

# CHAPITRE 1

## ÉVOLUTION DU COUVERT FORESTIER DU NIVEAU NATIONAL AU RÉGIONAL ET MOTEURS DE CHANGEMENT

*Baudouin Desclée<sup>1</sup>, Philippe Mayaux<sup>1</sup>, Matthew Hansen<sup>2</sup>, Patrick Lola Aman<sup>2</sup>, Christophe Sannier<sup>3</sup>, Benoît Mertens<sup>4</sup>, Thomas Häusler<sup>5</sup>, René Ngamabou Siwe<sup>5</sup>, Hervé Poilvé<sup>6</sup>, Valéry Gond<sup>7</sup>, Mathieu Rahm<sup>8</sup>, Jörg Haarpaintner<sup>9</sup>, Jean-Paul Kibambe Lubamba<sup>10</sup>*

*Avec la contribution de : Peter Potapov, Svetlana Turubanova, Alice Altstatt, Louis-Vincent Fichet, Gernot Ramminger, Sharon Gomez, Guillaume Cornu, Lucas Bourbier, Quentin Jungers, Pierre Defourny, Thuy LeToan, Manuela Hirschmugl, Gabriel Jaffrain, Camille Pinet, Cédric Lardeux, Anoumou Kemavo, Philippe Dorelon, Donata Pedrazzani, Fabian Enfle, Joerg Seifert-Granzin, Landing Mane, Ludovic Nkok Banak, Anton Vrieling, Stéphane Mermoz*

<sup>1</sup>CCR, <sup>2</sup>University of Maryland, <sup>3</sup>SIRS, <sup>4</sup>IRD, <sup>5</sup>GAF AG, <sup>6</sup>Astrium, <sup>7</sup>CIRAD, <sup>8</sup>Eurosense, <sup>9</sup>Norut, <sup>10</sup>UCL

### 1. Introduction

Les forêts tropicales sont au cœur des enjeux internationaux sur le changement climatique et la conservation de la biodiversité. Étant le second plus grand écosystème forestier tropical après l'Amazonie, le bassin du Congo joue un rôle important dans le système climatique continental. Ces forêts d'Afrique offrent des moyens de subsistance à 60 millions de personnes qui y vivent ou résident à proximité (nourriture, pharmacopée, combustibles, fibres, produits forestiers non ligneux). Elles remplissent aussi des fonctions sociales et culturelles. Ces forêts contribuent plus indirectement à alimenter les 40 millions de personnes qui vivent dans les centres urbains proches de ces domaines forestiers (Nasi *et al.*, 2011).

La cartographie des forêts et la surveillance de leur évolution sont d'une importance primordiale. L'état des forêts affecte le bien-être de millions de personnes, influe sur le climat régional et mondial et sur la biodiversité. La connaissance précise de la superficie forestière, de sa composition floristique et de sa dynamique fournissent des informations qui sont essentielles à la mise en place et au suivi des politiques environnementales et économiques. Ces rôles essentiels des forêts sont pris en compte par les accords multilatéraux sur l'environnement tels que la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements climatiques (CCNUCC), par les politiques de réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD +) qui reconnaissent le rôle des forêts dans le cycle du carbone et par la Convention sur la Diversité biologique (CDB) pour qui la perte d'habitat forestier est une cause majeure de baisse de la diversité biologique. La politique européenne

FLEGT (Application des réglementations forestières, gouvernance et échanges commerciaux) réclame également des informations sur la traçabilité des bois et sur le caractère légal des coupes forestières.



*Photo 1.1 : Gombé (Didelotia sp) en forêt mature – Sud Ouest Gabon*

Ce chapitre dresse un aperçu non exhaustif des différentes initiatives de suivi des forêts d'Afrique centrale par image satellite. Le champ d'analyse passe de l'échelle locale, à la couverture nationale voire à celle de l'ensemble de l'Afrique centrale.

La plupart des études identifient les surfaces touchées par la déforestation mais d'autres, plus récentes, tentent de suivre des changements de couvert forestier plus limités tels que la dégradation forestière et la réduction de la biomasse.

*Photo 1.2: Canopée de forêt mixte au Nord du Gabon.*



## 2. Initiatives nationales de suivi du couvert forestier

Plusieurs pays dont le Gabon, le Cameroun, le Congo, la RCA et la RDC, se sont officiellement engagés dans le processus REDD+ (voir chapitre 5). Ces pays doivent mettre en place un système intégré de Mesure, Notification et Vérification (MNV) des changements liés à la déforestation et/ou à la dégradation des forêts mais aussi ceux résultant de l'amélioration du couvert forestier. Cartographier les zones de changements du couvert forestier est indispensable pour élaborer des stratégies localement adaptées afin de mieux contrôler ces dynamiques. Une cartographie nationale très détaillée n'est exigée que tous les 3 à 5 ans, mais les évolutions du couvert forestier doivent être suivies plus fréquemment. Cette démarche MNV nécessite la mise en place de normes nationales (telles que la définition de «forêt» en termes de couvert forestier) et l'implication d'experts nationaux dans les processus de cartographie et de validation.

**Tableau 1.1:** Liste partielle des projets d'appui aux initiatives nationales et locales de cartographie des changements de couvert forestier.

Nom (*)	Pays	Leader	Partenaires institutionnels /pays	Partenaires techniques	Bailleurs	Durée	Période d'analyse	Couverture	Application recommandations GIEC
GSE-FM	Cameroun	GAF	MINFOF, MINEP	FAN	ESA, KFW	2008-2010	1990-2000-2005	Pays	Non
	Congo	GAF	MDDEFE	SIRS, JR	ESA, FFEM	2010-2014	1990-2000-2010	Pays	Oui
	Gabon	SIRS	AGEOS	GAF, JR	ESA, FFEM	2010-2014	1990-2000-2010	Pays	Oui
OSFT	RCA	Astrium	MEEDD	IGNFI	AFD	2010-2014	1990-2000-2010	33 sous-préfectures (55 % Pays)	Oui
REDDAF	RCA	SIRS	MEEDD	GAF, CESBIO, JR, LACCEG	EU	2010-2013	1990-2000-2010	Région Sud-Ouest	Oui
	Cameroun	GAF	MINEPDED	SIRS, CESBIO, JR, GTG	EU	2010-2013	1990-2000-2010	Province Centre	Oui
FACET	Congo et RDC	OSFAC	-	SDSU, UMD, WRI	CARPE/USAID, NASA, CBFF/BAD	2009-2013	2000-2005-2010	Pays	Non
ReCover	RDC	Norut	OSFAC	ALUFR, GMV	EU	2010-2013	1990-2000-2005-2010	Région Ouest	Non
REDDiness	Congo, Gabon	Eurosense	MEF (Gabon), CNIAP (Congo)	ITC, IRD	EU	2011-2013	2007-2012	Sud Congo, Sud-Est Gabon	Non

(\*) Voir la page des acronymes en début d'ouvrage pour la signification des abréviations de ce tableau.

Les méthodologies de cartographie peuvent différer d'un pays à l'autre vu les contextes variés et des normes nationales différentes. Les initiatives nationales ou locales de cartographies des changements du couvert forestier sont présentées ci-

après (tableau 1.1 ci-avant). Cette section détaillera ensuite les initiatives de cartographie nationale uniquement pour le Gabon, le Cameroun, le Congo et la RCA car la cartographie de la RDC (FACET) a déjà été publiée dans l'État des Forêts 2010.

## 2.1 Gabon

Le Gabon dispose d'une cartographie complète de son couvert forestier pour les années 1990, 2000 et 2010. Cette cartographie a été réalisée dans le cadre du projet GSE-FM Gabon grâce au traitement d'images satellites Landsat pour les années 1990 et 2000, et d'une combinaison des images Landsat et Aster pour 2010. Pour couvrir l'ensemble du territoire gabonais 300 images satellites ont dû être utilisées à cause du couvert nuageux permanent, alors qu'une quinzaine d'images

Landsat auraient suffi par temps clair.

La cartographie détaillée a d'abord été réalisée sur l'année de référence 2000. Chaque image de l'année 2000 a été traitée et classée séparément pour en extraire le couvert forestier. Un contrôle qualité détaillé a été appliqué pour chaque image et les résultats ont été mosaïqués pour créer la couche nationale Forêt/Non Forêt (F/NF) de l'année 2000. Cette carte F/NF 2000 a ensuite été superposée aux images de 1990 et 2010 pour

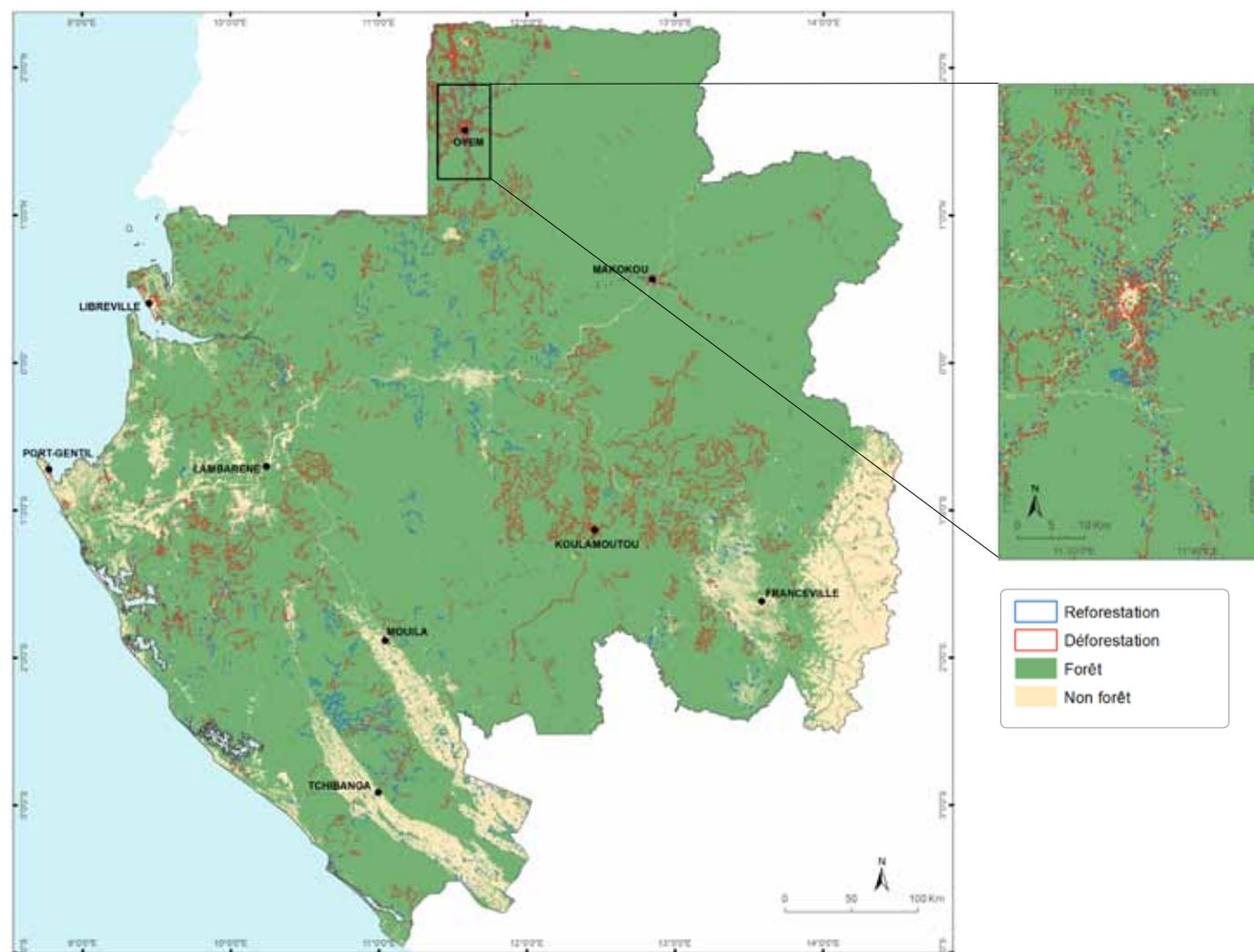


Figure 1.1: Carte du couvert forestier du Gabon et de son évolution entre 1990 et 2000

Source: GSE-FM Gabon

en extraire les changements observés et les classer selon une nomenclature compatible avec celle du GIEC. La précision des cartes F/NF produites a été évaluée à près de 98 % pour les 3 périodes. La méthodologie employée est décrite en détail par Fichet *et al.* (2012 et 2013).

Afin d'améliorer les estimations des changements forestiers, les cartes F/NF ont été combinées à un échantillonnage systématique photo-interprété couvrant 1 % de la surface du Gabon (Sannier *et al.*, 2014). Les résultats pour l'ensemble du Gabon sont détaillés dans le tableau 1.2. La forêt couvre plus de 88 % du territoire gabonais soit environ 236 000 km<sup>2</sup>.

**Tableau 1.2:** Estimations de l'évolution du couvert forestier du Gabon entre 1990, 2000 et 2010

	Unités	1990	2000	2010	1990-2000	2000-2010
Gabon	km <sup>2</sup>	267 667			Déforestation nette	
Couvert forestier	km <sup>2</sup>	237 380	236 570	236 335	810	235
	%	88,68	88,38	88,29	0,34	0,09
Incertitude (95 % IC)	km <sup>2</sup>	±664	±711	±698	±293	±259
	%	±0,25	±0,27	±0,26	±0,13	±0,11

Source: GSE-FM Gabon

Le taux de déforestation nette entre 1990 et 2000 est de 0,34 % soit une diminution du couvert forestier d'environ 800 km<sup>2</sup>. La déforestation brute est estimée à un peu plus de 1200 km<sup>2</sup>. Près de la moitié de la déforestation est due à l'exploitation forestière et à l'ouverture de routes alors que près d'un tiers résulte de la conversion de la forêt en cultures, prairies ou savanes. L'agriculture itinérante sur brûlis se confond avec la savane sur les images satellites. La reforestation est de l'ordre de 400 km<sup>2</sup> et les principales causes en sont la conversion des savanes/prairies en forêts pour plus de 60 % et la reforestation des routes d'exploitation forestières pour 25 %.

