LA TÉLÉDÉTECTION EN TANT QU'OUTIL DE MESURE DE LA RÉDUCTION DE LA DÉFORESTATION (REDD)

Moïse TSAYEM DEMAZE

Université du Maine, UMR CNRS 6590 ESO-GREGUM
Chercheur associé à l'IRD, US 140 ESPACE
Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9
Tél. 02.43.83.31.46, Fax 02 43 83 31 92
Moise.Tsayem_Demaze@univ-lemans.fr

Soumis le 11mars 2009; accepté le 17 octobre 2010 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 3-4, p. 245- 257

Résumé :

La Réduction des Emissions de gaz à effet de serre (GES) dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière (REDD) est un mécanisme prôné dans les négociations internationales pour l'élaboration du protocole censé remplacer le protocole de Kyoto après 2012. Dans ces négociations, la télédétection est sollicitée pour fournir des solutions aux difficultés méthodologiques relatives à la mise en œuvre de la REDD. Il se pose la question de savoir comment mesurer la déforestation et la dégradation forestière évitées ou réduites, ainsi que les quantités de GES associées à cette déforestation et à cette dégradation forestière évitée ou réduite. Cet article fait le point sur cette question à partir d'une revue des publications scientifiques récentes en télédétection de la déforestation et de l'exploitation forestière dans la zone intertropicale. La recherche bibliographique effectuée montre que la mesure de la diminution du couvert forestier est faite à plusieurs niveaux (global, régional, national, local) grâce aux images fournies par différents capteurs. Des pays, comme le Brésil ou l'Inde, disposent de systèmes nationaux de monitorage par télédétection, ce qui permet un suivi de la déforestation au niveau national. La télédétection de l'exploitation forestière n'est pas courante et relève encore en grande partie de la recherche, tout comme la mesure des émissions de GES en lien avec les changements d'occupation du sol (déforestation/dégradation forestière). L'article rend compte de la grande variabilité des quantifications par télédétection, avec de nombreuses imprécisions statistiques qui augurent d'une difficile utilisation de la télédétection dans l'optique de la REDD, ce qui souligne la nécessité de recherches méthodologiques complémentaires.

***Mots-clés** : REDD, déforestation évitée, télédétection, forêts tropicales, gaz à effet de serre.*

Remote sensing as a tool to measure avoided deforestation

Abstract

The Reduction of greenhouse gas Emissions due to Deforestation and forest Degradation (REDD) is a mechanism preached in international negotiations for the elaboration of a protocol which is supposed to replace the Kyoto protocol after 2012. In these negotiations, remote sensing is requested to provide solutions to methodological difficulties relating to REDD implementation. It indeed raises the question to know how to measure avoided deforestation and the quantities of greenhouse gas not emitted in the atmosphere thanks to deforestation avoidance. This paper presents knowledge related to this question starting from a review of recent scientific publications in remote sensing of deforestation and forest logging in tropical areas. Bibliographical review shows that measurement of reduction in forest cover is made at several levels (global, regional, national, local) with images provided by various sensors. Countries, like Brazil or India, have national systems of monitoring by remote sensing, which allows a follow-up of deforestation at national level. Remote sensing of forest logging is not current and is still mainly in research, like measurement of greenhouse gas emissions due to land cover and land use changes (deforestation/forest degradation). The paper underlines the great variability of quantifications by remote sensing, with many statistical inaccuracies which forecast a difficult use of remote sensing in the REDD framework. Additional methodological research is needed for an efficient use of remote sensing to support REDD implementation.

***Keywords**: REDD, avoided deforestation, remote sensing, tropical forests, greenhouse gas.*

1. INTRODUCTION

Le constat de la déforestation et de son évolution dans les régions tropicales, en particulier depuis la décennie 1980, a progressivement amené divers acteurs à chercher à mettre en œuvre une gestion dite durable des forêts tropicales (Karsenty et Pirard, 2007a). Ce souhait de gestion durable a été répercuté de manière retentissante au niveau mondial depuis le sommet que les Nations unies ont organisé en 1992 à Rio de Janeiro pour amener la communauté internationale à s'engager dans le développement durable (Tsayem, 2009a et b). Or, la communauté internationale n'a pas réussi à finaliser les discussions et les négociations qui étaient censées déboucher à Rio sur l'adoption d'une convention internationale pour la gestion durable de ces forêts tropicales (Brédif, 2008). Elles sont depuis quelques années prises en compte dans les discussions et les négociations qui se tiennent dans le cadre de la convention sur le changement climatique associée au protocole de Kyoto, notamment parce que le rapport Stern (2006) et le 4ème rapport du GIEC (2007) ont indiqué que la déforestation représente 20 à 25% des émissions mondiales de CO_2. Cette estimation a récemment été revue à la baisse par van der Werf *et al*. (2010) qui ont montré que la déforestation engendre entre 12% et 15% des émissions mondiales de CO_2. Prônée depuis 2005, la Réduction des Emissions de gaz à effet de serre (GES) dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière (REDD) est un mécanisme volontaire qui a vocation à inciter les pays en développement à adopter des mesures pour réduire la déforestation, étant entendu que les pays qui parviendront à réduire effectivement la déforestation seront récompensés soit par des crédits carbone, soit financièrement par un fonds international créé à cet effet (Karsenty et Pirard, 2007b). Les négociations en cours, dont une étape importante a été franchie à Bali en décembre 2007 puis à Copenhague en décembre 2009, ont pour objectif d'intégrer la REDD dans un protocole qui remplacera ou prolongera le protocole de Kyoto après 2012. Bien qu'elles soient considérées largement comme un échec, les négociations de Copenhague ont débouché sur un Accord dont la REDD et les financements internationaux constituent la substance (Lavallée, 2010 ; De Perthuis et Delbosc, 2010; Tsayem, 2010).

Pour que la REDD soit adoptée et entre en application, il faudra au préalable trouver des solutions aux problèmes méthodologiques qui se posent. La quantification des émissions évitées apparaît comme le problème crucial à résoudre. Comment mesurer la déforestation réellement évitée et quantifier les GES non émis dans l'atmosphère suite à l'application de décisions ayant permis d'éviter ou de réduire la déforestation ? Dans les débats en cours au sein des instances internationales (conférences annuelles des pays qui ont ratifié la convention des Nations unies sur le changement climatique et/ou le protocole de Kyoto), la télédétection est préconisée comme outil approprié pour résoudre ce problème méthodologique.

L'objectif de cet article est d'examiner les publications scientifiques récentes pour faire le point des connaissances sur l'utilisation de la télédétection en matière d'évaluation quantitative et de suivi de l'évolution de la déforestation et de l'exploitation forestière dans les pays de la zone intertropicale. Il s'agit de contribuer au débat sur la faisabilité de la REDD en analysant l'apport et les limites de la télédétection en tant qu'outil de mesure des quantités de GES imputables à la déforestation et à la dégradation forestière. La recherche bibliographique, effectuée dans des bases de données internationales (ScienceDirect, ISI Web of Science) entre 2008 et 2010, a été complétée par des entretiens avec des acteurs (ONG et Institutions) et des chercheurs qui expérimentent la REDD, notamment à Madagascar (entretiens en novembre 2008 et en mars-avril 2010).

Après une synthèse des modalités de mise en œuvre de la REDD, l'article discute les principaux résultats des recherches récentes afin de montrer les acquis et les insuffisances à surmonter en vue d'une contribution efficiente de la télédétection dans l'implémentation de ce nouveau mécanisme international. Des tableaux de synthèse sont présentés pour illustrer l'apport et les limites de la télédétection.

