

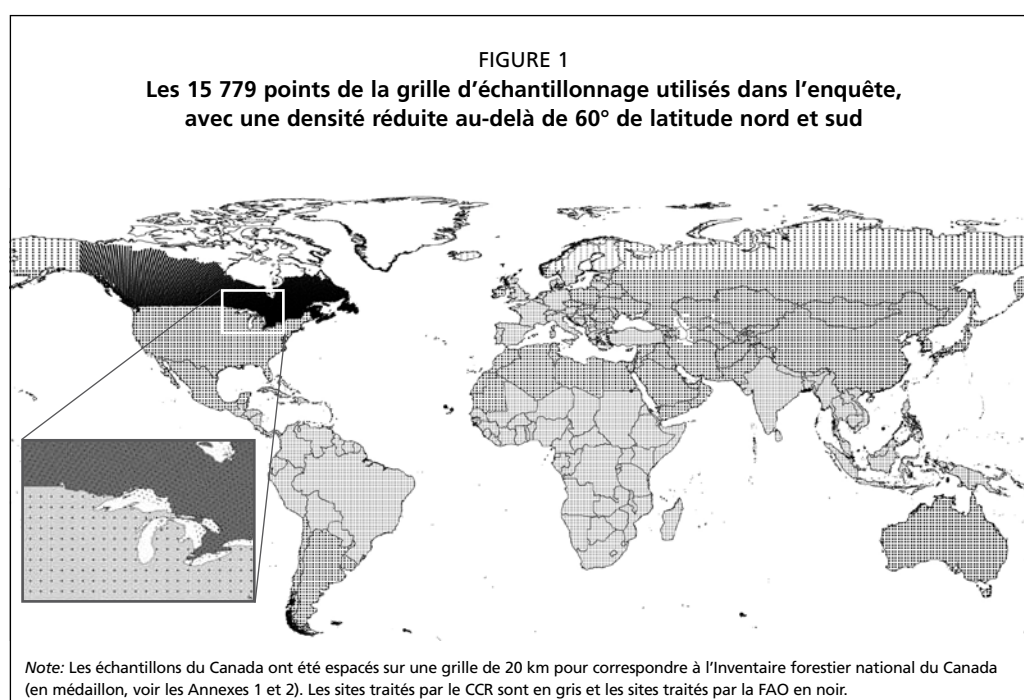
## 2. Méthodes et matériels

### OCCUPATION DES SOLS ET UTILISATION DES TERRES

Ce rapport présente des statistiques mondiales sur l'utilisation des terres forestières qui proviennent d'une classification de l'occupation des sols et de l'interprétation d'images par des experts. L'occupation des sols se réfère aux caractéristiques biophysiques de la surface de la Terre et peut être détectée directement à partir des images aériennes ou des satellites. L'utilisation des terres sous-entend une dimension humaine ou un objectif d'exploitation de la terre (Lambin *et al.*, 2001). L'utilisation des terres peut être déduite des images de télédétection, mais doit généralement être vérifiée par un expert local ou par le biais de données recueillies sur le terrain. Des informations précises sur l'utilisation des terres sont essentielles pour comprendre les causes de changement de couverture forestière et élaborer des politiques et des stratégies efficaces pour ralentir et inverser les pertes de forêt.

### PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE SYSTÉMATIQUE

L'enquête a utilisé un échantillonnage systématique d'extraits d'images satellitaires de 10 km par 10 km à chaque intersection de 1 degré de latitude et de longitude (Mayaux *et al.*, 2005; Ridder, 2007). À l'échelle mondiale, cela équivaut à un échantillon de 1 pour cent de la surface de la Terre émergée. La densité d'échantillonnage a été réduite au-delà de 60 degrés de latitude nord et sud, afin d'inclure uniquement les degrés pairs de longitude et d'éviter un « poids » croissant des échantillons aux latitudes élevées lié à la forme de la Terre. Aucun site situé à une latitude supérieure à 75 degrés Nord ou Sud n'a été utilisé. Pour le Canada, la grille a été modifiée afin d'utiliser celle de 20 km de l'Inventaire forestier national, constituée de points photo inférieurs à 4 km<sup>2</sup> (Gillis, Omule et Brierley, 2005). La grille d'échantillonnage finale était composée de 15 779 points couvrant la terre entière (Figure 1).



Dans un certain nombre d'études nationales, régionales et mondiales (par exemple, Hansen *et al.*, 2008; Stehman, Sohl et Loveland, 2005; Potapov *et al.*, 2008; Eva *et al.*, 2010), les approches par échantillonnage ont permis d'obtenir des résultats sur les changements de superficie forestière avec une précision acceptable et connue. Dans les précédentes enquêtes par télédétection, une large série d'échantillons d'images satellitaires sur de vastes régions, a permis de réaliser de bonnes estimations des paramètres à l'échelle régionale (> 100 000 hectares) et continentale (Czaplewski, 2002).

