

Examen des méthodes de mesure et de suivi des émissions historiques de carbone causées par la dégradation des forêts

M. Herold, R.M. Román-Cuesta, V. Heymell, Y. Hirata, P. Van Laake, G.P. Asner, C. Souza, V. Avitabile et K. MacDicken

En l'absence de données de terrain historiques, les pays en développement peuvent s'appuyer sur des relevés de terrain actuels cohérents et des évaluations par télédétection.

D'après les estimations, les perturbations conduisant à une dégradation des forêts affectent quelque 100 millions d'hectares de forêts dans le monde chaque année (FAO, 2006, dans Nabuurs *et al.*, 2007). En regard de l'atténuation des effets du changement climatique, la dégradation des forêts se traduit par une perte du stock de carbone dans les forêts qui restent forêts (GIEC, 2003a; CCNUCC, 2008). La dégradation implique ainsi que les variables forestières mesurées, comme la fermeture du couvert, demeurent au-dessus du seuil servant à définir une forêt. Elle se distingue du déboisement, communément associé à un changement d'affectation des terres.

En 2005, la onzième session de la Conférence des Parties (COP 11) à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a souligné le rôle joué par la réduction du déboisement et de la dégradation des forêts comme moyen pour atténuer les effets du changement climatique (Réduction des émissions causées par le déboisement et la dégradation des forêts – REDD). La Conférence est venue appuyer l'article 2 du Protocole de Kyoto en ce qui concerne la protection et le renforcement des puits et des réservoirs des gaz à effet de serre non réglementés par le Protocole de Montréal.

Les pays en développement Parties à la CCNUCC ont été encouragés à prendre en compte certaines recommandations au moment de s'engager dans les activités REDD et REDD+ (CCNUCC, 2009a), notamment celles liées à la mise en place de systèmes de suivi forestier nationaux. Ces systèmes doivent utiliser une combinaison adéquate de méthodes

de télédétection et d'approches de terrain dans l'inventaire du carbone forestier, en vue d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, leur séquestration par les puits de carbone, les stocks de carbone forestier et les changements de superficie forestière. Toutes les estimations doivent être transparentes, cohérentes et aussi précises que possible, et les incertitudes doivent être réduites autant que les capacités et aptitudes nationales le permettent.

Mesurer la dégradation des forêts et les changements afférents en matière de stock de carbone forestier est plus complexe et plus coûteux qu'effectuer la mesure du déboisement. Les pays peuvent mesurer leurs taux actuels de dégradation au moyen de données de terrain et/ou de données de télédétection; certes, l'association des deux types de sources fournit les estimations les plus sûres. Les pays en développement manquent toutefois fréquemment de données historiques de terrain cohérentes. Aussi, pour évaluer la dégradation des forêts dans le temps, sont-ils souvent contraints de s'appuyer massivement sur des approches de télédétection, mêlées à des estimations de terrain actuelles de l'évolution du stock de carbone.

Cet article vise à appuyer les pays en développement dans la mise en œuvre des activités REDD+, en présentant un tableau et un examen des méthodes qui permettent de mesurer et surveiller les émissions de carbone causées par la dégradation des forêts. Il met l'accent sur les périodes passées de façon à donner un aperçu de l'évolution historique de la dégradation dans le cadre des activités REDD+ (CCNUCC, 2009b).

Martin Herold est Professeur de télédétection, Centre de géoinformation, Université de Wageningen, Pays-Bas.

Rosa María Román-Cuesta travaille à la conception et à la mise en œuvre de systèmes de mesure, notification et vérification (MRV) de REDD+ dans le contexte du Programme ONU-REDD, FAO.

Victoria Heymell est Consultante auprès du Département des forêts, FAO.

Yasumasa Hirata dirige le Bureau sur les changements climatiques, Institut de recherche sur la foresterie et les produits forestiers, Tsukuba, Japon.

Patrick Van Laake est Expert technique auprès du Programme ONU-REDD au Viet Nam, Hanoi.

Gregory P. Asner est Professeur d'écologie et de télédétection, Department of Global Ecology, Carnegie Institution for Science, États-Unis d'Amérique.

Carlos Souza est Scientifique supérieur à l'Institut Imazon, Belém, Brésil.

Valerio Avitabile est Chercheur postdoctorant, Centre de géoinformation, Université de Wageningen, Pays-Bas.

Kenneth MacDicken est Forestier principal, Évaluation des ressources forestières mondiales et communication d'informations, FAO.

Définition des réservoirs de carbone selon les Recommandations en matière de bonnes pratiques

Le GIEC (2003b) définit cinq réservoirs de carbone qu'il convient de mesurer et surveiller: la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, la litière, le bois mort et le carbone organique du sol. Les catégories de source clés devraient être évaluées et sélectionnées. Une catégorie de source clé est «une catégorie d'émission ou de puits qui est priorisée dans le système d'inventaire national parce que son estimation a une influence significative sur l'inventaire total des gaz à effet de serre directs du pays, en termes de niveau absolu d'émissions, de tendance des émissions ou des deux.» Les catégories de source clés devraient être évaluées en utilisant les niveaux plus élevés (encadré ci-dessous) si l'on dispose des ressources suffisantes. Dans les tropiques, l'approche la plus répandue consiste à ne surveiller que la biomasse aérienne; or, les stocks de carbone du sol présents dans les marais devraient retenir davantage l'attention, dans la mesure où ces derniers sont susceptibles de contenir davantage de carbone que la biomasse aérienne.