Entre 2000 et 2010, un ralentissement très net de la déforestation est observé, puisque le taux de déforestation observé est de 0,09 %, valeur qui n'est pas significativement différente de zéro. Ceci peut s'expliquer par la faible densité de la population rurale, une moindre dynamique agricole et par les mesures institutionnelles prises par le Gabon pour les parcs nationaux et par le code forestier. Treize parcs nationaux sont répartis sur l'ensemble du territoire et le code forestier a obligé les exploitants à réaliser des plans d'aménagements forestiers. Une autre explication possible est à rechercher dans les conditions écologiques généralement favorables à une régénération forestière rapide, notamment une très bonne pluviométrie et une bonne dissémination des graines par une diversité faunistique importante (Doucet, 2003). On pourrait également ajouter que le relief accidenté constitue un frein à l'exploitation permanente des massifs forestiers. Ces explications doivent être confirmées par les études en cours au Gabon sur les causes de la déforestation et de la reforestation.



© Carlos de Wasseige

**Photo 1.3:** Les espaces péri-urbains sont de moins en moins forestiers aux alentours des grandes villes.

## 2.2 Cameroun

Une couverture nationale complète d'images satellites Landsat de 1990 et 2000, et DMC de 2005/2006 a été acquise et analysée pour terminer l'évaluation du couvert forestier du Cameroun. Les zones forestières et non forestières ont été cartographiées pour ces années par unités de 5 ha minimum. Deux projets distincts (GSE-FM Cameroun et REDDAF) ont entrepris de cartographier les variations du couvert forestier dans le pays mais leur travail s'est limité à la région Est et à la région Centre en raison de contraintes budgétaires.

Des cartes de changements de couvert ont été produites pour les périodes 1990-2000 et 2000-2005 à partir des cartes forêt/non forêt (F/NF) de la région Est (figure 1.2). Les zones qui ont été déboisées ont ensuite été classées en cinq catégories compatibles avec le GIEC: culture, savane/prairie, marécage, habitat et autres terres. Les données d'apprentissage nécessaires à la classification F/NF ont été dérivées d'imageries à très haute résolution (THR) et de vérifications sur le terrain.

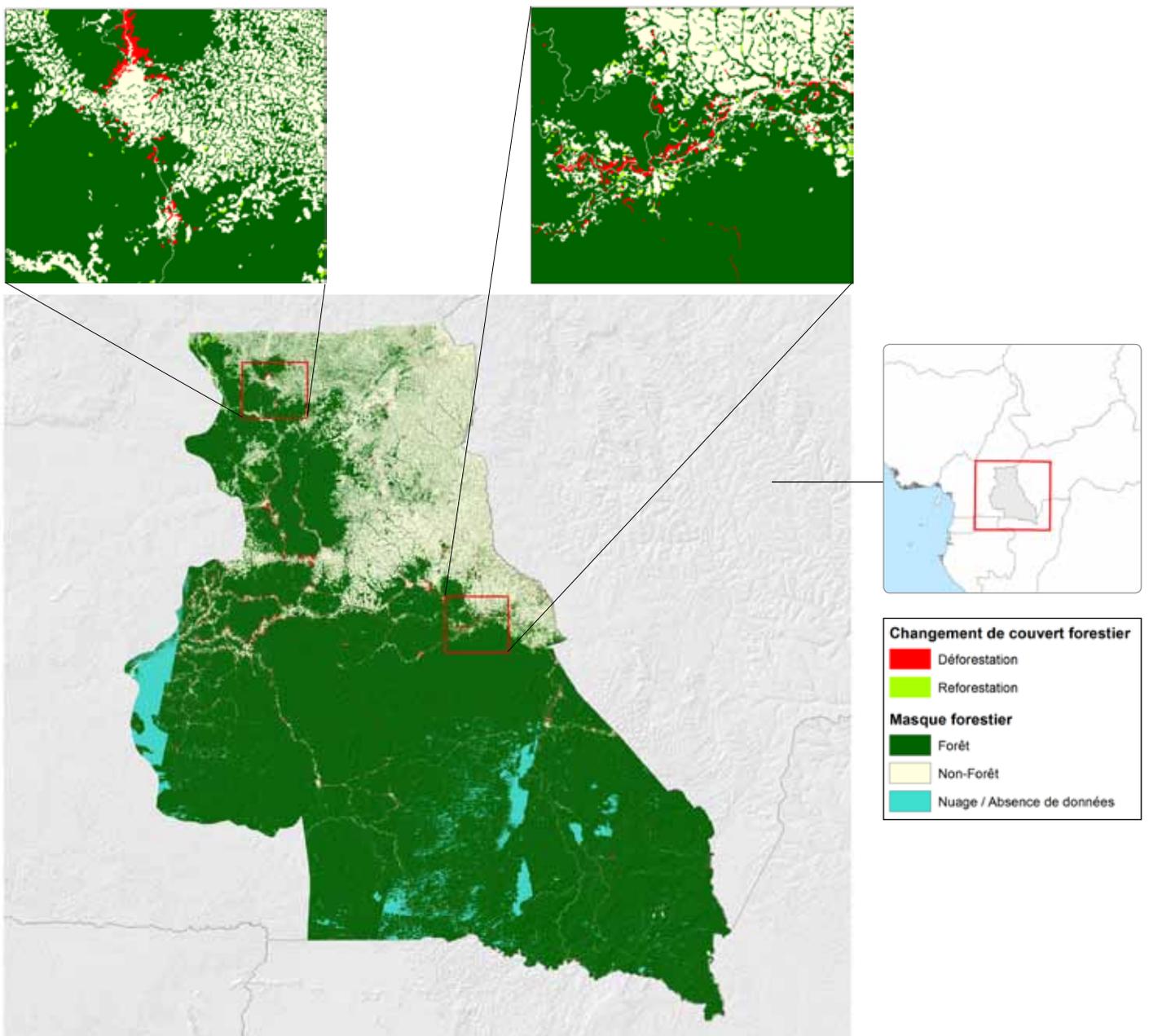


Figure 1.2: Les changements du couvert forestier (en rouge) dans la région Est du Cameroun au cours des périodes 1990-2000 et 2000-2005

Source: GSE-FM Cameroun

Le tableau 1.3 présente les superficies affectées par les changements du couvert forestier pour les trois années de référence (1990, 2000 et 2005). En raison de la couverture nuageuse, la zone cartographiée représente environ 96 à 98 % des 112 950 km<sup>2</sup> de la région Est. Cette zone (et les zones de couvert forestier correspondantes) diffère dès lors légèrement d'une période à l'autre<sup>(\*)</sup>. Le taux de déforestation brut pour la période 1990-

2000 est estimé à 0,86 %. On note des recolonisations forestières significatives (0,21 %) pendant cette période, qui ont ramené le taux de déforestation net à 0,65 %. Pour la période 2000-2005, le taux de déforestation brut est de 0,07 %. Étant donné les recolonisations élevées (0,10 %), le taux de déforestation net pour la période 2000-2005 est estimé à -0,03 %.

**Tableau 1.3:** Estimations des changements de couvert forestier dans la région Est du Cameroun au cours de la période 1990-2000-2005

Région Est		1990	2000 (a)*	2000 (b)*	2005	1990-2000	2000-2005
Zone cartographiée	km <sup>2</sup>	108 854		110 781		Déforestation nette	
Couverture forestière	km <sup>2</sup>	87 991	87 424	89 187	89 209	567,7	-22,9
	%	80,83 %	80,31 %	80,51 %	80,53 %	0,65 %	-0,03 %

(\*) Voir le texte pour une explication.

Source: GSE-FM Cameroun

## 2.3 République du Congo

Un exercice de cartographie du couvert forestier et de ses changements pour les années 1990-2000-2010 a été réalisé dans le cadre du projet GSE-FM Congo. Bien que le but du projet soit la cartographie totale du pays en vue d'élaborer la stratégie REDD nationale en y impliquant le gouvernement camerounais (MINFOF et MINEP), les premières analyses n'ont été effectuées que pour le nord du Congo (provinces de Likouala et Sangha). Pour remédier à un problème de couverture nuageuse importante dans certaines parties du pays, il a été fait usage de différents capteurs satellitaires (Landsat-4, -5, -7, Aster, DMC, RapidEye et SPOT).

Les zones où un changement de couvert forestier a été noté ont été rangées en classes d'occupation du sol compatibles avec le GIEC. Les résultats préliminaires pour le Nord du Congo indiquent des taux de déforestation nets d'environ 0,21 % pour la période 1990-2000 et de 0,03 % pour la période 2000-2010 (tableau 1.4). Entre 1990 et 2000, le taux de déforestation brut est de 0,35 % alors que la reforestation représente 0,14 %. Pour la deuxième période (2000-2010), le taux de déforestation brut s'élève à 0,27 % et le taux de reforestation passe à 0,23 %.

**Tableau 1.4:** Les changements de couvert forestier dans le nord du Congo (provinces de Likouala et de Sangha) au cours de la période 1990-2000-2010

Likouala & Sangha		1990	2000	2010	1990-2000	2000-2010
Moyenne de la zone cartographiée	km <sup>2</sup>	124 774			Déforestation nette	
Couvert forestier	km <sup>2</sup>	120 422	120 171	120 131	251,1	40,4
	%	96,5	96,3	96,3	0,21 %	0,03 %

Source: GSE-FM Congo



© Dominique Louppe

**Photo 1.4:** Relicte forestière protégée par les villageois dans le Bas Congo en RDC

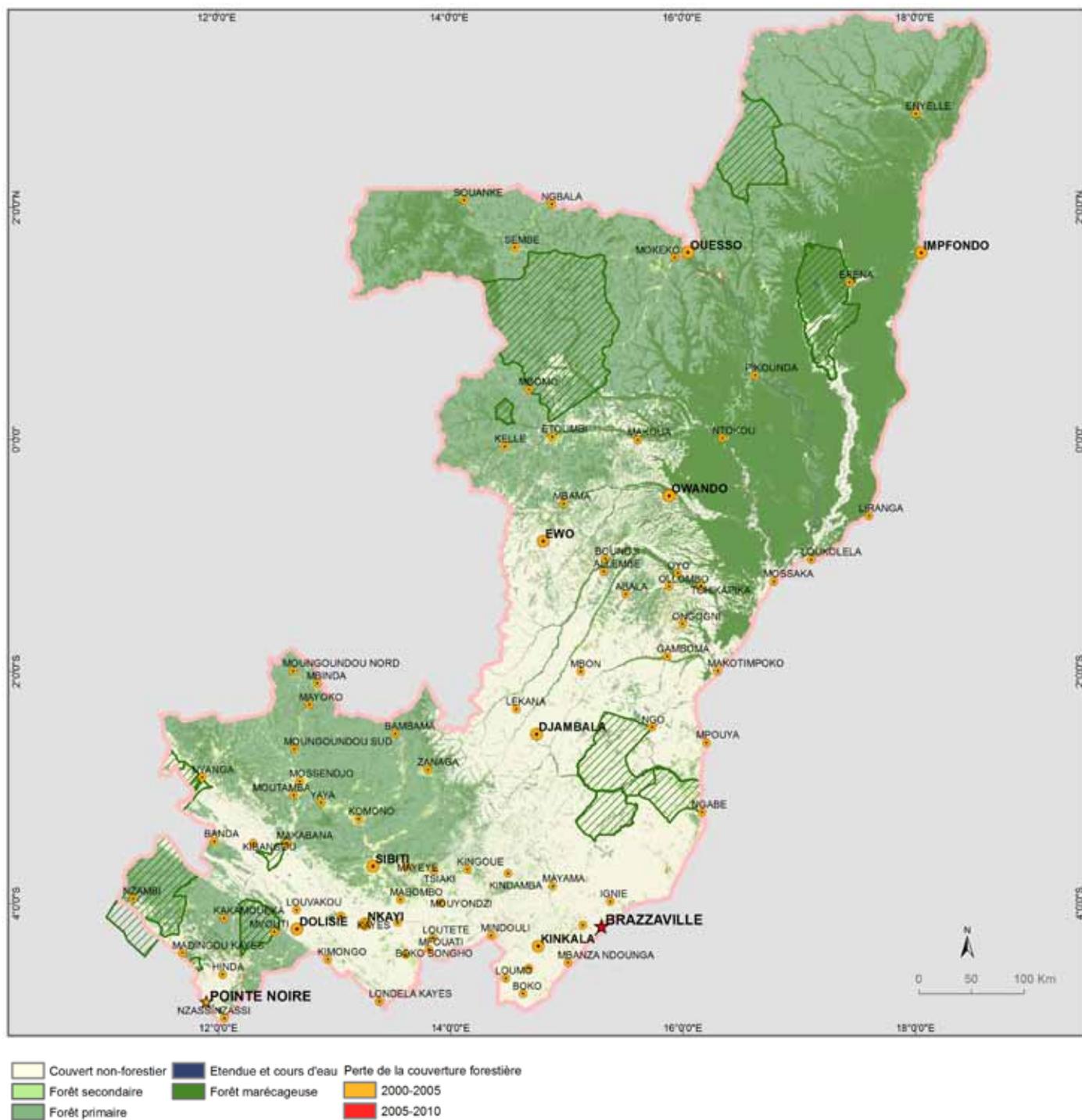


Figure 1.3: Carte de la perte de couvert forestier en République du Congo pour la période 2000-2005-2010

Source: FACET Congo

Une autre initiative de cartographie de la République du Congo (RC) est l'atlas FACET, une cartographie systématique réalisée sur l'ensemble du pays. FACET évalue quantitativement la dynamique spatiotemporelle des changements forestiers en Afrique centrale grâce à l'utilisation de données satellitaires multitemporelles. FACET est un projet commun de l'Observatoire satellital des forêts d'Afrique centrale (OSFAC) et de l'Université du Maryland. L'approche retenue pour l'atlas FACET du Congo est similaire à celle utilisée pour produire l'atlas FACET de la RDC (Potapov *et al.*, 2012), laquelle a été présentée dans le rapport EDF 2010 (de Wasseige *et al.*, 2012). Une recherche exhaustive dans les archives du satellite Landsat ETM+ a été effectuée en vue de cartographier l'étendue et la perte de couvert forestier entre 2000 et 2010. Un total de 1 788 images ETM+ ont été traitées pour dresser la carte finale. Cette méthode est une évolution de l'approche utilisée par Hansen *et al.* (2008), qui fait appel aux données MODIS pour prétraiter des séries chronologiques d'images Landsat, lesquelles sont utilisées à leur tour pour caractériser l'étendue et la perte de couvert forestier. Le couvert forestier a été cartographié pour 2000 et la perte a été analysée entre 2000 et 2005 et entre 2005 et 2010 (figure 1.3).

