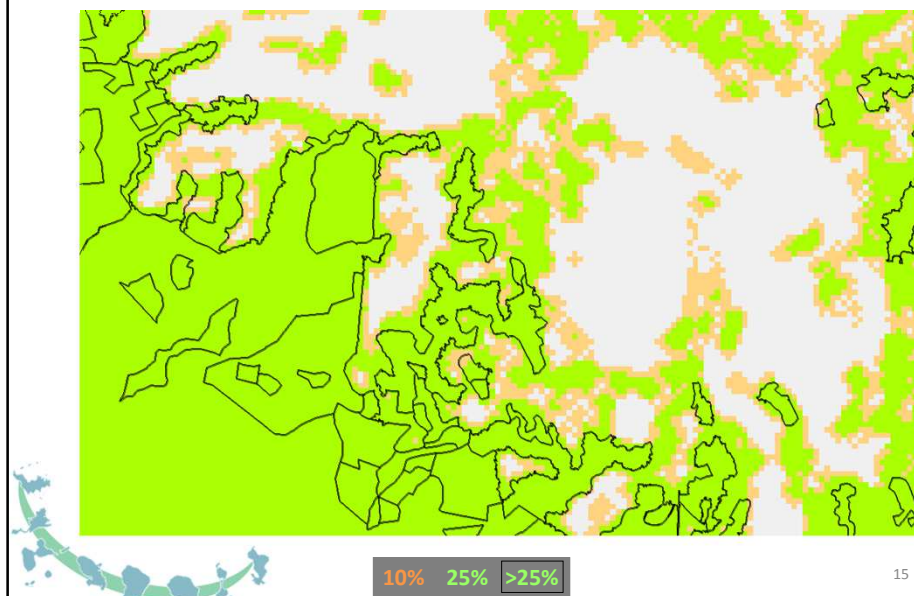
1. Production d'images très haute résolution
2. Interprétation des habitats et numérisation
3. Comparaison date à date



Temps réel	Annuelle	Pluriennale
Alerte	Pilotage	Constat tardif
Compilation annuelle des flux	Flux annuel pour le REDD	Flux sous-estimés pour REDD
Prévention dégradations	Qualification dégradation	Dégradation mal détectée

Question 4 (définition des seuils)

- Suivi des habitats : seuil forêt / non forêt – suivi formations non arborées ?

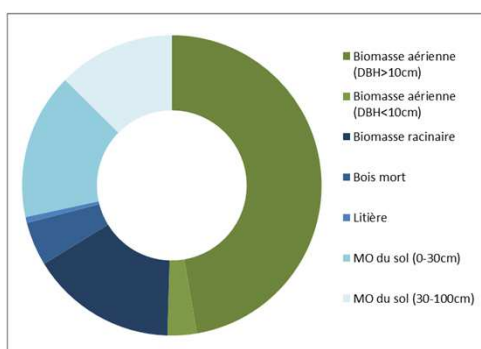


15

Question 5 (attendu carbone)

- Bilan Carbone : quel apport pour quelle précision ?

Les différents bassins de carbone forestier



Les différents niveaux de précisions

TIER 1

Valeurs moyennes IPCC

TIER 2

Valeurs moyennes propres au territoire

TIER 3

Modèles et informations spatialement explicites

Tier 1 – Suivi des changements d'occupation du sol et des dégradations (cœur du projet)

Tier 2 + Acquérir des données terrain par types d'habitats (projet IGN MAAF – quels compartiments ?)

Tier 3 + Développer des modèles de **prédiction** spatiaux et/ou dynamique → err 50t MS.ha⁻¹ (1 ha)
Ou développer des modèles **d'estimation** sur couverture LiDAR → err 30t MS.ha⁻¹

16

Question 6 (problématique EE)

■ Espèces envahissantes : intégration au dispositif ?

Pas de solution **téledétection** opérationnelle (images hyper-spectral) ...

... mais des **expériences “participatives”** à la Réunion

→ **Financements à chiffrer ? Méthodes à proposer ?**



Groupe Espèces Invasives de La Réunion
Préservez notre patrimoine naturel

Faire un signalement

Remplissez le formulaire suivant pour nous informer de votre signalement. En validant ce formulaire vous acceptez que les données (hors les informations personnelles) et photographies fournies soient du domaine public (information sur le domaine public).

Les photos ne seront utilisées que dans le cadre du GISE, sans activité commerciale, pour des outils de sensibilisation ou d'information dans le respect des droits d'auteurs (copyright).

SELECTION DU SIGNALLEMENT

FICHE DE SIGNALLEMENT

Remplissez le nom du rédacteur de cette fiche

Remplissez le nom de l'observateur du signalement

Remplissez le nom de l'observateur

Remplissez l'adresse email

Remplissez le numéro GSM

Remplissez le numéro fixe

Remplissez le numéro portable

OBSERVATION

Remplissez la date de l'observation (format : jour/mois/année)

Remplissez la date d'observation

Remplissez le lieu de l'observation (détaillez par la suite proposée)

Type d'observation : sélectionner le type

Remplissez la description de l'espèce (détaillez)

Remplissez le nom de l'espèce (ex : canard)

Zone Océan Indien

Documents à télécharger

La presse en parle

OFFRES

Emplois ou stages

Pl@ntNet

QR code

17

Question 7 (articulation avec le terrain)

■ Production cartographique : option de fonctionnement avec les territoires

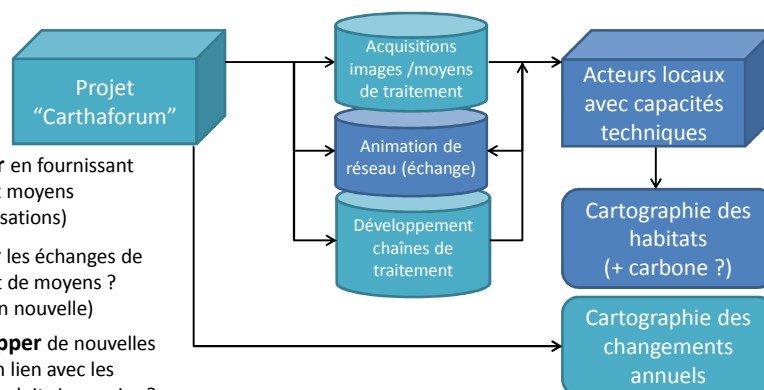
1 – Faciliter en fournissant méthodes et moyens (contractualisations)

2 – Animer les échanges de méthodes et de moyens ? (une fonction nouvelle)

3 – Développer de nouvelles méthodes en lien avec les nouveaux produits imageries ? (incitation financement recherche)

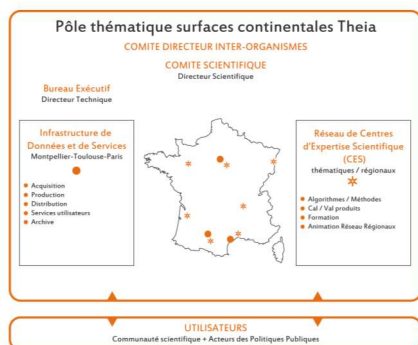
4 – Produire certains produits ou en cas d'absence de porteur local ? (poste structurel)

■ **Acteurs techniques en place (ONF, PN, CBN) ou acteurs institutionnels (CL-ARB) ?**



Question 8 (support technique)

- SEAS en local // Théia-GeoSUD en national // ESA-Copernicus ?



THEIA - Geosud		ESA - Copernicus
SPOT, Landsat, Sentinel	Imagerie	Sentinel
Animation régionale	Animation	Appels à projet
DataHub, clusters analyse	Services	DataHub
Centre d'Expertise	Développement	Appels à projet

19

Question 9 (coordination IGN-MAAF)

- Quelle complémentarité avec étude IGN-MAAF ?

Propositions IGN-MAAF	Contenu	Méthode	Compléments possibles avec Carthaforum
Brique 1	BD Forêt enrichie (classes FRA)	Photo-interprétation sur BD Ortho IRC	Co-financement LiDAR pour robustesse ? Fréquence de mise à jour
Brique 2	OCS-Ge enrichie : Cartographie des types locaux	Très haute résolution Fréquence faible	Co-financement LiDAR pour caractérisation de l'état de conservation ? Carte végétation IGN = 1er niveau (facteur de classification carte habitat)
Brique 3	Inventaires terrain : stocks sur pied et flux	Placettes IFN selon design à définir - suivi	Co-financement LiDAR pour biomasse ? Données de calibration Ajouts thème sol, EE, botanique

20

Suites à donner

DECEMBRE :

- Consultation des territoires : lettre MEEM – questionnaire – contacts institutionnels

JANVIER :

- Proposition d'options techniques : 3e COPIL
- Réponses territoires
- Consultation des territoires : contacts techniques

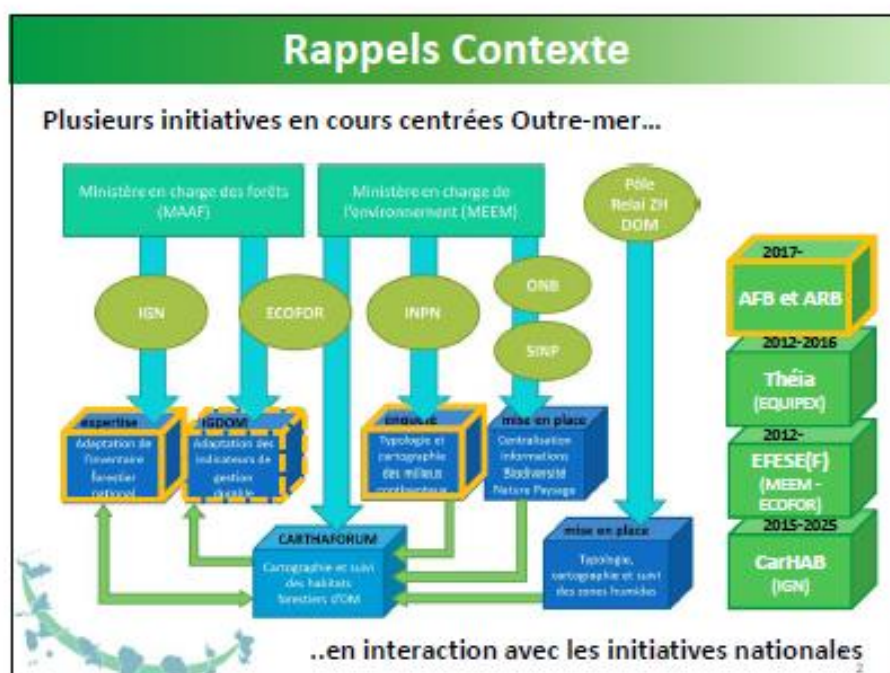
FEVRIER – MARS :

- Elaboration cahier des charges et chiffrages : contacts supports et territoires
- Finalisation de la rédaction : bibliographie, état des lieux, propositions



23

ANNEXE 9 : PRESENTATION ET CR DU 3^{EME} COPIL ETENDU 18/01/2017



Rappels avancements

Equipe projet :

Chef de Projet : Bernard Riera (ECOFOR) - Assisté de Stéphane Guitet (expert-consultant)

Experts téledétection : Jean-Paul Rudant – Hakim Bennacer – Samira Mobaied – Aimé Kemayo

Documentaliste : Anaïs Jallais

Participations extérieures : C. Bedeau (ONF Guyane) – P. Perbet (Parc Amazonien Guyane)

jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec	jan
BIBLIOGRAPHIE												
		TESTS RS (H BENNACER)							Suite HB			
			ETAT DES LIEUX								Quest. web	
			TESTS ONF Guyane + PAG									
						coordination IGN SNP IGDOM						
					rapport	Copil r				Copil 1	Copil 2	Copil 3

Fin prévue de l'étude, AVRIL 2017 :

- Finalisation propositions techniques (janv-fev)
- Synthèse attentes territoires + attentes COPIL (fev)
- Rédaction cahier des charges (mars)
- Proposition gouvernance (mars)
- Rédaction (fev-avril)

3

Rappels décisions 2^e COPIL

Questions	Positionnements
1 - Quelle précision thématique visée ?	Formations végétales (Habitats et état de conservation = option)
2 - Quelle restitution spatiale visée ?	0,5 ha (1-2 ha en Guyane a minima)
3 - Quelle fréquence de suivi ?	Continue
4 - Quelle place pour les formations végétales non forestières ?	Intégré Forêts/ATB et Atdca suivant critère FAO (autres formations végétales non suivies)
5 - Quel niveau de qualité pour le suivi carbone ?	Tier 3 (aboutir à une carto carbone)
6 – Quelle place pour la problématique Espèces Envahissantes ?	Ne rentre pas dans le champ
7 – Quelle articulation avec les acteurs du territoire ?	Consultation en cours
8 - Quel support technique pour la partie télédétection ?	SEAS en local / THEIA-GéoSud / ESA-Copernicus : à définir
9 – Coordination avec IGN-MAAF	Voir ci-après

4

Articulation avec étude IGN

■ COPIL de restitution du 9 janvier 2017 : éléments apportés par IGN

Propositions IGN-MAAF	Brique 1	Brique 2	Brique 3
Contenu	Enveloppe Forêt Classes FAO	Formations végétales	Inventaires terrain : stocks sur pied et flux
Méthode	Photo-interprétation sur BD Ortho IRC Après segmentation automatique Option 2 : avec MNH LiDAR		Placettes IFN terrain selon design à définir
Fréquence	Tous les 3-4 ans	Tous les 6 à 9 ans	Continu glissant
Coûts	46 000 € option 1 61 500 € option 2	1 650 000 € dt 80% guyane 736 500 € maj	750 000 € conception 2 345 000 € collecte

- Brique 1+2 : Théoriquement suffisant pour reporting mais **pas-de-temps inadapté pour lutte contre déforestation et dégradation** (trop large – simple constatation)
- Brique 3 : Indispensable pour suppléer à la **rareté des données terrain** et caractériser de façon fiable et détaillée les formations (structure, biomasse, composition)

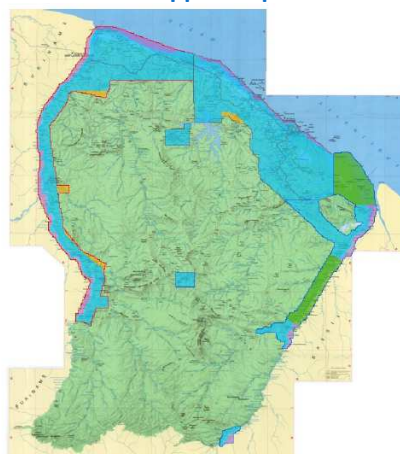
5

Articulation avec étude IGN

■ COPIL de restitution du 9 janvier 2017 : éléments apportés par IGN

• Guyane :

- Une brique 1 par assemblage de couches existantes (couche de statut <> critères FRA)
- Une approche partielle du territoire pour la brique 2
- Enjeu : consolider la cartographie de l'intérieur (zones déforestées, habitats non forestiers...)



Emprise du projet IGN d'acquisition de prises de vues aériennes 2017-2018 sur le département de la Guyane.
Le code couleur utilisée correspond aux options proposées.
La surface totale couverte représentera, suivant les options qui seront retenues, entre 17 334 et 19 413 km² (zone dite du fer à cheval).

6

Synergie Carthaforum – IGNom

■ Apport des productions IGN prévues :

- Une première couche thématique « formation forestière » (brique2) à 10 classes (Mangroves, F littorales, F sèches, F naturelle humide de basse et moyenne altitude, F naturelle marécageuse, Plantations, Autres terres boisées, autres terres dotées de couvert d'arbres, zones arbustives naturelles) adoptant la résolution spatiale visée par carthaforum
- Des données de calibration terrain essentielles pour superviser l'analyse d'images et calibrer les modèles carbone (brique 3).