ESTIMER LES ÉMISSIONS CAUSÉES PAR LA DÉGRADATION DES FORÊTS Recommandations en matière de bonnes pratiques du GIEC

Sous l'égide de la CCNUCC, les pays sont encouragés à utiliser les *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie* du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) comme base pour établir leurs rapports sur les émissions de gaz à effet de serre causées par le déboisement et la dégradation des forêts (GIEC, 2003b; 2006). En vue d'évaluer les émissions liées à la dégradation des forêts, les pays devraient notamment observer:

- Les zones forestières demeurées telles touchées par la dégradation, considérées au niveau national, et idéalement réparties en fonction des différents types de perturbations ou de dégradation. Des données statistiques, calculées grâce aux inventaires forestiers ou à la télédétection, peuvent être utilisées en vue de quantifier la part de superficie forestière soumise à une dégradation en cours, et sa localisation. De telles données peuvent être appelées *données d'activités*.
- L'évolution des stocks de carbone forestier résultant des processus de dégradation, par zone et par unité de temps. Le carbone forestier perdu et relâché dans l'atmosphère à travers les mécanismes de dégradation est facilement mesurable par des échantillonnages de terrain et des

inventaires forestiers répétés. Les changements devraient être calculés pour chacun des cinq réservoirs de carbone (encadré ci-dessus). Les mesures sont indiquées en tonnes de carbone produit par hectare et par an ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Ces données peuvent être appelées *facteurs d'émission* (GIEC, 2003b; 2006).

Les émissions nationales causées par la dégradation des forêts sont le résultat de l'action combinée des données d'activités et des facteurs d'émission pour chaque type de forêt et de dégradation,

ainsi que cela est indiqué dans le guide méthodologique du GIEC.

Les *Recommandations en matière de bonnes pratiques* présentent les niveaux de complexité et de certitude de diverses approches de signalisation relevant de la CCNUCC, en termes de niveaux. Plus le niveau est élevé, plus le degré d'incertitude associé aux données est faible, et donc plus la précision est grande (encadré ci-dessous).

Enjeux et considérations

Il n'existe pas de méthode unique pour effectuer le suivi de la dégradation des forêts. Le choix de la méthode, ou d'une association de méthodes, dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment du type de dégradation et des données, capacités et ressources disponibles. Par ailleurs, il convient de tenir compte de la portée et des limites des diverses approches de mesure et de suivi. En effet, les différentes démarches se heurtent à des difficultés variables:

- *Seuils temporels et échelles spatiales*. L'impact de la dégradation des forêts sur les stocks de carbone forestier dépend de la durée. Des seuils temporels pour chaque type de forêt devraient être établis, de façon à éviter de confondre les effets des

Niveaux décrits dans les *Recommandations en matière de bonnes pratiques* pour l'estimation des émissions

Le GIEC (2003b) propose trois niveaux pour classer les méthodes d'estimation des émissions. Plus le numéro du niveau est élevé, plus les conditions requises pour obtenir les données sont rigoureuses, et plus l'analyse effectuée est complexe. Par conséquent, plus le numéro du niveau est élevé, plus l'estimation est exacte.

- Le niveau 1 utilise des valeurs par défaut de la biomasse forestière et de l'accroissement moyen annuel (AMA) de la biomasse forestière. Celles-ci sont obtenues grâce à la Base de données sur les facteurs d'émission (BDFE) du GIEC et correspondent aux grands types de forêts continentales (par exemple, la forêt pluviale tropicale africaine). Le niveau 1 utilise aussi des hypothèses simplifiées pour calculer les émissions.
- Le niveau 2 utilise des données spécifiques au pays (par exemple, des données recueillies à l'intérieur des frontières nationales). La biomasse forestière est observée à des échelles plus fines grâce à la description de strates plus détaillées.
- Le niveau 3 utilise des données issues d'inventaires établis grâce à des mesures répétées de placettes d'échantillonnage permanentes permettant de mesurer directement les changements de la biomasse forestière. En outre, ou en alternative, des modèles bien paramétrés pourront être utilisés en association avec les données des placettes.

Une approche de niveau 3 requiert un engagement de ressources à long terme, et implique ainsi de mettre en place une organisation permanente susceptible de prendre en charge le programme de suivi.

réductions du stock de carbone à court terme avec les effets des réductions à long terme. Ainsi, des pratiques de gestion forestière durables peuvent provoquer des modifications temporaires des stocks de carbone sans que cela conduise à une dégradation, tandis que des pratiques d'exploitation non durables peuvent mener à une dégradation des forêts sur le long terme.

- **Intégration des données de terrain et des données satellitaires.** Le suivi de l'évolution des stocks de carbone résultant de la dégradation des forêts repose très largement sur les enquêtes de terrain. Cependant, ces informations recueillies gagnent à être complétées par des données de télédétection comprenant des caractéristiques biophysiques de précision. Les questions essentielles à cet égard consistent à comprendre quels sont les paramètres biophysiques qui devraient être mesurés et quels seuils temporels seraient les plus appropriés pour relier les deux approches.
- **Impact spatial et intensité.** Les diverses activités à l'origine de la dégradation forestière sont souvent concentrées dans des zones spécifiques au sein d'un même pays. Aussi le travail de mesure et de suivi doit-il privilégier les activités les plus importantes et leurs impacts, de manière à utiliser plus efficacement les ressources (Herold et Skutsch, 2011).
- **Identification des réservoirs de carbone forestier clés touchés par la dégradation.** Les méthodes permettant de calculer les changements dans les stocks de carbone varient pour chaque réservoir de carbone important (encadré en haut de la page 17), de même qu'il en est pour les émissions de gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone, notamment le méthane et l'oxyde nitreux.

