

# Etude des changements du couvert forestier dans les zones tropicales entre 1980 et 2000

## RÉSUMÉ

L'étude par télédétection des zones tropicales de FRA 2000 a complété l'évaluation basée sur les informations des pays et s'est intéressée aux processus de changement survenus dans les forêts tropicales pendant les années 80 et 90. Un échantillonnage aléatoire stratifié (10 pour cent) des forêts tropicales mondiales constitué de 117 unités d'échantillonnage a été utilisé, représentant 87 pour cent des forêts tropicales. Pour chaque unité d'échantillonnage, trois images satellitaires Landsat prises à différentes dates ont fourni le matériel brut pour l'élaboration de statistiques sur les changements du couvert forestier et des autres catégories de couvert végétal entre 1980 et 1990, et entre 1990 et 2000.

Parmi les importants résultats générés par cette étude figurent des matrices de changement pour l'ensemble de la zone intertropicale (zones des pays en développement) et pour l'Afrique, l'Asie et l'Amérique latine considérées séparément. Les matrices montrent les différentes classes de forêts et autres couverts, et la façon dont elles ont évolué au cours des deux dernières décennies. Cette étude est la première à fournir une méthodologie cohérente d'évaluation du changement du couvert forestier sur deux périodes d'évaluation (de 1980 à 1990 et de 1990 à 2000). Les résultats de l'étude par télédétection et les données statistiques des pays des zones tropicales regroupées au niveau régional sont bien corrélés, bien que l'étude par télédétection montre un niveau de déforestation inférieur pour l'Afrique à celui calculé en additionnant les statistiques nationales.

Les conclusions de l'étude sur l'ensemble des zones tropicales indiquent que les forêts tropicales mondiales comprises dans la zone inventoriée ont disparu avec un taux d'environ 8,6 millions d'hectares par an dans les années 90, comparé à une perte d'environ 9,2 millions d'hectares au cours de la décennie précédente. Bien que la différence soit comprise dans la marge d'erreur pour l'ensemble de la zone intertropicale, la réduction de la déforestation est statistiquement significative dans la zone écologique des forêts tropicales humides décidues. En revanche, de petites augmentations de la déforestation (négligeables sur le plan statistique) ont été décelées dans les zones écologiques des forêts tropicales ombrophiles et des forêts sèches. Pour l'ensemble des tropiques, l'essentiel de la déforestation était dû à la conversion directe des forêts à l'agriculture permanente ou aux pâturages et, dans une moindre mesure, à l'intensification progressive de l'agriculture itinérante.

---

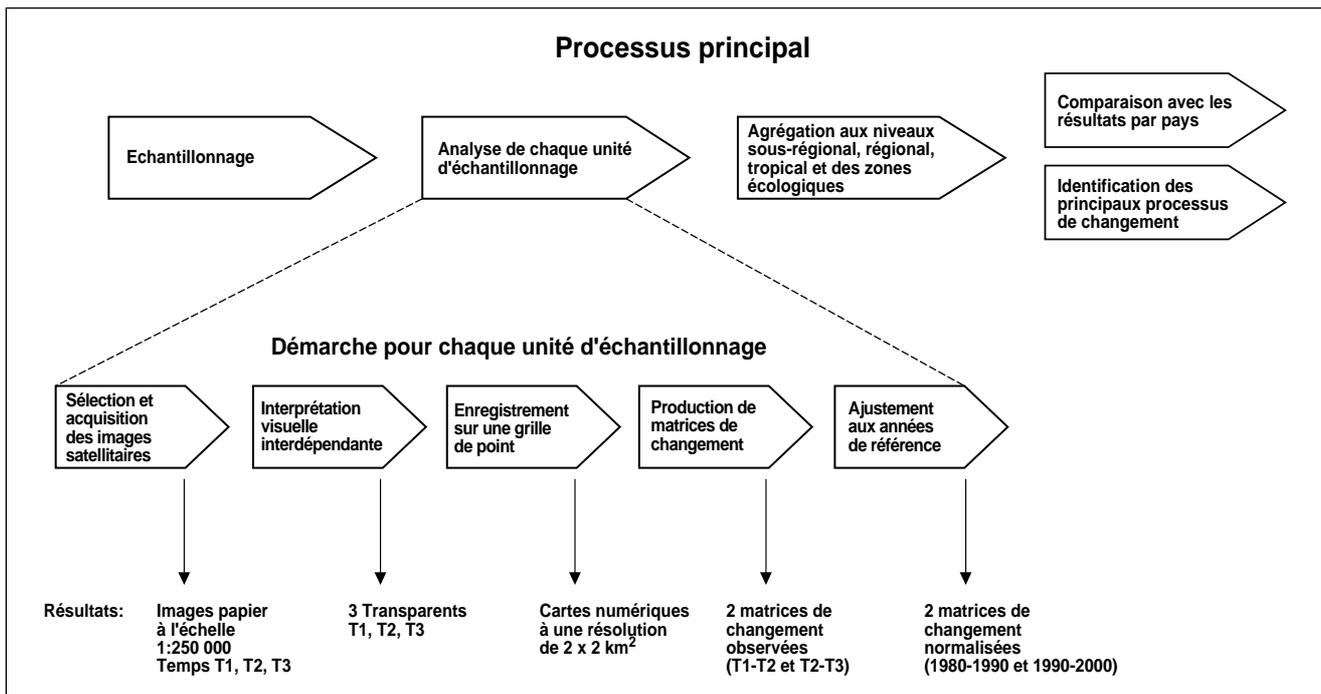
## INTRODUCTION

Les estimations de la superficie forestière et de son évolution produites par FRA 2000 sont basées, dans une large mesure, sur les rapports de statistiques et d'inventaires nationaux qui contiennent des informations détaillées sur les forêts des différents pays. Cependant, les fortes différences entre les jeux de données des divers pays peuvent s'expliquer par des divergences dans les méthodes appliquées, les termes et les définitions employés, et les mises à jour des informations dans les inventaires. Malgré les ajustements effectués pour atténuer ces différences, des incertitudes peuvent encore subsister lorsque l'on compare les statistiques des différents pays, notamment ceux relatifs aux changements de la superficie forestière.

Pour renforcer ses connaissances sur les processus de changement du couvert végétal au niveau tropical, en particulier la déforestation, et pour compléter les statistiques nationales, la FAO a entrepris une étude indépendante des changements du couvert végétal dans les zones tropicales. Cette étude, qui mettait l'accent sur la quantification des changements du couvert forestier, s'est appuyée sur

117 unités d'échantillonnage couvrant 10 pour cent de la zone inventoriée. Chaque unité consistait en une série temporelle de trois images satellitaires Landsat couvrant la période entre 1980 environ et 2000.

Les résultats de l'étude complètent les estimations de la superficie forestière extraites des données des pays et fournissent une information unique en son genre sur les tendances de l'évolution du couvert forestier depuis les années 80 à des intervalles de dix ans. Cette étude est le premier qui ait donné un aperçu cohérent des processus de changement affectant les forêts aux niveaux tropical, régional et des zones écologiques sur deux périodes d'évaluation. Les principaux résultats de l'étude comprennent des matrices de changement qui quantifient les modifications survenues dans les forêts et les autres classes de couvert végétal. A partir de ces matrices, plusieurs processus de changement ont été identifiés – déforestation, dégradation, fragmentation et agriculture itinérante, notamment. L'analyse des passages entre les classes, attribués à ces processus de changement, a permis d'identifier les relations de cause à effet qui contribuent à



**Figure 46-1. Processus de l'étude par télédétection**

expliquer les mécanismes complexes de la déforestation. En revanche, les études basées sur les rapports nationaux ne sont en mesure de produire que des estimations individuelles des changements de la superficie forestière, sans montrer comment ou pourquoi le couvert forestier a évolué.

Les acquisitions les plus récentes d'images satellitaires qui ont été utilisées correspondent aux mêmes unités d'échantillonnage sélectionnées pour l'étude des zones tropicales de FRA 1990. Les archives de FRA 1990, contenant des séries chronologiques de deux images pour chaque unité d'échantillonnage, étaient disponibles pour la plupart des zones et ont été complétées avec les images les plus récentes disponibles. Les mêmes méthodologies et définitions ont été appliquées pour FRA 2000. Les trois dates disponibles pour chaque échantillon ont rendu possible une étude sur 20 ans et la production de statistiques à des intervalles de dix ans.

Les objectifs de l'étude par télédétection de FRA 2000 étaient les suivants:

- suivre la situation et le changement du couvert forestier au cours des 20 dernières années à l'échelle régionale et tropicale;
- analyser les tendances des changements du couvert forestier entre les périodes 1980-1990 et 1990-2000;
- étudier les dynamiques du changement du couvert forestier et identifier les mécanismes responsables de la déforestation;
- compléter les informations nationales existantes en fournissant des données spatiales et temporelles compatibles sur la situation du couvert forestier et ses changements.

## MÉTHODES

La figure 46-1 montre les différentes étapes de l'étude qui seront expliquées en détail ci-après.

L'analyse des séries chronologiques pour l'étude a été réalisée de façon à assurer un haut niveau de compatibilité, en utilisant des sources de données et des techniques d'interprétation uniformes. Les données utilisées pour chaque unité d'échantillonnage se composent de trois images acquises à des dates aussi près que possible des années de référence 1980, 1990 et 2000.

Ces séries de trois dates ont permis d'analyser et de calculer les changements du couvert végétal sur deux périodes de temps successives, et d'évaluer les différences dans les changements survenus dans le couvert entre ces deux périodes. L'utilisation d'une troisième date dans la série chronologique a compliqué considérablement le calcul des estimations pour les périodes et les années de référence couvertes par le rapport.

Les principaux aspects de la méthodologie de l'étude sont:

- le plan d'échantillonnage statistique;
- la classification standard axée sur l'évaluation des forêts;
- la procédure d'interprétation interdépendante;
- la normalisation des résultats aux années de référence;
- le calcul des estimations agrégées.

Pour plus de détails, se référer au chapitre 1 dans FAO (1996) et FAO (2001).

