

MINISTRE DE L'ECONOMIE FORESTIERE
ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE

CENTRE NATIONAL D'INVENTAIRE ET
D'AMENAGEMENT DES RESSOURCES
FORESTIERES ET FAUNIQUES (CNIAF)

SERVICE CARTOGRAPHIE
PHOTO-INTERPRETATION

CELLULE MRV

REPUBLIQUE DU CONGO
Unité - Travail - Progrès



CARTE DE CHANGEMENT DU COUVERT FORESTIER EN REPUBLIQUE DU CONGO POUR LA PERIODE 2000-2012

CNIAF, Brazzaville

Septembre 2015



Sommaire

Remerciements	3
Acronymes.....	3
Résumé Exécutif	4
Executive summary.....	5
Introduction	6
I. Approche méthodologique	8
1.1. Analyse des données historiques existantes	8
1.2. Matériels de travail	9
1.3. Données cartographiques	9
1.3.1. Données de types raster	9
1.3.1.1. Images Landsat de 2010.....	9
1.3.1.2. Images Landsat de 2000.....	10
1.3.1.3. Images spot 2010	10
1.3.1.4. Cartes forestières historiques.....	10
1.3.2. Les données vecteurs	12
1.3.3. Système de projection utilisé.....	12
1.4. Méthode.....	13
1.4.1. Segmentation multi temporelle	13
1.4.2. Injection des valeurs des produits dans les polygones	14
1.4.3. L'arbre de décision	14
1.4.4. Intégration de la couche des routes issues du produit GAF.....	16
1.4.5. Evaluation de la précision.....	17
1.4.5.1. Système d'échantillonnage.....	17
1.4.5.2. Système de réponse	20
1.4.5.3. Analyse	21
II. Présentation des résultats	22
2.1 Produit cartographique	22
2.1.1 Présentation du produit final de 2000 à 2012	22
2.1.2 Résultats de l'analyse de la précision et statistiques	25
Conclusion.....	30
Bibliographie.....	31
Annexes	32

Remerciements

Ce rapport a été rédigé par Georges Claver BOUNDZANGA, Carine MILANDOU, Rémi D'ANNUNZIO et les autres experts SIG et Télédétection de la Cellule MRV du CNIAF¹.

L'équipe se réjouit des fructueux échanges qui se sont développés entre les experts de la FAO, du CNIAF et des Cellules d'Aménagement des Sociétés Forestières. Le présent rapport est donc l'expression de cette collaboration proactive. Toute notre gratitude à tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur collaboration pour la finalisation de cet important outil de travail, qu'est la carte de changement de couvert forestier au Congo pour 2000-2012.

Abréviations

CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur les changements Climatiques
CNIAF	Centre National d'Inventaire et d'Aménagement des Ressources forestières et Fauniques
COP	Conférence des Parties
FACET	Forêts d'Afrique Centrale Evaluées par Télédétection
FCPF	Fonds de Partenariat pour le Carbone Forestier
GAF	GAF AG, Munich, Bureau de consultation en géo information
GFC	Global Forest Change
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
MDDEF	Ministère du Développement Durable et de l'Economie Forestière
MMU	Minimum Mapping Unit
MRV	Mesure Notification et Vérification
NERF	Niveau des émissions de référence pour les forêts
PNAT	Plan national d'affectation des terres
REDD+	Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement et rôle de la conservation, de la gestion durable des forêts et du renforcement des stocks de carbone forestier dans les pays en développement.
SPOT	Satellite pour l'Observation de la Terre

¹ BOUMBA Hugues Bruno, OUISSIKA Chérubin-Brice, DIACKABANA Lill Teddy, BIKOUNDA Stéphanie, LOUBILA Gisèle, MATOKO Dabney, MENGUE Karel, MPONGUI Jean Blaise, OMBODH Kenovh, ONKA Bertrand et YOKA Jeannette

Résumé Exécutif

La carte de changement de couvert forestier en République du Congo pour la période 2000-2012 a été réalisée par le Centre National d'Inventaire et d'Aménagement des Ressources Forestières et Fauniques (CNIAF) avec l'assistance technique de la FAO à travers le Programme ONU-REDD. Elle est élaborée sur la base des trois produits existants, de manière à respecter la définition nationale de la forêt (30% de couverture arborée, MMU de 0,5 hectare).

Les produits concernés sont la couverture forestière de :

- FACET (Résolution 60 m, pertes pour 2000-2005-2010) ;
- GAF (Résolution 20 m, gains et pertes vers les classes du GIEC, MMU 1 ha) ;
- GFC (résolution 30m, pertes annuelles de couverture arborée, Hansen et al., 2013).

Cette carte a été élaborée pour servir de base au processus REDD+, notamment pour le calcul du Niveau des Emissions de Référence pour les Forêts (NERF), le plan national d'affectation des terres (PNAT) et autres utilisations ayant un lien avec la cartographie forestière.

Sur la base de cette carte, les forêts de la République du Congo couvrent une superficie de 23.517.000 hectares, soit 69% du territoire national.

La précision a été évaluée en utilisant toutes les sources de données disponibles couvrant la période choisie (Google Earth + imagerie SPOT pour 2010). La précision générale de la carte est de 90% hors stratification, avec une précision plus forte pour les classes stables (91% et 86%) que pour les pertes (73%).

Les valeurs de la légende de la carte sont les suivantes :

0	=	No Data
2	=	Non Forêt
4	=	Eau
11	=	Forêt Primaire
12	=	Forêt Secondaire
13	=	Forêt Primaire / Marécageuse
31	=	Perte Primaire
32	=	Perte Secondaire
33	=	Perte Primaire / Marécageuse
34	=	Perte Primaire vers Route

Executive summary

The forest cover change map Republic of Congo for the period 2000-2012 was created by the National Centre for Assessment and Management of Forest Resources and Wildlife (CNIAF) in collaboration with FAO technical assistance through the UN-REDD Programme. It builds on 3 existing products, which are combined to comply with the national forest definition (30% tree cover, 0.5 hectare MMU).

The products concerned are forest cover:

- FACET (Resolution 60 m, losses for 2000-2005-2010);
- GAF (Resolution 20 m, gains and losses to classes IPCC MMU 1 ha);
- GFC (30m resolution, annual loss of tree cover, Hansen et al, 2013.).

This map has been developed to serve a basis for REDD+ process, including the calculation of the Reference Emission Level (REL), the National Land Use Plan (NLUP) and other uses that link with mapping forest.

Based on this map, the forests of the Republic of Congo cover 23,517,000 hectares, or 69% of the national territory.

The accuracy of the product has been assessed using all available imagery covering the country for the chosen period (Google Earth + imagery coming from the ASTRIUM AFD project). Accuracy of the aggregated map (Forest, Non Forest, Loss) is 90%, with 73% accuracy for the loss layer.

The values of the raster are with the following legend:

- 0 = No Data
- 2 = Non Forest
- 4 = Water body
- 11 = Forest - Primary
- 12 = Forest - Secondary
- 13 = Forest - Primary / Swamp
- 31 = Loss - Primary
- 32 = Loss - Secondary
- 33 = Loss - Primary / Swamp
- 34 = Loss - Primary to Roads

Introduction

Le changement climatique est devenu une préoccupation scientifique et politique. Les discussions à ce sujet, soulèvent de nombreuses controverses, notamment sur les facteurs en cause. L'élévation de la température globale est cependant maintenant quasiment admise par l'ensemble de la communauté scientifique internationale.

Dans le cadre des efforts internationaux visant à atténuer ce fléau, le programme REDD+ initié par de nombreux pays développés et dont l'importance et l'utilité sont désormais admises par les pays en voie de développement, notamment en Afrique, accentue peu à peu son niveau d'intervention et d'implication dans les politiques nationales de nombreux pays pour la Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts.

Ce programme REDD+, basé sur des incitations positives des pays qui démontrent une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la déforestation et de la dégradation forestière, inclue la gestion durable des forêts, la conservation de la biodiversité et l'accroissement des stocks de carbone forestier. Selon le programme REDD+ la détermination des émissions issues de la déforestation et de la dégradation des forêts nécessite le suivi, la vérification et le rapport des superficies forestières, des stocks de carbone et des émissions qui en résultent.

Par ailleurs, l'estimation de la déforestation et de la dégradation forestière est une fonction de la définition de la forêt, conformément à l'accord de Marrakech². La Conférence des Parties (CoP) exige que les pays engagés dans le mécanisme REDD+ établissent des niveaux de référence pour les forêts (NRF) et des niveaux d'émissions de référence pour les forêts (NERF) pour évaluer l'efficacité des mesures stratégiques de la REDD+³. Ce NERF doit être défini en termes de portée, d'échelle, de période de référence et être construit sur la base de données d'activités transparentes, précises, cohérentes, complètes et conformes aux critères du GIEC (GBP, 2003 et LD, 2006). Les tendances historiques des changements du couvert forestier constituent des informations d'entrées pour l'élaboration du NERF (GAF, 2013).

Depuis 2008, la République du Congo a adhéré au mécanisme REDD+ dont l'objectif général est de contribuer au développement durable. Le pays est membre des deux principales plateformes internationales sur la REDD+ à savoir :

- Le Fonds de Partenariat pour le Carbone Forestier (FCPF) de la Banque Mondiale qui a sélectionné la République du Congo en 2000 sur la base de la fiche R-PIN ;
- Le Programme ONU-REDD du Secrétariat des Nations Unies qui a sélectionné la République du Congo en 2010, sur la base de la proposition du Programme National sur la REDD+.