Mesurer la dégradation passée des forêts constitue un défi supplémentaire. L'historique de la dégradation est en effet important pour pouvoir quantifier la réduction potentielle d'émissions dans un pays. Des estimations *ex ante* de la dégradation des forêts pourraient être nécessaires pour estimer le niveau d'émissions de référence par rapport

auquel les réductions d'émissions seront calculées pour une période donnée. Outre les considérations générales liées à la méthodologie, effectuer une évaluation historique de la dégradation des forêts requiert de surmonter divers obstacles, notamment:

- **Le manque de données.** De nombreux pays, en particulier dans les régions tropicales, manquent de données historiques sur la dégradation des forêts et sur son impact sur les stocks de carbone. Au niveau national, les données relatives au passé consistent souvent uniquement en archives d'images satellitaires or, la télédétection comporte en soi des limites en ce qui concerne le relevé de la dégradation.
- **Les capacités insuffisantes.** Si de nombreux pays en développement ont acquis un certain niveau d'expérience dans le suivi des activités forestières commerciales et ont conservé toute une série de données,

les ressources humaines et les autres capacités requises sont en revanche souvent insuffisantes pour pouvoir mettre en œuvre une évaluation nationale du déboisement et de la dégradation des forêts au cours de l'histoire.

- **Les considérations temporelles.** Il n'existe pas actuellement d'accord quant à la définition d'un seuil temporel associé à la perte de stock de carbone sur le long terme. Les pertes de carbone cumulatives, à long terme et graduelles, peuvent être mesurées en recourant à des méthodes directes. Pour ce qui est des pertes de carbone qui adviennent plus rapidement, les fermetures du couvert empêchent les observations, tant sur le terrain que par satellite.
- **L'intégration des différentes sources de données.** Les données illustrant l'historique de la dégradation des forêts sont rarement disponibles. Intégrer des données de télédétection

Exemples d'études sur les méthodes utilisées pour mesurer la dégradation des forêts

Pays	Télé-détection	Collecte de données sur le terrain	Combinaison des deux	Détails de la méthodologie	Source
Brésil			X	Corrélation entre des techniques d'analyse de décomposition spectrale (<i>Spectral mixing analysis</i> – SMA) et la mesure de la biomasse aérienne à travers des transects forestiers	FAO, 2009a
République démocratique du Congo	X			Mesures sur le terrain de la dégradation des forêts utilisant des placettes permanentes	FAO, 2009b
Mexique		X		Établissement d'environ 25 000 placettes de 1 ha, dont 23 000 sont mesurées et 20 pour cent sont re-mesurées chaque année	de Jong <i>et al.</i> , 2010
Mexique			X	Perturbation de la forêt: forêt intacte, forêt secondaire à dominante d'arbres, forêt secondaire à dominante d'arbustes Corrélation entre les valeurs de l'indice différentiel normalisé de végétation issues des données MODIS et le volume de la biomasse aérienne d'après l'inventaire forestier national	FAO, 2009c
Népal	X	X	X	Comparaison des méthodologies utilisées au Népal pour mesurer la dégradation	FAO, 2009d

Exemples de méthodes directes pour mesurer la dégradation des forêts

À gauche: techniques d'analyse de décomposition spectrale (SMA) et estimations de la biomasse aérienne (AGB) utilisées pour suivre la dynamique de dégradation des forêts de basses-terres amazoniennes

À droite: analyse de lacunarité et indice d'homogénéité translationnelle (ITH), utilisés pour estimer les largeurs de houppier dans les paysages de la forêt amazonienne

D'autres exemples sont disponibles sur le site claslite.ciw.edu

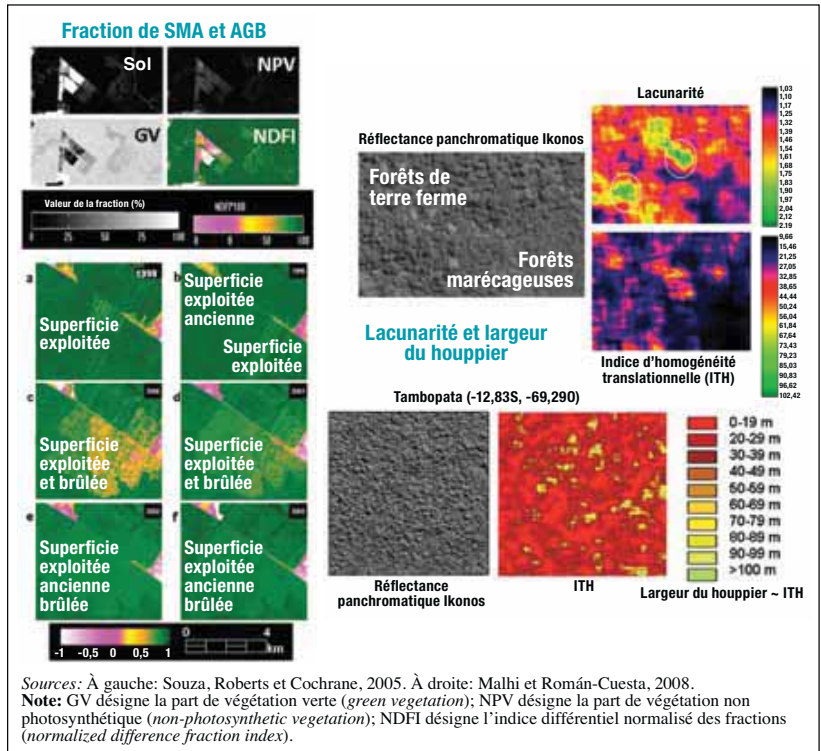
avec des caractéristiques biophysiques de précision issues de précédentes évaluations sur le terrain et d'autres sources, telles que les données relatives à la gestion forestière, constitue un véritable défi.

- Les incohérences liées à l'intégration entre données passées et présentes et entre méthodologies différentes.

Des systèmes différents, employés pour obtenir des données à travers des processus différents, se révèlent souvent incompatibles entre eux, et exigent ainsi un travail d'harmonisation et de mise en cohérence pour pouvoir être reliés.