### Plan statistique

FRA 2000 a utilisé le même plan d'échantillonnage statistique que FRA 1990 (FAO 1996; Czaplewski 1994).

Tableau 46-1. Classification du couvert végétal utilisée pour l'étude

Catégories de couvert végétal	Classes de couvert végétal (principales classes)	Brève description
<b>Forêt naturelle</b>		
Couvert forestier continu	Couvert fermé Couvert ouvert Jachères longues	Couverture des houppiers > 40 % Couverture des houppiers 10-40% Forêt affectée par l'agriculture itinérante
Forêt fragmentée	Forêt fragmentée	Mosaïque de formations forestières/non forestières
<b>Terres non forestières</b>		
Autres terres boisées	Arbustes Jachères courtes	Zones agricoles avec des périodes de jachère courtes
Zones non boisées	Autre couvert Eau	Comprend les zones urbaines et agricoles, les zones ayant moins de 10% de couvert végétal ligneux
<b>Végétation ligneuse établie par l'homme</b>	Plantations	Plantations forestières et agricoles
<b>Non visible</b>	Non interprété	Nuages, terres boisées brûlées, ombres, hors de la zone d'étude

*Note:* Les classes sont groupées en zones forestières/non forestières suivant la définition f3 de la forêt.



Figure 46-2. Répartition des unités d'échantillonnage de l'étude par télédétection des zones tropicales

Ses principales caractéristiques sont les suivantes:

- Un échantillonnage aléatoire stratifié à deux degrés a été utilisé. La zone inventoriée a été divisée en régions et sous-régions. Chacune des sous-régions a été ultérieurement subdivisée en trois strates au maximum, définies en fonction de la superficie forestière (Amérique latine et Asie) ou de la dominance de la forêt (Afrique).
- La population échantillonnée consistait en 1 203 scènes Landsat où le couvert forestier dépassait 10 pour cent et où la superficie terrestre était supérieure à 1 million d'hectares, représentant 51 pour cent du nombre total de scènes couvrant les zones tropicales. Au sein de la population, les échantillons couvraient tous les types de forêts tropicales en conditions très humides, humides et sèches. D'après les statistiques nationales de FRA 1990, 87 pour cent des forêts tropicales se situent dans la zone échantillonnée.

117 unités d'échantillonnage ont ainsi été sélectionnées, une unité correspondant à une scène Landsat. La figure 46-1 montre la localisation des unités d'échantillonnage.

#### Classification du couvert végétal

La même classification du couvert végétal a été utilisée pour toutes les unités d'échantillonnage pour cartographier, compiler les statistiques et décrire la végétation (notamment la végétation ligneuse). Elle comprend dix classes de couvert dont neuf sont visibles (tableau 46-1).

La classification du couvert végétal contient plusieurs classes de végétation ligneuse. Elles peuvent par conséquent être regroupées suivant les différents besoins de rédaction de rapports et d'analyse. Dans le cas des forêts, trois définitions distinctes ont été déterminées par regroupement de différentes classes de végétation ligneuse. La première et la plus restrictive, désignée sous le nom de «forêt 1» (f1), n'inclut que la classe de la forêt fermée. La deuxième,

«forêt 2» (f2), a été créée pour concorder avec la définition de la forêt utilisée dans les rapports des pays; elle comprend les classes de forêt fermée et ouverte, et une fraction (deux neuvièmes) de la classe de forêt fragmentée. La troisième définition, «forêt 3» (f3), est la plus générale et comprend les classes de jachère longue et une fraction plus importante de la classe de forêt fragmentée (un tiers) que dans la définition de f2 (voir aussi FAO 1996). La dernière définition permet une meilleure différenciation des changements.

### **Interprétation des unités d'échantillonnage et compilation des données**

L'interprétation des unités d'échantillonnage a été entreprise pour FRA 2000 par des experts en photo-interprétation d'images satellitaires. De nombreuses organisations régionales et nationales ont contribué à ce travail, y compris le Centre agronomique tropical de recherche et d'enseignement (CATIE) du Costa Rica, l'Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts (ENGRF) de Montpellier, France, l'Inventaire forestier de l'Inde (FSI) et l'Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) du Brésil. La FAO s'est chargée de la formation du personnel auprès des institutions participantes. Chaque interprétation a été soigneusement vérifiée et examinée au siège de la FAO à Rome, afin de garantir l'homogénéité des interprétations entre les échantillons. Ce travail d'interprétation a été effectué aussi en tenant compte de la connaissance des experts nationaux sur la situation et l'état de la végétation dans les zones inventoriées. Dans certains endroits, notamment au Brésil, des vérifications de terrain conséquentes ont été menées (survolés aériens et inventaires au sol).

Les interprétations ont été réalisées en utilisant des méthodes manuelles conventionnelles pour l'interprétation des séries temporelles d'images satellitaires. Les données Landsat (MSS et TM) ont été utilisées pour la plupart des unités d'échantillonnage, mais quelques images SPOT et IRS ont été nécessaires lorsque les données Landsat n'étaient pas disponibles ou de faible qualité. Les images ont été traitées en utilisant une composition classique de trois bandes en fausses couleurs infrarouges. Les interprétations ont été réalisées sur des impressions papier à l'échelle de 1:250 000.

Chaque unité d'échantillonnage a été interprétée à trois dates différentes avec des images se rapprochant le plus possible des années de référence 1980, 1990 et 2000. Les dates moyennes pour les trois images des séries étaient 1977, 1989 et 1998. Les dénominations T1, T2 et T3 ont été données aux images correspondant respectivement aux données pour 1980, 1990 et 2000.

Les images T1 et T2 avaient déjà été étudiées dans FRA 1990 suivant une méthode d'interprétation interdépendante. La même technique a été appliquée à l'interprétation des images T3 acquises pour FRA 2000. Cette méthode implique une analyse du changement par

comparaison continue entre les images appartenant à la même série chronologique. En outre, toutes les images ont été calées géométriquement sur l'image T2 en utilisant des techniques locales de calage au fur et à mesure de l'interprétation. Bien que cette méthode soit plus longue que l'interprétation indépendante, elle permet d'éliminer les erreurs de classification et d'estimations de l'état et du changement. Elle réduit considérablement les erreurs qui peuvent être engendrées par des distorsions géométriques entre les images, et celles dues aux différences de traitement des images (contraste) ou aux différences saisonnières dans la végétation entre les scènes.

L'image acquise pour la troisième date de la série temporelle a apporté beaucoup d'informations nouvelles à l'analyse. L'essentiel de l'imagerie T3 a été acquis numériquement par FRA. De nouvelles informations auxiliaires, comme des cartes de la végétation, étaient disponibles depuis FRA 1990 et ont été utilisées pour améliorer l'interprétation des séries chronologiques entières. Les interprétations T1 et T2 ont donc été révisées si nécessaire. Cette révision a conduit à de très légères différences dans les statistiques relatives à la période 1980-1990, comparées à celles produites par FRA 1990 pour la même période.

Les interprétations ont été réalisées par superposition de calques transparents. Plus de 900 millions d'hectares ont été interprétés, avec une superficie visible commune à l'intérieur des séries chronologiques couvrant environ 250 millions d'hectares. La saisie des données s'est faite à l'aide d'une grille de points avec des pas de 2 x 2 km<sup>2</sup>. Pour chaque point, la classe interprétée a été enregistrée pour les trois dates successives, et les grilles de données correspondantes ont été intégrées au Système d'information sur les forêts (FORIS). Toutes les données ont été archivées dans FORIS qui permet aussi de visualiser les interprétations et de calculer les statistiques aux différents niveaux étudiés. Les grilles de données ont également été géoréférencées et intégrées dans un Système d'information géographique.

Les grilles de données ont servi à déterminer l'état (c'est-à-dire les superficies des différentes classes de couvert végétal à chacune des trois dates) et à estimer les changements d'une classe à une autre pendant les deux périodes. Les changements intervenus entre deux dates au sein d'une même unité d'échantillonnage ont été synthétisés dans une unique matrice qui quantifie tous les passages entre les classes.

Les données produites pour chaque unité d'échantillonnage consistent donc en trois états (1980, 1999 et 2000) et deux matrices de changement (1980-1990 et 1990-2000).

### **Normalisation des données aux années de référence 1980, 1990 et 2000**

Bien que les images aient été choisies de façon à être le plus proche possible des années de référence 1980, 1990 et 2000,