■ Complément potentiel de Carthaforum :

- Un enrichissement et harmonisation de la typologie « formation forestière » grâce à une analyse spectrale et texturale complémentaire plus approfondie
- Compléter la couverture spatiale en Guyane
- Un suivi plus régulier de l'enveloppe forêt, des déforestations et de dégradations (actualisation des couches IGN pour reporting annuels REDD et phasage temporel FRA)

■ Synergie possible les deux projets :

- Recherche de financements mutualisés pour acquisitions LiDAR (MEEM, MAAF, Collectivités) → apport de fiabilité brique 1 IGN + enrichissement brique 2 IGN + réduction des coûts brique 3 IGN + indispensables modèle carbone carthaforum + atout pour calibration classification

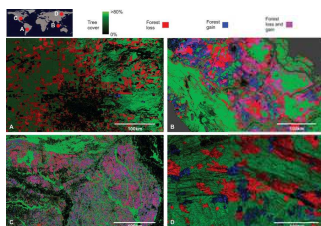


7

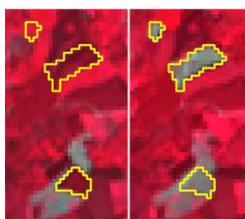
Suivi des dégradations et déforestations

• Des méthodologies déjà existantes :

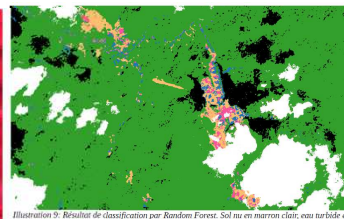
- Sur série LANDSAT = Hansen et al 2013
- Sur LANDSAT8, SPOT6 ou SENTINEL2 = application "coupe rase" Théia
- Sur SPOT6 et Pléiades = Observatoire de l'Activité Minière



Hansen et al 2013
Change in % baresoil, PV, NPV



Ose et al 2016
Change in NDVI



André np.
Classification SVM

méthodes libres, à ajuster au contexte

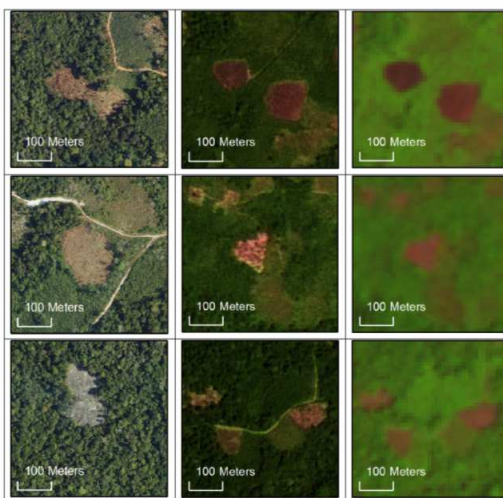


8

Suivi des dégradations et déforestations

Observatoire agriculture-forêt sur le PAG (AGRIPAG)

- Production annuelle (sélection images post-saison sèche)
- Tout type d'images (faire feu de tout bois)
- Photo-interprétation



9

Suivi des dégradations et déforestation

Suivi des changements sur TerraSAR (C. Bedeau ONF)

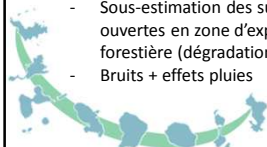


- ➔ Points positifs
- Facilité d'accès à l'image
 - Rapidité de traitement
 - Bonne détection des sites miniers

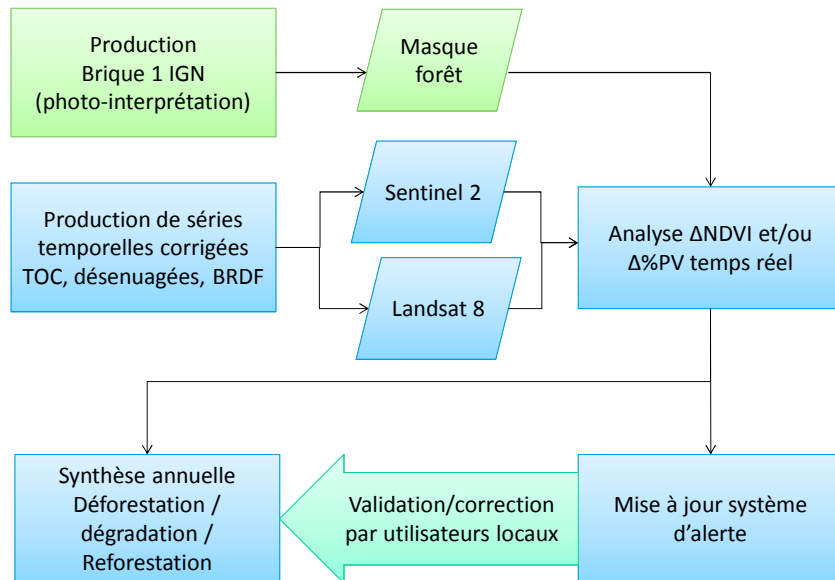


➔ Points négatifs

- Sous-estimation des surfaces ouvertes en zone d'exploitation forestière (dégradations)
- Bruits + effets pluies



Suivi des dégradations et déforestation



11

Suivi des dégradations et déforestation

PROPOSITIONS :

1. Préférer suivi des changements sur séries temporelles → implique gratuité des images
2. Mise en route rapide d'une chaîne de traitement sur optique (opérationnalité <1an) → LANDSAT8 et SENTINEL2 + SPOT6 selon les territoires (Adaptation des chaînes existantes HANSEN + coupe rase)
3. Contractualisation pour veille et traitement images
 - Soit systématique (20 LANDSAT/ an + 30 SENTINEL/an)
 - Soit après sélection % ennuagement (<10 images /an)
4. Mise en ligne sur plateforme dédiée ou transfert direct de la couche aux utilisateurs ?
5. En parallèle , appel à projet pour développement d'une nouvelle chaîne de traitement Sentinel 1

OU et QUI ?

- Pré-traitement en réflectance, désennuagement : chaîne MUSCATE (Théia :CNES/cesbio)
- Traitement en pied d'antenne pour éviter transfert des données : SEAS Guyane et/ou Théia-GEOSUD
- Adaptation/développement chaînes de traitement : IGN-espace, IRSTEA, IRD, CNES, Univ, ONFI = appel d'offre ?
- Plateforme dédiée au partage de la donnée – Géoportail / ThéiaGEOSUD / dédié ? ¹²

Cartographie des formations forestières

Production IGN prévue :

Guyane Expertise Littoral	Martinique Cartographie 2004	Guadeloupe Cartographie 2010	Réunion Nomenclature MOS	Mayotte Typologie forestière	Postes harmonisés MAAF	Classement FAO
Mangroves	Mangrove	Mangrove	Sans objet	Mangrove (H < 3m) Mangrove (H 3 – 6 m) Mangrove (H 6 – 10 m) Mangrove (H > 10 m)	Mangroves	
Forêts sur cordons sableux Forêts littorales sur sols rocheux	Forêt de plage	Forêt littorale	Sans objet ou non distinguées	Tanne et mangrove supra-littorale	Forêts littorales	
Sans objet	Forêt sèche basse Forêt sèche haute	Forêt semi-décidue Forêt de bas-fond sur substrat calcaire	Forêt semi-sèche	Espace boisé (H > 10 m)	Forêts naturelles sèches ou semi-décidues	
Forêts de la plaine côtière ancienne Forêts basses sur sable blanc Forêts basses et humides des collines et plateaux Forêts hautes et humides des collines et plateaux Forêts dégradées de terre ferme Forêts inondées ou marécageuses Forêts inondées ou marécageuses dégradée	Forêt moyennement humide ou humide Non distinguées	Forêt sempervirente saisonnière Forêt ombrophile Forêt de fond de vallée Forêt marécageuse	Forêt tropicale de basse et moyenne altitude Sans objet ou non distinguées	Peuplement à hétérogénéité horizontale élevée (H 5-10 m) Peuplement à hétérogénéité horizontale élevée (h>10m) Tache de peuplement enlaidi effondré Sans objet ou non distinguées	Forêts naturelles humides de basses et moyennes altitudes Forêts naturelles marécageuses	Forêt (F)
Sans objet	Formation semi-arborée d'altitude	Forêt alpine	Forêt tropicale humide de montagne	Sans objet	Forêts naturelles humides d'altitude	
Plantations forestières	Plantation de mahogany	Peuplement à mahogany Espaces sylvoles divers	Forêt à <i>Acacia heterophylla</i> Plantation forestières de feuillus mono spécifiques Coupe et replantation des exploitations de feuillus	Peuplement à <i>Acacia mangium</i> Plantation en autres essences Espace boisé (H 5-10 m)	Plantations forestières	

➤ Apporter plus de détails dans les classes principales (meilleure approche de la diversité des formations forestières : composition, habitats particuliers) ?

13

Cartographie des formations forestières

Production IGN prévue :

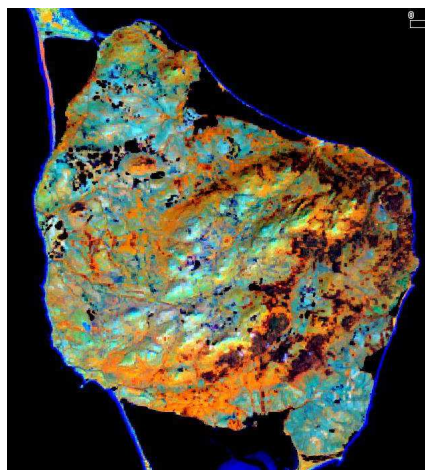
Guyane Expertise Littoral	Martinique Cartographie 2004	Guadeloupe Cartographie 2010	Réunion Nomenclature MOS	Mayotte Typologie forestière	Postes harmonisés MAAF	Classement FAO
Système cultural et parcellaires complexes (abattis)	Formation arborée avec habitations Formation arborée sur terrain agricole	Forêt des zones agricoles ou d'habitation	Non distinguées	Non distinguées	Autres terres dotées de couvert d'arbres	Autres terres dotées de couvert d'arbres Formations boisées à usage agricole ou urbain
Territoire agricole avec présence de végétation (abattis itinérants)						
Vergers et petits fruits Espaces verts artificialisés non agricoles						
Forêt et végétation arbustive en mutation	Friche après autre culture Friche après bananeraie Friche avec fort couvert de ligneux bas	Fourré d'altitude Fourré littoral et formation boisée dégradée	Non distinguées	Non distinguées	Autres terres boisées	Autres terres boisées Couvert forestier compris entre 5 à 10%
Savane sèche	Pelouse alpine	Bas fourré d'altitude	Végétation éricoides d'altitude Fourrés perhumides des hauts	Buisson sur Padza Végétation basse ou arbustive claire	Zones arbustives naturelles	Autres terres
Savane inondable ou inondée	Autre friche ou savane	Formation basse colonisatrice Friche à ligneux bas	Formations continues des fourrés arbustifs des pentes et du littoral Fourrés arbustifs des espaces en transition	Peuplement arbustif ou arboré très clair		

➤ Apporter plus de détails dans les classes de transitions (niveau de dégradation, couvert) ?

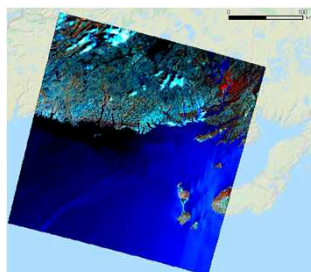
14

Cartographie des formations forestières

Cartographie des formations St Pierre et Miquelon – comparaison capteurs (ONFI)



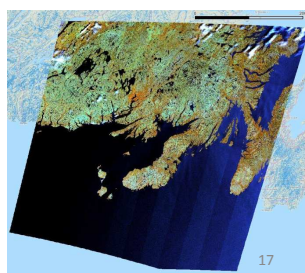
Classification Landsat (08-08-2015).



Landsat 15m

19-06-2016.

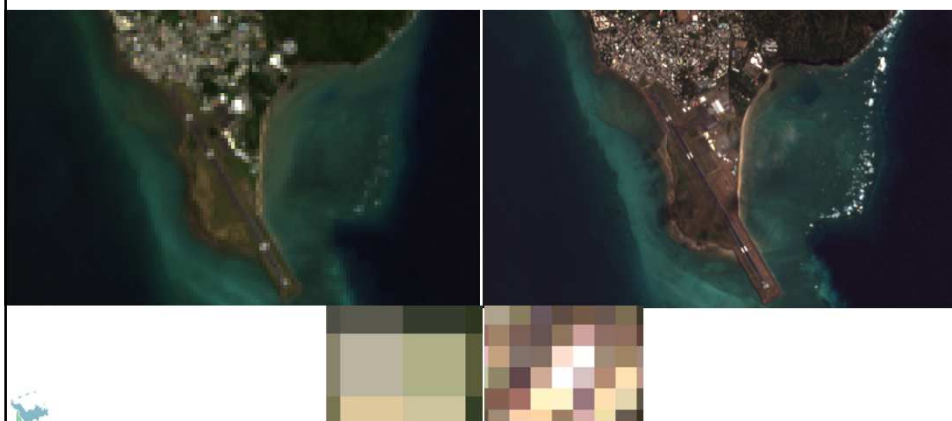
Sentinel2 10m
19-06-2016.



17

Cartographie des formations forestières

Résolution LANDSAT 8 SENTINEL2 (stage ECOFOR)

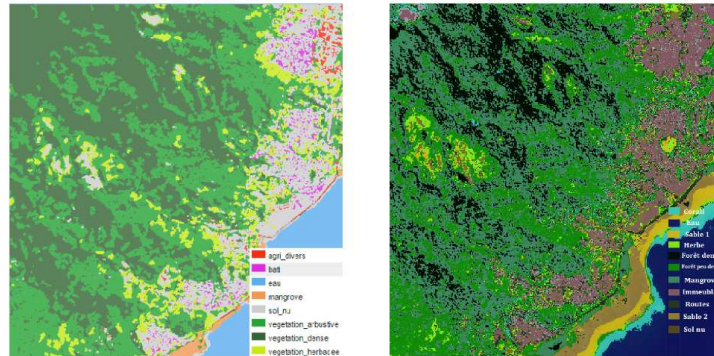


Résultats amélioration résolution avec Sentinel2

18

Cartographie des formations forestières

Classification sur SENTINEL 2 (stage ECOFOR H. Bennacer)



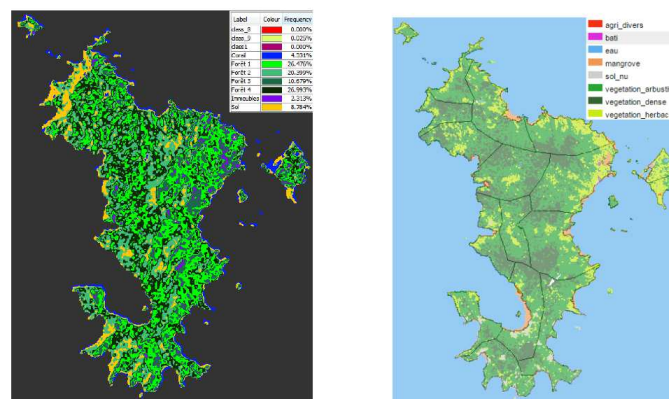
Fort potentiel – efficacité prometteuse (kappa 0,85)

- des confusions évitables (mangrove / sol nu / route) → besoin de variables auxiliaires
- des effets de BRDF corrigéables (forêts denses = effet versant) → correction du signal

19

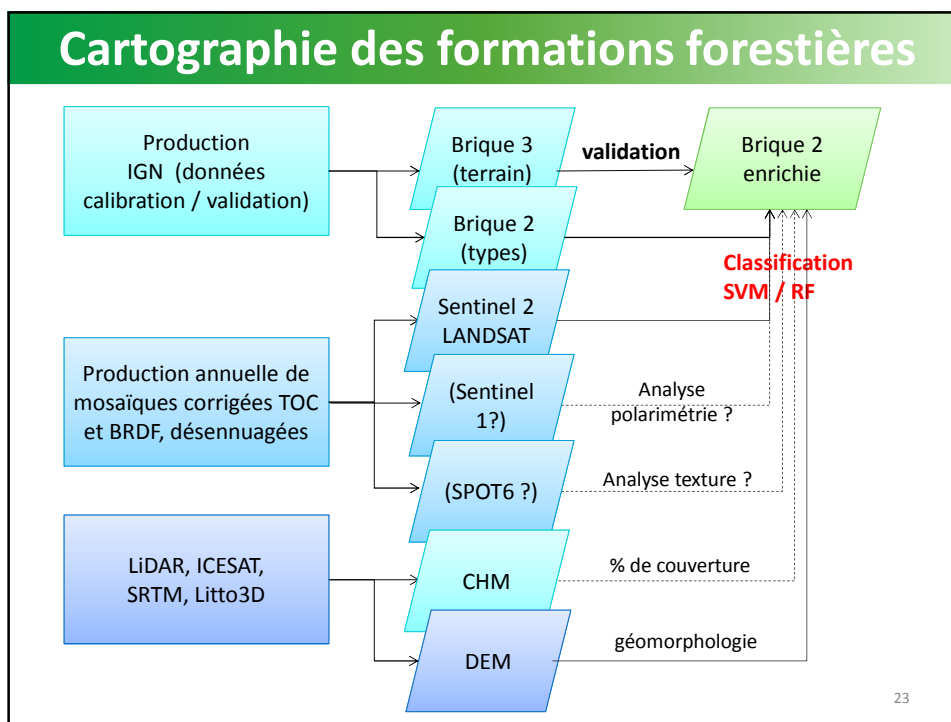
Cartographie des formations forestières

Classification sur SENTINEL 1 (stage ECOFOR)



Résultats beaucoup moins satisfaisants – manque de détails et effets artefactuels – beaucoup de développements restent nécessaires

20



Cartographie des formations forestières

PROPOSITIONS :

1. Constituer des mosaïques annuelles images LANDSAT8 et/ou SENTINEL2 corrigées TOA, BRDF, désennuagées
2. Méthode standard optique pour classification multi-sources (RF/SVM ?) :
 - sur Guyane pour compléter spatialement (et thématiquement) les produits IGN
 - sur autres territoires avec brique 2 en référence pour compléter thématiquement les produits IGN ?
3. Développement complémentaire sur méthodes d'analyse polarimétrique et texturale
4. Constituer une compilation annuelle des dégradations/déforestations :
 - Mise à jour annuelle des changements de catégories sur produits IGN ?
 - Constitution de sous-catégories dans les classes en transition ?
5. Validation par utilisateurs locaux à partir de l'expertise terrain et des images THR disponibles (SEAS)

OU, QUI, QUAND ?

- Constitution mosaïques annuelles : par opérateur en charge du suivi annuel, Théia, IGN-espace ?
- Validation ONF + Parcs Nationaux ? Sur points IGN (brique 2) ? Méthode commune à développer
- Production suivant la fréquence IGN (tous les 6-9 ans ?), fréquence FRA (4-5 ans) ou ajustement annuel ?
- Dans le cadre d'études ponctuelles mais sur financement consolidé (assurer une source de financement pour les besoins ponctuels) ?

24

Cartographie de la biomasse

Exemple emblématique : combinaison LiDAR-Landsat-SRTM

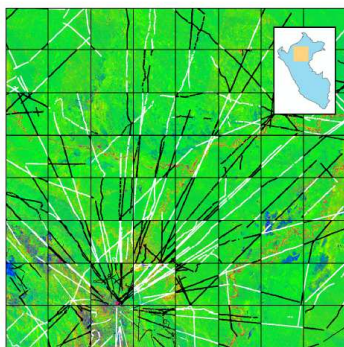


Figure 1. Fractional cover of photosynthetic vegetation (PV; green), non-photosynthetic vegetation (NPV; blue), and bare substrate (S; red) of our focal study region in Northern Peru. The inset shows the location of the focal area within Peru. The region spans 16 million ha of ecological heterogeneity within the Marañon and Ucayali Watersheds. For carbon modeling purposes, airborne LiDAR data from CAO were divided using a checkerboard configuration, with 694,243 ha of calibration data (white) and 669,943 ha of validation data (black).
doi:10.1371/journal.pone.0085993.g001

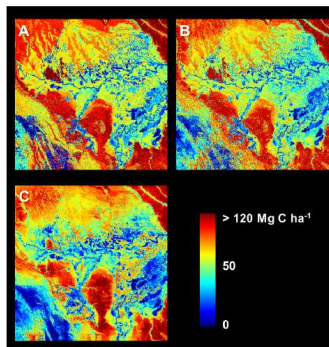


Figure 4. Predicted carbon stocks using three different methodologies. (a) Stratification and mapping of median carbon stocks in each class, (b) Random Forest without the inclusion of position information, (c) Random Forest using additional model inputs for position.
doi:10.1371/journal.pone.0085993.g004

OPEN ACCESS Freely available online

PLOS ONE

A Tale of Two "Forests": Random Forest Machine Learning Aids Tropical Forest Carbon Mapping

Joseph Mascaro*, Gregory P. Asner, David E. Knapp, Ty Kennedy-Bowdoin, Roberta E. Martin, Christopher Anderson, Mark Higgins, K. Dana Chadwick
Department of Global Ecology, Carnegie Institution for Science, Stanford, California, United States of America

25

Cartographie de la biomasse

PROPOSITIONS :

1. Compléter la production des cartes biomasse (en valorisant Litto3D)
 - Existant = Guyane
 - En cours = Guadeloupe (pour partie)
 - A faire = Martinique, Réunion, Mayotte, St Pierre et Miquelon (financement études ?)
2. **Fréquence de mise à jour :**
 - Suivant l'acquisition des données IGN brique 3 (nécessaire au calibrage) ?
 - Mise à jour annuelle suite au suivi des dégradations et perturbations (modélisation) ?
3. Planifier acquisition **LiDAR sur 10% de la surface forestière (coordination avec brique 3) ?**
 - Prix IGN 175€/km² ➔ ex taux sondage 10% = 25 000 € Réunion, 15 000 € Guadeloupe, 300 k€ Fer à cheval Guyane

OU, QUI, QUAND ?