L'échantillonnage systématique a été choisi pour quatre raisons principales (Ridder, 2007): il semble exister des tendances au niveau de l'occupation des sols à l'échelle régionale et continentale et aucune hypothèse *a priori* sur l'intensité de changement de superficie forestière n'a été nécessaire; la présentation de la grille de latitude-longitude n'est pas politiquement biaisée et elle est facile à comprendre; les unités d'échantillonnage peuvent être facilement identifiées sur les cartes; et enfin, les évaluations forestières nationales validées par la FAO sont généralement élaborées à partir de la même grille.

### SOURCES DES IMAGES SATELLITE

Les images provenant du Landsat Global Land Survey (GLS) du United States Geological Survey (USGS) ont fourni la plupart des informations pour la classification et l'interprétation (Gutman *et al.*, 2008). Le capteur Landsat permet de couvrir l'ensemble de la Terre avec une longue série temporelle d'images, et des caractéristiques spatiales et spectrales appropriées pour la détection de changements du couvert forestier. Les données Landsat sont référencées à la surface de la Terre par une grille de colonnes et de lignes, appelé Système de référence mondial (WRS). Le GLS est une base spatialement exhaustive constituée des meilleures images Landsat pour chaque colonne/ligne du WRS couvrant la majeure partie de la surface de la Terre acquises en 1975, 1990, 2000 et 2005.

Pour chaque site d'échantillonnage, des séries de données du GLS1990, GLS2000 et GLS2005 de bandes optiques de 1 à 5 et 7 de Landsat ont été compilées. Celles-ci ont été intégrées dans un cadre de 20 km par 20 km centré autour de chaque intersection latitude/longitude pour créer des sous-ensembles d'images. La zone centrale de 10 km par 10 km de ces extraits a été utilisée pour les calculs de surface et les analyses statistiques. Pour les données de GLS prises dans des régions à couverture nuageuse ou qui ne correspondaient pas en termes de saison, d'autres images ont été recherchées dans les archives Landsat ou les stations terrestres régionales (pour plus de détails, voir Beuchle *et al.*, 2011; Potapov *et al.*, 2010; Seebach *et al.*, 2010).

Pour les domaines boréal, tempéré et subtropical, les données du GLS ont été considérées comme les meilleures données existantes. Si plusieurs données GLS sont disponibles pour un site et une date donnés, l'image GLS avec la couverture nuageuse la moins dense est retenue pour la classification (Lindquist *et al.*, soumis).

### PRÉTRAITEMENT DES IMAGES

Les images ont été prétraitées pour corriger les différences radiométriques causées par des changements dans la qualité de l'air ou les caractéristiques du capteur entre les dates d'acquisition des images pour le même site. La normalisation de l'image a pour effet de standardiser par site les valeurs des nombres numériques relatives à des couvertures forestières denses et permet une application plus efficace des algorithmes de classification automatique (Toivonen *et al.*, 2006; Potapov *et al.*, 2010; Hansen *et al.*, 2008). Potapov *et al.* (2010) décrivent les méthodes de prétraitement utilisées par l'équipe de la FAO pour les zones non tropicales. Bodart *et al.* (2011) décrivent les méthodes de prétraitement utilisées par l'équipe du CCR pour les sites de l'Afrique tropicale et subsaharienne.

## CLASSIFICATION AUTOMATISÉE DE L'OCCUPATION DES SOLS

La FAO et le CCR ont tous deux réalisés des classifications automatisées de l'occupation des sols des images prétraitées. L'équipe du CCR s'est chargée des sites des régions tropicales, de l'Afrique subsaharienne (Beuchle *et al.*, 2011) et de l'Europe occidentale (Seebach *et al.*, 2010) dans le cadre de ses projets en cours TREES-3, MONDE et FOREST (CCR, 2010; voir Raši *et al.*, 2011 pour plus de détails sur la classification de l'occupation des sols du CCR). L'équipe de la FAO a traité tous les autres sites (Figure 1). Même si les méthodes de traitement utilisées par les deux équipes ne sont pas strictement identiques, le traitement global et, surtout, les classifications finales sont comparables. Les méthodes de traitement ont utilisé les composantes communes suivantes:

- l'acquisition de données;
- le prétraitement des données et la normalisation des images;
- la segmentation des images;
- la classification des images.