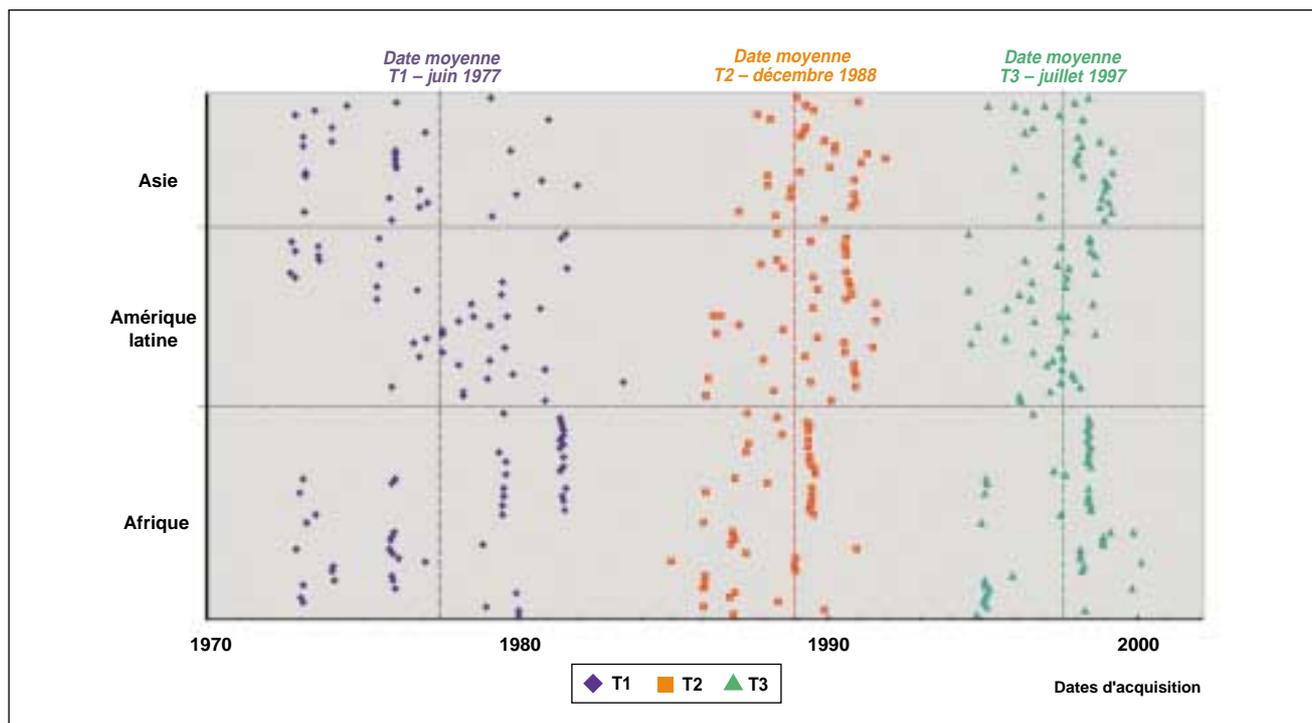


Figure 46-3. Répartition temporelle des images satellites utilisées pour l'étude

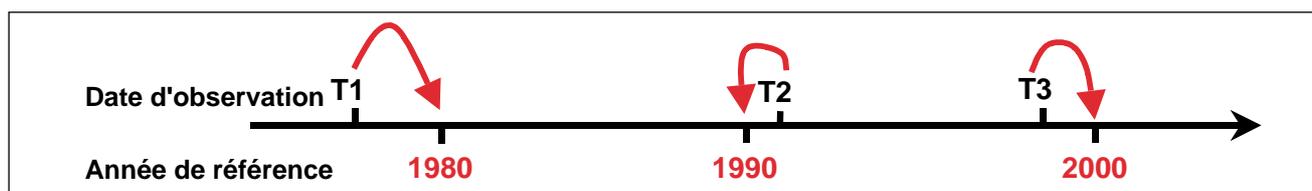


Figure 46-4. Illustration de la normalisation aux années de référence

les dates correspondaient rarement aux années de référence et variaient entre les unités d'échantillonnage (figure 46-3).

Avant de pouvoir réaliser des agrégations à différents niveaux, les données ont été ajustées aux années de référence 1980, 1990 et 2000. Les statistiques de chaque unité d'échantillonnage ont dû être soit extrapolées, soit interpolées à partir des dates d'acquisition d'origine de l'image jusqu'aux différentes années de référence (figure 46-4).

Les données pour chaque unité d'échantillonnage ont d'abord été organisées en une série de matrices informatisées, puis traitées en utilisant l'un de deux algorithmes. Les algorithmes ont été développés par la FAO de manière à projeter les informations issues de l'interprétation des images satellites pour les années de référence standard. Deux méthodes ont été utilisées: la méthode constante et la méthode linéaire. Dans la première, les changements annuels du couvert végétal ont été considérés comme constants pendant toute la période de référence. Ils ont été calculés à l'aide des données relatives à une seule période étudiée. En revanche, dans la méthode linéaire, les changements annuels

du couvert végétal ont été supposés graduels et linéaires, ce qui exigeait l'utilisation des données des deux périodes successives (T1-T2 et T2-T3).

Du point de vue informatique, la méthode linéaire est plus complexe mais a été préférée car elle ne provoque pas de changements brusques de tendance à la deuxième date de la série, contrairement la méthode constante. En outre, la méthode linéaire a l'avantage de donner les mêmes résultats pour l'année de référence 1990 qu'ils soient extrapolés ou interpolés à partir des données T1-T2 ou T2-T3. Cependant, la méthode linéaire n'était toujours supportée par les données originales. Dans ces cas là (23 pour cent), la méthode constante, plus robuste, a été utilisée. Elle a été aussi appliquée lorsque l'extrapolation hors des périodes observées était nécessaire pour ajuster les résultats aux années 1980 ou 2000.

Le calcul des estimations s'est basé sur la zone commune aux trois images de la série. Environ 90 pour cent de la zone commune à T1 et T2 se trouvaient aussi dans l'image T3. Il aurait été possible, théoriquement, d'améliorer certaines des estimations de l'étude en n'utilisant que la zone commune à

deux images consécutives, pour chaque période (puisque'elle était plus grande). Cependant, cela n'a pas été réalisé car la méthode ne permettait pas d'estimer les changements des taux de déforestation entre les deux périodes (1980-1990 et 1990-2000), ce qui représentait l'un des principaux objectifs de l'étude.

### Calcul des estimations

Les estimations du couvert forestier et des taux de déforestation sur les deux périodes de référence de dix ans ont été calculées pour chaque strate, chaque région géographique et chaque zone écologique. Toutes ces estimations sont issues des données des unités d'échantillonnage, normalisées pour correspondre aux périodes de référence.

Les unités d'échantillonnage à l'intérieur de chaque strate de l'étude ont été considérées comme un échantillon par grappes. Les estimateurs étaient généralement des estimateurs par le ratio ou une combinaison de ceux-ci. Du fait que le nombre d'échantillons était relativement faible pour chaque strate, la méthode des estimateurs combinés sur les strates a été utilisée pour limiter les biais.

Les erreurs types (ET) ont été calculées pour mesurer la précision des estimations, établir des intervalles de confiance à 95 pour cent et tester les hypothèses. Les erreurs types des estimateurs de base ont été calculées suivant une théorie commune (estimateurs par le ratio pour l'échantillonnage stratifié) (Raj 1968). Pour les estimateurs plus complexes, la formule d'expansion de Taylor (Raj 1968) a été utilisée pour dériver les formules standard de l'erreur type. Le Document de travail de FRA N° 49 (FAO 2001) explique de manière détaillée les méthodes statistiques employées dans cette étude.

## RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Les résultats couvrent presque toutes les forêts des zones tropicales avec des conditions écologiques variées, depuis les forêts tropicales ombrophiles jusqu'aux forêts sèches. Cette étude est le premier outil d'évaluation qui ait fourni des informations compatibles et comparables portant sur deux périodes (1980-1990 et 1990-2000), ce qui a permis de calculer à la fois les changements eux-mêmes et le changement de ces changements entre les deux périodes. Les évaluations antérieures n'ont pu fournir ce type d'informations en raison du manque de compatibilité dans les informations issues des rapports consécutifs de FRA.

Un exemple des résultats de l'interprétation est donné pour un échantillon situé au Zimbabwe dans la figure 46-5.

### Etats et changements pour la période 1990-2000 aux niveaux tropical, régional et des zones écologiques

Les résultats pour la période 1990-2000, estimés pour l'ensemble des zones tropicales et au niveau régional sont présentés dans le tableau 46-2 et le tableau 46-3.

Un résumé des changements nets par classe pour la période 1990-2000 est donné dans la figure 46-6. Ils ont été obtenus en calculant la différence entre les estimations de la superficie en 2000 et 1990, et montrent les pertes et les gains pour chaque classe.

Pour la période 1990-2000, l'étude met en évidence que, pour l'ensemble des zones tropicales, les forêts fermées sont la classe la plus sujette aux pertes. La classe «autre couvert», qui comprend les zones avec une faible végétation ligneuse comme les zones agricoles et urbaines, enregistre la plus grande augmentation en superficie dans l'ensemble des zones tropicales. Au niveau tropical, la plupart des forêts qui ont subi un changement, ont été converties en «autre couvert». On peut déduire de ce résultat que la majorité des forêts tropicales fermées a disparu en raison de leur conversion en terres agricoles (une portion négligeable allant aux zones urbaines). Au niveau régional, les résultats varient.

En Afrique, pendant les années 90, la superficie des forêts fermées convertie en «autre couvert» est relativement faible par rapport aux autres régions. Des pourcentages élevés de forêts fermées ou ouvertes ont été transformés en classes de forêt fragmentée et jachère courte dans la région. Des superficies importantes de forêt fragmentée ont également été converties en «autre couvert». Les forêts ouvertes d'Afrique ont subi des pertes plus sérieuses que celles des autres régions.

Les changements intervenus dans les forêts d'Amérique latine se caractérisent par un passage marqué de la forêt fermée vers la classe «autre couvert» (environ deux fois plus élevé que dans les autres régions). Bien que les résultats soient similaires en Asie, de grandes superficies de forêt fermée ont été transformées en classes de jachères longues et courtes dans cette région. D'importantes superficies de formations arbustives ont aussi changé en «autre couvert» en Amérique latine, mais pas en Asie ou en Afrique. Le passage des classes «autre couvert» ou forêt fermée vers les plantations (végétation ligneuse établie par l'homme) a été observé de façon notable en Asie.

Les changements positifs concernent les superficies où la quantité de biomasse ligneuse augmente. Même si ce type de changement n'était pas très fréquent dans les années 90, certains changements positifs ont été observés avec le passage de superficies d'«autre couvert» vers des jachères courtes ou des formations arbustives en Amérique latine. Des transformations d'«autre couvert» en de la forêt fragmentée étaient distribuées plus uniformément dans les zones tropicales, alors que des changements de la jachère courte vers la jachère longue ont été observés surtout en Asie.

Le tableau 46-4 donne les estimations de la superficie forestière pour la définition f3 de la forêt. La superficie forestière de la zone inventoriée a été estimée en 2000 à 1,6 milliard d'hectares, soit environ 50 pour cent de la zone inventoriée. La moitié de cette superficie forestière se situe en Amérique latine.