- Productions données terrain calibration : IGN+ONF (brique 3) + données recherche
- Production cartographies de référence : Universités ? (financement projet d'étude)
- Mise à jour annuelle par producteur du suivi déforestation/dégradation (méthodologie CIRAD-Guyane)

26

Récapitulatif propositions

1. Mise au point système de détection déforestations / dégradations

- Calquer sur Hansen et "coupes rases" / appliquer sur LANDSAT8 et Sentinel2
- Proposition d'un produit élaboré en ligne (alerte changements)
- Consolidation annuelle d'une couche changements

2. Cartographie des formations forestières

- Suivant production Brique2 IGN (photo-interprétation THR)
- Production mosaïques annuelles LANDSAT8 / Sentinel2 a minima
- Développement chaîne de traitement "classification des forêts" multi-source

3. Cartographie de la biomasse forestière

- Coordination acquisition LIDAR (taux 10%) avec déploiement IFN dom
- Compléter cartes références (utiliser Litto3D)
- Mise à jour cartes de référence (en phase avec brique 3)

27

Outils Théia-GEOSUD / besoins MEEM

IDS GeoSUD Théia - SEAS

ART GeoDev
(JF Faure ROM-COM)Organiser des
productions récurrentesApplication coupe rase
(K Ose - R Cresson -
Dinh)Outils de détection
dégradation /
déforestationCES Biomasse
(Le Toan + Dinh + N
Baghdadi)Carte de biomasse à
façon (ex Guyane)CES Occupation des
sols
(J Inglada – S Alleaume
– JB Ferret - IGN)Adaptation chaîne iota2
à la classification forêt

QUESTIONS A ABORDER

- Mode de fonctionnement ?
- Portage ?
- Financements nécessaires ?
- Planning envisageable ?

28

Merci pour votre attention

Equipe projet :

Chef de Projet : Bernard Riera (ECOFOR) - Assisté de Stéphane Guitet (expert-consultant)

Experts télédétection : Jean-Paul Rudant – Hakim Bennacer – Samira Mobaied – Aimé Kemavo

Documentaliste : Anaïs Jallais

Participations extérieures : C. Bedeau (ONF Guyane) – P. Perbet (Parc Amazonien Guyane)

jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec	jan
BIBLIOGRAPHIE												
		TESTS RS (H BENNACER)							Suite HB			
			ETAT DES LIEUX								Quest. web	
			TESTS ONF Guyane + PAG									
							coordination IGN SNP IGDOM					
					rapport	Copil r				Copil 1	Copil 2	Copil 3

Fin prévue de l'étude, AVRIL 2017 :

- Finalisation propositions techniques (janv-fev)
- Synthèse attentes territoires + attentes COPIL (fev)
- Rédaction cahier des charges (mars)
- Proposition gouvernance (mars)
- Rédaction (fev-avril)

29

ANNEXE 10 : FICHES ACTIONS

ACTION 1 : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES DANS LES ROM-COM

OPTION A : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A HAUTE RESOLUTION PAR EXPLOITATION D'IMAGERIES SATELLITAIRES SUR LES TERRITOIRES NON COUVERTS PAR UNE BD-FORET RECENTE

OPTION B : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A HAUTE RESOLUTION PAR EXPLOITATION D'IMAGERIES SATELLITAIRES SUR TOUS LES TERRITOIRES Y COMPRIS CEUX COUVERTS PAR UNE BD-FORET RECENTE

OPTION C : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A TRES HAUTE RESOLUTION PAR COMBINAISON D'ANALYSE D'IMAGERIES SATELLITAIRES ET DE PHOTO-INTERPRETATION SUR TOUS LES TERRITOIRES

ACTION 2 : SUIVI DES DEGRADATIONS ET DEFORESTATIONS LIEES AUX ACTIVITES HUMAINES DANS LES ROM-COM

OPTION A : SUIVI ANNUEL DES CHANGEMENTS FORESTIERS

OPTION B : SURVEILLANCE EN CONTINU DES DEFORESTATIONS, DEBOISEMENTS & DEGRADATIONS EN FORET

OPTION C : SURVEILLANCE EN CONTINU DES CHANGEMENTS EN FORET (Y COMPRIS BOISEMENTS ET REBOISEMENTS)

ACTION 3 : SUIVI DES FLUX DE CARBONE FORESTIER DANS LES ROM-COM

OPTION A : REALISATION DE MESURES DE TERRAIN POUR UNE ESTIMATION DES STOCKS DE CARBONE FORESTIERS AU TIER 2 SUR LES ROM-COM

OPTION B : ELABORATION DE MODELES DE PREDICTION DE LA BIOMASSE FORESTIERE SUR LES ROM-COM

OPTION C : SUIVI DES FLUX DE CARBONE FORESTIER CONSECUTIFS A LA DYNAMIQUE FORESTIERE

ACTION 4 : SUIVI DES ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES VEGETALES TERRESTRES DANS LES HABITATS FORESTIERS DES ROM-COM

OPTION A : TEST DE PROTOCOLES POUR LE SUIVI DES PRINCIPALES EEE VEGETALES TERRESTRES DANS LE CADRE D'UN DISPOSITIF D'INVENTAIRE FORESTIER REGULIER IFN

OPTION B : DEVELOPPEMENT D'OUTILS NUMERIQUES INTELLIGENTS POUR LE RELEVÉ DES EEE SUR LE TERRAIN ET LA CONSTITUTION D'UNE BASE D'OCCURRENCE DES EEE

OPTION C : DEVELOPPEMENT DE METHODES DE CARTOGRAPHIE DES PRINCIPALES EEE PAR TELEDETECTION DANS LES ROM-COM

ACTION 5 : ANIMATION TECHNIQUE INTER-OUTRE-MER

OPTION A : ORGANISATION D'UN SEMINAIRE TECHNIQUE ANNUEL INTER OUTRE-MER

OPTION B : ACTIVATION D'UN APPEL A PROJETS DE RECHERCHE ORIENTE VERS LES TERRITOIRES ULTRA-MARINS

OPTION C : ANIMATION D'UN RESEAU « FORETS ULTRA-MARINES »

ACTION 1 : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES DANS LES ROM-COM

OPTION A : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A HAUTE RESOLUTION PAR EXPLOITATION D'IMAGERIES SATELLITAIRES SUR LES TERRITOIRES NON COUVERTS PAR UNE BD-FORET RECENTE

Résumé du produit : il s'agit de produire des couvertures cartographiques des formations végétales à partir d'analyses d'images satellitaires, par classification multi-capteurs, afin de compléter les produits IGN sur les territoires où ils ne sont pas disponibles ou incomplets.

OBJECTIFS:

- Cartographier les différentes formations végétales naturelles forestières et non forestières suivant une nomenclature normalisée à l'échelle nationale et internationale ;
- Compléter la couverture fournie par l'IGN d'un point de vue géographique (production sur les territoires non couverts par la BDForêtV2 de l'IGN) ;
- Faciliter le renseignement des statistiques forestières dans le cadre de l'enquête FRA ouverte tous les 5 ans par la FAO et renseignées par l'ONF pour le compte du MAAF (notamment les ventilations par grands types forestiers).

LIVRABLES:

Il s'agit de produire une couche géo-référencée et qualifiée des postes de formations végétales naturelles, pour la Guyane, la Réunion et Mayotte, à partir de mosaïques d'images satellitaires standardisées permettant d'aboutir à une couverture complète des territoires. Cette couche sera accompagnée d'une mise à disposition des images ayant servi à sa production selon les conditions précisées ci-après ainsi que d'un rapport précisant la méthodologie détaillée employée pour sa production.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

DEAL, DAF, ONF, Parcs Nationaux pour chaque territoire concerné. MAAF, MEEM, MOM, IGN en métropole.

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Les postes de formations végétales devront s'inscrire dans la nomenclature standardisée proposée par IGN-MAAF (20/01/2017) légèrement modifiée, correspondant aux définitions données ci-dessous, permettant de renseigner de façon homogène les reportages internationaux tout en s'adaptant aux typologies locales :

Poste FAO	Postes harmonisés MAAF-IGN enrichis	Définition	Remarques
<u>Forêt</u> (i.e. superficie de plus de 0,5 hectares avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 mètres et un couvert forestier de plus de 10 pour cent, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils in situ. Sont exclues les terres à vocation	Mangroves	Forêts naturelles présentant une végétation de mangroves	Détails possibles par essences dominantes
	Forêts littorales	Forêts naturelles développées sur cordons sableux, rochers ou	Caractérisables par des variables contextuelles (distance à la côte,

agricole ou urbaine prédominante.)		falaises littorales	altitude...)
	Forêts sèches (décidues ou semi-décidues)	Forêts naturelles dominées par des espèces perdant leur feuillage en saison sèche	Caractérisables par une analyse multi-temporelle ou saisonnière
	Forêts naturelles humides sempervirentes	Forêts naturelles sans défoliation notable en saison sèche	Détails possibles selon les territoires à l'aide de variables contextuelles (selon l'altitude, l'exposition, etc...)
	Forêts marécageuses	Forêts naturelles inondables ou sur sols très humides	Caractérisables par modélisation sur MNT ou analyse saisonnière
	Plantations forestières	Forêts artificielles (y compris mangroves)	Détails possible selon essences dominantes
	Jeunes forêts secondaires ou forêts très dégradées	Forêts perturbées à couvert < 40%	Caractérisables par analyse de texture, structure et/ou historique
<u>Autres terres dotées de couvert d'arbres</u> (i.e. superficie à vocation agricole ou urbaine prédominante, ayant des îlots de végétation arborée couvrant une superficie supérieure à 0,5 hectares avec un couvert forestier de plus de 10 pour cent d'arbres pouvant atteindre une hauteur de 5 mètres à maturité. Elles renferment des espèces d'arbres forestiers et non forestiers.)	Forêts artificialisées ou cultivées	Agro-forêts, vergers, mosaïques de formations arborées avec habitations et/ou cultures	Caractérisable par un croisement avec les couches d'occupation des sols actuelles et anciennes
	Arbres hors forêts	Alignement d'arbres (>20m de large), parcs et jardin	
<u>Autres terres boisées</u> (i.e. non définies comme «forêt», couvrant une superficie de plus de 0,5 ha avec des arbres atteignant une hauteur > 5m et un couvert forestier de 5-10%, ou des arbres capables d'atteindre ces seuils, ou un couvert mixte d'arbustes, arbrisseaux et d'arbres > 10%. Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante).	Friches arborées	Anciens terrains agricoles en cours de recolonisation forestière	Détails possibles selon les territoires à l'aide de variables contextuelles (selon l'altitude, l'exposition, etc...)
	Fourrés arborés	Formation naturelle dominée par les arbustes	
	Savanes arbustives ou semi-arborées	Formation naturelle dominée par les herbacées	
	Forêts rabougries	Végétation forestière < 5m de hauteur	Détails possibles par essences dominantes
	Mangroves rabougries	Végétation de mangroves < 5m de hauteur	
	Végétation basse littorale	Formations naturelles basses développées sur cordons sableux, rochers ou falaises littorales	
<u>Autres terres</u> (avec ou sans végétation)	Savanes, pelouses, prairies naturelles sèches	Formation exclusivement herbacée non inondable	Détails possibles selon les territoires à l'aide de variables contextuelles (selon l'altitude, l'exposition, etc...)
	Savanes, pelouses, prairies naturelles humides	Formation exclusivement herbacée inondable	
	Autres végétations	Cultures, pâturages, autres formations végétales artificielles	Détails possibles selon la culture dominante
	Marais, marécages, surface en eau		
	Sol nu	Affleurements rocheux ou terre nue	
	Sol artificialisé	Infrastructures, urbanisation...	

Ces postes pourront être complétés par des sous-postes correspondants aux particularités des typologies locales, définis en concertation avec les acteurs locaux, en faisant appel à des co-variables contextuelles.

2. PRECISION ET FIABILITE :

La couche sera produite à partir de méthodologies déjà éprouvées (i.e. ayant déjà été déployées à l'échelle de territoires régionaux de plusieurs milliers de km²), permettant d'assurer un niveau de fiabilité > à 90%, à partir d'images satellitaires permettant une restitution à une échelle optimale de 0,5ha. Afin d'assurer la meilleure richesse typologique possible la production devra s'appuyer sur une approche multi-sources permettant d'intégrer plusieurs critères d'analyse (signature spectrale optique, réflectance radar polarimétrique, texture...). La fiabilité de la donnée produite devra être évaluée par matrice de confusion à partir d'un jeu de points de validation indépendants, contrôlés par des partenaires spécialisés et basés sur le territoire étudié, intégrant à minima 30 à 50 points de contrôle par poste typologique. Une partie de ce jeu de contrôle pourra provenir de couches thématiques produites et vérifiées par les opérateurs de terrain, ou d'interprétation d'images THR ou de photographies aériennes pour les formations reconnaissables sans confusions possibles sur ce type d'images.

La cartographie devra s'appuyer sur les méthodes d'analyse les plus efficaces au regard de l'état de l'art comme par exemple :

- les analyses de signatures spectrales intégrant le moyen infra-rouge (e.g. sur LANDSAT8 ou SENTINEL2) pour la discrimination des mangroves, forêts secondaires, ... ;
- les analyses polarimétriques radar pour la discrimination des savanes humides et sèches (e.g. SENTINEL1 en bande C) ou des forêts inondables (e.g. ALOS-Palsar en bande L) ;
- les analyses de texture sur images à THR (e.g. SPOT6/7, GeoEye) pour la discrimination des statures de forêts (faciès de mangroves ou de forêts basses...) ;

Références en exemple

Gaelle Viennois. Cartographie de la phénologie des forêts humides en Afrique centrale. 2011. <halsde-00675851>. http://www.biogeosciences.net/10/6957/2013/bg-10-6957-2013.pdf	Discrimination des formations forestières décidues et sempervirentes du massif du Tridom en Afrique Centrale (~160 000 km ²) à partir de GeoEye, SPOT5 et MODIS
Helmer E.H., Ruzicki T.S., Benner J., Voggesser S.M., Scobie B.P., Park C., Fanning D.W. & Ramnarine S. (2012). Detailed maps of tropical forest types are within reach: Forest tree communities for Trinidad and Tobago mapped with multiseason Landsat and multiseason fine-resolution imagery. <i>For. Ecol. Manag.</i> , 279, 147-166. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.016	Cartographie par des forêts de Trinidad et Tobago (5 130 km ²) à partir de classification d'une mosaïque d'images LANDSAT, GeoEye et de photographies aériennes.
Betbeder J., Gond V., Frappart F., Baghdadi N., Briant G. & Bartholomé E. (2014). Mapping of Central Africa forested wetlands using remote sensing. <i>IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing</i> , 7, 531-542 https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/966798/filename/mt2013-pub00038599.pdf	Discrimination des forêts marécageuses sur analyse d'images radar polarimétrique en bande C

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Cette couche devra être spatialement cohérente et compatible avec les produits cartographiques développés par l'IGN (BD Forêt®, OCS-Ge) sur les territoires de références et couvrir la totalité des surfaces terrestres. Les Antilles et St Pierre-et-Miquelon déjà couverts par des cartographies issues de photo-interprétation ne sont pas intégrés dans cette commande.

Territoire	973	974	976
Surface forestière (ha)	8 130 000	88 000	6 000
Surface totale (ha)	8 242 000	250 000	38 000
Nb dalles Sentinel	20	1	1
Nb dalles Landsat	8	1	1
Nb KJ SPOT	41	4	1

4. ETENDUE TEMPORELLE ET PLANNING DE PRODUCTION :

La couche devra être produite dans un délai d'un an à partir de la commande et au plus tard avant le 31 mai 2019 afin de permettre le renseignement de l'enquête FRA2020 de la FAO dans les délais impartis. Les images utilisées pour la cartographie devront être collectées dans la période 2015-2018 dans une fourchette ne dépassant pas 18 mois d'écart entre les dates les plus extrêmes afin d'assurer une cohérence temporelle.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

La couche sera produite en vecteurs (polygones) au format shapefile (ESRI). Chaque entité sera attribuée des champs d'information suivants : poste FRA, poste MAAF-IGN, poste typologique local, date de l'image utilisée pour la classification, superficie.

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Pour s'assurer du niveau d'exhaustivité de la couverture produite et de sa qualité, celle-ci sera accompagnée de la mosaïque composée des images optiques utilisées pour sa production. Cette mosaïque sera ortho-rectifiée, géométriquement superposable aux produits existants (i.e. restituée dans un référentiel connu adapté à chaque territoire), désennuagée, corrigée radiométriquement en réflectance apparente dite TOA (Top of Atmosphere) et corrigée des effets de BRDF (Bidirectionnal Reflectance Distribution Fonction) liés aux variations d'angles d'acquisition des images (niveau 2A en sortie de chaîne Muscate ou équivalent).