2. LES MODALITES DE MISE EN ŒUVRE DE LA REDD

La REDD est actuellement en expérimentation conformément aux recommandations de la conférence de Bali (UNFCCC, 2007). La mise en œuvre de ce mécanisme doit avoir un triple intérêt. Le premier est environnemental et correspond aux effets tant locaux que globaux en termes de réduction des émissions de GES suite à l'évitement d'une quantité de déforestation et de dégradation forestière. Le deuxième est socio-économique et concerne les pays en développement : réduction des taux nationaux de déforestation et de dégradation forestière, réception des récompenses ou des compensations financières. Le troisième est commercial et concerne les pays développés qui participent volontairement aux projets REDD : obtention des crédits carbone commercialisables dans les marchés internationaux.

Au stade actuel des débats et des négociations, il est quasiment acquis que les émissions évitées d'un pays seront calculées par rapport aux émissions de ce pays durant une période de référence (généralement 1990-2005). Les émissions évitées durant la phase d'application de cette initiative (période post Kyoto ou période Kyoto II) devront être certifiées pour donner lieu aux récompenses financières (pour les pays en développement qui auront réduit leurs émissions en appliquant des politiques qui entraînent la baisse de la déforestation et de la dégradation forestière) et aux crédits carbone ou aux quotas d'émissions à utiliser ou à commercialiser (par les pays développés qui auront financé les projets REDD ayant permis la réduction des émissions). La certification de la réduction des émissions d'un pays sera validée par comparaison avec un scénario de référence qui envisage l'évolution des émissions selon l'hypothèse que les

choses se passent comme d'habitude (« business as usual »). La période 2008-2012 (période d'application de l'actuel protocole de Kyoto) est considérée comme période test pour la mise en œuvre de la REDD (figure 1).

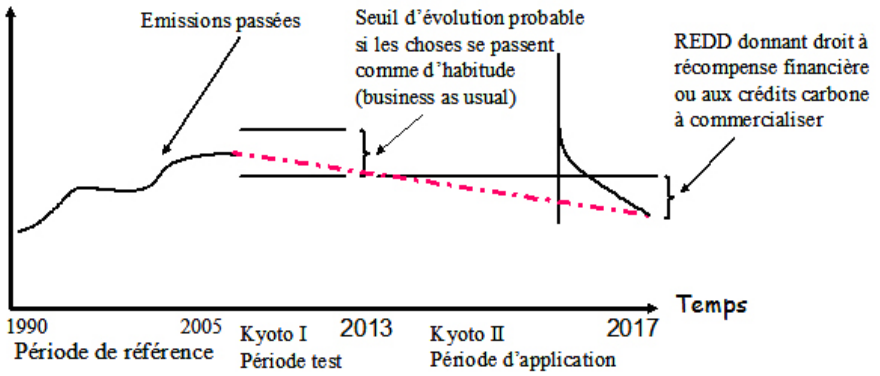


Figure 1. Synthèse des préconisations pour la mise en œuvre de la REDD.
(Tsayem, 2009, adapté des travaux de Schlamadinger *et al*., 2005 ; Mollicone *et al*., 2007 ; Hôlne *et al*., 2007 ; Skutsch *et al*., 2007)
Synthesis of recommendations for REDD implementation

Telle qu'elle est envisagée (figure 1), la REDD pose de nombreuses questions techniques et méthodologiques qui devraient être résolues avant sa mise en œuvre. Ces questions sont débattues dans de nombreuses publications (Wertz-Kanounnikoff et Tubiana, 2007 ; Wertz-Kanounnikoff et Rubio Alvarado, 2007 ; Wertz-Kanounnikoff, 2007 ; Pirard, 2008 ; Karsenty et Pirard, 2008b ; Loisel, 2008).

Un premier groupe de questions porte sur les scénarios de référence par rapport auxquels la déforestation et la dégradation forestière évitées seront calculés et comparés. Pour un pays comme le Brésil par exemple, on considérera qu'il y a eu évitement de la déforestation et de la dégradation forestière si la réduction du couvert forestier brésilien entre 2013 et 2017 est inférieure à la réduction enregistrée entre 1990 et 2005. La comparaison par rapport à une période de référence ne va-t-elle pas favoriser les pays qui ont déforesté massivement durant cette période de référence ? Pourquoi mesurer les efforts de lutte contre la déforestation en se référant à l'évolution passée de la déforestation et de la dégradation forestière dans un pays ?

Le deuxième groupe de questions concerne le calcul du prix des émissions évitées, étant donné que la REDD donnera droit aux récompenses financières équivalentes aux quantités de gaz à effet de serre non émises dans l'atmosphère du fait de l'évitement de la déforestation et de la dégradation forestière. Sur quelles bases seront fixés les prix du CO_2 évité suite à la réduction de la déforestation et de la dégradation forestière ? La tonne de CO_2 évitée en Afrique centrale aura-t-elle la même valeur ou le même prix que la tonne de CO_2 évitée en Amazonie brésilienne par exemple ? En conférant une valeur marchande au CO_2 par les prix qui seront fixés, ne risque t-on pas de « valoriser financièrement » la déforestation et la dégradation forestière dans certains pays ? Les récompenses ou les compensations seront-elles versées aux populations ou aux Etats ?

Le troisième groupe de questions porte sur le critère dit de l'additionnalité. Ce critère devra valider le fait que la déforestation et la dégradation forestière évitées n'auraient pas pu avoir lieu en l'absence de la mise en œuvre de la REDD. Si on reprend l'exemple du Brésil, ce critère signifie que s'il y a baisse de la déforestation et de la dégradation forestière dans ce pays entre 2013 et 2017, il faudra démontrer que cette baisse n'aurait pas pu avoir lieu si les choses avaient continué de fonctionner au Brésil comme d'habitude (« busines as usual »), c'est-à-dire sans la REDD. Des publications récentes illustrent le problème de l'évaluation de la déforestation évitée au Brésil. Dans l'hypothèse que les choses se déroulent comme d'habitude, une étude intégrant les images satellites (Landsat TM) dans un modèle de simulation (figure 2), permet de prévoir l'évolution de la déforestation à l'horizon 2050 (Soares-Filho *et al*., 2006). Cette étude indique que le couvert forestier dense amazonien du Brésil passera de 5,3 millions de km^2 en 2006 à 3,2 millions de km^2 en 2050 si des mesures spécifiques du type REDD ne sont pas prises et appliquées (Moutinho, 2007). La réduction du couvert forestier ainsi estimée (-40%) correspondrait à l'émission d'environ 32 Pg de carbone dans l'atmosphère (Soares-Filho *et al*., 2006).

