

# Conférence climatique de Durban : l'enjeu de la mesure des flux de carbone forestier

Gabriela Simonet<sup>1</sup>

Longtemps restées en marge des négociations climatiques, les forêts tropicales reviennent sur le devant de la scène avec l'émergence du mécanisme REDD+ ou Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts. Si le principe même du REDD+ fait consensus, plusieurs barrières ralentissent son développement concret, dont celle de la Mesure, Rapportage et Vérification (MRV). Pour être efficace, un mécanisme financier conditionné aux émissions doit être fondé sur une mesure fiable des émissions effectives et émissions évitées. Or, cette condition n'est pas encore remplie pour le REDD+.

Ce papier propose d'identifier les incertitudes et lacunes dans la mesure des flux de carbone forestier. Les progrès réalisés en termes de télédétection depuis le début des négociations REDD+ constituent une grande avancée vers l'amélioration de la précision de la mesure. Il apparaît cependant que l'enjeu de la MRV n'est pas uniquement technique. Du fait que la MRV conditionne les rémunérations que recevront les pays et les acteurs sous-nationaux, chaque pays a intérêt à défendre un cadre méthodologique de MRV qui joue en sa faveur. L'enjeu de la MRV à Durban sera donc autant politique que technique.

*L'auteur tient à remercier l'équipe d'Astrium et en particulier Anabelle Oliveira, Mariana Deheza (CDC Climat Recherche), Julien Valteau (ex-stagiaire CNES-CESBIO - projet BIOMASS), Philippe Delacote (Laboratoire d'Economie Forestière), Julien Wolfersberger (Laboratoire d'Economie Forestière et Chaire Economie du Climat), Christian de Perthuis (Chaire Economie du Climat), Pierre-André Juvet (Chaire Economie du Climat), Guillaume Bouculat (Chaire Economie du Climat) et Virginie Boutueil (Chaire Economie du Climat) pour leur relecture attentive ainsi que tous les participants aux multiples discussions, débats et échanges sur les questions traitées dans cette note.*

1. Chercheur à la Chaire Economie du Climat  
[gabriela.simonet@chaireeconomieduclimat.org](mailto:gabriela.simonet@chaireeconomieduclimat.org)

## Table des matières

Introduction.....	2
1 La mesure, un frein potentiel au développement du REDD+.....	3
1.1 Le REDD en bref : vers une inclusion croissante des forêts tropicales dans la lutte contre le changement climatique.....	3
1.2 Un problème de mesure ?.....	5
1.3 L'enjeu de la mesure pour le REDD+ .....	7
1.4 Trois dimensions clés dans la mesure des flux de carbone forestier.....	8
2 Suivi du couvert forestier : un grand pas en avant grâce à la télédétection.....	9
2.1 Des statistiques forestières lacunaires.....	9
2.2 La solution vient du ciel.....	9
2.3 Plus de coopération pour une surveillance homogène de la déforestation .....	12
2.4 Vers une définition homogène de la « déforestation » .....	13
2.5 L'épineuse question des niveaux de référence .....	15
3 Estimation du stock de carbone forestier : un défi plus délicat à relever.....	16
3.1 Où se cache le carbone forestier ? .....	17
3.2 Les ambitions de la télédétection : vers une meilleure connaissance de la biomasse .....	18
3.3 Le REDD doit-il se limiter au carbone des arbres? .....	20
4 Suivi des flux de carbone : les consensus restent à trouver .....	21
4.1 Méthodes des stocks versus méthode des flux.....	21
4.2 Que devient le carbone après déforestation ?.....	22
4.3 Traquer les flux de carbone dans une forêt .....	23
4.4 Qu'est-ce qu'un flux « anthropique » ?.....	24
4.5 Quelle précision minimale pour le REDD+ ?.....	24
Conclusion : REDD+ et MRV, de la dimension technique aux enjeux politiques .....	25
Table des acronymes.....	26
Annexe 1 : Estimations des émissions associées au changement d'affectation des terres, en GtCO <sub>2</sub> eq/an .....	27
Annexe 2 : A la base de la plupart des estimations mondiales : le « book-keeping model » .....	28
Références.....	29

## Introduction

En 1992, la Convention Cadre des Nations Unies contre le Changement Climatique (CCNUCC), ratifiée depuis par 192 Etats, pose les bases de la lutte contre le changement climatique. Près de vingt ans plus tard, le bilan de l'action reste mitigé. Du niveau local au niveau international, plusieurs initiatives ont vu le jour afin de réguler les émissions de gaz à effet de serre, mais le recours à des instruments économiques de type « taxe » ou « systèmes de quotas d'émissions » reste limité sur le terrain.

Plusieurs secteurs sont jusqu'à présent restés en marge de l'économie du climat. C'est le cas du secteur forestier qui présente une inclusion très limitée dans les marchés réglementés, compensée par un succès plus important sur le marché volontaire (la taille de ce marché reste cependant relativement réduite). Pourtant, les raisons d'inclure le secteur forestier dans la lutte contre le changement climatique ne manquent pas. L'émergence d'un mécanisme global visant à Réduire les Emissions liées au Déboisement et à la Dégradation des forêts tropicales (REDD+) constitue d'ailleurs la preuve d'un consensus quant à la nécessité d'inclure les forêts dans la lutte contre le changement climatique.

La mise en œuvre concrète du REDD+ se heurte néanmoins à des obstacles inattendus. Parmi eux, l'incertitude liée à la mesure des flux de carbone forestiers s'annonce particulièrement contraignante. Si l'on dispose de méthodes de mesures fiables et acceptées par tous dans la plupart des secteurs (énergie, procédés industriels, etc.), c'est loin d'être le cas pour les émissions liées aux forêts. En effet, ces émissions sont plus difficiles à étudier, en raison des phénomènes biologiques qui entrent en jeu et du fait que les forêts peuvent à la fois émettre et séquestrer du carbone. Les divergences dans les estimations des émissions mondiales liées au déboisement – allant de 3 à 10 milliards de tCO<sub>2</sub>e/an<sup>1</sup> selon les études – reflètent ces lacunes.

Mesurer les émissions et séquestration de carbone forestier demande de prendre en compte trois dimensions : les variations de surface forestière, le stock de carbone unitaire et enfin les flux de carbone. Cette étude propose dans une première partie de démontrer les enjeux d'un progrès de la mesure pour le développement du REDD+. Les parties suivantes s'arrêtent sur chacune des trois dimensions précédemment évoquées afin de poser les bases méthodologiques et techniques de la mesure des flux de carbone forestiers. Les solutions techniques apportées par la télédétection seront développées. Nous verrons enfin que la définition d'un cadre méthodologique de mesure pour le REDD+ fait apparaître des enjeux purement politiques. Si le besoin de progrès technique a pu ralentir les négociations REDD+, les enjeux politiques pourraient constituer un frein encore plus important à ces négociations.

---

<sup>1</sup> 1 GtCO<sub>2</sub>e/an correspond à 1 milliard de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent par an. Les estimations liées au carbone forestier sont souvent exprimées en tonnes de carbone plutôt qu'en tonnes de CO<sub>2</sub>, sachant que 1tC = 3,67tCO<sub>2</sub>e.

# 1 La mesure, un frein potentiel au développement du REDD+

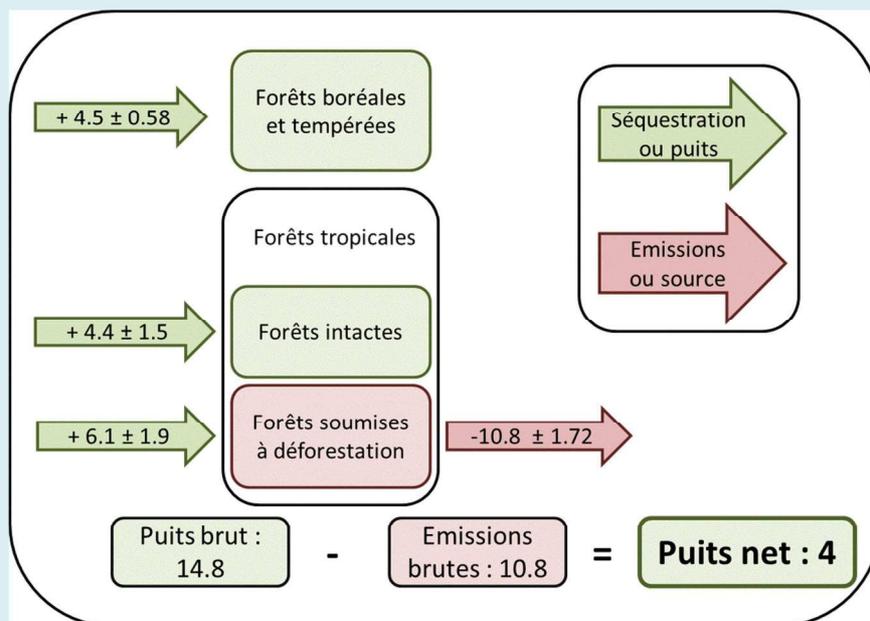
## 1.1 Le REDD en bref : vers une inclusion croissante des forêts tropicales dans la lutte contre le changement climatique

A l'heure actuelle, la nécessité d'intégrer les forêts tropicales dans la lutte contre le changement climatique est difficilement contestable. Le stock de carbone forestier total, estimé à plus de 3000 GtCO<sub>2</sub>e, avoisine celui de l'atmosphère. La protection et l'augmentation de ce stock, en particulier dans les forêts tropicales, permettrait d'atténuer considérablement les émissions de gaz à effet de serre. Comme expliqué dans l'encadré 1, les phénomènes de déboisement et de dégradation auxquelles sont soumises les forêts tropicales entraînent la libération d'environ 10 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année (Pan *et al.* 2011).

### Encadré 1 : Les forêts mondiales, un puits de carbone à préserver

Contrairement aux idées reçues, une étude récente menée par Pan *et al.* aboutit au constat que les forêts mondiales absorbent au global plus de carbone qu'elles n'en émettent, constituant ainsi un puits net de 4 GtCO<sub>2</sub>e/an (Pan *et al.* 2011).

Figure 1 : Flux entrants et sortants par type de forêt entre 1990 et 2007, en GtCO<sub>2</sub>e/an



Source : CEC à partir de Pan *et al.* 2011

On parle de puits de carbone pour désigner la capacité des forêts à séquestrer du carbone, via le processus de photosynthèse. Au cours de la période 1990-2007, les forêts mondiales auraient absorbé environ 14,8 GtCO<sub>2</sub>e/an, soit 42% des émissions actuelles de GES d'origine anthropique. Ce puits est principalement lié à la séquestration de carbone dans les forêts établies (forêts restant forêts au cours de la période d'étude). La croissance de la forêt secondaire après déboisement en milieu tropical a néanmoins un poids non négligeable puisque ces jeunes forêts absorbent autour de 6 GtCO<sub>2</sub>e/an. Certaines activités – déboisement et dégradation, mais aussi incendies, tempêtes et maladies – provoquent au contraire un relâchement de carbone forestier vers l'atmosphère qui amoindrissent le puits global final. Si les forêts tropicales sujettes à déforestation constituent de puissantes sources de carbone, elles se révèlent être quasiment neutres en carbone dès lors que leur capacité de séquestration est prise en considération.

Au-delà du carbone, les raisons de protéger les forêts sont multiples. Menée de façon adéquate, la lutte contre les émissions de CO<sub>2</sub> peut s'accompagner de nombreux co-bénéfices environnementaux et sociaux.

Malgré leur contribution aux émissions globales de CO<sub>2</sub>, les forêts tropicales ont été très faiblement intégrées dans les négociations internationales sur le climat. Le protocole de Kyoto, à travers le Mécanisme de Développement Propre (MDP), ne considère que les projets de boisement/reboisement. Or, dans le cadre d'une politique climatique, il est plus fondé de protéger les forêts existantes que d'effectuer de nouvelles plantations. En effet, déboiser un hectare de forêt mature entraîne l'émission de plusieurs centaines de tonnes de CO<sub>2</sub> qui ne seront compensées par la croissance des jeunes arbres que sur le très long terme. D'où l'intérêt de projets de Réduction des Emissions liées au Déboisement et à la Dégradation ou REDD. La surveillance et la comptabilité carbone des projets REDD sont plus complexes que pour les projets de boisement, ce qui a contribué à l'exclusion des projets REDD du système de MDP. Ces projets sont néanmoins autorisés sur le marché volontaire. Cette plus grande flexibilité explique en partie le succès des projets forestiers sur le marché volontaire. En effet, alors qu'ils représentent moins de 1% des projets enregistrés dans le cadre du MDP, les projets forestiers ont comptabilisé plus de 40% des transactions sur le marché volontaire de gré-à-gré en 2010 (Ecosystem Marketplace, 2011), dont plus des deux tiers proviennent de projets REDD. En février 2011, le *Kasigau Corridor REDD project* au Kenya, premier projet REDD de grande envergure à avoir généré des crédits REDD<sup>2</sup>, symbolise ce succès.

Une des limites des projets REDD est le risque de fuites de carbone. Lorsque les vecteurs à l'origine du déboisement n'ont pas été clairement identifiés et traités, on risque simplement de déplacer les émissions de carbone à l'extérieur du périmètre du projet. Afin de minimiser ces fuites, la CCNUCC travaille à l'élaboration d'un mécanisme basé sur une approche nationale. Plus connu sous le nom de REDD+, ce mécanisme global vise à rémunérer directement les pays en développement pour les réductions d'émission associées à la protection de leurs forêts. Les pays en développement seraient ainsi davantage impliqués dans la lutte contre le changement climatique tout en bénéficiant du soutien financier et technique des pays développés.