Elle sera aussi accompagnée d'une autre couche vecteur en mode point localisant les points de contrôle, avec en attribution le type de végétation constaté sur le contrôle (suivant la même nomenclature que celle de la couche polygone), la hauteur de la végétation, le couvert par strate, la composition dominante ainsi que le mode de contrôle effectué (sur le terrain, sur photo-aérienne, sur image satellite THR...). Le dispositif SEAS sera sollicité pour la mise à disposition d'images THR (Spot 6/7) facilitant le contrôle et la validation du produit.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Plusieurs organismes de recherches et de développement ou bureaux d'études ont déjà montré leur capacité à réaliser des cartographies forestières complexes et détaillées par satellites. Parmi ces organismes on liste l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à l'UMR AMAP et à l'UMR Espace-DEV, l'UR Forêts & Sociétés de la Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), ou encore l'Office National des Forêts International (ONF-I). Des chaînes de traitements ont aussi été développées par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) au sein du CESBio pour la réalisation de carte d'occupation des sols par télédétection, potentiellement adaptables pour des applications plus orientées vers les formations végétales. La prestation devra obligatoirement intégrer l'intervention d'un partenaire du territoire parmi les organismes spécialisés dans la gestion, le contrôle ou l'administration des milieux naturels (ONF, DEAL, ...). Le pilotage et/ou la réalisation de l'étude impliquera un représentant de l'Institut Géographique National (IGN) en charge des productions cartographiques forestières, en mesure de vérifier la qualification du produit au regard des attendues des couvertures BD Forêt® et OCS-Ge.

ESTIMATION DES COUTS : 231 000 € [+ 132 000 € IGN NON COMPATIBILISES]

- Constitution des jeux de données images (collecte, téléchargement, correction, prétraitement, mosaïquage) dont acquisition d'images optique THR ou radar complémentaires si dispositif SEAS insuffisant) : ~ 46 000 €
- Constitution des jeux de données de contrôle (600 à 1000 pts de contrôle par territoire réalisé par les partenaires locaux) : ~ 120 000 €

- Analyse des données (10 mois ingénieur d'étude) : $\approx 65\,000\text{ €}$

	Guyane	Réunion	Mayotte
Constitution du jeu de données images principal	40 000 €	5 000 €	1 000 €
Constitution du jeu de données de contrôle	60 000 €	45 000 €	15 000 €

NB : Les 48 500 € nécessaires à la collecte de données in situ sur les autres ROM-COM et les 64 000 € nécessaires à la réalisation ou mise à jour de la BD Forêt @ IGN (Brique 1 et 2) sur ces mêmes territoires ne sont pas comptabilisés.

ACTION 1 : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES DANS LES ROM-COM

OPTION B : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A HAUTE RESOLUTION PAR EXPLOITATION D'IMAGERIES SATELLITAIRES SUR TOUS LES TERRITOIRES Y COMPRIS CEUX COUVERTS PAR UNE BD-FORET RECENTE

Résumé du produit : il s'agit de produire des couvertures cartographiques des formations végétales à partir d'analyses d'images satellitaires et de comparer ces produits avec ceux issus de photo-interprétation sur les territoires couverts par une production IGN récente.

OBJECTIFS:

- Idem que fiche 1A
- Analyser les biais et les complémentarités entre les deux types de produits (issu de télédétection et issu de photo-interprétation) sur les territoires bénéficiant des deux couvertures (territoires insulaires) ;

LIVRABLES:

Il s'agit de produire une couche géo-référencée et qualifiée des postes de formations végétales naturelles, pour les ROM-COM (en dehors de St Pierre-et-Miquelon, St Barthélémy et ST Martin), à partir de mosaïques d'images satellitaires standardisées permettant d'aboutir à une couverture complète des territoires. Cette couche sera accompagnée d'une mise à disposition des images ayant servies à sa production selon les conditions précisées ci-après, d'un rapport précisant la méthodologie détaillée employée pour sa production ainsi que d'un rapport de synthèse intégrant l'analyse comparative de ces cartes avec celles produites par l'IGN aux Antilles, et des propositions pour l'harmonisation de ces deux types de produits.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Idem que fiche 1A

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Idem fiche 1A

2. PRECISION ET FIABILITE :

Idem fiche 1A. La cartographie s'appuiera par ailleurs sur la « Brique1 » et la BD Ortho® produite par l'IGN là où elle sera disponible afin d'intégrer dans la mesure du possible une analyse une approche orientée objet et une caractérisation précises des structures de végétation.

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

La couche produite devra être spatialement cohérente et compatible avec les produits cartographiques développés par l'IGN (BD Forêt®, OCS-Ge) sur les territoires de références et couvrir la totalité des surfaces terrestres des territoires listés ci-dessous.

Territoire	971	972	973	974	976
Surface forestière (ha)	83 000	50 000	8 130 000	88 000	6 000
Surface totale (ha)	168 000	106 000	8 242 000	250 000	38 000
Nb dalles Sentinel	1	1	20	1	1
Nb dalles Landsat	1	1	8	1	1
Nb KJ SPOT	2	2	41	4	1

4. ETENDUE TEMPORELLE ET PLANNING DE PRODUCTION :

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :
6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Idem fiche 1A.

Sur les territoires bénéficiant d'une couverture BD Forêt® récente, une analyse des correspondances et des écarts entre ces produits et les cartographies de formations végétales par l'IGN issues de photo-interprétation sera effectuée afin d'évaluer les biais et précisions de chaque type d'approche, faire une analyse qualité-prix des productions, proposer des méthodes correctives pour une amélioration et/ou une fusion de ces produits et aboutir à des préconisations pour une production régulière optimale.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Idem fiche 1A.

ESTIMATION DES COUTS : 308 000 € [+95 000 € NON COMPATIBILISES]

- Constitution des jeux de données images (collecte, téléchargement, correction, prétraitement, mosaïquage) dont acquisition d'images si nécessaire : ~ 50 000 €
- Constitution des jeux de données de contrôle (600 à 1000 pts de contrôle par territoire) : ~ 158 000 €
- Analyse des données (12 mois ingénieur d'étude) : ~ 72 000 €
- Analyse comparative des productions issues de télédétection et de photo-interprétation (3 mois ingénieur d'étude) : ~ 18 000 €

	Guadeloupe	Martinique	Guyane	Réunion	Mayotte
Constitution du jeu de données images principal	~1 semaine	~1 semaine	~4 mois	~2 semaines	<1 semaine
Constitution du jeu de données de contrôle	20 000 €	18 000 €	60 000 €	45 000 €	15 000 €

NB : les 95 000 € nécessaires à la collecte des données in situ à St Martin, St Barthélémy et St Pierre-et-Miquelon et à la réalisation de la BD Forêt ® IGN (Brique 1 et/ou mise à jour de la Brique 2) ne sont pas comptabilisés ici.

ACTION 1 : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES DANS LES ROM-COM

OPTION C : CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES A TRES HAUTE RESOLUTION PAR COMBINAISON D'ANALYSE D'IMAGERIES SATELLITAIRES ET DE PHOTO-INTERPRETATION SUR TOUS LES TERRITOIRES

Résumé du produit : il s'agit de produire des couvertures cartographiques des formations végétales à très haute résolution spatiale et précision thématique optimale à partir d'analyses d'images satellitaires combinées aux produits issus de photo-interprétation.

OBJECTIFS:

- Cartographier les différentes formations végétales naturelles forestières et non forestières suivant une nomenclature normalisée à l'échelle nationale et internationale ;
- Enrichir la couverture fournie par l'IGN d'un point de vue thématique par une analyse multi-spectrale et multi-sources des objets segmentés au sein des espaces naturels ;
- Faciliter le renseignement des statistiques forestières dans le cadre de l'enquête FRA ouverte tous les 5 ans par la FAO et renseignées par l'ONF pour le compte du MAAF (notamment les ventilations par grands types forestiers).

LIVRABLES:

Il s'agit de produire une couche géo-référencée et qualifiée des postes de formations végétales naturelles, pour les ROM-COM (en dehors de St Barthélémy, St Martin et St Pierre-et-Miquelon), par photo-interprétation effectuée sur prise de vue aérienne (méthode IGN) assistée par l'analyse de mosaïques d'images satellitaires standardisées permettant d'aboutir à une couverture complète des territoires. Cette couche sera accompagnée d'une mise à disposition des images ayant servi à sa production selon les conditions précisées ci-après ainsi que d'un rapport précisant la méthodologie détaillée employée pour sa production.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Idem que fiche 1A

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Idem fiche 1A et 1B.

2. PRECISION ET FIABILITE :

Idem fiche 1A. Ces différentes analyses seront intégrées dans les processus de segmentation et de pré-classification effectués par l'IGN par photo-interprétation dans le cadre de la production de la BDForêt® lorsque cela sera possible. Une méthodologie simplifiée n'intégrant pas d'analyse orientée objet pourra être employée là où cela ne serait pas possible et en tout état de cause sur l'intérieur de la Guyane.

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Cette couche couvrira la totalité des surfaces terrestres des territoires listés ci-dessous.

Territoire	971	972	973	974	976
Surface forestière (ha)	83 000	50 000	8 130 000	88 000	6 000
Surface totale (ha)	168 000	106 000	8 242 000	250 000	38 000
Nb dalles Sentinel	1	1	20	1	1
Nb dalles Landsat	1	1	8	1	1
Nb KJ SPOT	2	2	41	4	1

4. ETENDUE TEMPORELLE ET PLANNING DE PRODUCTION :
5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :
6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Idem fiche 1A.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Idem fiche 1A.

ESTIMATION DES COUTS : 308 000 € [+ 334 A 560 000 € NON COMPTABILISES]

- Constitution des jeux de données images (collecte, téléchargement, correction, prétraitement, mosaïquage) dont acquisition d'images si nécessaire : ≈ 50 000 €
- Constitution des jeux de données de contrôle (600 à 1000 pts de contrôle par territoire) : ≈ 158 000 €
- Analyse des données (12 mois ingénieur d'étude) : ≈ 72 000 €
- Phase de développement pour intégration des méthodes de télédétection et de photo-interprétation dans un seul processus de production (3 mois ingénieur d'étude) : ≈ 18 000 €

	Guadeloupe	Martinique	Guyane	Réunion	Mayotte
Constitution du jeu de données images principal	~1 semaine	~1 semaine	~4 mois	~2 semaines	<1 semaine
Constitution du jeu de données de contrôle	20 000 €	18 000 €	60 000 €	45 000 €	15 000 €

NB : les budgets nécessaires à la phase de photo-interprétation de la BD Forêt ® (Brique2) de l'IGN et à la collecte des données in situ à St Martin, St Barthélémy et St Pierre-et-Miquelon ne sont pas comptabilisés ici.

ACTION 2 : SUIVI DES DEGRADATIONS ET DEFORESTATIONS LIEES AUX ACTIVITES HUMAINES DANS LES ROM-COM

OPTION A : SUIVI ANNUEL DES CHANGEMENTS FORESTIERS

Résumé du produit : il s'agit de produire une couche de changements sur la base d'une comparaison date-à-date de mosaïques annuelles basées sur de l'optique haute résolution de type LANDSAT ou SENTINEL2

OBJECTIFS:

- Informer annuellement les agents publics responsables du contrôle, de la conservation et de la gestion des forêts publiques et privées (DAF, ONF, Parcs...), des changements d'état détectés dans les massifs forestiers sous leur juridiction ;
- Faciliter la production de statistiques annuelles de déforestation et dégradation par territoires (après validation et renseignement de la couche produite par les agents publics précédemment cités) par les organismes intéressés par ce suivi (Observatoires régionaux, DAF, CITEPA...) ;
- Faciliter le renseignement des statistiques d'évolution des surfaces forestières dans le cadre de l'enquête FRA ouverte tous les 5 ans par la FAO et renseignées par l'ONF pour le compte du MAAF ;
- Faciliter la mise à jour des couches forêts (BDForêt) et des couches OCS-Ge (Occupation du Sol à grande échelle) produites par l'IGN à fréquence irrégulière.

LIVRABLES:

Il s'agit de produire en début d'année n+1, une couche géo-référencée, millésimée et qualifiée des changements détectés (par imageries satellitaires) entre l'année n et l'année n-1 sur l'ensemble des massifs forestiers préalablement délimités, dans les ROM-COM suivant : Guadeloupe, Martinique, Guyane, la Réunion, Mayotte, St Martin, St Barthélemy. Cette couche sera accompagnée d'une mise à disposition des images ayant servies à sa production selon les conditions précisées ci-après.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

DEAL, DAF, ONF, Parcs Nationaux pour chaque territoire concerné. MAAF, MEEM, MOM, IGN en métropole.

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Trois types de changements seront observés en forêt :

- les pertes forestières qui comprennent les déboisements et déforestations et sont définies comme un passage d'un état boisé (détecté comme forêt sur les images satellitaires) à un état non-boisé (détecté comme non-forêt) sur une surface > 0.5ha d'un seul tenant ;
- les dégradations qui sont définies comme une réduction de plus de 50% du couvert forestier sur une surface > 0.5ha d'un seul tenant (i.e. déforestation diffuse sur plus de 50% de la surface).
- les reboisements et reforestations qui sont définis comme un passage d'un état non-boisé à un état boisé sur une surface > 0.5ha d'un seul tenant.

La couche produite à partir des images satellitaires ne distinguera pas les déforestations (coupe rase du peuplement forestier pour un changement d'occupation du sol) des déboisements (coupe de la forêt sans changement d'occupation du sol). Cette distinction sera effectuée a posteriori après validation et renseignement de la couche produite par les agents publics précédemment cités.

2. PRECISION ET FIABILITE :

La couche sera produite à partir de méthodologies déjà éprouvées (i.e. ayant déjà été déployées à l'échelle de territoires nationaux), permettant d'assurer un niveau de fiabilité > à 90% (en commissions), utilisables à partir d'images satellitaires haute résolution assurant une précision spatiale $\leq 30m$, disponibles gratuitement, permettant de mesurer les variations d'indices de végétation (e.g. méthode CLASLite de Asner 2009 basée sur les variations de l'indice ForestCover, méthode « Coupe rase » de l'IRSTEA basée sur les variations de NDVI, méthode HANSEN 2013 basée sur les deux indices).

Références en exemple

Asner G.P., Knapp D.E., Balaji A. & Páez-Acosta G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASLite. Journal of Applied Remote Sensing, 3, 033543-033543-24.	Application sur différents sites au Brésil, Pérou, Etats-Unis
Potapov P.V., Dempewolf J., Talero Y., Hansen M.C., Stehman S.V., Vargas C., Rojas E.J., Castillo D., Mendoza E., Calderon A., Giudice R., Malaga N. & Zutta B.R. (2014). National satellite-based humid tropical forest change assessment in Peru in support of REDD plus implementation. Environmental Research Letters, 9.	Application de la méthode Hansen au niveau national au Pérou
Osé K. & Deshayes M. (2015). Détection et cartographie des coupes rases par télédétection satellitaire - Guide méthodologique version 5.0. document IRSTEA UMR Tetis. 72p.	Application sur différentes régions métropolitaines (Normandie, LR, PACA...)

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Cette couche devra couvrir de façon la plus exhaustive possible l'ensemble des massifs forestiers tels que délimités par les couches de références produites par l'IGN (BDForêt®, OCS-Ge, ou autres couches de référence indiquée par le Ministère), susceptibles de subir des dégradations et déforestations. Cette zone sera appelée périmètre forestier restreint.

Elle devra aussi couvrir a minima les zones occupées par les formations végétales naturelles non forestières et les zones agricoles en transitions, telles qu'indiquées par une couche ad hoc fournie par le Ministère (basée sur OCS-Ge ou tout autre information équivalente disponible), susceptibles de présenter des reboisements. Cette zone sera appelée périmètre forestier étendu.

Surfaces estimées pour chaque territoire

Territoire	971	972	973	974	976	St Martin
Périmètre restreint (ha)	71 000	49 000	8 130 000	88 000	6 000	1 000
Périmètre étendu (ha)	12 000	6 000		51 000	28 000	2 000

4. FREQUENCE ET PLANNING DE PRODUCTION :

Compte-tenu des contraintes d'ennuagement, impactant la capacité d'observation des territoires visés, et compte-tenu que la majorité des changements d'origine anthropiques sont rythmés par les saisons sèches. La production des informations se concentrera autant que faire se peut sur l'exploitation d'images datées de la fin de saison sèche.

Périodes des saisons sèches pour chaque territoire

Territoire	971	972	973	974	976	St Martin
Début saison sèche	Janvier	Février	Août	Mai	Juin	Février
Fin saison sèche	Avril	Avril	Novembre	Novembre	Septembre	Avril

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

La couche sera produite en vecteurs au format shapefile (ESRI). Chaque entité se verra attribuée des champs d'information suivants : superficie en hectare de l'entité, date de l'image utilisée pour l'observation, type de changement (perte, gain, dégradation), valeur des indices à l'année n-1, valeur des indices à l'année n. La table attributaire sera accompagnée de champs libres permettant aux utilisateurs de la couche de qualifier l'information en indiquant à minima la validation/invalidation après contrôle, la date du contrôle, le nom de l'agent ayant effectué le contrôle, la nature du changement observé (coupe d'exploitation, défrichements, ...).

Cette couche sera transmise aux organismes en charge des contrôles sur les territoires au maximum 4 mois après la fin de saison sèche du territoire concerné par sa mise à disposition sur une plate-forme permettant le téléchargement des données. Chaque mise à jour ou production d'une nouvelle couche sera accompagnée d'une information aux organismes de contrôle des territoires destinataires de ces informations.

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Pour s'assurer du niveau d'exhaustivité de la couverture produite et de sa qualité, celle-ci sera accompagnée d'une mosaïque composée des images optiques utilisées pour sa production. Cette mosaïque sera ortho-rectifiée, géométriquement superposable aux produits de l'année précédente (i.e. restitués dans un référentiel connu adapté à chaque territoire), désennuagée, corrigée radiométriquement en réflectance apparente dite TOA (Top of Atmosphere), corrigée des effets de BRDF (Bidirectionnal Reflectance Distribution Fonction) liés aux variations d'angles d'acquisition des images et mise à disposition sous un format raster multicanal. Elle permettra de préciser le % de surface effectivement observée sur le périmètre forestier restreint ainsi que sur le périmètre étendu pour l'année n. Elle sera mise à disposition des agents publics responsables du contrôle des forêts publiques et privées, en tant qu'élément de validation.

Les informations de validation renseignées par les agents de terrain sur la couche produite pour l'année n seront réutilisées l'année suivante de façon à nettoyer la couche de ses commissions et éventuelles omissions. Cette couche nettoyée servira de référence pour la production de la couche du millésime suivant et sera retransmise aux territoires.