Les changements de couvert forestier ont été analysés pour l'ensemble du territoire national

grâce aux images Landsat qui, par temps clair, couvraient 99,9 % du territoire. Le couvert forestier total est estimé en 2000 à 229 385 km<sup>2</sup> (tableau 1.5). La forêt primaire de terre ferme représente 52 % de la superficie forestière totale, la forêt secondaire en couvre 4 % et la forêt marécageuse 44 %. La perte brute de couvert forestier entre 2000 et 2010 est estimée à 1 700 km<sup>2</sup>, soit 0,7 % de la superficie forestière totale en 2000. Pour ce qui concerne le couvert forestier, 51 % de la perte totale se situent dans la forêt primaire de terre ferme, 34 % dans la forêt secondaire et 16 % dans la forêt marécageuse. Les taux de perte du couvert forestier varient selon le type de forêt : le taux le plus élevé concerne la forêt secondaire (6,7 %) et le taux le plus faible la forêt marécageuse (0,3 %). Le taux de perte du couvert forestier pour la forêt primaire s'élève à 0,7 %. La majeure partie de la perte de couvert de forêt primaire est attribuée à l'expansion de l'agriculture et à l'exploitation des forêts primaires qui peut potentiellement modifier la composition des espèces animales et végétales ainsi que la dynamique de l'écosystème. La perte totale de couvert forestier a presque doublé entre 2000-2005 et 2005-2010. L'augmentation la plus importante concerne la forêt marécageuse, où la perte a presque triplé (284 %) ; la perte de forêt primaire de terre ferme a augmenté de 182 %.

**Tableau 1.5 :** Perte de couvert forestier en République du Congo pour la période 2000-2005-2010 (en kilomètres carrés)

		2000	2005	2010	Perte de forêt	
					2000-2005	2005-2010
Congo	km <sup>2</sup>	339118				
Forêt primaire	km <sup>2</sup>	117708	117403	116846	305,4	557,2
Forêt secondaire	km <sup>2</sup>	8534	8310	7962	224,6	347,4
Forêt marécageuse	km <sup>2</sup>	101443	101374	101178	68,9	195,9
Forêt totale	km <sup>2</sup>	229385	228786	227685	598,8	1100,5
	%	67,6 %	67,5 %	67,1 %	0,26 %	0,48 %

Source : FACET Congo

### Encadré 1.1 : Suivi de la déforestation en RDC – le projet TerraCongo

Przemyslaw Zelazowski<sup>1</sup>, Carlos Riano<sup>2</sup>, Stefano Giaccio<sup>1</sup>, Inge Jonckheere<sup>1</sup>, V. K. Kosa<sup>3</sup>, H. K. Koy<sup>3</sup>, F. M. Kayembe<sup>3</sup>, E. N. Manzila<sup>3</sup>, D. V. Mbenza<sup>3</sup>, Danaé Maniatis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FAO, Forestry Department, UN-REDD Programme, Rome, RDC, <sup>2</sup> FAO, UN-REDD Programme, Kinshasa, Italy, <sup>3</sup> Direction Inventaire et Aménagement Forestiers (DIAF)/MÉCNT, Kinshasa, DRC

Le projet *TerraCongo*, lancé en 2011, est le fruit de la collaboration entre la FAO et FUNCATE (fondation brésilienne chargée du développement technique des méthodes et outils destinés au système de surveillance de la forêt amazonienne), la FAO et plusieurs pays qui participent au programme UN-REDD ([www.un-redd.org](http://www.un-redd.org)), notamment la RDC, le Paraguay et la Papouasie-Nouvelle-Guinée. La collaboration vise à renforcer la capacité nationale de suivi et de mesures, notification et vérification (S et MNV) de la forêt tropicale qui s'appuie sur une technologie et des données (généralement) gratuites. Parmi les autres objectifs du projet, citons le renforcement des capacités techniques et professionnelles des experts nationaux au cours de la phase de mise en œuvre, ainsi que l'incorporation des données et méthodes nationales actuelles au système *TerraCongo*. La FAO fait office d'unificateur pour le transfert de technologie sud-sud et le renforcement de la capacité technique (notamment le logiciel brésilien *TerraAmazon*) ainsi que la promotion et la génération d'outils de télédétection d'accès libre disponibles gratuitement.

Avec *TerraCongo*, la RDC est le premier pays à mettre en œuvre cette initiative. La première phase du projet se concentre sur la surveillance des forêts et la diffusion d'informations sur Internet, qui forment ensemble le Système national de surveillance des forêts (SNSF) officiel de la RDC. Actuellement, le projet ne couvre que la province du Kasai occidental, qui dispose d'environ 96 000 km<sup>2</sup> de forêt. La province du Kasai occidental a été choisie comme point de départ parce qu'elle a atteint le niveau de faisabilité le plus élevé lors d'une évaluation qui a pris en compte plusieurs critères (superficie, taux de déforestation, activités REDD+, couverture nuageuse, disponibilité des données, topographie, parcelles forestières et types de forêt). Cette phase initiale sera suivie par l'intégration progressive de toutes les provinces de la RDC, chacune d'elles faisant l'objet de bases de données distinctes.

La mesure de la superficie forestière pour le projet *TerraCongo* s'appuie sur des données librement disponibles du satellite Landsat, des utilitaires gratuits de traitement des images (par exemple [http://km.fao.org/OFwiki/index.php/Open\\_Foris\\_Geospatial\\_Toolkit](http://km.fao.org/OFwiki/index.php/Open_Foris_Geospatial_Toolkit)) et le logiciel gratuit *TerraAmazon* ([www.terraamazon.org](http://www.terraamazon.org)), qui permet l'édition multi-utilisateurs des cartes de couvert. Toute l'imagerie satellitaire utilisée en cours de projet est corrigée et segmentée. Le traitement des données est effectué en deux étapes principales : la délimitation de la superficie forestière pour l'année de référence et la détection des changements des limites de la superficie forestière au cours des années suivantes. Le prétraitement des données au cours de la première étape fait appel à la carte FACET de la RDC, la carte officielle de la forêt, qui fournit des données d'apprentissage pour la classification des segments d'image. La précision de la carte initiale de la forêt qui en résulte est estimée à environ 85 % (basée sur des comparaisons avec l'imagerie haute résolution dans Google Earth, et sans tenir compte des différences d'heure). Le prétraitement des données en vue de la deuxième phase implique la détection automatique du changement de couvert entre les images à différentes dates.

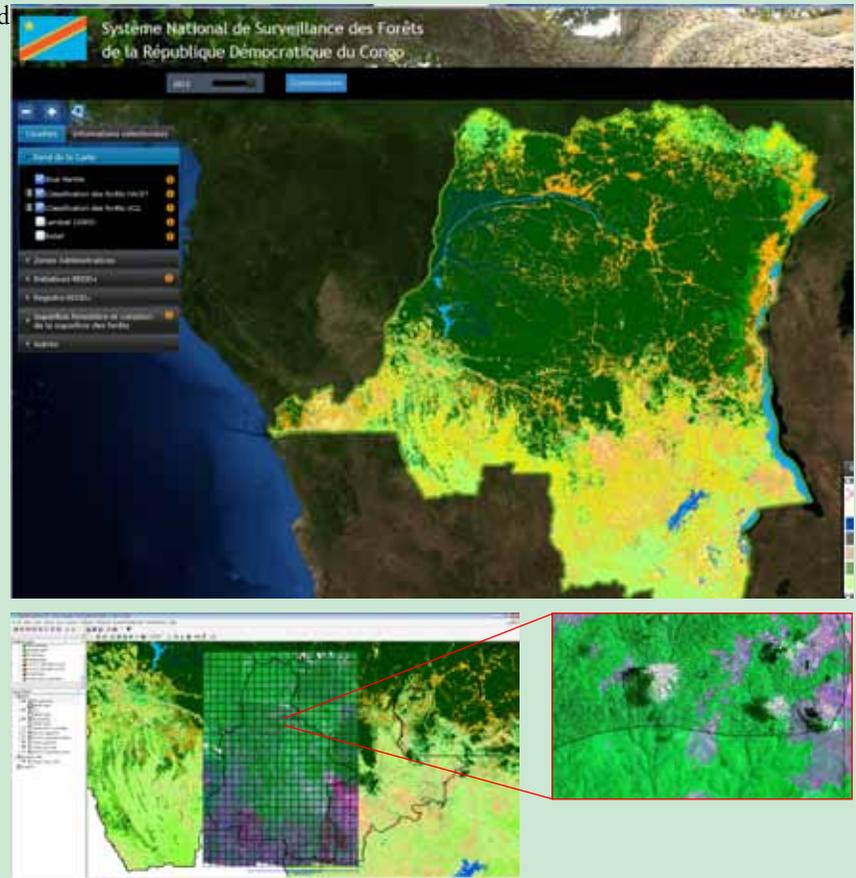


Figure 1.4 : Présentation de l'initiative de surveillance des forêts de la RDC

Tout au long des deux phases de traitement des données, un groupe de cinq experts nationaux de la DIAF (Direction des Inventaires et Aménagements forestiers), formés au Brésil, en Italie et en RDC, post-traitent et valident les informations extraites par traitement automatique des données afin de s'assurer que les superficies forestières sont conformes à la définition officielle de la RDC d'une forêt telle que soumise au secrétariat de la CCNUCC. Ils utilisent à cet effet un espace de travail dédié dans le logiciel *TerraAmazon*, qui comporte deux projets distincts (intégrés dans la même base de données) : l'un pour la finalisation du masque de la forêt, et l'autre pour l'évaluation périodique du changement de la superficie forestière. Les récents travaux se concentrent sur la collecte d'images à haute résolution afin d'aider à l'interprétation des données Landsat et à la validation du projet, et sur la manipulation de l'ensemble des données de pré- et post-traitement à l'aide de logiciels libres et gratuits.

Les résultats du travail décrit ci-dessus sont publiés sur le portail web officiel du SNSF ([www.rdc-snsf.org](http://www.rdc-snsf.org)), qui a été officiellement inauguré en décembre 2011 (COP), et sont disponibles pour importer, traiter et disséminer toute donnée relative au suivi de la forêt et à la MNV.

## 2.4 République Centrafricaine

La cartographie forestière en RCA, réalisée dans le cadre des projets REDDAF et OSFT, couvre la partie sud du pays sur environ 345 000 km<sup>2</sup>, soit 55 % du territoire national répartis sur les 12 préfectures contenant les principales forêts humides. Les zones de forêt tropicale dense sont situées au sud et en remontant vers le nord, on trouve des forêts galeries et des zones de formations végétales arborées plus claires et sèches. Les carto-

graphies forestières sont issues de la classification d'images satellites Landsat pour les périodes les plus anciennes, et de SPOT 4/5 et RapidEye pour les plus récentes.

Pour les trois préfectures du Sud-Ouest (Sangha Mbaéré, Lobaye et Ombella-Mpoko), la méthodologie est identique à celle utilisée pour le Gabon (cartes F/NF des années pivot 1990, 2000 et 2010 :

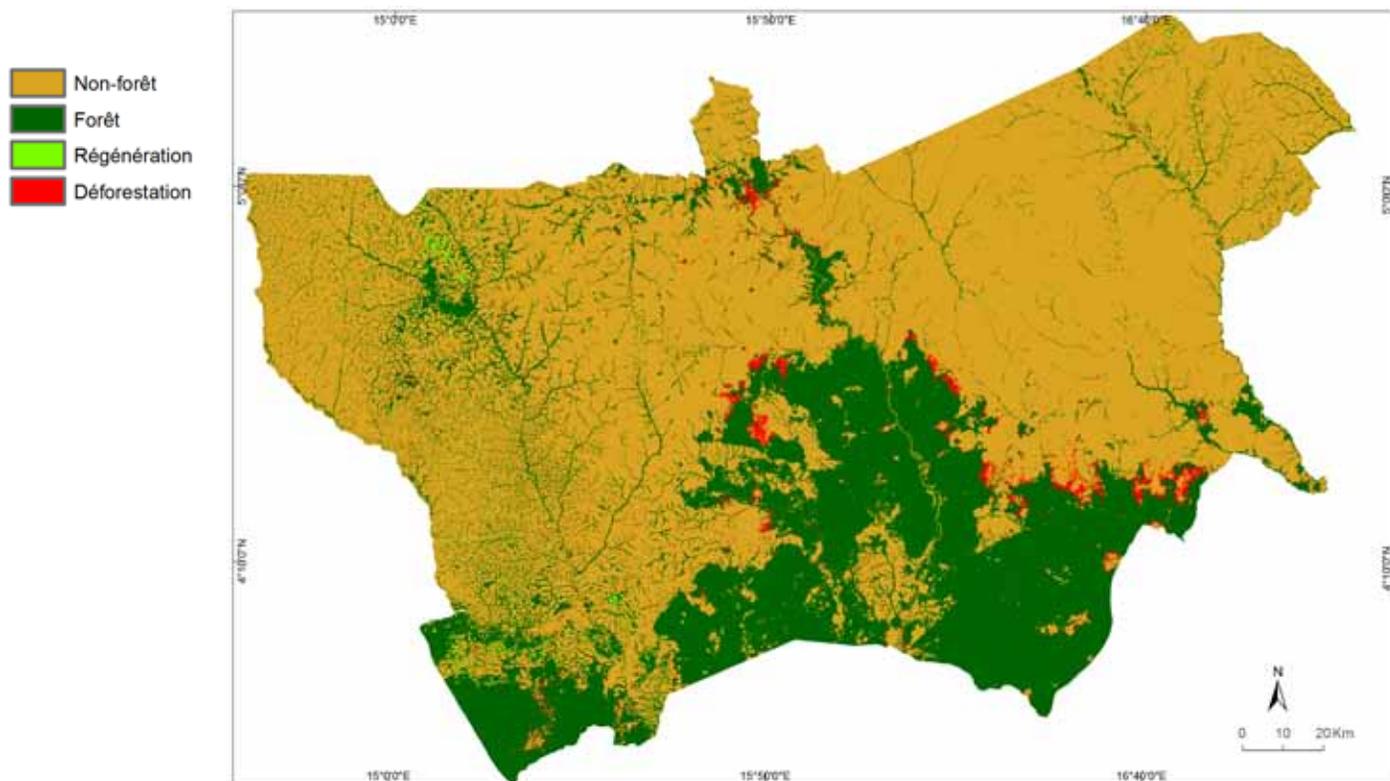


Figure 1.5: Cartographie des changements forestiers entre 2000 et 2010 dans la province de Mambéré Kadei (Lot 1) en RCA

