

Evolution du couvert forestier aux échelles régionale et nationale / Forest cover evolution at regional and national scales

Introduction

- Nombreuses initiatives de suivi des forêts par image satellite
- Différentes échelles d'analyse: Régionale, nationale et locale
- Multi-capteurs : principalement Landsat mais davantage d'autres capteurs
- Changements de couvert forestier : déforestation, dégradation, biomasse, ...
- Politiques forestières impliquées: REDD, FLEGT, ...

1. Evaluation régionale du couvert forestier / Regional assessment of forest cover

1.1 Suivi régional des forêts humides de 1990 à 2010

(B. Desclée et P. Mayaux)

Dans le cadre de l'OFAC et dans la continuité des précédentes éditions de l'EDF, une nouvelle évaluation cohérente de la déforestation a été réalisée à partir de la plus longue série temporelle (1990-2000-2010) couvrant le Bassin du Congo. Les images satellites couvrant ces dates pivots ont été cartographiées sur base des techniques récentes de traitement d'images et croisées afin de déterminer les taux de déforestations pour chaque pays du Bassin du Congo. Cette étude est réalisée dans le cadre du projet TREES lancé en 1992 par la Commission Européenne et qui contribue à l'enquête mondiale par télédétection de l'Evaluation Globale des ressources forestières mondiales 2010 de la FAO (FRA pour Forest Resource Assessment ; FAO, 2012).

L'approche TREES/FRA utilise des extraits d'images satellites de 10x10 km sur trois époques 1990, 2000 et 2010 sur base d'un échantillonnage systématique sur chaque demi-degré de latitude/longitude (et même quart de degré pour le Gabon et la Guinée Equatoriale, fréquemment couverts de nuages), soit un échantillon total potentiel de 875 points systématiquement distribués sur les forêts humides d'Afrique Centrale. 540 sites ont été couverts par des images de bonne qualité sur les 3 époques. Les principaux

échantillons manquants sont localisés sur les zones côtières du Gabon, de la Guinée Equatoriale et du Cameroun.

Bien que les périodes cibles étaient 1990, 2000 et 2010, la recherche des images couvre quelques années autour de chaque période cible vu les contraintes de disponibilités des images (notamment couvert nuageux et faibles acquisitions historiques). Les problèmes techniques sur les satellites Landsat (capteur défectueux sur Landsat-7 et station de réception Landsat-5 défaillante) ont également compliqué l'acquisition des images sur 2010, alors que ces données étaient la base pour 1990 et 2000. Dès lors, le jeu de données 2010 a été construit en combinant plusieurs satellites de résolution similaire. Parmi les candidats potentiels, DMC (Disaster Monitoring Constellation, comprenant notamment les satellites Beijing-1, NigeriaSat-1, Deimos-1, UK-DMC and UK-DMC2) était considéré comme bon candidat étant donné sa courte période de revisite et ses résolutions spatiales (de 22 à 32 m) et spectrales similaires à Landsat. Les images SPOT-4 et -5 à plus haute résolution (respectivement 20 et 10 m) ont également été utilisées comme imagerie complémentaire. Au total, DMC représentant 43% des images utilisées, SPOT (22%) et Landsat TM pour les 34% restants.

Les changements de couvert forestier sur la période 1990-2000-2010 ont été estimés sur base d'une chaîne de traitement originale qui comprend différentes étapes (Rasi et al., 2013): sélection visuelle des meilleures images disponibles, co-registration, calibration, masquage des nuages et ombres, segmentation, détection de changement et classification. Cette chaîne de traitement a été adaptée pour les échantillons DMC et SPOT (Desclée et al., 2013). Des experts régionaux ont alors vérifié les cartes d'occupation du sol produites automatiquement et ont recodé les erreurs détectées. Les changements de couvert forestier ont alors pu être mesurés en comparant les paires de cartes validées entre 1990 et 2000 et sur 2000 et 2010 sur chaque point de l'échantillonnage (Mayaux et al., 2013). La Figure 1 présente cette évolution de la déforestation sur l'ensemble du bassin du Congo.

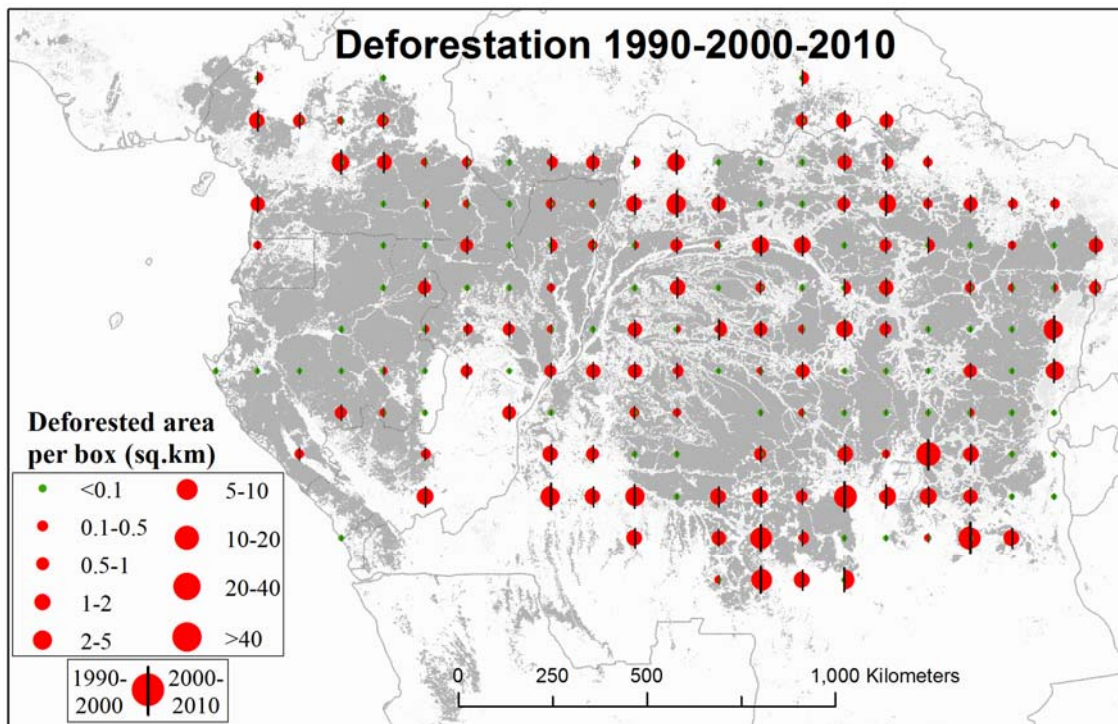


Figure 1 : Cartes du Bassin du Congo illustrant les taux de déforestation sur chaque point de l'échantillonnage sur les périodes 1990-2000 et 2000-2010

Le tableau 1 reprend les estimations de taux de déforestation sur la RDC et l'ensemble du Bassin du Congo sur les périodes 1990-2000 et 2000-2010. La tendance générale est une réduction du taux de déforestation entre ces 2 périodes de 0.19% à 0.10% sur tout le Bassin. La reforestation diminue également en passant de 0.03% à moins de 0.01%.

Tableau 1 : Taux annuels (bruts et nets) de déforestation sur les périodes 1990-2000 et 2000-2010 sur la RDC et l'ensemble du bassin du Congo

Pays*	n	1990 – 2000			2000 - 2010		
		Déforesta tion brute	Reforesta tion brute	Déforesta tion nette	Déforesta tion brute	Reforesta tion brute	Déforesta tion nette
RDC	114	0.24% ±0.04%	0.02% ±0.01%	0.22% ±0.06%	0.19% ±0.04%	0.00% ±0.00%	0.19% ±0.06%
Bassin du Congo	173	0.19% ±0.03%	0.03% ±0.01%	0.16% ±0.05%	0.10% ±0.01%	0.00% ±0.00%	0.10% ±0.02%

* Travaux en cours pour les autres pays du bassin du Congo

1.2 Regional Landsat-scale forest extent and disturbance FACET map

(M. Hansen and P. Amani)

Medium spatial resolution Landsat imagery is the data of choice in quantifying forest extent and change over large areas. Methods for mass-processing the Landsat archive in support of land monitoring programs are now being implemented. Date-intensive computational methods allow for the querying of every Landsat pixel, enabling researchers to overcome the primary limitation of optical earth observation data sets for tropical Africa – cloud cover. The USAID Central Africa Regional Program for the Environment (CARPE) has supported the analysis, characterization and dissemination of Landsat data sets and products for Central Africa through a collaboration between the University of Maryland (UMd) and OSFAC (Observatoire Satellital des Forêts d’Afrique Centrale). UMd and OSFAC have generated a set of products as part of their FACET program (Forêts d’Afrique Centrale Evaluées par Télédétection). FACET products, delivered as hard and soft copy atlases of forest type, extent and loss at national scales, represent the first medium spatial resolution maps of their kind. FACET data have been incorporated into UNREDD activities, including the use of FACET as the primary thematic layer for forest cover extent and loss for the Democratic Republic of the Congo’s National Forest Monitoring System. We report here an addition to the FACET product suite, which to date consists of national scale products for the Democratic Republic of the Congo and the Republic of Congo. These mapping methods have now been extended to the regional scale, characterizing the following countries of Central Africa: Cameroon, the Central African Republic, the Republic of Congo, the Democratic Republic of Congo, Equatorial Guinea and Gabon.

The Landsat program fits several requirements for operational national to regional to global-scale forest monitoring. Landsat data, specifically ETM+ or Landsat 7 data, are acquired systematically at the global scale. FACET processing of Landsat data includes per pixel quality assessment in order to retain only viable land surface observations for forest characterization. Technical methods for processing and characterizing Landsat data in this manner are presented by Potapov et al. (2012). For this first regional product, data from 1999 through 2012 were included. Two products were derived: a per pixel percent tree cover estimate for 2000 (derived from a set of statistical derivatives

from AVHRR, MODIS and Landsat) and a 2000 to 2012 per pixel forest cover loss estimate (using Landsat?). Figure 2 shows the result. Forest cover loss (in red) includes areas with tree cover higher than 30% that experienced stand-replacement disturbance between 2000 and 2012. A regional subset is shown in Figure 3, illustrating the variation in forest disturbance between countries along the northern fringe of the Congo Basin rainforest. The background image captures the high data quality of the input Landsat data and the lack of cloud or haze contamination enabled by mass-processing of the Landsat archive.