INTERVENANTS POTENTIELS :

L'IRSTEA qui a développé l'application coupe rase au sein de l'UMR Tetis dans le cadre de l'IDS Théia-GéoSUD, a déjà démontré ses capacités en termes de traitement d'images et d'automatisation pour la détection de changements en milieu forestier tempéré. Cette expertise pourrait être adaptée aux contextes tropicaux. Interlocuteur : K. Osé, R. Cresson (Ingénieurs de recherche).

L'Office National des Forêts (ONF) et le Parc Amazonien de Guyane (PAG) au sein de l'Observatoire de l'Activité Minière ont développé depuis 2008 une expertise en matière de détection des déforestations liées à l'activité minière et aux suivis du développement des activités agricoles en zone forestière (abbatis). Interlocuteur : A. Coppel (ONF), P. Joubert (PAG). Une expertise de ce type existe aussi au sein de l'ONF-international (Interlocuteur : C Lardeux) et de l'UR Forêts & Sociétés du CIRAD (Interlocuteur : V. Gond).

ESTIMATION DES COUTS (HORS INTERVENTIONS AGENTS DE POLICE) :

- Développement méthodologique et automatisation (une fois) : $\approx 35\,000\text{ €}$
- Mise en œuvre sur les territoires (annuellement) : $\approx 30\,000\text{ € / an}$
- Formation des agents de terrain pour utilisation de la couche (une fois puis à la demande) : $\approx 15\,000\text{ € / sessions}$

ACTION 2 : SUIVI DES DEGRADATIONS ET DEFORESTATIONS LIEES AUX ACTIVITES HUMAINES DANS LES ROM-COM

OPTION B : SURVEILLANCE EN CONTINU DES DEFORESTATIONS, DEBOISEMENTS & DEGRADATIONS EN FORET

Résumé du produit : il s'agit de mettre en place un système d'alerte par détection des changements sur la base d'images optiques haute résolution de type LANDSAT ou SENTINEL

OBJECTIFS:

- **Informers en temps réel** les agents publics responsables du contrôle, de la conservation et de la gestion des forêts publiques et privées (DAF, ONF, Parcs...), des changements d'état détectés dans les massifs forestiers sous leur juridiction ;
- Faciliter la production de statistiques annuelles de déforestation et dégradation par territoires (après validation et renseignement de la couche produite par les agents publics précédemment cités) par les organismes intéressés par ce suivi (Observatoires régionaux, DAF, CITEPA...) ;
- Faciliter le renseignement des statistiques d'évolution des surfaces forestières dans le cadre de l'enquête FRA ouverte tous les 5 ans par la FAO et renseignées par l'ONF pour le compte du MAAF ;
- Faciliter la mise à jour des couches forêts (BDForêt) et des couches OCS-Ge (Occupation du Sol à grande échelle) produites par l'IGN à fréquence irrégulière.

LIVRABLES:

Il s'agit de mettre en place un système de détection et d'alerte (par imageries satellitaires) permettant d'informer le plus tôt possible les agents publics de toute perte de couvert ou dégradations se produisant au sein des massifs forestiers préalablement délimités qu'ils sont en charge de contrôler, dans les ROM-COM suivant : Guadeloupe, Martinique, Guyane, la Réunion, Mayotte, St Martin. L'information sera transmise sous la forme d'une couche géo-référencée régulièrement mise à jour et partagée sur un serveur permettant un travail collaboratif entre agents des territoires et détecteur. Cette couche sera accompagnée d'une mise à disposition des images utilisées pour la détection, et fera l'objet d'une consolidation annuelle pour la production millésimée et qualifiée des changements détectés au cours de l'année.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Idem Fiche 2A.

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :
2. PRECISION ET FIABILITE :
3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Idem Fiche 2A.

4. FREQUENCE ET PLANNING DE PRODUCTION :

Sur le périmètre restreint, les détections de pertes forestières et dégradations seront produites en temps réel, c'est-à-dire dans un délai maximum de 15 jours suivant l'acquisition des images satellitaires, et sans interruption au cours de l'année. En fin d'année une consolidation des

informations accumulées depuis le dernier millésime sera effectuée et intégrera les informations de validation apportées par les agents publics en charge du contrôle.

Les détections de reboisements et reforestations ne feront pas l'objet d'un suivi en continu mais seront produites en fin d'année n sur la base d'une analyse simplifiée (data-à-date) des meilleures images collectées en cours de l'année n sur le périmètre restreint et étendu, comparées à celles collectées l'année n-1.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

Les informations seront produites format shapefile (ESRI). Chaque entité sera attribuée des champs d'information suivants : superficie en hectare de l'entité, date de détection, type de changement observé (perte, gain, dégradation), indice de fiabilité. La table attributaire sera accompagnée de champs libres permettant aux utilisateurs de la couche de qualifier l'information en indiquant à minima la validation/invalidation après contrôle, la date du contrôle, le nom de l'agent ayant effectué le contrôle, la nature du changement observé (coupe d'exploitation, défrichements, ...). Ces informations seront mises à disposition sur une plateforme permettant le téléchargement des données et la modification des champs libres de la table attributaire en ligne. Chaque mise à jour sera accompagnée d'une information aux différents organismes en charge des contrôles sur les territoires concernés.

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Un indice de fiabilité sera développé pour évaluer la qualité de l'information obtenue. Cet indice sera renseigné pour l'ensemble des entités détectées et se basera sur l'intensité des changements observés (par rapport à des seuils prédéfinis) et la cohérence temporelle (par comparaison avec les informations antérieures). Cette information complémentaire sera comprise dans la table attributaire mise à disposition des agents publics responsables du contrôle des forêts publiques et privées, en tant qu'élément de validation. Les images utilisées pour la détection, ortho-rectifiées, géométriquement superposables aux produits de l'année précédente (i.e. restitués dans un référentiel connu adapté à chaque territoire), désennuagées, corrigées radiométriquement en réflectance apparente dite TOA (Top of Atmosphere), corrigées des effets de BRDF (Bidirectionnal Reflectance Distribution Fonction) liés aux variations d'angles d'acquisition des images, seront aussi mises à disposition sur le serveur sous un format raster multicanal. Les informations de validation renseignées par les agents de terrain sur la couche produite au cours de l'année n seront utilisées en fin d'année de façon à nettoyer la couche finale de ses commissions et éventuelles omissions. Cette couche nettoyée servira de référence pour la production d'une couche millésimée consolidée et sera transmise aux territoires.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Idem Fiche 2A.

ESTIMATION DES COUTS (HORS INTERVENTIONS AGENTS DE POLICE) :

- Développement méthodologique et automatisation (une fois) : $\approx 35\,000\text{ €}$
- Mise en œuvre sur les territoires (annuellement) : $\approx 60\,000\text{ € / an}$
- Gestion de la plate-forme (annuellement) : $\approx 10\,000\text{ € / an}$
- Formation des agents de terrain pour utilisation de la couche (une fois puis à la demande) : $\approx 15\,000\text{ € / sessions}$

ACTION 2 : SUIVI DES DEGRADATIONS ET DEFORESTATIONS LIEES AUX ACTIVITES HUMAINES DANS LES ROM-COM

OPTION C : SURVEILLANCE EN CONTINU DES CHANGEMENTS EN FORET (Y COMPRIS BOISEMENTS ET REBOISEMENTS)

*Résumé du produit : il s'agit de mettre en place un système d'alerte par détection des changements sur la base d'images optiques haute résolution de type LANDSAT ou SENTINEL **intégrant la détection des gains forestiers***

OBJECTIFS:

Idem Fiche 2B

LIVRABLES:

Idem Fiche 2B

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Idem Fiche 2A

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :
2. PRECISION ET FIABILITE :
3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Idem Fiche 2A

4. FREQUENCE ET PLANNING DE PRODUCTION :

Les informations de perte, de dégradation seront produites en temps réel, c'est-à-dire dans un délai maximum de 15 jours suivant l'acquisition des images satellitaires, et sans interruption au cours de l'année. **Compte-tenu de leur dynamique, les gains seront aussi suivis en continu mais sur un pas de temps plus lent.** En fin d'année une consolidation des informations accumulées depuis le dernier millésime sera effectuée et intégrera les informations de validation apportées par les agents publics en charge du contrôle.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :
6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Idem Fiche 2B

INTERVENANTS POTENTIELS :

Idem Fiche 2B

ESTIMATION DES COUTS :

- Idem Fiche 2B + 35 000 € pour le développement méthodologique et automatisation du suivi des gains forestiers en continu.

ACTION 3 : SUIVI DES FLUX DE CARBONE FORESTIER DANS LES ROM-COM

OPTION A : REALISATION DE MESURES DE TERRAIN POUR UNE ESTIMATION DES STOCKS DE CARBONE FORESTIERS AU TIER 2 SUR LES ROM-COM

Résumé du produit : Acquisition de données de terrain permettant une meilleure estimation des principaux stocks de carbone forestiers dans les ROM-COM où seules des données « à dire d'expert » sont actuellement disponibles

OBJECTIFS:

- Recueillir des données de terrain sur les territoires et principales formations forestières pour lesquelles aucune donnée précise n'est actuellement disponible concernant les stocks de carbone forestiers ;
- Améliorer les reportages REDD sur les ROM-COM en produisant des données contextualisées fiables permettant d'atteindre *a minima* un niveau de précision Tier2 sur tous les territoires ;
- Faciliter et préparer la mise en place d'un inventaire forestier statistique par l'IGN sur les ROM-COM ;
- Faciliter et préparer la réalisation ultérieure de cartes de prédiction des stocks de carbone forestier sur les territoires dépourvus de telles couvertures.

LIVRABLES:

Il s'agit de produire une base de données spatialisée à partir de la mise en place d'un prototype de réseau de placettes forestières permettant (1) d'estimer les stocks de carbone forestiers épigés moyens (biomasse et bois morts) sur les territoires ne disposant d'aucune mesures fiables de ce type, et (2) de fournir des données de base permettant de calibrer un dispositif d'inventaire statistique type IFN plus conséquent.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

IGN (en charge de la mise en place de l'inventaire forestier statistique), ONF (en charge du rapportage FRA dans les DOM).

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Les stocks de carbone forestiers à estimer sont définis comme suit :

- Stock de biomasse aérienne : biomasse vivante constituée par la partie aérienne des arbres – ce compartiment comprend l'étage dominant (i.e. tiges de diamètre supérieur ou égal à 10 cm à hauteur de poitrine – DHP $\geq$ 10 cm) et le sous-étage (i.e. tiges de diamètre inférieur à 10 cm et supérieur à égal 2.5 cm à hauteur de poitrine – comprenant les lianes) ;
- Stock de nécromasse : masse ligneuse non vivante, sur pied ou gisant au sol y compris les souches, dont le diamètre apparent est supérieur ou égal à 2.5cm (bois morts) et la litière (débris < 2.5cm) ;

2. PRECISION ET FIABILITE :

Les données devront être recueillies sur des placettes de surface standardisée comprises entre 0.4 et 0.5 ha, précisément géo-référencées et durablement matérialisées de façon à pouvoir assurer un retour sur le dispositif. Les estimations de biomasse aérienne se baseront sur (1) un

relevé précis des diamètres (au demi cm) de tous les DHP ≥ 10 cm ; (2) des mesures précises de hauteurs sur un sous-échantillon d'une trentaine d'arbres DHP ≥ 10 cm par placettes couvrant toutes les classes de diamètres ; (3) des déterminations botaniques (à minima au genre) permettant une estimation de la densité moyenne des bois sur la placette ; (4) mesure des stocks de bois mort sur un sous-échantillon. Aucune obligation de spatialisation et/ou de numérotation des tiges inventoriées n'est imposée. Les mesures suivront des protocoles standardisés précis se référant à des méthodologies éprouvées et publiées.

Exemples de procédures standardisées d'implantation et de mesure de dispositifs forestiers

IGN (2014). Les données de l'inventaire forestier : état des lieux et évolution. La feuille de l'inventaire forestier n°34. 17p (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article335)	Méthodologie de mesures IFN
Ledo, A. (2015). Protocol for inventory of mapped plots in tropical forest. <i>Journal of Tropical Forest Science</i> , 240-247. (https://www.researchgate.net/publication/265215924_Protocol_for_inventory_of_mapped_plots_in_tropical_forest)	Exemple de protocole allégé pour mise en place rapide d'un réseau de placettes en forêt tropicale

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Le proto-réseau comprendra une vingtaine de placettes par territoire et couvrira prioritairement les formations forestières dominantes et le principal gradient environnemental structurant la végétation selon le contexte (altitude / climat / géologie / relief). Ce réseau pourra s'appuyer sur les dispositifs de suivi forestiers déjà mis en place et/ou compléter ces dispositifs dont les données seront alors intégrées à la base de données de référence. La Guyane disposant déjà de données et de dispositifs *ad hoc*, n'est pas concernée.

Territoire	971	972	973	974	975	976
Nb placettes mise en place	9	0	>20	0	0	0
Nb de placettes à mettre en place	11	20	0	20	20	20

4. ETENDUE TEMPORELLE ET PLANNING DE PRODUCTION :

Le dispositif totalisant une surface de 8 à 10 ha par territoire devra être mis en place sur un pas de temps ne dépassant pas 18 mois. La base de données devra être fournie dans un délai maximum de 6 mois suivant les dernières mesures.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

La base de donnée devra formalisée sous un format compatible avec celles développées par les services forestiers de l'IGN et devra contenir *a minima* les niveaux d'informations suivants : placettes (coordonnées UTM, type de formation végétale, dates de mesure, participants aux mesures, surface réelle, surface réelle de la sous-placette « sous-étage », surface réelle de la sous-placette «nécromasse») ; biomasse aérienne (diamètre, hauteur totale mesurée/hauteur totale estimée, hauteur des contreforts, espèce/genre) ; nécromasse (placette échantillonnée, surface échantillonnée, masse mesurée de litière, masse mesurée de bois gisant, masse mesurée de bois sur pied, masse estimée de bois sur pied).

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Ces réseaux seront mis en place avec la participation des services IFN de l'IGN qui seront en charge de veiller à la qualité des données recueillies, à la structuration des données et à leur mode de traitement au regard de leur expérience acquise en ce domaine en métropole.

INTERVENANTS POTENTIELS :

En Guyane et en Guadeloupe, des dispositifs ont déjà été mis en place dans le cadre de collaboration étroite entre les gestionnaires de milieux naturels (ONF et Parcs Nationaux) et laboratoires de recherche (UMR EcoFoG, UAG). Sur les autres territoires, ce type de portage par un consortium réunissant organismes de recherche et organismes de gestion est fortement conseillé. Cette action devant aussi participer à la préparation d'un inventaire statistique *ad hoc* par l'IGN sur ces mêmes territoires, la supervision de l'action devrait être déléguée à l'IGN (maîtrise d'œuvre).

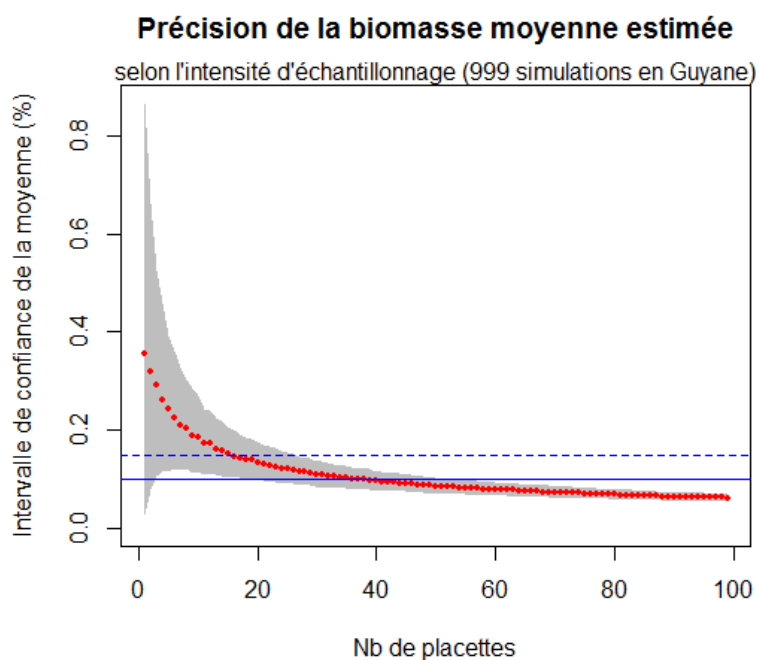
ESTIMATION DES COÛTS :

- Installation des placettes à raison de 10 HJ/ha: $\approx 40\,000$ € par territoire (calage sur expérience guyanaise ajustée pour tenir compte des difficultés d'accessibilité, de mesure sur terrain pentu, des mesures complémentaires)
- Déplacements : ≈ 10 à 25% du temps d'installation selon étendue et difficultés du terrain

	Guadeloupe	Martinique	Réunion	Mayotte	St Barth + St Martin
Déplacements	6 000 €	6 000 €	10 000 €	4 000 €	4 000 €
Installations	25 000 €	40 000 €	40 000 €	40 000 €	40 000 €
Mesure carbone des sols	6 000 €	Données existantes	6 000 €	6 000 €	6 000 €

NB : L'investissement de l'IFN, déjà chiffré dans l'étude IGN dans l'étude MAAF (rapport du 09/01/2017) n'est pas comptabilisé ici. Des financements complémentaires (notamment UE) pourraient être demandés aux niveaux régionaux dans le cadre des programmes FEADER par exemple. La Guadeloupe est partiellement équipée.

PJ : En supposant que la variable biomasse dans les milieux insulaires suit des lois de distribution comparables à la Guyane, la mesure d'une vingtaine de placettes de 0.4 à 0.5ha selon un échantillonnage aléatoire devrait être suffisante pour assurer une estimation moyenne avec une incertitude de l'ordre de +/-15% à l'échelle du territoire au seuil de confiance de 95%.



ACTION 3 : SUIVI DES FLUX DE CARBONE FORESTIER DANS LES ROM-COM

OPTION B : ELABORATION DE MODELES DE PREDICTION DE LA BIOMASSE FORESTIERE SUR LES ROM-COM

Résumé du produit : Réalisation de modèles de prédiction spatiale de la biomasse dans les ROM-COM (hors Guyane et St Pierre et Miquelon) intégrant des données LiDAR, satellitaires et terrain pour une estimation des flux de carbone à un niveau Tier 3.