Source: OSFT

**Tableau 1.6:** Évolution historique (1990-2000-2010) de la surface des forêts denses humides, en RCA, par préfecture

Préfecture	Surface Totale (km <sup>2</sup> )	1990		Changements 1990-2000 en forêt dense humide		Changements 2000-2010 en forêt dense humide	
		Surface forêt dense humide		Déforestation	Recolonisation	Déforestation	Recolonisation
		(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )
Mambere-Kadei	30 100	9 845	32,7 %	694	59	436	151
Nana-Mambere	27 400	3 342	12,2 %	251	17	244	19
Ouham-Pende	23 300	1 093	4,7 %	105	25	99	7
Ouham	27 300	3 733	13,7 %	200	27	187	28
Kemo-Gribingui	16 800	4 582	27,3 %	318	32	347	15
Ouaka	49 200	5 246	10,7 %	263	112	188	120
Haute Kotto	16 200	4 174	25,8 %	182	23	254	27
Basse Kotto	17 200	2 750	16,0 %	54	102	53	160
Mbomou	60 400	23 668	39,2 %	362	141	364	116
Haut Mbomou	24 000	5 731	23,9 %	117	139	74	144
Sangha Mbaéré	18 700	17 713	94,7 %	124	34	118	55
Lobaye	18 400	10 223	55,6 %	119	7	128	64
Ombella-Mpoko	32 100	6 536	20,4 %	308	1	115	14
<b>Total</b>	<b>361 100</b>	<b>98 636</b>	<b>27,3 %</b>	<b>3 097</b>	<b>718</b>	<b>2 607</b>	<b>919</b>
Déforestation nette		(km <sup>2</sup> )		2379		1688	
		(%)		2,41 %		1,75 %	

Source : OSFT et REDDAP-RCA

voir §2.1). Pour les neuf autres préfectures, une cartographie détaillée de l'année 2010 a été produite à partir des images SPOT à 10 m de résolution spatiale tout comme les changements de couvert forestier sur la période 2000-2010. Les changements de la période 1990-2000 ont été analysés à partir des images Landsat de moins bonne résolution. La cartographie détaillée de 2010 a été réalisée en 6 classes d'occupation du sol : forêt dense, savane arborée, savane, zone d'habitation, zone humide et zone agricole. La figure 1.5 illustre les changements intervenus dans la province de Mambéré Kadei.

Le croisement des cartes des années 1990, 2000 et 2010 a permis d'estimer les changements de surfaces forestières. Ceux-ci sont présentés par préfectures au tableau 1.6.

La déforestation est relativement faible dans les forêts humides de la RCA, environ 2 % en 10 ans à l'exception de certaines préfectures comme Nana-Mambere et Kemo-Gribingui qui présentent un taux de déforestation plus important (jusqu'à 7 % sur 10 ans). La forêt dense humide de RCA a perdu 4 % de sa surface totale (4 067 km<sup>2</sup>) en 20 ans soit une moyenne de 0,20 % par an.

### 3. Évaluation régionale des changements de couvert forestier



*Photo 1.5: Changement d'occupation du sol en zone forestière, conversion de la forêt en champ de manioc*

L'harmonisation à l'échelle régionale du suivi du couvert forestier est complémentaire aux différentes initiatives nationales (tableau 1.7). En effet, comme certains critères, dont la définition cartographique d'une forêt, peuvent différer d'un pays à l'autre, la comparaison entre pays est complexe. Les approches régionales permettent alors une évaluation cohérente de la situation des forêts sur toute l'Afrique centrale. Deux types d'analyses régionales coexistent, avec leurs intérêts et leurs limites. La première, conçue pour une vision régionale voire nationale mais non locale, est l'approche par échantillonnage qui permet une meilleure compréhension des changements forestiers car son historique va de 1990 à 2010. La seconde approche est la cartographie exhaustive (wall-to-wall) qui est indispensable à la mise en œuvre des politiques nationales et locales; mais elle nécessite des traitements d'images satellites importants au moyen d'outils avancés.

*Tableau 1.7: Les différentes approches utilisées pour le suivi du couvert forestier en Afrique centrale entre 1990 et 2000 et entre 2000 et 2010*

	1990-2000		2000-2010		
	Cartographie nationale	Cartographie par échantillonnage	Cartographie nationale	Cartographie par échantillonnage	Atlas FACET
Cameroun	X(Est)	X	X(Est)	X	X*
Congo	X(Nord)	X	X(Nord)	X	X
Gabon	X	X	X	X	X*
Guinée Eq.		X		X	X*
RCA	X(Sud)	X	X(Sud)	X	X*
RDC		X		X	X
Tchad		X		X	
Régional		X		X	X*

(\* Travaux en cours)

### 3.1 Suivi régional des forêts humides et sèches entre 1990 et 2010

Dans le cadre du projet TREES lancé en 1992 par la Commission européenne, une nouvelle évaluation de la déforestation a été réalisée à partir de la série temporelle 1990-2000-2010 couvrant le Bassin du Congo. Des cartographies ont été élaborées sur la base des images satellites en utilisant les techniques récentes de traitement d'images. Les cartes ont été croisées pour déterminer les taux de déforestation pour chaque pays du Bassin du Congo. Cette étude contribue à l'Évaluation par télédétection des ressources forestières mondiales 2010 de la FAO (Forest Resource Assessment (FRA) 2010; FAO, 2012).

L'approche TREES/FRA utilise des extraits d'images satellites de 1990, 2000 et 2010 couvrant 10x10 km sur la base d'un échantillonnage systématique sur chaque demi-degré de latitude/longitude (et même quart de degré pour le Gabon et la Guinée Équatoriale, fréquemment couverts des nuages), soit un échantillon total potentiel de 510 points systématiquement distribués sur les forêts humides d'Afrique centrale. Mais seulement 311 sites ont été couverts par des images de bonne qualité aux trois dates. La majorité des échantillons manquants sont localisés sur les zones côtières du Gabon, de la Guinée Équatoriale et du Cameroun. Bien que les périodes cibles étaient 1990, 2000 et 2010, la recherche des images a inclus quelques années autour de ces dates à cause du couvert nuageux ou de la faible quantité d'images disponibles. Les satellites Landsat qui ont fourni les données en 1990 et 2000 ont connu des difficultés techniques en 2010. Le jeu de données de 2010 a été construit en combinant plusieurs satellites de résolution spectrale similaire : DMC (courte période de revisite et résolution de 22 à 32 m), SPOT-4 et -5 (résolutions de 20 et 10 m). Au total, DMC représente 43 % des images utilisées, SPOT 22 % et Landsat TM 34 %.

Les changements de couvert forestier sur la période 1990-2000-2010 ont été estimés sur base d'une chaîne originale de traitement d'images : sélection visuelle des meilleures images disponibles, recalage, calibration, masquage des nuages et ombres, segmentation, détection de changement et classification (Raši *et al.*, 2013). Cette chaîne de traitement a été adaptée pour les échantillons DMC et SPOT (Desclée *et al.*, 2013). Les cartes d'occupation du sol produites automatiquement ont été vérifiées et les erreurs détectées ont été reco-



Photo 1.6: Rivière Munaya au Cameroun

dées. La comparaison des paires de cartes validées entre 1990 et 2000, et entre 2000 et 2010 ont permis de mesurer les changements de couvert forestier au niveau de chaque point de l'échantillonnage (Mayaux *et al.*, 2013). L'évolution de la déforestation sur l'ensemble du bassin du Congo est présentée à la figure 1.6.

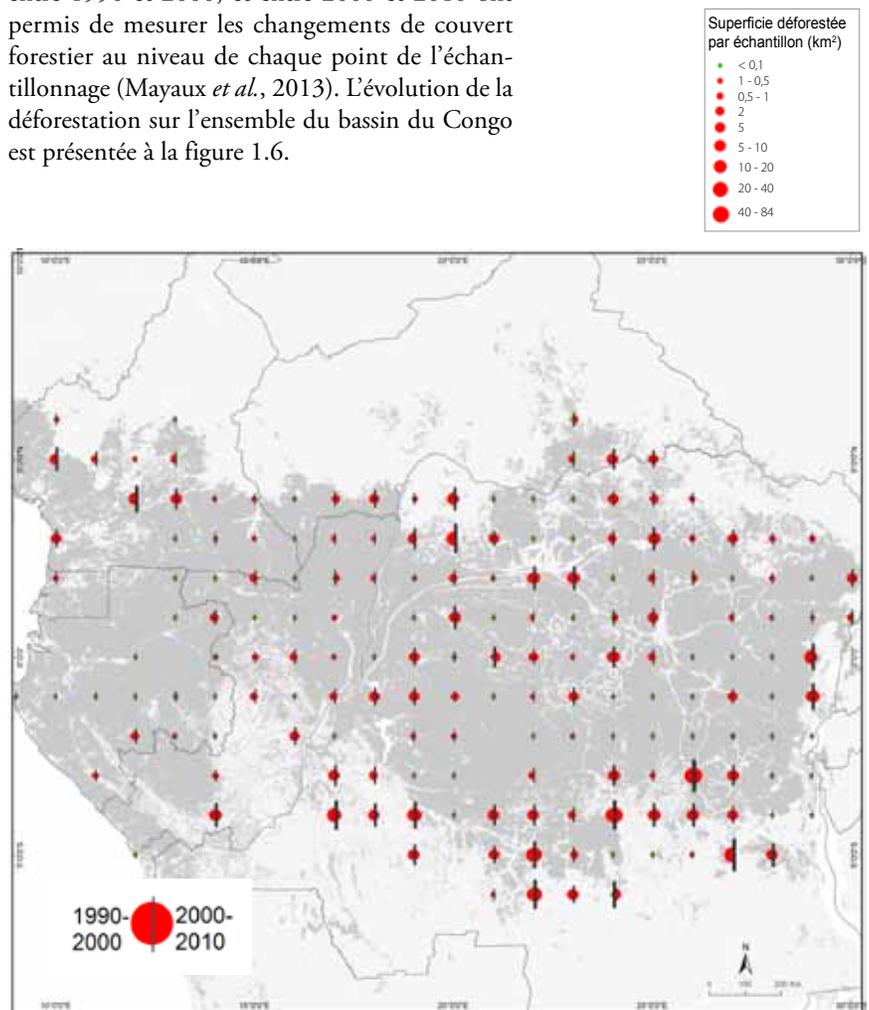


Figure 1.6: Déforestation brute normalisée dans le Bassin du Congo au niveau de chaque point échantillonné entre 1990 et 2000 et entre 2000 et 2010

Source: CCR

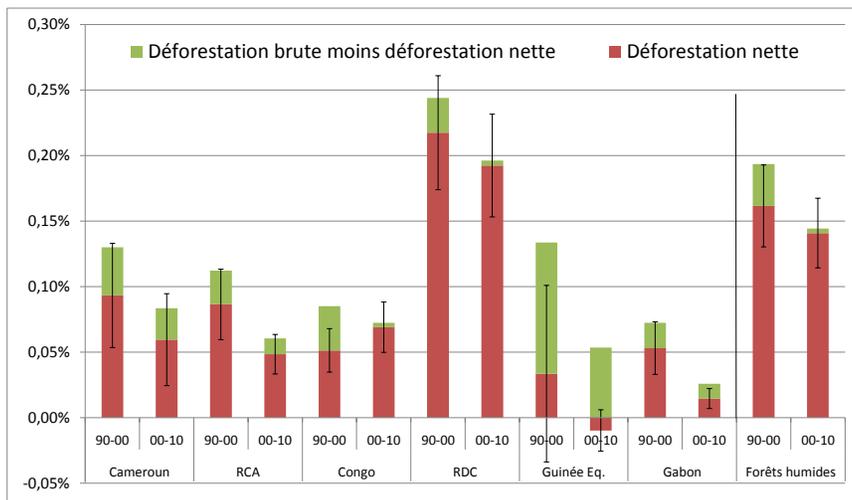


Figure 1.7: Taux annuels (bruts et nets) de déforestation des forêts humides d'Afrique centrale entre 1990 et 2000, et entre 2000 et 2010\* (avec barre d'erreur standard). Les chiffres sont présentés en annexe 1A

Sources: UCL (1990-2000) et CCR (2000-2010) \*Résultats préliminaires

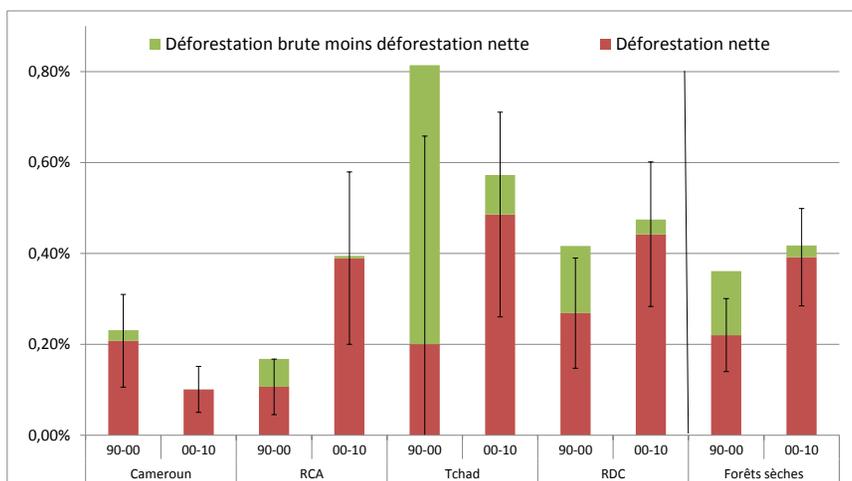


Figure 1.8: Taux annuels (bruts et nets) de déforestation des forêts sèches d'Afrique centrale entre 1990 et 2000, et entre 2000 et 2010\* (avec barre d'erreur standard). Les chiffres sont présentés en annexe 1B

Source: CCR \*Résultats préliminaires

### 3.2 Étendue régionale Landsat de la forêt et carte de perturbations FACET

Un jeu de produits cartographiques a été généré dans le cadre du programme FACET. Ces produits constituent les premières cartes à résolution spatiale moyenne du type de forêt, de leurs superficies et de la perte de forêts à l'échelle nationale. Ces cartes existent sous forme d'atlas papier et informatique. Les produits FACET se composent à ce jour de cartes nationales pour la RDC (présenté dans EDF 2010) et la République du Congo (présenté dans la

La figure 1.7 reprend les estimations de taux de déforestation par pays et sur l'ensemble des forêts humides d'Afrique centrale entre 1990 et 2000, et 2000 et 2010. La tendance générale est une diminution du taux de déforestation qui passe de 0,19 % à 0,14 % pour l'ensemble des forêts humides du Bassin du Congo. La reforestation diminue aussi et devient négligeable.