La segmentation automatisée des polygones d'occupation des sols et la pré-classification des types d'occupation des sols ont eu deux objectifs majeurs: créer une série de données spatialement et temporellement cohérentes et éviter la délimitation manuelle, ce qui facilite la révision visuelle des labels d'occupation des sols et d'utilisation des terres.

La méthodologie de classification de l'occupation des sols de la FAO-CCR suit quatre étapes principales:

- la segmentation des images au niveau 1, sans unité cartographique minimale (UCM) et niveau 2 (UCM d'environ 5 ha);
- la collecte de données de sites représentatifs pour une classification supervisée;
- la construction de modèles et la classification de l'occupation des sols des objets de niveau 1;
- l'attribution de classification d'occupation des sols d'objets de niveau 2.

Toutes les fonctions de segmentation et de classification supervisées ont été réalisées à l'aide du logiciel de segmentation et de traitement d'image eCognition®<sup>1</sup>.

La segmentation d'images consiste à diviser une image en regroupant les pixels similaires en objets (ou segments ou polygones) à partir de la similarité spectrale et les différences spatiales. Les critères de création d'objets à partir de pixels individuels dans eCognition peuvent être contrôlés par l'opérateur en spécifiant les valeurs pour une série de paramètres comme la taille, la forme et le degré de similarité à obtenir dans la segmentation. Ces valeurs affectent le regroupement et conditionnent la forme et la taille globale des objets créés (Baatz et Schappe, 2000).

Une routine de segmentation multi-date a utilisé des bandes d'images Landsat provenant de trois périodes d'enquête afin de créer une seule couche contenant des objets basés sur l'information spectrale de chaque période (Figure 2). La segmentation d'images a été réalisée en deux parties. La FAO a utilisé une méthode similaire aux segmentations décrites par Raši *et al.* (2011), en utilisant des paramètres qui ont permis la création de petits objets de forme irrégulière sur la base des valeurs de réflectance spectrale des bandes 3, 4 et 5 (0,63 à 1,75  $\mu\text{m}$ ) de Landsat. Ces bandes ont été choisies pour leur capacité à éliminer les différences de réflectance de surface causées par les changements de type de végétation (Desclée, Bogaert et Defourny, 2006; Duveiller *et al.*, 2008). La première segmentation (niveau 1 par exemple) a créé de très petits objets allant de la taille d'un pixel Landsat unique à plus de 100 ha et variant inversement avec l'hétérogénéité spectrale de l'image Landsat correspondante.

L'image la plus récente (2005) a été segmentée en premier. Les objets créés ont été utilisés pour contraindre la segmentation de l'image pour 2000 et, à leur tour, ces objets ont contraint la segmentation de l'image de 1990. Pour les tropiques, la segmentation a

<sup>1</sup> [www.ecognition.com/products/ecognition-developer](http://www.ecognition.com/products/ecognition-developer).

