

4. Résultats et discussion

La signification statistique des gains et des pertes bruts annualisés pondérés de superficie forestière et du changement net de superficie forestière a été testée pour les régions et les domaines climatiques en utilisant plusieurs analyses:

- le test de Welch (bilatéral) pour indiquer si les gains, les pertes et le changement net sont différents de 0 (Tableau 3);
- les modèles linéaires généraux pour calculer la pente et la significativité de l'ordonnée à l'origine et de la pente de la régression (Tableau 4);

TABEAU 3
Importance des changements nets annuels et des gains et pertes bruts annuels pour les régions et les domaines

	Changement significatif, 1990–2000			Changement significatif, 2000–2005		
	net	gain	perte	net	gain	perte
Domaine						
Boréal	*	*	*	*	*	*
Subtropical	*	*	*	*	*	*
Tempéré	*	*	*	*	*	*
Tropical	*	*	*	*	*	*
Région						
Afrique	*	*	*	*	*	*
Asie	*	*	*	*	*	*
Europe		*	*		*	*
Amérique du Nord et centrale	*	*	*		*	*
Océanie	*	*	*		*	*
Amérique du Sud	*	*	*	*	*	*
Monde	*	*	*	*	*	*

Note: * indique une valeur significativement différente de 0 ($p < 0,05$) en utilisant le test de Welch.

TABEAU 4
Valeurs de p pour la pente de la ligne formée par un modèle linéaire général reliant le changement annualisé net, les gains et les pertes bruts avec la période d'enquête par région et domaine

	net		gain	perte
Domaine				
Boréal	0.167		0.000	0.001
Subtropical	0.895		0.178	0.009
Tempéré	0.018	↑	0.003	0.417
Tropical	0.000	↓	0.664	0.000
Région				
Afrique	0.000	↓	0.787	0.000
Asie	0.515		0.014	0.122
Europe	0.133		0.646	0.030
Amérique du Nord et centrale	0.027	↑	0.000	0.339
Océanie	0.595		0.438	0.780
Amérique du Sud	0.001	↓	0.928	0.000
Monde	0.001	↓	0.000	0.000

Note: Les différences significatives ($p < 0,05$) entre les périodes d'enquête sont en vert. Pour le changement net, la direction de la flèche indique s'il y a perte (↓) ou gain (↑) net de superficie forestière.

- l'analyse de variance (ANOVA) pour détecter les interactions entre les domaines climatiques et l'année (Tableau 5);
- l'analyse du maximum de vraisemblance restreinte (REML) en tant qu'outil fiable pour évaluer les différences et les interactions en supposant des variances inégales des populations de l'échantillon (Tableau 6).

LA SUPERFICIE D'UTILISATION DES TERRES FORESTIÈRES A DIMINUÉ ENTRE 1990 ET 2005

La figure 9 présente la superficie forestière estimée par région en 1990, 2000 et 2005, et la figure 10 la superficie forestière estimée par domaine pour les mêmes années. La superficie forestière totale en 2005 était de 3,8 milliards d'hectares, soit environ 30 pour cent de la surface émergée du globe. Il y a eu une réduction nette de la superficie forestière mondiale entre 1990 et 2005 de 66,4 millions d'hectares, soit 1,7 pour cent.

PERTES ET GAINS DE FORÊT AU NIVEAU MONDIAL

Au niveau mondial, la réduction brute d'utilisation des terres forestières se chiffre à 9,5 millions d'hectares par an entre 1990 et 2000 et à 13,5 millions d'hectares par an entre 2000 et 2005. Cette réduction a été partiellement compensée par des gains de superficie forestière grâce au boisement et à l'expansion naturelle des forêts de 6,8 millions d'hectares par an entre 1990 et 2000 et 7,3 millions d'hectares par an entre 2000 et 2005. Ainsi, le taux de perte de forêt annuel net a augmenté de façon significative ($p < 0,05$), passant de 2,7 millions d'hectares entre 1990 et 2000 à 6,3 millions d'hectares entre 2000 et 2005 (Tableau 7). Les figures 11 et 12 montrent ces changements par zone géographique et climatique.

DIFFÉRENCES RÉGIONALES DANS LES PERTES ET GAINS DE FORÊT

En Amérique du Sud, une conversion significative des forêts en autres utilisations des terres a eu lieu dans les deux périodes d'enquête: 2,8 millions d'hectares par an entre 1990 et 2000 et 4,3 millions d'hectares par an entre 2000 et 2005. L'Afrique a enregistré des pertes annuelles nettes de superficies forestières statistiquement significatives de 1,1 million d'hectares entre 1990 et 2000 et 2,7 millions d'hectares entre 2000 et 2005.