Approches

De nombreux pays en développement disposent de données de terrain limitées, voire n'en disposent pas. Par ailleurs, des procédures permettant de mesurer l'évolution des stocks de carbone sur une base cohérente n'ont pas encore été établies – mais elles peuvent l'être, eu égard aux considérations qui suivent. Les facteurs d'émission passés peuvent être déduits en analysant les données actuelles sur les pertes de stock de carbone ayant résulté de processus de dégradation similaires, ainsi qu'en étudiant et reliant leurs chronoséquences avec des données historiques disponibles, telles que des images de télédétection archivées. Pour certaines activités d'exploitation entraînant une dégradation, les données pourraient être recueillies dans les dossiers des sociétés ayant mené les activités en question. À cet égard, on pourrait par exemple consulter les rapports sur le volume de bois extrait au cours de coupes sélectives.



En adoptant de telles approches en vue de faire une estimation historique des émissions, il est important de tenir compte des incertitudes associées aux résultats. Un cas mérite une attention particulière, à savoir lorsque des données spécifiques au pays sont utilisées pour estimer l'évolution des stocks de carbone par zone et unité de temps (comme dans l'approche de niveau 2; voir l'encadré en bas de la page 17). L'estimation de données spécifiques au pays pour un paramètre donné repose considérablement sur l'échantillonnage de terrain, souvent effectué sur la base des inventaires forestiers nationaux. Or, l'évaluation de la zone touchée par la dégradation serait plus fiable si elle était faite au niveau national grâce à des approches de télédétection (approches systématiques – «wall-to-wall» – ou approche par échantillonnage). Par conséquent, l'utilisation de la télédétection pour renforcer la collecte de données sur le terrain devrait être encouragée, de même que les données de terrain devraient servir à vérifier les données de télédétection.

Exemples choisis

Méthodes directes et indirectes

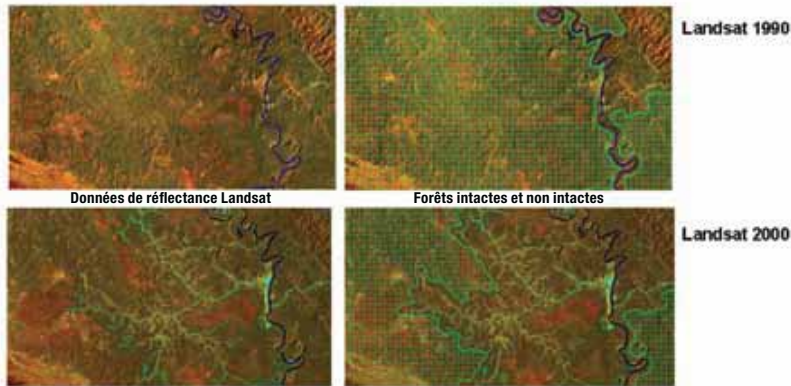
Il existe deux méthodes de télédétection pour estimer la superficie touchée par la

dégradation forestière, l'une directe et l'autre indirecte:

1. La détection directe des processus de dégradation et des changements de superficie associés se concentre sur les dégâts subis par le couvert forestier. Les caractéristiques mises en évidence et extraites de l'imagerie par satellite sont ainsi les trouées dans le couvert forestier, les petites éclaircies et les changements structuraux de la forêt résultant des perturbations (Asner *et al.*, 2005; Souza, Roberts et Cochrane, 2005; Oliveira *et al.*, 2007).
2. Les approches indirectes se concentrent sur la répartition spatiale et l'évolution des infrastructures humaines (comme les routes et les centres habités), qui sont utilisées comme variables de remplacement pour les zones nouvellement dégradées.

Lorsque l'on utilise des méthodes directes pour cartographier la dégradation des forêts, on se heurte à certains facteurs contraignants. Tout d'abord, les observations doivent être faites fréquemment, c'est-à-dire une ou deux fois par an, parce que les marques spatiales des forêts dégradées changent lorsque les trouées du couvert forestier se referment.

Forêts intactes et infrastructures humaines

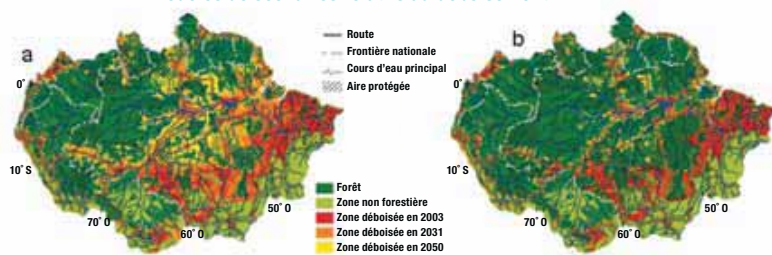


2 Exemples de méthodes indirectes pour mesurer la dégradation des forêts

En haut: estimation des forêts intactes et non intactes en fonction des zones d'influence (zones tampons) déterminées par les infrastructures humaines. L'exemple illustre l'évolution d'un paysage forestier dans lequel de nouvelles routes ont été construites, ce qui a réduit la superficie totale de forêts intactes (en vert)

En bas: modèles de déboisement futur dans le bassin amazonien selon deux scénarios possibles: (a) poursuite de la tendance actuelle; et (b) gouvernance efficace

Modèles de scénarios relatifs au déboisement



Sources: En haut: Mollicone *et al.*, 2007. En bas: Soares-Filho *et al.*, 2006.