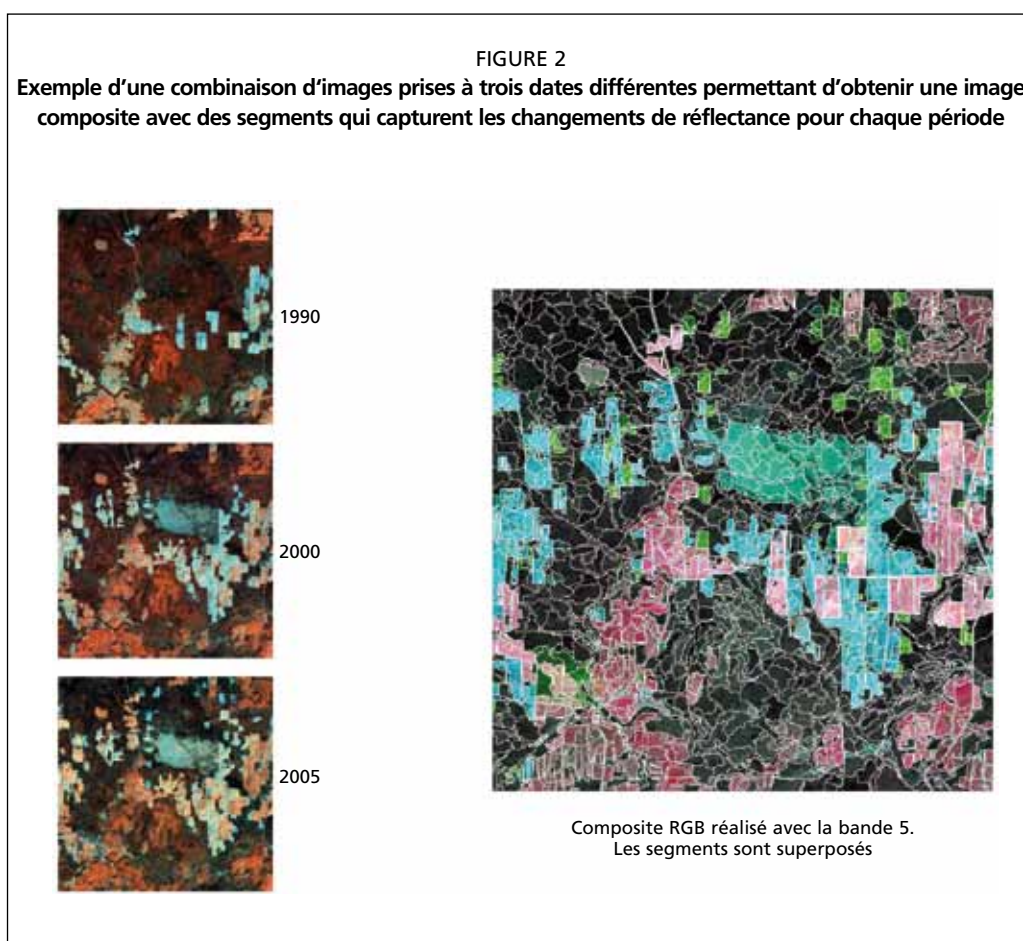


TABLEAU 1

**Modèle de labellisation d'occupation des sols avec une UCM de 5 ha (niveau 2), basé sur le pourcentage de composition des segments de niveau 1 sous-jacents, par ordre décroissant de priorité**

Niveau 1	composition (%)	Label d'occupation du sol de niveau 2
Couvert forestier	≥ 30	Couvert forestier
Autre terre boisée	≥ 70	Autre terre boisée
Autre occupation du sol	≥ 70	Autre occupation du sol
Eau	≥ 70	Eau

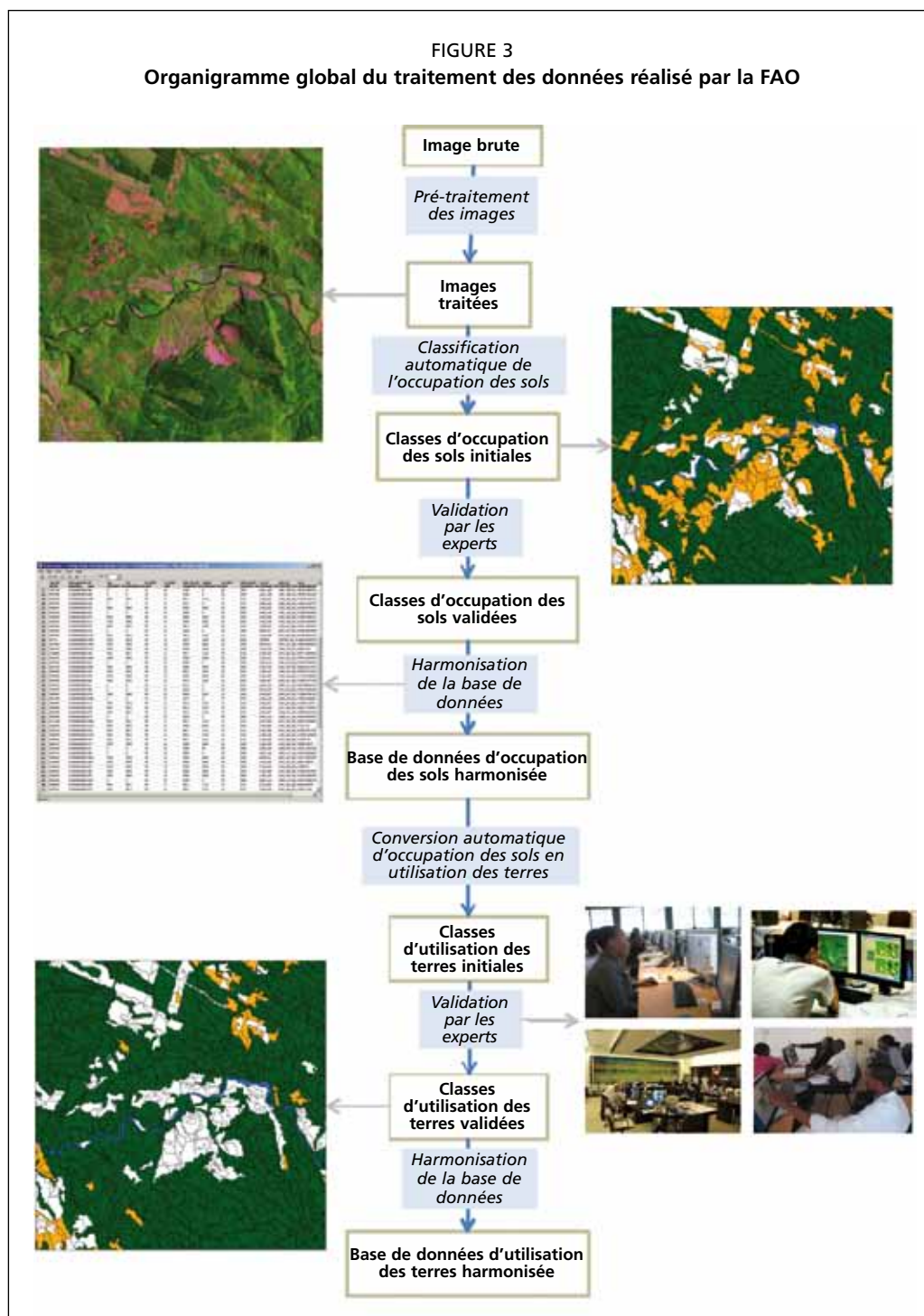
d'abord été appliquée aux deux images de 1990 et 2000, puis les objets dissous de 2000 ont été utilisés pour contraindre la segmentation de l'image pour 2005.