TABLEAU 5

Test ANOVA pour le changement net annuel de superficie forestière, par domaine et année

Source	Type III SS	df	Carrés moyens	Ratio F	Valeur p
Domaine climatique	1.096	3	0.365	237.686	0.000
Année	0.053	1	0.053	34.678	0.000
Domaine climatique * Année	0.164	3	0.055	35.499	0.000
Erreur	40.162	26 124	0.002		

TABLEAU 6

Résultats REML concernant le changement net annuel par domaine et période d'enquête (1990-2000 et 2000-2005)

Effet	Niveau	Estimation	Erreur standard	df	t	Valeur p
Domaine climatique	Boréal	0.003	0.002	26 123	1.083	0.279
	Subtropical	0.002	0.002	26 123	0.962	0.336
	Tempéré	0.002	0.002	26 123	0.81	0.418
	Tropical	-0.007	0.002	26 123	-2.879	0.004
Année		0.000	0.000	26 123	0.346	0.729
Domaine climatique * année	Année * Boréal	0.000	0.000	26 123	7.217	0.000
	Année * Subtropical	0.000	0.000	26 123	1.638	0.101
	Année * Tempéré	0.000	0.000	26 123	1.667	0.095
	Année * Tropical	0.000	0.000	26 123	-3.069	0.002

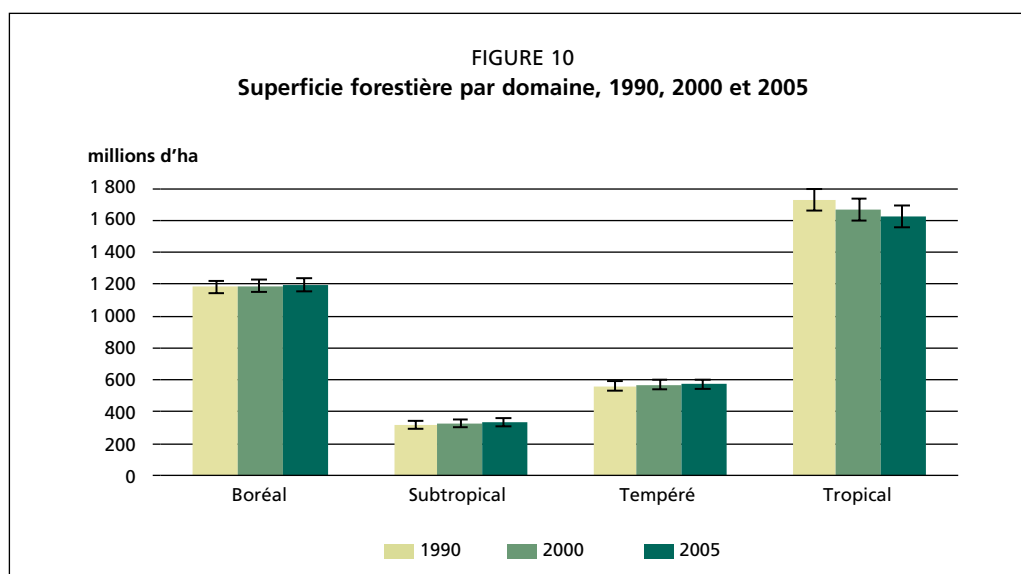
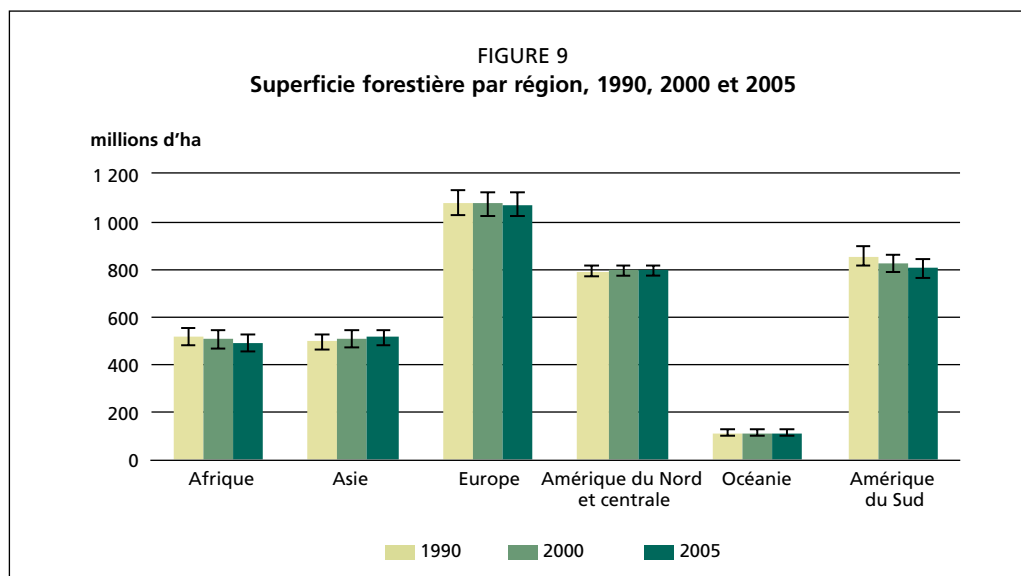