Regional maps such as this serve to demonstrate capabilities that could be adopted by national agencies responsible for forest monitoring. National monitoring tasks in support of the REDD initiative will require such data in establishing baseline carbon emissions estimates. Forest definitions used in REDD may vary based on tree height and cover density. For this regional map, the percent canopy cover of 5 meter or taller trees is estimated per pixel. Percent tree cover maps allow users to vary the definition of forest based on canopy cover and enable the disaggregation of forest loss by canopy density strata. The mapped forest cover loss is for stand-replacement disturbances only, and does not include an assessment of forest degradation due to selective logging. FACET forest type maps of the two Congos, which include primary and secondary forest classes, are needed at the regional scale in order to provide context to the forest cover loss data. Labeling of forest loss events by antecedent forest type as well as change dynamic (mechanical clearing, fire, storm damage) will be required in order to properly model carbon emissions 'activities' in support of REDD monitoring objectives. Dissemination of the regional product is pending accuracy and peer-review assessments, and after that will be made freely available at the CARPE and OSFAC websites (carpe.umd.edu and osfac.net).



Figure 2. Landsat-derived regional percent tree cover and forest cover loss for tree cover $\geq 30\%$ canopy cover.

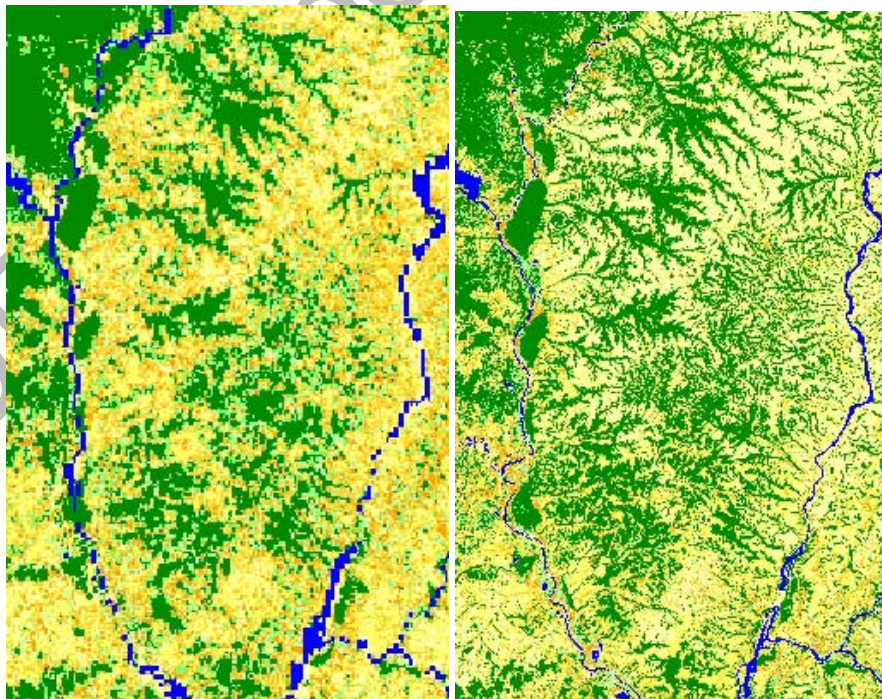


Figure 3. Regional subset of Figure 1, with forest cover loss from 2000 to 2012 in red and a background composite image of Landsat in 5-4-3 false color.

Box 1.3 Carte régionale du pourcentage de couvert forestier à partir de radar

(A. Bouvet)

A new wall-to-wall map of the percent tree cover has been created over Sub-Saharan Africa. The map is the result of a supervised classification applied on a mosaic of double-polarization data (HH and HV) from PALSAR, Japanese L-band synthetic aperture radar. The mosaic covers the African continent at a spatial resolution of about 100m. The Vegetation Continuous Fields (VCF) product from MODIS, which gives the percentage of the surface covered by trees in each 0.25 km² pixel, is used as training data for the classification. The following tree cover classes are retained: 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, and >60% (the PALSAR signal saturates for tree covers higher than 60%). Compared to VCF and to other vegetation maps available at large scales, this new map provides results at an improved spatial resolution, which allows detecting fine structures (e.g. gallery forests) and reducing the number of mixed pixels, as shown on Figure 4. High-resolution samples of classified optical data from the Global Forest Resources Assessment 2010 (FRA2010) Remote Sensing Survey, available at each square degree, have been used for the validation of these results. The forest/non-forest accuracy has been calculated to be around 89% on the whole Sub-Saharan Africa.



*Figure 4. Comparison of VCF percent tree cover (left) and classified PALSAR maps (right)
(subset of tile centered on -2.5°S, 15.5°E)*

2. Cartographies nationales du couvert forestier et de ses changements / National forest cover/change maps

2.1 Forest monitoring in Gabon

(C. Sannier)

Le Gabon dispose maintenant d'une cartographie complète de son couvert forestier pour les années de référence 1990 et 2000 et sur près de 40% de son territoire pour l'année 2010. La méthodologie employée est décrite en détail par Fichiet et al. (2012). La cartographie du couvert forestier du Gabon a été réalisée grâce au traitement d'images Landsat pour les années 1990 et 2000 et d'images Landsat, et ASTER pour 2010. La couverture complète du Gabon par des images optiques est habituellement considérée comme difficilement réalisable étant donné le couvert nuageux permanent. Au total, près de 300 images satellites ont été traitées alors qu'en l'absence de nuages, une quinzaine de scènes Landsat suffiraient pour couvrir l'ensemble du territoire gabonais. Chaque image de l'année 2000 a été traitée et classée séparément pour en extraire le couvert forestier et les résultats fusionnés pour chaque emprise. Un contrôle qualité détaillé a ensuite été appliqué pour chaque emprise d'images et les résultats ont été mosaïqués sur l'ensemble du territoire pour créer la couche forêt/non forêt de l'année 2000. La couche 2000 a ensuite été superposée aux images de 1990 et 2010 pour en extraire les changements observés et les classer selon une nomenclature compatible avec celle du GIEC. Cette carte des changements permet ensuite de dériver les couches forêt/non forêt pour 1990 et 2000.

La précision des cartes produites a été évaluée à près de 98% et a été estimée à partir de la comparaison des cartes avec une interprétation visuelle indépendante des images satellites par un photo-interprète confirmé sur un plan d'échantillonnage couvrant 1% de l'ensemble du territoire gabonais. Ce même plan d'échantillonnage permet de produire des estimations de surface indépendantes de la carte thématique, mais aussi de combiner ces résultats avec la carte thématique et ainsi d'améliorer la précision des estimations (Sannier et al, 2013).

Les résultats pour l'ensemble du Gabon sont détaillés dans le Tableau 2 et illustré par la Figure 5. La forêt représente plus de 88% du territoire gabonais soit environ 23,6 millions d'hectares. Le taux de déforestation nette entre 1990 et 2000 est établi entre 0,31 et 0,37% soit une diminution d'environ 80 000 ha entre les deux dates. Ce taux est faible et reste inférieur aux estimations précédemment publiées.

Tableau 2 : Statistiques de l'évolution du couvert forestier du Gabon entre 1990, 2000 et 2010 (C.I.= Confidence Interval)

		1990	2000	2010	1990-2000	2000-2010
Study area	(ha)	26 766 700			Net Deforestation	
Direct	(ha)	23 663	23 589	23 565	73 863	24 342
Expansion		313	450	108		
Estimate	(%)	88,41	88,13	88,04	0,31	0,10
Direct	(ha)	532 580	534 396	535 099	47 727	26 839
Expansion	(%)					
Estimate at 95% CI		2,25	2,27	2,27	64,62	110,26
Map area statistics	(ha)	23 724	23 661	-	61 151	-
		204	786	-		
	(%)	88,63	88,40	-	0,26	-
Regression	(ha)	23 741	23 653	-	87 157	-
Estimate		480	057	-		
	(%)	88,70	88,37	-	0,37	-
Regression	(ha)	66 610	70 587	-	27 605	-
Estimate at 95% C.I.	(%)	0,28	0,30	-	31,67	-

Pour 2010, les résultats de la cartographie réalisée concernent un peu moins de 40% du territoire gabonais comprenant Libreville, Lambaréné, Franceville et les parcs nationaux de Pongara, Akanda, Monts de cristal, la Lopé, des plateaux Batéké et Minkébé. Toutefois, l'interprétation des segments de validation ont été réalisés sur l'ensemble du pays ce qui permet tout de même d'avoir des résultats.

Entre 1990 et 2000, la déforestation brute est estimée à un peu plus de 100 000 ha et près de la moitié est due à l'exploitation forestière et à l'ouverture de routes alors que près d'un tiers de la déforestation est due à la conversion de la forêt en prairie/savane. La reforestation est de l'ordre de 40 000 ha et les principales causes en sont la conversion des savanes/prairies pour plus de 60% et la reforestation des routes liées à l'exploitation forestières pour 25%. La suppression du couvert forestier lié à l'exploitation forestière peut être considérée comme n'étant pas de la déforestation, car il n'y a pas de conversion vers un autre type d'utilisation des sols.

Entre 2000 et 2010, un ralentissement très net de la déforestation est observé, puisque le taux de déforestation observé est de 0.10% sur la période et la zone couverte. D'autre part, cette valeur n'est pas significativement différente de zéro. Ceci peut s'expliquer par la mise en place des parcs nationaux en 2002 et la politique de gestion durable des ressources forestières à partir des années 2000 par la création des petits permis et des concessions forestières en aménagement durable. Des études sont en cours pour confirmer ces hypothèses.