L'UCM des segments de niveau 2 recherchée était de 5 ha (Ridder, 2007). L'UCM souhaitée a été obtenue par l'agrégation des segments de niveau 1, inférieurs à 5 ha, avec des objets adjacents ayant une réflectance moyenne dans la bande 5 la plus similaire. La réflectance en infrarouge d'ondes courtes a été utilisée en raison de son efficacité dans les applications de cartographie forestière (Horler et Ahern, 1986; Hoffhine et Sader, 2002). La classification de l'occupation des sols a été effectuée sur les segments de niveau 1 spectralement homogènes. Les segments de niveau 2 se sont vus attribuer des labels de classe en fonction du pourcentage de composition des segments de niveau 1 (Tableau 1).

Vu le grand nombre d'échantillons et la complexité de classifier chaque site, la meilleure technique de classification pour traiter les données a été la classification supervisée automatisée. La méthodologie générale de classification (présentée dans l'organigramme global en Figure 3) se présente comme suit:

- Pour chaque site et date, les occupations des sols ont été classées selon les classes suivantes: *Couvert arboré*, *Couvert d'arbustes*, *Autre couvert* (comprenant *Herbacées* et *Absence de végétation*, qui ont été regroupées), *Eau* et *Pas de données*. Ces classes correspondent globalement aux directives de bonnes pratiques d'utilisation des terres du GIEC (Paustian, Ravindranath et van Amstel, 2006), lorsqu'elles sont finalement converties en labels d'utilisation des terres.
- Les images de 2000 ont été classées en premier. Lorsqu'il existait de faibles probabilités de détecter des changements entre les enquêtes, le label de classe pour les objets de la couche d'objets de l'image pour 2000 a été transféré aux couches d'objets de l'image pour 1990 et 2005.

FIGURE 3  
Organigramme global du traitement des données réalisé par la FAO



- Les objets considérés comme ayant une probabilité relativement élevée de changement entre 1990 et 2000 et entre 2000 et 2005 ont été classés séparément en utilisant les données d'entraînement sélectionnées automatiquement dans les objets qui n'ont pas changé durant la même période.
- Les objets d'UCM de 5 ha ont reçu des labels de classe en fonction de la proportion d'objets de niveau 1 labellisés qu'ils contenaient.

## MODÈLES DE CLASSIFICATION

Les très nombreuses caractéristiques biophysiques de la couverture forestière au niveau mondial constituent un défi pour la collecte des données d'entraînement. Ainsi, les conifères à feuilles persistantes denses et sombres ont des caractéristiques différentes des conifères à larges feuilles persistantes, qui diffèrent, à leur tour, des caractéristiques des feuillus à feuilles caduques. Les diverses caractéristiques biophysiques, et les changements de saison et de conditions d'éclairage en fonction de l'angle du soleil et de la position des arbres sur la terre se combinent pour affecter les propriétés de réflectance spectrale de la couverture forestière et rendent difficile de créer des modèles génériques de réflectance qui peuvent classer avec précision la couverture forestière sous toutes ses formes dans le monde. La méthode de classification de la FAO a cherché à rendre compte de cette variation en appliquant une méthode simple pour créer un modèle de classification de la couverture forestière pour chaque unité et période d'échantillonnage. Pour chaque site d'échantillonnage, donc, trois différents modèles de classification d'occupation des sols ont été créés et appliqués, un pour chaque période.