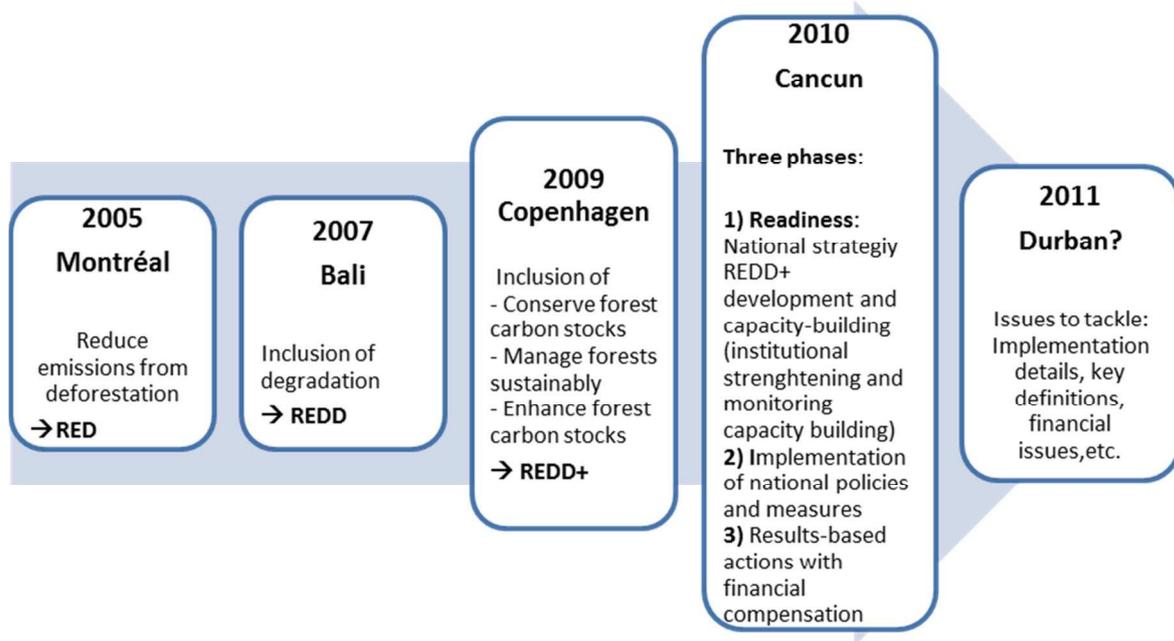
L'idée d'un mécanisme global REDD est née lors de la COP 11 à Montréal (2005), lorsque le Costa Rica et la Papouasie Nouvelle Guinée ont suggéré de mettre en place un système qui créerait des incitations à réduire la déforestation en attribuant une valeur au carbone stocké dans les arbres. Comme on le voit dans la figure 2, alors que le mécanisme de départ ne visait que le déboisement évité (RED), les Parties ont progressivement élargi le champ des activités couvertes, permettant ainsi à un nombre croissant de pays de s'impliquer dans ce mécanisme global. Ainsi, le mécanisme actuel REDD+ couvre également la dégradation évitée, la gestion durable des forêts, ainsi que la conservation et l'augmentation des stocks de carbone forestier.

A Copenhague, six pays – Australie, France, Japon, Royaume-Uni, Etats-Unis et Norvège – se sont engagés à réunir 3,5 milliards d'euros d'ici 2012 pour financer la première phase du REDD+. L'Accord de Cancun a formalisé la création du mécanisme REDD+ en engageant les Parties à « ralentir, arrêter et inverser le déboisement et les émissions associées ». Un déroulement en trois phases a été confirmé, et plusieurs pays ont d'ores et déjà amorcé leur première phase dite de *Readiness*, grâce aux fonds bilatéraux et multilatéraux levés à cet effet. Cette étape de préparation au REDD+ sera suivie d'une phase de mise en œuvre des politiques nationales, avant de déboucher sur une dernière phase où les pays seront récompensés pour les réductions d'émissions réalisées sur leur territoire. Les Parties travaillent actuellement à une éventuelle extension du REDD+ en REDD++, qui permettrait d'inclure les activités de conservation des sols agricoles et des tourbières (Loisel, 2011).

---

<sup>2</sup>Crédits générés sous le Voluntary Carbon Standard (VCS), détails disponibles sur [http://www.ecosystemmarketplace.com/pages/dynamic/article.page.php?page\\_id=8007&section=home](http://www.ecosystemmarketplace.com/pages/dynamic/article.page.php?page_id=8007&section=home)

Figure 2: De Montréal à Cancun, l'avancée du REDD dans les négociations climatiques



Source: Climate Economics in Progress 2011

La Norvège ouvre la voie en termes de coopération puisqu'elle a déjà défini deux partenariats avec l'Indonésie et le Guyana. Deux principaux fonds multilatéraux soutiennent les pays dans leur phase de *Readiness*, notamment dans l'élaboration de leur stratégie nationale et dans le renforcement de leurs capacités.

- Le *Forest Carbon Partnership Facility* (FCPF) de la Banque Mondiale, qui implique 37 pays volontaires et s'élève à 216 millions de dollars en 2011. La banque Mondiale monte également un Fonds Carbone visant à financer la phase de compensation du REDD+.
- Le Programme des Nations Unies pour le REDD (UN-REDD), un fonds multi-donateur de 55,4 million de dollars, qui compte 35 pays partenaires dont 13 pays pilotes qui reçoivent une aide technique et financière pour leur programme national REDD+.

Les programmes REDD+ attirent un nombre croissant de pays en développement qui ne veulent pas « manquer le coche ». L'engouement à la fois des pays développés et des pays en développement est un bon présage pour le succès du REDD+. Et pourtant, plusieurs barrières freinent visiblement sa mise en œuvre concrète. La question du financement des phases suivantes du REDD+, entre fonds publics et marchés du carbone, n'est pas encore tranchée (Loisel, 2011). L'articulation entre les projets qui se développent sur le marché volontaire et l'approche nationale du REDD+ reste également à clarifier. A Cancun, l'utilisation d'une approche hybride ou *nested approach* a été proposée, mais reste à confirmer. Celle-ci consiste en un amorçage à l'échelle projet, tout en engageant les pays à développer sur le long terme une stratégie nationale de lutte contre la déforestation (Leplay, 2011). Moins souvent évoquée, la question de la mesure des flux de carbone forestier s'avère pourtant cruciale pour le développement du REDD+.

## 1.2 Un problème de mesure ?

Si l'on sait calculer avec précision la quantité de gaz à effet de serre émise par les secteurs énergétiques et industriels, la question de la mesure semble plus difficile à traiter dans le secteur forestier. Les divergences importantes dans les estimations des émissions mondiales de GES associées au secteur forestier reflètent cette complexité.

Depuis le dernier rapport du GIEC, il semble communément admis que la déforestation est responsable de 17,4% des émissions mondiales de GES. Ce chiffre n'inclut pas la capacité des forêts à séquestrer le carbone de l'atmosphère, mais se limite aux émissions brutes engendrées par le déboisement et la dégradation des forêts. Il provient de l'estimation réalisée par le groupe de travail n°3 du GIEC qui part de l'hypothèse que 50% des émissions liées à la déforestation et à la dégradation proviennent de la combustion du bois. Pour obtenir des données à grande échelle, les experts du GIEC ont utilisé des statistiques issues de la télédétection des feux de forêts<sup>3</sup>, principalement d'origine anthropique dans ces régions (voir GIEC 2007, introduction du Rapport Technique, figures TS1a, TS2a et TS2b<sup>4</sup>). Ces émissions sont ensuite doublées afin de prendre en compte les flux de carbone engendrés par la matière organique morte et le sol.

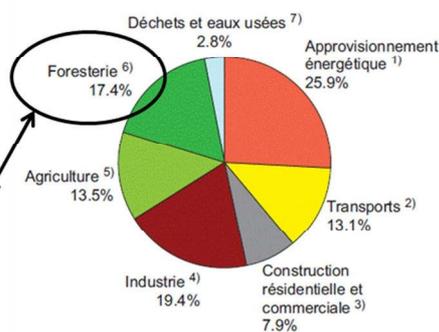
Cette estimation est cependant largement débattue. Comme on peut le voir dans la figure 3.a et dans le complément proposé en Annexe 1, d'un expert à l'autre, les estimations varient du simple au triple. Pour comprendre comment on aboutit à de tels écarts dans les estimations mondiales, deux phénomènes sont à prendre en considération :

- D'une part, l'incertitude liée à la mesure est plus importante que dans n'importe quel autre secteur, du fait que l'on a affaire à du vivant et que les instruments de mesure adéquats sont encore en cours de développement. Selon les études, l'erreur peut ainsi atteindre 50% des émissions estimées.
- D'autre part, chaque expert utilise une méthodologie qui lui est propre. Chaque étude prend en compte des activités et des compartiments de carbone différents, et applique sa propre méthode de comptabilisation des flux de carbone.

**Figure 3.a : Aperçu des divergences dans les estimations des émissions brutes de CO2 liées au déboisement et à la dégradation des forêts.**

Chercheur	Estimation (année/période)	Méthode
Pan et al. (2011)	10,8 (1990-2007)	Données issues d'inventaires et observations long terme, couplées à des modèles
GIEC 2007, groupe n°3	8,53 (2004)	Emissions feux de forêt + émissions tourbières
Werf (2009)	5,5 (2008)	Actualisation données du GIEC groupe n°3
Harris et al. (2010)	2,7± 1,1 (2000-05)	Données satellites MODIS 2000 couplées modèle spatial pour la biomasse

**Figure 3.b : Emissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique par secteur en 2004**



Source : GIEC 2007

Source : CEC

**Note :** Ces estimations correspondent à des émissions brutes. Comme démontré dans l'encadré 1, le bilan des forêts mondiales devient positif dans certaines estimations qui prennent également en compte leur capacité de stockage.

D'après une actualisation réalisée par Werf (2009), la part du secteur forestier dans les émissions globales en 2007 serait plutôt de l'ordre de **15±5%** des émissions totales de CO<sub>2</sub>, soit **12±6%** des émissions de GES.

<sup>3</sup> Données récoltées sur la période 1997-2002. Global Fire Emissions Database, disponible sur [http://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/global\\_fire\\_emissions\\_v2.1.html](http://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/global_fire_emissions_v2.1.html)

<sup>4</sup> [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/tssts-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/tssts-1.html)

Quel que soit le niveau réel des émissions engendrées par le déboisement et à la dégradation des forêts, tout le monde s'accorde sur l'urgence d'agir contre ces deux phénomènes étant données les multiples conséquences négatives qu'ils génèrent (perte de biodiversité, érosion, perte de bien-être des populations locales, etc.). Connaître avec précision la quantité de carbone émise annuellement par le secteur forestier ne semble donc pas limitant pour engager la lutte contre la déforestation. Pourtant, ces lacunes évidentes dans la connaissance du secteur forestier pourraient porter préjudice au développement du REDD+.

### 1.3 L'enjeu de la mesure pour le REDD+

Les questions méthodologiques autour de la comptabilisation du carbone forestier – incertitude scientifique, manque de données et de comparabilité entre les pays – étaient l'un des principaux arguments à la marginalisation du secteur forestier dans le Protocole de Kyoto (Chenost *et al.* 2009). Afin d'assurer un maximum de cohérence et de transparence, la CCNUCC exige que les réductions d'émissions soient Mesurables, Rapportables et Vérifiables (voir encadré 2), ce qui semble plus complexe à garantir dans le secteur forestier que dans des secteurs classiques. Dans le cadre du REDD+, on entendra également parler de MMRV, où le premier « M » désigne la capacité à surveiller les forêts (*monitoring*).

#### Encadré 2: la MRV dans un contexte REDD+

**Mesure** est le "processus de collecte de données au cours du temps, fournissant un ensemble de données de base, incluant l'exactitude et la précision associée, pour une gamme de variables pertinentes. Les sources possibles de données sont les mesures et observations de terrain, la télédétection et les interviews".

**Rapportage** fait référence au "processus formel de rapportage des résultats de l'évaluation à la CCNUCC, dans des formats prédéterminés et selon des standards fixés".

**Vérification** concerne "le processus formel de vérification des rapports, par exemple la vérification des communications nationales et des inventaires nationaux rapports à la CCNUCC".

Source : UN-REDD

Plusieurs arguments permettent de rendre compte de l'importance d'un système de mesure solide pour assurer la pérennité d'un mécanisme global REDD+.

**L'impossible calibrage du coût du REDD+** : Les divergences importantes dans les estimations des émissions globales associées au secteur forestier empêchent de calibrer le coût réel du REDD+. Selon les études, l'estimation des coûts et des investissements nécessaires pour le REDD+ varie considérablement. Stern (2006) estime par exemple qu'il faudra entre 5 et 15 milliards de dollars par an pour réduire la déforestation mondiale de moitié, alors que Kindermann *et al.* (2008) comptent entre 17 et 28 milliards de dollars par an. Les lacunes en termes de connaissance des émissions exactes associées à la déforestation et à la dégradation des forêts participent largement à l'incertitude sur le coût financier du REDD+, incertitude qui se chiffre en milliards d'euros. Notons par ailleurs que ces estimations sont certainement sous-estimées car elles ne prennent en compte que le coût d'opportunité associé aux projets forestiers, et négligent les coûts annexes tels que coûts de transaction ou coûts de MRV (UNEPFI, 2011).

**Assurer l'intégrité environnementale du système** : « On n'agit que sur ce que l'on peut mesurer ». Cet adage du monde des affaires trouve un sens renforcé dans le cadre de l'action contre les émissions de gaz à effet de serre. Pour être efficace, tout mécanisme de transferts financiers conditionnés aux résultats doit être basé sur des mesures fiables des quantités de GES effectivement émises aussi bien qu'évitées. Le degré de précision dépend des ressources propres à chaque pays (accès à la télédétection, inventaires forestiers réguliers, etc.). Etant donnée l'incertitude sur les émissions, le nombre de crédits attribués aux pays peut s'avérer être surestimé ou sous-estimé. En plus de l'inefficacité économique engendrée, des mesures erronées pourraient compromettre l'intégrité environnementale d'un système incitatif de type REDD+. Les négociations sur le REDD+ devront fixer un niveau de précision minimal. En attendant, la phase de *Readiness* permet aux pays souhaitant s'impliquer dans le REDD+ de renforcer leur capacité de MRV.