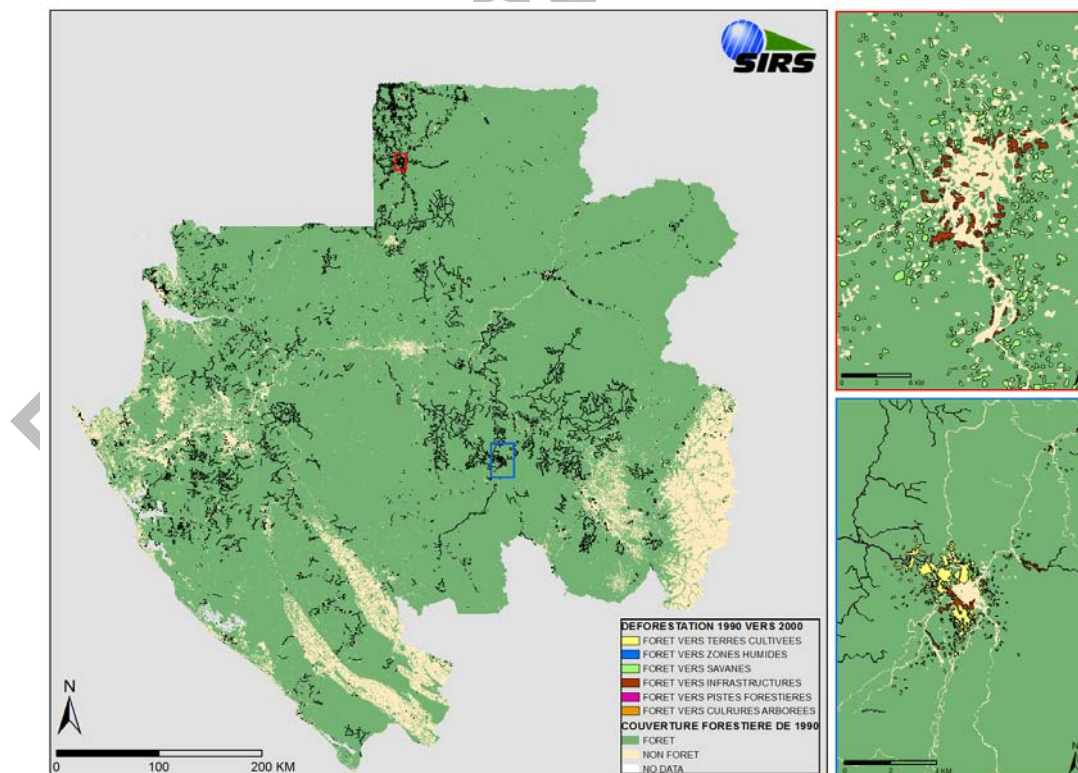


Figure 5 : Carte de la déforestation entre 1990 et 2000 pour le Gabon

Ces résultats intéressants doivent être confirmés par les études sur les causes de la déforestation et de la reforestation au Gabon et par la finalisation de la cartographie du couvert forestier sur l'ensemble du territoire pour 2010 qui doivent être réalisées au cours du premier semestre 2013.

2.2 Monitoring Forests in Republic of the Congo and Cameroon

(T. Haeusler, S. Gomez, R. Siwe et al.)

Two countries that have been actively following the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) policy process on reducing emissions from deforestation and degradation (REDD+) since its inception in 2005 are Cameroon and Republic of Congo (RoC). In this context both countries have implemented the application of Earth Observation (EO) data as a tool for improved forest monitoring which is a pre-cursor to REDD.

Cameroon

The REDD project in Cameroon addressed methodological issues for forest monitoring with special focus on application of Earth Observation (EO) technologies with ground-based Carbon accounting. The Pilot Project had a general objective to establish/support a pre-operational technical and institutional framework for the national carbon monitoring/accounting within the scope of the REDD process. The project furthermore developed a south-south co-operation by applying experiences obtained in Carbon accounting in Bolivia, to Cameroon. The technology transfer was implemented via capacity building workshops and on-the-job-trainings with the national counterparts.

The Activity Data (AD) assessment for Cameroon comprised of the acquisition and analysis of full national EO data coverages based on Landsat for 1990 and 2000, and DMC data for 2005/06. The forest and non-forest areas were mapped for these years with a Minimum Mapping Unit (MMU) of 5 ha.

An agglomeration of the clouded areas in the three epochs is approximately 30% of the national territory covering a significant portion of the forest area. Calculating national deforestation statistics on this basis would be misleading. Therefore, an effort was made

to optimise the EO data by using additional sensors and reduce the cloud problem. Due to budgetary constraints for this had to be limited to the Eastern region. Based on the improved forest/non-forest products of the East region, change masks were generated for the periods: 1990-2000 and 2000-2005 (Figure 6). The change areas are indicated in “red”. The changed areas were then classified into the five IPCC compliant categories: cropland; grassland; wetland; settlement land and other land. Training data was derived from Very High Resolution (VHR) data and from the data acquired during the field missions.

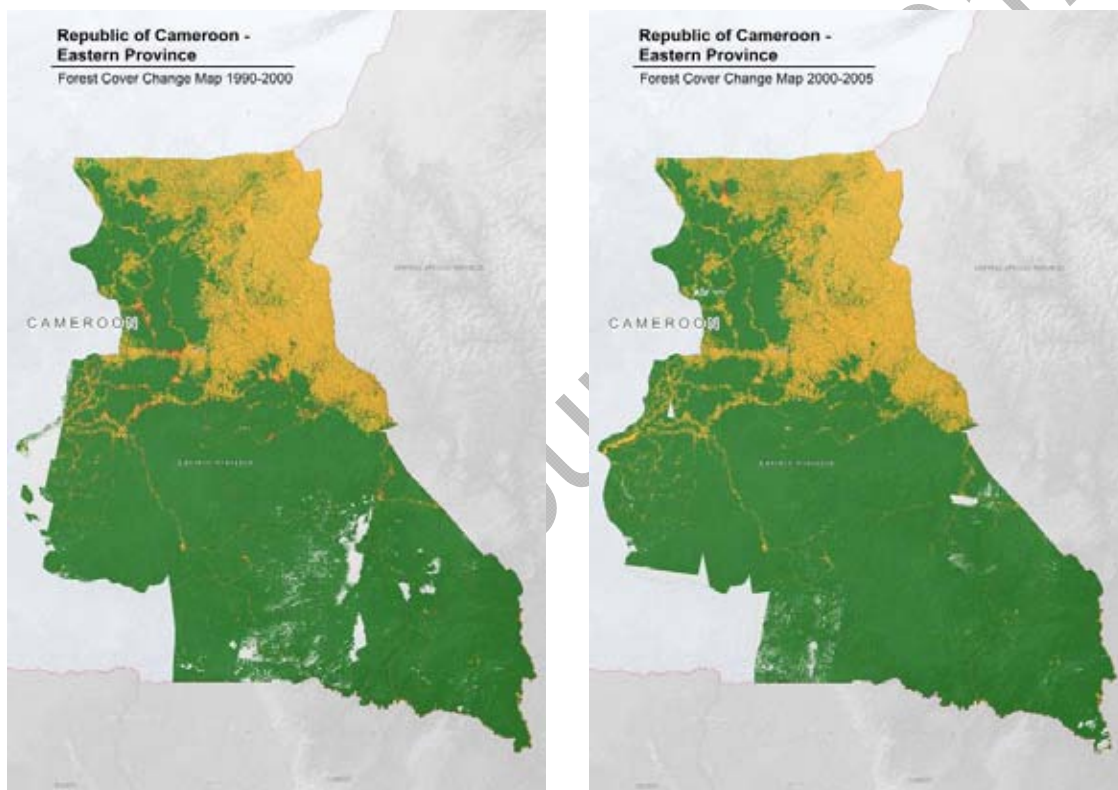


Figure 6: Forest cover change (in red) in the East region of Cameroun for 1990-2000 and 2000-2005

The overall interpretable area for the East region in the period 1990-2000 was 108,854 Km² approximately 96.37% of the total surface area of the East region. The gross deforestation rate for the 10 year period was 0.69% leading to an annual gross deforestation of 0.069% annually. There was a significant regrowth during this period estimated at 0.17%. Based on the regrowth, the net deforestation rate was 0.52% (that 0.05% annually). For the period 2000-2005 the total interpretable area was 110 780.81

km², approximately 98% of the total surface area of the East region. The gross deforestation rate for the 5 year period was 0.06%. The rate of regrowth is approximately the rate of deforestation (0.08%).

The Emission Factor (EF) assessment focused on one of the main agents of forest degradation in Cameroon, which is planned selective logging. Two field inventories assessed biomass and carbon impacts due to selective logging in a FSC certified forest concession as well as in a non-certified concession. The sampling design was based on the installment of carbon impact zone (CIZ) plot in the logging gaps and an additional plot in a distance of 50 m from the CIZ plot to measure the intact carbon stocks. The results of the inventory indicated an average above ground biomass of 326 tons per hectare. The comparison of the Carbon Impact Zones with the measurements in the intact plots indicated that the logging damage per m³ extracted timber is 1.99 t of carbon in the uncertified concession and 1.34 t of carbon in the certified concession. The results demonstrated that improved forest management and logging practices can lead to a substantial reduction of emissions. This study also illustrated that it is possible to track degradation signals due to selective logging using remote sensing imagery; important to note is the need to have a high frequency of satellite data for degradation assessment.

Republic of the Congo

The European Space Agency (ESA) has supported from 2010 to 2014 a REDD related forest monitoring project which focuses on the application of EO for Activity data Assessment in the Republic of the Congo (RoC). The Project is implemented by GAF AG in cooperation with the Ministry of Sustainable Development, Forest Economy and Environment. The collaborating Partners are MesaConsult, Joanneum Research, TUEV Sued and Geospatial Technical Group SARL - GTG Cameroon.

The methodological approach is based on a wall-to-wall mapping of forest area and forest area change for the years 1990-2000-2010. Different satellite sensors such as Landsat-4, -5, -7, Aster, DMC, RapidEye and SPOT were used to overcome the problem of heavy cloud cover in some parts of the country. The changed areas are classified into the IPCC compliant land cover classes; i.e agriculture land, grassland,

settlement, wetland and other land. Preliminary results for example for results of forest cover change in Northern Congo (Likouala and Sangha Provinces) indicate gross deforestation rates of approximately 0.33% within the period between 1990-2000 whereas and 0.26% between 2000-2010 (Table 3).

*Table 3. Summary of results for Deforestation Assessments
between 1990 and 2010 for Northern Congo*

Summary Changes				
	1990 to 2000		2000 to 2010	
	Area in km ²	Area in %	Area in km ²	Area in %
Gross Deforestation	417.81	0.33	319.84	0.26
Gross Increase in Forest Area	166.70	0.13	279.46	0.23
Net Deforestation	251.11	0.20	40.38	0.03
Annual Net Deforestation Rate		0.02		0.003

2.3 Central African Republic baseline maps for REDD

(H. Poilvé, G. Jaffrain, C. Lardeux et al.)

Le projet OSFT (Observation Spatiale des Forêts Tropicales), financé par l'AFD (Agence Française de Développement) vise à : (i) donner aux utilisateurs REDD libre accès aux images des satellites SPOT disponibles sur le Bassin du Congo (images d'archive et acquisitions récentes) ; (ii) participer à l'établissement des scénarios de référence REDD en produisant les cartographies forestières sur certaines zones. La production des cartographies est réalisée par Astrium-GEO (Spot Image), et tous les produits sont contrôlés et validés par une équipe conjointe IGN FI (IGN France International) – ONFI (ONF International).