Tableau 46-2. Matrice de changement pour la période 1990-2000 au niveau tropical (millions d'ha)

Matrice de changement 1990-2000 Zones tropicales											
Classes de couvert végétal en 1990	Classes de couvert végétal en 2000									Total 1990	% de la superficie totale de terres
	Forêt fermée	Forêt ouverte	Jachères longues	Forêt fragmentée	Arbustes	Jachères courtes	Autre couvert	Eau	Plantations		
Forêt fermée	1131,6	1,2	6,7	9,4	1,3	8,0	43,1	1,1	1,9	1205,1	39,3
Forêt ouverte	0,2	287,3	0,5	6,8	0,7	2,2	6,6	0,1	0,0	304,5	9,9
Jachères longues	1,1	0,1	63,2	0,2	0,0	4,8	4,7	0,0	0,2	74,4	2,4
Forêt fragmentée	0,5	0,4	0,2	302,1	0,5	2,2	11,2	0,1	0,2	317,5	7,1
Arbustes	0,1	0,1	0,0	0,1	143,5	0,6	9,7	1,8	0,1	155,9	5,1
Jachères courtes	1,0	0,3	1,2	1,6	0,2	122,7	11,6	0,2	0,4	139,8	4,5
Autre couvert	0,6	0,5	0,5	2,3	3,7	4,9	928,4	1,3	2,3	944,4	30,0
Eau	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	6,6	0,0	7,8	0,3
Plantations	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	18,0	19,3	0,6
<b>Total 2000</b>	<b>1135,2</b>	<b>290,8</b>	<b>71,5</b>	<b>222,5</b>	<b>150,6</b>	<b>147,3</b>	<b>1017,6</b>	<b>10,2</b>	<b>23,2</b>	<b>3068,8</b>	
% de la superficie totale de terres	37,0	9,5	2,3	7,2	4,9	4,8	33,2	0,3	0,8		

Notes: Les classes sont rangées de manière décroissante en fonction de leur contenu indicatif de biomasse ligneuse, à l'exception de la classe des plantations, de sorte que les changements négatifs (vers une classe de plus faible contenu de biomasse) correspondent aux valeurs indiquées au-dessus de la diagonale, alors que les changements positifs se situent au-dessous. Les valeurs de la diagonale représentent les superficies qui sont restées inchangées pendant la période.

Tableau 46-3. Matrices de changement pour la période 1990-2000 par région (millions d'ha)

Matrice de changement 1990-2000 Afrique											
Classes de couvert végétal en 1990	Classes de couvert végétal en 2000									Total 1990	% de la superficie totale de terres
	Forêt fermée	Forêt ouverte	Jachères longues	Forêt fragmentée	Arbustes	Jachères courtes	Autre couvert	Eau	Plantations		
Forêt fermée	261,4	0,6	0,7	5,7	0,0	5,0	2,0	0,0	0,1	275,6	20,0
Forêt ouverte	0,0	106,1	0,2	5,0	0,1	1,0	2,9	0,0	0,0	117,0	16,1
Jachères longues	0,0	0,1	16,3	0,1	0,0	0,5	0,2	0,0	0,0	17,2	1,4
Forêt fragmentée	0,2	0,2	0,0	139,6	0,1	1,8	6,0	0,0	0,0	148,2	12,1
Arbustes	0,0	0,0	0,0	0,0	42,9	0,3	1,5	0,0	0,0	44,9	3,7
Jachères courtes	0,8	0,2	0,3	0,9	0,2	65,3	2,9	0,1	0,0	70,7	5,8
Autre couvert	0,1	0,2	0,0	0,4	0,2	0,4	467,0	0,3	0,1	468,7	26,3
Eau	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,4	0,0
Plantations	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	1,3	1,3	0,1
<b>Total 2000</b>	<b>262,6</b>	<b>107,4</b>	<b>17,0</b>	<b>152,8</b>	<b>43,5</b>	<b>75,1</b>	<b>483,0</b>	<b>0,4</b>	<b>1,4</b>	<b>1224,1</b>	
% de la superficie totale de terres	21,0	7,0	1,4	12,0	3,6	6,1	39,0	0,0	0,1		

Matrice de changement 1990-2000 Asie											
Classes de couvert végétal en 1990	Classes de couvert végétal en 2000									Total 1990	% de la superficie totale de terres
	Forêt fermée	Forêt ouverte	Jachères longues	Forêt fragmentée	Arbustes	Jachères courtes	Autre couvert	Eau	Plantations		
Forêt fermée	195,0	0,4	3,6	0,7	0,1	3,2	9,4	0,7	1,9	213,0	24,9
Forêt ouverte	0,2	24,7	0,2	0,2	0,2	0,3	1,1	0,0	0,0	26,0	4,4
Jachères longues	0,6	0,0	41,2	0,0	0,0	3,9	2,8	0,0	0,2	49,3	6,1
Forêt fragmentée	0,1	0,0	0,2	16,8	0,2	0,2	1,3	0,0	0,1	19,0	3,1
Arbustes	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	0,2	0,8	0,0	0,0	9,7	1,6
Jachères courtes	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	41,3	6,3	0,1	0,4	49,0	6,0
Autre couvert	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,3	222,7	0,3	2,0	226,3	27,1
Eau	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,2	0,0	1,4	0,2
Plantations	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	15,3	16,0	2,6
<b>Total 2000</b>	<b>194,2</b>	<b>25,1</b>	<b>46,6</b>	<b>18,3</b>	<b>9,1</b>	<b>49,5</b>	<b>245,1</b>	<b>2,5</b>	<b>19,0</b>	<b>610,5</b>	
% de la superficie totale de terres	31,8	4,2	7,6	3,0	1,0	8,1	40,7	0,4	3,2		

Matrice de changement 1990-2000 Amérique latine											
Classes de couvert végétal en 1990	Classes de couvert végétal en 2000									Total 1990	% de la superficie totale de terres
	Forêt fermée	Forêt ouverte	Jachères longues	Forêt fragmentée	Arbustes	Jachères courtes	Autre couvert	Eau	Plantations		
Forêt fermée	677,1	0,2	1,4	3,0	1,1	1,7	31,7	0,3	0,0	715,6	26,1
Forêt ouverte	0,0	76,6	0,1	0,0	0,3	0,1	2,7	0,0	0,0	80,7	6,0
Jachères longues	0,5	0,1	3,3	0,1	0,0	0,3	1,6	0,0	0,0	7,9	0,6
Forêt fragmentée	0,2	0,2	0,0	45,5	0,2	0,1	3,9	0,1	0,1	50,3	4,1
Arbustes	0,0	0,1	0,0	0,0	92,0	0,0	7,4	1,7	0,0	101,3	8,2
Jachères courtes	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	36,1	2,4	0,0	0,0	39,4	3,6
Autre couvert	0,4	0,1	0,3	1,5	3,3	4,2	238,7	0,7	0,2	249,3	20,2
Eau	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	4,1	0,0	6,0	0,5
Plantations	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	1,6	1,9	0,2
<b>Total 2000</b>	<b>678,5</b>	<b>77,2</b>	<b>7,4</b>	<b>51,4</b>	<b>97,7</b>	<b>22,7</b>	<b>289,6</b>	<b>7,8</b>	<b>2,0</b>	<b>1221,5</b>	
% de la superficie totale de terres	30,0	6,0	0,6	4,2	7,9	1,0	23,0	0,6	0,2		

Notes: Voir Tableau 46-2.

La déforestation est définie comme la somme de toutes les transitions des classes forestières vers des classes non forestières. Le changement net de la superficie a été considéré comme la différence entre le passage des classes non forestières vers les classes de forêts moins la déforestation. Le taux de déforestation a été estimé à 0,52 pour cent par an, soit 9,2 millions d'hectares par an, pour l'ensemble des zones tropicales entre 1990 et 2000. Il correspond à un changement net de la superficie égal à -8,6 millions d'hectares par an durant cette période (tableau 46-5). Les erreurs types au niveau régional sont relativement élevées, et les différences des taux de déforestation entre les zones géographiques ne sont pas significatives statistiquement au seuil de 5 pour cent.

Les résultats sur les forêts ont été calculés pour les zones écologiques dans l'étude par télédétection, en regroupant les classes de la carte des zones écologiques mondiales de FRA 2000 en trois zones agrégées (voir chapitre 47, figure 46-7 et tableau 46-6):

- forêt tropicale ombrophile (saison sèche inexistante ou courte);
- forêt tropicale humide décidue (de trois à sept mois secs);
- forêt tropicale sèche (plus de six mois secs).

Pour agréger les statistiques pour chaque zone écologique considérée, les unités d'échantillonnage ont été classées en fonction de la zone écologique couvrant la plus