Pour les sites des domaines boréal, tempéré et subtropical, des labels d'entraînement pour chaque classe d'occupation des sols ont été assignés aux objets d'image de niveau 1 en utilisant des produits coïncidant pour l'année 2000 d'occupation des sols issus du spectroradiomètre à résolution modérée MODIS (VCF) (Hansen *et al.*, 2003) et du GlobCover 2005 (Arino *et al.*, 2008). Les labels de d'entraînement pour les masses d'eau ont été attribués en fonction de la proportion par objet individuel de pixels d'eau du masque global de MODIS (Carroll *et al.*, 2009). Les données de GlobCover ont été utilisées pour faciliter la classification de l'occupation des sols dominée par les arbustes.

Des classificateurs de réseaux de neurones artificiels ont été utilisés pour effectuer les classifications d'occupation des sols pour les sites d'échantillonnage traités par la FAO. Pour chaque site, un réseau a été formé et ensuite appliqué à tous les objets de l'image de l'année 2000. Les objets dont les caractéristiques spectrales en 1990 et 2005 étaient identiques ou similaires à celles de 2000 ont automatiquement reçu le label d'occupation des sols de 2000. Si un changement spectral important a été détecté entre 1990 et 2000 ou entre 2000 et 2005, les objets de 1990 et de 2005 ont reçu des labels basés sur des modèles de classification de 1990 et 2005 créés individuellement. Les méthodes sont détaillées dans Lindquist *et al.* (Soumis).

Pour les tropiques, la classification de l'occupation des sols de niveau 1 a été basée sur une bibliothèque spectrale supervisée (Raši *et al.*, 2011). Les signatures spectrales ont été recueillies à partir d'un ensemble commun de zones d'entraînement représentant les principales classes d'occupation des sols sous les tropiques. A cet effet, les données Landsat ETM+ pré-transformées pour l'année 2000 et pour tous les sites d'échantillonnage d'une sous-région donnée ont été utilisées. Pour chaque classe principale d'occupation des sols, plusieurs sous-classes ont été identifiées, représentant des variations spectrales dues à l'état du site ou sous-type d'occupation des sols. Pour Couvert *Arboré*, par exemple, les sous-classes identifiées ont été forêts denses de conifères, forêts dégradées de conifères, forêts sèches à feuilles caduques, mangroves et forêt marécageuse. Pour chaque sous-classe, plusieurs formations ont été sélectionnées. Le nombre de pixels utilisés à la fin pour établir la signature spectrale d'une sous-classe est généralement supérieur à 1 000. Des statistiques de signature spectrale (moyennes

et écarts-types) ont été calculées au niveau des sous-classes. Pour l'Asie du Sud et du Sud-Est, par exemple, 73 signatures spectrales ont été établies comme intrants dans la classification numérique des quatre principales catégories d'occupation des sols. Une classification générique supervisée des objets de segmentation de niveau 1 a été réalisée de manière uniforme pour tous les sites d'échantillonnage, à partir des fonctions d'appartenance établies en fonction de la signature spectrale de chaque sous-classe pour les bandes spectrales 3, 4 et 5 de Landsat. Les fonctions d'appartenance ont été définies comme une approximation de la distribution aléatoire de la classe. Ces fonctions d'appartenance ont ensuite été appliquées à l'imagerie des trois années, à savoir en étendant les signatures spectrales pour 1990 et 2005. Les sous-classes résultant de la classification supervisée n'ont pas été cartographiées en tant que catégories thématiques distinctes d'occupation des sols mais ont contribué à la cartographie des quatre principales classes d'occupation des sols.

Le résultat de la classification supervisée obtenue pour les objets de niveau 1 a servi de données directes pour l'agrégation thématique réalisée au niveau de la segmentation de niveau 2 (avec une UCM de 5 ha). La labellisation des objets de niveau 2 a été réalisée avec une liste séquentielle de critères de classification (Tableau 1). Dans le but de surveiller les forêts, l'accent a été mis sur la couverture forestière et les proportions de couverture forestière dans les objets de niveau 2. Pour les sites tropicaux, une classe *Mosaïque de couvert arboré* a été introduite pour les objets contenant un couvert forestier partiel au niveau 2: par exemple, une unité de cartographie contenant 40 pour cent de couvert arboré (= superficie totale d'objets agrégés de forêt de niveau 1) est toujours labellisée en *Mosaïque de couvert arboré*. Les objets de niveau 2 ont été les seuls labels d'objet d'image pris en considération pour l'examen et la révision des experts décrits dans les sections suivantes.