La méthodologie de production utilise une approche innovante de traitement des images satellites qui utilise les caractéristiques physiques du couvert arboré, telles que densité, rugosité et humidité («traitement biophysique» : approche basée sur des modèles de réflectance du couvert couplé avec un modèle de transmission atmosphérique). Elle permet de générer ici deux types de produits de référence pour la REDD : (1) Une analyse historique de la déforestation sur 20 ans et (2) une cartographie détaillée

additionnelle sur 2010. L'analyse historique de la déforestation sur 20 ans est une combinaison de classification binaire forêt/non-forêt aux trois dates pivots 1990, 2000 et 2010, ainsi que les cartes de changement associées. Les cartes sont générées à partir d'une combinaison d'images satellites Landsat (pour les dates plus anciennes) et SPOT, à 20m de résolution spatiale. Pour le pivot le plus récent (2010) une cartographie détaillée additionnelle est réalisée suivant les recommandations du GIEC, montrant les surfaces de forêts mais aussi les savanes, savanes boisées, zones humides, terres cultivées, et zones d'habitat. Cette carte est générée à partir d'une mosaïque d'images SPOT 5, à 10 m de résolution spatiale. Ces cartographies REDD sont en cours de production sur toute la moitié sud de la RCA (290 000 km²) : zones de forêt tropicale humide au sud, et zones de formations végétales arborées plus claires en remontant vers le nord. Cette production est divisée en 12 lots d'environ 20 à 30 000 km².

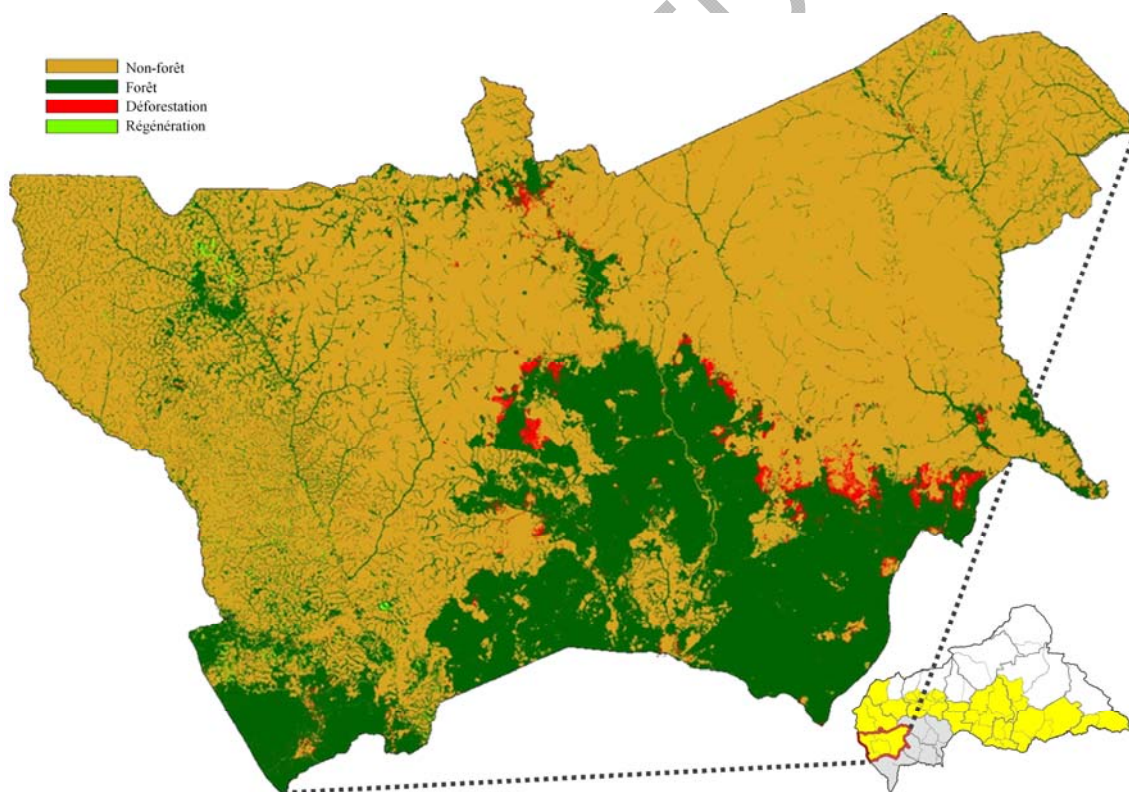


Figure 7: évolution du couvert forestier entre 2000 et 2010, sur le lot 1 (préfecture de Mambéré-Kadéï). La déforestation est représentée en rouge et la régénération forestière en vert clair.

Un protocole rigoureux de contrôle qualité a été défini afin de répondre aux exigences de performances requises par les normes internationales VCS (Verified Carbon

Standard). Les contrôles sont réalisés par une équipe indépendante de l'équipe de production, en 2 étapes successives. Premièrement, une étape de vérification selon un échantillonnage statistique, qui a notamment permis de détecter des erreurs systématiques sur les premiers lots et d'affiner ainsi les règles de classification. Deuxièmement, une phase de validation utilisant un échantillonnage stratifié (on s'assure d'avoir un nombre significatif de points dans chaque classe), vise à quantifier les qualités et les défauts de la classification, sous la forme d'une matrice de confusion.

Le protocole de validation a été conçu par un groupe d'experts pluridisciplinaire (ONFI, IGN FI) avec l'aide d'un spécialiste de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) afin d'obtenir des résultats statistiquement significatifs. Le protocole ainsi défini implique le contrôle d'un nombre de points nettement plus important que celui indiqué dans les documents de validation REDD.

Les résultats statistiques sur les premiers lots produits sont présentés dans le tableau 4. Ce sont les performances réalisées par la classification forêt/non-forêt et par les cartes de changement des forêts sur un ensemble de 500 points de contrôle utilisés pour chacune des 3 dates pivots (précision producteur de la classification).

Tableau 4 : Résultats de validation de l'analyse historique (1990-2000-2010) sur les premiers lots produits (165 000 km²)

Lot			1	2	4	5	6	9	10
<i>préfecture</i>			<i>Mambere-Kadei</i>	<i>Nana-Mambere</i>	<i>Ouham</i>	<i>Kemo-Gribingui</i>	<i>Ouaka (Sud)</i>	<i>Basse Kotto</i>	<i>Mbomou (Ouest)</i>
Cartographie Forêt			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1990	Forêt	<i>Exigence de la norme : >90%</i>	100.0	96.8	95.9	100.0	91.4	98.2	99.4
	Non Forêt		99.2	99.4	99.6	99.6	99.2	99.5	100.0
2000	Forêt		99.6	94.4	94.3	98.8	92.0	98.2	99.4
	Non Forêt		99.0	99.2	100.0	99.9	98.9	99.6	100.0
2010	Forêt		99.6	97.5	98.2	98.7	91.3	93.3	99.3
	Non Forêt		100.0	99.0	100.0	100.0	99.7	99.6	100.0
Carte de changement									
1990 - 2000	Déforestation	<i>Exigence de la norme : >80%</i>	83.7	95.7	97.9	100.0	94.7	92.0	98.6
	Stable		99.6	99.9	99.7	99.8	99.8	99.9	100.0
2000	Déforestation		100.0	100.0	90.6	100.0	88.5	95.6	100.0

- 2010	Stable		99.1	99.3	100.0	99.9	99.4	99.9	100.0
--------	--------	--	------	------	-------	------	------	------	-------

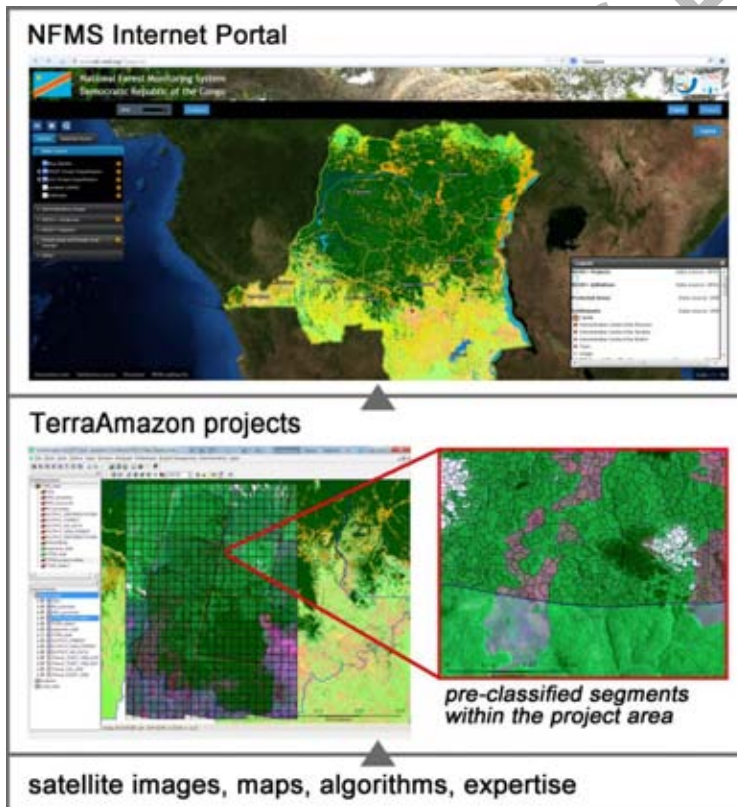
La production de 290 000 km² sur la Centrafrique sera terminée au deuxième trimestre 2013. Les produits cartographiques sont livrés aussi bien aux formats raster que vecteur, et accompagnés des informations relatives aux phases de vérification et de validation.

Box 2.4 Monitoring deforestation in the DRC – the TerraCongo project

(Przemek Zelazowski et al.)

The *TerraCongo* project, initiated in 2011, stems from a collaboration between the Brazilian Space Agency INPE and FUNCATE (a foundation dealing with the technical development of methods and tools for the Amazon forest monitoring), FAO of the UN, and a number of countries participating in the UN-REDD programme (www.un-redd.org), notably DRC, Paraguay and Papua New Guinea. The collaboration aims to

build capacity in tropical forest Monitoring and Measurement, Reporting and Verification (M and MRV) based on (mostly) freely available technology and data. Other goals include reinforcement of technical and professional capacities of national experts during the implementation phase, as well as inclusion of existing national data and methods. FAO’s role is that of a catalyst of South-South



transfer of know-how and capacity building (notably, linked to the Brazilian *TerraAmazon* software) and of a promoter and generator of freely available and open tools.