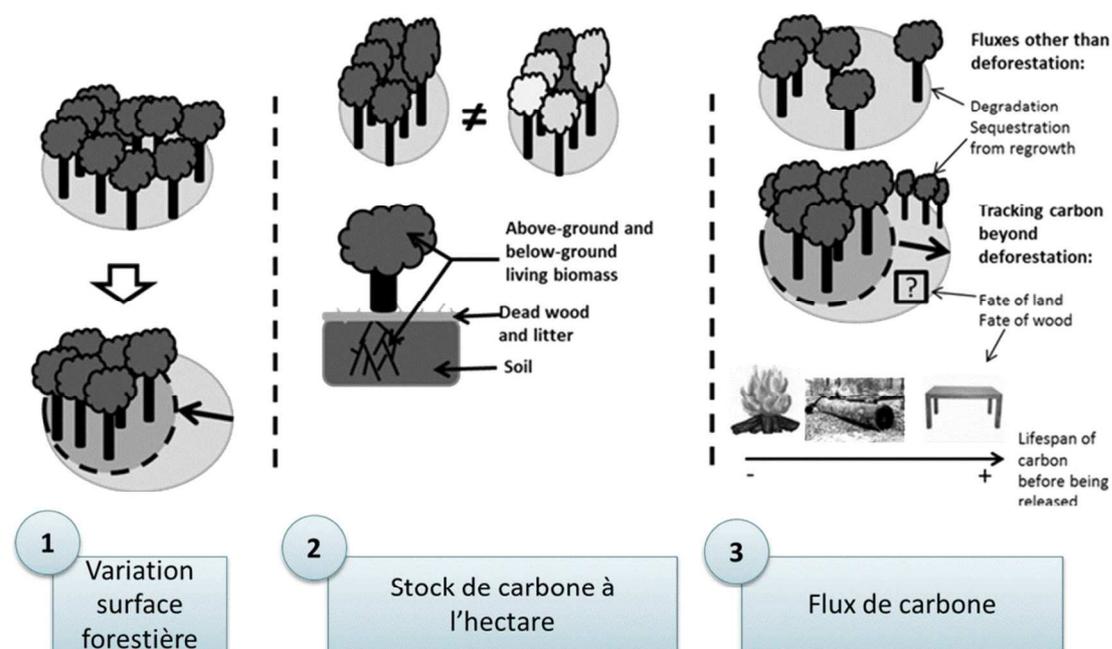
**Garantir la transparence et cohérence des méthodes de mesure :** Dans un système basé sur une rémunération, les réductions d'émission affichées doivent être comparables d'un pays à un autre. Si le REDD+ passe par un mécanisme de marché, cette harmonisation sera nécessaire pour rendre fongibles les crédits générés dans chaque pays. A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthodologie unique sur la mesure des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts. Lors de la COP 15 (Copenhague 2009), l'ensemble des pays signataires impliqués dans les négociations REDD s'est accordé sur le fait d'utiliser les préconisations les plus récentes du GIEC pour estimer les stocks de carbone, surfaces et émissions de GES d'origine anthropique associées à la forêt<sup>5</sup>. Les Lignes Directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre constituent donc la base méthodologique la plus à jour pour harmoniser le mode d'évaluation des émissions associées à la forêt. Définies dans le cadre plus large de l'UTCF (Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt), elles nécessitent néanmoins d'être adaptées aux spécificités du REDD+ et éventuellement simplifiées (Loisel, 2011).

#### 1.4 Trois dimensions clés dans la mesure des flux de carbone forestier

Afin de mieux appréhender la question de la mesure des réductions d'émissions associées au REDD+, trois dimensions propres au secteur forestier doivent être considérées :

- La première concerne le suivi du changement de surface forestière, en d'autres termes il s'agit d'évaluer les taux de déforestation de chaque pays.
- La seconde consiste à estimer le stock de carbone unitaire qui, à l'image de la diversité des écosystèmes forestier, varie d'une forêt à l'autre, et au sein même de chaque forêt.
- La troisième dimension porte sur l'évaluation des flux de carbone, dont nous verrons qu'elle n'est pas simplement le produit de la surface par le stock de carbone.

**Figure 4 : Trois dimensions pour comprendre la mesure des flux de carbone forestiers**



Source: Climate Economics in Progress 2011

<sup>5</sup> Decision 4/CP.15, paragraphe 1

La suite de ce rapport propose de s'arrêter sur chacune de ces trois dimensions, en donnant un aperçu des bases méthodologiques proposées par le GIEC et en surlignant les chaînons encore manquants pour un lancement effectif du REDD+. Les progrès en termes de télédétection devraient permettre de réduire l'incertitude liée à la mesure des stocks et flux de carbone forestiers, mais d'autres questions seront plus complexes à résoudre car elles comportent des enjeux stratégiques sur lesquels les pays engagés pourraient avoir plus de difficultés à s'accorder.

## 2 Suivi du couvert forestier : un grand pas en avant grâce à la télédétection

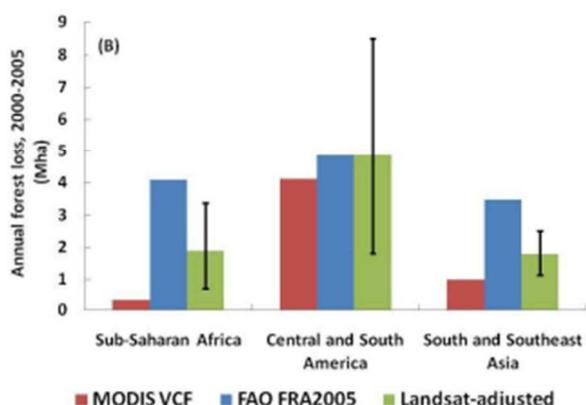
### 2.1 Des statistiques forestières lacunaires

Contrairement aux idées reçues, l'estimation des taux de déforestation mondiaux était jusqu'aux années 2000 encore très approximative. Depuis 1946, le FAO publie tous les 5 à 10 ans un rapport d'évaluation des ressources forestières mondiales ou *Forest Resource Assessment* (FRA). Ce rapport présente notamment les données officielles sur les taux de déforestation par pays et au niveau global. Les statistiques forestières qui y figurent ont cependant été fortement critiquées du fait qu'elles reposent principalement sur des rapports nationaux de qualité inégale selon les pays. Nombre d'entre eux ne disposent pas de moyens suffisants pour surveiller leur couvert forestier et se basent uniquement sur des dires d'expert. Dans le cadre du REDD+, certains pays pourraient avoir intérêt à surestimer leurs taux de déforestation, afin de faciliter les réductions d'émission à venir. Un mode de suivi harmonisé et fiable des surfaces forestières est donc un préalable à un mécanisme global REDD+.

### 2.2 La solution vient du ciel

Comme le montre la figure 5 ci-dessous, plusieurs études basées sur la surveillance par satellite de l'évolution des forêts aboutissent à des estimations plus faibles que celle de la FAO. En s'appuyant sur des données Landsat combinées à d'autres données haute résolution, DeFries (2002) aboutit par exemple à des taux de déforestation 53 à 62% inférieurs à ceux du FRA pour les années 1980s et 1990s (Ramankutty, 2006). Afin d'améliorer la qualité des statistiques forestières, le FRA complète depuis 2000 les résultats des rapports nationaux par des enquêtes de télédétection sur la zone tropicale. De telles améliorations ont permis de revoir à la baisse les taux de déforestation estimés<sup>6</sup>.

**Figure 5 : Comparaison entre les taux de déforestation régionaux enregistrés par la FAO et ceux issus de données satellite moyenne résolution**



Source : Harris *et al.* 2010

<sup>6</sup> Le taux net de déforestation estimé pour les années 1990s passent par exemple de à -9,4 Mha/an dans le FRA 2000 et à -8,9 Mha dans le FRA 2005.

Dès que l'on dépasse l'échelle du petit projet, et ce sera le cas dans une approche nationale du REDD+, le recours à la télédétection devient indispensable. L'encadré ci-dessous propose quelques explications des basiques de la télédétection.

#### **Encadré 4 : la télédétection en bref**

##### **Systemes actifs et passifs**

Les systèmes de télédétection sont de types passifs ou actifs. Les systèmes passifs réceptionnent simplement les ondes optiques ou thermiques de la surface de la Terre. Ils permettent d'obtenir des images très haute résolution et de différencier différents types de couverts (végétation, sol nu, neige...) mais ils ne peuvent pénétrer les nuages. Les systèmes de télédétection les plus utilisés pour le suivi du couvert sont des systèmes optiques.

Les systèmes de télédétection actifs, tels que les systèmes radar SAR ou les systèmes laser LiDAR, sont moins affectés par la présence de nuages et permettent d'obtenir des cartes en trois dimensions de la surface terrestre. Ils sont donc très utiles pour compléter les analyses de couverts là où les systèmes optiques passifs ont été arrêtés par les nuages. Ils perdent cependant en fiabilité en zone montagneuses. Les systèmes actifs sont plus souvent portés par avion que par satellite. Ils représentent encore une part réduite des satellites en orbite mais leur nombre et leur sophistication devraient augmenter au cours des prochaines années (Fagan et DeFries, 2009). Ils se révèlent particulièrement utiles pour estimer le stock de carbone contenu dans les forêts.

##### **Echantillonnage**

Si un territoire de petite taille peut être analysé de façon intégrale (approche « wall-to-wall », ou image par image), une procédure d'échantillonnage s'avère vite utile dès que l'on dépasse une certaine échelle. L'échantillonnage systématique fournit des images à intervalles réguliers (ex : tous les 10km). L'échantillonnage stratifié consiste à utiliser d'autres variables géo-référencées (routes, installations, feux de forêt, etc.) afin de cibler les zones pour lesquelles on souhaite obtenir des images. Des images basse résolution peuvent être utilisées pour repérer les zones les plus sujettes à la déforestation (« hotspots ») et ainsi cibler l'acquisition d'images plus résolues.

##### **Interprétation des images**

A partir des cartes de couvert brutes obtenues par télédétection, une étape d'interprétation est nécessaire pour aboutir à une carte opérationnelle d'affectation des terres (corrections géométriques, ombres, nuages, etc.). Celle-ci peut se faire de façon visuelle (analyse de chaque image par un expert) ou automatique, grâce à des méthodes informatiques.

Le tableau 1 dresse un panorama des différentes techniques de télédétection pouvant être appliquées pour suivre l'évolution du couvert forestier. Avec une résolution de 30mx30m, pour une image de 185 km de large, les satellites moyenne résolution sont les plus adaptés à la cartographie de la couverture végétale sur une grande échelle (Fagan et Defries, 2009). Des satellites qui présentent un champ plus faible mais avec une plus grande capacité de revisite (exemple SPOT) peuvent néanmoins s'avérer plus adaptés dans les zones à fort couvert nuageux car cela augmente la probabilité d'obtenir une image exploitable.

**Tableau 1: Fiabilité, coût, utilité et limites des différents types de satellites utilisés dans le suivi du changement d'affectation des terres.**

Technologie Suivi aire	Fiabilité <sup>#</sup>	Coût d'acquisition <sup>1,2</sup>	Utilité <sup>1</sup>	Limites <sup>2</sup>
<b>Optique basse résolution :</b> <b>Ex : Terra MODIS (2000- ), SPOT VGT (1998- ), AVHRR, Envisat-MERIS (2004-)</b>  Pixel 200-1000m Surface cartes : 10-100ha	70-80% pour des cartes forêt/non forêts  65% pour les types de forêts	Faible à nul	Images quotidiennes annuelles mondiales  Repérage des « hotspots » avant analyse plus poussée	Ne pénètrent pas les nuages (passifs)
<b>Optique Moyenne résolution :</b> <b>Ex : Landsat TM, CBERS (Chine/Brésil), Terra Aster (USA), SPOT-HRV (France)</b>  Pixel 15-200 m Surface cartes : 0,5-10ha	>80% pour des cartes forêt/non-forêt	Landsat et CBERS gratuits depuis 2009  <0,001\$/km <sup>2</sup> Pour données historiques  0,02 à 0,5\$/km <sup>2</sup> pour données récentes	Premier instrument pour suivre le changement d'usage des terres : utilisé notamment par Brésil et Inde pour le suivi de leur déforestation nationale	Ne pénètrent pas les nuages (passifs)  Manque de détail pour distinguer les types de forêt
<b>Optique haute résolution :</b> <b>Photos aériennes, IKONOS, QuickBird</b>  Pixel < 10 m Surface cartes <0,1ha	>90% pour des cartes forêt/non-forêt	Elevé à très élevé : De 0.5\$/km <sup>2</sup> (SPOT-5 HRG) à 30\$/km <sup>2</sup> (Geoeye-1)	Validation de résultats et calibrage des algorithmes servant à analyser les données basse et moyenne résolutions	Besoin de nombreuses images pour couvrir une surface importante : coût élevé  Analyse des images difficile à standardiser
<b>Radar moyenne résolution : SAR</b>  <b>Ex : ERS1/2 SAR, JERS-1, ENVISAT-ASAR</b>	>80% pour des cartes forêt/non-forêt	Plusieurs gratuits (JERS-1, RADARSAT...)  ALOS PALSAR : 0,017\$/km	Pénètrent les nuages (actifs)	Manque de détail pour distinguer les types de forêt  Limité à des forêts de faible biomasse

<sup>#</sup> Fiabilité selon Fagan et DeFries 2009 : pourcentage de pixels identifiant correctement le couvert végétal.