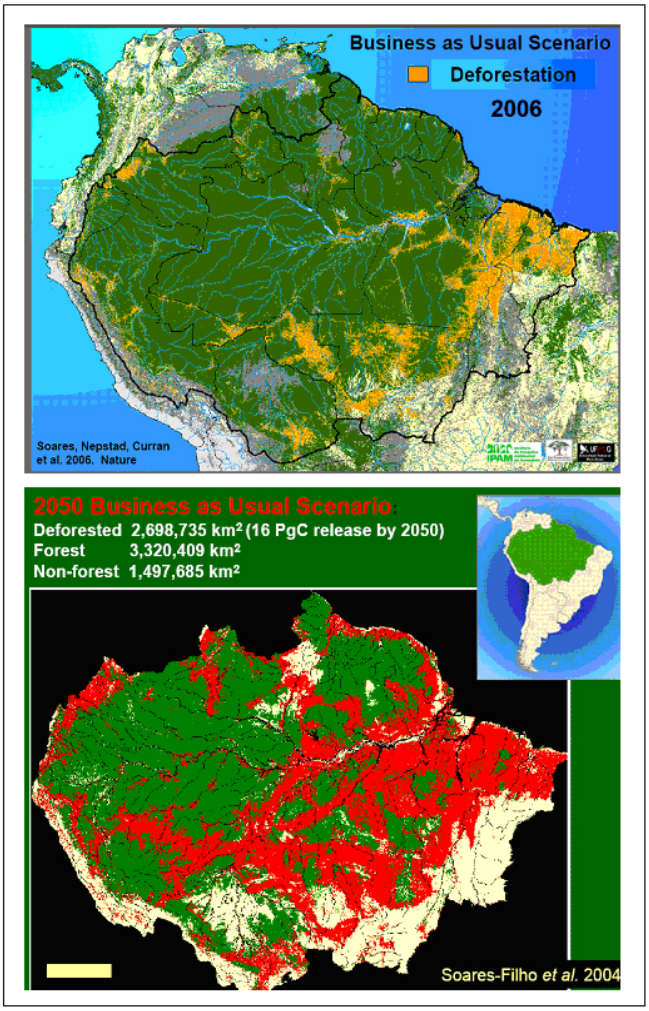


Figure 2. La déforestation en Amazonie brésilienne quantifiée et simulée par traitement d'images satellites (adapté de Moutinho, 2007). En rouge, les espaces qui seront déforestés en 2050 (d'après le modèle de simulation)
Deforestation measurement and simulation in Brazil Amazon with the help of remote sensing. Areas en red are supposed to be deforested in 2050 according the to simulation model

Si la REDD est adoptée et appliquée par le Brésil, ce type de modèle de prédiction de l'évolution de la déforestation pourra être utilisée pour calculer la différence, à un moment donné (2017 par exemple), entre la déforestation envisagée et la déforestation survenue réellement, la différence enregistrée étant censée être l'effet de l'application de la REDD. Cet exemple pose la question de savoir comment mesurer la déforestation et la dégradation réellement évitées en étant certain qu'elles sont dues à l'application de politiques spécifiques. Certains auteurs suggèrent l'évaluation à posteriori des politiques publiques ayant effectivement entraîné la baisse de la déforestation et de la dégradation forestière (Combes *et al*. 2008). Comment mesurer les quantités de carbone ou de CO_2 évitées suite à la réduction de la déforestation et de la dégradation forestière ? Comment faire face au problème de fuite de la déforestation (le fait que la mise en œuvre de la REDD entraîne le déplacement de la déforestation vers des régions dans lesquelles la REDD ne serait pas mise en œuvre) ? Comment mettre en place des systèmes de suivi de la déforestation et de la dégradation forestière (les systèmes MRV : Monitoring, Reporting and Verification) ?

3. LE RECOURS A LA TELEDETECTION

La télédétection est suggérée quasi unanimement comme outil de mesure de la déforestation évitée et des émissions de GES associées à cette déforestation évitée. L'importance ainsi accordée à la télédétection par la communauté internationale a amené les agences spatiales (European Space Agency par exemple), les organismes d'appui à la coopération Nord-Sud (l'Agence Française de Développement par exemple), les instituts de recherche scientifique et méthodologique appliquée aux pays en développement (le Joint Research Center et l'Institut de Recherche pour le Développement par exemple) à s'intéresser à la REDD et à s'impliquer dans le développement de méthodes à base de télédétection en vue de la mise en œuvre de ce mécanisme. Plusieurs études pilotes ou expérimentales sont en cours afin de fournir des résultats qui pourront être utilisés de manière opérationnelle dans le cadre d'un accord international comprenant la REDD (Forest Peoples Programme, 2008 ; CETRI, 2008). Pour alimenter les débats, nous proposons ci-

après un état de l'art qui fait le point sur la télédétection de la déforestation et de l'exploitation forestière en milieu tropical et récapitule les points forts et les points faibles à prendre en compte en vue de l'utilisation de la télédétection comme outil d'appui à la mise en œuvre et au suivi de la REDD.

3.1. La télédétection de la déforestation en milieu tropical

3.1.1. Aux niveaux global, continental et régional

Les images fournies par les capteurs à large champ comme l'Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et VEGETATION de Spot sont de plus en plus mises à contribution pour produire des cartes du couvert végétal aux niveaux global, continental et régional (tableau 1). Les travaux effectués dans le cadre du projet TREES s'inscrivent dans cette optique (Achard *et al*., 2007). Des scènes à résolution spatiale de l'ordre du kilomètre, couvrant au sol une surface d'environ 2500 km de côté, ont été compilées et traitées pour mettre en évidence l'étendue des massifs forestiers tropicaux et les modifications qu'ils subissent sous forme de déforestation. Les enregistrements à résolution spatiale plus haute (Landsat MSS et TM, Spot XS), ont ensuite été utilisés pour valider les classifications et les interprétations d'images à large champ ; c'est l'approche top-down déployée notamment par le Joint Research Center (DeFries *et al*., 2007).

Tableau 1. Principales cartes globales d'occupation du sol issues d'images à résolution spatiale entre 1km et 300 m.
Main global land cover maps derived from satellites images with spatial resolution between 1 km and 300 m.

Titre de la carte	Etendue	Capteur utilisé	Traitements	Publication
IGBP discover Map	Globale	NOAA-AVHRR	Indices de végétation (synthèse de 12 indices mensuels entre 1992 et 1993)	Loveland *et al*., 1999
University of Maryland (UMD) Map	Globale (1km de résolution spatiale)	NOAA-AVHRR	Classification d'une compilation de 41 images multidates acquies entre 1992 et 1993	Hansen *et al*., 2003
TREES Map	Zone intertropicale (1km de résolution spatiale)	NOAA-AVHRR	Classification d'une mosaïque d'images acquises entre 1992 et 1993	Achard *et al*., 2001
FRA-2000 Map	Globale (1km de résolution spatiale)	NOAA-AVHRR	Spatiocartographie réalisée à partir de la base de données de l'IGBP	FAO, 2001
MODIS-land-cover (MODLAND)	Globale (1km de résolution spatiale)	TERRA MODIS	Synthèse de 12 images mensuelles acquises entre 2000 et 2001	Friedl *et al*., 2002
Global Land-Cover 2000 (GLC-2000)	Globale (1km de résolution spatiale)	SPOT VEGETATION	Classification de la mosaïque d'images quotidiennes de l'année 2000 (365 images)	Bartholomé and Belward, 2005
Vegetation continuous fields	Globale (1km de résolution spatiale)	NOAA-AVHRR	Indices annuels de phénologie	DeFries *et al*., 2000
Vegetation continuous fields	Globale (500 m de résolution spatiale)	TERRA MODIS	Indices annuels de phénologie	Hansen *et al*., 2003
GLOBCOVER	Globale (300 m de résolution spatiale)	Envisat MERIS	Synthèse de 6 mosaïques bimensuelles d'images acquises entre 2005 et 2006	Arino *et al*., 2007

Source : Achard *et al.*, 2007

Cette approche a permis de cartographier les zones écologiques et de repérer les fronts de déforestation massive ou « points chauds » de déforestation (Mayaux *et al*., 2000 et 2005 ; Mayaux et Lambin, 1997 ; Lambin et Ehrlich, 1997 ; Malingreau *et al*., 1989). C'est ainsi que les cartes de végétation de l'Afrique centrale ont été établies (Laporte *et al.*, 1995 et 1998 ; Achard *et al.*, 2002 ; Mayaux *et al*., 2003). A ce niveau scalaire, les cartes sont peu précises et se limitent généralement à la distinction du binôme forêt/non forêt et à la localisation des zones de déforestation active ou de dégradation forestière (figure 3).