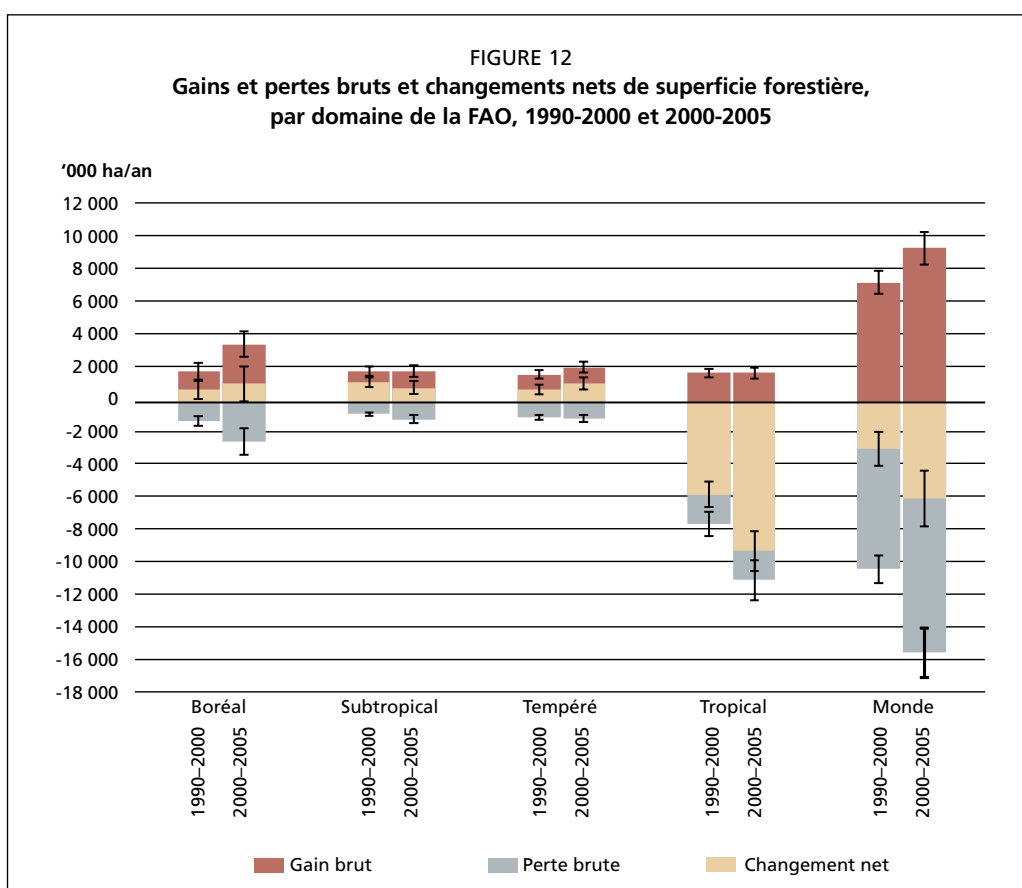
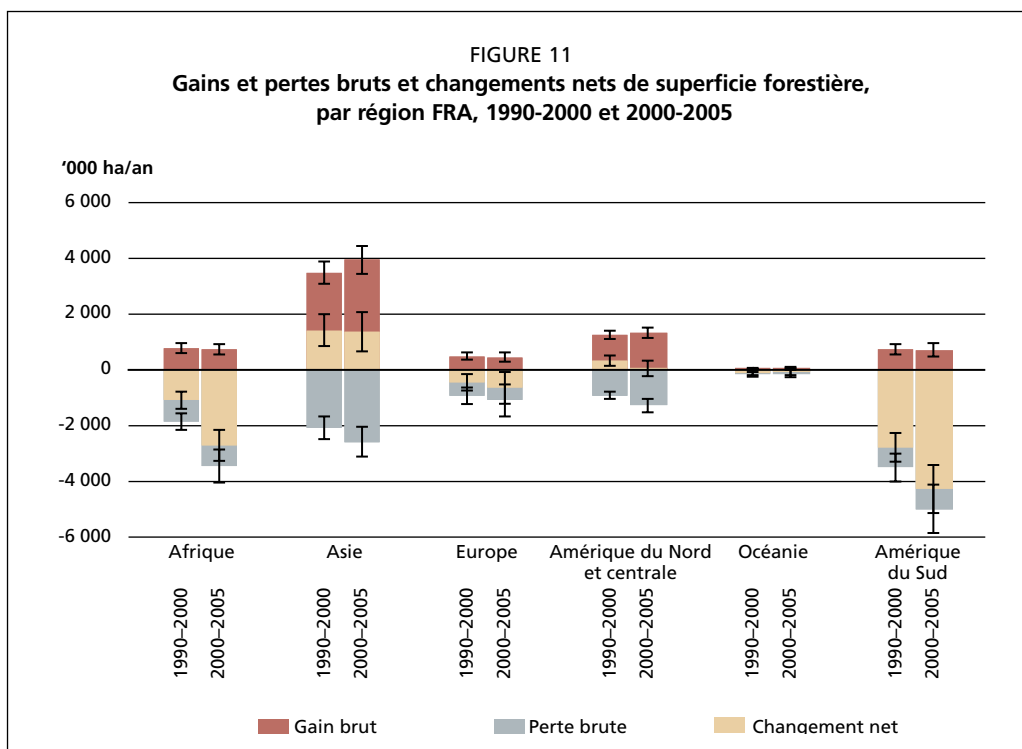
TABLEAU 7

Changement net annuel moyen en superficie forestière et intervalles de confiance de 95 pour cent entre les périodes d'enquête pour les régions FRA et les domaines de la FAO