<sup>1</sup> GOF-C-GOLD, 2009

<sup>2</sup> Fagan et DeFries, 2009

Source : CEC

### 2.3 Plus de coopération pour une surveillance homogène de la déforestation

Alors que la déforestation a principalement lieu dans les pays en développement, ces derniers ne disposent généralement pas de moyens de surveillance aussi élaborés que le Brésil (voir encadré 3). Heureusement, l'accès aux données satellites et le coût de leur interprétation ont déjà beaucoup diminué aux cours des cinq dernières années pour atteindre parfois la gratuité.

#### Encadré 3 : Brésil, une longueur d'avance dans la surveillance des forêts

Avec près de 61,7 millions d'hectares déboisés dans les années 1970, dont les deux tiers destinés à de l'élevage extensif (Bellassen, 2008), le Brésil a rapidement pris conscience de la nécessité de mettre en œuvre un suivi efficace de la déforestation. Dans le cadre d'un programme intitulé PRODES, l'Institut national de recherche spatiale (INPE) fournit depuis 1988 une estimation annuelle des taux de déforestation dans la forêt amazonienne brésilienne. Pour cela, l'INPE traite chaque année quelques 229 images LANDSAT d'une résolution de 30m. Le Brésil œuvre pour la diffusion du suivi de la déforestation en publiant gratuitement ses données satellites<sup>7</sup>. Depuis 2002, l'interprétation des images est digitalisée, ce qui a permis la mise en place d'une banque de données multi-temporelle. Depuis 2005, le Brésil a lancé le programme DETER, qui permet de lancer des alertes en temps réel lorsque des cas de déboisement de plus de 25ha sont détectés<sup>8</sup>.

Depuis 2008, la NASA met à disposition des images Landsat moyenne résolution à couverture quasi globale. Disponibles gratuitement pour les années 1990, 2000 et 2005, ces images servent de référence pour définir les taux historiques de déforestation. La seule limite à l'utilisation de ces données concerne les zones à couverture nuageuse persistante telle que l'Afrique Centrale. Depuis 2009, les données du China-Brazil Earth Resource Satellite (CBERS), dont la couverture spatiale est en cours d'expansion, sont accessibles gratuitement pour les PED (GOFC-GOLD, 2009).

D'autre part, le Center for Global Development a développé une plateforme nommée FORMA<sup>9</sup> (Forest Monitoring for Action) qui génère gratuitement des cartes interprétées à partir d'images satellites gratuites de la NASA et d'autres institutions. Leur analyse est basée sur la détection des variations de couleur du couvert végétal. Pour l'instant appliquée seulement à l'Indonésie, ce travail permet d'avoir des données sur la déforestation en temps réel à un coût limité, une fois l'algorithme d'analyse généré.

Enfin, afin d'améliorer la connaissance de l'utilisation des surfaces forestières mondiales, la FAO mène actuellement une enquête mondiale de télédétection<sup>10</sup> basée sur la compilation et l'interprétation de plus de 13 500 images Landsat datées de 1990, 2000 et 2010. Des données radar permettent de compléter les résultats pour les zones présentant une couverture nuageuse permanente. En mettant à disposition des décideurs et des chercheurs les données satellites et les logiciels d'interprétation associés, cette enquête permettra d'aider les pays qui n'ont pas encore développé un système performant et adapté à la surveillance de leur forêt. En homogénéisant les méthodes de suivi et la détermination des taux historiques de déforestation, cette base de données pourrait constituer un levier important dans l'avancée des négociations REDD.

---

<sup>7</sup> Disponibles à l'adresse suivante : <http://www.obt.inpe.br/prodes/>

<sup>8</sup> Résultats disponibles à l'adresse suivante : <http://www.obt.inpe.br/deter/>

<sup>9</sup> <http://www.cgdev.org/section/initiatives/active/forestmonitoringforactionforma>

<sup>10</sup> En partenariat avec le Joint Research Centre de la Commission Européenne (JRC), l'USGS, la NASA, l'Université d'Etat du Dakota du Sud (SDSU), l'Université Friedrich-Schiller et de nombreux experts nationaux. Publication des résultats prévue pour fin 2011, Année Internationale des Forêts.

## 2.4 Vers une définition homogène de la « déforestation »

Des outils de suivi de la déforestation performants sont devenus opérationnels au cours des deux dernières décennies, avec une accessibilité croissante pour les pays en développement. Pourtant, pour harmoniser la surveillance des forêts, une étape clé reste la définition du concept de « déforestation ».

Le GIEC propose trois approches pour suivre le changement d'usage des terres, avec une quantité d'information croissante de l'approche 1 à l'approche 3, comme illustré ci-contre. Ces approches ne s'excluent pas mutuellement : un pays peut choisir de les combiner selon les conditions nationales (GIEC, 2006). Selon la méthode utilisée, on aura accès à des données de déforestation brute et/ou nette. Un taux brut ne prend en compte que les surfaces déboisées. Un taux net fournit directement le bilan entre surfaces déboisées et reboisées. Seule la connaissance des taux à la fois brut et net permet de distinguer la part de déforestation brute et celle de reboisement. Cette distinction est fondamentale en termes d'émissions car le carbone qui sera séquestré dans une nouvelle plantation ne compense pas directement les pertes associées au déboisement de forêts primaires ayant accumulé du carbone pendant des centaines voire des milliers d'années. Ainsi un pays peut tout à fait avoir un taux de déforestation net proche de zéro mais continuer d'émettre, du fait que les hectares plantés ne compensent pas les émissions des hectares déboisés.

### Encadré 5 : Taux de déforestation mondiale : ce que le « net » ne dévoile pas

Le recul de la déforestation mondiale annoncé par le rapport FRA 2010 doit être interprété avec précaution. En passant de -8,3 à -5,2 millions d'hectares par an la déforestation nette opère une baisse remarquable de 38% entre les années 1990 et 2000. Celle-ci s'explique cependant surtout par une augmentation du boisement et de l'expansion naturelle des forêts dans certains pays. Le recul de la déforestation brute entre ces décennies est donc plutôt aux environs de 19%<sup>11</sup>. Or, en termes de stock de carbone, la perte engendrée par le déboisement de forêts primaires ayant séquestré du carbone pendant des milliers d'années n'est pas immédiatement compensée par la croissance des plantations ou des forêts secondaires.

Dans le cadre du REDD+, seule l'approche 3 est adaptée car elle permet de dissocier déboisement, boisement et reboisement (GOFC-GOLD, 2008), et de suivre chacune de ces activités spatialement.

---

<sup>11</sup> Passage de 16 à 13 Mha/an, pertes naturelles incluses, soit une baisse de 19% entre les années 1990 et 2000.

**Tableau 2 : Illustration de l'approche 1**

L'approche 1 identifie la **superficie totale** pour chaque catégorie d'affectation des terres, sans spécification des conversions entre catégories. On ne peut donc suivre que des changements **nets** d'affectation. Cette approche est souvent alimentée par des données préparées dans des buts autres (statistiques agricoles et forestières), d'où un risque d'incohérence (double comptages, omissions), et une incertitude variable selon la fiabilité des données.

Land-Use	Land Area Mha		
	Initial	Final	Net Change
<b>Forest land total</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>1</b>
<i>Forest land (Unmanaged)</i>	5	5	0
<i>Forest land zone A</i>	7	4	-3
<i>Forest land zone B</i>	6	6	0
<i>Afforestation</i>	0	4	4
<b>Grassland total</b>	<b>84</b>	<b>82</b>	<b>-2</b>
<i>Unimproved grassland</i>	65	63	-2
<i>Improved grassland</i>	19	19	0
<b>Cropland total</b>	<b>31</b>	<b>29</b>	<b>-2</b>
<b>Wetlands total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Settlements total</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>3</b>
<i>Existing Settlements</i>	5	5	0
<i>New Settlements</i>	0	3	3
<b>Other land total</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>
<b>Balancing term</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>TOTAL</b>	<b>140</b>	<b>140</b>	<b>0</b>

Source: Présentation de Thelma Krug, MRV Workshop UN-REDD 2010

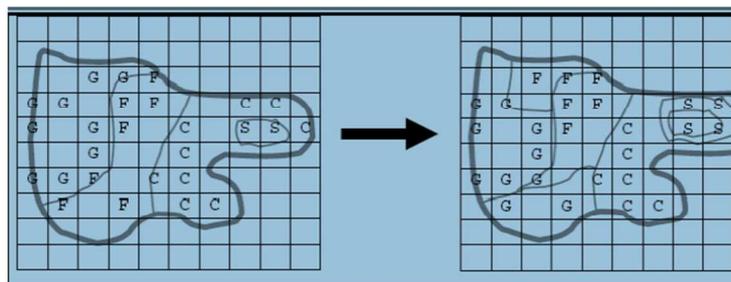
**Tableau 3 : Matrice de conversion, approches 2 et 3, illustrée pour le cas de la France**

	Forêt	Prairie	Culture	Artificiel	Zones humides	Autres terres	Total 2008
Forêts	15 241	15	3	5	0	0	15 265
Prairies	22	14 063	205	52	11	1	14 354
Cultures	3	72	18 188	32	1	0	18 295
Artificiel	3	28	16	5 202	1	0	5 251
Zones humides	0	2	0	1	876	0	880
Autres terres	0	0	0	3	0	871	874
Total 2009	15 270	14 180	18 412	5 295	890	872	54 919

L'approche 2 complète la précédente par des informations sur les **conversions** entre catégories, mais sans données d'emplacement spatialement explicites. Cette approche aboutit à une matrice répertoriant les usages et les conversions. Les changements **nets et bruts** sont disponibles, ce qui permet d'effectuer des vérifications par recoupement.

Source : CITEPA 2010

**Figure 6 : Suivi spatialement explicite avec visualisation de la catégorie initiale et finale pour chaque point entre deux dates données**

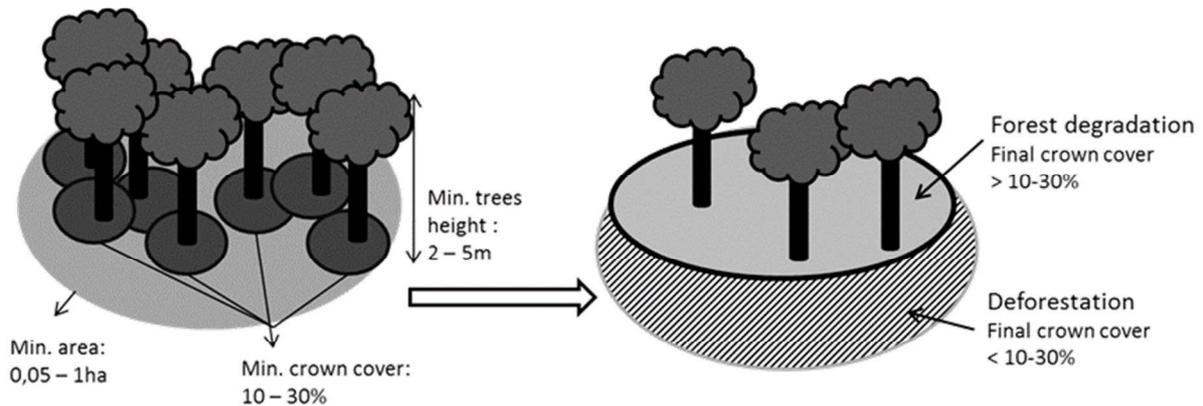


L'approche 3 permet d'étendre l'approche 2 en suivant les conversions des affectations des terres sur une base **spatialement explicite**, grâce aux apports de la télédétection. L'incertitude de cette méthode varie selon l'outil de télédétection et le mode d'interprétation utilisé (GIEC 2006).

Source : CITEPA, 2010

En amont du choix entre déforestation brute et nette, se pose la question d'un consensus sur la définition du concept même de forêt. En effet, la déforestation est définie par la CCNUCC comme la « conversion de long terme, causée par l'activité humaine, d'une forêt à une autre utilisation de la terre ». Or, afin de s'adapter à la diversité des forêts mondiales, les Accords de Marrakech permettent cependant une certaine flexibilité dans la définition du terme forêt. Comme le montre la figure 7, une forêt est définie comme une surface d'au moins 0.05-1.0 hectare, avec une densité de couvert de plus de 10-30% et des arbres d'une hauteur minimale de 2 à 5m.

**Figure 7: Définition d'une forêt selon les Accords de Marrakech et distinction entre déboisement et dégradation**



Source : Chaire Economie du Climat

La surface mondiale forestière ainsi que les taux de déforestation nationaux varient énormément selon la définition retenue du terme « forêt », rendant d'autant plus complexe l'harmonisation du suivi de la déforestation d'un pays à un autre. A titre d'exemple, la surface forestière en Indonésie au début des années 2000 varie de 165 à 121 Mha selon que l'on définit la « forêt » sur la base de 10 ou de 30% de couvert forestier<sup>12</sup> (Saastchi *et al.* 2011). Selon la définition de « forêt » utilisée, les données de déforestation en Indonésie peuvent indiquer une augmentation de 5%/an ou au contraire une baisse de 0,1%/an<sup>13</sup> (Ekadinata *et al.*, 2010). Le choix de la définition de la forêt peut donc influencer la compensation reçue par un pays au titre du REDD+. Le choix d'une définition large a certes permis de contenter tous les pays engagés dans le REDD+, mais une harmonisation minimale est attendue dans les prochaines négociations sans quoi chaque pays aura intérêt à choisir la définition la plus stratégique en termes de rémunération.