² Propose des seuils à partir desquels les pays peuvent choisir leur définition de la forêt :

- superficie minimale de la forêt : 0.05-1 ha
- couverture minimale du houppier : 10-30%
- hauteur minimale de l'arbre : 2-5 m

³ UNFCCC, Decision 9/CP.19, par. 3 and Decision 13/CP.19, par. 2

Afin de répondre aux exigences internationales, notamment la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements Climatiques (CCNUCC), le Congo est en cours de développement d'outils stratégiques pour la mise en œuvre des activités REDD+ : il est engagé dans le développement du niveau des émissions de référence pour les forêts (NERF), à présenter à la Conférence des Parties auprès de la Convention Cadre (COP 21) en Décembre 2015 à Paris.

Pour la république du Congo, il a été admis que les données d'activités historiques, des changements du couvert forestier pour le développement du NERF proviendraient de la télédétection et des mesures sur le terrain pour la période de référence considérée (2000 à 2012). Tenant compte de l'Accord de Marrakech, la République du Congo a fixé, en mars 2014, les repères pour une définition consensuelle de la forêt au niveau national, dans le cadre de REDD+.

Afin d'estimer les pertes historiques du couvert forestier sur l'étendue nationale, la Coordination nationale REDD+, à travers la cellule MRV et le service de cartographie et Photo-interprétation du CNIAC, a entrepris de mai à juin 2015, une production de la carte du couvert forestier historique et des changements pour cette période de référence.

Cette cartographie réalisée avec l'assistance technique du programme ONU-REDD - FAO, prend en compte les paramètres de la définition nationale de la forêt et a été basée sur la combinaison des caractéristiques des trois produits cartographiques existants au Congo (FACET et GAF pour la période 2000-2010 ; GFC pour la période 2000-2013). La combinaison des produits est faite à travers un arbre de décision clair et compréhensible, décidé à la suite d'une mission d'analyse de ces trois produits, en janvier 2015 par l'ONU-REDD. Ces produits, antérieurs à l'adoption de la définition nationale de la forêt, ont été élaborés dans le cadre du suivi des forêts par télédétection. Ils sont issus des travaux de Forêt d'Afrique Centrale Evaluée par Télédétection (FACET, 2012), du rapport des opérations de service, Extension GSE FM REDD réalisé par un bureau d'étude allemand (GAF, 2013) et de données extraites de Global Forest Change (GFC, 2013)

Ce rapport présente les activités de la production cartographique : il commence par une approche méthodologique qui regroupe l'aperçu de la mission d'évaluation des produits existants, un descriptif des données utilisées, puis aborde les différentes étapes de la production et de l'analyse de la précision. Un dernier chapitre sur les résultats s'articule autour de la présentation du produit final, les statistiques zonales et l'analyse de la précision.

I. Approche méthodologique

Elle a porté tout d'abord sur l'analyse des données existantes. A partir de cette analyse, il a été ensuite défini la méthode et les données à utiliser pour la réalisation de cette production cartographique qui réponde à la définition nationale de la forêt

1.1. Analyse des données historiques existantes

Depuis l'adhésion du Congo au processus REDD+ en 2008, plusieurs études ont fait l'objet de la cartographie historique de la couverture végétale et des changements au Congo. En effet, le Congo dispose de trois produits cartographiques de couverture forestière et de changements de la couverture forestière, mais aucun de ces produits ne correspond exactement à la définition des forêts adoptée en Mars 2014 (superficie minimale : 0,5 hectare ; Hauteur minimale des arbres : 3 mètres ; couverture minimale de la canopée : 30%). Cependant, la construction du NERF requiert des données d'activités historiques en cohérence avec la définition de la forêt.

Pour ce faire, une mission d'évaluation de ces trois produits existants, réalisée en Janvier 2015 par la FAO-ONU-REDD, a permis de définir la marche à suivre pour obtenir un produit cartographique de changement Forêt / Non Forêt au Congo couvrant la période de référence 2000-2012.

Le tableau 1 résume les caractéristiques, avantages et inconvénients des trois produits qui sont potentiellement complémentaires et pertinents pour le Congo : FACET (2012), GFC (2013) et GAF (2013).

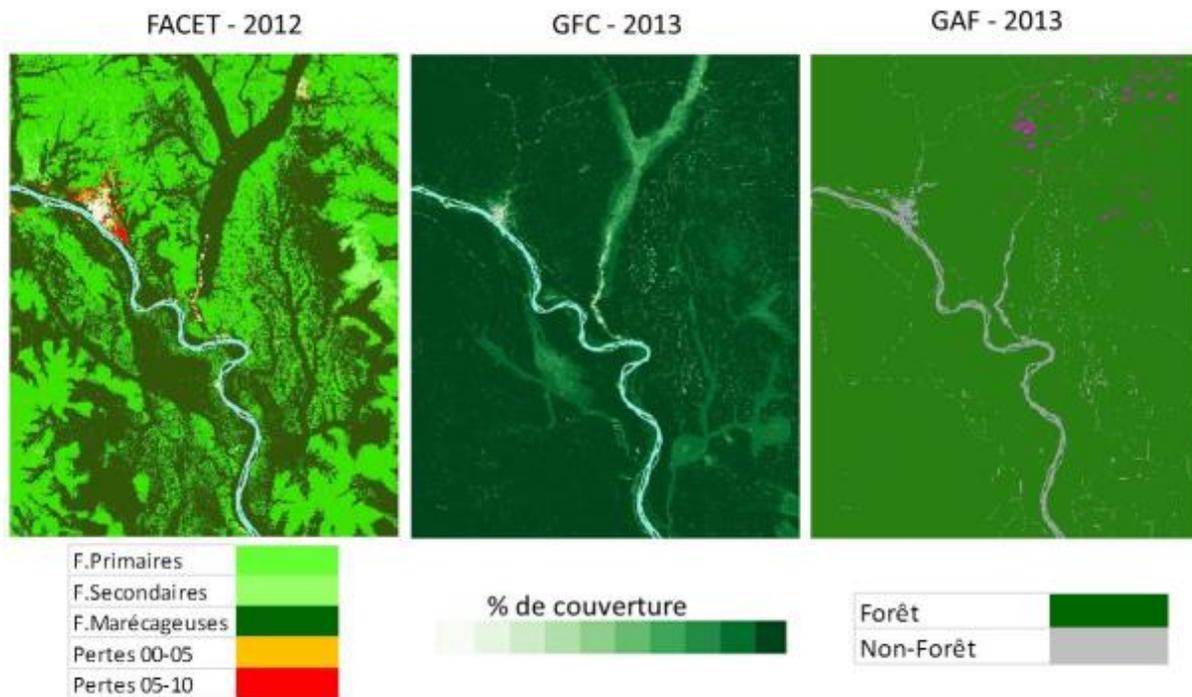
Tableau 1. Représentation des caractéristiques des trois produits

Produit	MMU	Dates	Classes	Précision	Classes de Changement	Taux annuel deforestation	Précision
FACET	0.36 ha	2000 2005 2010	F.Primaires F.Secondaires F.Marécageuses Non Forêt	ND	Pertes	0.07%	ND
GFC	0.09 ha	2000 2012	% couverture	94%	Pertes /an Gains	0.08%	ND
GAF	1 ha	1990 2000 2010	Forêt Non-Forêt	97%	Perte + GIEC Gains	0.03%	53%

Il est essentiel de remarquer qu'aucun des produits ne respecte la définition des forêts au Congo (MMU de 0.5ha), avec pour conséquence une potentielle surestimation (FACET / GFC avec une MMU inférieure) ou sous-estimation (GAF avec une UMM supérieure) des pertes réelles de forêt au Congo. Afin de pallier l'inadéquation des produits à la définition des forêts (et a fortiori des pertes de forêt), il a été proposé de créer une nouvelle carte de couverture forestière et des pertes, avec une Unité Minimale de Cartographie et une couverture arborée qui

correspondent à la définition de la forêt (0.5 ha, 30% de couvert) et qui combine les caractéristiques des trois cartes (fig.1).

Figure 1. Trois cartes de (changement de) couverture forestière et leurs légendes



1.2. Matériels de travail

Les matériels utilisés concernent :

- Les outils "Open Foris Geospatial Toolkit" ;
- Les logiciels « R » et « QGIS 2.8 » ;

L'Environnement de travail est constitué par :

- Xubuntu du système d'exploitation Linux ;
- Collect Earth ;
- Google Earth.

1.3. Données cartographiques

1.3.1. Données de types raster

La principale source de données utilisées pour la carte historique du couvert forestier de la République du Congo est le CNIAF. Les données utilisées sont : (i) les images satellites et (ii) les cartes forestières.