Région	Changement net moyen ('000 ha)		Intervalle de confiance à 95% ('000 ha)		Intervalle de confiance (%)	
	1990-2000	2000-2005	1990-2000	2000-2005	1990-2000	2000-2005
Région						
Afrique	-1 091	-2 712	306	560	28	21
Asie	1 419	1 367	564	703	40	51
Europe	-437	-638	303	578	69	91
Amérique du Nord et centrale	323	55	190	287	59	522
Océanie	-101	-61	87	136	86	224
Amérique du Sud	-2 779	-4 275	516	863	19	20
Total	-2 666	-6 264	902	1 410	34	23
Domaine climatique						
Boréal	776	1 153	565	1 088	73	94
Subtropical	1 212	902	295	380	24	42
Tempéré	787	1 152	288	364	37	32
Tropical	-5 648	-9 111	775	1 238	14	14
Total	-2 873	-5 904	1 044	1 730	36	29

Note: Le changement net global a été calculé en additionnant les estimations pour les régions FRA.

L'Europe, y compris la Fédération de Russie, a enregistré une perte nette annuelle de superficie forestière statistiquement significative de 0,4 million d'hectares entre 1990 et 2000 et 0,6 million d'hectares entre 2000 et 2005. L'Océanie a enregistré d'importantes pertes nettes annuelles de forêts de 0,1 million d'hectares entre 1990 et 2000 mais, par



contre, aucun changement significatif de superficie forestière entre 2000 et 2005. Il y a eu un gain net annuel moyen significatif de superficie forestière en Amérique du Nord entre 1990 et 2000 de 0,3 million d'hectares, sans changement net significatif entre 2000 et 2005. En Asie, des gains nets annuels moyens de superficie forestière significatifs ont été enregistrés de 1,4 million d'hectares entre 1990 et 2000 et 1,4 million d'hectares entre 2000 et 2005.

C'est dans le domaine tropical que la perte nette de forêt a été la plus élevée pour les deux périodes: 5,6 millions d'hectares par an entre 1990 et 2000 et 9,1 millions d'hectares par an entre 2000 et 2005.

Le domaine tempéré a enregistré des gains nets annuels de superficie forestière significatifs de 0,8 million d'hectares entre 1990 et 2000 et 1,2 million d'hectares entre 2000 et 2005.

Dans le domaine boréal, des gains nets annuels de superficie forestière significatifs ont été enregistrés de 0,8 million d'hectares entre 1990 et 2000 et 1,2 million d'hectares entre 2000 et 2005. Le coefficient élevé de variation dans ces estimations de changement de superficie forestière, cependant, indique qu'il existe un large éventail d'estimations de changement de superficie de forêt pouvant être dû à des problèmes de classification de l'utilisation des terres et du couvert végétal dans cette zone.

Le domaine subtropical a enregistré des gains nets annuels de superficie forestière significatifs de 1,2 million d'hectares entre 1990 et 2000 et 0,9 million d'hectares entre 2000 et 2005.

DIFFÉRENCES DANS LES TAUX DE CHANGEMENT ANNUELS PAR RÉGION ET DOMAINE

Il y a eu une interaction significative entre les domaines et l'année (Tableau 5), ce qui signifie que les différences entre les périodes d'enquête n'étaient pas les mêmes pour tous les types de domaine. Ces différences de taux de changement net de forêt entre les périodes sont significatives dans les domaines boréal et tropical et non significatives dans les domaines subtropical et tempéré (Tableau 6). Le seul domaine qui a enregistré une diminution nette était celui des tropiques, où le changement net annuel est passé d'une perte de 5,6 millions d'ha en 1990-2000 à une perte de 9,1 millions d'ha en 2000-2005.

L'analyse REML du Tableau 6 autorise les corrélations spatiale et temporelle et une variance inégale entre les populations et est plus fiable que l'ANOVA pour l'analyse des données d'enquête. L'analyse REML est utilisée pour diminuer les chances de commettre une erreur de Type 1 lorsque l'on détermine la signification statistique de certains résultats (Picquelle et Mier, 2011).