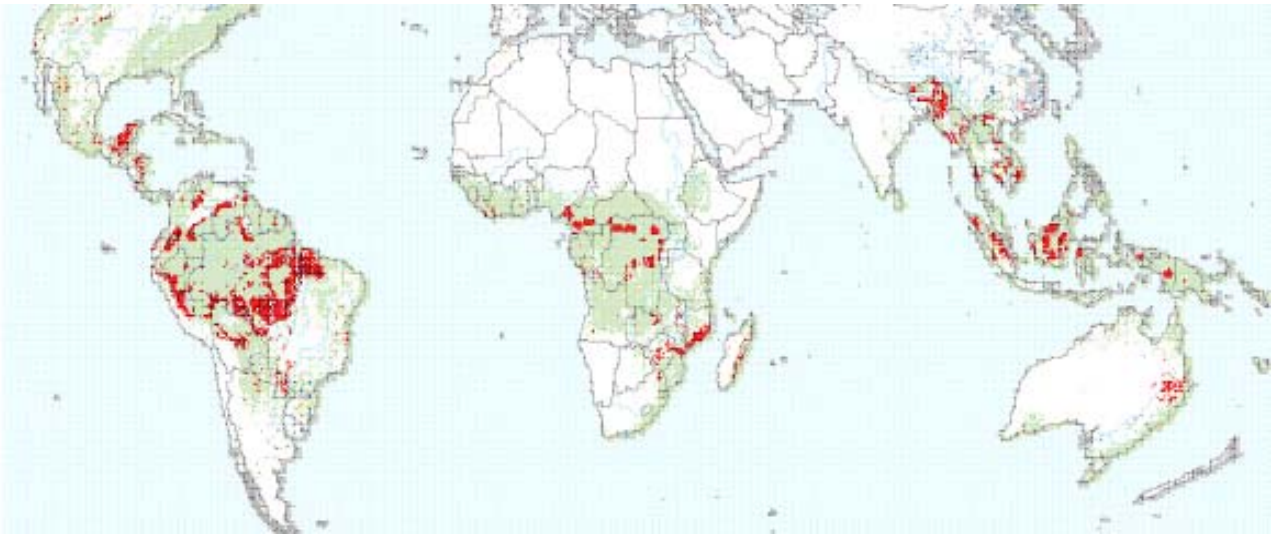


Figure 3. Zones de déforestation active détectée en zone intertropicale à l'aide du capteur AVHRR de NOAA (Source : Mayaux *et al*., 2005)
Active deforestation areas (deforestation hot spots) in the tropics derived from NOAA AVHRR images

Avec les produits GlobCover, issus du traitement d'images ENVISAT-MERIS, des cartes globales du couvert végétal, avec une résolution spatiale de 300 m, sont maintenant disponibles (http://postel.mediasfrance.org/fr/PROJETS/Pre-operationnels-GMES/GLOBCOVER/). Arino *et al.* (2008) ont utilisé ces produits pour élaborer des cartes du couvert végétal, aussi bien au niveau global qu'au niveau continental (http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin136/bul136d_arino.pdf).

Une autre méthode d'évaluation au niveau global ou régional consiste à utiliser les images à haute résolution spatiale (Landsat, Spot, IRS) sur un échantillon de sites, et à généraliser ensuite les résultats à l'ensemble d'un continent ou d'une zone écologique par extrapolation statistique. La FAO a procédé de cette manière pour évaluer les superficies forestières et leur diminution dans les régions tropicales, en parallèle avec les inventaires forestiers nationaux (FAO, 2001a et b ; FAO, 1996). Une carte du couvert forestier de l'Afrique Centrale a été élaborée à partir de la classification d'images Landsat TM (Achard *et al*., 2002). Généralisée à l'ensemble de la zone intertropicale, cette approche cartographique a fait état d'une déforestation portant sur 5,8 millions d'ha en plus de 2,3 millions d'ha de forêt dégradée (Achard *et al*., 2002). Un état des forêts du bassin du Congo en 2008 a été publié en 2009 à la suite d'une évaluation réalisée notamment à partir de l'utilisation d'images Landsat (De Wasseige *et al*., 2009). A l'aide de ce type d'images, une estimation de l'évolution de la déforestation, prenant en compte les pertes et les gains de surfaces forestières entre 1990 et 2000, a été réalisée en utilisant l'approche orientée objet pour faire des classifications et produire des statistiques (Duveiller *et al*., 2008).

Les évaluations par télédétection montrent de nombreuses différences dans les statistiques obtenues (tableau 2), même pour les régions et les années de référence identiques ou proches (Mayaux *et al*. 1998 ; Laporte *et al*, 1995 ; Ramankutty *et al*., 2007 ; UNFCCC, 2006 ; Tsayem et Fotsing, 2004). Bien qu'elles permettent de localiser et de visualiser les zones touchées par la déforestation, ces évaluations par télédétection au niveau continental et/ou régional demeurent relativement imprécises. Du fait de la faible résolution spatiale des images, les documents cartographiques produits offrent une vue globale et instantanée, souvent limitée à la discrimination du binôme forêt/non forêt, sans indication sur les types d'occupation du sol compris dans le vocable déforestation. La dégradation forestière est difficilement détectée et quantifiée à ce niveau d'observation. En dépit des efforts récents, les dynamiques de déforestation sont rarement mises en évidence, d'où l'absence de véritables cartes d'évolution spatio-temporelle de la déforestation aux niveaux global, continental et régional.

Tableau 2. Déforestation annuelle moyenne dans les régions tropicales (10^6ha)
Source : UNFCCC, 2006
Average annual deforestation in tropical areas (10^6ha)

Zones	Années 1980 (DeFries *et al.*, 2002)	Années 1990 (FAO, 2006)	**Années 1990** (DeFries *et al.*, 2002)	**Années 1990** (Achard *et al.*, 2004)	**Période 2000-2005** (FAO, 2006)
Amérique tropicale	4,426	4,165	**3,982**	**4,41**	**4,482**
Afrique tropicale	1,508	3,362	**1,325**	**2,35**	**3,058**
Asie tropicale	2,158	2,578	**2,742**	**2,84**	**2,851**
Total	8,092	10,105	**8,049**	**9,60**	**10,391**

Les mesures de la FAO (1980s et 1990s) sont issues d'un mixage d'inventaires forestiers et de dires d'experts; alors que celles de 2006 sont issues de données de télédétection, comme les mesures de DeFries *et al*., et de Achard *et al*. Les statistiques issues des données de télédétection sont en gras

3.1.2. Au niveau local

Avec l'augmentation progressive de la résolution spatiale des images, de 80 m en 1972 pour Landsat MSS à 10 m aujourd'hui pour Spot 5 en mode multispectral et jusqu'à 2,5 m en mode panchromatique, pour ne citer que ces exemples très courants, les études sur la déforestation au niveau local dans la zone intertropicale se multiplient (tableau 3). Elles proposent des diagnostics ainsi que des analyses diachroniques pour expliquer l'évolution de la déforestation. En plus des enregistrements satellites, les photographies aériennes sont parfois utilisées. Il s'en suit une certaine précision dans les mesures du taux de déforestation et des détails sont fournis sur la nature des parcelles qui ont remplacé la forêt (Dibi N'Da *et al*., 2008 ; Tsayem *et al*., 2001). A ce niveau d'observation, les résultats des évaluations suggèrent la complexité du phénomène de déforestation en milieu tropical et tendent à relativiser son ampleur en mettant en évidence les processus de recul et de reprise de la forêt dans de nombreuses localités. Ainsi, pour la forêt dense humide de la région de Bertoua au Cameroun, les calculs réalisés sur les images Landsat TM font état d'un taux annuel de déforestation de 0,5 % (Mertens et Lambin, 1997). Pour la même région, l'analyse des photographies aériennes couplées aux images Landsat TM révèle une dynamique du couvert végétal caractérisée par une lente progression de la forêt aux dépens de la savane adjacente (Youta-Happi, 1998). Une tendance similaire est observée dans les régions forestières de la République Démocratique du Congo (Runge et Neumer, 2000). Pour l'ensemble du Bassin du Congo, les calculs effectués par Duveiller *et al*. (2008) sur les images Landsat (figure 4), indiquent un taux de déforestation de 0,21% par an et un taux de dégradation forestière (exploitation forestière par extraction du bois) de 0,15% par an.