## 2.5 L'épineuse question des niveaux de référence

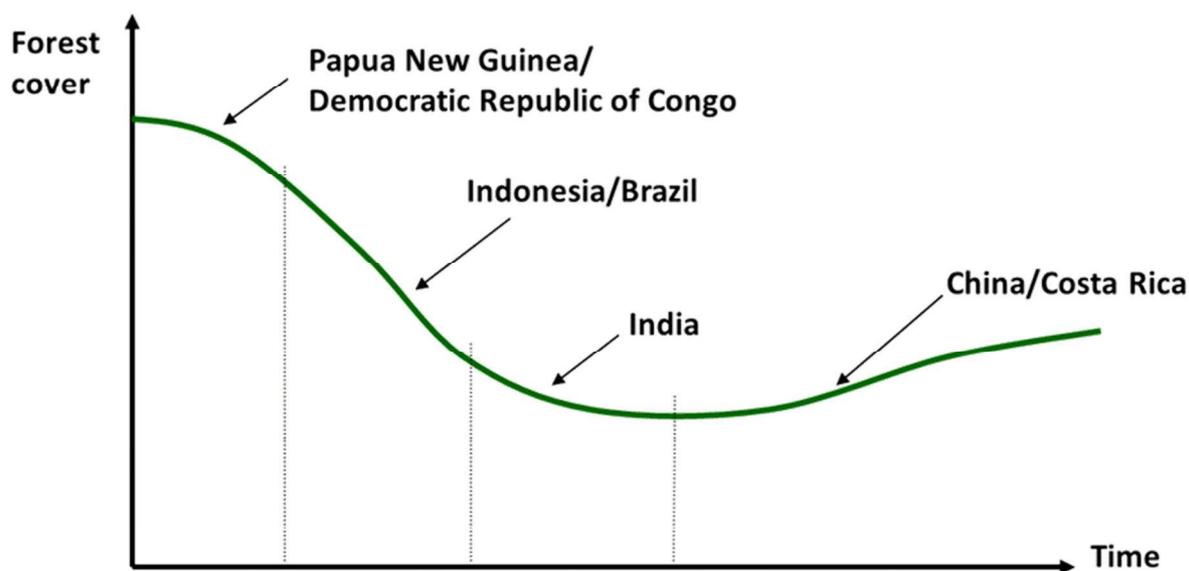
Un des rôles du cadre de MRV sera d'assurer l'additionnalité des réductions d'émissions rémunérées par le REDD+ par rapport à un scénario de référence. Le choix des niveaux de référence en termes de déforestation influe directement sur la rémunération que recevra chaque pays. Or les intérêts de chaque pays diffèrent largement entre l'utilisation de niveaux de référence historiques ou projetés.

<sup>12</sup> <http://rainforests.mongabay.com/deforestation/2000/Indonesia.htm>

<sup>13</sup> <http://www.asb.cgiar.org/story/category/fuzzy-forest-framing-favours-fallacies>

Selon la théorie de la transition forestière, illustrée dans la figure 8, les premières étapes de développement d'un pays conduisent à une réduction du couvert forestier en raison de l'expansion démographique et de l'augmentation consécutive de la demande pour les terres, l'agriculture et les produits bois. Le couvert forestier atteint ensuite une phase de stabilisation car l'économie du pays se concentre sur les services. La dernière étape du développement est associée à des plantations forestières grâce à une diminution de la pression démographique, une augmentation des rendements agricoles et une demande plus soutenue pour les biens environnementaux.

**Figure 8: Courbe représentative de la théorie de la transition forestière**



Source : Kanninen et al. 2007

Bien que cette théorie ne soit pas toujours vérifiée, elle illustre la difficulté actuelle à choisir entre des niveaux de référence historiques ou projetés pour la déforestation et les émissions associées. Un niveau de référence historique joue clairement en faveur des pays ayant fortement déboisé au cours des dernières années par rapport à ceux qui entrent dans la première phase de la courbe de transition forestière. Des niveaux de référence projetés seraient plus justes mais d'avèrent bien plus complexes à mettre en place à cause des nombreux facteurs à prendre en considération.

Au-delà des questions purement techniques de précision de la mesure, on constate donc que les questions de MRV révèlent des enjeux stratégiques autour desquels un accord global peut s'avérer complexe. Des questions similaires se posent lorsque l'on traite des stocks de carbone forestier.

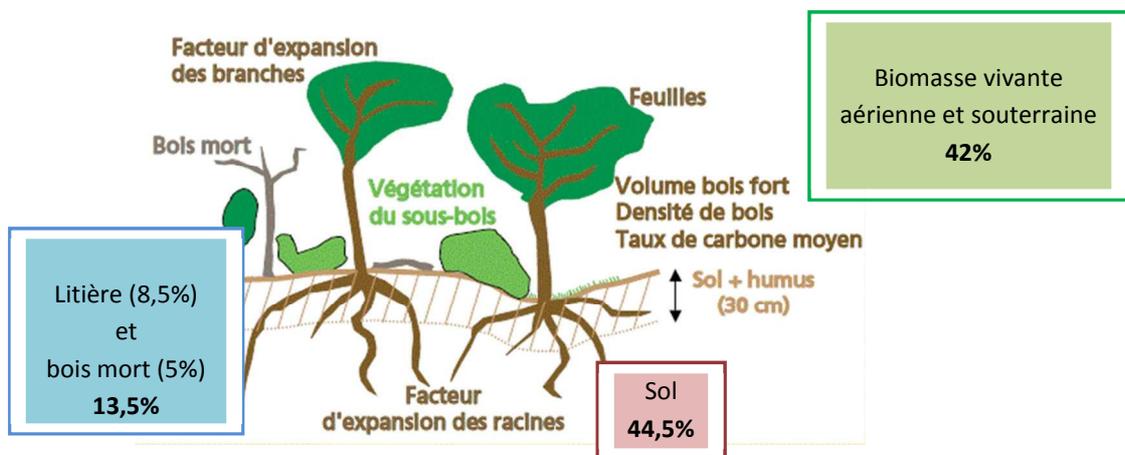
### **3 Estimation du stock de carbone forestier : un défi plus délicat à relever**

La connaissance des surfaces déboisées ne suffit pas à déduire les émissions de carbone. Déboiser un hectare dans une forêt A n'émettra pas autant qu'un hectare dans une forêt B. En effet, de nombreux facteurs influencent le contenu carbone d'un hectare de forêt, dont le type d'essence, le climat, la latitude ou la densité de la forêt. Déterminer le contenu carbone à l'hectare de chaque forêt est donc une dimension majeure dans un contexte de rémunération des réductions d'émission.

### 3.1 Où se cache le carbone forestier ?

La plupart des efforts de recherche sur le stock de carbone forestier s'en tiennent uniquement au carbone contenu dans la biomasse aérienne. Elles négligent généralement la biomasse racinaire, plus difficile à mesurer. Cette dernière représente pourtant entre 20 et 56% de la biomasse aérienne (en matière sèche, selon GIEC 2006). D'autre part, le carbone des forêts ne se situe pas uniquement dans l'arbre sur pied. Comme le montre la figure 9, en 2010, sur les 3160GtCO<sub>2</sub>eq que constitue le stock mondial de carbone forestier, seuls 42% sont attribués à la biomasse vivante (aérienne et souterraine). Le carbone contenu dans le sol représente à lui seul 44,5% du stock total, les 13,5% restants étant attribués au bois mort et à la litière (Pan et al. 2011). En conséquence, le GIEC définit cinq grands compartiments de carbone : *biomasse aérienne*, *biomasse souterraine*, *bois mort*, *litière* et *sols* (GIEC, 2006).

**Figure 9 : Part des différents compartiments de carbone dans le stock de carbone forestier total 2010**



Source : image IFN, données Pan et al. 2011

L'estimation du contenu carbone d'une forêt nécessite des inventaires de terrain au cours desquels on utilise des équations dites allométriques qui relient un paramètre de l'arbre – le plus souvent le diamètre – à son contenu carbone. L'encadré 6 donne une illustration schématique de l'évaluation du contenu carbone d'un arbre. Ces études de terrain sont néanmoins longues et coûteuses, d'où l'importance de les combiner à un processus d'échantillonnage.

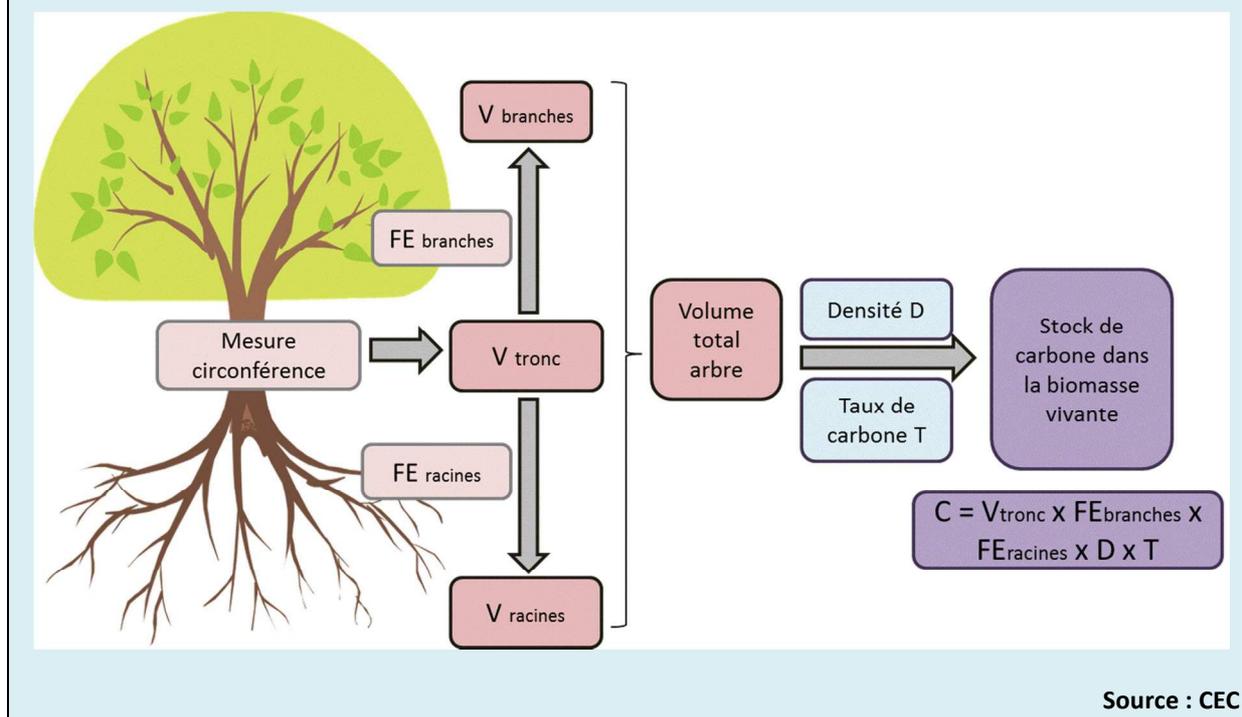
#### Encadré 6 : Combien de carbone dans un arbre ?

L'estimation du stock de carbone dans un arbre commence par l'évaluation du volume du tronc ( $V_{\text{tronc}}$ ), grâce à la mesure de la circonférence, couplée éventuellement à la hauteur. Des facteurs d'expansion (FE) « branche » et « racine » permettent de passer du volume du tronc au volume total. Comme le montre la **figure 10**, le stock de carbone de l'arbre **C** s'obtient en multipliant le volume du tronc et les facteurs d'expansion par la densité du bois<sup>14</sup> **D** et le taux de carbone moyen<sup>15</sup> **T** souvent arrondi à 50% (IFN, 2005).

<sup>14</sup> Obtenue en séchant puis pesant intégralement les arbres d'une parcelle. On obtient d'abord la masse volumique du bois en tonnes de matières sèches par m<sup>3</sup>. Elle va de 0,20 à 0,80 selon les essences.

<sup>15</sup> Tonne de carbone par tonne de matière sèche

Figure 10 : Stock de carbone dans un arbre



Un pays qui ne dispose pas de données spécifiques à ses forêts pourra utiliser les valeurs moyennes de biomasse par défaut fournies par le GIEC. Gratuites, ces valeurs engendrent une forte incertitude à cause des variations de carbone observées dans les écosystèmes forestiers.

Pour les compartiments « bois morts et litière » et dans une moindre mesure pour le « sol », la connaissance du stock de carbone est encore très lacunaire. Obtenir des données précises demanderait à chaque pays de prélever et analyser des échantillons propres à chaque forêt, une étape qui est pour l'instant largement remplacée par l'utilisation des valeurs par défaut proposées par le GIEC.

Si elles permettent un gain de temps et d'argent, l'utilisation de valeurs génériques pour le stock de carbone génère une erreur significative. Une étude menée sur la forêt amazonienne brésilienne a montré que 60% de l'incertitude sur les flux de carbone forestier au Brésil provenait de l'incertitude sur les stocks de carbone forestier<sup>16</sup>. La création d'outils de suivi du stock de carbone plus « coût-efficace » est donc un enjeu majeur pour le REDD+. A cet effet, la télédétection semble apporter des solutions prometteuses, limitées pour l'instant au compartiment « biomasse vivante ».

### 3.2 Les ambitions de la télédétection : vers une meilleure connaissance de la biomasse

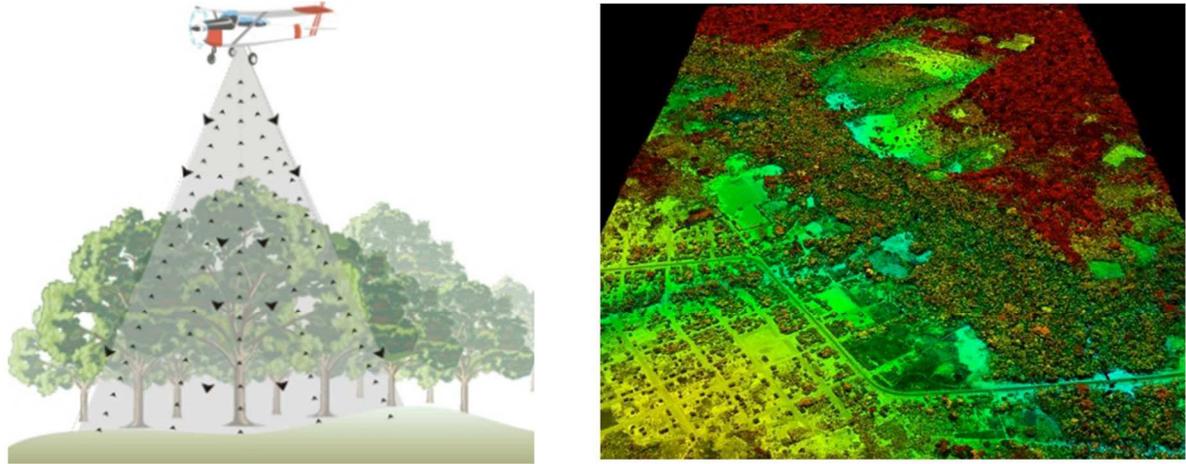
Comme indiqué dans le tableau 4, les capteurs actifs radar ou lidar (voir encadré 4) se sont révélés les plus adaptés à l'estimation du stock de carbone dans la biomasse forestière.