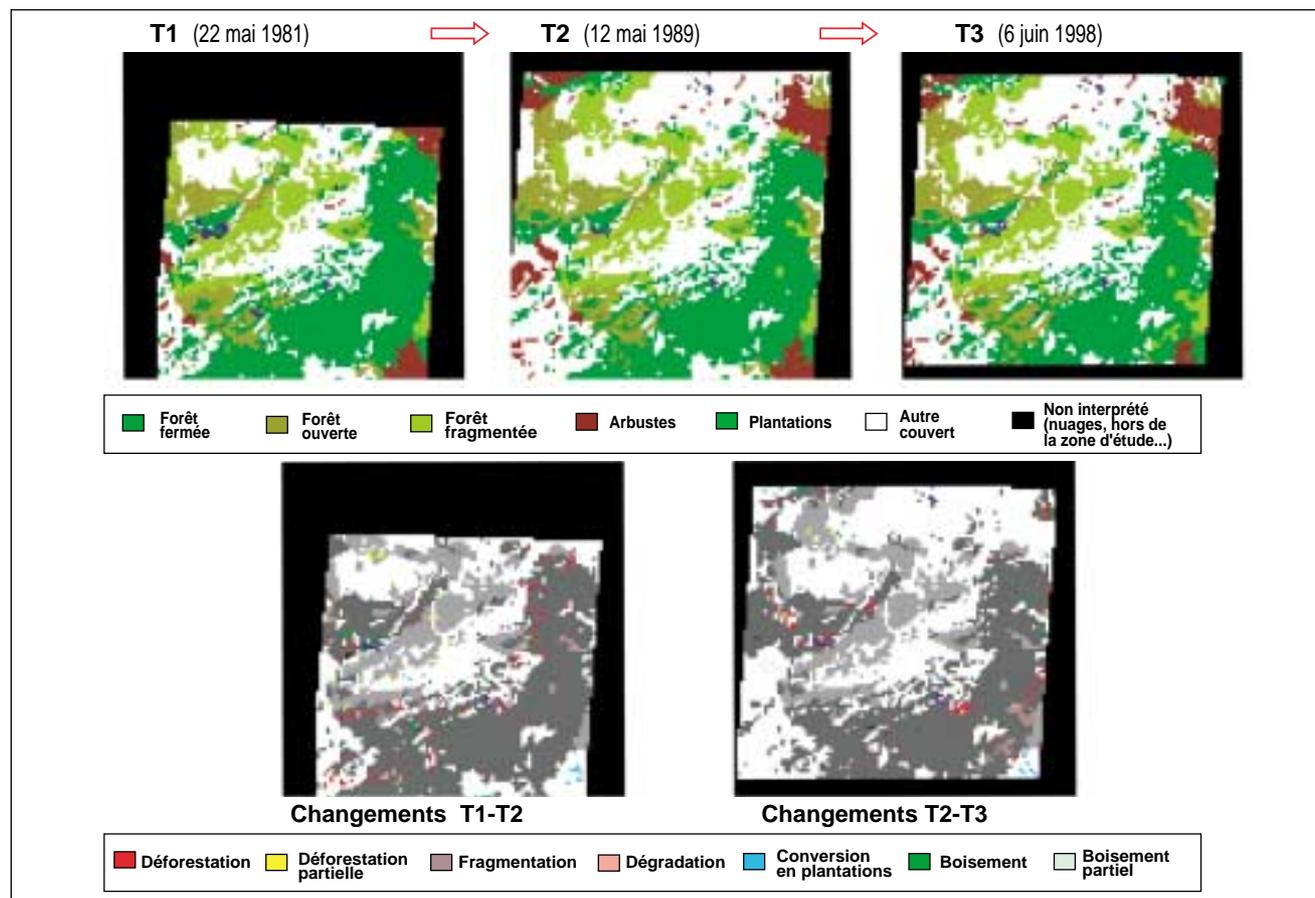
grande superficie, lorsque les unités d'échantillonnages couvraient plusieurs zones écologiques.

La répartition des forêts par zone écologique a montré que les forêts inventoriées se situent principalement dans la zone des forêts tropicales ombrophiles. Les estimations de la déforestation par zone écologique indiquent que la perte de couvert forestier est aussi concentrée dans cette zone écologique.

### Comparaison des changements de la superficie forestière, 1980-1990 et 1990-2000

Les tests statistiques n'ont pas révélé de différence significative au seuil de 5 pour cent, ni au niveau régional, ni au niveau tropical, entre les estimations de la déforestation, pour les deux périodes étudiées (1980-1990 et 1990-2000) (figure 46-8).

En ce qui concerne les zones écologiques, la déforestation dans la zone des forêts tropicales humides décidues est significativement différente entre les deux périodes de l'étude (1980-1990 et 1990-2000) (figure 46-9). Dans cette zone, le changement net de la superficie forestière et le taux de déforestation ont diminué significativement au seuil de 5 pour cent. Pour les autres zones écologiques, les différences pour ces deux paramètres ne sont pas significatives.



Note: Taille du pixel: 2 x 2 km<sup>2</sup>.

Figure 46-5. Résultats d'une unité d'échantillonnage localisée au Zimbabwe: cartes raster obtenues à partir d'une grille de points

### Principaux processus de changement du couvert forestier par région

Les matrices de changement normalisées ont été utilisées pour décrire les principaux processus de changement affectant les forêts et pour quantifier leur importance relative aux niveaux des zones tropicales et des régions. Les processus de changement ont été classés en fonction de la gravité de la dégradation forestière, de la taille de l'activité contribuant à la déforestation, des principaux facteurs responsables du changement et des types d'utilisation des terres. Quatre processus de déforestation ont ainsi été définis:

- **Extension de l'agriculture itinérante dans des forêts non perturbées.** Ce processus a lieu dans des forêts où l'agriculture itinérante ou la dégradation a commencé après 1980. L'impact sur les forêts de l'extension de l'agriculture itinérante est modéré et graduel. Ce processus se traduit par les passages des classes de forêt fermée et forêt ouverte vers la classe de jachères longues, et de la forêt fermée vers la forêt ouverte.
- **Intensification de l'agriculture dans les zones d'agriculture itinérante.** Ce processus se déroule dans les forêts déjà affectées par les pratiques d'agriculture itinérante en 1980. Il est représenté par les zones où l'agriculture itinérante s'est intensifiée (la période de jachère s'est raccourcie) et les zones où l'agriculture itinérante a évolué vers une agriculture permanente, entre les années 80 et les années 90. Pour la présente étude, ce processus inclut le passage de la jachère longue vers la forêt fragmentée et la jachère courte, et de la jachère courte vers la classe «autre couvert».
- **Conversion directe des forêts à une petite agriculture permanente.** Dans ce processus, de petites superficies forestières (moins de 25 ha) ont été converties en terres

Tableau 46-4. Estimation de la superficie forestière par région et pour l'ensemble des zones tropicales en 2000

Région	Superficie forestière			
	Millions d'ha		%	
	Estimation	ET	Estimation	ET
Afrique	519	37	42	3
Amérique latine	780	49	63	4
Asie	272	23	45	4
Zones tropicales	1 571	66	51	2

Notes: ET = Erreur type. Les chiffres se rapportent à la superficie inventoriée, et représentent environ 90 pour cent de l'ensemble des terres forestières des régions tropicales. Les estimations se réfèrent à la définition f3 de la forêt.

Tableau 46-5. Déforestation annuelle et changement net de la superficie forestière entre 1990 et 2000 par région et pour l'ensemble des zones tropicales

Région	Déforestation annuelle millions d'ha/an	Changement annuel net de la superficie forestière millions d'ha/an		Tasa de deforestación %/an	
		Estimation	ET	Estimation	ET
	Afrique	2,3	-2,1	0,4	0,34
Asie	2,5	-2,3	0,6	0,79	0,20
Amérique	4,4	-4,2	1,1	0,51	0,15
Zones tropicales	9,2	-8,6	1,3	0,52	0,08

Notes: ET = Erreur type. La définition f3 de la forêt a été utilisée.

Tableau 46-6. Déforestation annuelle et changement net de la superficie forestière entre 1990 et 2000 par zone écologique

Zone écologique	Deforestación anual millions d'ha/an	Changement annuel net de la superficie forestière millions d'ha/an		Taux annuel de deforestación millions d'ha/an	
		Estimation	ET	Estimation	ET
Forêt tropicale ombrophile	6,0	-5,7	1,2	0,59	0,14
Forêt tropicale humide décidue	2,4	-2,2	0,4	0,43	0,07
Forêt tropicale sèche	0,8	-0,7	0,3	0,38	0,13

Notes: ET = Erreur type. La définition f3 de la forêt a été utilisée.

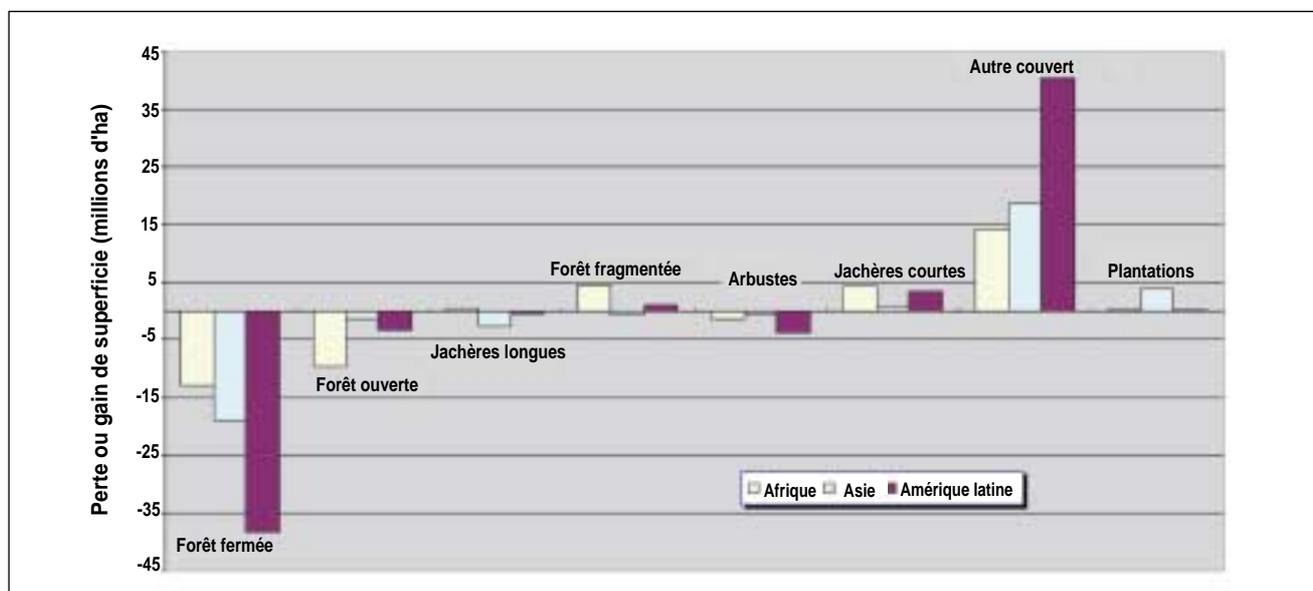


Figure 46-6. Bilan par région des changements nets pour la période 1990-2000 pour chaque classe de couvert végétal

agricoles. Pour la présente étude, ces transitions se traduisent par le passage de la forêt fermée et ouverte vers la forêt fragmentée et la jachère courte, et de la forêt fragmentée vers de la jachère courte ou vers la classe «autre couvert».

- **Conversion directe des forêts à une agriculture à grande échelle.** Dans ce processus de vastes étendues (plus de 25 ha) de forêt fermée, de forêt ouverte et de jachère longue sont converties en «autre couvert». (Ceci peut aussi représenter la conversion plus ou moins simultanée de petites zones contiguës qui, une fois regroupées, occupent une superficie de plus de 25 ha. Ces zones n'ont pas été différenciées des grandes superficies forestières converties uniformément lors de l'interprétation des images satellitaires).