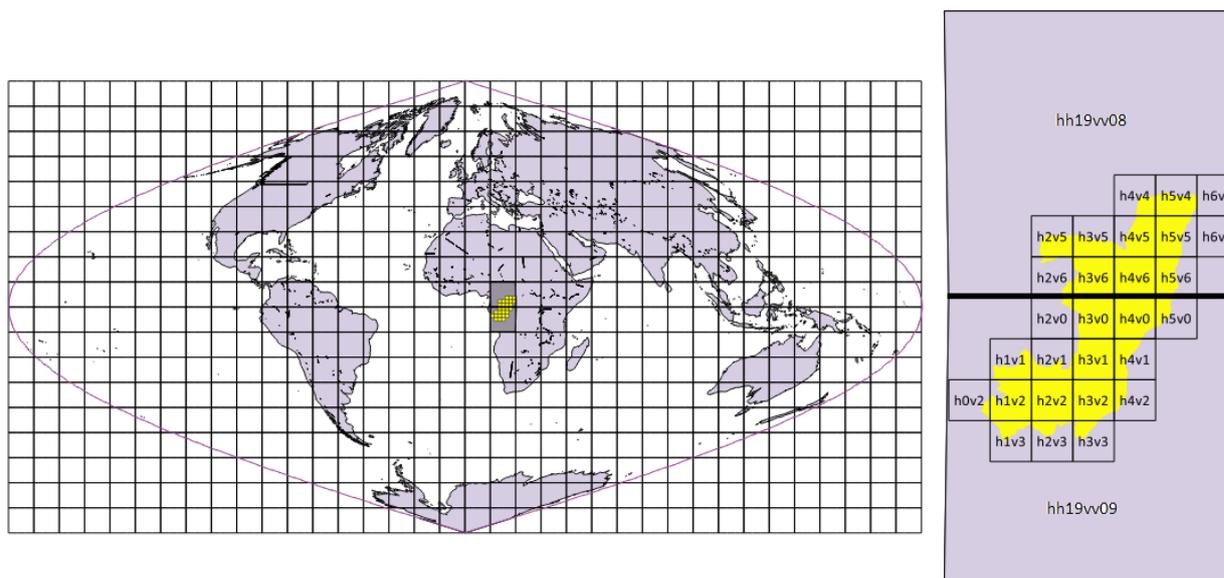
1.3.1.1. Images Landsat de 2010

La mosaïque utilisée provient du projet WELD (World Enabled Landsat Dataset), avec des scènes sous forme HDF, accessibles et téléchargeables gratuitement à partir de <http://globalweld.cr.usgs.gov/collections>. Au total 28 scènes HDF en projection sinusoidale qui couvrent tout le territoire congolais ont été téléchargées.

1.3.1.2. Images Landsat de 2000

La mosaïque utilisée pour l'année 2000 vient du produit Global Forest Change 2000–2013 de l'Université du Maryland (Hansen et al. 2013). Deux scènes (le maillage est de 10 degrés) couvrant le Congo ont été subdivisées pour correspondre à chacune des 28 scènes HDF de WELD. La figure 2 présente les indices des empreintes des deux mosaïques Landsat de 2000 (en gris) et les indices des empreintes des boîtes WELD pour la mosaïque Landsat et de 2010 (petites boîtes).

Figure 2: Représentation du système de projection (gauche) et des indexes des images Landsat 2000 et 2010 (droite).



1.3.1.3. Images spot 2010

Elles sont tirées de la base de données du Centre National d'Inventaire et d'Aménagement des Ressources forestières et Fauniques (CNIAF).. Ces Données SPOT ont été acquises par l'intermédiaire du projet AFD-ASTRIUM Bassin du Congo⁴.

1.3.1.4. Cartes forestières historiques

Ces trois cartes ont été obtenues à partir de la base de données du CNIAF.

Carte forestière de GAF (2000 – 2010)

Ce produit national a été élaboré dans le cadre de GSE Suivi forestier, Extension des Services REDD, projet MDDEF/REDD/GAF.

La société GAF, connue sous le nom officiel de GAF AG, Munich, est une société Allemande qui a agi en tant que prestataire de services au Ministère du Développement Durable et de l'Economie Forestière (MDDEF) en République du Congo, dans le cadre de l'Extension GSE FM REDD (surveillance des forêts). L'ensemble des services pour le MDDEF comprend la production à l'échelle nationale, des cartes du couvert forestier et des changements du couvert forestier entre 1990, 2000 et 2010, ainsi que le renforcement des capacités (entre autre sur

⁴ <http://bassinducongo.reddspot.org/>

les SIG et la télédétection). Ceci pour un suivi complet du couvert forestier pour la REDD au Congo. Outre son rôle de contractant principal pour l'extension GSE FM REDD, GAF a agi en tant que prestataire de services responsable de tous les aspects de l'acquisition des données, de l'ortho rectification, du prétraitement, de la production des cartes et du post-traitement (GAF, 2013). La figure a1, annexe 1 présente la carte du couvert forestier de GAF pour la période 2000 à 2010.

Carte forestière de FACET (Atlas de la République du Congo) de 2000 à 2010

FACET ou Forêts d'Afrique Centrale Evaluées par Télédétection, est un projet de l'OSFAC dont le but est d'évaluer quantitativement la dynamique spatio-temporelle des changements forestiers en Afrique Centrale à travers l'utilisation des données satellites multi-temporelles. Les résultats FACET sur le type, l'étendue et les pertes de couvert forestier sont une contribution utile pour plusieurs projets incluant le suivi de la biodiversité, la modélisation du climat, la conservation, la gestion des ressources naturelles, la planification de l'utilisation des terres, la Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation (REDD+). L'Atlas FACET est le résultat d'une étude sur l'étendue et les pertes brutes du couvert forestier en République du Congo de 2000 à 2010 (Atlas de la République du Congo, 2010). La figure a 2, annexe 5 présente la carte forestière issue de FACET.

Carte forestière de GFC de 2000 à 2012

Le produit GFC est issu d'une étude globale par télédétection des changements de couvert arboré, menée par l'université du Maryland (Hansen et al., 2013). Des images Landsat de 30m de résolution ont été analysées pour chaque année entre 2000 et 2013, le calcul ayant été rendu possible grâce aux performances du 'Cloud Computing' fourni par Google dans un partenariat inédit. Les arbres sont définis comme toute végétation ligneuse supérieure à 5 m de hauteur, et chaque pixel du produit contient une valeur de pourcentage de couverture et une indication sur le changement (année de perte, gain). Les images de référence pour 2000 et 2014 sont les observations médianes en saison de végétation d'un jeu de données dont la qualité a été évaluée et validée. La couche disponible sur le site dédié⁵ a été extraite et découpée aux frontières du Congo pour ce travail (fig. a3, annexe 5).

⁵ <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>

1.3.2. Les données vecteurs

Ce sont essentiellement les shapes files des limites territoriale et départementales (fig. 3)

Figure 3 : limites territoriale et départementales du Congo



1.3.3. Système de projection utilisé

Le système de projection utilisé pour le travail était la projection sinusoidale SR-ORG: 6842 (<http://spatialreference.org/ref/sr-org/6842/>). Cette projection est conforme (elle respecte les superficies) et subit le minimum de déformation en son centre ce qui convient particulièrement pour le Congo. De plus c'est la projection native des images HDF utilisées pour la mosaïque des images Landsat 2010 et le découpage en boîtes.

1.4. Méthode

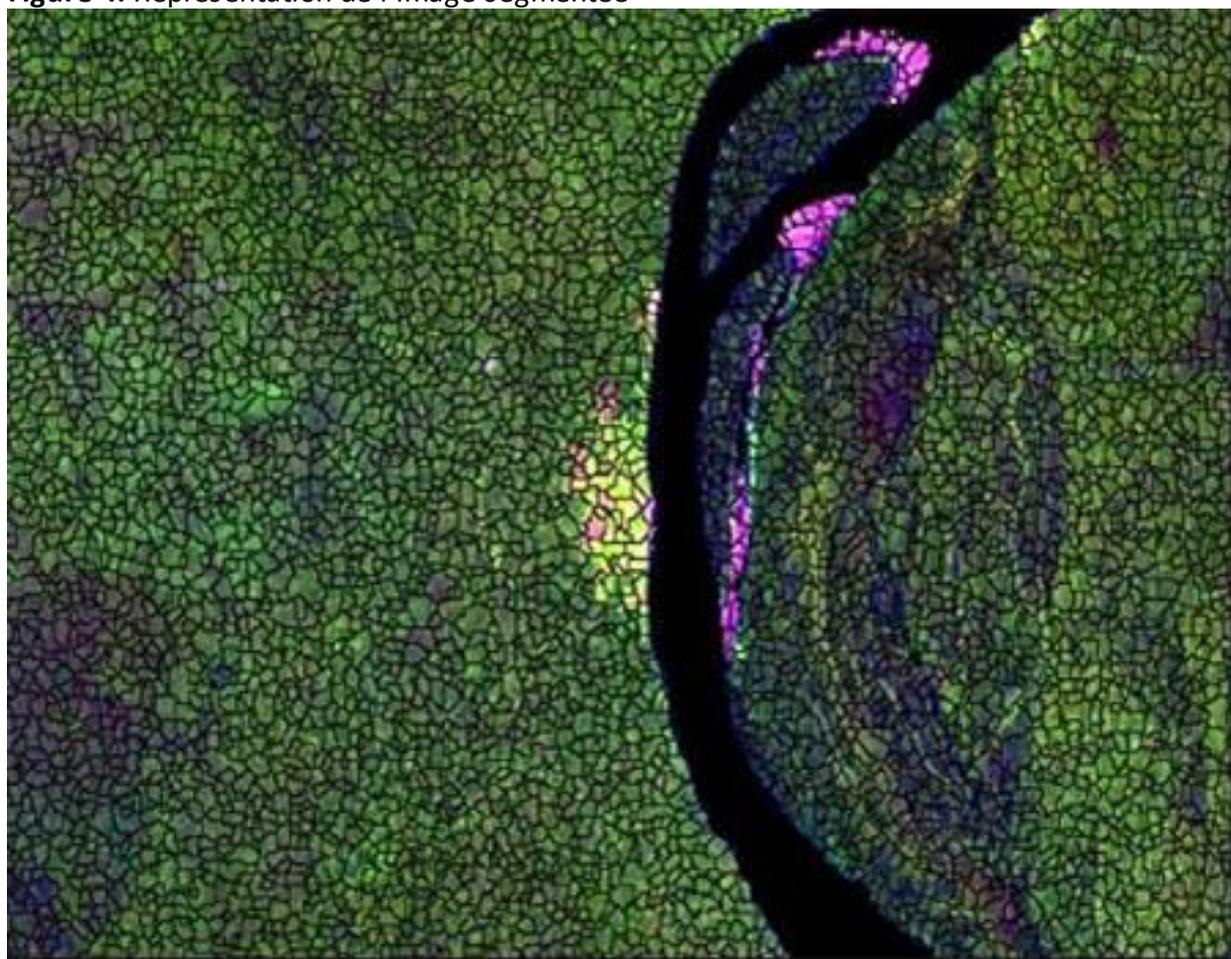
Elle a porté sur plusieurs étapes à savoir : (i) la segmentation multi-temporelle, (ii) l'injection des valeurs des produits dans les polygones, (iii) l'arbre de décision, (iv) l'intégration de la couche des routes issues du produit GAF et (v) l'évaluation de la précision

1.4.1. Segmentation multi temporelle

Pour chacune des scènes HDF couvrant le pays, un composite 6 bandes (bandes 3, 4, 5 pour 2000 et pour 2010) a été produit puis segmenté en polygones respectant une unité minimale de Cartographie (MMU) de 0.5 ha. Il en résulte plus de 50 millions de polygones (fig. 4). Cette segmentation sur des composites multi temporels a pour but de capturer un maximum de changement de réflectance ayant lieu entre les deux dates.