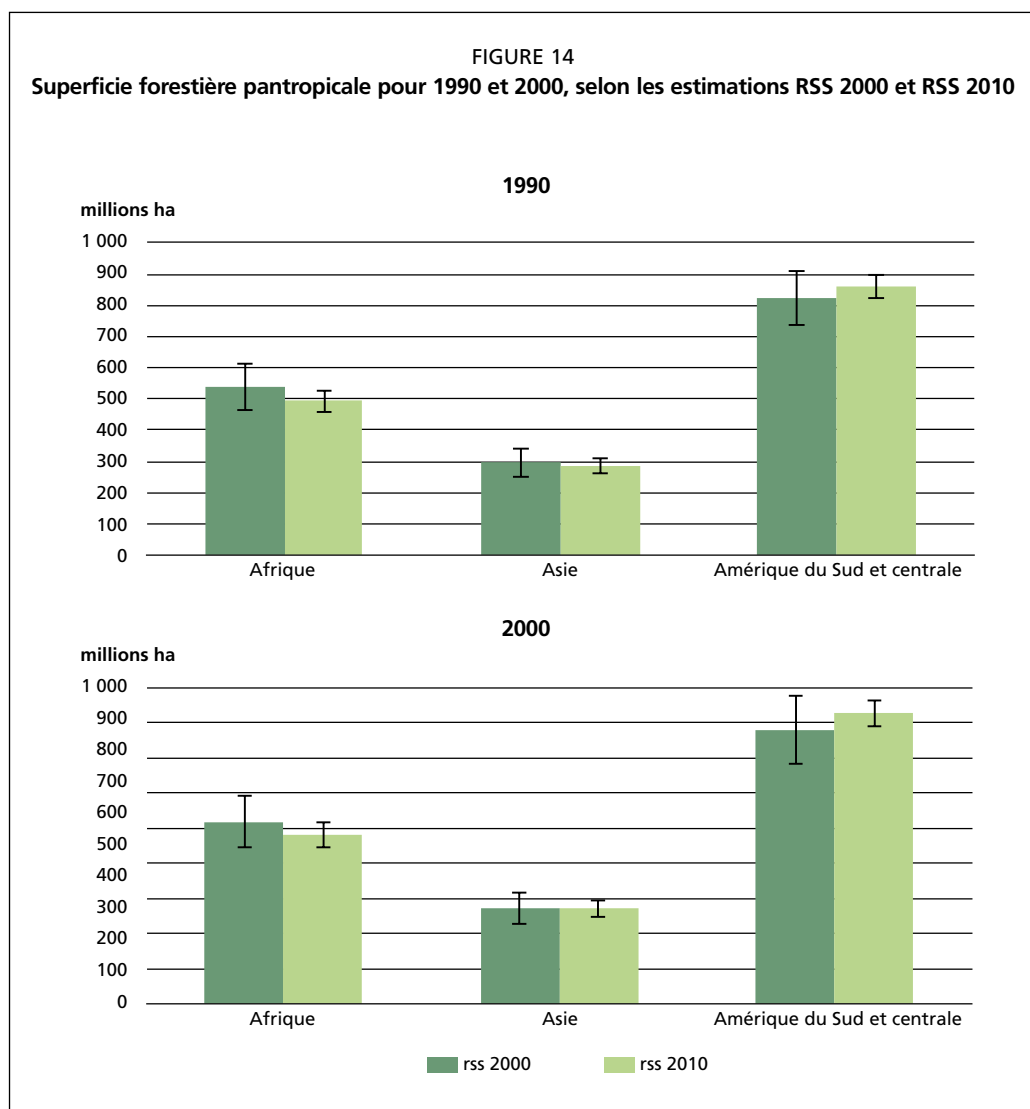
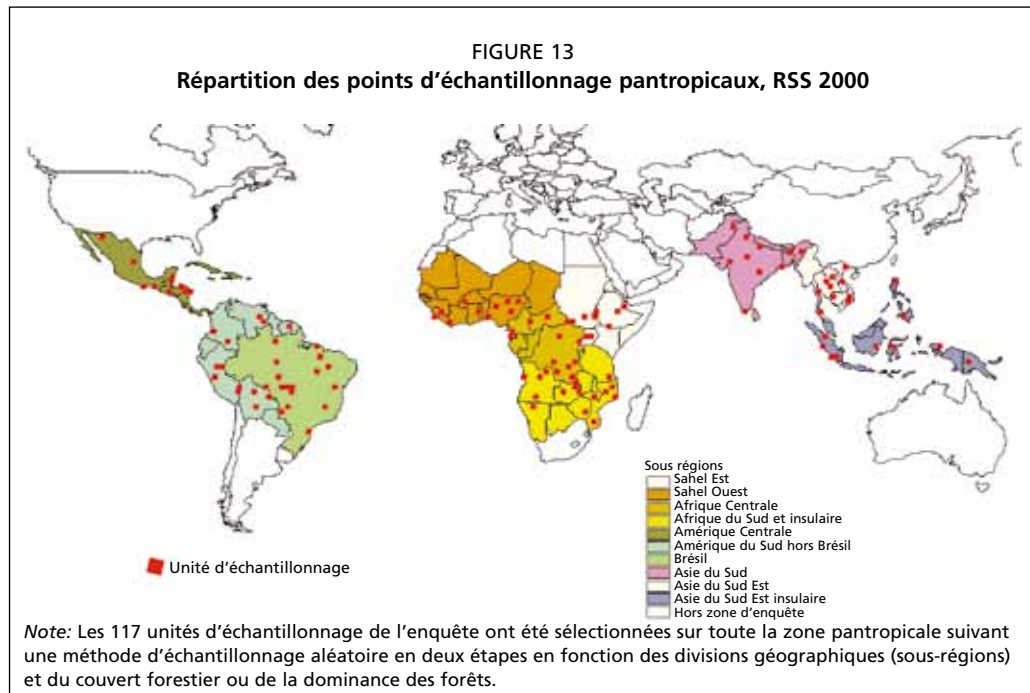
Durant ces dernières décennies, les tropiques ont été considérés comme la principale source de pertes nettes de forêt. Cette étude confirme cette tendance et le fait que la plupart des pertes ont eu lieu en Afrique et en Amérique du Sud (Tableau 7).