DRC's *TerraCongo* is the first country implementation of the initiative. In the first phase, it focuses on (i) forest area monitoring, and (ii) data dissemination through Internet, which together form the DRC's official National Forest Monitoring System (NFMS). Currently the project encompasses the Kasai-Occidental province, which has *circa* 96 000 km² of forest, and was chosen as it received the highest feasibility rank in an assessment that considered several criteria (area, deforestation rates, REDD+ activity, cloudiness, data availability, topography, forest plots, and forest types). This initial phase will be followed by successive inclusion of all DRC's provinces, each in a separate database.

Measurement of the forest area is primarily based on freely available Landsat satellites data, free and open tools for satellite image processing (e.g. http://km.fao.org/OFwiki/index.php/Open_Foris_Geospatial_Toolkit), and free-of-charge *TerraAmazon* software (www.terraamazon.org) that facilitates multi-user edition of land cover maps. All satellite imagery used in the project is corrected and segmented. Other data processing is specific to one of the two main stages: (i) delineation of forest area for the year of reference and (ii) change detection. Data pre-processing for the 1st stage makes use of the officially-adopted forest map "Monitoring the forests of Central Africa using remotely sensed data sets" (*FACET* in French; see www.osfac.net), which provides training for image segment classification. Based on comparisons with high-resolution imagery, accuracy of the resulting initial forest map is preliminarily estimated to be 85 % (based on hi-res imagery in Google Earth, and not accounting for time differences). Data pre-processing for the 2nd stage involves automatic detection of change between imagery from different dates.

In both data processing phases, a group of 5 national experts from DIAF (Department of Forest Inventory and Management), who received training in Brazil, Italy, and DRC, post-process and validate geo-information derived through automated data processing, ensuring that forest areas conform to the official country definition of forest, submitted to the UNFCCC secretariat. This is done using purpose-build workspace in the *TerraAmazon* software, with two separate projects (implemented in the same database),

one for forest mask finalization, and one for periodic assessment of forest area change, which together cover the whole data production cycle. Recent efforts focus also on gathering high-resolution imagery to aid Landsat data interpretation and project validation, and on the implementation of all data pre- and post-processing in open and free software.

Results from the above-described work are published through the official NFMS web-portal of DRC (www.rdc-snsf.org, also based on open source technologies), which was officially launched in December 2011 (COP), and is available to import, process, and disseminate any data related to forest Monitoring and MRV.

Box 2.5 Amélioration de la cartographie des types de forêts à partir de MODIS

(V. Gond et al.)

En général, les forêts tropicales humides d’Afrique Centrale sont regroupées dans une grande couche verte ne distinguant pas les variations des types de forêts. D’un autre côté, les études locales montrent au contraire une grande diversité des types forestiers. Dans le cadre du projet CoForChange (www.coforchange.eu), en utilisant l’information de la dynamique temporelle des mesures satellites, nous avons produit une carte des types forestiers dans le couloir de la Sangha (latitude 0° - 5° Nord et longitude 13° - 19° Est) a été réalisée à partir de 10 ans d’archive de données du satellite MODIS (synthèse d’indice de végétation EVI sur 16 jours à 500 m de résolution entre 2000 et 2009). Les données météorologiques de moyenne mensuelle à 1km de résolution (<http://earlywarning.usgs.gov/fews/africa/index.php>) ont été nécessaires pour analyser la dynamique spatiale des pluies. Les 37.898 placettes d’inventaires provenant des concessions forestières ont été utilisées pour la validation de la carte. Enfin, la carte de végétation du Cameroun de Letouzey (1985) a été utilisée pour la validation des classes forestières.

La figure 7 présente un extrait de la carte réalisée. Dans la légende, la couleur est attribuée à la combinaison des hauteurs de précipitations mensuelles (barres), la courbe annuelle de l’activité photosynthétique de la classe (trait plein) et la courbe annuelle de l’activité photosynthétique de l’ensemble de la zone d’étude. Au nord les couleurs marrons et jaune soulignent la transition entre les savanes et la lisière forestière. Les dégradés de vert marquent les différents types de forêts tropicales humides repérés par

l'analyse des données satellites (plus la teinte est foncé plus le peuplement est constitué d'arbres sempervirents ; et donc plus la teinte est claire plus le peuplement est abrite des arbres semi-caducifoliés). On note aussi en rose les zones agro-forestières autour des voies de communication et des principales agglomérations. Enfin, les savanes incluses dans le secteur de Nola sont clairement identifiées par rapport aux savanes du nord, grâce à leur cycle végétatif différent. En effet la distinction des types de couvert est réalisée par les variations temporelles au cours de l'année de l'activité photosynthétique.

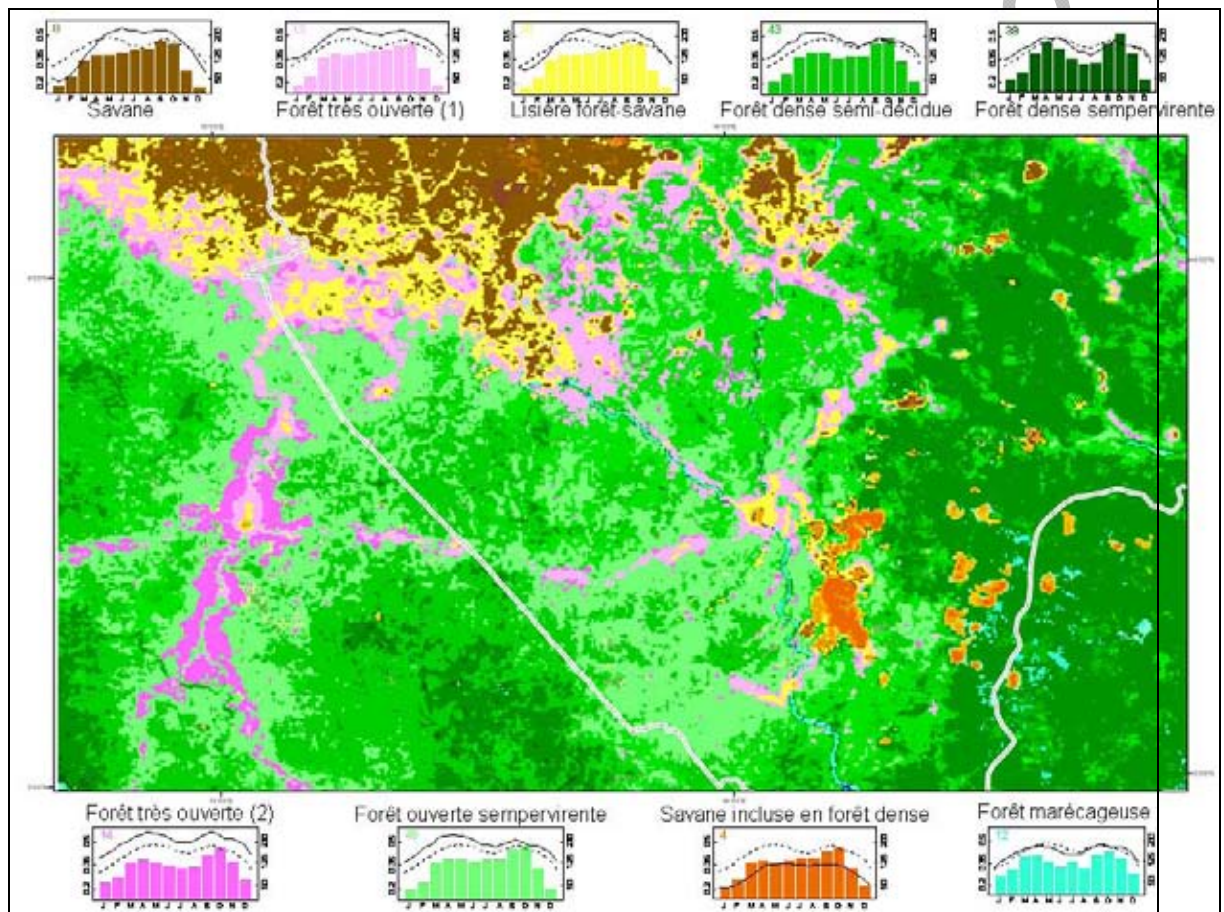


Figure 7 : extrait de la carte de l'intervalle de la Sangha présentant la lisière nord du massif forestier de Yokadouma (Cameroun) à l'ouest, à Nola à l'est (République Centrafricaine) jusqu'aux grés de Carnot à la frontière de la République du Congo.

3. Etudes et cartographies des changements forestiers dans le cadre du REDD-MRV

3.1 Détection des routes d'exploitation

(V. Gond et al.)

L'exploitation des ressources forestières entraîne invariablement la création de piste d'accès et d'exportation des produits (les grumes). Les pistes se structurent dans l'espace forestier en réseau avec des routes principales très utilisées, des routes secondaires qui mènent aux parcelles et enfin des routes tertiaires (ou de débussage) qui donnent accès à chaque arbre exploité.

Dans le cadre de la REDD+, un outil de localisation spatio-temporelle de l'ouverture de la canopée par les activités humaines est nécessaire. Malgré des efforts répétés pour mettre au point un système opérationnel, la communauté forestière manque encore cruellement d'information sur la capacité des écosystèmes forestiers à se régénérer après exploitation. Le projet de cette étude était de mettre au point un prototype capable de traiter l'ensemble de l'archive des données Landsat (30 m) sur le bassin du Congo afin d'estimer annuellement la dégradation forestière à l'échelle d'une maille de 500 m (afin d'être compatible avec les données du capteur MODIS).

La zone du projet CoForChange (<http://www.coforchange.eu/>) couvre le sud-est Camerounais, le sud de la République Centrafricaine et le nord de la République du Congo. Les forêts tropicales y sont semi-décidues. La densité de population y est faible. La majorité de l'exploitation forestière est gérée par des compagnies privées.