Tableau 3. Disponibilité des capteurs à résolution moyenne pour détecter la déforestation et la dégradation forestière
Availability of sensors with average resolution to detect deforestation and forest degradation

Pays	**Satellite et capteurs**	**Résolution spatiale**	**Fonction**
USA	Landsat 5 TM	30 m	Acquisition et fourniture d'images optiques tous les 16 jours
USA	Landsat 7 ETM+	30 m et 15 m (panchro)	Fonctionnement perturbé depuis 2003 (lignes vierges)
USA/Japon	TERRA ASTER	15 m	Acquisition et fourniture d'images optiques à la demande (pas d'acquisition routinière, pas de couverture complète)
Inde	IRS-P2 LISS 3 et AWIFS	23 m et 56 m	Acquisition expérimentale satisfaisante
Chine/Brésil	CBERS-2 HRCCD	20 m	Acquisition expérimentale satisfaisante
Grande Bretagne / Turquie / Algérie	DMC	30 m	Acquisition et fourniture d'images optiques
France	SPOT-5 HRG	2,5 m à 20 m	Acquisition et fourniture d'images optiques
Japon	ALOS PALSAR	50 m	Acquisition et fourniture d'images radar

Source : Achard *et al*., 2007



Figure 4. La déforestation mesurée sur des extraits d'images Landsat TM de 1990 (a et c) et ETM+ de 2000 (b et d) en Afrique centrale (source : Duveiller *et al*., 2008). Les contours des endroits déforestés sont dessinés sur les extraits d'images.
Deforested area measured on 1990 Landsat TM extract (a and c) and on 2000 Landsat ETM+ extract (b and d). The detected deforested area between these two dates is delineated and overlaid over the images.

Au niveau local, la télédétection permet d'affiner l'analyse de la déforestation. La diversité des formes de défrichement est mise en évidence et les caractéristiques spatiales des parcelles sont décrites de manière qualitative et quantitative. Toutefois, la variabilité des statistiques amène à s'interroger sur la signification réelle des chiffres et des pourcentages publiés. En l'absence d'une définition claire et homogène de la déforestation, une imprécision subsiste sur la nature des parcelles « déforestées ». La réalité géographique traduite par les statistiques sur l'emprise de la déforestation n'est pas explicite surtout que cette déforestation semble correspondre à un phénomène géographique au contenu spatial divers et fluctuant.

3.2. La télédétection de l'exploitation forestière en milieu tropical

C'est seulement depuis quelques années que la télédétection est utilisée pour la caractérisation de l'exploitation forestière dans les régions tropicales. Des travaux récents montrent que les prélèvements d'arbres effectués en forêt tropicale trouent la canopée et laissent des traces qui peuvent être détectées par les satellites d'observation de la Terre (Duveiller *et al*., 2008 ; Laporte *et al*., 2007 ; Gond, *et al*., 2003). A partir des classifications d'images Landsat ETM+ et Spot, complétées par l'analyse des textures et les mesures de terrain, plusieurs travaux ont décrit et quantifié les empreintes de l'exploitation forestière sélective en Amazonie (Asner *et al*., 2005 et 2002 ; Brandão et Souza, 2005 ; Matricardi *et al*. 2001). Dans le bassin du Congo, l'exploitation légale qui est très sélective (1 arbre par ha) n'entraînerait pas de trouées de taille importante pour une détection optimale par télédétection (Laporte *et al*., 2002). Les recherches effectuées s'appuient essentiellement sur le traitement d'images Landsat et Spot dont les résolutions

spatiales, variant de 30 à 2,5 mètres, ne paraissent pas suffisamment fines pour rendre compte de l'exploitation forestière très sélective dans des concessions forestières réduites comme les ventes de coupe au Cameroun.

Les essais récents d'identification de l'exploitation forestière dans le Bassin du Congo s'appuient essentiellement sur la détection et la cartographie des pistes d'exploitation forestière. Plusieurs méthodes ont été testées pour repérer ces pistes et essayer de les cartographier : numérisation après photo-interprétation des compositions colorées (Laporte *et al*., 2003 ; Van De Pol *et al*., 2004 ; Auzel, 2003), extraction automatique (Gond *et al*., 2003), classification spectrale et analyse texturale (De Wasseige et Defourny, 2004), classification par approche orientée objet (Duveiller *et al*., 2008).

Les connaissances demeurent lacunaires en matière d'utilisation d'images satellites à des fins de détection, d'analyse et de suivi de l'exploitation forestière alors que cette activité s'étend de manière considérable, notamment dans les forêts du bassin du Congo, avec une grand part d'illégalité (Bigombe Logo, 2004). Avec la REDD, les besoins de gestion des forêts soulignent de plus en plus la nécessité de disposer d'informations spatialisées pouvant permettre d'évaluer les assiettes de coupe, les volumes prélevés, les impacts environnementaux en terme d'évolution du couvert forestier et de quantités de GES associées à cette évolution du couvert forestier.

3.3. Potentiel de la télédétection dans la perspective de la mise en œuvre de la REDD

La littérature montre qu'il existe des données compatibles avec les périodes retenues pour l'établissement des scénarios de référence (tableaux 3 et 4). Les archives Landsat et Spot, par exemples, couvrent cette période (1990-2005), même si les données sont sans doute défectueuses ici ou là (problèmes relatifs au taux élevé de couverture nuageuses pour beaucoup d'images optiques de la zone intertropicale). Les systèmes nationaux de monitorage par télédétection existent dans quelques pays et leur permettent d'évaluer et de suivre l'évolution des surfaces forestières et des surfaces déforestées (cas du Brésil et de l'Inde par exemples). Des pays comme le Peru, la Bolivie et l'Indonésie, sont en train de construire et de développer leurs systèmes nationaux de monitorage par télédétection, contrairement à d'autres pays, comme ceux d'Afrique centrale, dans lesquels le déficit en infrastructures de veille spatiale est très important. L'IRD a élaboré pour la Guyane française une méthodologie de traitement d'images Spot qui a permis d'établir une mosaïque d'images couvrant tout le territoire (Petit *et al*, 2007 ; Stach *et al*., 2009 ; Eva *et al*., 2010). Cette méthodologie est utilisée dans le cadre de l'application du protocole de Kyoto par la France, notamment en ce qui concerne la déclaration des stocks (puits) de CO2 (Stach *et al*., 2007 et 2009).

Tableau 4. Utilité des capteurs optiques à différentes résolutions pour le monitorage de la déforestation
Utility of optical sensors with various resolutions for the monitoring of deforestation

Résolution spatiale	**Exemple de capteurs**	**Utilité pour le monitorage**	**coût**
Très haute (< 5m)	IKONOS, QuickBird	Validation locale des résultats obtenus avec des capteurs large champ	Très élevé
Haute (entre 10m et 60 m)	Landsat, Spot HRV, AWIFS LISS 3, CBERS	Supports pour l'identification de la déforestation et de la dégradation forestière	Faible pour les données d'archives, élevé pour les données actuelles ou récentes
Moyenne	MODIS, Spot VEGETATION	Fiable pour le monitorage annuel : identification des zones de déforestation massive (> 10-20 ha), repérage des hot spot pour le suivi avec les images de haute et très haute résolution	Faible, images fournies gratuitement

Source : DeFries *et al*., 2007

Les images issues de ces capteurs optiques sont très utilisées pour le monitorage de la déforestation, alors que les images issues de capteurs radar (ERS1/2 SAR, JERS-1, Envisat-ASAR, ALOS PALSAR), malgré leur potentiel démontrés dans des études pilotes, ne sont pas encore très utilisées de manière opérationnelle pour le monitorage de la déforestation dans les régions tropicales.