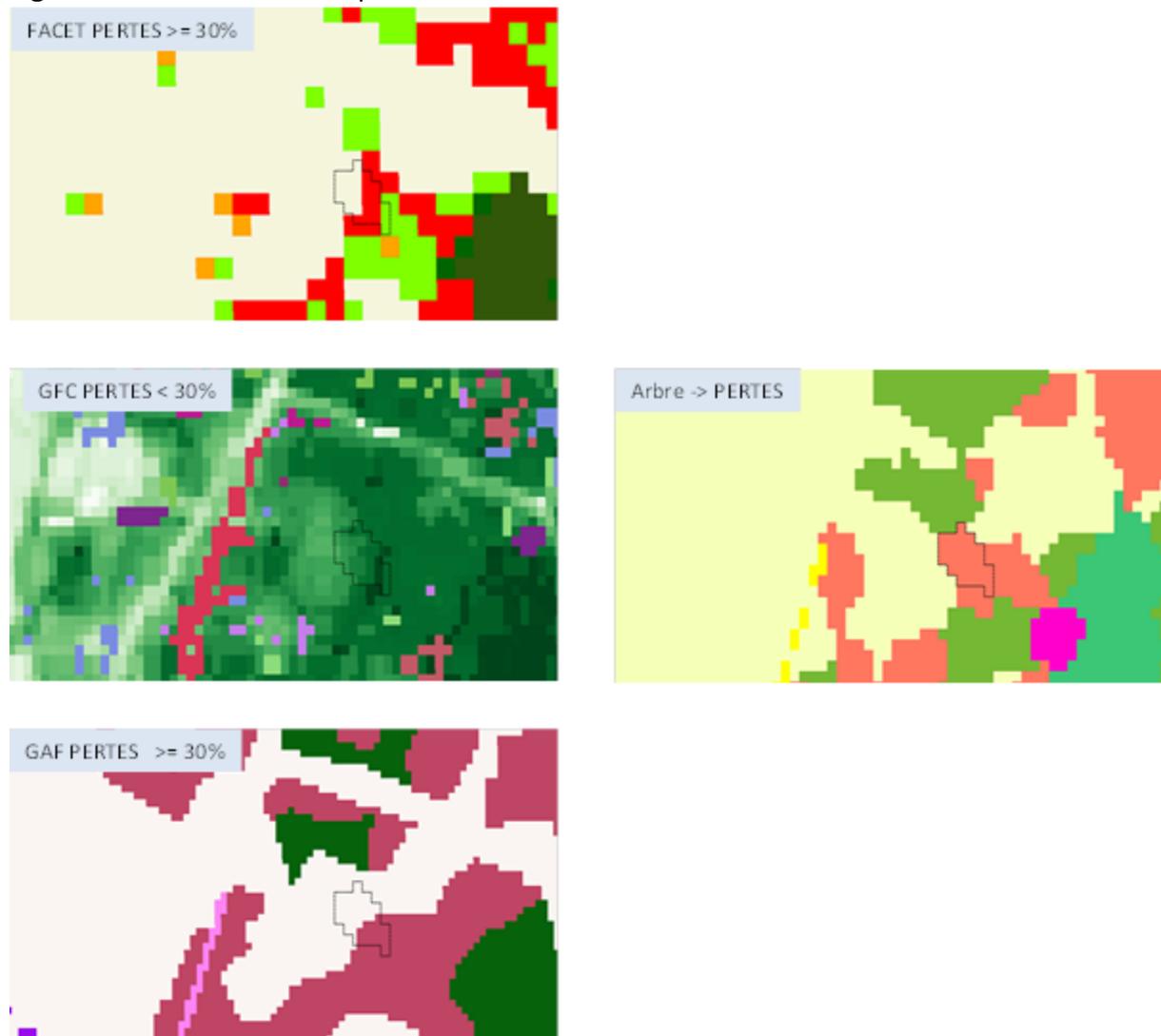
Pour chaque polygone de la segmentation, les valeurs des trois rasters sous-jacents sont combinées selon un arbre de décision pour déterminer la valeur du polygone de sortie.

Figure 4: Représentation de l'image segmentée



L'arbre a ensuite été transcrit dans le logiciel R et appliqué aux routines d'exécution développées dans l'environnement Open Foris Geospatial toolkit⁶. Il en résulte une couche préliminaire avec les classes de forêt, non forêt, pertes et eau. Un exemple illustré de la combinaison des produits dans les polygones finaux est donnée pour la Branche n2 de l'arbre, sur la figure 6. L'ensemble des illustrations pour chaque branche est donné en Annexe 1.

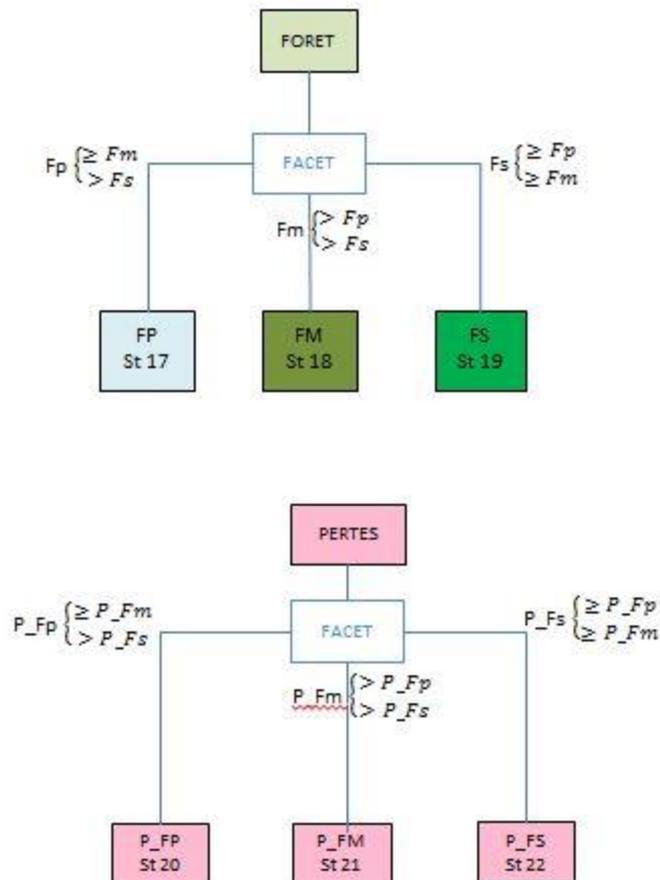
Figure 6. Illustration du comportement de l'arbre de décision sur la Branche 2



Il s'en est suivi une stratification ayant permis de discriminer les classes « forêt » et « pertes » par création d'une nouvelle branche de l'arbre de décision, qui prend en compte la stratification du produit FACET suivant la règle de priorité ci-après : Secondaire > Primaire > Marécageuse. La couche générée contient huit classes et dans laquelle ont été intégrées les routes issues du produit de GAF. La forme de cet arbre est illustrée par la figure 7.

⁶ www.openforis.org

Figure7. Présentation de la phase de stratification de la classe forêt (en haut) et des pertes (en bas)



1.4.4. Intégration de la couche des routes issues du produit GAF

Il a été constaté que la conversion (pertes) de la classe "Forêt" en "Infrastructure" dans le produit GAF correspond en majorité à des routes qui sont des éléments linéaires, difficiles à détecter en segmentation automatique, et qui ont été édités manuellement dans ce produit avec une forte valeur ajoutée.

Ces routes ont donc été intégrées par-dessus l'arbre de décision, avec écrasement des valeurs sous-jacentes, avant le calcul des statistiques. Cette intégration ne pose pas de problème de cohérence car l'unité minimale de cartographie utilisée dans le produit final (0.5 ha) est inférieure à celle de GAF (1 ha).

Après toutes ces étapes, l'arbre final a ensuite été implémenté dans le logiciel R. Il en résulte une couche stratifiée de 2000 à 2010 avec neuf classes (voir annexe 2 pour les scripts de production). Le tableau 2 ci-après présente les différentes strates et les codes respectifs.

Tableau 2. Différentes strates et leurs codes (AD-00_10)

Code	classe
2	Non-Forêt
4	Eau
11	Forêt Primaire
12	Forêt Secondaire
13	Forêt Primaire / Marécageuse
31	Pertes Forêt Primaires
32	Pertes Forêt Secondaire
33	Pertes Forêt Primaire / Marécageuse
34	Pertes Forêt Primaire vers routes

Une dernière étape a consisté à intégrer les pertes des années 2011 et 2012 du produit GFC. En effet, afin de respecter la période de référence pour le NERF, ces pertes ont été incorporées dans la couche de 2000 à 2010, après filtrage au préalable de tous les éléments de GFC de taille inférieure à 0.5 ha.