Nous avons utilisé des données Landsat à 30 de résolution obtenues gratuitement sur le site du gouvernement américain (<http://glovis.usgs.gov/>) qui permet un accès à l'archive depuis 1984. Les canaux Vert (V), Rouge (R), Proche Infrarouge (PIR) et Moyen Infrarouge (MIR) ont été utilisées. Le prototype a été élaboré à partir de la boîte à outil développée par le CNES (<http://wiki.orfeo-toolbox.org/>). Les prétraitements ordinaires ont été développés comme la calibration radiométrique afin de standardiser les valeurs de chaque image à traiter. Des indices sont alors calculés afin d'estimer l'activité

photosynthétique de la surface comme le NDVI ($NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$) et le rapport vert-rouge ($VR = \frac{V - R}{V + R}$). Ces indices permettent d'augmenter le contraste entre les surfaces forestières et les pistes (associées à des sols nus) grâce à l'application d'un filtre spatial (Gond *et al.*, 2004). Les valeurs de seuils appliquées pour identifier les pixels de sols nus ont alors été ajustées (Bourbier *et al.*, 2013). Une synthèse annuelle a été alors calculée pour chaque zone couverte par Landsat. Sur des cellules de 500m de côté un pourcentage de pixel de sol nu a été calculé afin d'estimer la dégradation annuelle. Cette synthèse permet de comparer l'évolution du réseau de pistes. Ces valeurs sont considérées comme des Indicateurs d'Ouverture de Canopée (IOC ; Figure 8).

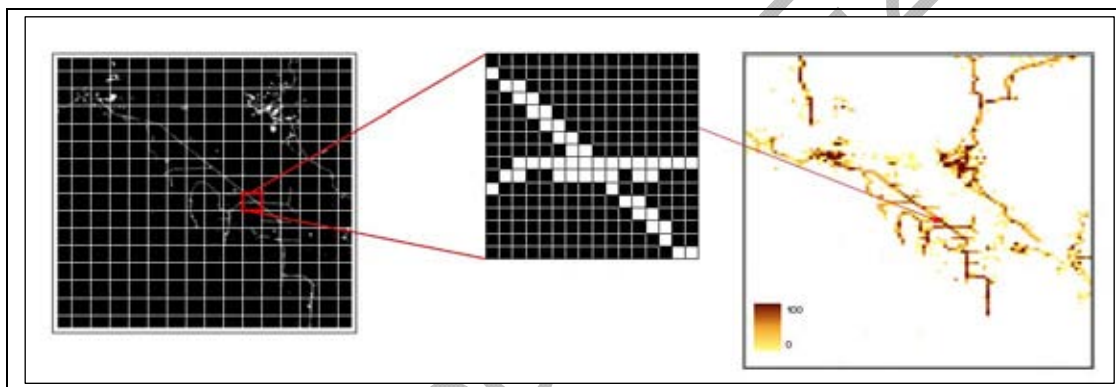


Figure 8: L'indicateur d'ouverture de canopée (IOC) est construit à partir de l'identification des sols nus sur les images Landsat (à gauche). L'agrégation spatiale à l'échelle de cellule MODIS de 500m de côté (au centre) est utilisée pour estimer le ratio de surface en sol nu (à droite).

L'indicateur d'ouverture de canopée peut alors être analysé pour des périodes de temps dépendantes de l'archive Landsat (Figure 9). Cette figure se décompose en trois niveaux, avec des extraits des images Landsat (en haut), l'IOC de chaque année (au milieu) et les courbes d'évolution de l'IOC dans le temps.

L'IOC renseigne sur l'évolution temporelle de l'impact puis de la revégétalisation de chaque pixel durant la période d'observation. L'intérêt de travailler à cette échelle d'une cellule de 500m de côté permet d'obtenir une valeur numérique qui peut être comparé dans le temps et l'espace. En effet, chaque cellule peut être suivie dans son évolution

mais elle peut être aussi comparée avec n'importe quelle autre cellule. Ceci est à mettre en perspective dans le cadre de l'évaluation des impacts liés à l'exploitation forestière. Une évaluation peut ainsi être mise en place afin de gérer les réseaux de piste forestière en Afrique centrale. Combinée avec des travaux ayant pour objectifs de déterminer les dégâts d'abattage (Guitet et al. 2012) ces outils pourraient être des moyens de surveiller l'activité et donc aider à la gestion forestière.

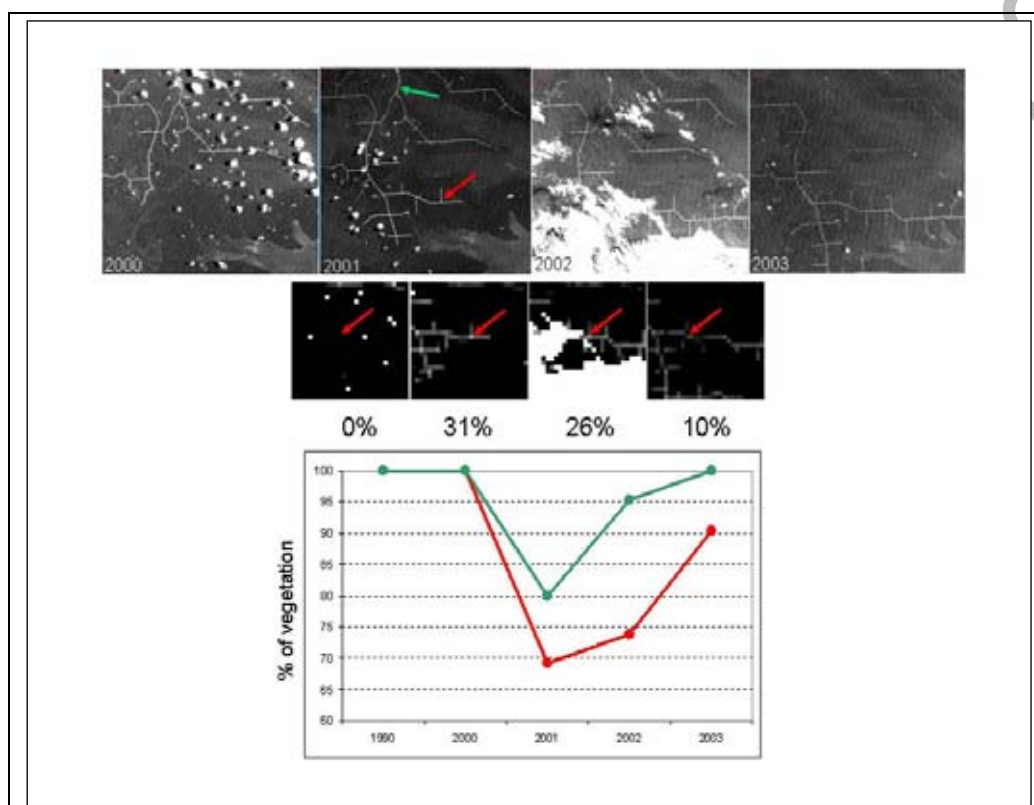


Figure 9: Analyse temporelle de l'évolution de l'IOC. Les extraits des images Landsat montrent l'évolution du réseau de route entre 2000 et 2003 (en haut). Par exemple ici 26% de la cellule MODIS de 500m (soit 25ha) équivaut à 6,5ha d'ouverture de canopée en 2002.

3.3 Détection des trouées

(B. Desclée et P. Mayaux)

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 n'est pas

seulement sur les processus de déforestation (conversion de forêts en d'autres occupations du sol) mais aussi la dégradation forestière, c'est-à-dire une réduction des stocks de carbone au sein des zones dégradées en forêt. En utilisant la télédétection, plusieurs activités provoquant des réductions des stocks de carbone peuvent être surveillées, 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 et exige des techniques plus avancées pour analyser les images satellites.

Sur base d'une série temporelle d'images satellites SPOT, cette étude a évalué les changements de couvert forestier sur une concession forestière certifiée en République du Congo. Différentes perturbations forestières ont été identifiées par détection de changement sur des images satellites de différentes périodes. Sur une superficie totale de 20.000 ha correspondant à une assiette de coupe, la perte de couvert forestier, identifiée par image satellite, correspondait à seulement 7% de la superficie exploitée entre janvier et mars 2005. Cette ouverture de la canopée correspond à 60% pour les trouées d'abattage et le 40% restant pour les routes d'exploitations. La même analyse sur l'image acquise en 2007 permet de montrer que les trouées se sont refermées, seules les pistes principales subsistent. L'information fournie par la concession forestière peut ainsi être liée à cette carte de perte de couvert forestier.

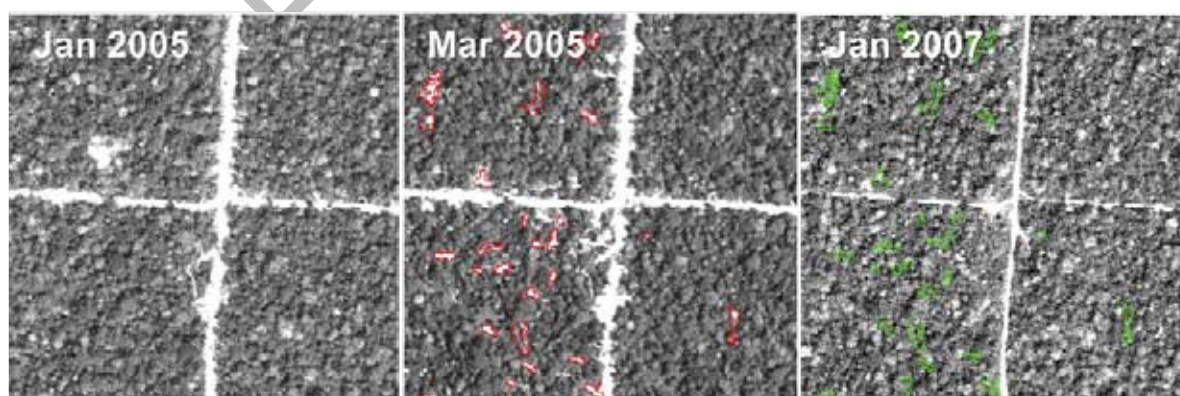


Figure 10 : Illustration du résultat de l'analyse de détection des trouées d'exploitation sélective sur base d'une série temporelle d'images satellites SPOT entre 2005 et 2007