La déforestation, définie comme étant la perte intégrale du couvert forestier dans un territoire suite à la conversion de la forêt en pâturages par exemple, apparaît comme un phénomène que la télédétection permet de détecter et de quantifier de manière relativement satisfaisante, à travers différentes méthodes : interprétation visuelle, photo-interprétation assistée par ordinateur, classifications d'images, cartographie à partir des mosaïques d'images, etc. La dégradation forestière, définie comme étant une diminution du taux de couverture forestière suite aux prélèvements épars d'arbres (exploitation forestière par exemple), s'avère difficile à mesurer avec précision. Elle fait encore l'objet de recherches qui s'appuient notamment sur les images à très haute résolution spatiale (Spot 5, IKONOS). Les quantités de GES émises suite à la déforestation et à la dégradation forestière, ou, à contrario, les quantités de GES non émises suite à l'évitement à ou la réduction de la déforestation et de la dégradation forestière, sont difficiles à mesurer directement par télédétection (UNFCCC, 2006). Des modèles associant la télédétection sont proposés pour mesurer les émissions de carbone résultant de la déforestation (tableaux 5 et 6). Les résultats sont très hétérogènes, variant du simple au double, y

compris lorsque les mesures ont été effectuées par télédétection, que ce soit au niveau global ou au niveau continental (Ramankutty *et al*., 2007 ; UNFCCC, 2006). Ils relèvent encore essentiellement de la recherche (Grinand *et al*., 2008). Les données radar sont peu utilisées, malgré l'avantage de leur caractère tout temps (cloud free) qui est potentiellement très intéressant pour les régions tropicales (Dikongo Ndjomba *et al*., 2008).

Tableau 5. Exemples d'inventaires de stocks de carbone en forêt tropicale
Examples of carbon stocks inventories in tropical forest

Produit	**Echelle**	**Limites/insuffisances**	**Coût**
Inventaires forestiers classiques	Nationale ou régionale	Beaucoup ne sont pas à jour et quelques inventaires récents portent concernent les forêts d'intérêt commercial	Elevé
Inventaires forestiers avec des données additionnelles de télédétection sur la canopée ; données mises à jour sur les stocks de biomasse à l'aide de nouvelles images satellites haute résolution pour identifier les changements dans la canopée (modèles reliant la densité de la canopée à la biomasse)	Nationale ou régionale	Inventaires généralement focalisés sur les forêts ayant un intérêt commercial	Elevé pour la phase d'inventaire initial au sol, moyen à faible pour la phase de mise à jour
Inventaires FAO	Nationale, continentale, zonale et globale	Compilations d'inventaires nationaux souvent peu fiables	faible

Source : DeFries *et al*., 2007

Tableau 6. Quantification des émissions de carbone suite à la déforestation en zone tropicale (GtC/an)
Quantification of carbon emissions due to deforestation in tropical zone (GtC/an)

Région	**Période 1981-1990** (Fearnside, 2002)	**Période 1980-1995** (Malhi et Grace, 2000)	**Années 1990** (Houghton, 2003)	**Années 1990** (DeFries *et al*., 2002)	**Années 1990** (Achard *et al*., 2004)
Amérique	0,94	0,94	0,75	0,43	0,441
Afrique	0,42	0,36	0,35	0,12	0,157
Asie	0,66	1,08	1,09	0,35	0,385
Total	2,00	2,40	2,20	0,91	0,983

Source : UNFCCC, 2006

Toutes les mesures sont obtenues par utilisation de modèles. Pour les deux dernières colonnes, les données de télédétection ont été utilisées pour alimenter les modèles.

La variabilité statistique des estimations, et les imprécisions qui en découlent, montrent que des efforts importants doivent être faits pour standardiser les méthodes de traitement d'images afin que la télédétection soit utilisée de manière opérationnelle et satisfaisante dans la perspective de la mise en œuvre de la REDD. Si la mesure et le suivi de l'évolution de la déforestation peuvent être faits de manière routinière, il n'en est pas de même pour les émissions de GES dont le seul qui est mesuré, de manière indirecte à travers la quantification du carbone, est le CO2. C'est dans ce domaine que des recherches méthodologiques doivent être poursuivies et approfondies. Parallèlement à ces recherches méthodologiques, il convient d'harmoniser les définitions des concepts clés qui sont fondamentaux dans la REDD : forêts, déforestation et dégradation forestière. De nombreuses imprécisions statistiques découlent de l'utilisation de définitions différentes (Tsayem et Fotsing, 2004 ; Tsayem, 2002). Les instances internationales qui abritent les débats sur la REDD devraient veiller à ce que l'adoption éventuelle de la REDD soit accompagnée et encadrée par des procédures méthodologiques cohérentes et homogènes quant aux termes clés et aux traitements à appliquer aux images pour produire des statistiques sur la déforestation évitée ou réduite, et sur les émissions de GES associées à cette déforestation évitée ou réduite.

4. CONCLUSION

Cette étude bibliographique montre que dans le contexte actuel de mondialisation des préoccupations environnementales, la télédétection est sollicitée en tant qu'outil méthodologique devant contribuer à la mise en œuvre et à l'évaluation du fonctionnement de la REDD. Pour que la télédétection réponde de manière satisfaisante à cette attente, il faudrait au préalable trouver des solutions aux difficultés méthodologiques relatives non seulement à la complexité même de la déforestation évitée ou réduite, mais aussi aux contraintes inhérentes aux caractéristiques des images satellites et aux traitements appliqués à ces images pour mesurer et suivre l'évolution de l'application de ce mécanisme émergeant. Ces difficultés rendent difficiles l'utilisation d'images satellites à des fins de mesure directe des quantités de GES émises ou économisées suite à la déforestation ou à la déforestation évitée. Des lacunes importantes subsistent quant à l'évaluation de la dégradation forestière, qui se déroule, notamment en Afrique centrale, sous forme d'exploitation forestière plus ou moins industrielle et de prélèvement du bois en forêt. L'engouement international suscité par la REDD offre des opportunités pour des recherches méthodologiques devant permettre des progrès attendus en télédétection. C'est dans cette perspective que la FAO réalise son état des forêts du monde 2010 en faisant abondamment appel à la télédétection dans l'ensemble du monde (FAO, 2008 ; FAO *et al*., 2009). Elle y travaille depuis 2008, en organisant des réunions et des consultations d'experts pour amener la communauté des télédétecteurs à asseoir et à affiner les méthodes de traitement d'images satellites qui pourraient ensuite être utilisées dans le cadre de la REDD. Il est utile que des travaux méthodologiques, dont un inventaire vient d'être publié (GOFC-GOLD, 2009), se fassent parallèlement avec des concertations pour harmoniser les définitions et les nomenclatures relatives à l'évaluation de la déforestation et de la dégradation forestière.

Références

Achard F., DeFries R., Eva H., Hansen M., Mayaux P., Stibig H.J., 2007. Pan-tropical monitoring of deforestation. Environmental Research Letters, doi :10.1088/1748-9326/2/4/045022 (11p).

Achard, F., Eva, H., Stibig, H. J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., and Malingreau, J.P.- 2002- Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. Science, 297: 999-1003.

Arino O, Bicheron P, Achard F, Latham J, Witt R, Weber J.L., 2008, The most detailed portrait of Earth, ESA Bulletin (European Space Agency), 136: 24-31.