Une analyse similaire a été réalisée sur les forêts sèches d'Afrique centrale. Ces forêts sèches sont situées en dehors de l'écorégion Guinéo-Congolienne qui correspond aux forêts humides. L'approche décrite pour la période 1990-2000 par Bodart *et al.* (2013) a été étendue sur la période 2000-2010 sur les pays de la COMIFAC. Les principaux pays concernés sont le Cameroun, la RCA, la RDC et surtout le Tchad. Les données pour 1990 et 2000 proviennent de Landsat, et pour 2010 de DMC (62 %) et de Landsat TM (38 %). Les résultats de cette étude sont présentés dans la figure 1.8. Alors que la déforestation brute est similaire entre 1990 et 2000 et entre 2000 et 2010 (0,36 % vs 0,42 %), on constate une diminution de la reforestation qui passe de 0,14 % à 0,03 % entre ces 2 périodes.

section 2.3). Les méthodes de cartographie utilisées ont été étendues à l'échelle régionale pour caractériser les pays suivant d'Afrique centrale: Cameroun, RCA, République du Congo, la RDC, la Guinée équatoriale et le Gabon.

L'imagerie Landsat à moyenne résolution est la source de données par excellence pour quantifier l'étendue des forêts et ses changements dans

de grandes zones. Le programme Landsat répond à plusieurs critères de suivi opérationnel, notamment une stratégie formelle d'acquisition de données, une politique de données ouvertes (les données sont fournies gratuitement et sont directement accessibles sur le site Glovis; <http://glovis.usgs.gov>). La correction radiométrique et géométrique des données évite aux utilisateurs de recourir à un prétraitement onéreux. Le lancement réussi de Landsat 8 en février 2013 garantit la pérennité du programme.

Des méthodes de traitement massif des archives Landsat pour soutenir les programmes de suivi des terrains sont actuellement mises en place. Des méthodes informatiques faisant appel à de nombreuses données permettent d'interroger chaque pixel Landsat et aux chercheurs d'échapper ainsi à la principale contrainte limitant l'observation optique de la terre en Afrique tropicale : la couverture nuageuse. Le traitement FACET des données Landsat comprend une évaluation de la qualité de chaque pixel afin de ne retenir que les seules observations permettant de caractériser la forêt. Ces méthodes techniques de traitement et de caractérisation des données Landsat ont été décrites par Potapov *et al.* (2012). Les données de 1999 à 2012 ont été incluses pour ce premier produit régional. À ce jour, les produits FACET comptent deux cartes : une référence de l'étendue de la forêt l'instant un et une estimation de la perte de couvert forestier entre cet instant et l'instant deux (Hansen *et al.*, 2013).

La cartographie, dérivée de Landsat, de l'étendue des forêts et de la perte de couvert à l'échelle régionale est présentée à la figure 1.9 qui montre le pourcentage de couvert en 2000 et la perte estimée du couvert forestier entre 2000 et 2012. La perte de couvert forestier (en rouge) inclut des zones dont le couvert était supérieur à 30 % et qui ont subi une perturbation du peuplement entre 2000 et 2012.

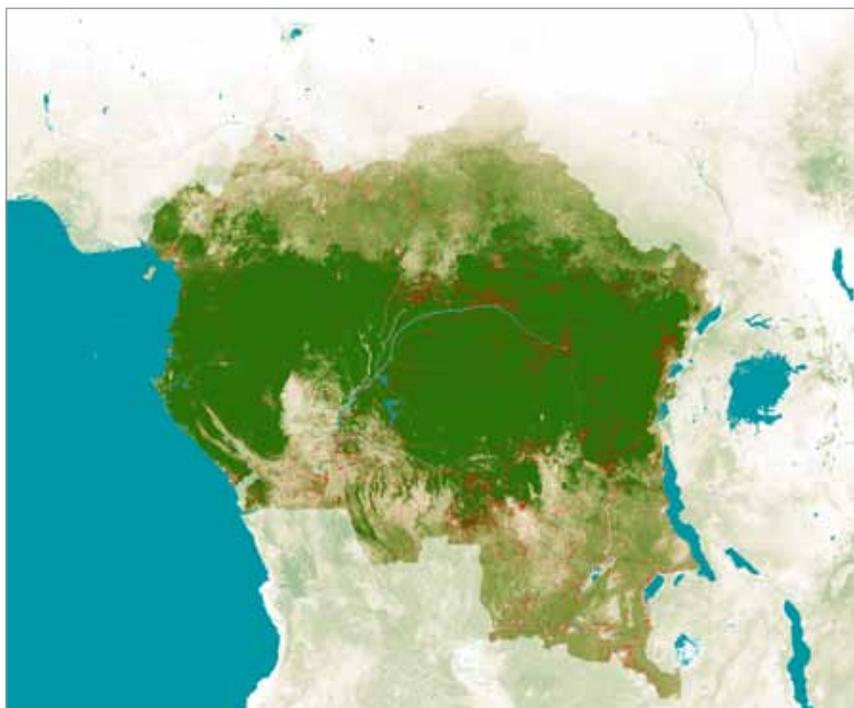


Figure 1.9. Taux de couvert forestier (dérivé d'images Landsat) et pertes de couvert forestier  $\geq 30\%$

Source: FACET



© Frédéric Sepulchre

Photo 1.7: Village et Paysage du Sud Kivu

La figure 1.10 illustre un exemple sous régional en montrant la variation de la perturbation forestière dans les pays à la lisière septentrionale de la forêt humide du Bassin du Congo. L'image en arrière-plan montre la haute qualité des données Landsat. L'absence de taches nuageuses ou brumeuses résulte du traitement massif des archives Landsat.

De telles cartes régionales montrent les possibilités offertes aux agences nationales chargées du suivi de la forêt. À titre d'exemple, les données FACET ont été intégrées aux activités UN-REDD, et utilisées pour définir la carte thématique de base de l'étendue et de la perte du couvert forestier destinée au Système national de Surveillance des Forêts (SNSF) de la RDC. Le suivi national de l'initiative REDD+ exigera de telles données pour les estimations de base des émissions de carbone. Les définitions de la forêt utilisées dans REDD+ peuvent varier en fonction de la hauteur des arbres et de la

densité du couvert. Pour cette carte régionale, le taux de couvert de la canopée a été estimé pour des arbres de 5 mètres ou plus. Les cartes de pourcentage du couvert arboré permettent aux utilisateurs de modifier la définition d'une forêt en fonction du couvert de la canopée et autorisent la désagrégation de la perte de forêt par strate de densité de la canopée. La cartographie de la perte de couvert forestier concerne uniquement les perturbations du peuplement mais n'évalue pas la dégradation de la forêt à la suite d'une exploitation sélective. En outre, pour modéliser correctement les émissions de carbone dans le cadre des objectifs de suivi REDD+, il convient de qualifier les causes de perte de forêt par type de forêt et d'identifier la dynamique du changement (défrichement mécanique, incendie, dégâts de tempête). Le résultat régional sera mis gracieusement à disposition sur les sites internet de CARPE et de l'OSFAC ([carpe.umd.edu](http://carpe.umd.edu) et [osfac.net](http://osfac.net)).



Figure 1.10: Sous-ensemble régional de la Figure 1.9, avec perte de couvert forestier entre 2000 et 2012 en rouge et une image d'arrière-plan composite de Landsat en 5-4-3 fausses couleurs

Source: FACET

## 4. Avancées en matière de cartographie de la dégradation forestière et de la biomasse: études de cas

Dans le cadre de la gestion durable des forêts et du programme UN-REDD, de nouveaux outils sont nécessaires pour fournir des informations fiables et continues sur les changements des stocks de carbone forestier. La priorité du suivi forestier concerne non seulement les processus de déforestation (conversion de forêts en d'autres utilisations du sol) mais aussi la dégradation forestière, c'est-à-dire la réduction des stocks de carbone au sein

des zones forestières dégradées. La télédétection permet de surveiller les activités qui entraînent la réduction des stocks de carbone, depuis l'exploitation sélective jusqu'à la récolte du bois de feu. Si les méthodes d'estimation de la déforestation semblent robustes, une évaluation fiable de la dégradation forestière reste encore un défi qui exige des techniques plus avancées d'analyse des images satellites.



*Photo 1.8: Plateaux des Batéké-RDC, les forêts résiduelles se trouvent bien souvent dans les vallées ou sur les pentes*

### 4.1 Évaluation de la dégradation forestière

L'exploitation des ressources forestières nécessite la création de pistes d'accès aux arbres et d'exportation des grumes. Les pistes se structurent en réseau avec des routes principales très utilisées, des routes secondaires qui mènent aux parcelles et enfin des routes de débusquage qui donnent accès à chaque arbre exploité.

Une première étude a mis au point un outil-prototype permettant d'estimer annuellement l'extension des routes forestières à partir de séries temporelles d'images Landsat. Il a permis de réaliser une étude sur le sud-est du Cameroun, le sud de la RCA et le nord de la République du Congo où les forêts sont semi-décidues et où la densité de population est faible et où la majorité des exploitations forestières sont gérées par des compagnies privées.

#### **Encadré 1.2: Amélioration de la cartographie des types de forêts à partir de MODIS**

*Valéry Gond, Adeline Fayolle, Alexandre Pennec, Sylvie Gourlet-Fleury  
CIRAD*

En général, sur les cartes issues des images satellitaires, les forêts tropicales humides d'Afrique centrale sont un grand aplat de couleur verte dans lequel on ne peut pas distinguer les différents types de forêts. Pourtant, les études au sol montrent l'existence d'une grande diversité de types forestiers. Dans le cadre du projet CoForChange ([www.coforchange.eu](http://www.coforchange.eu)), la dynamique temporelle des images satellitaires, et leurs informations sous-jacentes, nous a permis de produire une carte détaillant les types forestiers du couloir de la Sangha (latitude 0° – 5° Nord et longitude 13° – 19° Est). Les données du satellite MODIS qui présentent une synthèse d'indices de végétation EVI sur 16 jours à 500 m de résolution ont été utilisées pour la période de 2000 à 2009. La dynamique spatiale des pluies a été analysée à partir des moyennes météorologiques mensuelles à 8 km de résolution (<http://earlywarning.usgs.gov/fews/africa/index.php>). Les données d'inventaires de 37 898 placettes forestières ont été utilisées pour valider cette carte. Enfin, les classes forestières ont été confrontées à la carte de végétation du Cameroun de Letouzey (1985) pour validation (Gond *et al.*, 2013).

La figure 1.11 présente un extrait de la carte réalisée. Dans la légende, les histogrammes de couleur présentent les précipitations mensuelles moyennes, le trait plein la variation de l'activité photosynthétique au cours de l'année comparée à l'activité photosynthétique moyenne de la zone d'étude (en pointillé). Au nord de la carte, les couleurs marron et jaune soulignent la transition entre les savanes et la lisière forestière. Les dégradés de vert différencient les types de forêts tropicales humides identifiés par l'analyse des données satellitaires: plus la teinte est foncée plus le peuplement comprend d'arbres sempervirents; et inversement plus la teinte est claire plus le peuplement abrite des arbres semi-caducifoliés. Le rose correspond aux zones agro-forestières proches des voies de communication et des agglomérations. Enfin, les savanes incluses (en orange) du sud sont clairement différenciées des savanes du nord par leur cycle végétatif différent révélé par leur activité photosynthétique.

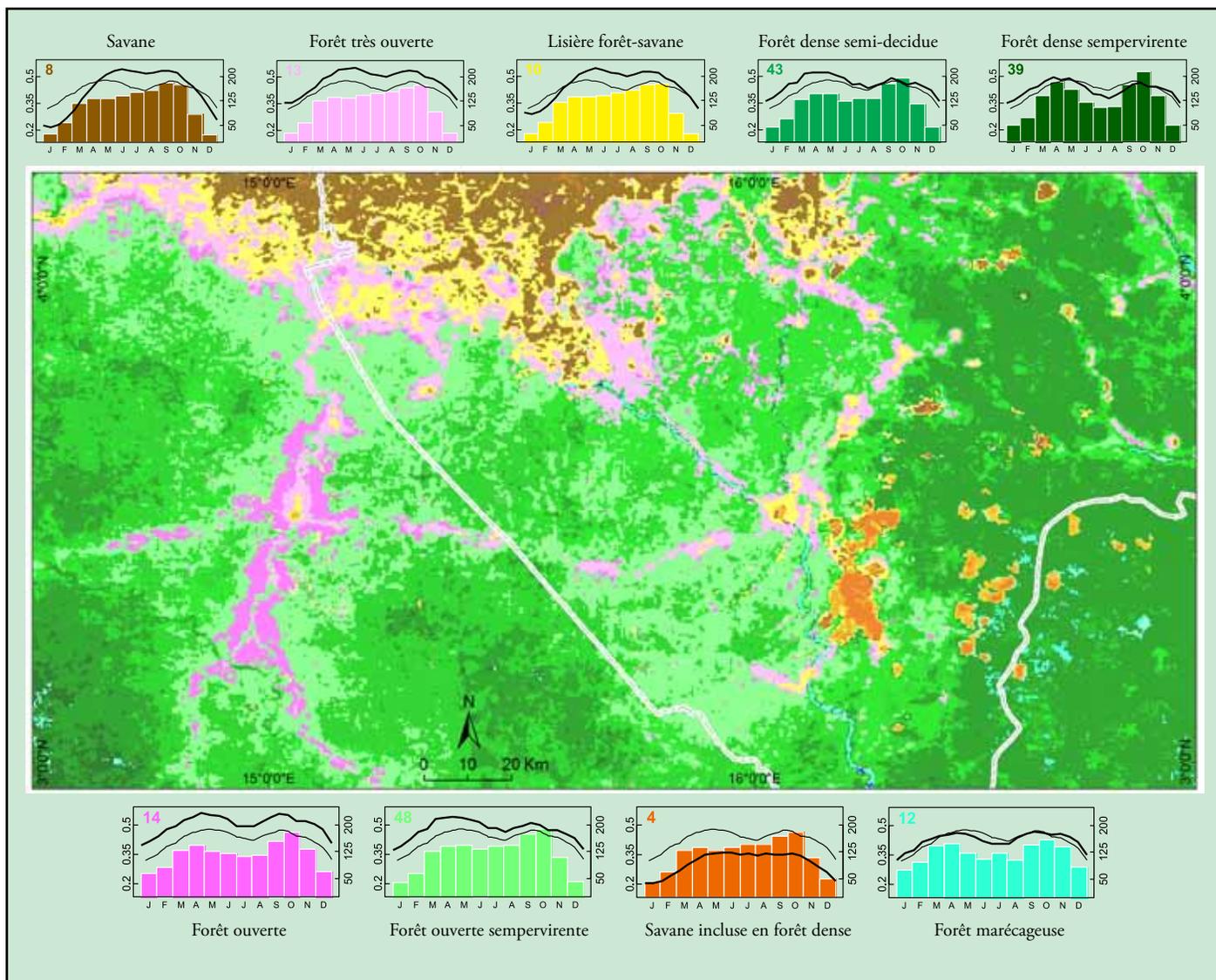


Figure 1.11 : Extrait de la carte de l'intervalle de la Sangha présentant la lisière nord du massif forestier de Yokadouma (Cameroun) à l'ouest, à Nola à l'est (République Centrafricaine) jusqu'aux grès de Carnot à la frontière de la République du Congo.