Ces pertes (2011 et 2012) ont par la suite été stratifiées (en prenant pour chaque polygone la classe majoritaire de forêt sous-jacente) et intégrées pour conduire à un produit final de 2000 à 2012, conformément aux critères de la définition nationale de la forêt.

1.4.5. Evaluation de la précision

Pour cette production cartographique, l'analyse de la précision s'est faite en suivant les bonnes pratiques décrites par Olofsson *et al.*, (2014) en trois étapes : la définition du système d'échantillonnage, l'adoption d'un système de réponse optimal et l'analyse.

1.4.5.1. Système d'échantillonnage

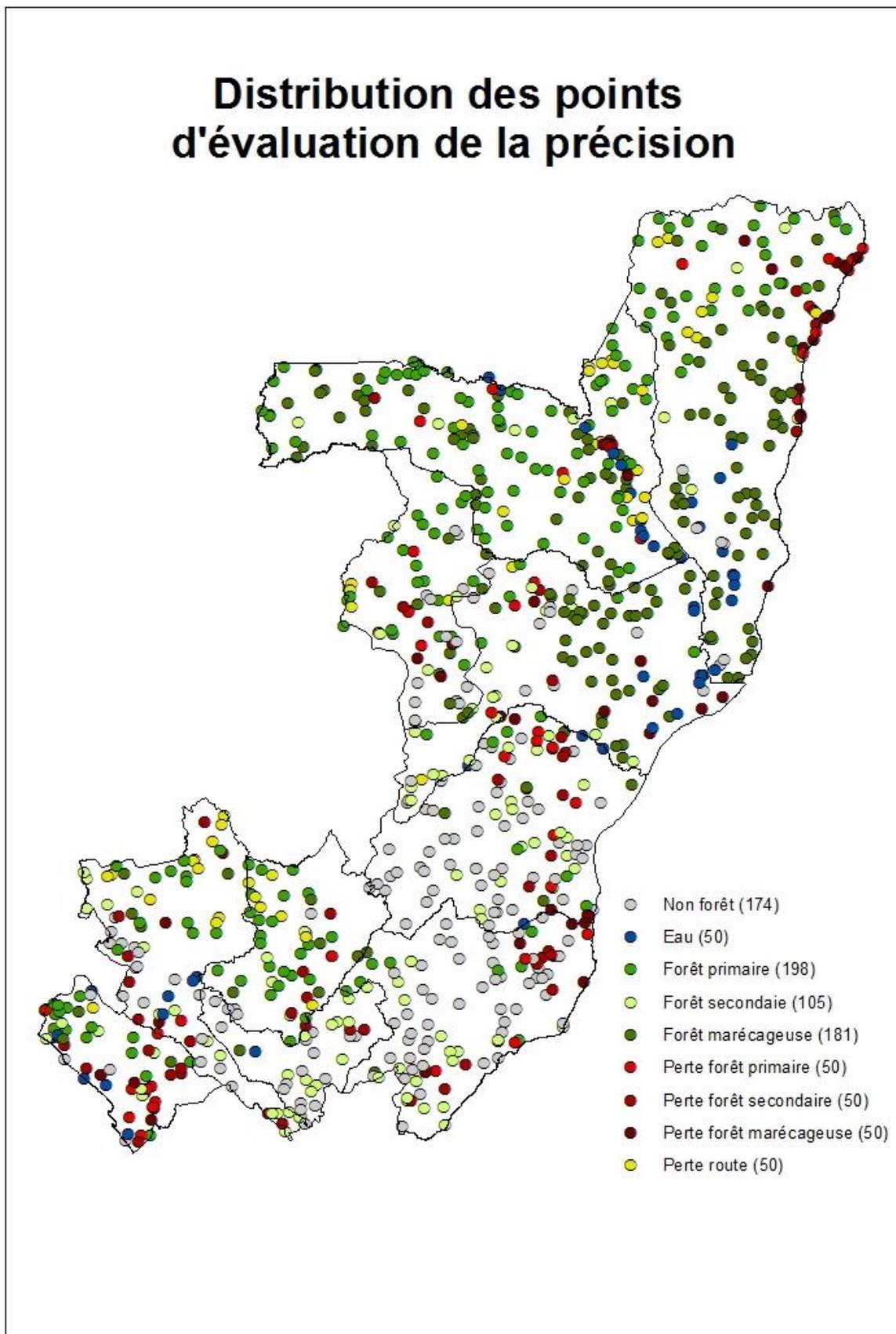
Un échantillonnage stratifié a été réalisé avec répartition des points aléatoires dans chaque strate. Avec une précision attendue de 0.9 pour les classes stables et 0.5 pour les classes de changement, 908 points distribués entre les classes, conformément au tableau 3, ont été aléatoirement tirés (Fig.8)

Tableau 3. Précision attendue des différentes classes et répartition des points pour l'analyse de la précision. Un minimum de 50 points par classe a été retenu.

	autre	eau	fp	fs	fm	pp	ps	pm	pr	Total
# pixels	106,556,255	925,823	137,377,600	18,728,954	114,184,628	581,935	396,791	125,776	305,619	379,183,381
Précision attendue U_i	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.5	0.5	0.5	0.5	6.50
Proportion W_i	28.1%	0.2%	36.2%	4.9%	30.1%	0.2%	0.1%	0.0%	0.1%	100%
S_i	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	3.50
$W_i \cdot S_i$	0.084	0.001	0.109	0.015	0.090	0.001	0.001	0.000	0.000	0.30
Erreur standard du produit										0.01
Nombre d'échantillons total	$(\sum W_i \cdot S_i / SE)^2 = 908$									
Alloc1 Ni(W)	255	2	329	45	273	1	1	0	1	908
Alloc2 Ni(U)	126	126	126	126	126	70	70	70	70	908
Alloc. Final $(W+2 \cdot U)/3$	174	50	198	105	181	50	50	50	50	908

L'échantillonnage des classes majoritaires a été fait en choisissant aléatoirement des points dans une grille aléatoire (paquet *raster* et *sample* dans R). L'échantillonnage des classes rares a été fait en utilisant la fonction *rasterToPoints* dans R, puis la fonction *sample*. Les scripts R pour l'échantillonnage sont également disponibles en annexe 2.

Figure 8: Distribution des points pour l'évaluation de la précision



1.4.5.2. Système de réponse

Selon Olofsson et al., (2013) les données qui servent à évaluer la précision d'une carte doivent être de qualité et de résolution au moins supérieures ou égales aux données utilisées pour l'élaboration de la carte.

Pour les classes majoritaires stables (Forêt et Non Forêt) le système de réponse choisi a été l'outil Collect Earth où les points sont visuellement interprétés en utilisant les images présentes dans Google Earth, Bing map et Here map.

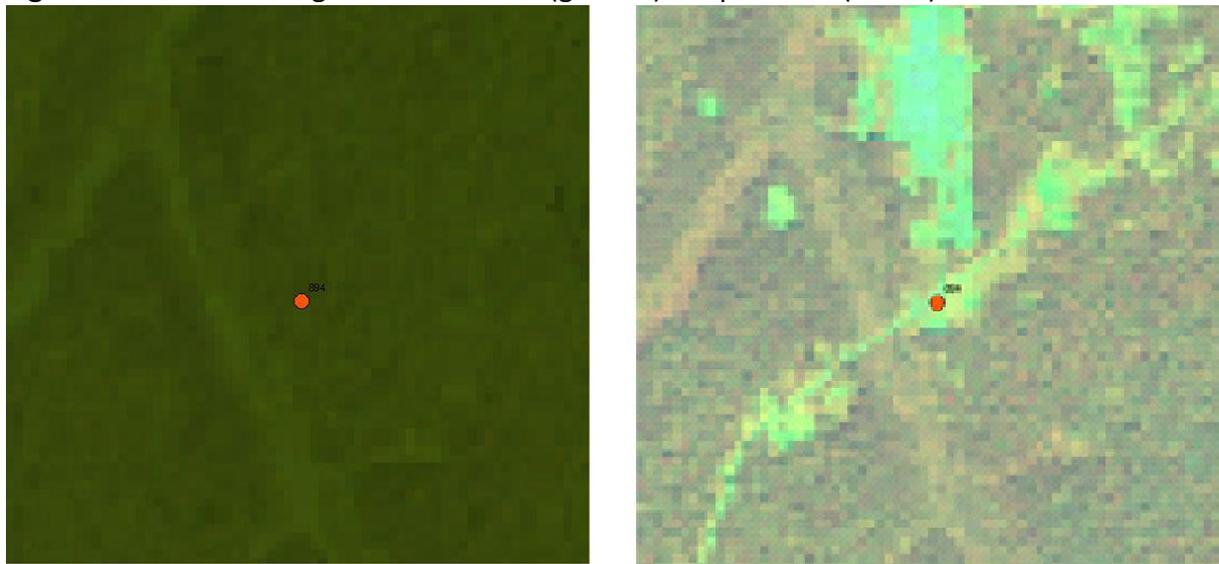
Pour les classes rares de pertes, tous les points de pertes ont fait l'objet d'une évaluation visuelle à partir de la comparaison d'images Landsat pour l'année 2000 et d'images SPOT pour l'année 2010 fournies dans le cadre du projet ASTRIUM AFD.

Chaque paire d'image a été découpée dans un cadre de 2km de côté, ouverte dans un SIG et l'information concernant les pertes a été vérifiée.

Les figures 8 et 9 représentent respectivement une illustration des images Landsat et Spot découpées pour chacun des points des pertes sur tout le territoire.

L'intégralité des illustrations de l'évaluation de la précision des points de pertes est disponible en annexe 4.