Sur l'ensemble des zones tropicales, la déforestation dans les forêts non perturbées est prédominante et répartie de manière uniforme entre les conversions à l'agriculture à grande et petite échelles. Les variations sur le plan régional (figure 46-10) des processus de changement sont résumées comme suit:

- **Afrique.** Le principal processus de déforestation est dû à la conversion de la forêt pour l'établissement d'une petite agriculture permanente.
- **Amérique latine.** La déforestation est le résultat de la conversion à une agriculture à grande échelle.
- **Asie.** Le principal processus est la conversion directe des forêts vers de grandes zones agricoles, accompagné d'autres processus contribuant aussi fortement à la déforestation.

### Comparaison avec les statistiques de FRA 2000 extraites des rapports par pays

FRA 2000 a réalisé une évaluation indépendante de la situation et l'évolution de la forêt utilisant les informations existantes pour chaque pays. Les résultats des deux études ont été comparés afin d'analyser leurs relations et de trouver

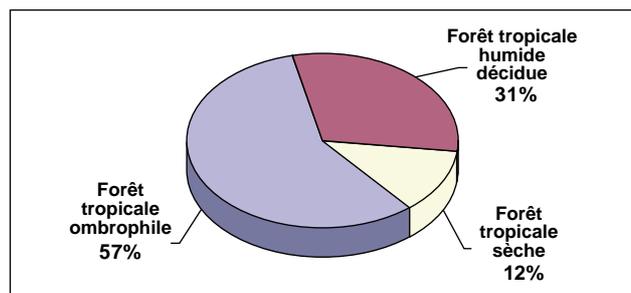


Figure 46-7. Répartition de la forêt par zone écologique (définition f3 de la forêt)

le moyen d'utiliser conjointement les deux jeux de données pour obtenir une estimation intégrée au niveau mondial.

Les deux composantes de l'évaluation diffèrent dans les aspects suivants.

- **Résolution.** Les statistiques des pays ont fourni des estimations à l'échelle nationale, alors que l'étude par télédétection était destinée à produire des informations aux niveaux tropical et régional.
- **Définitions.** Les définitions de la forêt utilisées dans les deux approches étaient voisines sans toutefois coïncider exactement. Les statistiques des pays ont été ajustées à la définition mondiale de la forêt de FRA 2000, basée à la fois sur l'utilisation des terres et sur le couvert végétal, alors que l'étude par télédétection a utilisé une définition homogène du couvert végétal basée sur des critères de photo-interprétation.
- **Couverture géographique.** Les zones inventoriées sont différentes. Alors que l'évaluation basée sur les informations nationales concerne le monde entier, l'étude par télédétection ne couvre que 63 pour cent de la superficie terrestre des zones tropicales, soit environ 87 pour cent des forêts tropicales mondiales. Dans la zone étudiée par l'étude par télédétection, les scènes Landsat ayant moins de 10 pour cent de forêt ont en effet été incluses dans une strate non échantillonnée. De

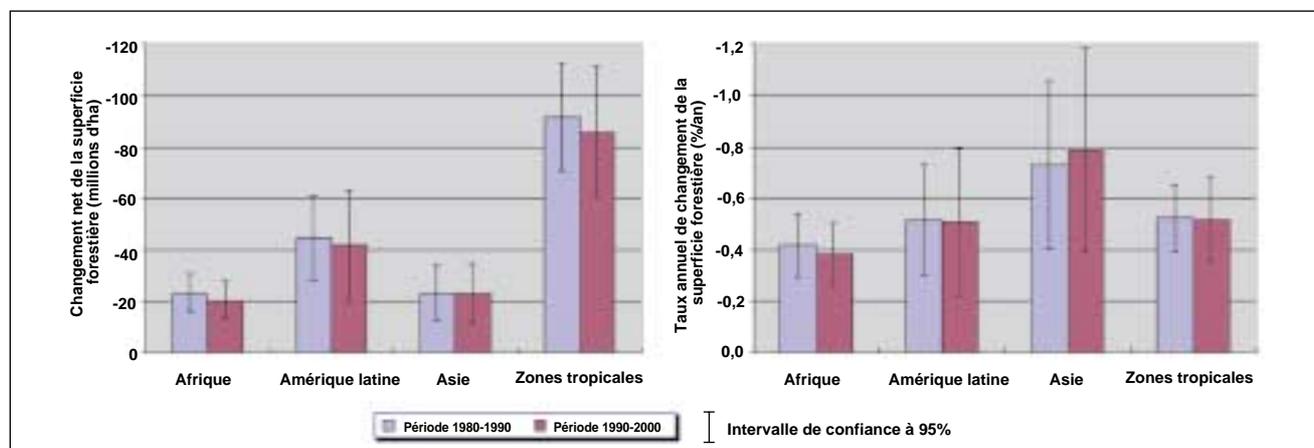


Figure 46-8. Changement net de la superficie forestière par région et pour l'ensemble des zones tropicales, 1980-1990 et 1990-2000 (à gauche); taux annuel de changement de la superficie forestière par région et pour l'ensemble des zones tropicales, 1980-1990 et 1990-2000 (à droite)

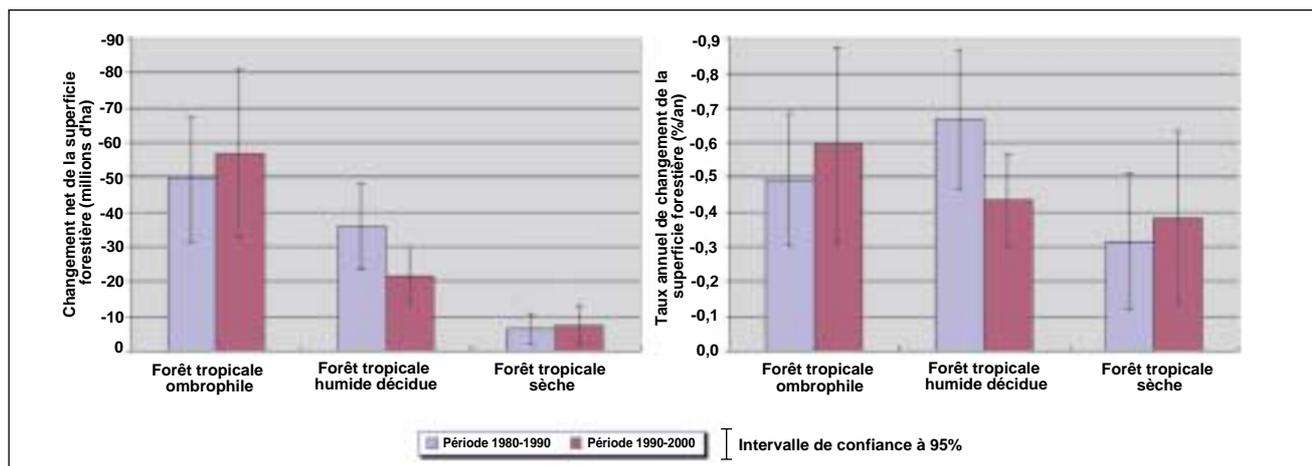


Figure 46-9. Changement net de la superficie forestière par zone écologique, 1980-1990 et 1990-2000 (à gauche); taux annuel de changement de la superficie forestière par zone écologique, 1980-1990 et 1990-2000 (à droite)

même, les clichés Landsat ayant une superficie terrestre inférieure à 1 million d'hectares ont été exclus, alors que les informations nationales couvrent en principe toutes les terres.

- **Techniques de mesure.** Les statistiques nationales sont basées sur un large éventail de données de référence issues d'un grand nombre de méthodes (opinions d'experts, cartes réalisées à partir de l'imagerie satellitaire, échantillonnage et inventaires sur le terrain), alors que l'étude par télédétection repose sur des images satellitaires interprétées et un échantillonnage statistique objectif.
- **Actualité de l'information.** L'étude par télédétection est basée sur des images acquises à des dates proches des années de référence 1980, 1990 et 2000 (avec quelques variations), alors que les informations des pays en développement datent en moyenne de 1994, bien que certaines données nationales soient antérieures ou plus récentes.

Les variations entre les deux jeux d'informations pourraient contribuer aux différences entre les estimations respectives; et par conséquent, il n'a pas été possible d'effectuer une comparaison directe entre les deux. Cependant, l'étude par télédétection a été réalisée dans des conditions relativement bien contrôlées et a utilisé un échantillonnage statistique. Il a donc servi d'outil de calibrage à l'échelle régionale pour améliorer certains résultats généraux concernant les zones tropicales.

Les comparaisons entre les résultats basés sur les informations des pays et les estimations de l'étude par télédétection se sont limitées aux 73 pays couverts par l'étude par télédétection (tableau 46-7). Soixante de ces pays sont couverts par une partie au moins d'une unité d'échantillonnage. Seuls les résultats aux niveaux des sous-régions, des régions et de l'ensemble des zones tropicales ont été considérés (car l'étude par télédétection n'a pas servi à produire des résultats au niveau national) en utilisant la

définition f2 de la forêt (puisque'elle se rapproche le plus de celle utilisée dans les données statistiques des pays).

Les estimations de la superficie forestière issues de l'étude par télédétection sont en général inférieures à celles basées sur les données des pays pour les zones tropicales, pour toutes les régions et pour la plupart des sous-régions. Néanmoins, on observe une bonne corrélation entre les données des pays et les estimations de l'étude aux niveaux des sous-régions et des régions (figure 46-11).

Les estimations du changement de la superficie forestière provenant des deux jeux de données sont comparables pour l'Asie et l'Amérique latine. Par contre, les résultats relatifs à l'Afrique ne le sont pas et la corrélation au niveau tropical est, de ce fait, faible aussi. Les sous-régions contribuant le plus aux disparités entre les deux jeux de données sont l'Afrique de l'Est et l'Afrique australe. Ces différences peuvent être attribuées essentiellement à deux causes.