OBJECTIFS:

- Recueillir des données de terrain selon un protocole rapide sur les territoires et principales formations forestières pour lesquels aucune donnée précise n'est actuellement disponible concernant les stocks de carbone forestiers ;
- Acquérir un échantillonnage de relevés LiDAR combinés aux mesures de données terrain, sur les territoires qui en sont dépourvu, afin de mettre en place des modèles de prédiction spatialisés ;
- Améliorer les rapports REDD sur les ROM-COM en produisant des cartes de biomasse permettant d'atteindre un niveau de précision Tier3 sur tous les territoires ;
- Faciliter et préparer la mise en place d'un inventaire forestier statistique par l'IGN sur les ROM-COM ;

LIVRABLES:

Il s'agit de produire des cartes de distribution spatiale de la biomasse forestière sur les territoires qui en sont dépourvus à partir d'acquisition LiDAR aérien, de la réalisation de campagne de mesures rapides sur le terrain pour la calibration du modèle, et de l'utilisation d'imagerie satellitaire pour l'extrapolation à l'échelle du territoire.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

IGN (en charge de la mise en place de l'inventaire forestier statistique), ONF (en charge du rapportage FRA dans les DOM), Collectivités (en charge de la réalisation des bilans carbone sur leur territoire).

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Les stocks de carbone forestiers à estimer se limitent au stock de biomasse aérienne constituée par les arbres vivants de l'étage dominant (i.e. tiges de diamètre supérieur ou égal à 10 cm à hauteur de poitrine – DHP $\geq$ 10 cm). Le stock de biomasse constitué par le sous-étage, le stock de nécromasse et le stock de carbone organique des sols ne rentrent pas dans le modèle à développer.

2. PRECISION ET FIABILITE :

Ce premier modèle cartographique devra fournir des prédictions sans biais, pour des erreurs relatives moyennes inférieures à 20% ne dépassant pas 50-60 T ms/ha à la résolution de 1km², suivant des méthodologies éprouvées. Compte-tenu de la faible quantité de données disponibles pour calibrer le modèle, la précision et la fiabilité du modèle seront évaluées selon des méthodes de validation croisée à partir de sous-échantillonnages.

Exemples de modèles de prédiction cartographiques développés à des échelles régionales

Fayad, I., Baghdadi, N., Guitet, S., Bailly, J. S., Hérault, B., Gond, V., ... & Minh, D. H. T. (2016). Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data. <i>International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation</i> , 52, 502-514. (https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1610/1610.04371.pdf)	Exemple de modèle spatial de prédiction de biomasse pour la Guyane combinant des inventaires terrain avec des données LiDAR embarqués (GLAS), de produits satellitaires optiques et radar et de co-variables spatialisées
Mascaro J., Asner G.P., Knapp D.E., Kennedy-Bowdoin T., Martin R.E., Anderson C., Higgins M. & Chadwick K.D. (2014). A tale of two "forests": Random Forest machine learning aids tropical forest carbon mapping. <i>PloS one</i> , 9, e85993. (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article335)	Exemple de modèle spatial de prédiction de biomasse en Amazonie combinant des inventaires terrain avec des données LiDAR aéroportées et des produits satellitaires optiques et radar.

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Le modèle couvrira la totalité des formations naturelles boisées des territoires. Sur les territoires dépourvus de couverture LiDAR récente, les relevés LiDAR couvriront environ 10% de cette surface de façon à représenter les principales formations naturelles dominantes et les principaux gradients environnementaux structurant la végétation selon le contexte (altitude / climat / géologie / relief). Les relevés de terrain servant à la calibration du modèle seront implantés suivant 5 à 6 transects couverts par les empreintes LiDAR ou, dans le cas de l'utilisation de données LiDAR anciens, sur des secteurs n'ayant pas subi de profonds changements au cours des dernières années. Les placettes de relevés non permanentes devront être précisément géo-localisées et de taille suffisante pour permettre une calibration précise des données LiDAR ($S \geq 0.25\text{ha}$, largeur $\geq 20\text{m}$). La Guyane, et la partie Basse Terre de la Guadeloupe déjà pourvues ne sont pas concernées (modèle récent). Les territoires avec de très faibles stocks de biomasse (St Pierre-et-Miquelon, St Barthélémy, St Martin) ne sont pas concernés.

Territoire	971	972	974	976
Surface d'acquisition LiDAR (km ²)	41,5	0	139	7
Nb de placettes à mesurer	20 - 30	30-40	30-40	30-40

4. ETENDUE TEMPORELLE ET PLANNING DE PRODUCTION :

Le dispositif de terrain devra être mis en place dans un délai de 18 mois suivant l'acquisition LiDAR et le modèle de prédiction de biomasse dans un délai maximum de 3 ans. Idéalement pour une intégration des données au prochain système de rapportage REDD à partir de 2020.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

Les inventaires de terrain base devront être intégrés dans une base de donnée formalisée sous format xxx qui devra contenir a minima les niveaux d'informations suivants : placettes (coordonnées UTM, type de formation végétale, dates de mesure, participants aux mesures, surface réelle) ; biomasse aérienne (diamètre des tiges, hauteur totale mesurée ou estimée à partir du MNC LIDAR, hauteur des contreforts, espèce/genre).

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Les données terrain et LIDAR seront collectées sous le contrôle des services IFN de l'IGN qui seront en charge de veillée à la qualité des données recueillies, à la structuration des données et à leur mode de traitement au regard de leur expérience acquise en ce domaine.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Plusieurs unités de recherches ont déjà montré leur capacité à réaliser des cartes de biomasse tant sur les territoires concernés, qu'en métropole. Parmi ces organismes on liste l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à l'UMR AMAP, l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) à l'UMR Tetis et les Universités des Antilles et de la Guyane (ex UAG) à l'UMR EcoFoG. La mesure de placettes sur le terrain nécessite l'intervention des gestionnaires d'espaces naturels (ONF et/ou Parcs Nationaux). La prestation devra obligatoirement intégrer l'intervention d'un ou plusieurs partenaires parmi les organismes spécialisés dans la gestion, le contrôle ou l'administration des milieux naturels sur chaque territoire pour la phase d'acquisition terrain. Le pilotage et/ou la réalisation de l'étude impliquera un représentant de l'Institut Géographique National (IGN) en charge des productions cartographiques forestières, en mesure de vérifier la qualification des données produites.

ESTIMATION DES COUTS :

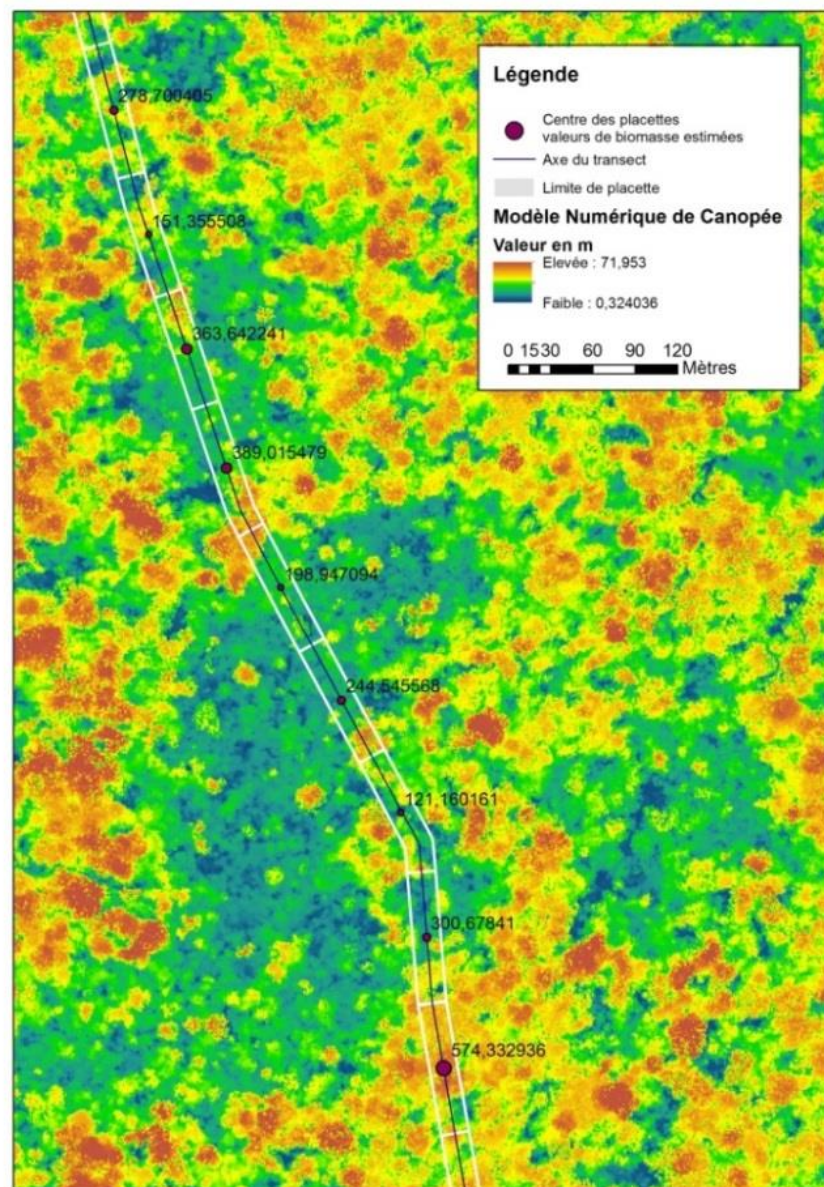
- Installation des placettes à raison de 8 HJ/ha: $\approx 32\,000\text{ €}$ / territoire (calage sur expérience guyanaise ajustée pour tenir compte des difficultés de mesure sur terrain pentu et des efforts de détermination botanique nécessaire à l'estimation des densités de bois)
- Déplacements : ≈ 10 à 25% du temps d'installation selon étendue et difficultés du terrain
- LiDAR : fixe de $5\,000\text{ €}$ / territoire + 2.00 €/ha
- Modélisation : $38\,000\text{ €}$ (≈ 6 mois d'ingénieurs ou équivalent de 6 mois de stages rémunérés/territoires avec encadrement)

	Guadeloupe	Martinique	Réunion	Mayotte
Déplacements	5 000 €	4 000 €	10 000 €	4 000 €
Installations	17 000 €	32 000 €	38 000 €	32 000 €
Acquisition LIDAR	13 000 €	en cours d'acquisition	30 000 €	7 000 €

NB : en Guadeloupe, les coûts d'installation des placettes et d'acquisition LIDAR sont réduits du fait de l'exclusion de la partie Basse Terre mais les déplacements sont importants du fait des transports inter-îles.

L'investissement de l'IFN, déjà chiffrés dans l'étude IGN pour le compte du MAAF (rapport du 09/01/2017) n'est pas comptabilisé ici. Des financements complémentaires (notamment UE) pourraient être demandés aux niveaux régionaux dans le cadre des programmes FEADER.

PJ : Exemple de dispositifs avec placettes rectangulaires de 0.2ha disposées sur transects avec couverture LiDAR (Modèle numérique de canopée en fond coloré) – site Itoupé (Guyane)



ACTION 3 : SUIVI DES FLUX DE CARBONE FORESTIER DANS LES ROM-COM

OPTION C : SUIVI DES FLUX DE CARBONE FORESTIER CONSECUTIFS A LA DYNAMIQUE FORESTIERE

Résumé du produit : Il s'agit d'inciter et faciliter la production de données sur les évolutions du stock de carbone en forêt des ROM-COM dans les contextes qui sont dépourvus de dispositifs de suivis, afin de pouvoir intégrer dans les bilans carbone non seulement les effets des changements d'affectation des sols mais aussi les flux liés à la dynamique forestière après perturbation anthropique.

OBJECTIFS:

- Favoriser l'installation de dispositifs de suivi de la dynamique forestière dans les ROM-COM afin de compléter le réseau français sur ce thème en comblant l'absence de données concernant les évolutions des stocks de carbone forestiers dans certains contextes (Antilles – îles de l'Océan Indien) ;
- Contribuer à la pérennisation et à la standardisation des dispositifs de suivi de la dynamique forestière existants outre-mer ;
- Améliorer les bilans REDD sur les ROM-COM en tenant compte des potentiels effets puits ;
- Faciliter et préparer la mise en place d'un inventaire forestier statistique par l'IGN sur les ROM-COM ;

LIVRABLES:

Financement d'un programme spécifique permettant la constitution d'un réseau de suivi du fonctionnement des écosystèmes forestiers couvrant les différents contextes outre-mer et intégrant l'appui aux dispositifs anciens (Guyane), la consolidation et la standardisation des dispositifs récents (Guadeloupe) et l'aide à l'installation de dispositifs nouveaux (Océan Indien, St Pierre et Miquelon).

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

IGN (en charge de la mise en place de l'inventaire forestier statistique), ONF (en charge du rapportage FRA dans les DOM), Collectivités (en charge de la réalisation des bilans carbone sur leur territoire), Organismes de recherche.

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Les stocks de carbone forestiers dont les évolutions font l'objet de suivi sont définis comme suit :

- Stock de biomasse aérienne : biomasse vivante constituée par la partie aérienne des arbres – ce compartiment comprend l'étage dominant (i.e. tiges de diamètre supérieur ou égal à 10 cm à hauteur de poitrine – dhp $\geq$ 10 cm) et le sous-étage (i.e. tiges de diamètre inférieur à 10 cm et supérieur à égal 2.5 cm à hauteur de poitrine – comprenant les lianes) ;
- Stock de biomasse souterraine : biomasse de racines vivantes à l'exclusion des radicelles <2mm de diamètre empiriquement intégrées dans la matière organique du sol ;

- Stock de nécromasse : masse ligneuse non vivante, sur pied ou gisant au sol y compris les souches, dont le diamètre apparent est supérieur ou égal à 2.5cm (bois morts) et la litière (débris < 2.5cm) ;
- Stock de carbone organique des sols : carbone organique présent dans les sols minéraux et organiques (y compris les tourbières) jusqu'à une profondeur de 100 cm.

2. REFERENTIELS EN TERMES DE QUALITE VISEE :

A ce jour il n'existe pas de données fiables et précises pour les ROM-COM sur l'évolution des stocks de carbone au sein des écosystèmes forestiers contrairement à la métropole qui dispose de dispositifs mesure *ad hoc* (RENECOFOR, IFN). Seule la Guyane dispose à ce jour de dispositifs permanents permettant de suivre la dynamique forestière avec le réseau de placettes permanentes GUYAFOR qui s'intéresse notamment au suivi de la biomasse aérienne, de la nécromasse, et du stock de carbone organique des sols. Un réseau de 9 placettes forestières de 1 ha a aussi été récemment installé en Guadeloupe selon les mêmes protocoles. Une amélioration quantitative de ce suivi consisterait à compléter le thématiquement (en finançant des mesures dans les compartiments orphelins sur les dispositifs existants) et en étendant spatialement le dispositif sur la zone de l'Océan Indien et sur les « forêts boréales » de St Pierre et Miquelon). Une amélioration qualitative de ce suivi consisterait à mieux insérer ces dispositifs dans les réseaux nationaux (F-ORE-T, RMQS).

Dispositifs de mesure existant pour le suivi des flux de carbone au sein des écosystèmes forestiers

GUYAFOR	Réseau de dispositifs forestiers guyanais comprenant 45 placettes sur 16 sites totalisant 235 ha régulièrement mesurés http://paracou.cirad.fr/experimental-design/guyafor-network
RENECOFOR	Partie française d'un ensemble de sites permanents de suivi des écosystèmes forestiers installés dans 34 pays européens http://www.onf.fr/renecofor/
SOERE F-ORE-T	ORE labellisé en tant que Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement (SOERE) qui rassemble 15 sites forestiers fortement instrumenté et les deux réseaux précédemment listés http://www.gip-ecofor.org/f-ore-t/index.php
RMQS	Réseau de Mesures de la Qualité des Sols pour le suivi des évolutions sous l'effet de grands facteurs naturels et sous l'effet des activités humaines sur 2200 sites répartis uniformément sur un maillage de 16km x 16km https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34

3. TERRITOIRES CONCERNES ET DECLINAISONS LOCALES :

Les objectifs poursuivis seront différents selon les contextes. En Guyane il s'agirait de financer des mesures complémentaires sur les stocks de biomasse souterraines. En Guadeloupe il s'agirait de conforter le réseau naissant en finançant des mesures complémentaires et en aidant à son intégration dans le réseau F-ORE-T. A St Pierre-et-Miquelon et dans l'Océan Indien il s'agirait de lancer un appel à projet pour l'installation de dispositifs permanents.

Contexte	Guyane	Antilles	Océan indien	Nord-Atlantique
Dispositifs	GUYAFOR (CIRAD-ONF-INRA-CNRS)	PNG-ONF-UAG	3 à 4 placettes à créer	3 à 4 placettes à créer
Suivi biomasse aérienne	oui	oui		
Suivi biomasse souterraine	non	non		
Suivi nécromasse	oui	non		
Suivi sol	oui	non		
SOERE F-ORE-T	oui	non		

4. ACTIONS MISES EN ŒUVRE ET PLANNING :

Trois types d'actions et de financements peuvent être envisagés :

- lancement et financement d'un appel à projet ciblé pour l'installation de placettes permanentes dans l'Océan Indien (Mutualisation Réunion – Mayotte) et à St Pierre-et-Miquelon. Ce type de dispositif peut être installé dans un délai de deux à trois ans à partir du lancement de l'appel à projet.
- financement ponctuel sur un ou deux ans pour l'intégration du réseau Guadeloupe dans le dispositif SOERE F-ORE-T sous forme d'une aide forfaitaire de 10 000 € pour audit et mise à niveau du dispositif.
- financement d'une thèse ou d'un post-doc pour l'étude des biomasses racinaires dans les forêts guyanaises.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

Toutes les données produites dans ce cadre pourront être valorisées sous forme de publications scientifiques, notamment les données de biomasse racinaires compte-tenu de l'extrême rareté des références sur ce sujet. Les données issues de ces dispositifs devraient à termes être centralisées et diffusables dans le cadre du réseau national F-ORE-T.