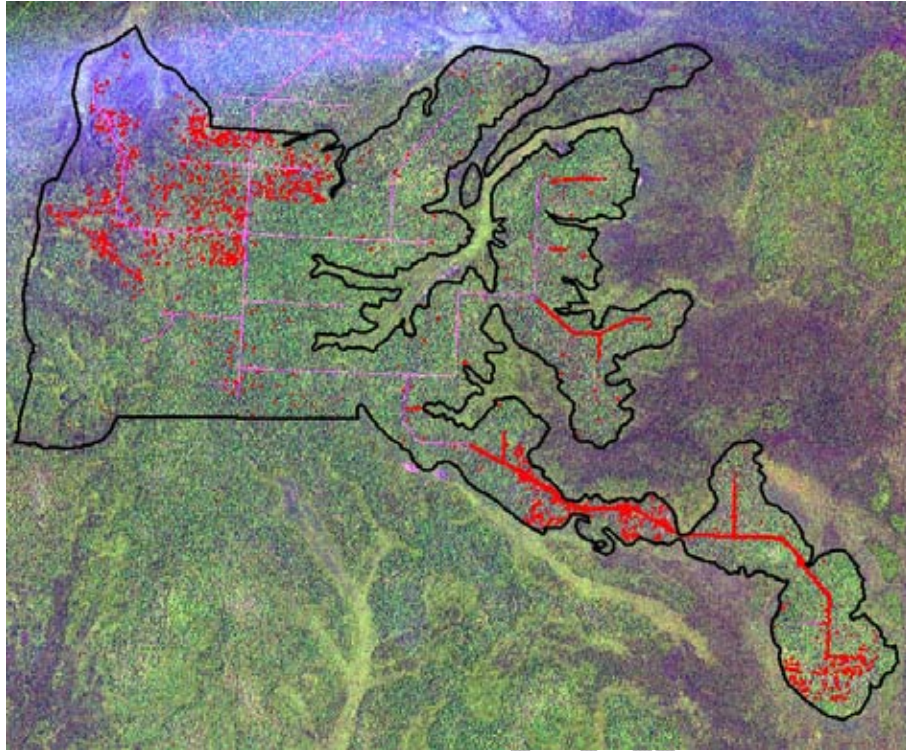


Figure 11 : Carte des zones affectées par une ouverture de la canopées et détectés sur base d'une série temporelle d'images satellites SPOT entre 2005 et 2007

3.4 ReCover Initiative

(J. Haarpaintner et al.)

The project ReCover is providing a pilot service of remote sensing forest product to OSFAC (Haarpaintner et al., 2012) for a test region in western DRC aiming to support REDD activities and contribute to a National Forest Monitoring System. As tropical regions have persistent cloud cover, satellite-based monitoring with cloud-penetrating synthetic aperture radar will play a crucial role in future MRV systems. In 2012, the project provided both, optical (Pedrazzani et al., 2012) and cloud-penetrating synthetic aperture radar (SAR) (Einzmann et al., 2012) satellite sensor based products, i.e. image mosaics and forest/non-forest maps for the years 1990, 2000, 2005 and 2010 (Figure 13), all in 30m resolution. A biomass map based on space-borne LiDAR data from IceSAT/GLAS with data of the period 2003-2009 was also produced. At this stage, these products represent an additional analysis for evaluating nation-wide products like the FACET atlas (OSFAC, 2010) and an additional data source for a National Forest

Monitoring System. These preliminary results will be improved in a second iteration in summer 2013 after the collection of ground reference data and validated with Kompsat-2 VHR data. Decadal (1990-2000-2010) forest change and forest degradation maps will also be computed during the second service iteration. A future operationalization of this service could be integrated in the National Forest Monitoring System of DRC, as well as be adapted to other countries of the Congo Basin or the tropics in general.

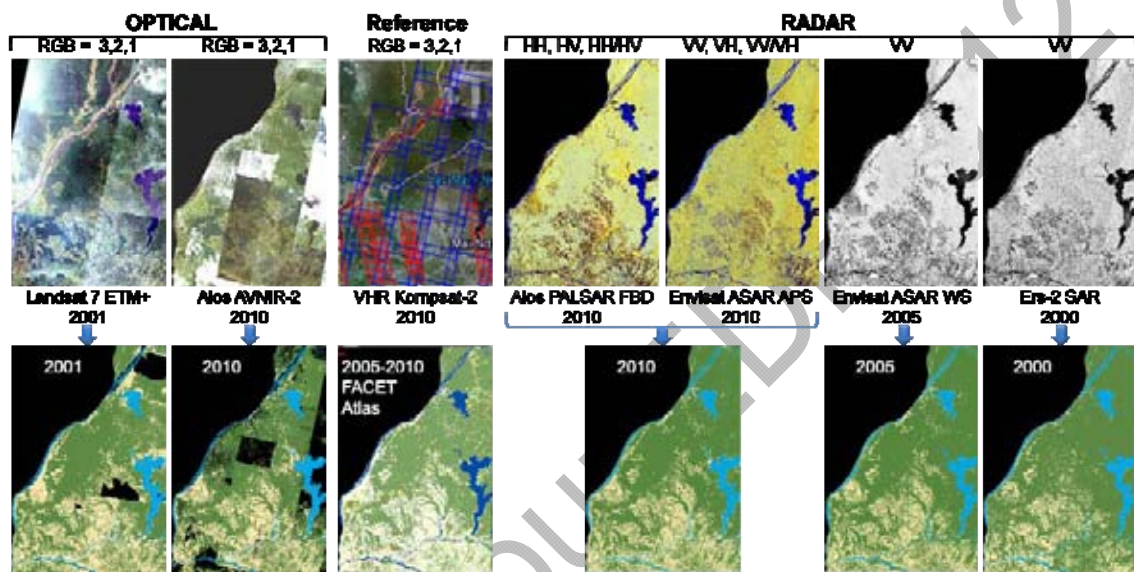


Figure 12. Optical and SAR image mosaics (upper images) and their derived forest (green) / non-forest (beige) maps (lower images) for indicated years with water in blue. The reference image mosaic is from Google Earth and indicates the Kompsat-2 VHR scenes (red) and Alos AVNIR-2 (blue). The reference forest map is the 2005-2010 forest change map from the FACET Atlas (OSFAC, 2010).

3.5 REDDiness Initiative

(A. Vrieling and M. Rahm)

The REDDiness project (2011-2013) supported Gabon and the Republic of Congo in defining options for setting up a forest monitoring system in the framework of REDD+. Following an extensive user requirements survey, REDDiness concentrated on research and capacity building activities. REDDiness' research component consisted of an evaluation of the potential of optical and radar satellite imagery to detect and monitor forest degradation. Such an evaluation is urgently needed given (1) the importance of forest degradation in REDD+ and for Central Africa, (2) the difficulty to assess forest

degradation because it is often characterized by small scale changes in forest cover (3) the limited time frame to detect degradation given the quick regeneration of vegetation, and (4) the persistent cloud cover in the region which limits optical image acquisition. For two study sites of 20x10 km (one in each country), we observed changes in forest cover, i.e. small forest gaps and narrow unpaved logging roads. Archive and new acquisitions of optical and radar data at different resolutions (0.5-30m) were obtained.

Visual comparison of mono- and multi-temporal images from a wide range of satellite sensors provided valuable insight into their potential for detection of small-scale forest degradation signs. For optical data, we also tested more advanced processing techniques such as spectral unmixing, and semi-automated object-based segmentation and classification. Field missions at each site were carried out to obtain ground-evidence of forest degradation. As an example, Figure 14 shows a large area of secondary forest in the southern Congo study site. The optical image of August 2011 (a) shows a rectangular pattern of approximately 10m wide logging roads that are related to mineral prospecting activities in the area. The image of July 2012 (d) shows that within a year much regeneration of the green vegetation cover (red colour in the image) took place. Fast regeneration of green vegetation calls for imagery at high frequency, at least once per year, for effective detection of degradation features. Change detection is cumbersome in most areas of this subset due to cloud cover in both images.

Radar is not sensitive to cloud cover. From the 3m resolution TerraSAR StripMap image of May 2012 (c) the rectangular pattern of logging roads is very clear, but absent from the June 2010 image (b). This means that the logging roads were created between June 2010 and August 2011. The 8m resolution RADARSAT imagery of March 2012 (f) does not show the appearance of these logging roads, which suggests that this resolution is not sufficient for their detection. Both TerraSAR and RADARSAT show an expansion of cassava fields between 2010 and 2012 (for example blue arrows), although the interpretation of these radar images for small-scale features is more complex than for optical data.

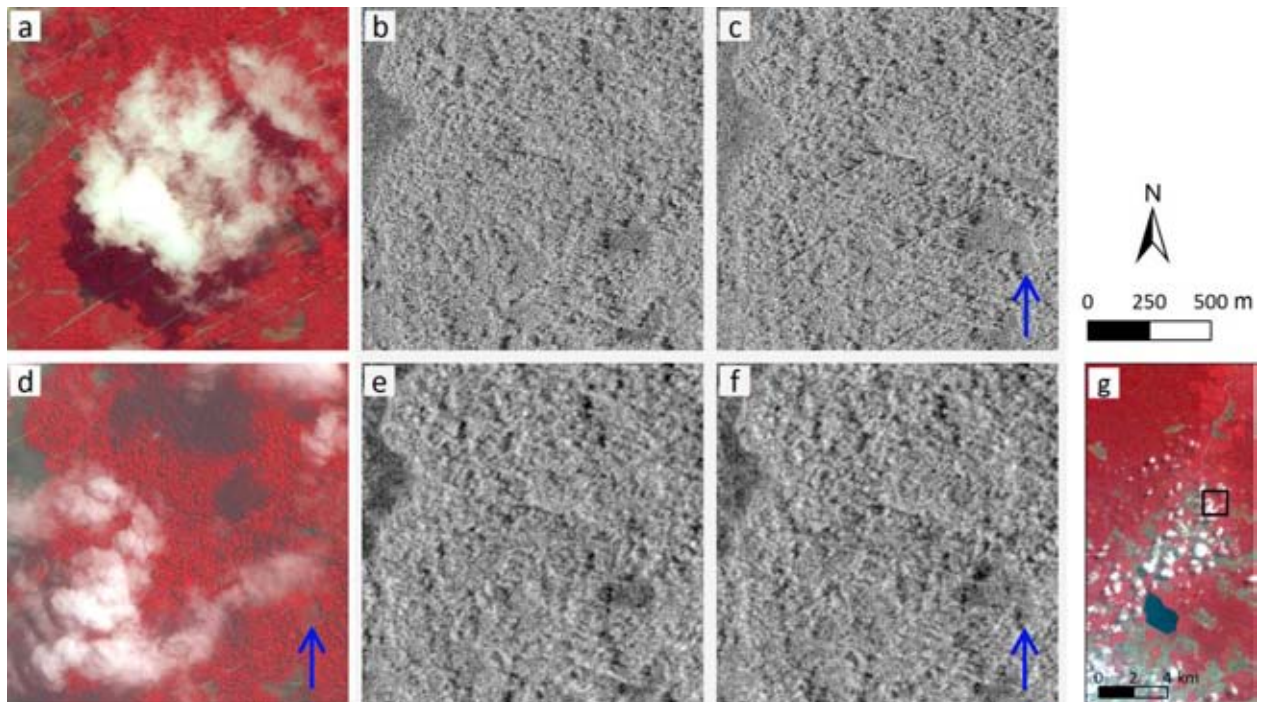


Figure 14: Appearance of logging roads and clear-cuts in a secondary forest of the Congo study site (in Kayes-Madingo district): a) WorldView, 0.5m – August 2011, b) TerraSAR StripMap, 3m - June 2010, c) TerraSAR StripMap - May 2012, d) QuickBird, 0.6m - July 2012, e) RADARSAT-2, 8m - March 2010, f) RADARSAT-2 - March 2012, g) 20x10km study site with black box indicating location of subsets. The blue arrows indicate an example of a new clear-cut in 2012.