Asner G.P., Keller M., Pereira R., Zweede J.C., 2002. Remote sensing of selective logging in Amazonia. Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. Remote Sensing of Environment, n° 80, p.p. 483-496.

Asner G.P., Knapp D.E., Broadbent E.N., Oliveira P.J.C., Keller M., Silva J.N., 2005. Selective logging in the Brazilian Amazon. Science, vol. 310, p.p. 480-482.

Auzel P. 2003- Real time monitoring of logging activities using remote sensing, Technical report prepared for Forest Monitors, 41 p.

Bellassen V., Gitz V., 2008. Reducing emissions from deforestation and degradation in Cameroon. Assessing costs and benefits. Ecological Economics, doi :10.1016/j.ecolecon.2008.03.015.

Bigombe Logo P., 2004. Les populations locales et autochtones à l'épreuve de l'exploitation illégale des forêts au Cameroun : entre culture de l'impunité et exigence d'une reconfiguration du pouvoir dans la gestion des forêts, CERAD, Yaoundé, 19 p.

Brandão, A.O., C.M, Souza J.R., 2005. Mapping unofficial roads with Landsat images : A new tool to improve the monitoring of Brazilian Amazon forest. International Journal of Remote sensing.

Brédif H., 2008. Référentiels de durabilité forestière : l'universalité en question. Natures Sciences Sociétés, n°16, p.209-219.

CETRI, 2006. Changements climatiques : impasses et perspectives. Points de vue du Sud. Alternatives Sud, n°2, Syllepse, 209 p.

Combes Motel P., Pirard R., Combes J.-L., 2008. A methodology to estimate impacts of domestic policies on deforestation : compensated successful efforts for « avoided deforestation » (REDD). Ecological Economics, doi:10.1016/j.ecoloecon.2008.06.001.

De Wasseige C, Devers D, De Marcken P, Nasi R, Eba A, Atyi R, Mayaux P (Eds) 2009, Les Forêts du Bassin du Congo - Etat des Forêts 2008, Luxembourg: Office des publications de l`UE, 2009 http://www.observatoire-comifac.net/

De Wasseige C. et Defourny P., 2004. Remote sensing of the logging activities for the tropical forest management in Forest Ecology and Management, 188: 161- 173.

DeFries R., Achard F., Brown S., Herold M., Murdiyarso D., Schlamadinger B., De Souza Jr. C., 2007. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. Environmental Science & Policy, n° 10, p. 385-394.

DeFries R., Achard F., Brown S., Herold M., Murdiyarso D., Schlamadinger B., de Souza Jr C., 2007. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. Environmental Science and Policy, n° 10, p.385-394.

Dibi N'Da H., Kouakou N'Geussan E., Egnankou Wadja M., Affian K., 2008. Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le Parc National de la Marahoué (Côte d'Ivoire), Revue Télédétection, p.17-34.

Dikongo Ndjomba C., Rudant J.P., Lardeux C., Roussel G., Frison P.L., 2008. Apport de l'imagerie radar pour le suivi de la déforestation des forêts tropicales du bassin Congo : cas des forêts de la RDC et des forêts périurbaines de Libreville. Communication présentée au colloque Télédétection et gestion des ressources, Tananarive, novembre 2008.

Duveiller, G., Defourny, P., Desclée, B., Mayaux, P., 2008. Deforestation in Central Africa: Estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically-distributed Landsat extracts. Remote Sensing of Environment 112: 1969-1981.

Eva H.D., Carboni S., Achard F., Stach N., Durieux L., Faure J.-F., Mollicone D., 2010. Monitoring forest areas from continental to territorial levels using a sample of medium spatial resolution satellite imagery, ISPRS *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 65, Issue 2, March 2010, Pages 191-197*

FAO, 2008. Evaluation des ressources forestières mondiales 2010 (FRA 2010) brochures (http://www.fao.org/forestry/fra/en/).

FAO, JRC, SDSU ET UCL, 2009. Enquête par télédétection de l'évaluation des ressources forestières mondiales 2010. Objectifs, Données, Méthodes et Approche. Evaluation des ressources forestières mondiales. Document de travail n° 155. Publié par FAO et partenaires FRA RSS Rome, 2009. http://www.fao.org/forestry/fra/2560/fr/

FAO., 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes, FAO forestry paper n° 130. Rome, 1996, 154 p.

FAO., 2001a. Comparison of forest area and forest area change estimates derived from FRA 1990 and FRA 2000. Forest resources assessment programme, working Paper n° 59, 69 p.

FAO., 2001b. Situation des forêts du monde 2001. Rome, FAO, 2001. 181 p.

Forest Peoples Programme, 2008. Projets mondiaux de « déforestation évitée » : aux dépens des populations agroforestières ? Alternatives Sud, vol. 15-2008/3, p. 81-104.

GIEC, 2007. Changements climatiques 2007. Rapport de synthèse. Résumé à l'attention des décideurs, 114 p. (http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf).

GOFC-GOLD, 2009, Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting, Achard F., Brown S., De Fries R., Grassi G., Herold M., Mollicone D., Pandey D., Souza C. (Eds.), GOFC-GOLD Report version COP15, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.http://www.gofc-gold.uni-jena.de/redd/

Gond, V., Féau, C., et Pain-Orcet, M., 2003. Télédétection et aménagement forestier tropical : les pistes d'exploitation, Bois et Forêt des Tropiques, n° 275 (1), 29-36.

Grinan C., Razakamanarivo H., Razakavololona A., Albrecht A., 2008. Etude des changements d'occupation du sol et estimation des stocks de carbone à l'aide de photos aériennes et d'images Spot. Application aux plantations d'Eucalyptus à l'est d'Antananarivo. Communication présentée au colloque Télédétection et gestion des ressources, Tananarive, novembre 2008.

Hölne N., Wartmann S., Herold A., Freibauer A., 2007. The rules for land use, land use change and forestry under the Kyoto Protocol. Lessons learned for the future climate negociations. Environmental Science and Policy, n° 10, p. 353-369.

http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin136/bul136d_arino.pdf

Karsenty A., Guénau S., Capistrano D., Singer B., Peyron J.-L., 2008. Régime international, déforestation évitée et évolution des politiques publiques et privées affectant les forêts dans les pays du Sud (compte rendu de l'atelier de Paris). Idées pour le Débat, n° 07/2008, 7 p.,IDDRI.

Karsenty A., Pirard R., 2007a. Forêts tropicales : la question du bien public mondial et la quête d'instruments économiques multilatéraux pour un régime international. Revue Forestière Française, n° 5, p. 535-547.

Karsenty A., Pirard R., 2007b. Changement climatique : faut-il récompenser la « déforestation évitée » ? Natures Sciences Sociétés, n° 15, p. 357-369.

Lambin E.F., Ehrlich D., 1997. The identification of tropical deforestation fronts at broad spatial scales. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n° 17, pp. 3551-3568.

Laporte N.T., Devers D; Tiffany L., 2002. Monitoring logging in Central Africa, http://luci.umd.edu.umd/lcluc

Laporte N.T., Justice, C., Kendall, J., 1995. Mapping the dense humid forest of Cameroon and Zaire using AVHRR satellite data. International Journal of Remote Sensing, 16 (6) : 1127-1145.

Laporte N.T., Lin, Tiffany S., 2003. Monitoring logging in the Tropical Forest of Republic of Congo with Landsat imagery. Toward and integrated forest monitoring system, http://carpe.umd.edu

Laporte, N., Stabach, J., Grosch, R., Lin, T., & Goetz, S. (2007). Expansion of industrial logging in Central Africa. Science, 316, 1451.

Laporte, N.T., Goetz, S.J., Justice, C.O., Heinicke, M., 1998. A new land cover map of central Africa derived from multi-resolution, multi-temporal AVHRR data. International Journal of Remote sensing, 19 (18) : 3537-3550.