Sur base d'images Landsat, différents indices ont été calculés après avoir augmenté le contraste entre les surfaces forestières et les pistes, généralement assimilées à des sols nus, grâce à l'application d'un filtre spatial (Gond *et al.*, 2004). Des valeurs de seuils ont été ajustées pour identifier les sols nus (Bourbier *et al.*, 2013). Les résultats ont été produits à l'échelle d'une maille de 500 m afin d'être compatibles avec les données du capteur MODIS. Sur chaque cellule de 500 m de côté, le pourcentage de pixel de sol nu a été calculé sur base d'un composite annuel d'image MODIS afin d'estimer le développement des routes forestières

(figure 1.12). Ces pourcentages sont considérés comme les Indicateurs d'Ouverture de la Canopée (IOC). L'analyse d'une série temporelle d'IOC permet de suivre l'évolution du réseau de pistes et donc d'évaluer l'impact de l'exploitation forestière.

L'IOC a été calculé pour la période de 1999 à 2003 sur des images Landsat. L'évolution de l'IOC renseigne sur l'évolution de l'ouverture ou de la fermeture du couvert forestier. Cette technique permet l'évaluation du réseau de pistes forestières en Afrique centrale et ainsi d'identifier les forêts potentiellement dégradées.

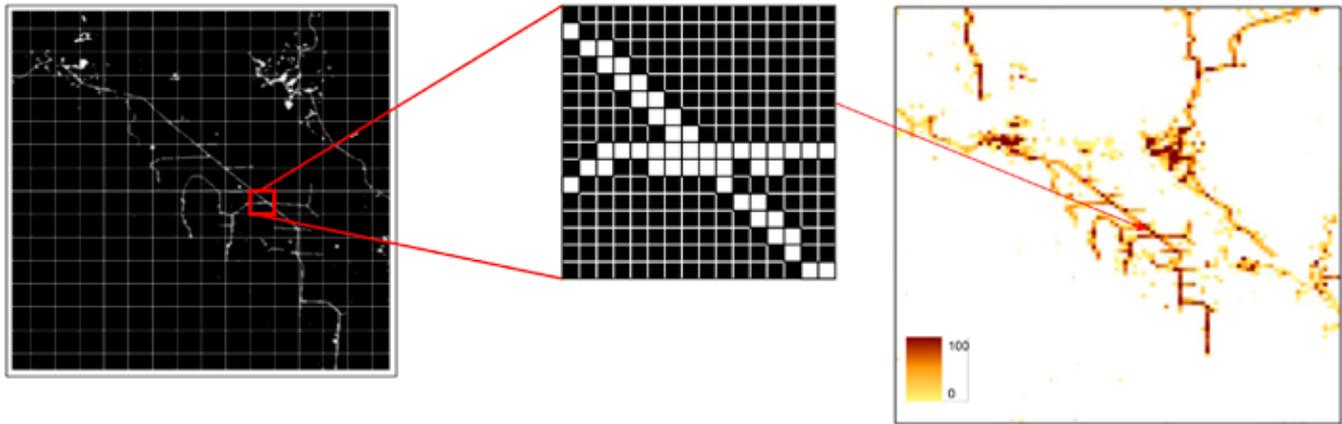


Figure 1.12: L'indicateur d'ouverture de canopée à partir de Landsat (gauche) est agrégé sur un maillage de 500 m de côté (centre) pour estimer le ratio de surface en sol nu (droite)

Source: Bourbier et al., 2013

### Encadré 1.3: Carte régionale du couvert arboré obtenue à partir de données radar

Alexandre Bouvet

CCR

Une nouvelle carte exhaustive (wall-to-wall) du pourcentage de couvert arboré a été produite pour l'Afrique subsaharienne. La carte résulte d'une classification supervisée appliquée à une mosaïque de données satellitaires à double polarisation (HH et HV) provenant de PALSAR, le radar japonais à synthèse d'ouverture de bande L (Bouvet *et al.*, 2011). La mosaïque couvre le continent africain à une résolution spatiale d'environ 100 m. Les mesures de l'aire à végétation continue (Vegetation Continuous Fields (VCF) issues de MODIS), qui indiquent le pourcentage de la superficie couverte par des arbres pour chaque pixel de 0,25 km<sup>2</sup>, sont utilisées comme données d'apprentissage pour la classification. Les intervalles de couvert arboré suivants ont été retenus: 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, et >60% (le signal PALSAR sature pour un couvert arboré supérieur à 60%). Par rapport à la carte VCF et à d'autres cartes disponibles de la végétation à grande échelle, la résolution spatiale améliorée permet la détection de structures fines (par exemple, les galeries forestières) et la réduction du nombre de pixels mixtes, comme le montre la figure 1.13. Des échantillons à haute résolution de données optiques classifiées de l'étude par télédétection réalisée pour l'Évaluation des ressources forestières mondiales 2010 (FRA 2010), disponibles pour chaque degré carré, ont été utilisés pour la validation de ces résultats. La précision de la classification forêt/non-forêt est estimée à environ 89% pour l'ensemble de l'Afrique subsaharienne.

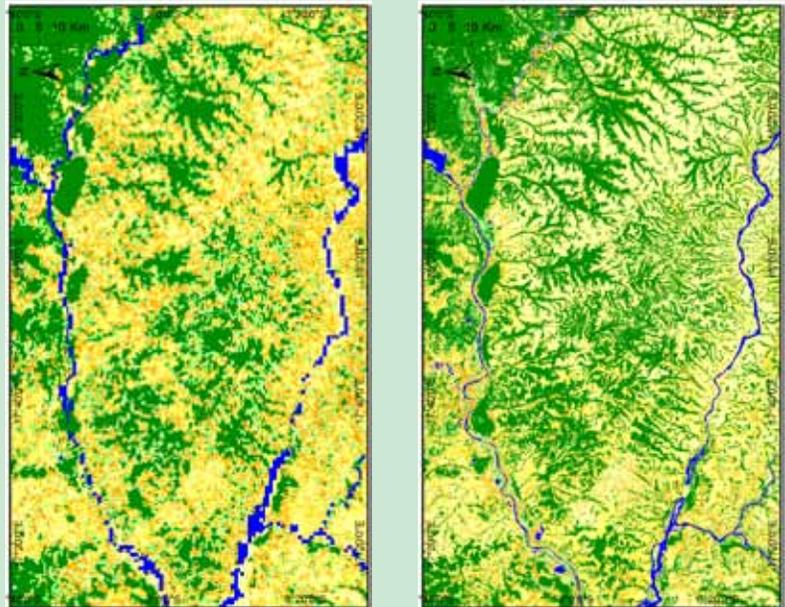


Figure 1.13: Comparaison du pourcentage de couvert arboré VCF (à gauche) et des cartes PALSAR classifiées (à droite) (sous-ensemble centré à -2.5°S, 15.5°E)

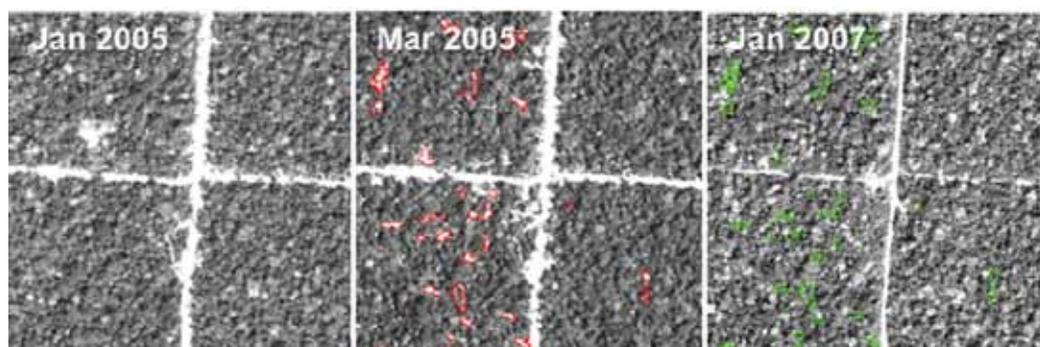


Figure 1.14: Suivi des trouées d'exploitation sélective sur base d'une série temporelle d'images satellites SPOT entre Janvier 2005 et Janvier 2007 (Desclée *et al.*, 2011)

Une seconde étude, sur base d'images SPOT, a permis d'évaluer les changements de couvert forestier sur une concession forestière certifiée en République du Congo (Desclée *et al.*, 2011). Différentes perturbations forestières ont été détectées par des changements sur les images satellites entre 2005 et 2007. Ainsi, entre janvier et mars 2005, sur une assiette de coupe de 20 000 ha, la perte de

couvert forestier a été de 7 % de la superficie mise en exploitation (figure 1.14). Ces 7 % d'ouverture de la canopée ont été causés à 60 % par les trouées d'abattage et à 40 % par les routes d'exploitations. L'analyse de 2007 montre que les trouées se sont refermées et que seules les pistes principales subsistent (figure 1.14). Ces cartes de suivi du couvert forestier peuvent ainsi être croisées avec les infor-

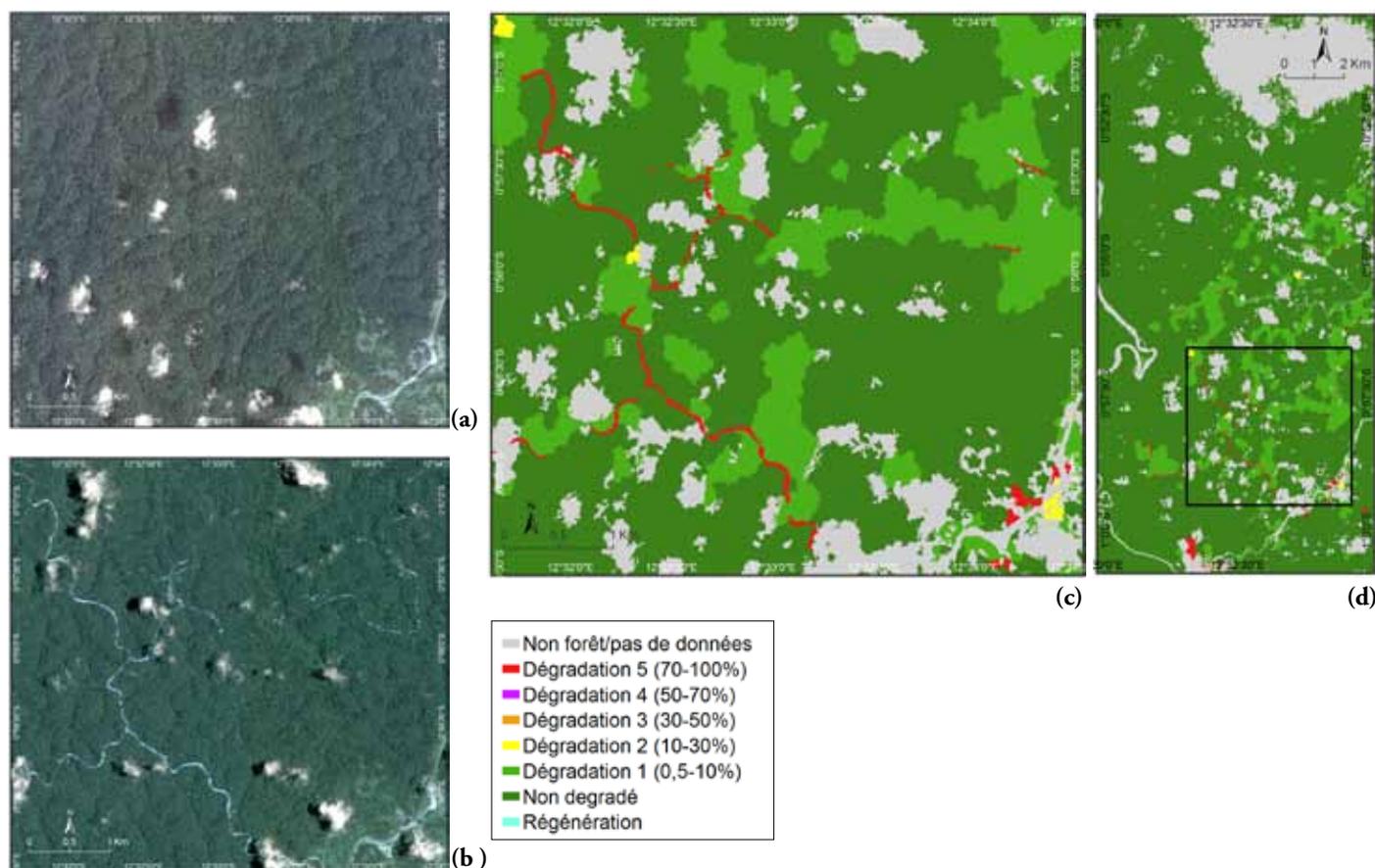


Figure 1.15: Carte de la dégradation au centre du Gabon dérivée des images Quickbird acquises en (a) décembre 2010 et (b) mars 2012. La carte de dégradation (en c) montre la différence de pourcentage de la superficie des petites taches de sol sans couvert végétal pour la période 2010-2012, d) l'ensemble de la zone étudiée de 20x10 km où le cadre noir indique la zone correspondant aux figures a, b et c

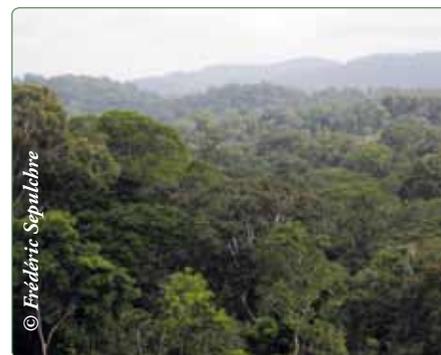
Source : REDDiness

mations fournies par la société forestière. Le suivi précis des trouées d'abattage nécessite des images satellites annuelles et de résolution fine.