- **Saisonnalité et conditions écologiques.** Dans les zones sèches, des difficultés se présentent fréquemment dans la classification et l'interprétation de la végétation ainsi que dans la détection des changements à partir d'images satellitaires. Le feuillage dans ces forêts peut être rare, sauf pendant la petite saison des pluies. Dans les formations décidues il est difficile de détecter et d'interpréter la végétation lorsque le feuillage est absent.
- **Contradictions pour quelques pays.** Les données nationales provenant d'un petit nombre de pays – République démocratique du Congo, Soudan et Zambie – ont contribué au fort taux de déforestation en Afrique. Les taux de déforestation pour les unités d'échantillonnage au Soudan et en Zambie étaient très inférieurs à ceux calculés à partir des données nationales. Cette différence n'est pas surprenante, car les unités d'échantillonnage n'étaient pas destinées à fournir des statistiques nationales représentatives et

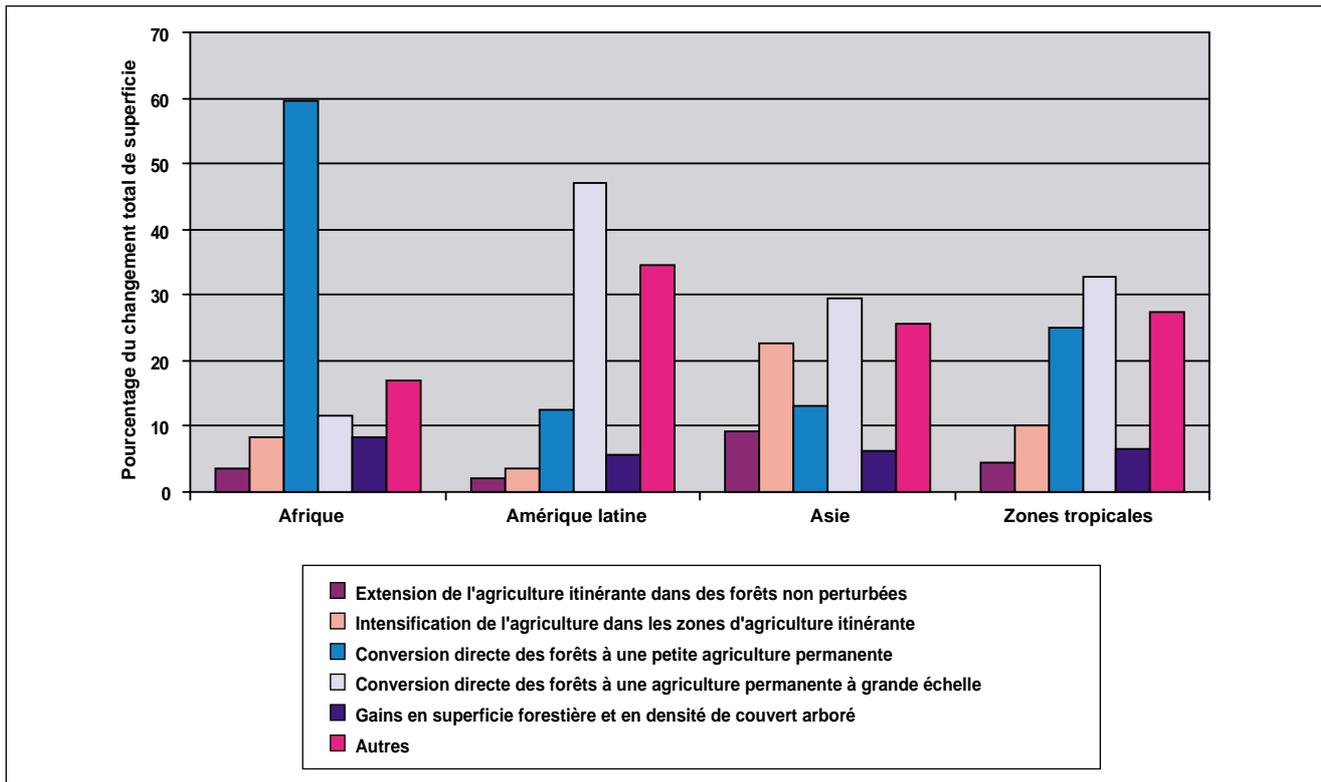


Figure 46-10. Processus de changement en pourcentage du changement total de superficie entre 1990 et 2000, au niveau régional et pour l'ensemble des zones tropicales

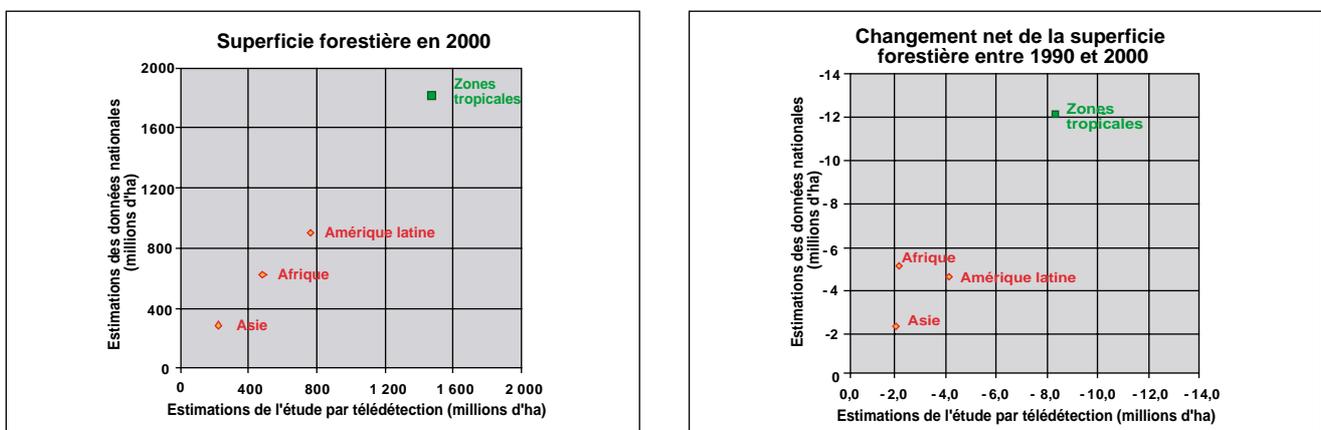


Figure 46-11. Superficie forestière en 2000 (à gauche) et changement net de la superficie forestière (à droite) – Comparaison entre les données des pays et les estimations de l'étude par télédétection

peuvent être situés dans des zones où le taux de déforestation est faible. Il est également possible que les données nationales du Soudan et de la Zambie surestiment la déforestation. Les données de référence pour la Zambie datent de 1978, et celles concernant le Soudan de 1990 et ne couvrent qu'un tiers du pays (zone de production de la gomme arabique). En outre, les estimations du changement ont été produites à partir d'avis d'experts ou d'estimations provenant de pays voisins, en l'absence de séries chronologiques d'informations comparables pour ces deux pays.

## SOURCES D'ERREURS ET IMPACT SUR LES RÉSULTATS

### Erreurs statistiques

Les erreurs statistiques identifiées dans l'étude sont les erreurs d'échantillonnage, les erreurs de mesures, l'absence de certaines valeurs et les divergences entre la population cible et la population échantillonnée.

**Erreurs d'échantillonnage.** L'erreur d'échantillonnage dépend du plan d'échantillonnage et des variations au sein de la population, et elle est quantifiée par l'erreur type. Pour

**Tableau 46-7. Comparaison des estimations de la superficie forestière et du changement de la superficie forestière issues de l'étude par télédétection avec les données nationales (en utilisant la définition f2 de la forêt)**

Région	Superficie forestière 2000 (millions d'ha)			Changement annuel net de la superficie forestière (millions d'ha/an)			Taux annuel de déforestation (%/an)		
	Données nationales	Etude par télédétection	Différence significative	Données nationales	Etude par télédétection	Différence significative	Données nationales	Etude par télédétection	Différence significative
Afrique	622	484	**	-5,2	-2,2	***	0,77	0,43	***
Asie	289	224	**	-2,4	-2,0	n.s.	0,78	0,84	n.s.
Amérique latine	892	767	**	-4,4	-4,1	n.s.	0,45	0,51	n.s.
Zones tropicales	1 803	1 475	***	-12,0	-8,3	**	0,62	0,54	n.s.

**Notes :** Seuls les résultats des pays couverts par l'étude par télédétection ont été compilés pour obtenir les données nationales figurant dans le tableau. L'hypothèse testée dans le tableau est que la valeur des données nationales est la valeur réelle de la population échantillonnée pour l'étude par télédétection. Niveau de signification de la différence entre les données nationales et les estimations de l'étude par télédétection : \*\*\* = niveau de signification de 0,01 pour cent, \*\* = niveau de signification de 1 pour cent, \* = niveau de signification de 5 pour cent, n.s. = non significatif au niveau de 5 pour cent.

chaque estimation réalisée dans l'étude par télédétection, l'erreur type correspondante (ou plus précisément l'erreur quadratique moyenne, puisque les estimations sont des ratios) a été calculée. Certaines de ces estimations d'erreurs ont été présentées dans les sections précédentes.

Les valeurs estimées de la superficie forestière relative et leurs erreurs types sont proches de celles signalées dans FRA 1990 (FAO 1996). Les estimations de la superficie forestière relative en 1980 et 1990 s'écartent légèrement de celles présentées dans le rapport de FRA 1990 et les erreurs types sont un peu plus élevées. L'une des explications de ces différences est la limitation des calculs statistiques à la superficie commune des images pour les trois dates.

Les valeurs estimées du taux de déforestation pour la période 1980-1990 sont légèrement inférieures pour FRA 2000 à celles calculées pour FRA 1990. Cet écart peut s'expliquer par l'utilisation de méthodes de normalisation différentes pour l'ajustement de l'information aux années de référence.

Les erreurs types de l'estimateur du taux de déforestation 1980-1990 sont du même ordre de grandeur (ou plus faibles) que celles signalées dans FRA 1990. Les erreurs types sont un peu plus importantes pour la période 1990-2000. Les différences entre ces erreurs pour les deux périodes considérées peuvent être dues au hasard (une conséquence de l'erreur d'échantillonnage de l'erreur type) ou peuvent indiquer que la variance de la déforestation a augmenté dans la zone inventoriée. Une troisième raison peut résider dans le fait que les statistiques de l'an 2000 sont presque toutes extrapolées, ce qui pourrait amplifier les variations observées.