COMPARAISON AVEC D'AUTRES ÉTUDES DE LA FAO

Le paragraphe suivant compare les estimations de superficie forestière et de changement de superficie forestière calculées dans ce projet avec celles issues des précédentes enquêtes par télédétection pantropicales de la FAO et celles présentées dans les données tabulaires du FRA 2010 (utilisant les données fournies par les pays).

Comparaison avec les données de télédétection pantropicales de FRA 2000

La FAO (2001) a réalisé une enquête à partir d'une étude par télédétection de la superficie forestière dans les tropiques pour les années 1990 et 2000; la référence à cette enquête se fera sous le nom de RSS 2000. Les données du RSS 2010 ont été compilées en utilisant les mêmes limites géographiques que celles utilisées dans le RSS 2000 (Figure 13), et les estimations de surface forestière, de perte brute et changement net de superficie forestière pour les années 1990 et 2000 ont été comparées (Figure 14).



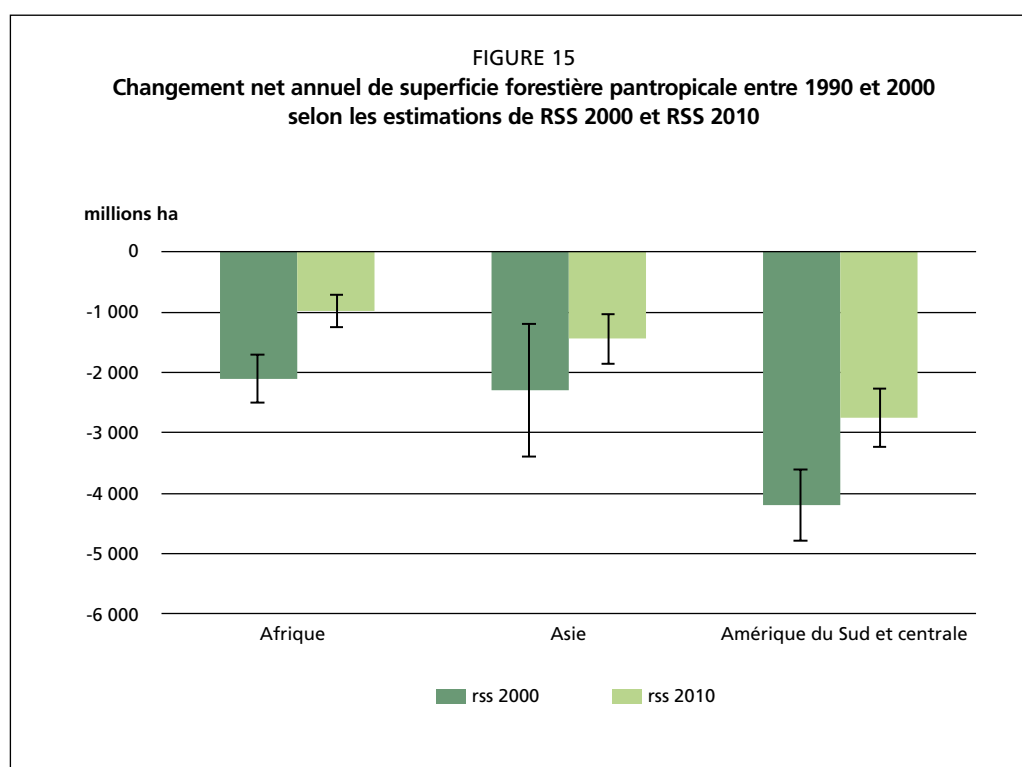
Les estimations de superficie forestière totale et de perte brute pour la période 1990-2000 n'ont pas été significativement différentes ($p < 0,05$) entre les deux enquêtes. La différence entre les estimations de changement net de superficie forestière n'est pas significative en Asie et en Amérique du Sud et centrale entre les deux enquêtes, par opposition à celles d'Afrique significativement différentes ($p < 0,05$) (Figure 15). Le RSS 2000 a ciblé la superficie de couverture forestière et n'a pas pris en compte les échantillons de non-forêt, ce qui peut expliquer pourquoi les estimations de perte nette de forêt sont généralement plus élevées dans le RSS 2000 que le RSS 2010.

Le RSS 2000 se composait de 117 scènes Landsat complètes (représentant une superficie totale d'échantillonnage de 250 millions d'hectares) et, dans la surface qui coïncide avec les deux enquêtes, le RSS 2010 a inventorié 3 631 sites d'échantillonnage (représentant une superficie totale d'échantillonnage de 36 millions d'hectares). L'augmentation du nombre d'échantillons dans le RSS 2010 a permis d'améliorer la précision des estimations par rapport au RSS 2000.

La figure 16 montre une chronologie complète des estimations de superficie forestière tropicale, par région, pour 1980, 1990, 2000 et 2005 provenant des enquêtes par télédétection du FRA. Les estimations pour 1980 ont été calculées à partir du RSS 2000 et les estimations pour 1990, 2000 et 2005 ont été tirées du RSS 2010.