## CLASSIFICATION DE L'UTILISATION DES TERRES

Les classifications d'utilisation des terres ont été formulées à partir des définitions de la FAO sur la forêt (FAO, 2010), notamment:

- *Forêt* – Terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 m et un couvert arboré de plus de 10 pour cent, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ*. Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante.
- *Autre terre boisée* – Terres n'entrant pas dans la catégorie *forêt*, couvrant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 m et un couvert arboré de 5-10 pour cent, ou des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ*, ou un couvert mixte d'arbustes, arbrisseaux et arbres supérieur à 10 pour cent. Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante.
- *Autre terre* – Toute terre n'entrant pas dans la catégorie *forêt* ou *autre terre boisée*.

## CONVERSION DE L'OCCUPATION DES SOLS EN UTILISATION DES TERRES

La conversion de la classe *occupation des sols* en classe *utilisation des terres* s'est faite en deux étapes. On a tout d'abord converti automatiquement les classes d'occupation des sols en labels préliminaires d'utilisation des terres (Figure 4). Cette conversion automatique est valable pour la majorité des polygones de la série de données. Cependant, la quantification précise des réels changements d'utilisation des terres est complexe. La véritable utilisation des terres d'une zone donnée doit être examinée dans un contexte écologique qui consiste à déterminer non seulement la végétation présente au moment de l'acquisition des images satellite, mais aussi quelle sera la réaction du couvert végétal et sa reconstitution future (grâce à la régénération, au reboisement ou déboisement par ex.) (Kurz, 2010).

Au niveau opérationnel, les définitions de la FAO ont dû être interprétées par les experts pour fournir le contexte nécessaire à la catégorisation précise de l'utilisation des terres, en particulier lorsqu'il existe des exceptions aux règles automatisées. Voici plusieurs types d'exceptions (voir aussi la figure 4):

- Les classes d'occupation des sols *Couvert arboré* et *Mosaïque de couvert arboré* ont été converties en classe d'utilisation des terres *Forêt*. Les experts ont cherché des exceptions où les utilisations des terres étaient en milieu urbain (par ex. les arbres dans les parcs ou les jardins autour des maisons) ou de nature agricole (vergers par ex.). Les zones urbaines avec des arbres ou des vergers, les plantations de palmiers à huile, les terres agricoles avec des arbres et les espaces d'agroforesterie ont été identifiés et manuellement recodés en tant que *Autre utilisation des terres avec couvert arboré*.
- La classe *Couvert d'arbustes* a été convertie en classe d'utilisation des terres *Autre terre boisée*. Les experts ont cherché des exceptions comme les forêts qui ont repoussé mais où les arbres n'ont pas encore atteint les 5 m, et ont recodé ces zones en *Forêt*.
- La classe *Autre couvert* a été convertie en *Autre utilisation des terres*. Les experts ont également cherché des exceptions telles que les surfaces temporairement déboisées qui pouvaient ne pas avoir d'arbre au moment de l'image, mais qui sont susceptibles de se régénérer ou d'être replantées; dans ce cas, elles ont été recodées comme *Forêt*.

#### INTERPRÉTATION, VALIDATION ET CORRECTION DES CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS ET D'UTILISATION DES TERRES PAR LES EXPERTS

L'affectation définitive des labels d'occupation des sols et d'utilisation des terres a été réalisée par des forestiers nationaux ou des experts en télédétection. Les contrôles visuels ont été effectués sur l'ensemble des images des trois périodes d'enquête pour examiner et réviser les labels d'occupation des sols et d'utilisation des terres attribués automatiquement. Le CCR a développé une application informatique autonome à cet effet (Simonetti, Beuchle et Eva, 2011). Cet outil a pour objectif de fournir une interface conviviale, avec une série de fonctions faciles à utiliser pour la navigation et l'évaluation