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Le lancement de ces études et la mise en place de ce réseau devraient bénéficier de la participation d'experts dans le domaine de l'écologie forestière tropicale, l'écologie du sol, et l'écophysiologie. Les actuels membres du réseau F-ORE-T pourraient être sollicités pour accompagner ces actions dans le cadre d'un comité de suivi.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Le CIRAD, au sein de l'UMR EcoFoG possède une très grande expérience en matière d'installation et de gestion de dispositifs forestiers permanents (B. Hérault) et est intervenu en tant que référent lors de la mise en place du dispositif de Guadeloupe (L. Blanc). Plusieurs laboratoires ayant des implantations outre-mer possèdent des compétences en termes d'écologie des sols et d'étude de la rhizosphère : l'IRD sur le centre de Cayenne (M. Brossard) et au sein de l'UMR Eco&Sol (J.L. Chotte), l'INRA au sein de l'UMR Amap (A. Stockes). La mesure de placettes sur le terrain nécessite l'intervention et/ou l'encadrement des gestionnaires d'espaces naturels (ONF et/ou Parcs Nationaux). La prestation devra donc obligatoirement intégrer l'intervention de partenaires du territoire parmi les organismes spécialisés dans la gestion, le contrôle, l'étude et/ou l'administration des milieux naturels.

Le pilotage de cette action et la gestion des financements devrait impliquer le GIP ECOFOR qui est en charge de l'animation du réseau SOERE F-ORE-T et qui possède une solide expérience dans la gestion d'appel à projet et suivi de projets de recherche.

ESTIMATION DES COUTS :

- Appel à projet pour installation de nouveaux dispositifs : ≈ 44 000 € (15HJ/ha + déplacement)
- Appel à projet pour étude de la biomasse racinaire : ≈ 100 000 € (1 post-doc)
- Financement mise à niveau et dossier de labellisation SOERE Guadeloupe : ≈ 10 000 € (forfait)

ACTION 4 : SUIVI DES ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES VEGETALES TERRESTRES DANS LES HABITATS FORESTIERS DES ROM-COM

OPTION A : TEST DE PROTOCOLES POUR LE SUIVI DES PRINCIPALES EEE VEGETALES TERRESTRES DANS LE CADRE D'UN DISPOSITIF D'INVENTAIRE FORESTIER REGULIER IFN

Résumé du produit : il s'agit de réaliser une étude comparative de différents protocoles de suivi des EEE dans l'optique d'une intégration dans le cadre d'un dispositif de type IFN

OBJECTIFS:

- Tester la pertinence d'indicateurs de suivi des EEE basé sur des relevés phytosociologiques dans le cadre de dispositifs de type IFN ;
- Faciliter et préparer la mise en place d'un inventaire forestier statistique par l'IGN sur les ROM-COM ;
- Participer au développement d'indicateurs de suivi des EEE végétales en milieux forestiers outre-mer pour l'ONB ;
- Réponse à la Stratégie Nationale relative aux EEE, objectif 2 « Surveiller les espèces exotiques envahissantes et leurs voies d'introductions » action 2.3 « Développer des indicateurs de suivi des EEE » [Elaborer un ensemble d'indicateurs sur les EEE (...) sur (...) l'évolution spatiale ou temporelle de la distribution des EEE (...) Définir la place des EEE dans les systèmes d'évaluation d'état de conservation des écosystèmes et habitats], objectif 8 « Développer les méthodes et outils de gestion innovants » action 8.1 « Concevoir des méthodes et techniques de prévention, de détection et de maîtrise des espèces exotiques envahissantes, y compris la lutte biologique » [Encourager la conception d'outils innovants de prévention et de surveillance permettant d'obtenir un bon rapport coût/efficacité].

LIVRABLES:

Rapport d'étude concernant les protocoles de suivi des populations des principales EEE végétales en milieu naturel terrestre ultra-marin (synthèse bibliographique et essais comparatifs) avec proposition de méthodologies intégrées dans le cadre d'un dispositif de suivi régulier.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Agents des DEAL, DAF, ONF, Parcs Nationaux, Conservatoires Botaniques pour chaque territoire concerné, ainsi que les membres des ONG engagées dans la protection de la nature, le suivi ou la lutte contre les EEE.

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

L'étude comparative devra couvrir les trois volets définis ci-après :

- Etat des connaissances : il s'agit de rassembler les données phyto-sociologiques disponibles et précédemment produites dans le cadre des campagnes de cartographie d'habitats, de caractérisation de végétation, ou de suivi spécifique des EEE végétales dans les milieux insulaires des ROM-COM sujet à un fort envahissement ;

- Test comparatif de méthode : il s'agit d'évaluer l'efficacité des différentes méthodes recensées et/ou de méthodes proposées pour la production d'indicateurs renseignant sur la dynamique des populations d'EEE végétales et leur impact sur les habitats naturels et plus particulièrement sur les espaces boisés – ces tests peuvent prendre la forme d'essai *in situ*, de simulation *in silico*, etc ;
- Mise en place d'un dispositif pilote : il s'agit de mettre en place un dispositif expérimental s'appuyant sur les résultats des deux premiers volets, sur un des territoires étudiés, afin de tester la production de premiers indicateurs sur ce territoire-pilote.

2. PRECISION ET FIABILITE :

Les indicateurs devront s'inspirer de ceux déjà développés en métropole dans le cadre de l'ONB et devront être accompagné d'une évaluation de leur robustesse dans le cadre d'un suivi régulier.

Macdonald, I. A., Thébaud, C., Strahm, W. A., & Strasberg, D. (1991). Effects of alien plant invasions on native vegetation remnants on La Réunion (Mascarene Islands, Indian Ocean). <i>Environmental conservation</i> , 18(01), 51-61.	Evaluation des impacts des EEE à la Réunion par la mise en place d'un dispositif de relevés par transects (remesuré après une décennie)
Florens, F. V., Baider, C., Martin, G. M., Seegoolam, N. B., Zmanay, Z., & Strasberg, D. (2016). Invasive alien plants progress to dominate protected and best-preserved wet forests of an oceanic island. <i>Journal for Nature Conservation</i> , 34, 93-100	Suivi de la dynamique des EEE en milieu forestier sur l'île Maurice à l'échelle régionale
Barbé, M., Fenton, N. J., Laverne, C., Le Péchon, T., Baider, C., & Gigord, L. D. (2015). Changes in lowland dry-forest native and alien plant communities on Réunion Island (Indian Ocean) over 16 years. <i>Botany</i> , 93(12), 843-857.	Suivi de dispositifs permanents à la Réunion (période de 16 ans)

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

L'état des connaissances et le test comparatif de méthodes couvriront l'ensemble des ROM-COM étudiés en contexte tropical (Guadeloupe, Martinique, Guyane, Réunion, Mayotte). Le volet d'essai pilote s'appliquera sur un des ROM-COM les plus concernés par la problématique des EEE (préférentiellement la Réunion ou Mayotte).

4. PLANNING DE PRODUCTION :

L'étude devra être réalisée dans un délai de 2 à 3 ans – par exemple dans le cadre d'un post-doc ou thèse.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

Le rapport d'étude devra être accompagné d'une base de données des relevés phytosociologiques et autres données disponibles pour le suivi de la dynamique des populations d'EEE végétales terrestres dans les ROM-COM désignées. Ces données seront transmises sous format numérique à l'ONB.

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Le dispositif pilote sera mis en place avec la participation des services IFN de l'IGN qui seront en charge de veiller à la qualité des données recueillies, à la structuration des données et à leur mode de traitement au regard de leur expérience acquise en ce domaine en métropole.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Plusieurs organismes faisant partie du Groupe Espèces Invasives de la Réunion (GEIR) se distinguent pour leurs compétences en termes de botanique, phytosociologie, gestion de

données et suivi de dispositifs expérimentaux : le Conservatoire Botanique National des Mascariens (L.Gigor) ; l'Université de la Réunion (D.Strasberg) ; le Parc National de la Réunion (S.Baret) et l'ONF (J. Triolo). L'expérience réunionnaise déjà exportée dans le bassin Indien devrait être mise à profit pour une diffusion dans les autres ROM-COM.

ESTIMATION DES COUTS (HORS INTERVENTIONS AGENTS DE TERRAIN ET FONCTIONNEMENT) :

- Financement thèse ou post-doc : $\approx 90\,000$ €
- Déplacements missions : $\approx 10\,000$ €

ACTION 4 : SUIVI DES ESPECES VEGETALES EXOTIQUES ENVAHISSANTES DANS LES HABITATS FORESTIERS DES ROM-COM

OPTION B : DEVELOPPEMENT D'OUTILS NUMERIQUES INTELLIGENTS POUR LE RELEVÉ DES EEE SUR LE TERRAIN ET LA CONSTITUTION D'UNE BASE D'OCCURRENCE DES EEE

Résumé du produit : il s'agit de développer une application pour smartphone qui permette de faciliter la reconnaissance et la géolocalisation des EEE par les agents des territoires sur le terrain et de centraliser ces informations

OBJECTIFS:

- Faciliter la collecte de données d'occurrence concernant les EEE par les agents publics chargés du contrôle et/ou de la gestion des milieux naturels forestiers à l'aide d'outils numériques portables intelligents ;
- Centraliser les informations recueillies pour les porter à connaissances des organismes en charge du suivi des EEE ;
- Participer au développement d'indicateurs de suivi des EEE végétales en milieux forestiers outre-mer pour l'ONB ;
- Réponse à la Stratégie Nationale relative aux EEE, objectif 2 « Surveiller les espèces exotiques envahissantes et leurs voies d'introductions » action 2.3 « Développer des indicateurs de suivi des EEE » [Elaborer un ensemble d'indicateurs sur les EEE (...) sur (...) l'évolution spatiale ou temporelle de la distribution des EEE (...) Définir la place des EEE dans les systèmes d'évaluation d'état de conservation des écosystèmes et habitats], objectif 8 « Développer les méthodes et outils de gestion innovants » action 8.1 « Concevoir des méthodes et techniques de prévention, de détection et de maîtrise des espèces exotiques envahissantes, y compris la lutte biologique » [Encourager la conception d'outils innovants de prévention et de surveillance permettant d'obtenir un bon rapport coût/efficacité].

LIVRABLES:

Développement d'un outil simple d'aide à la reconnaissance, à la géolocalisation et au signalement des EEE à l'aide d'un smartphone, permettant la collecte et la centralisation des observations d'occurrence effectuées par les agents publics et partenaires lors de leurs déplacements sur le terrain, couplé à une plate-forme permettant la visualisation et l'analyse des données collectées (en termes d'aire d'extension et de dynamique d'occupation).

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Agents des DEAL, DAF, ONF, Parcs Nationaux, Conservatoires Botaniques pour chaque territoire concerné, ainsi que les membres des ONG engagées dans la protection de la nature, le suivi ou la lutte contre les EEE.

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

L'outil développé devra répondre à trois grandes fonctions :

- Fonction de reconnaissance des espèces végétales autochtones et exotiques présentent sur le territoire concerné à partir d'images prises d'un smartphone ;
- Fonction de signalement des EEE par géolocalisation, transmission et centralisation de l'information d'occurrence dans une base de données distante ;
- Fonction d'analyse des données d'occurrence spatialisées pour la production d'indicateur de suivi des populations des principales EEE.

2. PRECISION ET FIABILITE :

L'outil sera développé à partir de technologies ayant déjà fait les preuves de leur efficacité et permettant d'assurer une reconnaissance fiable des EEE (≈ 90% de bonne détermination en fin de processus). Le signalement des EEE devra se baser sur la liste des espèces déclarées envahissantes dans les différents territoires mise à jour annuellement. L'outil devra être utilisable dans les deux principaux systèmes d'exploitation mobiles (iOS et Android). La géolocalisation des occurrences devra être enregistrée avec la meilleure précision possible au regard du contexte et des capacités de localisation de l'utilisateur. La restitution des analyses cartographiques devra être réalisée à minima à une résolution de 1 km².

Références en exemple

Joly A., Bonnet P., Goëau H., Barbe J., Selmi S., Champ J., Dufour-Kowalski S., Affouard A., Carré J., Molino J.-F., Boujemaa N. & Barthélémy D. (2016). A look inside the Pl@ntNet experience. <i>Multimedia Systems</i> , 22, 751-766.	Reconnaissance des espèces végétales sur iOS et Android (déployé à la Réunion, Guadeloupe, Guyane) http://identify.plantnet-project.org/
Wallace, R. D., Barger, C. T., Moorhead, D. J., & LaForest, J. H. (2016). IveGot1: Reporting and Tracking Invasive Species in Florida. <i>Southeastern Naturalist</i> , 15(sp8), 51-62.	Application mobile pour le signalement d'espèces envahissantes dans différents états US (Floride, Ontario ...) en mode coopératif http://apps.bugwood.org/apps/ivegot1/
Silvertown, J., Harvey, M., Greenwood, R., Dodd, M., Rosewell, J., Rebelo, T., ... & McConway, K. (2015). Crowdsourcing the identification of organisms: A case-study of iSpot. <i>ZooKeys</i> , 480, 125.	Application web d'identification collaborative (développée par The Open University en Angleterre) http://www.ispotnature.org/communities/global

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

L'outil devra être utilisable dans les différents territoires désignés selon des modalités contextualisées (adaptation des listes d'espèces et des bases images de références en fonction de la localisation régionale). Un mode de fonctionnement « dégradé » permettra l'utilisation de l'outil en dehors des zones couvertes par les réseaux UMTS (3G) ou LTE (4G).

Surfaces de couverture estimées pour chaque territoire

Territoire	971	972	973	974	975	976	St Martin
Surface totale (1000 ha)	168	106	8242	250	23	38	5
% couverture 3/4G	≈70%	≈90%	<5%	>90%		≈70%	100%

4. PLANNING DE PRODUCTION :

L'outil devra être opérationnel à court terme (délai < 18 mois à partir de la commande) et déployé en ordre de priorité sur les territoires suivants : (priorité 1) Réunion, Mayotte ; (priorité 2) Guadeloupe, Martinique, St Martin ; (priorité 3) Guyane.

Nombre d'espèces exotiques envahissantes reconnues par territoires (d'après TAXREF v10.0 – Gargominy O. et al. 2016)

Territoires	971	972	973	974	975	976	St Martin
Nb espèces végétales autochtones	2379	1964	5315	1461	700	660	421
Nb espèces végétales introduites	227	215	204	1497	166	213	62
Nb EEE végétales	6	7	?	88	?	26	?

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

Les fonctions que devra remplir l'outil impliqueront la production des informations suivantes :

- une banque de données images de référence minimale permettant la reconnaissance automatique d'au moins 50% des espèces présentes les plus communes (représentant 80% des occurrences) et 100% des EEE sur les territoires insulaires (excepté Guyane où le % d'espèces pourra être réduit) ;
- une base de données centralisée répertoriant toutes les occurrences observées des EEE, avec leur date de signalement, leurs coordonnées géographiques, le nom du contributeur, l'espèce déterminée, un indice de fiabilité de la détermination (voir ci-après) ;
- une interface graphique en ligne permettant la visualisation des données collectées partagées par les utilisateurs autorisés.

La diffusion de l'outil aux agents de contrôle et aux contributeurs associés, par l'intermédiaire de leurs structures respectives, impliquera la signature individuelle d'une autorisation d'utilisation et de mise en ligne des données produites permettant leur diffusion via l'interface graphique. Ces autorisations seront rassemblées et transmises par les structures à l'équipe en charge du développement de l'outil.

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

Pour s'assurer de la qualité des informations récoltées un indice de fiabilité du signalement sera développé à partir de différents critères (e.g. qualités des images utilisées pour le signalement, niveau d'expertise du collecteur auto-déclaré,...). Cette information sera produite automatiquement lors du signalement.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Le Consortium Pl@ntNet, rassemblant INRIA, CIRAD, INRA, IRD, a développé et déployé en 2013 l'application Pl@ntNet-mobile iOS, suivi d'une application Android en 2014. Le projet global a dépassé 3.2 M de téléchargement et 10M de données collectées en 4 ans et compte 15 à 20 000 utilisateurs par jour). Des bases de données contextualisées ont déjà été développées pour les flores de la Réunion et de la Guyane, et le seront très prochainement pour la Guadeloupe. Les mécanismes d'identification automatisés exploités par Pl@ntNet sont régulièrement évalués à travers sa participation à la campagne d'évaluation LifeCLEF et sont reconnus comme un des meilleurs moteurs de reconnaissance des plantes par l'image. Des adaptations de l'application mobile ont déjà été développées comme par exemple des systèmes d'alerte par pictogramme (espèces non comestibles) ou des adaptations de l'outil à une communauté ciblée (salades sauvages pour les Ecologistes de l'Euzière). Cet écosystème numérique pourrait être adapté à la problématique particulière des EEE et les bases de références étendues à l'ensemble des territoires suivis à court terme. Interlocuteurs : A. Joly (INRIA) et P. Bonnet (CIRAD).

Le Groupe Espèces Invasives de la Réunion (GEIR) est un groupe de travail qui rassemble de nombreux acteurs institutionnels et associatifs travaillant sur le suivi et la lutte contre les espèces envahissantes. Parmi ces nombreuses actions, le GEIR a mis en place un système de signalement en ligne participatif des espèces envahissantes. Les observations sont visualisable sur le géoportail Mascarine Cadetiana porté par le Conservatoire Botanique des Mascareignes (<http://mascarine.cbnm.org/mascarine/>). Cette expérience réunionnaise pourrait être mise à

profit pour le développement de l'interface de visualisation et d'analyse. Interlocuteur (à contacter) : Catherine Julliot (DEAL Réunion).