Figure 9. Portion d'images Landsat 2000 (gauche) et Spot 2010 (droite) de 4 km²



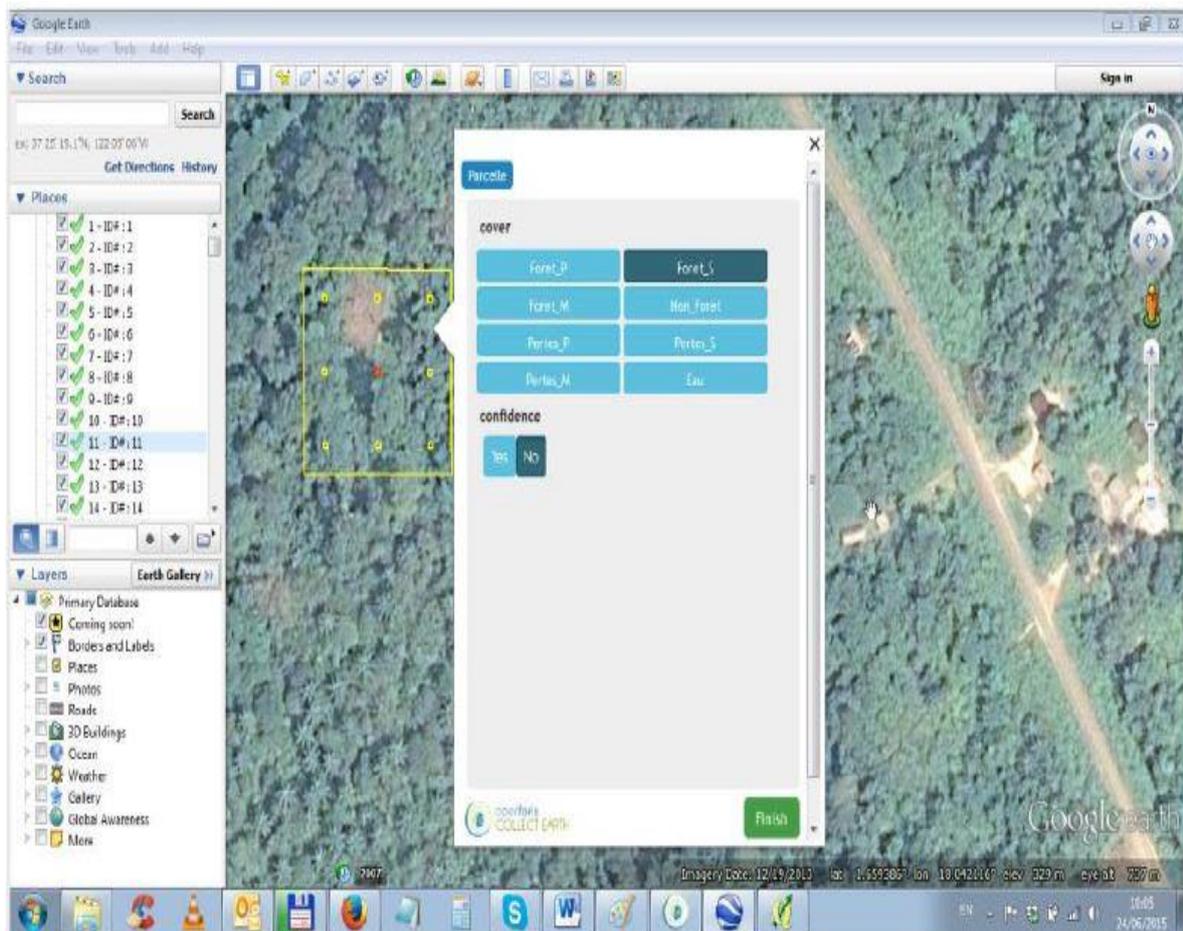
1.4.5.3. Analyse

L'analyse des résultats de l'évaluation de la précision a été faite dans R, en ne conservant que les points pour lesquels l'opérateur était certain de son jugement (870 points ont ainsi été conservés pour l'analyse finale. Les résultats ont été produits sous forme d'une matrice de confusion et d'une table des surface estimées corrigées. Une agrégation des strates a également été faite pour évaluer la précision du produit hors stratification.

L'analyse a été faite dans R en utilisant le paquet *shiny* et est disponible dans GitHub⁷. L'échantillonnage des classes majoritaires a été fait en choisissant aléatoirement des points dans une grille aléatoire (paquet *raster* et *sample* dans R, *Vecteur/Recherche/Points aléatoires* dans QGIS ou *Spatial Analysis/Create Fishnet* dans ArcGIS). L'échantillonnage des classes rares a été fait en utilisant la fonction *rasterToPoints* dans R, puis la fonction *sample*.

Les points ont été interprétés visuellement dans Collect Earth. La figure 10 illustre l'interface de travail dans Collect Earth. Le fichier est disponible en Annexe 3.

Figure 10: Interface Collect Earth



⁷ https://github.com/lecrabe/accuracy_assessment

II. Présentation des résultats

Ce chapitre porte sur la présentation du produit final et du résultat de l'analyse de la précision. Tous les scripts et interfaces nécessaires à la production de cette carte sont placés en annexes.

2.1 Produit cartographique

2.1.1 Présentation du produit final de 2000 à 2012

Le produit cartographique présenté ici est la couche finale issue de la combinaison des trois produits existants incluant les routes de GAF, suivant un arbre de décision complet et compréhensible, au quel ont été ajoutées les pertes des années 2011 et 2012 de GFC. Cette couche respecte d'une part les critères de la définition de la forêt et la période de référence pour l'établissement du NERF d'autre part. Ce produit est sous la forme raster de 30 mètres de résolution spatiale et de projection unisoidale.

La définition des classes thématiques dans ce produit est basée sur la stratification dans FACET.

Les classes des forêts, non forêt, pertes, l'eau et les routes ont été identifiées.

- La Forêt est définie comme un espace d'au moins 0,5 hectare de superficie, avec des arbres d'au moins cinq (3) mètres de haut et d'une couverture de la canopée d'au moins 30% à une résolution spatiale de 30m. Les zones forestières ont été divisées en trois (3) catégories : les forêts primaires, les forêts secondaires et les forêts marécageuses, où les forêts marécageuses représentent une sous-catégorie des forêts primaires.
- La Forêt primaire est définie comme une forêt mature, incluant les forêts anciennes, les plantations d'arbres à maturité et les galeries forestières. Les forêts primaires ont une hauteur de canopée mature et hétérogène et une structure qui dissipe la lumière entrante, réduit la réflectance et induit que les forêts apparaissent sombres sur l'imagerie satellite.
- La Forêt secondaire inclut les forêts régénérées après perturbation. Les forêts secondaires sont caractérisées par des canopées uniformes qui augmentent la réflectance, particulièrement dans le proche infra-rouge, en comparaison aux forêts primaires.
- La forêt marécageuse est définie comme une forêt primaire en zone humide. Les zones humides sont des terres de transition entre les systèmes terrestres et aquatiques où la nappe phréatique est généralement à la surface ou près de la surface ou encore là où la terre est recouverte d'eau peu profonde.
- La non forêt représente toute autre occupation du sol comme la savane, le bâti, le sol nu.
- Les pertes du couvert forestier correspondent à la conversion de la forêt en d'autres types d'occupation du sol. Elles sont de trois catégories : pertes primaires, secondaires et marécageuses
- Les Pertes de forêt converties en routes sont celles issues du produit GAF.

Les différentes classes sont présentées par les figures 11 et 12 ci-dessous.

Figure 11. Carte d'occupation du sol forestier et de changement d'occupation du sol forestier (2000-2012)