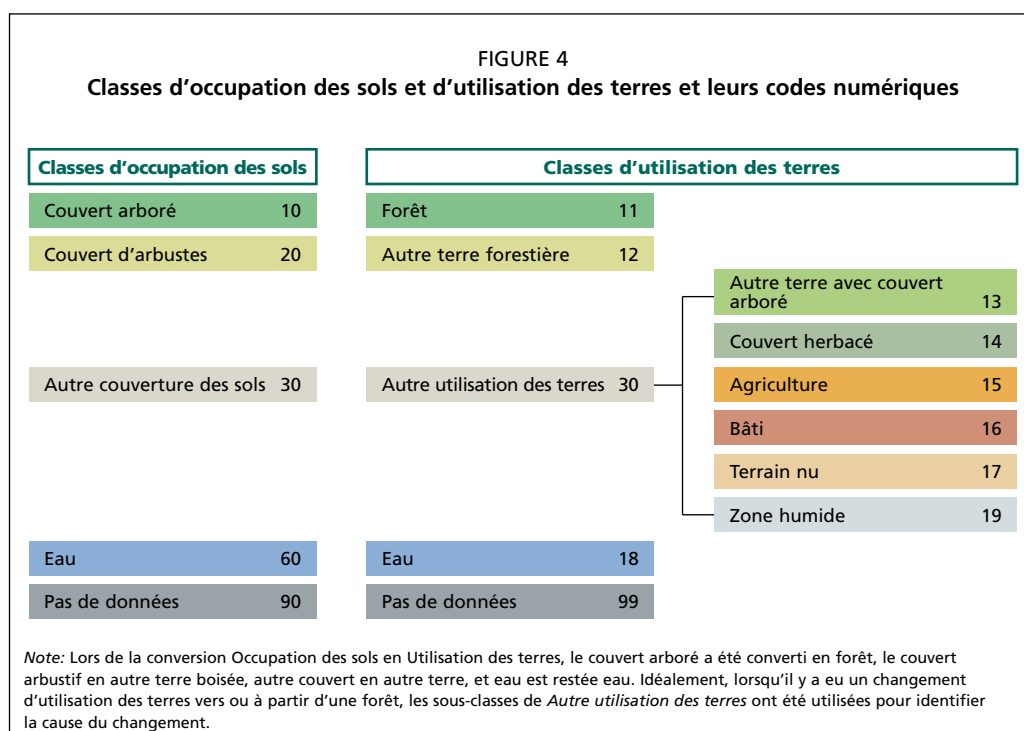
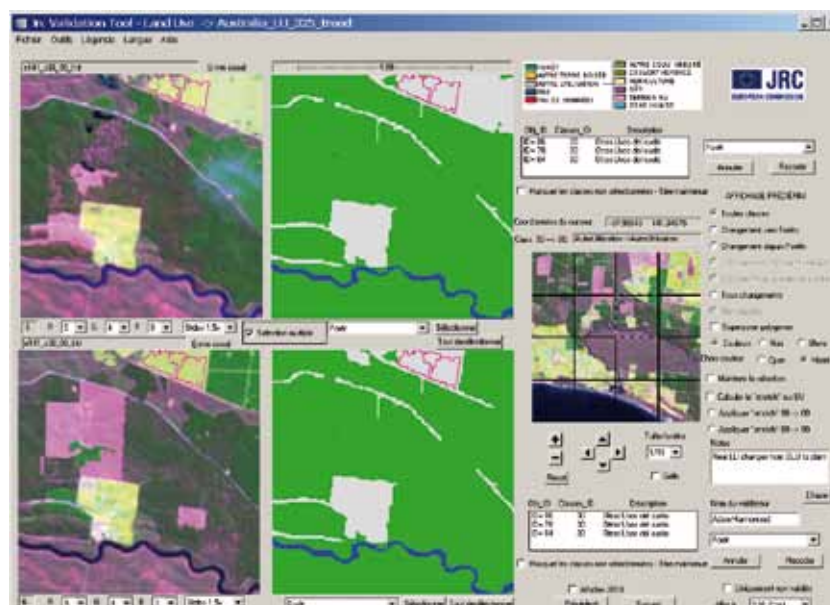




FIGURE 5  
Outil de validation du CCR montrant les images Landsat de chaque période de l'enquête (à gauche) et les classes d'utilisation des terres de la FAO (au centre)



des séries d'images satellitaires et des cartes d'occupation des sols/utilisation des terres, mais également pour mieux recoder certaines surfaces lorsque, selon les experts, des modifications étaient nécessaires (Figure 5).

Le contrôle visuel et l'affinage des résultats de la classification numérique des objets de niveau 2 ont été effectués en trois étapes:

- Les erreurs évidentes de classification automatique ont tout d'abord été corrigées.
- Les résultats de la cartographie ont été révisés par des experts nationaux lors d'ateliers régionaux ce qui a permis d'accroître les connaissances sur les forêts au niveau local pour améliorer l'interprétation. Dix-neuf ateliers régionaux ont été organisés entre septembre 2009 et juillet 2011 durant lesquels 204 experts nationaux venus de 107 pays (Annexe 3) sont intervenus.
- Dans une dernière phase d'harmonisation régionale, des interprètes d'images expérimentés ont effectué un criblage final afin de détecter les erreurs oubliées ou réintroduites et ont contrôlé la cohérence des interprétations pour la région, afin de réaliser les dernières corrections nécessaires.

Le travail de révision de la classification a été facilité par les images satellite à très haute résolution, Google Earth™, les images du projet Degree Confluence<sup>2</sup>, de Panoramio™ et des cartes de végétation disponibles. Les connaissances des experts ont également été primordiales au niveau local. La phase de contrôle visuel et d'affinement est une phase cruciale pour corriger les erreurs de classification et évaluer les changements.

<sup>2</sup> [www.confluence.org](http://www.confluence.org).