Plusieurs techniques utilisant des capteurs portés par avion (meilleure résolution mais couverture moins large) permettent de mesurer la largeur de la canopée ou la hauteur des arbres, que des relations allométriques permettent de relier à leur biomasse. Des inventaires de terrain ponctuels permettent ensuite d'aboutir au stock de carbone. Au Brésil, un couplage entre données satellites gratuites, capteurs lasers aériens LIDAR et

<sup>16</sup>D'après la présentation réalisée par Scott Goetz au workshop Planet Action du 27/10/11 sur la base de Houghton 2002

inventaires de terrains ponctuels, a permis d'obtenir des cartes en 3D du stock de carbone dans la biomasse, à un coût avoisinant les 0,08\$/ha<sup>17</sup> (Asner *et al.* 2010). Cette technique, illustrée ci-dessous, est en cours d'expérimentation dans plusieurs pays (Madagascar, Népal...), avec des résultats encourageants pour le REDD+.

**Figure 11 : Schéma expliquant le principe du lidar et exemple de carte forestière en 3D au Pérou**



Source : IRFO et Asner *et al.* 2010

Au-delà de l'échelle nationale, le recours aux satellites s'avère indispensable pour obtenir des résultats réguliers, homogènes et synoptiques. L'analyse de la corrélation entre l'intensité des signaux reçus par les satellites moyenne résolution optiques ou radar et les mesures de terrain a d'abord été envisagée. Ces méthodes perdent en fiabilité dès que la biomasse des forêts devient élevée et ne sont donc pas utilisables dans les forêts tropicales (Gibbs, 2007 ; Fagan et DeFries, 2009). Des efforts de recherche visent à développer des méthodes efficaces pour des valeurs de biomasses élevées. Le premier satellite LiDAR a été conçu par la NASA sous le nom IceSAT. Il n'est plus en orbite mais le lancement de ses successeurs a déjà été programmé. IceSAT a permis de cartographier le stock de carbone de 2,5 milliards d'hectares de forêt<sup>18</sup> (Saatchi et al. 2011)

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) développe un projet basé sur l'interférométrie (méthode PolInSAR ou Polarimetric Interferometric SAR). Ce projet BIOMASS<sup>19</sup> pourrait permettre d'atteindre une incertitude de moins de 20% sur la quantité de biomasse forestière grâce à une meilleure résolution et grâce au développement de relations directes entre données satellite et valeurs de biomasse, visant à s'affranchir du passage par des relations allométriques imprécises (grande variabilité selon l'essence, l'âge ou le climat de peuplements forestiers analysés).

---

<sup>17</sup> [http://fr.mongabay.com/news/2010/fr0906-carbon\\_mapping\\_peru.html](http://fr.mongabay.com/news/2010/fr0906-carbon_mapping_peru.html)

<sup>18</sup> Exploitation du système GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), uniquement applicable à des surfaces supérieures à 10 000 hectares : [http://news.mongabay.com/2011/0531-carbon\\_map.html?utm\\_campaign=Mongabay+rainforests&utm\\_medium=Twitter&utm\\_source=SNS.analytics](http://news.mongabay.com/2011/0531-carbon_map.html?utm_campaign=Mongabay+rainforests&utm_medium=Twitter&utm_source=SNS.analytics)

<sup>19</sup> Seul projet en bande P, gamme de longueur d'onde particulière dans l'infrarouge qui est sensible aux plus gros éléments des forêts, ce qui le rend très prometteur par rapport aux RADAR en bande L, C ou X déjà en cours d'exploitation.

**Tableau 4 : Fiabilité, bénéfices et limites des différentes techniques de mesure du stock de carbone dans la biomasse**

Méthode	Fiabilité <sup>#,1</sup>	Bénéfices <sup>2</sup>	Limites <sup>1,2</sup>
<b>Optique moyenne résolution</b>	Basse	Données fréquentes et accessibles à l'échelle mondiale. Gratuites.	Modèles inadaptés aux forêts tropicales : limité à des forêts à faible stock de biomasse
<b>Optique haute résolution (avion)</b>	40-90% de correspondance avec inventaires terrain		Aire des images limitée : coûteux. Analyse difficile à standardiser. Faible précision en forêt fermée.
<b>Radar</b> <b>SAR</b> <b>InSAR</b>  <b>Ex : PALSAR, Envisat</b>	>80% pour SAR (volumes)  30-80% pour InSAR (estimation des volumes à partir de la hauteur)	Pénètre les nuages.  Permettent des mesures globales et répétitives.  Adapté pour jeunes forêts ou forêts clairsemées PolInSAR s'adapte également à des biomasses élevées.	<b>SAR</b> : Baisse de précision lorsque en zone montagneuse et pour des canopées de structures complexes et/ou à forte biomasse (ex : forêt tropicale)  <b>InSAR</b> : Manque de modèles numériques d'élévations du terrain (DEM) pour augmenter la précision des résultats.
<b>Laser</b> <b>LIDAR</b>	45-97%	Bonne estimation des variations spatiales de carbone.	Echantillonnage limité spatialement. Coût élevé.

<sup>#</sup>Fiabilité définie comme le pourcentage de correspondance avec les inventaires de terrain

<sup>1</sup>Fagan et DeFries 2009

<sup>2</sup>Gibbs et al. 2007

Source : CEC

### 3.3 Le REDD doit-il se limiter au carbone des arbres?

Même au sein de l'Annexe 1, la connaissance du stock de carbone forestier est actuellement incomplète, surtout pour les compartiments autres que la biomasse vivante. Dans un contexte REDD+, les pays en jeu ont pour la plupart (l'Inde faisant exception) une mauvaise capacité à estimer ces stocks. Négliger l'un des cinq compartiments préconisés par le GIEC peut cependant avoir des conséquences importantes en termes de rémunération. Dans les forêts boréales (Russie, Norvège, etc.) les principaux changements de stocks ont lieu dans le sol et la litière (Pan *et al.* 2011).

En Indonésie, leader en termes d'émission de carbone souterrain (Ekadinata *et al.* 2010), négliger les compartiments de carbone autres que la biomasse aérienne peut mener à des politiques REDD+ inefficaces. L'approche REDD+ indonésienne se limite au périmètre de la définition institutionnelle d'une forêt – désigné par le terme *kawasan hutan* – en dehors duquel le Ministère des Forêts ne peut agir. Or des études montrent que les émissions hors *kawasan hutan* comptent pour un tiers des émissions forestières, notamment à cause des émissions engendrées par les tourbières (voir encadré 7). Dès lors que l'on élargit la définition du terme « forêt », en incluant notamment les sols des tourbières, les réductions nettes d'émissions prévues par les politiques REDD+ indonésienne s'annulent (Ekadinata *et al.* 2010).

### Encadré 7: Les tourbières, un stock de carbone souterrain à ne pas négliger

Les tourbières méritent une attention particulière dans la mesure où leurs sols, issus d'un long processus de fossilisation de débris végétaux, pouvant contenir jusqu'à 50% de carbone. Bien qu'elles n'occupent que 3% de la surface terrestre, les tourbières contiennent un stock de carbone deux fois plus important que celui de la biomasse forestière mondiale<sup>20</sup> (Kaat et Joosten, 2009). Ce stock de carbone accumulé, pendant des milliers d'années, est actuellement fragilisé par des opérations de drainage et par des incendies, en particulier en Asie du Sud-est. L'oxydation engendrée par le drainage des tourbières, principalement en raison de l'extraction de tourbe ou l'instauration de terres agricoles et forestières, entraîne la libération rapide d'un stock de carbone accumulé pendant plusieurs millénaires. En Asie du Sud-Est, ces émissions ont été estimées à plus de 600 MtCO<sub>2</sub>eq pour l'année 2006<sup>21</sup> (Hooijer, 2010).

L'acquisition de données sur les surfaces et les stocks de carbone forestiers a déjà fait apparaître des difficultés propres au secteur forestier. Le passage aux flux de carbone soulève de nouvelles questions que la partie 4 propose d'identifier.

## 4 Suivi des flux de carbone : les consensus restent à trouver

### 4.1 Méthodes des stocks versus méthode des flux

Le GIEC propose deux méthodes (qui peuvent être combinées) pour évaluer le flux de carbone dans la biomasse vivante de la parcelle entre deux dates données :

- ✓ La **méthode des stocks** consiste à réaliser des inventaires complets du nombre et des caractéristiques des arbres sur pied. A partir du stock total à deux dates différentes, on en déduit un flux par différence.
- ✓ La **méthode des flux** consiste à évaluer les flux entrants (nouveaux arbres plantés et accroissement des arbres existants) et sortants (prélèvements, mortalité). Elle requiert donc des données sur l'accroissement en volume des arbres pour évaluer le stockage ainsi que sur les prélèvements (légaux ou non) et autres pertes (mortalité naturelle, feux, etc.) pour estimer les émissions. Cette méthode est considérée comme moins fiable que la précédente car elle oblige à manipuler des données non homogènes (Dupouey, 2006). Elle reste très employée au niveau national car plus économique si les statistiques nécessaires existent.

Grâce à des inventaires de terrain complets menés sur l'ensemble des forêts françaises depuis 1958, l'Inventaire Forestier National applique tous les dix à douze ans la méthode des stocks pour évaluer les flux nets de carbone nationaux par région. Cependant, ces inventaires ne sont pas assez réguliers pour servir de base aux rapports annuels CCNUCC. Le CITEPA utilise donc la méthode des flux pour déterminer la variation de biomasse dans les forêts qui n'ont été ni déboisées ni reboisées depuis longtemps. Pour ce faire le CITEPA utilise les données récoltées par le service statistique du Ministère de l'Agriculture intégrant les prélèvements de bois (grumes et bois industriel) ainsi que la mortalité des arbres. Les statistiques énergétiques permettent d'estimer la quantité de bois prélevée à des fins non commerciales. Enfin, les données d'accroissement des peuplements forestiers recensées par l'Inventaire Forestier National permettent d'évaluer le carbone séquestré par les forêts françaises chaque année.

---

<sup>20</sup> Stock de carbone total dans les écosystèmes tourbeux estimé à 2019 GtCO<sub>2</sub> en 2008, dont 569 au Canada, 506 en Russie et 198 en Indonésie.

<sup>21</sup> 0,63 GtCO<sub>2</sub>e selon Hooijer 2006, et entre 0,36 et 0,86 GtCO<sub>2</sub>e selon Hooijer 2010.

L'incertitude sur les surfaces et stocks de carbone se répercute sur l'erreur finale associée aux flux de carbone forestier. A titre d'illustration, l'incertitude sur les données de changement d'usage des sols en France est estimée à 30%. En ajoutant le manque de précision sur les stocks de carbone, l'incertitude finale sur les facteurs d'émissions finaux atteint les 50% (CITEPA, 2010).

Au-delà de l'incertitude propre à la mesure, plusieurs questions surviennent au moment d'estimer les flux de carbone forestier dont la réponse n'est pas uniquement technique.

#### 4.2 Que devient le carbone après déforestation ?

Connaître la surface déboisée et le stock de carbone par hectare ne suffit pas à déduire un flux de carbone. En effet, le carbone contenu dans un arbre n'est pas intégralement émis dans l'atmosphère immédiatement après son abattage. L'ampleur et le rythme des émissions varient selon que le bois est brûlé, abandonné sur place ou utilisé pour créer des produits bois. De la même façon, selon l'usage qui est fait de la terre après déboisement, le carbone du sol sera relâché plus ou moins rapidement. Du fait que le labour libère une partie du carbone du sol, une ancienne terre forestière émettra davantage si elle est convertie en terre cultivée qu'en prairie. Certains modèles prennent en compte le devenir du carbone et la séquestration de carbone dans les forêts secondaires. C'est le cas du *book-keeping model* élaboré par Houghton (voir Annexe 2), qui donne une vision plus réaliste des flux de carbone forestier.

Les lignes directrices du GIEC sont obligées de poser des hypothèses simplificatrices. Pour le carbone du sol, elles supposent un changement linéaire d'un stock à un autre sur une période définie de 20 ans. Pour la biomasse aérienne, on suppose que tout ce qui n'est plus en forêt été émis dans l'atmosphère. En particulier, le potentiel de séquestration des produits bois est pour l'instant ignoré dans les inventaires. La durée de vie moyenne de ces derniers peut pourtant atteindre plusieurs décennies pour les meubles ou le bois de construction<sup>22</sup>, et le GIEC considère que l'on séquestre environ 1t CO<sub>2</sub> dans 1m<sup>3</sup> de bois. Des discussions sont en cours au sein du GIEC afin d'inclure dans les inventaires post-2012 les produits bois sous le terme Produits Ligneux Récoltés (PLR). Le GIEC propose déjà des lignes directrices pour les comptabiliser mais le rapportage est encore volontaire (chapitre 12, GIEC 2006). Dans ce contexte, le Ministère français de l'Agriculture et de la Pêche a récemment lancé une enquête visant à estimer la quantité de carbone stockée dans les produits bois pour l'année 2005 (Vial, 2010). Celle-ci révèle que la filière bois a permis de séquestrer en 2005, grâce à la fabrication de produits bois, environ 4 millions tCO<sub>2</sub>e<sup>23</sup> soit 7% du puits net forestier français cette même année<sup>24</sup>. Au niveau mondial, les produits bois représenteraient autour de 8% du puits de carbone dans les forêts établies (Pan *et al.* 2011).