Collecte de données sur la coupe sélective

L'Organisation internationale des bois tropicaux (OIBT, 2006) estime que 350 millions d'hectares de forêt tropicale humide sont actuellement impliqués dans la production de bois. Les données de terrain historiques nécessaires pour pouvoir évaluer l'impact de la coupe sélective en matière de carbone pourraient être obtenues à partir de différentes sources:

- données issues d'enquêtes ciblées sur le terrain, notamment interviews, et données provenant de parcelles expérimentales permanentes ou liées à des recherches (souvent mises en place pour des études locales);
- données fournies par le secteur forestier commercial, comme les concessions d'exploitation forestière et les estimations d'abattage centrées sur les zones de concessions associées; et
- données supplétives issues des marchés intérieurs (charbon, subsistance), telles que l'estimation des taux de production de bois des scieries, les ventes et les statistiques d'exportation (Nepstad *et al.*, 1999).

L'utilisation (directe ou indirecte) de la cartographie satellitaire de la coupe sélective pour estimer la dégradation à un niveau national est actuellement dans une phase de recherche en expansion. La recherche dans ce domaine a commencé au début de ce siècle, connaissant des résultats qui s'améliorent régulièrement (Asner *et al.*, 2002; 2004; Souza *et al.*, 2003; Souza, Roberts et Cochrane, 2005). Au cours des toutes dernières années, les premières cartes satellitaires à grande échelle et à haute résolution illustrant la coupe sélective et la dégradation ont été publiées, concernant une vaste partie de l'Amazonie brésilienne (Asner *et al.*, 2005), une large part de l'Afrique (Laporte *et al.*, 2007), des zones de l'Océanie (Shearman *et al.*, 2008) ainsi que d'autres pays amazoniens (Oliveira *et al.*, 2007). Récemment, une première cartographie directe à l'échelon mondial de la coupe sélective dans les forêts tropicales humides a montré que les activités d'abattage s'avancent très en avant à l'intérieur des forêts, souvent loin des fronts de déboisement (Asner *et al.*, 2009).

En second lieu, les processus de dégradation ne peuvent pas être tous examinés avec un degré élevé de certitude en utilisant des données obtenues par télédétection. En règle générale, plus la dégradation et les dégâts subis par le couvert sont sévères, plus il est facile de les cartographier avec précision, directement à partir des observations par satellite (Coops, Wulder et White, 2007). Cependant, de nombreuses activités se traduisant par une dégradation, comme le ramassage de bois de feu, n'affectent que le sous étage et sont indétectables par télédétection. La figure 1 présente deux exemples de méthodes directes.

Les méthodes indirectes se révèlent utiles lorsque l'intensité de la dégradation est faible et que la zone concernée est vaste, lorsque l'imagerie par satellite n'est pas facilement accessible ou lorsque l'approche directe ne peut être appliquée pour toute autre raison. Ces méthodes fonctionnent bien pour cartographier les zones forestières récemment dégradées, mais sont moins efficaces pour les processus de dégradation répétés.

Une approche indirecte efficace est l'approche dite «forêt intacte». Dans cette démarche, la présence d'infrastructures humaines est considérée comme une variable de remplacement de la dégradation et l'absence d'infrastructures sert à identifier les terres boisées dépourvues de perturbation anthropique, ou forêt intacte (Mollicone *et al.*, 2007; Potopov *et al.*, 2008). Une forêt intacte est soit un peuplement fermé, soit une forêt à la couverture arborescente non perturbée supérieure à 10 pour cent (i.e qui n'est pas soumise à l'extraction de bois). A l'inverse, une forêt non intacte a une couverture forestière supérieure à



Route, rivière et zone forestière, Indonésie. Les photographies aériennes peuvent fournir des informations sur les changements structurels du couvert arboré au fil du temps

recueillir une imagerie à haute résolution disponible au public, IKONOS. Les photographies aériennes peuvent fournir des informations sur les changements structurels des couverts forestiers au cours du temps, susceptibles d'être utilisées pour évaluer les taux historiques de dégradation forestière. Les méthodes employées pour détecter les trouées dans des modèles de surface digitale multi-temporels (DSM) ont été appliquées à des études à long terme sur la dynamique des couverts forestiers (Nakashizuka, Katsuki et Tanaka, 1995; Tanaka et Nakashizuka, 1997; Itaya, Miura et Yamamoto, 2004; Ticehurst, Phinn et Held, 2007). Les modèles DSM dérivant de photographies aériennes ou de données LIDAR (de l'anglais *Light detection and ranging*) peuvent aussi être utilisés pour estimer la croissance des forêts.

La qualité des estimations des taux historiques de la dégradation des forêts nécessite une analyse plus approfondie des images, notamment pour ce qui est de l'évolution des stocks de carbone des arbres individuels. La hauteur des arbres et la taille des houppiers des arbres individuels peuvent être estimées à partir de photographies aériennes ou de données LIDAR; des équations allométriques, qui fournissent des extrapolations sur

la base de quelques mesures, peuvent aider à évaluer leurs stocks de carbone. Cependant, les équations allométriques individuelles reliant hauteur de l'arbre, diamètre et biomasse, ne sont souvent pas disponibles eu égard à la structure et à la composition des espèces complexes des forêts tropicales.

Deux autres méthodologies permettent d'évaluer la taille des houppiers individuels à partir de photographies aériennes: la méthode dite de «suivi de la vallée» (valley-following method) (Leckie *et al.*, 2003; 2004; Gougeon et Leckie, 2006), qui suppose de suivre les vallées d'ombre dans une image en niveau de gris, et la méthode dite des bassins versants (Wang, Gong et Biging, 2004; Hirata, Sakai et Tsuboto, 2009), qui considère l'ampleur du gradient d'une image comme une surface topographique et crée des frontières, ou «lignes de partage des eaux», en fonction des pixels de plus grande valeur. Cette dernière méthode peut être utile pour identifier la dégradation au niveau du couvert forestier.