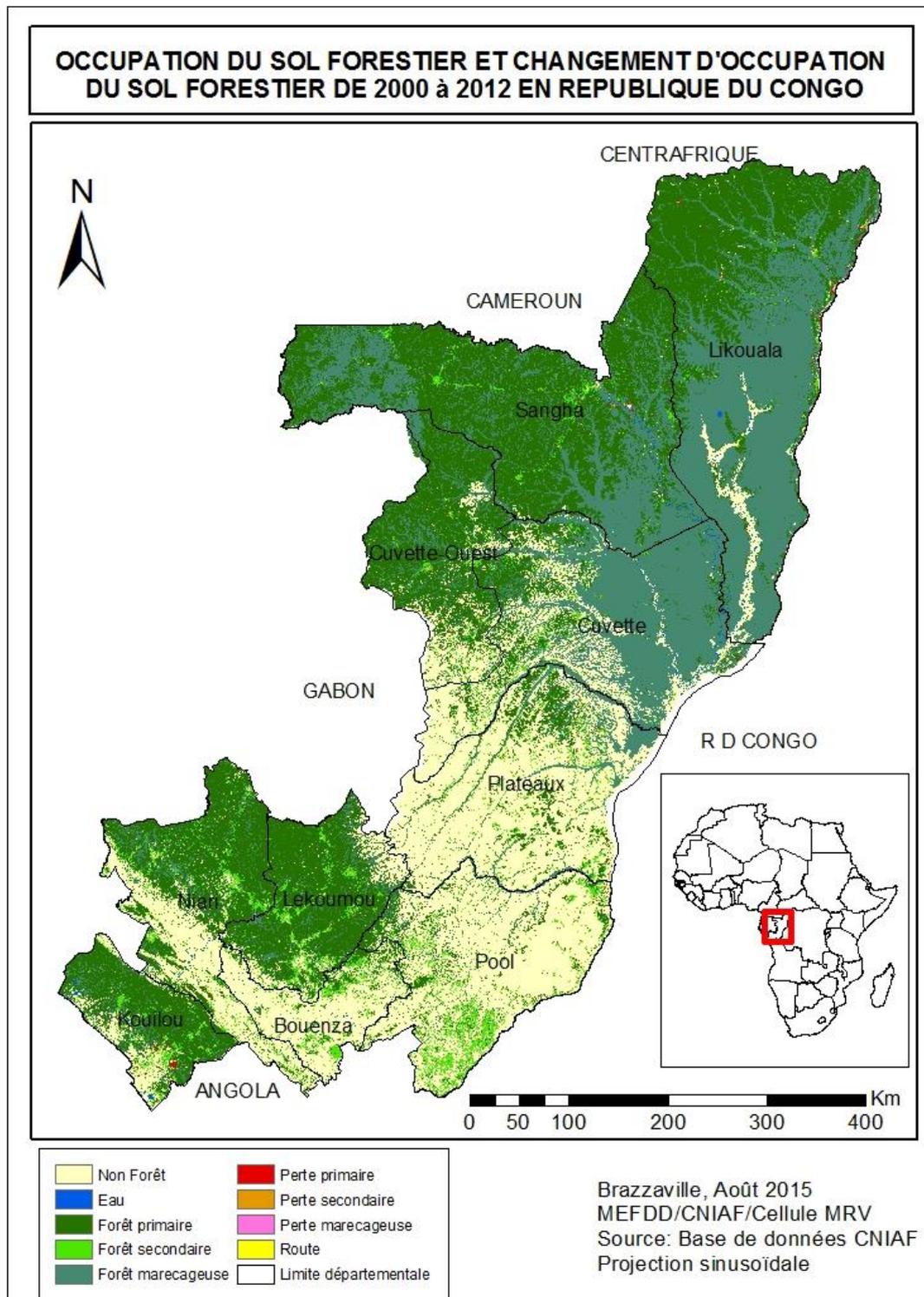
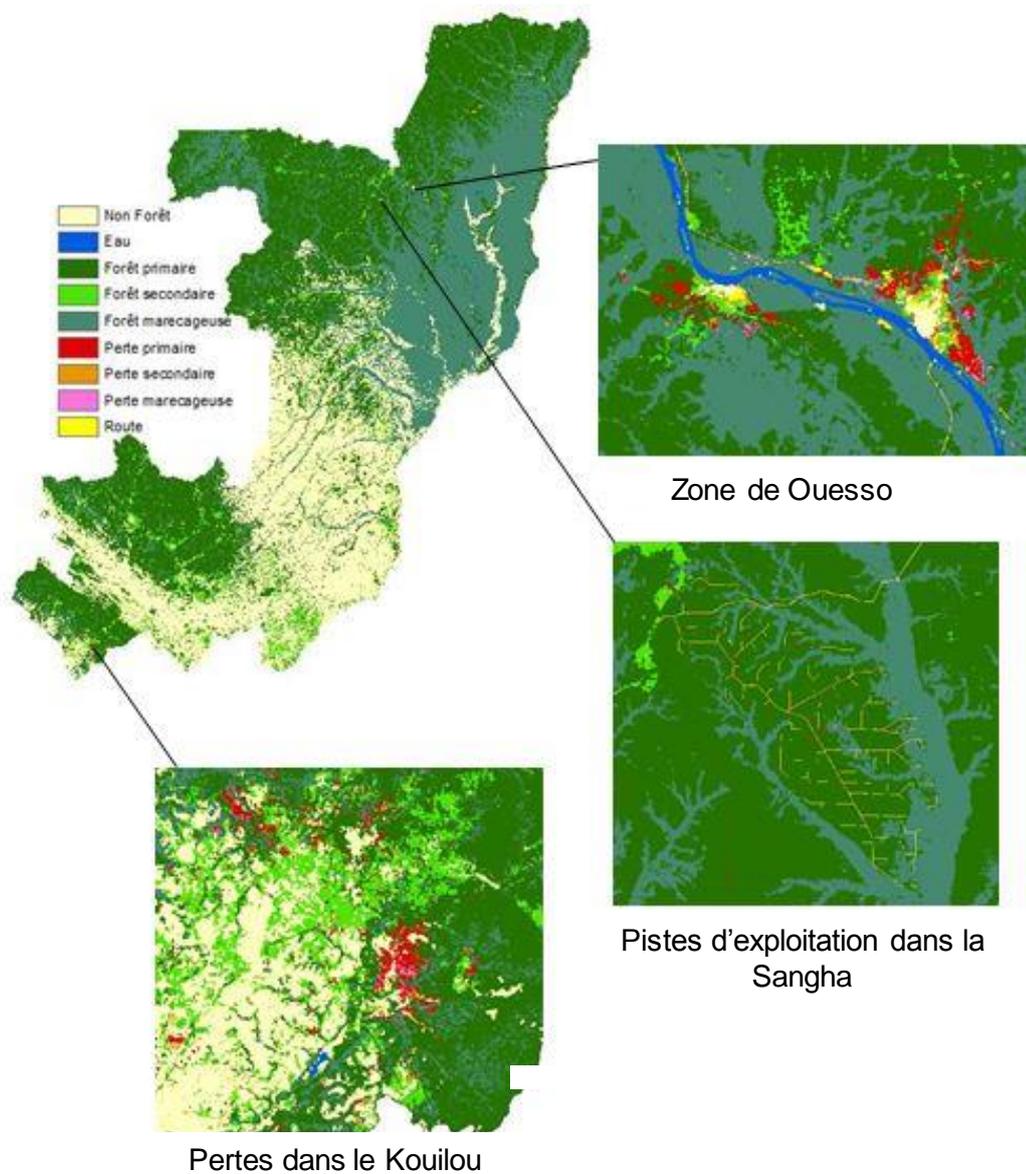


Figure 12 : Produit final avec un agrandissement de la zone du Kouilou, de Ouesso, et des pistes d'exploitation forestière dans la Sangha.



2.1.2 Résultats de l'analyse de la précision et statistiques

Les forêts du Congo couvrent 23.517.000 ha (+- 778,000 ha) soit 69% du territoire national (tableau 4). Entre 2000 et 2012, ~145,000 hectares de forêt ont été perdus, soit un taux moyen de perte annuelle de 0.052%.

La précision générale de la carte est de 90% hors stratification, avec une précision plus forte pour les classes stables (91% et 86%) que pour les pertes (73%).

Tableau 4: Résultats de l'analyse de la précision pour les classes agrégées

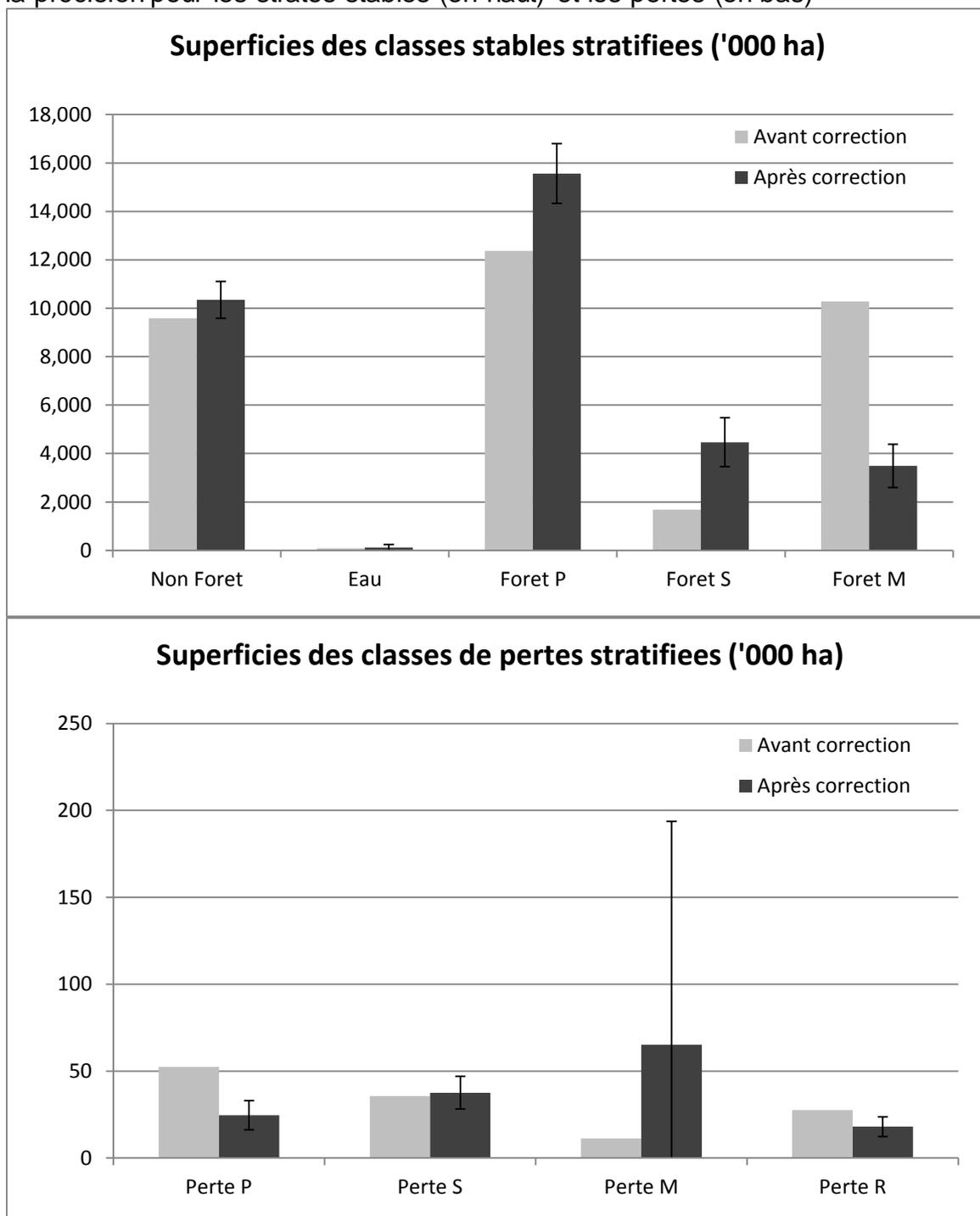
Classe agrégée	Superficie ('000 ha)			Prop.	Préc. Util	Préc. Prod
	Avant correction	Après correction	IC à 95%			
Forêt	24,326	23,517	778	68.9%	91%	94%
Non Forêt	9,673	10,464	772	30.7%	86%	80%
Pertes	127	145	104	0.4%	73%	64%
Total	34,127	34,127			90%	

La précision descend à 60% quand on considère les classes stratifiées. La strate de forêt marécageuse en particulier est surestimée et présente des confusions essentiellement avec la strate forêt primaire. Le tableau 5 et la figure 13 présentent la matrice de confusion et les superficies avant et après correction par analyse de la précision pour les strates stables et les pertes.