REDDiness concluded that satellite imagery has potential to detect forest degradation, but requires good-quality cloud-free remote sensing imagery at frequent intervals (at least once per year), and at high spatial resolutions (<10m). This has implications on the costs of a national monitoring system, which may need to implement a sampling approach. Persistent cloud cover is the main problem for optical image acquisition in the Congo Basin, but radar has its own intrinsic difficulties. The limited availability of optical and radar archive imagery makes it currently difficult to set proper baselines for forest degradation. This calls for systematic observation strategies where a satellite sensor frequently covers the territory using the same observation characteristics.

3.6 REDDAF Initiative

(R. Siwe, T. Haeusler, S. Gomez et al.)

The REDDAF project is supporting the MRV developments in Cameroon and Central African Republic by developing, testing and providing improved methodologies using a combination of optical and RADAR satellite data as well as in-situ information to assess deforestation/degradation and estimate biomass for operational monitoring of forest cover and biomass changes. Three critical issues are addressed in the REDDAF project: (1) Methods Development to offer cost-effective methods for assessing activity data and emission factors; (2) Service Development and Integration to develop customized products and services; and lastly (3) Capacity building to ensure that the methods and techniques developed are transferred to the Users.

The methods development focuses on the improvement of the production processes using satellite data for the development of forest cover and forest cover change maps; forest degradation maps and biomass maps. Three pre-processing methods have been developed: (1) a cloud shadow algorithm to radiometrically adjust cloud shadow areas and increase the amount of interpretable pixels which otherwise will be discarded; (2) a block-based radiometric adjustment tool, which improves the similarity between neighbouring images since multi-sensor, multi-temporal images are required for production; and (3) a robust and fully automatic matching procedure to ensure geometrical congruence between optical and SAR data sets. Furthermore, two methods have been tested for the direct assessment of forest degradation: a NDVI based approach based on the comparison of NDVI values derived from RapidEye satellite data from 2009 to 2011 and the application of Cosmo-SkyMed stereo satellite data to compute 3D models illustrating logging gaps and logging roads. Finally, a transferable model to estimate above ground biomass of low carbon forest using SAR data has been developed. Extensive biomass field measurements were carried out and used for the calibration and validation of the model. The model offers a cost-effective approach for estimating above-ground biomass in low-carbon forest.

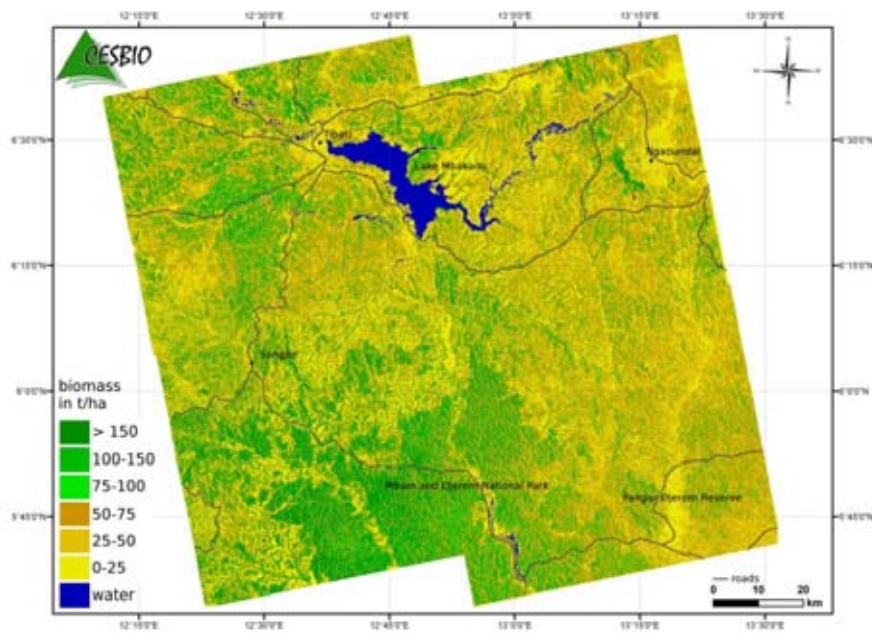


Figure 15: Biomass mapping results for the Adamawa region, Cameroon.

The service development integrates the research findings in the development of products and services on an operational scale. Forest cover and forest cover change maps were produced for test areas in Cameroon (Centre region) and Central African Republic – CAR - (Ombella Mpoko, Lobaye, and Sangha Mbaéré) for the periods 1990, 2000 and 2010. Optical datasets (Landsat TM, ETM, RapidEye) constituted the basis of the analyses. RADAR images are then used to complement any residual cloud gaps. A multi-temporal composite approach based on segments is used to interpret the images and create the forest cover and forest cover change maps for the corresponding periods. The mapping was done at a 1 hectare MMU using the 10% threshold for minimum crown cover. The accuracy assessment is based on an area frame sampling with the overall accuracies of the forest maps generally above 85%. Preliminary results show the rate of forest change in the centre region of Cameroon from 1990-2000 and 2000-2010 to be 1% and 0.47% respectively. For the demonstration sites in CAR, the rate of forest cover change was 1.4% and 0.82% for the 1990-2000 and 2000-2010 periods respectively. A significant amount of the changes are due to the establishment of cropland mostly along roads. Capacity Building ensures that the methods/techniques developed are transferred to the counterparts in Cameroon and CAR.

4. Perspectives de suivi des forêts tropicales

- Nombreuses réalisations, différents produits mais encore peu de validation et d'harmonisation.
- Perspectives en imagerie satellite (Landsat-8, Sentinel-2, SPOT...) et Station de réception de Libreville
- Nouvelles techniques d'analyse d'images (image composites, ...)
- Besoin d'intégration de données de terrain pour la biomasse (développement d'un réseau de collecte et archivage de données de terrain)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Desclée B, Simonetti D, Mayaux P, Achard F. *Multi-Sensor Monitoring System for Forest Cover Change Assessment in Central Africa*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013; In press.

Raši R, Beuchle R, Bodart C, Vollmar M, Seliger R, Achard F. Automatic updating of an object-based tropical forest cover classification and change assessment. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013; In press.

Mayaux P., Pekel J.-F., Desclée B., Donnay F., Lupi A., Achard F., Clerici M., Bodart C., Nasi R. and Belward A., *State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010*, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2013; Accepted.

FAO. *FAO Forest Resources Assessment 2010*. FAO Forestry Paper. Rome: FAO; 2012. Report No.: 163.

Fichet, L. V., Sannier, C., Massard Makaga, E., Mertens, B. (2012). Monitoring forest cover change at national level in Gabon for 1990, 2000 and 2010 with optical imagery. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 2012, Munich.

Sannier, C.A.D., McRoberts, R. E., Fichet, L.V., Massard K. Makaga, E. (2013). Application of the regression estimator to estimate Gabon forest cover area and net deforestation at national level. Submitted to the ForestSat 2012 *Remote Sensing of Environment* special issue.

Einzmann, Kathrin, Jörg Haarpaintner, and Yngvar. Larsen. 2012. Forest Monitoring in Congo basin with combined use of SAR C- & L-band. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2012, July 22-27, Munich, Germany*, IEEE Catalog Number CFP12IGA-USB, 6573-6576.

Haarpaintner, Jörg, Kathrin Einzmann, Donata Pedrazzani, María Teresa Mateos San Juan, Marta Gómez Giménez, Johannes Heinzl, Fabian Enßle, and Landing Mane. 2012. Tropical Forest Remote Sensing Services for the Democratic Republic of Congo case inside the EU FP7 'ReCover' project (1st iteration). *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2012, July 22-27, Munich, Germany*, IEEE Catalog Number CFP12IGA-USB, 6392-6395.

Pedrazzani, D., M.T. Mateos San Juan, M. Gómez Giménez, J. Haarpaintner, K. Einzmann, and L. Mane, "Potential applications of Sentinel-2 data to forest monitoring services in support to REDD activities: The Democratic republic of Congo case within ReCover Project". *Proceedings of the Sentinel-2 Preparatory Symposium 23-27 April 2012*, ESA-ESRIN, Frascati, Italy, ESA Communication SP-707, 2012.

OSFAC, "Monitoring the forests of Central Africa using remotely sensed data sets (FACET), 2010. Forest cover and forest cover loss in the Democratic Republic of Congo from 2000 to 2010". *South Dakota State University, Brookings, South Dakota, USA*. ISBN: 978-0-9797182-5-0, 2010.

Potapov, P.V., Turubanova, S.A., Hansen, M.C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L., and Justice, C.O., Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data, *Remote Sensing Environment*, 2012, 122, 106-116.

Gond, V., Fayolle, A., Penneç, A., Cornu, G., Mayaux, P., Camberlin, P., Doumenge, C., Fauvet, N., Gourlet-Fleury, S., Climatic control on vegetation structure and functioning in Central Africa : new insights from MODIS multi-temporal data, Philosophical Transaction of the Royal Society (serie B), submitted, 2013

Gond, V., Bartholomé, E., Ouatarra, F., Noguierma, A., Bado, L., 2004. Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION. International Journal of Remote Sensing, 25: 987-1004.

Bourbier, L., Cornu, G., Penneç, A., Brognoli, C., Gond, V., 2013, Large scale forest opening estimation using remote sensing in Central Africa, Bois et Forêts des Tropiques, in press.

Guitet, S., Pithon, S., Bruneaux, 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.

Pithon, S., Jubelin, G., Guitet, S., Gond, V., 2013. Statistical based method for logging-related canopy gap detection using high resolution optical remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 34: 700-711.

Approved VCS Methodology VM0015 Version 1.1, 3 December 2012, Sectoral Scope 14, Methodology for Avoided Unplanned Deforestation.

Congalton, R.G.,1991, A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data./Remote Sensing of Environment/, 37, 35–46.

Letouzey (1985) : Référence manquante