Comparaison avec les tableaux d'inventaire de FRA 2010

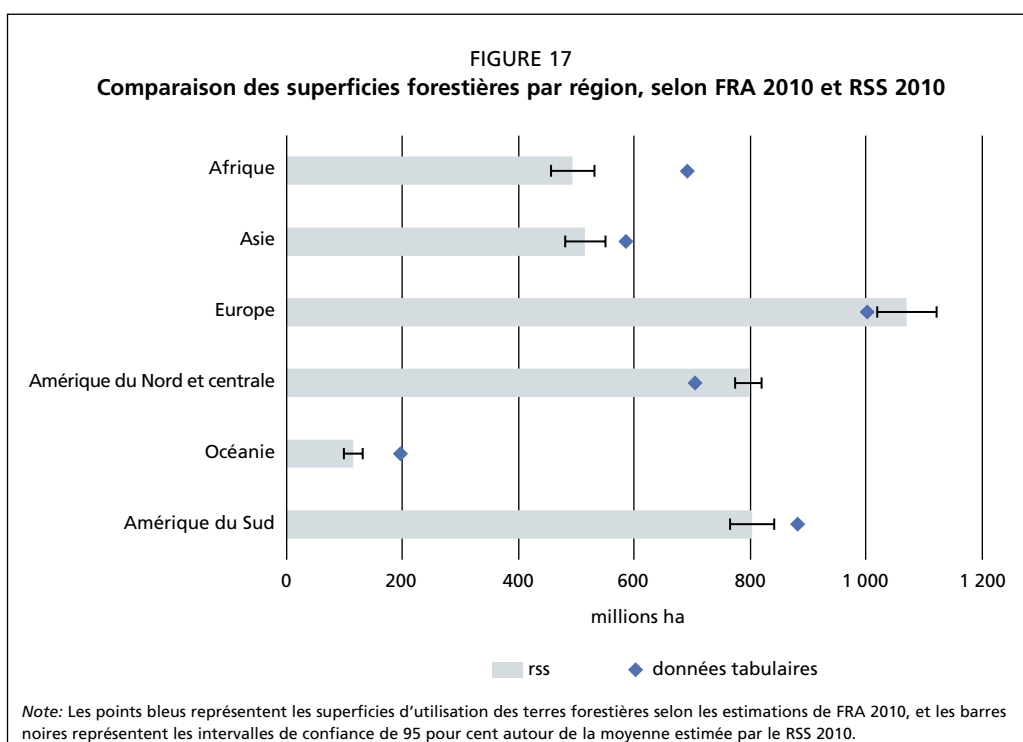
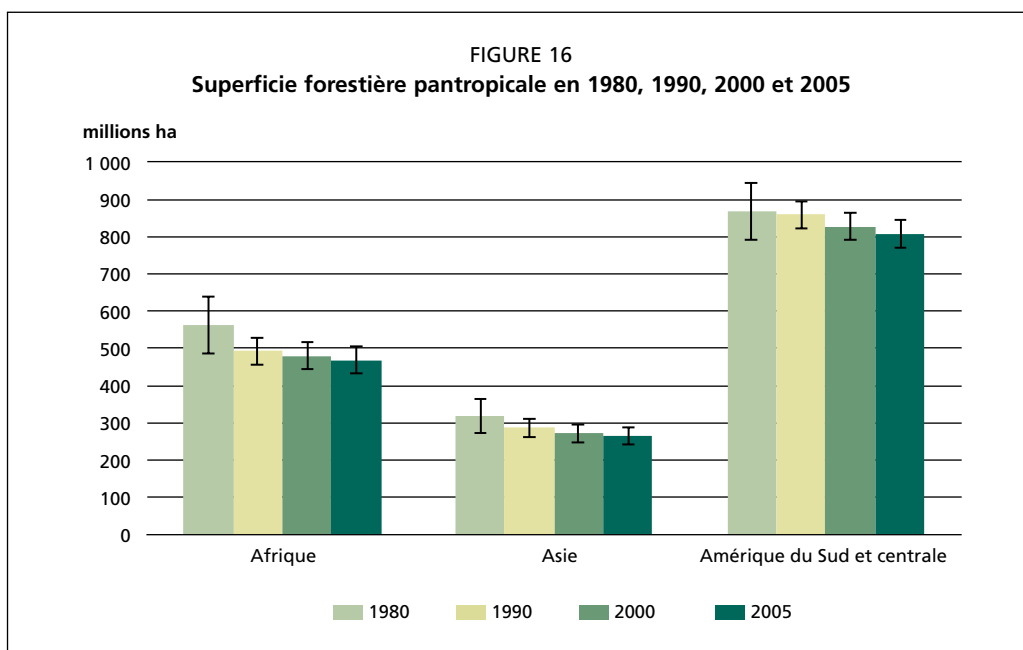
Les estimations de superficie forestière et de taux de changement de RSS 2010 diffèrent de celles présentées dans les tableaux du FRA 2010, à la fois en termes de superficie forestière que de changement annuel de superficie forestière. Les différences entre «l'état» (par ex. la superficie forestière) et la «tendance» (par ex. le changement de superficie forestière) d'utilisation des terres forestières sont complexes. Dans le paragraphe suivant, les différences d'inventaires entre le RSS 2010 et les données tabulaires du FRA 2010 (appelées FRA 2010 ci-après) sont examinées en rapport à plusieurs critères essentiels, notamment la définition de la forêt, les méthodes d'inventaire des deux enquêtes et la qualité globale de l'information reportée.