Le potentiel de l'imagerie satellitale optique et radar pour détecter et surveiller la dégradation de la forêt a été évalué dans le cadre du projet REDDiness. La cartographie de la dégradation a été effectuée sur un site test de 20 x 10 km du Gabon central à l'aide des images Quickbird multispectrales et de haute résolution (2,4 m) acquises entre 2010 et 2012. La cartographie s'est appuyée sur une classification semi-automatique à base d'objets. Tout d'abord, les grands objets qui présentent des caractéristiques d'image similaires ont été identifiés pour les deux dates. Parmi ces grands objets, les plus petites taches qui représentent le sol nu dans une des images (par ex., trouées dans la cano-

pée, pistes d'exploitation) ont été détectées. Cinq niveaux de dégradation de la forêt ont ensuite été définis en fonction de la différence de pourcentage de sol nu pour chacun de ces grands objets entre les deux dates. La dégradation forestière de niveau 5 est considérée comme de la déforestation lorsque le seuil de couvert arboré est inférieur à la définition de la forêt (figure 1.15).

La couverture nuageuse persistante dans de grandes régions du Bassin du Congo empêche une analyse multitemporelle efficace de la dégradation de la forêt. Pour remédier à ce problème, l'imagerie radar a été utilisée pour détecter les signes d'une dégradation de la forêt, bien que le traitement et l'interprétation de ces données à petite échelle soit complexe et demande une expertise dans l'analyse des signaux radar.



**Photo 1.9: Forêt à caesalpinaceae – Sud Ouest Gabon**

#### **Encadré 1.4: Différentes approches de cartographie des forêts pour faire face à une importante couverture nuageuse**

*Baudouin Desclée et Philippe Mayaux*  
CCR

Grâce aux images satellites, il est possible de cartographier les forêts tropicales par télédétection sur de grandes superficies telles que l'Afrique centrale. Les techniques sont cependant très variées et la qualité des résultats dépend de plusieurs paramètres tels que les images utilisées, les prétraitements réalisés, la méthode de classification et ses données d'entraînements. On parle de cartographie continue (ou « wall-to-wall ») quand la cartographie couvre une région complète alors qu'une analyse par échantillonnage est réalisée sur un échantillon représentatif de la zone étudiée. L'avantage de la première technique est d'avoir une information exhaustive sur toute la région d'intérêt mais elle nécessite de nombreux traitements d'images pour combiner différentes images. L'approche par échantillonnage limite l'analyse à des surfaces plus réduites et permet d'obtenir une vision rapide de l'évolution des forêts sur de plus grandes superficies. Les techniques de classifications utilisent soit des approches par pixel (on classe tous les pixels de l'image satellite) ou par objet (on découpe l'image en polygones homogènes et on leur assigne une catégorie d'occupation du sol). L'avantage de la première approche est d'avoir une information plus fine au niveau spatial (à l'échelle du pixel), tandis que la seconde permet d'avoir une information cartographique plus cohérente (groupe de pixel de comportement similaire). La difficulté de cette dernière approche est la détermination du niveau d'agrégation pertinent, souvent défini par l'unité minimale de cartographie.

Une grande contrainte pour la cartographie des forêts en zones tropicales, spécialement en Afrique centrale, est l'importance de la couverture nuageuse. Ceci constitue un problème lors de l'analyse des images optiques et nécessite de trouver des méthodes adaptées pour contourner cette difficulté. Il existe plusieurs types d'alternatives : (1) l'analyse multi-capteur, (2) la composition d'images et (3) l'exploitation d'images radar.

La première approche utilise des images satellites de différents capteurs pour couvrir une région importante avec suffisamment d'images sans nuages. Toutefois, on est lié à la disponibilité des images et à l'accès à ces données. Par exemple, l'accès aux images Landsat, couramment utilisées pour le suivi des forêts, a été problématique en Afrique centrale sur la période 2003-2013, dû au problème du capteur ETM+ de Landsat-7 en 2003 et à l'arrêt de la réception des données Landsat-5 depuis 2001 dans cette zone. Les images acquises par d'autres capteurs (par exemple SPOT, Aster, DMC et RapidEye) sont donc ajoutées à l'analyse multi-capteur pour couvrir la zone d'intérêt. Deuxièmement, la composition d'images est une approche plus récente qui combine des morceaux d'images afin de réaliser une image composite sans nuages. L'avantage de cette technique est d'obtenir une image continue sans nuage mais vu que les informations de différentes dates sont combinées, il est plus complexe d'identifier quand est survenu le changement de couverture forestière. La troisième alternative au regard de la couverture nuageuse est l'exploitation des images radar ayant un signal qui n'est pas perturbé par les nuages. Toutefois, ce signal est influencé par d'autres paramètres (ex. la topographie, l'humidité du sol...), ce qui rend son traitement plus complexe à interpréter. Il est donc utile de combiner ces données avec d'autres sources d'informations, les images optiques par exemple.

Ces différentes approches de cartographie des forêts ont donc chacune leurs avantages et leurs inconvénients afin de répondre à un défi important : cartographier les forêts dans une région très nuageuse. La recherche de nouvelles solutions est sans cesse renouvelée pour réaliser des cartes plus précises et adaptées aux nouveaux satellites disponibles.

## 4.2 Cartographie de la biomasse forestière

Comme les régions tropicales présentent une couverture nuageuse permanente, les futurs systèmes MNV nécessiteront un suivi par satellite avec des capteurs pénétrant les nuages combinés à des images optiques. Dans le cadre du projet ReCover (Häme *et al.*, 2012; Haarpaintner *et al.*, 2012), une carte de la biomasse a été produite pour une région de 68 000 km<sup>2</sup> dans l'ouest de la RDC. Elle a été réalisée à partir de données satellite LiDAR provenant d'un capteur ICESat/GLAS sur la période 2003-2009 (figure 1.16). La biomasse est estimée par interpolation et conversion ICESat/GLAS s'appuyant sur les hauteurs d'arbres à une résolution d'1 km<sup>2</sup>. L'équation allométrique fournie par Saatchi *et al.* (2011) a été utilisée pour cette première carte. La donnée supplémentaire utilisée était une carte Forêt/Non forêt (F/NF) dérivée des données Landsat et combinée à des données optiques à haute résolution (Pedrazzani *et al.*, 2012) et des données radar pénétrant les nuages (Einzmann *et al.*, 2012). Les cartes F/NF résultantes ont été produites pour les années 1990, 2000, 2005 et 2010 à une résolution de 30 m.

dans le cadre du projet REDDAF : (1) une approche à base NDVI, qui compare les valeurs de cet indice de végétation dérivé des données satellites RapidEye entre 2009 et 2011 ; et, (2) l'application de données satellites stéréo Cosmo-Skymed pour calculer des modèles 3D qui mettent les trouées d'exploitation et les pistes en évidence. Finalement, un modèle transférable a été mis au point en vue d'estimer la biomasse aérienne des forêts à faible émission de carbone à l'aide de données SAR (Mernoz *et al.*, 2014). La figure 1.17 présente les résultats de ce modèle : une carte de la biomasse pour la région de l'Adamawa au Cameroun qui couvre environ 15 000 km<sup>2</sup>. De nombreuses mesures de la biomasse (21 parcelles) ont été réalisées en 2012 sur le terrain. Elles ont été utilisées pour le calibrage et la validation du modèle d'inversion des données SAR. Ce modèle pourrait constituer une approche peu coûteuse d'estimation de la biomasse aérienne des forêts à faible émission de carbone. Il nécessite une validation pour une utilisation plus robuste dans d'autres régions.

L'évaluation du facteur d'émission, qui mesure les changements des stocks de carbone dans les divers réservoirs de carbone de la forêt, s'est concen-

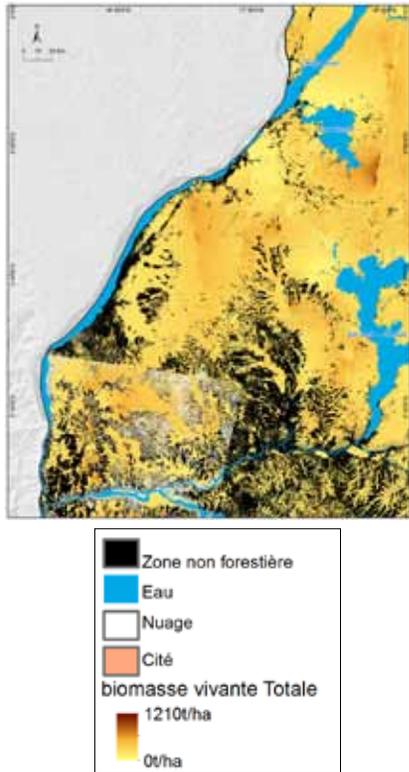


Figure 1.16: Carte de la biomasse des régions forestières de l'est de la RDC dérivée d'une combinaison de cartes forêt/non forêt et des hauteurs d'arbres

Source : ReCover.

Deux méthodes d'évaluation directe de la dégradation forestière ont été testées au Cameroun

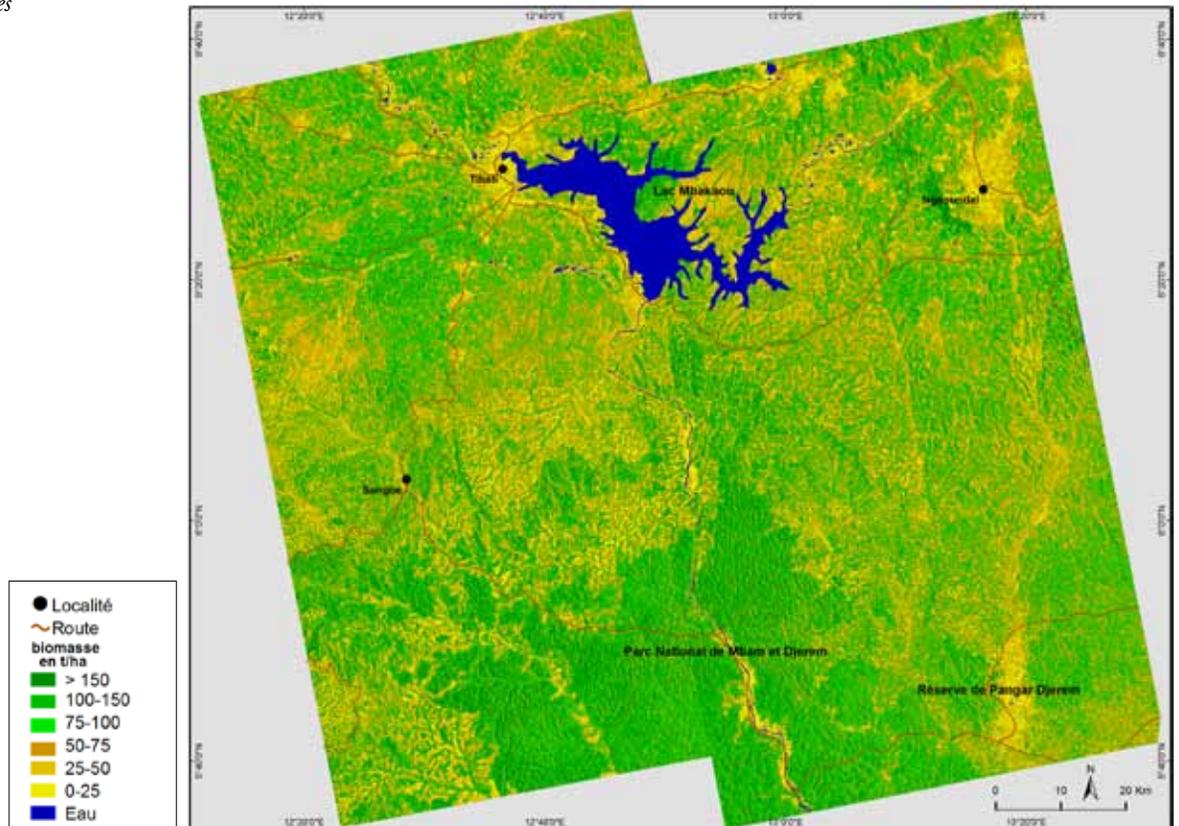


Figure 1.17: Cartographie de la biomasse de la région de l'Adamawa, Cameroun

Source : REDDAF-Cameroun

trée sur l'un des principaux agents de la dégradation de la forêt au Cameroun : l'exploitation sélective planifiée. Deux inventaires sur le terrain ont évalué les impacts sur la biomasse et sur le carbone induits par l'exploitation sélective dans une concession forestière certifiée FSC ainsi que dans une concession non certifiée. L'échantillonnage reposait sur des parcelles Zone Impact Carbone (ZIC) dans les trouées d'exploitation associées chacune à une parcelle de forêt intacte à 50 m de la parcelle ZIC. Cette seconde parcelle a permis de mesurer les stocks de carbone d'une forêt non perturbée. La superficie des parcelles ZIC dépend de la taille de la zone endommagée par l'abattage des arbres, laquelle est délimitée par les arbres sur pied, endommagés ou non, qui entourent la trouée d'exploitation. L'inventaire des 67 parcelles a permis d'estimer la biomasse totale, aérienne et racinaire, à 326 tonnes par hectare, la biomasse aérienne étant de 285 t/ha. La comparaison des ZIC avec les parcelles intactes révèle que pour une tonne de bois (grume) extraite des concessions non certifiées, 1,97 tonnes ( $\pm 0,41$ ) de carbone étaient émises, alors que dans les concessions certifiées, les émissions de carbone s'élèvent à 1,34 tonne ( $\pm 0,22$ )/T de bois exporté.