Si les négociations quant à la prise en compte des produits bois peinent à aboutir, c'est notamment à cause des enjeux stratégiques qui se cachent derrière le choix d'une méthodologie. Selon le mode de comptabilisation choisi, on avantage soit les pays importateurs soit ceux qui exploitent le bois.

---

<sup>22</sup> Durée de vie moyenne aux Etats-Unis estimée par Miner 2006 à 30 ans pour l'ameublement et entre 20 et 100 ans pour le bois de construction. En France, Barbier 2007 a estimé ces durées à 11,1 ans pour l'ameublement et 18,5 ans pour le bois de construction.

<sup>23</sup> Selon que l'on choisit une approche par la production (produits fabriqués à partir de bois issus de la de la forêt française) ou par la variation de stock (importations incluses). Etude réalisée sur les filières construction, ameublement, emballage, papier-carton et bois énergie, avec application d'une précision de niveau 3.

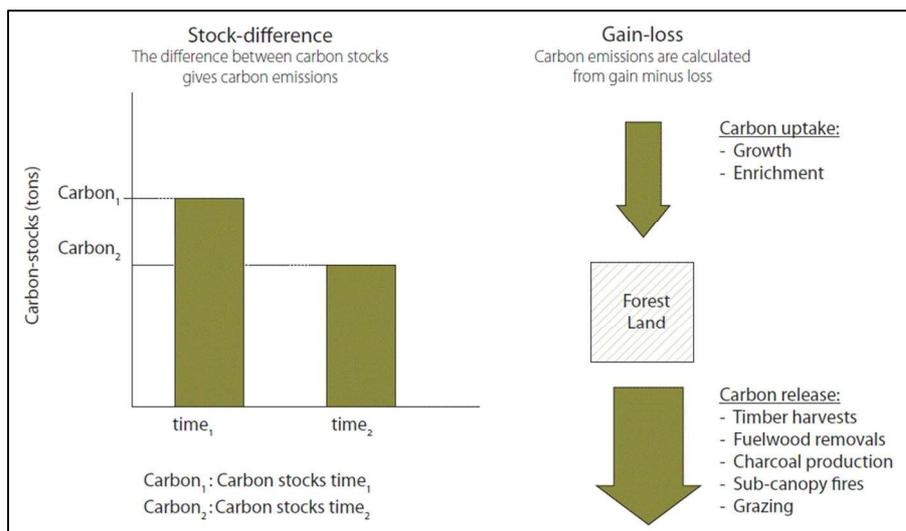
<sup>24</sup> Puits de 54 M tCO<sub>2</sub>e selon le rapport publié par le CITEPA en 2006

### 4.3 Traquer les flux de carbone dans une forêt

La définition du concept de forêt par un seuil de couvert forestier limite la prise en compte des émissions au-delà de ce seuil. Comme indiqué sur la figure 7, si le stock de carbone diminue sans que l'on puisse parler de déforestation, il y a alors dégradation. A l'inverse, une gestion forestière correctement menée peut permettre d'améliorer le stock de carbone forestier. L'élargissement progressif du RED au REDD+ a permis d'inclure les activités pouvant générer des variations de stock au sein d'une forêt. En dépassant le seul cadre de la déforestation évitée, le passage au REDD+ a permis d'inclure un plus grand nombre de pays dans ce mécanisme global. Dans certains pays, négliger la dégradation reviendrait à passer à côté d'une source majeure d'émissions. Dans la forêt amazonienne brésilienne par exemple, la dégradation serait responsable de 20% des émissions forestières, avec dans certains Etats brésiliens un taux d'abattage sélectif supérieur au taux de déforestation (Asner, 2005). Au Pérou, une étude utilisant des données issues de capteurs laser aéroportés montre que les émissions liées à la dégradation atteignent un tiers des émissions estimées pour la seule déforestation.

Comme le montre la figure 12, les deux méthodes préconisées par le GIEC permettent implicitement de suivre la part de la dégradation affectant la biomasse aérienne.

**Figure 12: Suivi du stock de carbone dans la biomasse aérienne des arbres : méthodes des stocks et des flux**



Source: CIFOR 2008

Le suivi par télédétection des aires dégradées est encore peu développé du fait de la complexité de son usage selon le type de dégradation réalisée. Les feux de forêts<sup>25</sup> et les trous dans la canopée engendrés par l'abattage sélectif, légal ou illégal, peuvent être détectés à partir d'une analyse adaptée d'images satellite (GOFC-GOLD, 2009) mais les feux de sous-bois ou prélèvement de bois de chauffage n'affectent pas nécessairement la canopée de manière détectable par imagerie satellite ou aérienne (DeFries, 2007). Plusieurs programmes - DEGRAD au Brésil (lancé en 2008), BIOMASS en Europe (en cours)- pourraient constituer une avancée considérable dans le suivi de la dégradation.

<sup>25</sup> Plusieurs bases de données recensent ces feux. Disponibles par exemple sur <http://modis-fire.umd.edu>, <http://maps.geog.umd.edu/firms>, <http://dup.esrin.esa.int/ionia/wfa/index.asp>

#### 4.4 Qu'est-ce qu'un flux « anthropique » ?

Le concept d'émissions anthropiques est plus complexe à définir pour des secteurs touchant au vivant comme le secteur forestier que pour les secteurs de l'énergie ou de l'industrie. Les émissions engendrées par les feux de forêt ayant ravagé la Russie au cours de l'été 2010 doivent-elles être traitées de la même façon que celles issues des déboisement et incendies volontaires en forêts tropicales ? Doit-on pénaliser un pays touché par une tempête ou une attaque de nuisibles ? A l'inverse, la séquestration de carbone liée à la croissance naturelle des forêts primaires peut-elle donner lieu à compensation ? Autant de questions qui devront être débattues avant d'aboutir à un cadre unique de MRV.

#### 4.5 Quelle précision minimale pour le REDD+ ?

Conscient de l'inégalité des moyens accessibles à chaque pays, le GIEC définit trois niveaux de précision croissante (ou Tiers) dans la méthode à employer pour estimer les stocks et flux de carbone :

- ✓ Les méthodes de niveau 1 sont créées pour être les plus faciles d'utilisation : les pays peuvent utiliser des équations et valeurs par défaut fournies par le GIEC.
- ✓ Le niveau 2 peut utiliser la même méthodologie que le Niveau 1 mais utilise des facteurs de variations des stocks et d'émissions basés sur des données spécifiques au pays ou à la région.
- ✓ Le niveau 3 utilise une méthodologie d'ordre supérieur : le pays est tenu d'utiliser des méthodes, modèles et systèmes d'inventaires adaptés aux circonstances nationales et répétés dans le temps, avec des données haute résolution désagrégées au niveau sous-national.

La question de la précision minimale à exiger reste actuellement ouverte. Autoriser un niveau 1 revient à accepter une erreur pouvant atteindre 50% (Cattaneo, 2011). Cela signifie que 50% de la somme versée lors de la phase de compensation peut ne pas correspondre à des réductions d'émission réelles, ce qui serait préjudiciable pour l'efficacité du REDD+. En adoptant des méthodes de mesure comportant une incertitude élevée, un pays peut bénéficier d'un effet d'aubaine ou au contraire ne pas être rémunéré à la hauteur de son véritable effort. Côté acheteurs, une telle incertitude limite la prévision de l'offre de crédits qui émanera du REDD+ et décrédibilise la valeur des crédits forestiers.

Augmenter la précision des mesures permettrait donc de réduire le risque pour les agents finançant le REDD+ de « gaspiller » leur argent, et pour les pays en développement de ne pas être rémunéré suffisamment. Passer d'un niveau 1 à un niveau 3 a néanmoins un coût, et rendre exclusif un niveau minimal de précision pourrait exclure des pays à fort potentiel de réduction d'émission, mais à faible capacité de MRV, diminuant la portée du REDD+ au global.

Une solution possible pour faire face à l'incertitude sur les flux de carbone est l'application du principe de conservation au REDD+ (Grassi *et al.* 2008). Lorsque la précision ou la complétude des estimations se révèlent insuffisantes, le risque de surestimer les réductions d'émissions doit être minimisé. Déjà appliqué par certains standards sur le marché volontaire<sup>26</sup>, ce principe pourra par exemple obliger les pays qui souhaitent négliger un compartiment de carbone à prouver que cette omission ne joue pas en leur faveur.

---

<sup>26</sup> Le VCS le présente comme l'un des principes majeurs de mesure (VCS v.3 datées du 1<sup>er</sup> septembre 2011)

## **Conclusion : REDD+ et MRV, de la dimension technique aux enjeux politiques**

L'incertitude associée à la mesure des flux de carbone forestier est une barrière avérée pour le développement du REDD+. Les progrès techniques sont une condition nécessaire pour le développement du REDD+, puisqu'ils rendront possible la réalisation d'une mesure fiable des réductions d'émissions associées aux activités couvertes par le REDD+. La télédétection a déjà apporté des résultats probants, en particulier pour un suivi précis et homogène des surfaces déboisées. Des améliorations techniques - en particulier les capteurs LiDAR - devraient permettre d'améliorer l'estimation des stocks de carbone forestier dans un avenir proche. Les progrès techniques constituent cependant une condition nécessaire, mais non suffisante, pour le développement du REDD+. La coopération entre les pays apparaît comme un élément clé à l'avancée du REDD+, la mutualisation des outils de suivi permettant de diminuer le coût de la MRV. A cela s'ajoute la nécessité, pour les Parties impliquées, de s'accorder sur les méthodologies d'inventaire et de clarifier plusieurs définitions et concepts, dont ceux de forêt, déforestation, dégradation ou flux anthropique. Ces choix comportent une réelle dimension stratégique pour les pays engagés dans le REDD+, puisqu'ils peuvent influencer sur la quantité d'argent que chacun recevra. Ivy Wong, du Forest Conservation World Wildlife Federation, souligne qu'un « enjeu majeur est de séparer négociations techniques et politiques » (FAO et RECOFTC, 2011).

Le sujet de la MRV ne sera pas oublié lors de la conférence sur le climat, qui se tiendra à Durban, début décembre 2011. Plusieurs aspects méthodologiques y seront abordés, notamment le système de surveillance des forêts, la procédure de rapportage et vérification, la fixation des niveaux de référence et le suivi des clauses de sauvegarde (Loisel, 2011). Les nombreux progrès réalisés depuis la conférence de Montréal, en termes de connaissance et de technique de mesure des flux de carbone forestier, devraient permettre de faire un pas en avant vers une homogénéisation du système de MRV à Durban. Il est néanmoins urgent que Durban expose les enjeux politiques qui se cachent derrière le REDD+, en particulier la question du véritable intérêt pour les pays en développement à s'engager dans le REDD+. Un mécanisme REDD+ réaliste et durable devra intégrer le droit au développement des pays engagés, rendant d'autant plus complexe le calcul des niveaux de référence sur lesquels sera calculée la rémunération que chaque pays recevra.

## Table des acronymes

CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
COP	Conférence des Parties
FRA	Forest Resource Assessment
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
FCPF	Forest Carbon Partnership Facility
IceSAT	Ice, Cloud and land Elevation Satellite
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais <a href="http://www.inpe.br/">http://www.inpe.br/</a>
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
Lidar	Light detection and ranging
MRV	Mesure, Reporting et Vérification
OTC	Over The Counter (gré à gré)
REDD	Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts
SAR	Radar à Synthèse d'Ouverture
SCEQE	Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emission
UN-REDD	Programme de collaboration des Nations Unies sur la réduction des émissions liées au déboisement et à la dégradation des forêts dans les pays en développement
URCE	Unité de Réduction Certifiées d'Emission
UTCF	Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt

## Annexe 1 : Estimations des émissions associées au changement d'affectation des terres, en GtCO<sub>2</sub>eq/an

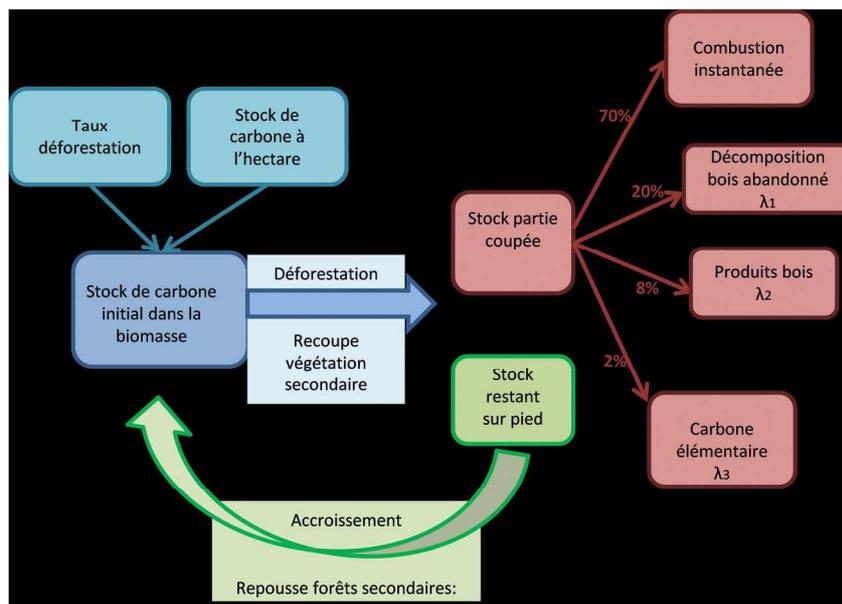
Chercheur Et modèle	Estimations en GtCO <sub>2</sub> eq/an	Périmètre géographique	Pools et activités	Origine des données 1) suivi usage des sols 2) stock carbone
<b>McGuire 2001</b> <b>Modèle éco systémique</b> <b>Avec flux historiques</b>	3,3 – 7,0 Pour les années 1980	Global	Terres cultivées uniquement. Pas abattage en forêt, ni conversion forêt à prairie	1) Statistiques agricoles : nationales et base de données FAOSTAT
<b>Houghton</b> <b>Book-keeping model</b> <b>Avec flux historiques</b>	Houghton 2003 <b>8,1 ± 2,9</b> <b>(années 90)</b>  7,3 ± 2,9 Pour les années 1980 Houghton 2008 <b>5,69</b> <b>(années 90)</b>  Houghton 2010 4,8 pour 2000-05	Global  Subdivision en 9 régions	Seuil forêt = 10%  Activités : Déboisement, établissement et abandon de terres cultivées et prairies, reboisement, exploitation du bois, part dégradation  Compartiments : Biomasse vivante, sol, bois mort et produits bois	<u>Tropiques</u> : FAO FRA 2000 pour taux et biomasse. FRA 2005 puis 2010 pour les actualisations des 2008 et 2010  <u>Autres régions</u> : 1) Taux de prélèvement issus des statistiques de production de bois FAOSTAT  2) Biomasses moyennes compilation études écologiques et statistiques forestières.
<b>Fearnside 2000</b> <b>BKM</b> <b>Sans flux historiques</b>	8,8 Pour les années 1980	Zone tropicale Subdivision en 6 régions	Mêmes activités et compartiments que Houghton. +Emissions liées au bois de feu et à la formation de charbon	1) Taux de déforestation FAO Forest Resources Assessment et autres inventaires
<b>De Fries 2002</b> <b>BKM</b> <b>Sans flux historiques</b>	<b>3,3 ± 1,8</b> <b>(années 90)</b>	Zone tropicale	Seuil 14% pour le couvert forestier	1) Satellites haute résolution AVHRR combiné Landsat.  2) Biomasses moyennes : idem Houghton
<b>Achard</b> <b>BKM</b> <b>Sans flux historiques</b>	Achard 2002 <b>3,52</b> <b>(années 90)</b>  Achard 2004 <b>4,2 ± 1,1</b> <b>(années 90)</b>	Zone tropicale humide  Zone tropicale entière	Feux tourbières Indonésie 1997-1998 inclus	1) Tropiques humides : Landsat projet TREE.  Tropiques sèches : télédétection FAO. Brésil : Données Agence Spatiale Nationale Brésilienne  2) Valeurs de biomasse moyennes FRA, corrigées par la méthode de Brown
<b>Harris 2010</b> <b>Modèle propre style Monte-Carlo</b> <b>Sans flux historiques</b>	pour 2000-05  2,7± 1,1 + 0,7 pour l'abattage sélectif	Zone tropicale Subdivision en 3 régions	Seuil 25% pour le couvert forestier Biomasse aérienne (allométrie pour extrapoler à la biomasse racinaire) Pas sol ni bois mort. Emissions BRUTES Abattage sélectif inclus	1) Déforestation : Données satellites basse résolution MODIS 2000  2) Modèle spatial pour la biomasse : 4079 inventaires de terrain couplés à plus de 3 millions d'échantillons laser GLAS
<b>GIEC 2007</b> <b>Groupe de travail n°3</b>	Année 2004 8,53		Combustion et décomposition liés déboisement et à l'abattage sélectif + feux et oxydation des tourbières	Données sur les feux de forêts obtenues par télédétection (Global Fire Emissions Database). Données pour les tourbières issues des travaux du WL/Delft Hydraulics ase sur la période 1997-2002

## Annexe 2 : A la base de la plupart des estimations mondiales : le « book-keeping model »

En 1983, Houghton, chercheur spécialisé dans le cycle du carbone, a créé un modèle visant à mesurer le flux de carbone lié au changement d'usage des terres d'origine anthropique qui prend donc en compte non seulement la forêt mais aussi les prairies et les terres cultivées. Les compartiments considérés dans ce modèle sont la biomasse vivante, le bois mort, les produits bois et le sol<sup>27</sup>. Contrairement à l'hypothèse faite par le GIEC selon laquelle le carbone d'un arbre coupé est immédiatement émis vers l'atmosphère, Houghton a choisi de prendre en considération le mode de déboisement. Il adapte la vitesse d'émission du carbone selon quatre devenir possibles pour le bois. Comme le montre la figure ci-dessous, l'hypothèse faite pour une forêt tropicale est que 70% du carbone s'échappe directement dans l'atmosphère par combustion, tandis que 20% du carbone est émis plus lentement car il est laissé à l'abandon. Le reste est divisé entre produits bois et carbone élémentaire<sup>28</sup>. Ces pourcentages sont adaptés à chaque région, tout comme les taux d'émissions sont associés à chaque devenir du bois.

Alors que le GIEC utilise une période par défaut de 20 ans pour suivre les flux de carbone, le modèle de Houghton présente la particularité de prendre en compte les changements d'usage des sols historiques (1850-2000). Certains compartiments accumulent ou relâchent des quantités de carbone conséquentes sur le long terme : c'est le cas pour la décomposition du bois mort et les produits bois, ainsi que pour la séquestration de carbone qui accompagne le retour de la végétation après déboisement. Reconnu comme un modèle de référence et réutilisé depuis sa création par plusieurs autres chercheurs, ce modèle est à la base de la majorité des estimations faites à l'échelle mondiale relatives à la part de la déforestation dans les émissions mondiales de GES.

### Représentation simplifiée de la dynamique du carbone dans la biomasse aérienne des forêts tropicales selon le book-keeping model de Houghton ( $\lambda_3 < \lambda_2 < \lambda_1$ )



Source : CEC

<sup>27</sup> Houghton prend explicitement en considération la diversité des sols selon les écosystèmes, le stock associé variant de 117 tCO<sub>2</sub>eq/ha pour une prairie tropicale latino-américaine à 756 tCO<sub>2</sub>eq/ha pour une forêt boréale

<sup>28</sup> Suie générée par le processus d'abattis-brûlis

## Références

Asner (2005), 'Selective Logging in the Brazilian Amazon', *Sciencemag* **310**, 480-483.

Asner, G.; Powell, G.; Mascaro, J.; Knapp, D.; Clark, J.; Jacobson, J.; Kennedy-Bowdoin, T.; Balaji, A.; Paez-Acosta, G.; Victoria, E. & others (2010), 'High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon', *Proceedings of the National Academy of Sciences* **107**(38), 16738.

Bellassen, V.; Crassous, R.; Dietzch, L. & Schwartzman, S. (2008), 'Reduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts: quelle contribution de la part des marchés du carbone?', *Etude Climat* 14.

Cattaneo, A. (2011), 'The Role of Measurement in the Economics of REDD+', présentation au Workshop Planet Action du 26/10/11

Chenost, C.; Gardette, Y.M.; Demenois, N. ; Perrier, M. ; Wemaëre, M. (2009): 'Bringing forest carbon projects to the market'.

CIFOR (2008), 'Measuring and monitoring forest degradation for REDD', Technical report, CIFOR.

CITEPA (2010), 'Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la CCNUCC et du protocole de Kyoto', Technical report, CITEPA.

DeFries, R. S., R. A. H. (2002), 'Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s', *PNAS* **99**, 14256 14261.

Ecosystem Marketplace (2011): Peters-Stanley, M.; Hamilton, K.; Marcello, T. & Sjardin, M. (2011), 'Back to the Future: State of the Voluntary Carbon Markets 2011', Technical report, Ecosystem Marketplace and Bloomberg New Energy Finance.

Ekadinata, A.; van Noordwijk, M.; Dewi, S. & Minang, P. (2010), 'Reducing Emissions from Deforestation, Inside and Outside the Forest.' (16), 4.

Fagan, M. & DeFries, R. (2009), 'Measurement and Monitoring of the World's Forests'

FAO and RECOFTC (2011), 'Forest and climate change after Cancun, an Asia-Pacific perspective'

FRA (2010), 'Evaluation des ressources forestières mondiales 2010 - Rapport principal', Technical report, FAO.

Gibbs, H.; Brown, S.; Niles, J. & Foley, J. (2007), 'Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality', *Environmental Research Letters* **2**, 045023.

GIEC (2006), '2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use'.

GIEC (2007) : Barker, T. et al. in IPCC Climate Change 2007. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC: *Mitigation of Climate Change*. Summary for Policymakers (eds Metz, B. et al.) 25–93 (Cambridge Univ.Press, 2007).

GOFC-GOLD (2008), 'Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting', Technical report, GOFC-GOLD.

- Grassi, G.; Monni, S.; Federici, S.; Achard, F. & Mollicone, D. (2008), 'Applying the conservativeness principle to REDD to deal with the uncertainties of the estimates', *Environmental Research Letters* **3**, 035005.
- Harris N.L, Sassan S. Saatchi, S. H. S. B. W. S. M. C. H. & Lotsch, A. (2010), 'New Estimate of Carbon Emissions from Land-Use Change'.
- Hooijer, A.; Silvius, M.; Wf6sten, H. & Page, S. (2006), 'Peat-CO<sub>2</sub>, assessment of CO<sub>2</sub> emissions from drained peatlands in SE Asia'.
- Hooijer, A.; Page, S.; Canadell, J.; Silvius, M.; Kwadijk, J.; W\`f6sten, H. & Jauhiainen, J. (2010), 'Current and future CO<sub>2</sub> emissions from drained peatlands in Southeast Asia', *Biogeosciences* **7**(5), 1505--1514.
- IFN (2005), 'La forêt française : un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques', revue de l'Inventaire Forestier National, n°7, mars 2005.
- Leplay (2011), 'Les instruments économiques pour la réduction de la déforestation. L'exemple du mécanisme REDD', thèse doctorale en Economie et Gestion.
- Loisel, C. (2011), 'Etat des négociations sur REDD+ avant la conférence de Durban' Workshop Planet Action du 26/10/11' (chargé de Mission Forêts auprès du Directeur Général de la Mondialisation, Ministère des Affaires Etrangères, France).
- Kaat, A. & Joosten, H. (2009), 'Fact book for CCNUCC policies on peat carbon emissions', Technical report, Wetlands International and Greifswald University.
- Kindermann, G., Obersteiner, M., Sohngen, B., Sathaye, J., Andrasko, K., Rametseiner, E., Schlamadinger, B., Wunder, S., and Beach, R. (2008), 'Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation', *Proc Natl Acad Sci USA*, 105(30), (2008 July 29), p. 10302-10307.
- Pan, Y.; Birdsey, R.; Fang, J.; Houghton, R.; Kauppi, P.; Kurz, W.; Phillips, O.; Shvidenko, A.; Lewis, S.; Canadell, J. & others (2011), 'A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests', *Science*.
- Ramankutty, N.; Gibbs, H.; Achard, F.; Defries, R.; Foley, J. & Houghton, R. (2007), 'Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation', *Global Change Biology* **13**(1), 51--66.
- Saatchi *et al.* (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents." PNAS June 3, 2011.
- Stern, N. (2006) 'Stern Review on the Economics of Climate Change'.
- UNEPFI (2011), 'Private sector suggestions for international climate change negotiators', study by UNEP Finance Initiative's; Biodiversity and Ecosystems Workstream (BEWS) and Climate Change Working Group (CCWG), September 2011.
- Verchot and Petkova (2010), 'The state of REDD negotiations. Consensus points, options for moving forward and research needs to support the process', rapport UN-REDD & CIFOR, Août 2010
- Vial, E. (2010), 'Comptabilisation du carbone dans les produits bois en France', Technical report, FCBA Institut Technologique.
- Werf, G. R. (2009), 'CO<sub>2</sub> emissions from forest loss', *Nature GeoScience* **2**, 737-738.

## Série Information et Débats

n° 12 • Novembre 2011

n° 12 • Novembre 2011

### **Conférence climatique de Durban : l'enjeu de la mesure des flux de carbone forestier**

par Gabriela Simonet

n° 11 • Septembre 2011

### **Towards low-carbon mobility: tackling road transport emissions**

par Rémi Russo et Virginie Boutueil

n° 10 • Août 2011

### **Carbon markets regulation: the case for a CO<sub>2</sub> Central Bank**

par Christian de Perthuis

n° 9 • Avril 2011

### **Twenty years of carbon taxation in Europe: some lessons learned**

par Jeremy Elbeze et Christian de Perthuis

n° 8 • Octobre 2010

### **Cancun: Year One of the Post-Copenhagen Era**

par Henri Casella, Anaïs Delbosc et Christian de Perthuis

n° 7 • Septembre 2010

### **Le risque carbone dans les investissements forestiers**

par Guillaume Bouculat et Clément Chenost

n° 6 • Juillet 2010

### **La lutte internationale contre le changement climatique : les difficultés d'une gouvernance environnementale**

par Christian de Perthuis et Raphaël Trotignon

n° 5 • Juin 2010

### **Quel(s) type(s) d'instrument employer pour lutter contre le changement climatique ?**

par Christian de Perthuis, Suzanne Shaw et Stephen Lecourt

#### **Nous contacter :**

Chaire Economie du Climat - Palais Brongniart (4<sup>e</sup> étage)

28 Place de la Bourse, 75 002 Paris

Tel : +33 (0)1 49 27 56 34

Fax : +33 (0)1 49 27 56 28

Email : [contact@chaireeconomieduclimat.org](mailto:contact@chaireeconomieduclimat.org)

Directeur de la publication : Christian de Perthuis

Les opinions exposées ici n'engagent que les auteurs. Ceux-ci assument la responsabilité de toute erreur ou omission

La Chaire Economie du Climat est une initiative de CDC Climat et de l'Université Paris-Dauphine