Suivi de la biomasse en combustion

Les systèmes satellitaires se sont révélés utiles dans la détection et le suivi des feux de forêt à trois égards principaux: identification des feux actifs, cartographie des zones brûlées après incendie (cicatrices d'incendie), et caractérisation des incendies (par exemple, sévérité de l'incendie, énergie dégagée). Pour ce qui est de l'estimation des émissions, les deux dernières utilisations sont particulièrement

10 pour cent, et elle remplit les critères définissant la forêt selon le Protocole de Kyoto, mais on suppose qu'elle est exploitée pour son bois et/ou soumise à la dégradation de son couvert.

Une autre méthode indirecte, qui peut être appliquée pour estimer les dynamiques de dégradation forestière à la fois passées et futures, consiste dans la modélisation des scénarios de dégradation des forêts. Soares-Filho *et al.* (2006) ont publié un exemple d'approche dite de «modélisation du déboisement» pour le bassin amazonien, produisant des cartes annuelles de simulation de déboisement futur selon des scénarios d'utilisation définis par l'utilisateur. Avec le soutien adéquat de données de terrain, une approche de modélisation similaire pourrait être employée pour reconstituer et prévoir les scénarios passés et futurs en matière de dégradation des forêts. La figure 2 offre deux exemples de méthodes indirectes permettant d'évaluer la dégradation des forêts.

Photographie aérienne

La photographie aérienne a joué un rôle important dans les enquêtes sur les forêts (Caylor, 2000; Hall, 2003). Cela a été longtemps le seul moyen de suivre dans le détail les conditions du couvert forestier jusqu'au lancement, en 1999, du premier satellite permettant de

Les données satellitaires peuvent être analysées pour estimer les émissions issues de la biomasse en combustion



pertinentes. Deux approches principales, l'une indirecte et l'autre directe, ont été identifiées (GOFC-GOLD, 2010):

1. La méthode «ascendante», ou indirecte, (Seiler et Crutzen, 1980) suit l'équation suivante:

$$L = A \times Mb \times Cf \times Gef,$$

où la quantité de gaz ou particules L (g) est le produit de la surface atteinte par le feu A (m^2), de la biomasse de combustible par unité de surface Mb ($g\ m^{-2}$), du facteur de combustion Cf , qui est la part de biomasse consommée à cause du feu ($g\ g^{-1}$), et du facteur d'émission ou coefficient d'émission Gef , qui est la quantité de gaz dégagée pour chaque espèce gazeuse par unité de biomasse consommée par le feu ($g\ g^{-1}$). Avec cette méthode, il existe une incertitude non négligeable liée à la surface brûlée et au facteur de combustion. En particulier, il existe une incertitude associée à l'évaluation d'incendies de biomasse advenus dans le passé, pour lesquels il existe peu de données.

2. La méthode directe mesure la puissance émise par des feux dangereux et produit en sortie la consommation totale de la biomasse. La composante radiative de l'énergie dégagée par la végétation incendiée peut être détectée à des longueurs d'onde à micro-infrarouge et infrarouge thermique (Ichoku et Kaufman, 2005; Wooster *et al.*, 2005; Smith et Wooster, 2005). Il a été montré que cette mesure instantanée, la puissance radiative du feu exprimée en watts (W), est liée au taux de consommation de la biomasse (g/s). Cependant, les méthodes directes doivent encore effectuer le passage du domaine de la recherche à celui de l'application opérationnelle.

CONCLUSIONS

Mesurer la dégradation des forêts et les changements dans les stocks de carbone qui lui sont associés est plus complexe et plus coûteux que de mesurer le déboisement. Les mesures s'appuient en effet sur l'observation de changements de structure dans la forêt qui n'impliquent pas de modification dans l'utilisation des terres – des changements qui ne sont donc pas nécessairement visibles facilement par la télédétection.

Il est peu probable qu'il soit possible dans un futur proche de mesurer, à des niveaux cohérents de détail et de précision, toutes les variations de stocks de carbone causées par la dégradation des forêts au sein d'un pays. Aussi centrer le travail de suivi de l'évolution des stocks de carbone sur les réservoirs les plus importants et des zones spécifiques d'un pays peut-il aider à cibler davantage ce suivi, le rendant plus efficient, et à saisir en priorité les éléments essentiels.

Pour que leur système de suivi respectent les *Recommandations en matière de bonnes pratiques* du GIEC, les pays doivent évaluer à la fois l'évolution de leurs stocks de carbone (facteurs d'émission) et celle de leur superficie soumise à la dégradation (données d'activités). Idéalement, les mesures devraient être prises pour diverses activités entraînant un changement dans les stocks de carbone des forêts restées forêts, notamment les feux, l'abattage et la récolte de feu de bois. L'estimation de l'évolution de ces stocks requiert des données de terrain cohérentes. L'évaluation de la superficie totale soumise à la dégradation, en particulier dans les pays en développement, peut être effectuée de façon plus fiable grâce à la télédétection pour ce qui est des principaux processus de dégradation, la coupe sélective et les incendies. Les évaluations de la dégradation des forêts aussi bien présente que passée devront examiner les facteurs d'émission et les données d'activités de façon cohérente pour pouvoir être aptes à estimer les émissions dérivant de cette dégradation. ♦