Loisel C., 2008. Climate change mitigation in the forest sector: what happened in Poznan. Synthèses n° 10, IDDRI, 4 p.

Malingreau J.P., Tucker C.J., Laporte N., 1989. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. In International Journal of Remote Sensing, vol.10, n° 4-5, pp. 855-867.

Matricardi, E.A.T., D.L. Skole, W. Chomentowski & Cochrane M.A., 2001. Multitemporal detection and measurement of selective logging in the Brazilian Amazon using Landsat Data, (CGCEO/ RA 03- 01/ W) Michigan State Univerity, 29 p.

Mayaux P., Achard F., Malingreau J.P., 1998. Global tropical forest area measurements derived from coarse resolution maps at a global level : a comparison with other approaches. Environmental Conservation, n° 25, p.p. 37-52.

Mayaux P., Bartholomé E., Massart M., Van Cutsem C., Cabral A., Nonguierma A., Diallo O., Pretorius C., Thompson M., Cherlet M., Pekel J-F., Defourny P., Vasconcelos M., Di Gregorio A., Fritz S., De Grandi G., Elvidge C., Vogt P., Belward A., 2003. Carte de l'occupation du sol de l'Afrique, EUR 20665 EN, European Commission, Joint Research Center, 56 p.

Mayaux P., Gond V., Bartholomé E., 2000. A near-real time forest-cover map of Madagascar derived from SPOT-4 VEGETATION data, International Journal of Remote sensing, 21(16): 3139-3144.

Mayaux P., Gond V., Massart M., Pain-Orcet M., Achard F., 2003. Évolution du couvert forestier du bassin du Congo mesurée par télédétection spatiale. Bois et Forêts des Tropiques, n° 277 (3), p.45-52.

Mayaux P., Holmgren P., Achard F., Eva H., Stibig H.-J., Branthomme A., 2005. Tropical forest cover change in the 1990s and options for future monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society, B., n° 360, p. 373-384.

Mayaux P., Janodet E. Blair-Myers C.M., Legeay-Janvier P., 1997. Vegetation Map of Central Africa at 1:5m, TREES Publications Series D1, EUR 17322, Luxembourg: European Commission, 32 p. + 1 map.

Mayaux P., Lambin E.F., 1997. Tropical forest area measured from global land-cover classifications : inverse calibration models based on spatial textures. Remote Sensing of Environment, 57, p. 29-43.

Mertens B., Lambin E. F., 1997. Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon. Applied Geography, vol. 17, n° 2, p. 143-162.

Mollicone D., Achard F., Federici S., Eva H.D., Grassi G., Belward A., Raes F., Seufert G., Stibig H.-J., Matteuci G., Schulze E.-D., 2007. An incentive mechanism for reducing emissions from conversion of intact and non-intact forests. Climatic Change, n° 87, p.477-493.

Moutinho P., 2007. Reducing carbon emission by slowing deforestation : promoting "Compensated Reduction" in Brazil. Communication présentée à l'atelier de Paris sur la déforestation évitée.

Petit M., Faure J.F., Girres J.F., Ose K., Durieux L., Corbane C., Huynh F., Lasselin D., Deshayes M., Stach N., 2007. A first global Spot mosaic of French Guiana in the framework of Kyoto Protocol by direct receiving station SEAS-Guyane facility. Communication présentée au colloque international FORESTAT 2007, Montpellier, 6 p.

Pirard R., 2008. Lutte contre la déforestation (REDD). Implications économiques d'un financement par le marché. Idées pour le débat, n° 20, IDDRI, 14 p.

Ramankutty N., Gibbs H.K., Achard F., DeFries R., Foley J.A., Houghton R.A., 2007. Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. Global Change Biology, n° 13, p.51-66.

Runge J., Neumer M., 2000. Landscape dynamics of the rain forest/savana border from 1955 to 1990 evidenced by aerial photographs and Landsat - TM data in Northern Zaire, p.p. 171-173. Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux, publication UNESCO-IRD.

Schlamadinger B., Ciccarese L., Dutschke M., Fearnside P.M., Brown S., Murdiyarso D., 2005. Should we include avoidance of deforestation in the international response to climate change ? In Tropical deforestation and climate change (Moutinho et Schwartzman, dir.), p. 53-62, IPAM, Brazil.

Skutsch M., Bird N., Trines E., Dutschke M., Frumhoff P., De Jong B.H.J., Laake P.V., Masera O., Murdiyarso D., 2007. Clearing the way for reducing emissions from tropical deforestation. Environmental Science and Policy, n° 10, p. 322-334.

Soares-Filho B.S., Nepstad D.C., Curran L., Cerqueira G. C., Garcia R. A., Ramos C. A., Voll E., McDonald A., Lefebvre P., Schlesinger P., 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. Nature, Volume 440 (7083), 23 March 2006, p.520-523

Stach N., Salvado A., Petit M., Ingrassia L., Joubert P., Deshayes M., 2007. Monitoring land use and land use changes in French Guiana by optical remote sensing. Communication présentée au colloque international FORESTAT 2007, Montpellier, 5 p.

Stach, N., Salvado, A., Petit, M., Faure, J.F., Durieux, L., Corbane, C., Joubert, P., Lasselin, D., Deshayes, M., 2009. Land use monitoring by remote sensing in tropical forest areas in support of the Kyoto Protocol: The case of French Guiana. International Journal of Remote Sensing 30:5133-5149.

Stern Review (Rapport Stern), 2006. L'économie du changement climatique, 34 p., résumé en français diffusé par le journal les Echos (http://www.lesechos.fr/medias/2007/0115//300131480.pdf).

Tsayem - Demaze, M., Polidori, L., Fotsing, J.M., 2001. Caractérisation multi-échelle et multi-capteur de la déforestation tropicale amazonienne. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 161 : 74-84.

Tsayem Demaze M., 2002. Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection : application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 242 p.

Tsayem Demaze M., 2009a. Paradoxes conceptuels du développement durable et nouvelles initiatives de coopération Nord-Sud : le mécanisme pour un développement propre. Article 443, Cybergéo, Revue Européenne de Géographie.

Tsayem Demaze M., 2009b. Le protocole de Kyoto, le clivage Nord-Sud et le challenge du développement durable, L'Espace Géographique, n° 2, 2009.

Tsayem Demaze M., Fosting J.-M., 2004. La déforestation tropicale dans le contexte de mondialisation des risques climatiques et écologiques : outils d'évaluation et de suivi, in (David G., dir.) Espaces tropicaux et risques, du local au global, Presses universitaires d'Orléans et IRD Editions.

UNFCCC, 2006. Background paper for the workshop on reducing emissions from deforestation in developing countries. Part I. Scientific, socio-economic, technical and methodological issues related to deforestation in developing countries. 28 p

UNFCCC, 2007. Nations Unies, Convention Cadre sur les Changements Climatiques, rapport de la 13ème session de la Conférence des parties tenue à Bali du 3 au 15 décembre 2007 (Plan d'Action de Bali), 62 p. (http://unfccc.int/resource/docs/2007/cop13/fre/06a01f.pdf).

Van De Pol M.J., Minemeyer., Soyuni L., Meehl J.- 2004- Technical report: mapping current and historic logging roads, LBZG/WRI, 22 p.

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

Wertz-Kanounnikoff S., 2007. Reducing emissions from deforestation and degradation in developing countries (REDD). Insights from the UNFCCC COP-13 in Bali. Idées pour le débat, n° 12, IDDRI, 5p.

Youta Happi, J., 1998. Arbres contre graminées : la lente invasion de la forêt par la savane au Centre - Cameroun. Thèse de Doctorat, Paris IV, 240 p.