Les calculs ont montré qu'un nombre relativement limité d'unités d'échantillonnage contribuaient notablement à l'erreur type, ce qui indique une variation importante réelle des valeurs entre les unités, par rapport aux variables étudiées. La stratification et la répartition du nombre d'unités par strate d'échantillonnage sont sans effet sur certaines caractéristiques à estimer: elles garantissent une couverture à peu près proportionnelle à la superficie de la zone inventoriée, mais elles ne sont pas les plus performantes pour estimer, par exemple, les changements dans les taux de déforestation.

Pour quelques strates, la taille de l'échantillon était plus petite que prévu en raison du manque de données convenables pour certains sites (du fait de la forte couverture nuageuse). Quatre unités d'échantillonnage, dont trois appartenant à la même strate, n'ont pu être analysées complètement.

L'estimation de la superficie forestière en 2000 peut être quelque peu améliorée si l'on considère la zone commune entre 1990 et 2000 seulement au lieu de celle pour les trois dates d'observation.

**Erreurs de mesure.** Des études numériques et théoriques non présentées dans ce rapport ont montré que l'influence directe des erreurs de mesure sur les résultats avait une importance mineure.

**Valeurs manquantes.** Certaines valeurs manquent dans l'étude par télédétection de FRA 2000 car certaines parties des scènes sont masquées par les nuages. La présence de nuages peut très bien être corrélée aux pourcentages des différentes classes de couvert végétal, ce qui implique que les valeurs manquantes pourraient fausser certaines estimations.

**Différences entre la population cible et la population échantillonnée.** Les différences entre la population cible et la population échantillonnée existent car la population entière n'a pu être échantillonnée. Dans la présente étude, les scènes contenant de petites superficies terrestres (les zones côtières, par exemple) ont été exclues pour des raisons de rentabilité. La population échantillonnée couvre environ 87 pour cent des terres forestières tropicales. Les scènes exclues sont probablement différentes de celles échantillonnées si bien que les résultats obtenus ne peuvent être considérés valides pour l'ensemble des terres forestières tropicales.

### Précision de l'interprétation

Il est difficile d'estimer la précision des travaux d'interprétation sans des études plus approfondies, contrôles de la qualité et évaluation de la précision. Différents aspects peuvent constituer des sources d'erreur:

- précision de la classification (discrimination entre les classes);
- détection des changements (identification des changements entre deux observations);

- cohérence de l'interprétation et utilisation homogène de la classification entre photo-interprètes;
- erreurs de saisie des données.

Pour plus de détails voir FAO 1996.

### Effets de la modélisation (normalisation)

La procédure de normalisation était justifiée par le besoin d'ajuster les matrices de changement observées aux années de référence 1980, 1990 et 2000. Il n'existe pas de théorie générale pour décrire les effets des erreurs de modélisation. Des études empiriques pourraient aider à évaluer les effets du modèle mais elles n'ont pu être entreprises dans le cadre de FRA 2000. Cependant, certains exemples peuvent élucider l'impact de ces erreurs.

Pour les deux méthodes de normalisation utilisées (constante et linéaire), des erreurs ont pu être introduites dans les matrices normalisées, qui, de ce fait, pourraient ne pas refléter les changements effectifs advenus pendant les périodes de référence. Ce risque est particulièrement important quand la première date d'observation de l'image (T1) est très antérieure à 1980. Par exemple, si la date de l'image T1 est 1974 et celle de T2 est 1991, la superficie forestière en 1980 et la déforestation pour la période 1980-1990 seront sous-estimés si la majorité de la déforestation a eu lieu après 1980. Inversement, en considérant les mêmes dates théoriques d'acquisition, si de grandes superficies ont été déboisées entre 1974 et 1980, le taux de déforestation entre 1980 et 1990 sera surestimé. (Les dates moyennes d'acquisition pour T1 et T2 sont respectivement 1977 et 1989). Le phénomène ne s'applique pas seulement à la déforestation mais à toutes les transitions d'une classe à une autre. Le même cas se présente pour la période 1990-2000 puisque la plupart des images T3 sont antérieures à 2000. S'il y a des changements significatifs dans les deux dernières années environ, ils n'apparaîtront pas dans les séries d'informations ajustées aux dates de référence (1998 est la date moyenne pour les images T3).

Dans de nombreux cas, lorsque les dates d'observation sont proches des années de référence, les deux méthodes d'ajustement produisent les mêmes résultats. Cependant, lorsque les deux matrices de changement observées sont très différentes, les statistiques de l'état en 1990 et les matrices normalisées peuvent différer d'une méthode à l'autre. Cette divergence s'explique par la propriété de prédiction de la méthode linéaire. Par analogie avec une interpolation ordinaire du premier et du second degré, on peut supposer que la méthode linéaire déterminera une différence moins prononcée (en valeur absolue) entre les deux taux de déforestation consécutifs par rapport à la méthode constante. On peut aussi déduire cela intuitivement puisque la méthode constante place toute la différence entre les deux taux à la date T2, proche de 1990.

Les effets d'erreurs d'interprétation «aléatoires» modérées sur les matrices normalisées résultantes ont été

examinés dans une certaine mesure. Ces effets paraissent limités et sans grand risque de propagation de l'erreur. L'erreur initiale est en principe «transformée» d'abord en une erreur annuelle et puis multipliée par le nombre d'années nécessaire pour ajuster la matrice de changement observée. Cela signifie que l'erreur finale est souvent plus petite que l'erreur initiale et rarement plus grande que le double.

## RECOMMANDATIONS TECHNIQUES

### Améliorations statistiques et du plan d'échantillonnage

Les estimations de la superficie forestière de FRA 2000 pourraient être améliorées en éliminant la restriction à la seule zone commune des trois dates d'observation. Les estimations du changement de la superficie forestière pour la dernière période pourraient de même être améliorées en utilisant uniquement la zone commune des deux dernières dates.

Dans la présente étude, des cartes générales de la végétation ont été utilisées pour la stratification de chacune des sous-régions. La répartition est plus ou moins proportionnelle à la superficie de chaque strate et n'est vraisemblablement pas optimale pour estimer les changements dans le taux de déforestation.

La précision des estimations de l'étude par télédétection pourrait être améliorée de deux principales façons: soit en renforçant l'efficacité de l'échantillonnage (en augmentant la superficie de l'échantillon ou par une meilleure répartition des zones échantillonnées, en utilisant par exemple des unités d'échantillonnage plus petites), soit en utilisant des informations extérieures pour avoir un échantillon plus efficace ou un estimateur plus performant. Ci-dessous sont indiquées certaines améliorations possibles.

- Les estimateurs pourraient être améliorés en utilisant des informations collatérales pour un plan d'échantillonnage à deux phases (ou multi-phase). Cela pourrait être testé d'abord à petite échelle (pour une sous-région, par exemple) et avec des données déjà disponibles.
- Les questions de précision et la taille des échantillons pourraient être réexaminées. Ajouter des échantillons permettrait certainement d'améliorer la précision pour certaines caractéristiques importantes.
- La stratification pourrait être révisée, notamment la répartition de l'échantillon. Si la modification de la stratification peut soulever des problèmes, la répartition peut en revanche être changée sans trop de complications.

### Amélioration de la normalisation

Beaucoup de travail a été effectué dans l'étude par télédétection de FRA 2000 pour venir à bout des problèmes inhérents à la normalisation des statistiques aux dates de référence. Cette procédure continuera à représenter un défi

pour l'étude par télédétection pour la prochaine évaluation des ressources forestières mondiales, si l'on entreprend une analyse des changements à partir de quatre dates différentes.

La fiabilité relative des résultats obtenus par toute technique de normalisation, quelle qu'elle soit, est difficile à évaluer puisque des changements réels et parfois spectaculaires peuvent avoir lieu à n'importe quel moment entre les deux dates d'observation consécutives. Les problèmes de fiabilité sont supposés plus graves lorsque les dates d'observation s'écartent beaucoup des dates de référence. Il faudrait donc, de toute évidence, acquérir des images à des dates aussi proches que possible des dates de référence.

## CONCLUSIONS

L'étude par télédétection a rempli ses objectifs en fournissant des séries d'informations détaillées décrivant la situation et l'évolution de la forêt tropicale à différents niveaux d'agrégation pour les périodes 1980-1990 et 1990-2000. L'une des principales réalisations de l'étude a été la production de jeux de données comparables sur les changements des forêts dans les zones tropicales couvrant deux décennies.

En ce qui concerne la précision, les résultats sont comparables avec les conclusions de FRA 1990, et correspondent aux niveaux attendus. Des améliorations dans le plan d'échantillonnage pourraient accroître à l'avenir la précision des estimations du changement de la superficie forestière et la comparaison entre deux périodes.

Les principaux résultats de l'étude par télédétection sont les suivants.

- Le changement net de la superficie forestière a été estimé à -8,6 millions d'hectares par an pour la période 1990-2000.
- Aucune différence significative dans la déforestation n'a été identifiée entre les deux périodes aux niveaux des zones tropicales et des régions, bien que la diminution du taux de déboisement dans les années 90 pour la zone écologique des forêts tropicales humides décidues ait été significativement inférieure à celui de la période 1980-1990.
- Le principal processus de déforestation est la conversion directe des forêts à l'agriculture permanente.
- Les comparaisons avec les données nationales de FRA 2000 révèlent une grande différence statistiquement significative, dans les estimations du changement de la superficie forestière en Afrique pour la période 1990-2000.

## BIBLIOGRAPHIE

- Czaplewski, R.** 1994. *Statistical evaluation of FRA 90 Results*. FAO. Rome.
- FAO.** 1996. *Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change process*. Etude FAO Forêts N° 130. Rome.
- FAO.** 2001. *FRA 2000: Pan-tropical survey of forest cover changes 1980-2000*. Document de travail de FRA N° 49. Rome.
- [www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp](http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp).
- Raj, D.** 1968. *Sampling theory*. New York, McGraw-Hill.