ESTIMATION DES COUTS (HORS INTERVENTIONS AGENTS DE TERRAIN) :

- Adaptation de l'écosystème numérique pour répondre aux critères spécifiques (une fois) : $\approx 60\,000$ €
- Développement de l'interface pour le « mapping » et analyse (une fois) : $\approx 90\,000$ €
- Missions de démarrage (constitution ou complémentation des bases de référence contextualisées) : $\approx 15\,000$ € / territoires non couverts ou peu couverts (2 fois dans le prévisionnel : Martinique et Mayotte)

ACTION 4 : SUIVI DES ESPECES VEGETALES EXOTIQUES ENVAHISSANTES TERRESTRES DANS LES HABITATS FORESTIERS DES ROM-COM

OPTION C : DEVELOPPEMENT DE METHODES DE CARTOGRAPHIE DES PRINCIPALES EEE PAR TELEDETECTION DANS LES ROM-COM

Résumé du produit : il s'agit d'étudier la faisabilité de développement d'une méthode de détection des principales espèces exotiques envahissantes à partir d'images multi-spectrales et/ou hyper-spectrales dans le contexte outre-mer

OBJECTIFS:

- Tester la détectabilité de quelques espèces parmi les plus envahissantes dans un contexte tropical forestier diversifié à partir d'images hyper-spectrales aéroportées ;
- Développer et tester des outils de cartographie de présence/abondance des EEE sur un site-pilote des ROM-COM – préférentiellement la Réunion ;
- Envisager la faisabilité d'une intégration de ce type d'outils lors des acquisitions de photo-aériennes par l'IGN ou lors des phases de cartographie des formations végétales par images satellitaires ;
- Répondre à la Stratégie Nationale relative aux EEE, objectif 2 « Surveiller les espèces exotiques envahissantes et leurs voies d'introductions » action 2.3 « Développer des indicateurs de suivi des EEE » [Elaborer un ensemble d'indicateurs sur les EEE (...) sur (...) l'évolution spatiale ou temporelle de la distribution des EEE (...) Définir la place des EEE dans les systèmes d'évaluation d'état de conservation des écosystèmes et habitats], objectif 8 « Développer les méthodes et outils de gestion innovants » action 8.1 « Concevoir des méthodes et techniques de prévention, de détection et de maîtrise des espèces exotiques envahissantes, y compris la lutte biologique » [Encourager la conception d'outils innovants de prévention et de surveillance permettant d'obtenir un bon rapport coût/efficacité].

LIVRABLES:

Rapport d'études concernant le test de faisabilité d'une cartographie des EEE les plus envahissantes à partir d'imagerie aéroportée hyper-spectrale ou spatiale multi-spectrale dans les ROM-COM : étude de cas sur un des territoires insulaires.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Ministère, IGN et réseau de spécialistes des DEAL sur les questions d'EEE, les Conservatoires Botaniques des ROM-COM, ONF.

CRITERES DE PRODUCTION:

1. DEFINITIONS :

Le test de faisabilité devra couvrir trois volets définis ci-après :

- Test de sensibilité: il s'agit de tester la **détectabilité** des principales EEE par analyse de différents types d'images notamment des images hyper-spectrales aéroportées comparées à des images spatiales multi-spectrales de haute à très haute résolution à la fois en milieu naturel ouvert et en milieu forestier ;

- Test de robustesse : il s'agit de tester la **robustesse** des outils suivant différentes modalités susceptibles d'influencer leur performance (altitude / saison / gamme spectrale selon les premiers retours d'expérience) ;
- Essai cartographique : il s'agit de réaliser sur un site-test **une carte** de présence/abondance d'EEE en milieu ouvert et en milieu forestier selon les paramètres optimaux mis en évidence lors des précédents volets.

2. PRECISION ET FIABILITE :

Cette action exploratoire visera à déterminer le niveau de précision spatiale et le niveau de fiabilité qui peuvent être atteint pour une cartographie des EEE à l'aide de l'imagerie optique. Aucune obligation de résultat n'est fixée à l'avance. Le projet sera jugé sur la base des compétences et moyens scientifiques qui seront mis en œuvre. L'étude devra cependant fournir une analyse de performance comparative entre 3 ou 4 types de capteurs (hyper-spectral sur drone et/ou aéroportés, multi-spectral très haute résolution type WorldView3 et/ou haute résolution type Sentinel2 ou Landsat8).

Références en exemple

Mouquet Pascal, Ropert Michel, Bajjouk Touria, Delacourt Christophe (2015). HYSCORES : Cartographies hyperspectrales appliquées aux écosystèmes coralliens et à leur état de santé. Rapport intermédiaire de fin de campagne d'acquisition. 40p.	Evaluation des moyens et ressources nécessaires à la mise en œuvre en routine de techniques de cartographie des récifs coralliens à partir d'images hyperspectrales à la Réunion http://archimer.ifremer.fr/doc/00320/43144/
Jean-Baptiste Feret, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Marie-Jose Lefèvre-Fonollosa, Christophe Proisy, Gregory P. Asner (2015). HYPERTROPIK PROJECT FOR HYPXIM MISSION - Mapping tropical biodiversity using spectroscopic imagery : characterization of structural and chemical diversity using 3-D radiative transfer modeling. 9th EARSeL SIG Imaging Spectroscopy workshop, Luxembourg 14-16 Avril 2015	Application de l'imagerie hyper-spectrale pour l'estimation de la biodiversité en forêt tropicales (dont Guyane française) http://www.sfpt.fr/hyperspectral/wp-content/uploads/2016/08/sfpt_gh6-1.pdf

3. ETENDUE DE COUVERTURE :

Les volets de tests s'appuieront sur des site-pilotes déjà documentés pour la présence d'EEE (sites expérimentaux de lutte ou de surveillance - préférentiellement à la Réunion). Le volet d'essai cartographique devra couvrir une surface significative (de l'ordre d'une trentaine de km²) qui intégrera à la fois des milieux ouverts et des milieux forestiers sujets à envahissement.

4. PLANNING DE PRODUCTION :

L'étude de faisabilité devra être réalisée dans un délai de 2 à 3 ans compatible avec le planning d'un travail de thèse ou de post-doc. Les tests de robustesse devront permettre une comparaison inter-saisonnière et éventuellement interannuelle par des acquisitions répétées dans le temps.

5. INFORMATIONS REQUISES ET MODE DE TRANSMISSION :

Le rapport devra être transmis aux membres du comité de suivi accompagné des données acquises sous un format numérique exploitable par les Systèmes d'Information Géographique communément employés par les organismes publics.

6. CONTROLE DU NIVEAU DE TRAITEMENT ET DE LA QUALITE OBTENUE :

L'étude devra être réalisée en étroite collaboration avec (1) des experts en matière de traitement du signal optique ; (2) les spécialistes de la question des EEE au sein du Ministère de l'Environnement, des services déconcentrés sur le territoire concernés, et des milieux associatifs (GIER pour la Réunion, UICN...) ; (3) l'IGN, opérateur public chargé de l'acquisition, de

l'exploitation et de la diffusion de l'information géographique et forestière pour le compte de l'état et des collectivités publiques. Ces partenaires seront associés dans un comité de suivi de l'étude.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Les spécialistes du traitement du signal hyper-spectral sont rares en France et sont confinés au domaine de la recherche. Un réseau national a été structuré autour du Groupe de Synthèse Hyperspectral (GSH) piloté par le CNES. Dans son rapport de synthèse daté de 2008 (http://www.sfpt.fr/hyperspectral/wp-content/uploads/2013/01/GSH_Rapport_Final_Nov2008.pdf), le GSH considère que la technologie est mûre pour des applications dans le domaine de la « végétation ». Parmi les spécialistes ayant acquis des compétences reconnues dans ce domaine, Jean-Baptiste Feret (IRSTEA) bénéficie d'une longue expérience en collaboration avec le Carnegie Airborne Observatory de la NASA, dans le cadre de travaux portant sur les forêts tropicales.

ESTIMATION DES COUTS :

- Budget d'acquisition d'images multi-spectrales satellitaires : $\approx 20\,000\text{ €}$
- Budget d'acquisition d'images hyper-spectrales aéroportées (avion et/ou drones) : $\approx 150\,000\text{ €}$
- Financement de travaux de thèse ou post-doc : $\approx 90\,000\text{ €}$

ACTION 5 : ANIMATION TECHNIQUE INTER-OUTRE-MER

OPTION A : ORGANISATION D'UN SEMINAIRE TECHNIQUE ANNUEL INTER OUTRE-MER

Résumé du produit : Il s'agit de faciliter les échanges techniques et de favoriser le transfert technologique entre recherche et gestion dans les Outre-mer à travers l'organisation d'un séminaire annuel de 2 jours rassemblant des opérateurs d'outre-mer, des experts métropolitains et des chercheurs de tous horizons autour de thématiques propres aux suivis des formations naturelles dans les contextes ultra-marins

OBJECTIFS:

- Faciliter les échanges techniques entre les territoires et favoriser le transfert technologique ;
- Susciter des collaborations et diffuser les innovations ;
- Assurer une veille technique sur les thématiques intéressant le suivi et la gestion des formations naturelles ultra-marines.

LIVRABLES:

Financement d'un programme d'animation spécifique permettant l'organisation de séminaires, une aide aux frais de déplacements depuis les Outre-mer vers la métropole, et une lettre d'information sur des innovations technologiques ou méthodologiques pouvant répondre aux besoins spécifiques des Outre-mer.

DESTINATAIRES UTILISATEURS – BENEFICIAIRES :

Communautés des administrateurs et gestionnaires de l'environnement dans les OM, communauté de la recherche et du développement travaillant dans ou sur les contextes tropicaux et outre-mer.

CRITERES DE PRODUCTION:

Organisation annuelle d'un séminaire de deux jours rassemblant une centaine de personnes sur des thèmes tournant régulièrement (caractérisation et cartographie des formations végétales outre-mer / suivi de la dynamique forestière naturelle et perturbée outre-mer / détection, suivi et lutte contre les EEE outre-mer / forêts des Outre-mer et changements climatiques ...) avec appel à contribution orale ouvrant droit à une prise en charge partielle des frais de déplacement pour les ultra-marins. Ce séminaire peut aussi être l'opportunité de réaliser un bilan d'avancement des actions engagées aux profits des Outre-mer et de recueillir les avis et retours d'expérience. Il peut éventuellement se coordonner avec l'organisation de formations spécifiques ciblées sur le public de chaque conférence

INTERVENANTS POTENTIELS :

Le GIP-ECOFOR a une forte expérience en matière d'organisation de séminaire et devrait être le porteur de cette action.

ESTIMATION DES COUTS :

- Organisation du séminaire (location de la salle – repas ...) : ≈ 5 000 € (50 €/pers)
- Aide aux frais de transport des ultra-marins : ≈ 20 000 € (1 000 € pour 20 intervenants en communication orale)
- Animation et mise en œuvre d'une lettre d'information suite au colloque : 5 000 €

ACTION 5 : ANIMATION TECHNIQUE INTER-OUTRE-MER

OPTION B : ACTIVATION D'UN APPEL A PROJETS DE RECHERCHE ORIENTE VERS LES TERRITOIRES ULTRA-MARINS

Résumé du produit : Il s'agit d'inciter l'innovation et la recherche sur des sujets spécifiques outre-mer notamment sur les méthodes de cartographie et de suivi d'écosystèmes complexes et diversifiés qui nécessitent de ce fait des adaptations méthodologiques ou des développements spécifiques

OBJECTIFS:

- Orienter une partie des efforts de recherche forestière vers les contextes tropicaux qui nécessitent des adaptations méthodologiques ou des développements spécifiques en termes de méthode de cartographie et de suivi ;
- Susciter des recherches appliquées participant à l'atteinte des objectifs d'amélioration de la compréhension et du suivi des écosystèmes forestiers tropicaux ;
- Compenser l'abandon de l'APR ECOTROP (Ecosystèmes Tropicaux) qui a donné des résultats en matière de transferts recherche-gestion dans les Outre-mer par le passé – et compléter l'offre de programmes de la FRB qui n'intègre pas les mots clefs « outre-mer » ni « forêt tropicale » ;
- Assurer une veille technique sur les thématiques intéressant le suivi et la gestion des formations naturelles ultra-marines.

LIVRABLES:

Animation d'un appel à projet de recherche dans la lignée de l'ancien APR ECOTROP mais explicitement orienté vers les Outre-mer, permettant l'aide au financement de projets de recherche appliquée sur les écosystèmes naturels des territoires ultra-marins (ou intégrant les territoires ultra-marins) et répondant aux besoins de connaissance et de développement du Ministère en charge de l'Environnement.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Communautés des administrateurs et gestionnaires de l'environnement dans les OM, communauté de la recherche et du développement travaillant dans ou sur les contextes tropicaux et outre-mer.

CRITERES DE PRODUCTION:

Gestion d'une enveloppe d'aides pluriannuelles permettant le financement de projets de recherche sur 4 à 5 ans et l'animation du programme (réunion d'un Comité scientifique et d'un comité d'orientation, etc..). La restitution de ces projets peut être coordonnée avec l'action 5.1 d'animation.

INTERVENANTS POTENTIELS :

Le GIP-ECOFOR a une forte expérience en matière d'organisation de séminaire et devrait être le porteur de cette action.

ESTIMATION DES COUTS :

- Enveloppe d'aides à financement d'actions de recherche : ≈ 450 000 € sur 5 ans
- Animation du programme : 5 000 € / an

ACTION 5 : ANIMATION TECHNIQUE INTER OUTRE-MER

OPTION C : ANIMATION D'UN RESEAU « FORETS ULTRA-MARINES »

Résumé du produit : Il s'agit de structurer un réseau d'échange entre acteurs concernés par la gestion et le suivi des espaces forestiers d'outre-mer sur le modèle du Pôle-Relai zones humides d'outre-mer et de son réseau d'observation des mangroves.

OBJECTIFS:

- Animer des échanges formels et réguliers entre les acteurs du suivi, de la gestion et de la recherche forestière dans les Outre-mer ;
- Mutualiser les connaissances, diffuser les méthodes, notamment les méthodes de suivi et de cartographie basées sur la télédétection ;
- Organiser des formations à l'attention des acteurs de l'outre-mer autour des thèmes précédemment traités (cartographie, suivi, bilan carbone, EEE...) ;
- Centraliser et diffuser les données et indicateurs relatifs au suivi des habitats forestiers d'outre-mer.

LIVRABLES:

Constitution d'un réseau d'échange entre les acteurs concernés par le suivi, la gestion et la recherche forestière dans les outre-mer, débouchant sur des propositions régulières d'animations et de formations spécifiques aux problématiques outre-mer.

DESTINATAIRES UTILISATEURS DES LIVRABLES:

Communautés des administrateurs et gestionnaires de l'environnement dans les OM, communauté de la recherche et du développement travaillant dans ou sur les contextes tropicaux et outre-mer.

CRITERES DE PRODUCTION:

Constitution et actualisation en continue d'une base de données des acteurs du réseau. Collecte et mise en ligne des ressources documentaires relatives au suivi et à la cartographie des écosystèmes forestiers d'outre-mer sur un site internet dédié.

INTERVENANTS POTENTIELS :

L'UICN anime actuellement une structure de ce type (pôle-relais zones humides tropicales). L'AFB ou l'une des ARB qui se mettront en place prochainement pourrait aussi jouer ce rôle d'animation.

ESTIMATION DES COUTS :

Actuellement le coût de fonctionnement du pôle-relais ZH tropicales est de l'ordre de 150 000 à 200 000 €/an comprenant des frais de fonctionnement (loyer, internet), deux salaires (CDD+VSC), des frais de missions, des prestations externalisées (site internet, traduction, études) et des activités d'animation soutenues (séminaires, rencontres, élaboration de supports de communication/éducatifs...)

Les deux actions précédentes Fiches 5A et 5B pourraient s'inscrire dans celle-ci.

RESUME

L'étude vise à évaluer la faisabilité d'une **cartographie régulière des habitats forestiers dans les outre-mer** permettant : (1) de répondre aux besoins de rapportages internationaux, concernant les thèmes biodiversité et carbone ; (2) de produire des indicateurs pour le pilotage des politiques nationales relatives à ces thèmes ; (3) de faciliter la gestion des territoires et les politiques d'aménagement mis en œuvre par les administrations et élus locaux.

L'étude comprend 4 volets : (1) **un état de l'art** en matière de cartographie et de suivi des écosystèmes forestiers basé sur une synthèse bibliographique large ; (2) **un état des lieux** basé sur un recensement des initiatives existantes et une enquête en ligne ; (3) une prospective et analyse critique des produits disponibles et en cours de développement s'appuyant notamment sur des **tests méthodologiques** ; (4) **l'élaboration d'un programme d'actions** chiffrées pour une mise en œuvre à court terme d'un suivi cartographique régulier des forêts ultra-marines.

L'état des lieux aboutit à plusieurs constats : (1) une grande hétérogénéité des cartes forestières actuellement disponibles dans les ROM-COM ; (2) une absence de dispositif régulier de suivi des évolutions forestières excepté en Guyane ; (3) un manque crucial de données in situ permettant d'estimer et de cartographier les principaux stocks de carbone forestiers, excepté en Guyane et en Guadeloupe ; (4) une attente locale forte pour la mise en place d'un système de suivi régulier à fréquence annuel et à haute résolution spatiale, couvrant les milieux forestiers et les autres formations végétales naturelles.

La bibliographie fait état de **plusieurs méthodes opérationnelles efficaces de cartographie et de suivi, basées sur les technologies de télédétection**, pouvant être rapidement adaptées et mises en œuvre en s'appuyant sur les programmes publics de mise à disposition d'images (COPERNICUS et Théia-GEOSUD-Seas). Ces traitements peuvent compléter les approches cartographiques photo-interprétatives, et les faciliter, pour aboutir à des produits permettant un suivi précis et robuste des formations végétales et de leurs évolutions.

Trois principales actions sont proposées et déclinées en différentes options :

- le développement de chaînes de traitement multi-sources pour une complémentation spatiale et/ou thématique des cartes forestières produites par l'IGN d'ici 2020, nécessitant un budget de 340 à 630 k€ sur 2 à 3 ans ;
- la mise en place d'un suivi des changements forestiers assisté par satellites, en continu ou sur un pas de temps annuel, facilitant le contrôle des défrichements sur le terrain et améliorant la qualité des rapportages pour un montant de 60 à 75 k€/an ;
- la collecte de données dendrométriques et pédologiques de terrain, l'acquisition de données LiDAR, le développement de modèles de prédiction spatiale et l'installation d'un réseau de placettes forestières permanentes pour une meilleure estimation des stocks et flux de carbone forestiers dans les ROM-COM, pour un budget de 240 à 664 k€ sur 2 à 5 ans ;

Ces actions s'accompagnent de plusieurs propositions complémentaires :

- des projets de recherche-développement-transfert permettant l'intégration à moyen terme du suivi des espèces exotiques envahissantes dans le dispositif de cartographie régulière, pour un budget de 100 à 540 k€ sur 5 ans ;
- un volet d'animation d'échanges techniques, d'appui à l'innovation et d'aide à la diffusion et aux transferts méthodologiques pour un budget de 125 à 325 k€/an.