Tableau 5. Matrice de confusion des classes de la carte.

	Non Forêt	Eau	Forêt P	Forêt S	Forêt M	Perte P	Perte S	Perte M	Perte R	Précision Utilisateur
Non Forêt	142	1	6	14	3	0	0	0	0	86%
Eau	9	30	1	0	5	0	0	0	0	67%
Forêt P	7	0	139	33	12	0	0	0	0	73%
Forêt S	26	0	40	30	3	0	0	0	0	30%
Forêt M	7	0	100	19	43	0	0	1	0	25%
Perte P	0	0	7	4	0	22	12	2	3	44%
Perte S	3	0	10	6	0	2	27	2	0	54%
Perte M	1	1	7	3	3	2	10	22	1	44%
Perte R	2	0	5	2	0	2	10	0	28	57%
Précision Producteur	86%	49%	56%	11%	72%	88%	49%	7%	82%	60%

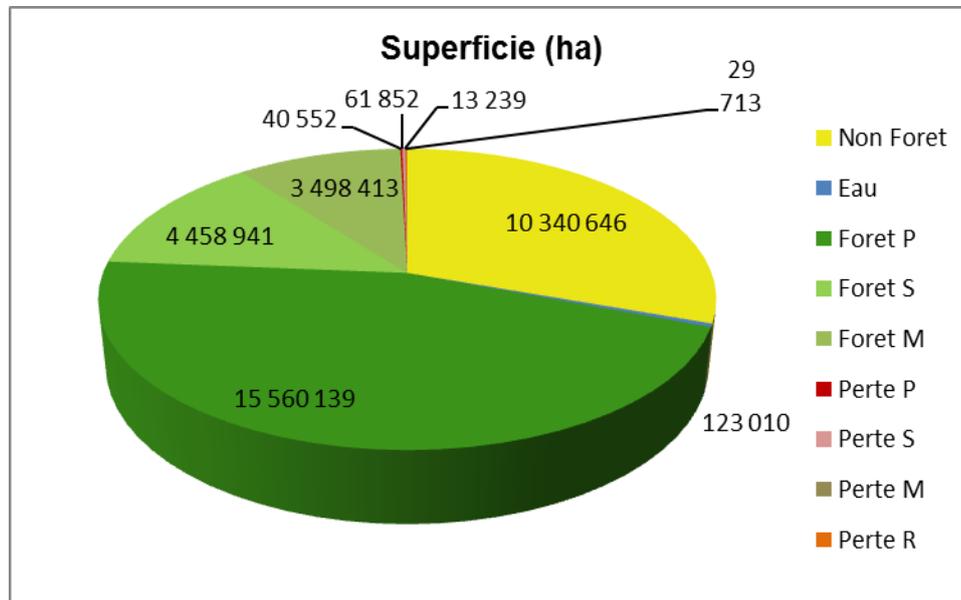
Figure 13 : Représentation des superficies avant et après correction par analyse de la précision pour les strates stables (en haut) et les pertes (en bas)



Les statistiques zonales pour tout le pays sont basées sur le shapefile de délimitation territoriale et celles à l'échelle départementale sur le shapefile des limites administratives. La répartition des différentes classes varie suivant les zones.

La figure 14 et le tableau 6 ci-dessous présentent la répartition des strates de la carte et les statistiques zonales par départements.

Figure 14. Représentation de la répartition des classes



Il faut noter que l'évaluation de la précision a été faite pour le territoire national et les superficies corrigées ne sont pas disponibles au niveau des départements.

Les superficies nationales corrigées des différentes strates ont donc été utilisées pour chaque département au prorata des statistiques zonales de chaque strate dans le département avant correction.

Tableau 6: Présentation des superficies des strates par département

Département	Non Forêt	Eau	Forêt P	Forêt S	Forêt M	Perte P	Perte S	Perte M	Perte R	Total
KOUILOU	267,421	17,867	1,062,745	290,210	62,630	3,606	3,231	8,148	658	1,716,515
NIARI	980,576	5,003	1,746,972	575,637	96,381	1,262	3,288	1,943	3,322	3,414,384
BOUENZA	1,003,414	5,232	181,676	392,808	9,578	152	1,682	200	16	1,594,761
LEKOU MOU	299,529	1,177	1,797,032	413,799	81,165	1,210	3,687	932	2,774	2,601,305
POOL	2,749,979	1,816	410,606	1,124,219	48,029	1,761	5,472	2,367	540	4,344,789
PLATEAUX	3,050,343	4,343	475,314	633,859	145,095	3,057	6,574	4,702	357	4,323,641
CUVETTE	860,526	31,728	665,041	339,629	824,893	1,828	3,593	10,619	864	2,738,720
CUVETTE OUEST	834,197	195	1,937,043	306,779	169,680	2,790	3,525	2,272	1,160	3,257,642
SANGHA	18,538	26,911	4,245,814	262,084	748,059	2,120	2,426	4,657	4,581	5,315,190
LIKOUALA	276,090	28,770	3,040,383	123,969	1,306,364	6,829	4,067	29,320	3,765	4,819,556
TOTAL	10,340,614	123,042	15,562,626	4,462,993	3,491,874	24,615	37,545	65,160	18,036	34,126,504

Ainsi, la conversion annuelle du couvert forestier en d'autres occupations de sol représente une superficie de 145356 hectares pour cette période.

Le tableau 7 présente une synthèse des pertes globales sur 12 ans et les pertes annuelles par département suivant les produits.

Tableau 7. Synthèse des pertes par département suivant les produits

Département	Pertes de foret en hectares			
	FACET_0010	GAF_0010	GFC_0012	AD_0012
KOUILOU	14,664	19,392	40,321	15,643
NIARI	12,706	28,637	33,195	9,815
BOUENZA	4,178	7,652	14,154	2,051
LEKOUMOU	10,478	14,839	21,850	8,604
POOL	26,049	14,470	44,964	10,140
PLATEAUX	27,307	13,981	29,885	14,689
CUVETTE	14,997	4,062	26,598	16,904
CUVETTE OUEST	15,185	5,773	20,642	9,747
SANGHA	13,643	-3,156	23,830	13,785
LIKOUALA	30,698	6,803	52,298	43,980
TOTAL	169,903	112,452	307,735	145,356
Pertes annuelles	16,990	11,245	25,645	12,113

Conclusion

La carte de changement de couvert forestier en République du Congo pour la période 2000-2012 a été réalisée par le Centre National d'Inventaire et d'Aménagement des Ressources Forestières et Fauniques (CNIAF) avec l'assistance technique de la FAO à travers le Programme ONU-REDD. Elle est élaborée sur la base des trois produits existants, de manière à respecter la définition nationale de la forêt.

Sur la base de cette carte, les forêts de la République du Congo couvrent une superficie de 23.517.000 hectares, soit 69% du territoire national.

Entre 2000 et 2012, 145,000 hectares de forêt ont été perdus, soit un taux moyen de perte annuelle de 0.052%.

La précision a été évaluée en utilisant toutes les sources de données disponibles. La précision générale de la carte est de 90% hors stratification, avec une précision plus forte pour les classes stables (91% et 86%) que pour les pertes (73%).

Ces données vont être mises en rapport avec les données de l'Inventaire Forestier National pour estimer les émissions de CO₂ par strates afin d'établir un niveau de référence pour la CCNUCC.

Bibliographie

Forêts d'Afrique Centrale Evaluées par Télédétection (FACET), 2012. Étendue et perte du couvert forestier en République du Congo de 2000 à 2010. Observatoire Satellital des Forêts d'Afrique Centrale (OSFAC). 110p. <http://osfac.net/component/k2/itemlist/category/184-facet>

GAF, 2013. SGDE Suivi Forestier Extension des Services REDD. S – Rapport des opérations de service pour la République du Congo – phase 3.

GBP, 2003. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf/french/full.pdf>

Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." *Science* 342 (15 November): 850–53.

Data available on-line from: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>

LD, (2006). Lignes directrices 2006 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4: Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Chapitre 3 : représentation cohérente des terres. GIEC, 47p. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_03_Ch3_Representation.pdf

Olofsson, P., Foody, G., Stehman, S., Woodcock, C., 2013. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment* 129 (2013) 122–131.

OFGT 2014. Open Foris Geospatial toolkit, boîte à outils de traitement d'images géospatiales développée par le département Forêt de la FAO. FAO, 2014. Disponible à www.openforis.org

R version 3.2.2 (2015-08-14) -- "Fire Safety" Copyright (C) 2015 The R Foundation for Statistical Computing. <https://cran.r-project.org>

Annexes

Annexe 1 : Illustrations des branches de l'arbre de décision

Annexe 2 : Scripts de production de la carte (R et OFGT)

Annexe 3 : Interface CollectEarth pour l'évaluation de la précision

Annexe 4 : Illustrations Landsat Spot pour l'analyse de la précision des pertes

Annexe 5 : Produits intermédiaires et Arbre de décision initial