Références

- Asner, G.P., Keller, M., Pereira, R. Jr. et Zweede, J.C. 2002. Remote sensing of selective logging in Amazonia: assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment*, 80(3): 483–496. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00326-1.
- Asner, G.P., Keller, M., Pereira, R. Jr., Zweede, J.C. et Silva, J.N.M. 2004. Canopy damage and recovery after selective logging in Amazonia: field and satellite studies. *Ecological Applications*, 14(4 Suppl.): S280–S298. DOI: 10.1890/01-6019.
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J.C., Keller, M. et Silva, J.N. 2005. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science*, 310(5747): 480–482. DOI: 10.1126/science.1118051.
- Asner, G.P., Rudel, T.K., Aide, T.M., Defries, R. et Emerson, R. 2009. A contemporary assessment of change in humid tropical forests. *Conservation Biology*, 23(6):1386–1395. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2009.01333.x.
- Caylor, J. 2000. Aerial photography in the next decade. *Journal of Forestry*, 98(6): 17–19.
- CCNUCC. 2008. Informal Meeting of Experts on Methodological Issues related to Forest Degradation, 20-21 octobre 2008, Bonn, Allemagne: Chair's summary of Key Messages from the meeting. Bonn. Disponible sur: unfccc.int/methods_science/redd/items/4579.php
- CCNUCC. 2009a. Décision 4/CP.15: Principes méthodologiques concernant les activités liées à la réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts et le rôle de la conservation, de la gestion durable des forêts et de l'accroissement des stocks de carbone forestiers dans les pays en développement. In *Rapport de la quinzième session de la Conférence des Parties tenue à Copenhague du 7 au 19 décembre 2009*. Deuxième partie: mesures prises par la Conférence des Parties à sa quinzième session. Disponible sur: <http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/fre/11a01f.pdf>.
- CCNUCC. 2009b. *Cost of implementing methodologies and monitoring systems relating to estimates of emissions from deforestation and forest degradation, the assessment of carbon stocks and greenhouse gas emissions from changes in forest cover, and the enhancement of forest carbon stocks*. Document technique. Disponible sur: unfccc.int/resource/docs/2009/tp/01.pdf.
- Coops, N.C., Wulder, M.A. et White, J.C. 2007. Identifying and describing forest disturbance and spatial pattern: data selection issues and methodological implications. In M.A. Wulder et S.E. Franklin, édés., *Understanding forest disturbance and spatial pattern: remote sensing and GIS approaches*. Boca Raton,

- États-Unis d'Amérique, Taylor and Francis, pp. 31–62. DOI: 10.1201/9781420005189.ch2.
- De Jong, B., Anaya, C., Maser, O., Olguín, M., Paz, F., Etchevers, J., Martínez, R.D., Guerrero, G. et Balbontín, C.** 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 260(10): 1689–1701. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.08.011.
- FAO.** 2006. *Évaluation des ressources forestières mondiales 2005 – Progrès vers la gestion forestière durable*. Étude FAO: Forêts n° 147. Rome (disponible aussi sur: www.fao.org/docrep/009/a0400f/a0400f00.htm).
- FAO.** 2009a. *Integrating forest transects and remote sensing data to quantify carbon loss due to forest degradation in the Brazilian Amazon*, par C.M. Souza, Jr., M.A. Cochrane, M.H. Sales, A.L. Monteiro et D. Mollicone. Évaluation des ressources forestières – Document de travail 161. Rome (disponible aussi sur: www.fao.org/docrep/012/k7180e/k7180e00.pdf).
- FAO.** 2009b. *La dégradation des forêts en République démocratique du Congo*, par C.M. Kamungandu. Évaluation des ressources forestières – Document de travail 169. Rome (disponible aussi sur: www.fao.org/docrep/012/k8270f/k8270f00.pdf).
- FAO.** 2009c. *Analysis of the normalized differential vegetation index (NDVI) for the detection of degradation of forest coverage in Mexico 2008–2009*, par C.L.M. Tovar. Évaluation des ressources forestières – Document de travail 173. Rome (disponible aussi sur: www.fao.org/docrep/012/k8593e/k8593e00.pdf).
- FAO.** 2009d. *Forest degradation in Nepal: review of data and methods*, par K.P. Acharya et R.B. Dangi. Évaluation des ressources forestières – Document de travail 163. Rome (disponible aussi sur: www.fao.org/docrep/012/k7608e/k7608e00.pdf).
- GIEC.** 2003a. *Définitions et options méthodologiques en ce qui concerne les inventaires des émissions résultant de la dégradation des forêts et de la disparition d'autres types de végétaux directement liées aux activités humaines*. Hayama, Japon, Institut des stratégies environnementales mondiales (IGES) pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (disponible aussi, en anglais, sur: www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/degradation_contents.html).
- GIEC.** 2003b. *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*. Hayama, Japon, IGES pour le GIEC (disponible aussi sur: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html).
- GIEC.** 2006. *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*. Vol. 4: Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Hayama, Japon, IGES pour le GIEC (disponible aussi sur: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html>).
- GOFC-GOLD (Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics).** 2010. *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation*. GOFC-GOLD Report version COP15-1. Alberta, Canada, Natural Resources Canada (disponible aussi sur: www.gofc-gold.uni-jena.de/redd/).
- Gougeon, F.A. et Leckie, D.G.** 2006. The individual tree crown approach applied to Ikonos images of a coniferous plantation area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(11): 1287–1297.
- Hall, R.J.** 2003. The roles of aerial photographs in forestry remote sensing image analysis. In M.A. Wulder et S.E. Franklin, édés., *Remote sensing of forest environments: concepts and case studies*. Boston, États-Unis d'Amérique, Dordrecht, Pays-Bas, et Londres, Kluwer Academic Publishers, pp. 47–75.
- Herold M. et Skutsch, M.** 2011. Monitoring, reporting and verification for national REDD+ programmes: two proposals. *Environmental Research Letters*, 6(1): 014002. DOI: 10.1088/1748-9326/6/1/014002.
- Hirata, Y., Sakai, A. et Tsuboto, Y.** 2009. Allometric models of DBH and crown area derived from QuickBird panchromatic data in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19): 5071–5088. DOI: 10.1080/01431160903022977.
- Ichoku, C. et Kaufman, Y.J.** 2005. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(11): 2636–2649. DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
- Itaya, A., Miura, M. et Yamamoto, S.** 2004. Canopy height changes of an old-growth evergreen broad-leaved forest analyzed with digital elevation models. *Forest Ecology and Management*, 194(1–3): 403–411.
- Laporte, N.T., Stabach, J.A., Grosch, R., Lin, T.S. et Goetz, S.J.** 2007. Expansion of industrial logging in central Africa. *Science*, 316(5830): 1451. DOI: 10.1126/science.1141057.
- Leckie, D.G., Gougeon, F.A., Walsworth, N. et Paradine, D.** 2003. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 355–369. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00013-0.
- Leckie, D.G., Jay, C., Gougeon, F.A., Sturrock, R.N. et Paradine, D.** 2004. Detection and assessment of trees with *Phellinus weirii* (laminated root rot) using high resolution multi-spectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(4): 793–818.
- Malhi, Y. et Román-Cuesta, R.M.** 2008. Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2074–2087. DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.009.
- Mollicone, D., Achard, F., Federici, S., Eva, H.D., Grassi, G., Belward, A., Raes, F., Seufert, G., Stibig, H.-J., Matteucci, G. et Schulze, E.-D.** 2007. An incentive mechanism for reducing emissions from conversion of intact and non-intact forests. *Climatic Change*, 83(4): 477–493. DOI: 10.1007/s10584-006-9231-2.
- Nabuurs, G.J., Maser, O., Andrasko, K., Benítez-Ponce, P., Boer, R., Dutschke, M., Elsidig, E., Ford-Robertson, J., Frumhoff, P., Karjalainen, T., Krankina, O., Kurz, W.A., Matsumoto, M., Oyhantcaval, W., Ravindranath, N.H., Sanz Sánchez, M.J. et Zhang, X.** 2007. Forestry. In B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave et L. Meyer, édés., *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'évaluation du*