Ces résultats démontrent qu'une gestion améliorée de la forêt et des pratiques d'exploitation à faible impact peuvent entraîner une réduction

substantielle des émissions. Cette étude a également illustré la possibilité de suivre les signaux de dégradation due à l'exploitation sélective à l'aide d'images captées à distance ; toutefois, il est important de noter la nécessité d'avoir des données satellitaires très fréquentes pour permettre une évaluation de la dégradation.

Ces études de cas montrent que l'imagerie satellitaire présente un fort potentiel de détection de la dégradation des forêts, mais qu'elle nécessite des images satellitaires de bonne qualité, à hautes résolutions spatiales ( $<10$  m), prises à des intervalles de temps rapprochés (au moins une fois par an). Ceci n'est pas sans conséquence sur les coûts d'un système de suivi national. Une approche par échantillonnage peut s'avérer nécessaire pour réduire les coûts. La couverture nuageuse persistante constitue le principal problème pour l'acquisition d'images optiques dans le Bassin du Congo, mais le radar présente ses propres inconvénients intrinsèques. La disponibilité limitée d'images d'archive optiques et radar rend actuellement difficile l'établissement de références adéquates pour le suivi de la dégradation des forêts. Des stratégies d'observation systématique, où un capteur satellite balaie fréquemment le territoire avec les mêmes caractéristiques d'observation, permettront de remédier à ces problèmes.



**Photo 1.10: Piste secondaire pour l'évacuation des bois dans la Province du Bandundu – RDC**

#### **Encadré 1.5: Une technologie aéroportée de pointe pour mesurer la biomasse forestière en RDC**

Aurélien C. Shapiro<sup>1</sup>, Mina Lee<sup>2</sup>, Johannes Kirchgatter<sup>1</sup>, Sassan Saatchi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>WWF – Allemagne; <sup>2</sup>WWF – RDC; <sup>3</sup>Université de Californie, Los Angeles

Après l'annonce de la cartographie de la biomasse de la forêt nationale en RDC (voir l'encadré 8.3 dans EDF 2010), le projet *Carbon Map and Model* (CO2M&M<sup>1</sup>) lancé en 2012 récolte aujourd'hui des données aéroportées de scanner à laser (LiDAR, for Light Detection and Ranging) afin de compléter les données de terrain et les données satellites en vue de l'estimation du carbone stocké dans les forêts de la RDC. Cette collecte de données stratégiques pour l'évaluation de la biomasse est réalisée grâce à une méthode d'échantillonnage qui reproduit les techniques d'inventaire forestier sur le terrain. Une couverture LiDAR nationale n'étant financièrement pas abordable, un échantillonnage aléatoire stratifié permettra de générer un ensemble de données le plus objectif possible (c.-à-d. distribué largement et uniformément) tout en représentant de manière cohérente les divers types de forêts dans l'ensemble du pays. À cette fin, 212 parcelles couvrant au total environ 400 000 ha seront survolées entre 2013 et 2014 afin d'acquérir simultanément les données LiDAR et des photos aériennes haute résolution en couleur, qui constitueront l'un des inventaires les plus complets de la forêt jamais réalisé en RDC.

Les scanners LiDAR sont des satellites actifs qui utilisent une approche altimétrique pour vérifier très précisément l'élévation de la superficie des terres ( $<10$  cm) ainsi que la hauteur de la canopée de la forêt (figure 1.18). Le signal LiDAR fournit également des informations au sujet de la structure forestière dans les forêts denses (canopée, densité). Des parcelles existantes et des parcelles nouvelles « classiques » seront utilisées pour calibrer les données LiDAR au niveau régional, ce qui constituera un large ensemble de données permettant de valider la méthodologie. Les données LiDAR, calibrées grâce aux inventaires de terrain, seront généralisées sous forme d'imagerie satellitaire et croisées avec d'autres données afin de mesurer la biomasse de l'ensemble du pays.

<sup>1</sup> <http://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/wald-und-klima/carbon-map-and-model-project>.

Outre l'estimation des stocks de carbone, ces données LiDAR peuvent être utilisées pour diverses applications, comme la santé de la forêt, la biodiversité et la recherche en matière de conservation. La campagne LiDAR fournira également des informations sur les perturbations de la forêt telles que l'exploitation dans les concessions forestières, l'étendue de la dégradation de la forêt et la capacité de régénération des forêts tropicales. Selon Zhuravleva, *et al.* (2013),

la dégradation de la forêt peut constituer une composante significative des émissions de carbone dans le Bassin du Congo. Fin 2015, ce projet fournira des informations essentielles sur les stocks et les émissions de carbone de la forêt en RDC et sur les émissions résultant de la gestion forestière, de la conservation et de la déforestation.

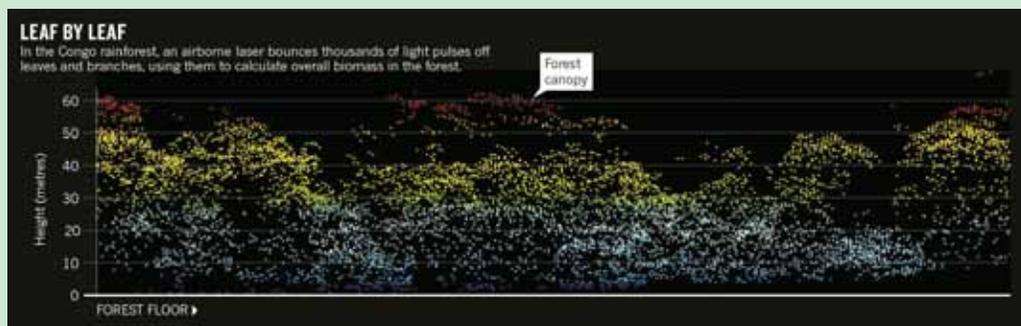


Figure 1.18: Schéma montrant la combinaison de LiDAR aéroporté estimant la hauteur de la canopée et l'élévation du sol qui, combinées à des données auxiliaires, permet de produire une carte de la biomasse avec une résolution d'un hectare.

## 5. Analyse des moteurs de la déforestation

### 5.1 Moteurs de la déforestation et facteurs sous-jacents

Photo 1.11: Canopée dans la brume – Monts de Cristal – Gabon



De nombreuses études récentes (Defourny *et al.*, 2011 ; Ernst *et al.*, 2013 ; Mayaux *et al.*, 2013 ; Megevand, 2013) ont identifié les facteurs directs et les causes sous-jacents de la déforestation dans le bassin du Congo. Dans cette région, les phénomènes de déforestation sont observés à petite

échelle et correspondent à des activités croissantes d'agriculture sur brulis, d'exploitation artisanale du bois d'œuvre et de carbonisation artisanale ou de collecte de bois de feu.

La carbonisation artisanale est principalement destinée à l'approvisionnement des centres urbains et provoque dès lors une auréole de dégradation autour des grandes métropoles de la région (Kinshasa, Douala, Yaoundé...). Dans le futur, le recours à des énergies fossiles, dont la prospection va croissante dans le bassin du Congo, pourrait diminuer la part du bois dans le bouquet énergétique des populations de la région, mais le bois devrait rester majoritaire.

L'expansion des surfaces agricoles est liée à l'agriculture villageoise qui alimente principalement un marché local et les centres urbains les plus proches. L'agriculture industrielle a jusqu'à présent peu affecté le couvert forestier, excepté les plantations de palmiers à huile et d'hévéas implantées à proximité des grands axes de transport. Certaines politiques publiques (notamment sur les biocarburants) et l'augmentation des grands projets agro-industriels influenceront certainement sur la déforestation et il conviendra de vérifier leurs impacts.

Aucune étude ne considère que l'exploitation forestière de bois d'œuvre soit un facteur direct de déforestation en raison des faibles densités d'exploitation concentrée sur quelques espèces à haute valeur commerciale. Par contre, la concomitance de fortes densités de population et de l'ouverture de routes forestières favorisent localement une dégradation importante du couvert forestier.

Les secteurs minier et pétrolier ne causent pas de déforestation importante, du moins en termes de surface, mais la pollution de l'air et des rivières qu'ils engendrent affectent localement l'état des forêts. Dans ces secteurs, de nombreux nouveaux projets sont à l'étude (par exemple l'exploitation pétrolière dans le parc national des Virunga) qui ne manqueront pas d'avoir un impact très important sur les forêts.

L'unanimité se fait sur les principales causes sous-jacentes de dégradation des forêts qui sont la

pression démographique tant rurale qu'urbaine, la pauvreté rurale, le développement de nouvelles infrastructures et la maîtrise insuffisante de la gouvernance du secteur forestier. La déforestation reste faible lorsque la population rurale ne dépasse pas le seuil de 8 habitants par km<sup>2</sup> et augmente rapidement au-delà de ce seuil. La proximité des villes, en temps de transport, influe fortement sur la dégradation des écosystèmes forestiers. En effet, l'absence d'infrastructures routières de bonne qualité est un frein au développement des activités d'exploitation agricole et de bois énergie. Lorsque le temps de transport excède 16 h, l'influence des centres urbains devient statistiquement négligeable (Mayaux *et al.*, 2013) sauf le long des voies navigables. Les études ont montré que la mauvaise gouvernance au niveau local et national est également un facteur sous-jacent qui favorise la déforestation, en particulier dans les zones où la mauvaise ou l'absence de planification spatiale ne permet pas de juguler les activités illégales (Rudel, 2013).

## 5.2 Simulation de la perte du couvert forestier en RDC à l'horizon 2035

---

Une simulation des risques de pertes du couvert forestier en RDC à l'horizon 2035 a été réalisée par l'UCL, en collaboration avec la FAO, dans le cadre de l'initiative REDD+. L'année 2035 constitue le terme de l'actuelle stratégie nationale REDD+ en RDC.

Cette étude s'est basée sur l'évolution du couvert forestier de la RDC entre 2000 et 2010 décrite dans l'atlas FACET (Potapov *et al.*, 2012). La simulation du risque de perte de couvert forestier, à la résolution spatiale du kilomètre carré, s'est appuyée sur les moteurs de la déforestation et de la dégradation des forêts en RDC identifiés par Defourny *et al.* (2011). La distribution de la population humaine et le temps d'accès aux marchés des zones urbaines sont les deux variables qui expliquent spatialement les dynamiques du changement du couvert forestier en RDC (Kibambe et Defourny, 2010; Kibambe *et al.*, 2013).

La calibration du modèle de simulation a été réalisée sur base des cartes d'occupation du sol des années 2000 et 2005 de l'atlas FACET. La cartographie du couvert forestier en 2010 de cet atlas a servi à la validation du modèle. Deux scénarios ont permis de contraster les simulations réalisées: un scénario *business-as-usual* (BAU) qui prévoit un doublement de la population en 2035 et un scénario conservateur qui envisage une perte annuelle de

couvert forestier du même ordre de grandeur que celle observée entre 2000 et 2005.

Alors que la perte de couvert forestier observée entre 2005 et 2010 a été estimée à 19 759 km<sup>2</sup> (Potapov *et al.*, 2012), soit 14% de plus que pour la période 2000-2005, la simulation conservatrice (2<sup>e</sup> scénario) la sous-estime d'environ 13%. Sur cette base conservatrice, le taux annuel moyen de perte de couvert forestier serait de 0,19%, taux peu réaliste en comparaison des tendances observées ailleurs. Ernst *et al.* (2013) ont observé un doublement des taux bruts de déforestation qui sont passés de 0,11% par an entre 1990 et 2000, et à 0,22% par an entre 2000 et 2005. Potapov *et al.* (2012) indiquent que le taux brut de perte de couvert forestier (tous types de forêts confondus) est passé de 0,22% à 0,25% par an entre les périodes de 2000 à 2005 et de 2005 à 2010.

Sur la base du scénario 1 (BAU), le taux moyen annuel de perte de couvert forestier a été estimé à 0,31% avec comme hypothèses une croissance démographique de 2% à 3% en milieu rural, une densité de population maximale de 6 habitants/km<sup>2</sup> en zone forestière (Kibambe et Defourny, 2010) et un besoin en terre forestière par ménage rural de 0,25 hectares (Tollens, 2010). Ce taux de 0,31% est quatre fois inférieur à l'estimation réalisée par Zhang *et al.* (2002).

Les simulations ont cependant montré que l'hypothèse conservatrice pouvait être un bon indicateur de l'évolution du couvert forestier à court terme (de l'ordre de 5 ans), car les superficies forestières converties en zones non forestières sont de faibles étendues à l'échelle du massif fores-

tier de la RDC. Par contre, la simulation basée sur la croissance démographique montre que les pertes du couvert forestier pourraient être bien plus importantes si la population congolaise double d'ici 2035, terme de l'actuelle stratégie nationale REDD+ en RDC.

## 6. Perspectives de suivi des forêts tropicales

Les différentes initiatives de cartographie et de suivi forestier en Afrique centrale démontrent le grand intérêt international pour les forêts tropicales. La tendance est à la réalisation de plus en plus de cartographies exhaustives des forêts car de plus en plus d'images satellites sont disponibles (notamment avec l'arrivée des nouveaux satellites Landsat-8 et Sentinel-2) et la résolution des images est de plus en plus fine. Pour pouvoir comparer ces différentes cartographies, il est crucial d'harmoniser les méthodes utilisées et la définition des classes d'occupation du sol ainsi que de détailler davantage la qualité et la précision des informations, ce qui est rarement le cas. La cartographie de certains pays comme le Rwanda, le Burundi et São Tomé et Príncipe est également indispensable afin d'avoir

une vision globale sur l'ensemble des pays de la COMIFAC.

Les études sur la dégradation forestière et d'évaluation de la biomasse aérienne sont encore en phase de développement. Elles nécessiteraient une meilleure intégration des données de terrain, pour la biomasse notamment, par le développement d'un réseau de collecte et archivage des données de terrain. Il est également important de renforcer les capacités régionales pour la collecte, le traitement et l'analyse des données de suivi forestier afin que cela soit réalisé par des experts de la région. Le projet de la station de réception SPOT de Libreville sera peut-être un tremplin pour atteindre cet objectif.



*Photo 1.12: Végétation typique des forêts denses humides – Cameroun*