- GIEC*. Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis d'Amérique, Cambridge University Press, pp. 541-584.
- Nakashizuka, T., Katsuki, T. et Tanaka, H.** 1995. Forest canopy structure analyzed by using aerial photographs. *Ecological Research*, 10(1): 13–18. DOI: 10.1007/BF02347651.
- Nepstad, D.C., Verissimo, A., Alencar, A., Nobre, C., Lima, E., Lefebvre, P., Schlesinger, P., Potter, C., Moutinho, P., Mendoza, E., Cochrane, M. et Brooks, V.** 1999. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398: 505–508. DOI: 10.1038/19066.
- OIBT.** 2006. *Status of tropical forest management 2005*. Rapport technique de l'OIBT n° 24. Yokohama, Japon, Organisation internationale des bois tropicaux. Disponible sur: www.itto.or.jp/live/PageDisplayHandler?pageId=270.
- Oliveira, P.J.C., Asner, G.P., Knapp, D.E., Almeyda, A., Galván-Gildemeister, R., Keene, S., Raybin, R.F. et Smith, R.C.** 2007. Land-use allocation protects the Peruvian Amazon. *Science*, 317(5842): 1233–1236.
- Potapov, P., Yaroshenko, A., Turubanova, S., Dubinin, M., Laestadius, L., Thies, C., Aksenov, D., Egorov, A., Yesipova, Y., Glushkov, I., Karpachevskiy, M., Kostikova, A., Manisha, A., Tsybikova, E. et Zhuravleva, I.** 2008. Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. *Ecology and Society*, 13(2):51.
- Disponible sur: www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art51/.
- Seiler, W. et Crutzen, P.J.** 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic Change*, 2(3): 207–247. DOI: 10.1007/BF00137988.
- Shearman, P., Bryan, J., Ash, J., Hunnam, P., Mackey, B. et B. Lokes.** 2008. *The State of the Forests of Papua New Guinea: mapping the extent and condition of forest cover and measuring the drivers of forest change in the period 1972–2002*. Port Moresby, Papouasie-Nouvelle-Guinée, Université de Papouasie-Nouvelle-Guinée.
- Smith, A.M.S. et Wooster, M.J.** 2005. Remote classification of head and backfire types from MODIS fire radiative power and smoke plume observations. *International Journal of Wildland Fire*, 14(3): 249–254. DOI: 10.1071/WF05012.
- Soares-Filho, B.S., Nepstad, D.C., Curran, L.M., Cerqueira, G.C., Garcia, R.A., Ramos, C.A., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P. et Schlesinger, P.** 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440: 520–523. DOI: 10.1038/nature04389.
- Souza, C. Jr., Firestone, L., Silva, L.M. et Roberts, D.** 2003. Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT4 through spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 87(4): 494–506. DOI: 10.1016/j.rse.2002.08.002.
- Souza, C. Jr., Roberts, D.A. et Cochrane, M.A.** 2005. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*, 98: 329–343. DOI: 10.1016/j.rse.2005.07.013.
- Tanaka, H. et Nakashizuka, T.** 1997. Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan. *Ecology*, 78: 612–620. DOI: 10.1890/0012-9658(1997)078[0612:FYO CDA]2.0.CO;2.
- Ticehurst, C., Phinn, S et Held, A.** 2007. Using multitemporal digital elevation model data for detecting canopy gaps in tropical forests due to cyclone damage: an initial assessment. *Austral Ecology*, 32(1): 59–69. DOI: 10.1111/j.1442-9993.2007.01734.x.
- Wang, L., Gong, P. et Biging, G.S.** 2004. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(3): 351–357.
- Wooster, M.J., Roberts, G., Perry, G.L.W. et Kaufman, Y.J.** 2005. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *Journal of Geophysical Research*, 110: D24311. DOI: 10.1029/2005JD006318. ◆