Différences de superficie forestière

L'estimation de la superficie forestière en Afrique en 2000 est d'environ 200 millions d'hectares (29 pour cent) plus élevée dans FRA 2010 que dans le RSS 2010 (Figure 17). En pourcentage, la plus grande différence est pour l'Océanie, où la superficie forestière estimée en 2000 était de 41 pour cent (81 millions d'ha) plus élevée dans FRA 2010 que dans le RSS 2010. Des différences similaires de superficie forestière ont été observées pour les estimations de 1990 et 2005.

Les différences d'estimations de superficie forestière entre cette étude et FRA 2010 sont probablement dues à des différences de méthode d'enquête et d'inventaire et d'un problème de télédétection découlant de la définition de la forêt. Les méthodes utilisées pour calculer les estimations de FRA 2010 varient selon les pays et incluent l'utilisation

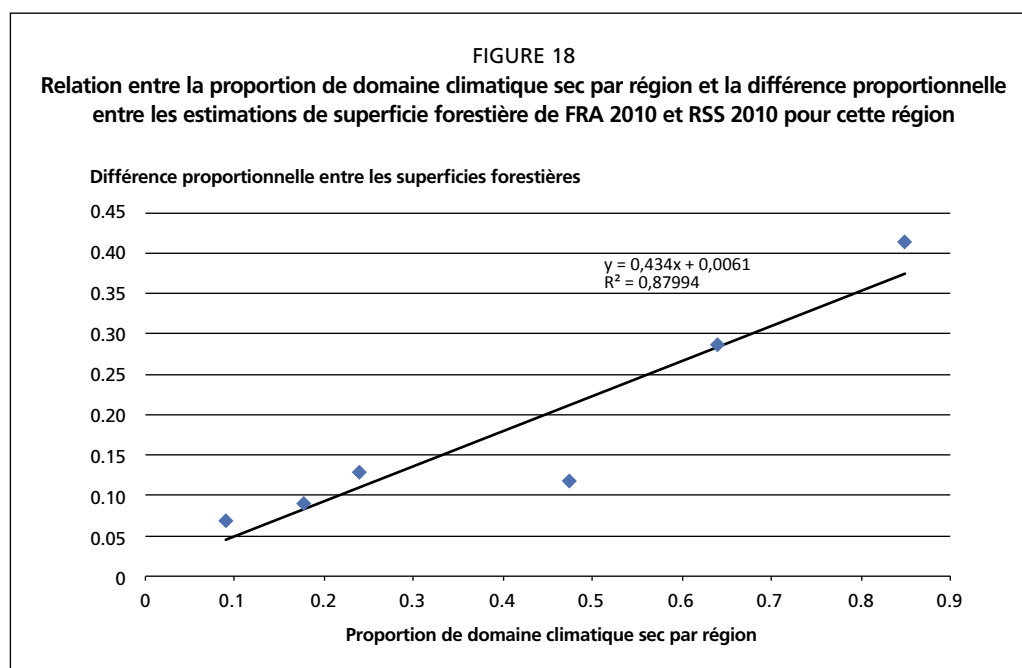


des inventaires forestiers nationaux, des études de télédétection et des avis d'experts. Les questionnaires de FRA 2010 adressés aux pays suivent un modèle standard afin d'améliorer la cohérence entre les données des pays, cependant, les pays inventorient leurs forêts de manière encore inégale conduisant à des incohérences au niveau de l'analyse de l'état et de la tendance. Par exemple, certains pays n'ont pas soumis à FRA des questionnaires complets pour FRA 2010. Pour ces pays, l'état et les tendances de superficie forestière ont été obtenus à partir de sources de données secondaires ou d'inventaires anciens (FAO, 2001). Selon la fréquence et le niveau d'inventaire, les estimations peuvent être obsolètes et de précision inconnue (Matthews, 2001).

L'Afrique possède actuellement les données les plus anciennes de toutes les régions FRA (Ö. Jonsson, Communication personnelle, 2012). L'utilisation d'informations périmées, qui ont nécessité une extrapolation, parfois depuis des décennies, pour produire des estimations pour FRA 2010, contribue à la variation observée entre les estimations de superficie forestière dans les deux études.

La définition de la forêt utilisée à la fois dans FRA 2010 et RSS 2010 se caractérise par un couvert arboré (> 10 pour cent), difficile à détecter en utilisant des images satellite à moyenne résolution spatiale et à délimiter avec précision sur le terrain en autre chose que le niveau de la parcelle. Une surface forestière avec un couvert arboré inférieur à 20 pour cent peut ne pas être détectée de manière fiable à partir d'images satellite à moyenne résolution spatiale telles que les images Landsat. Des études en cours cherchent à déterminer les seuils de pourcentage de couvert arboré classés comme forêt dans le RSS 2010 grâce à l'incorporation d'images à haute résolution spatiale pour certains sites. Une caractérisation plus cohérente des sites de faible couverture forestière pourrait réduire la différence entre les deux méthodes.

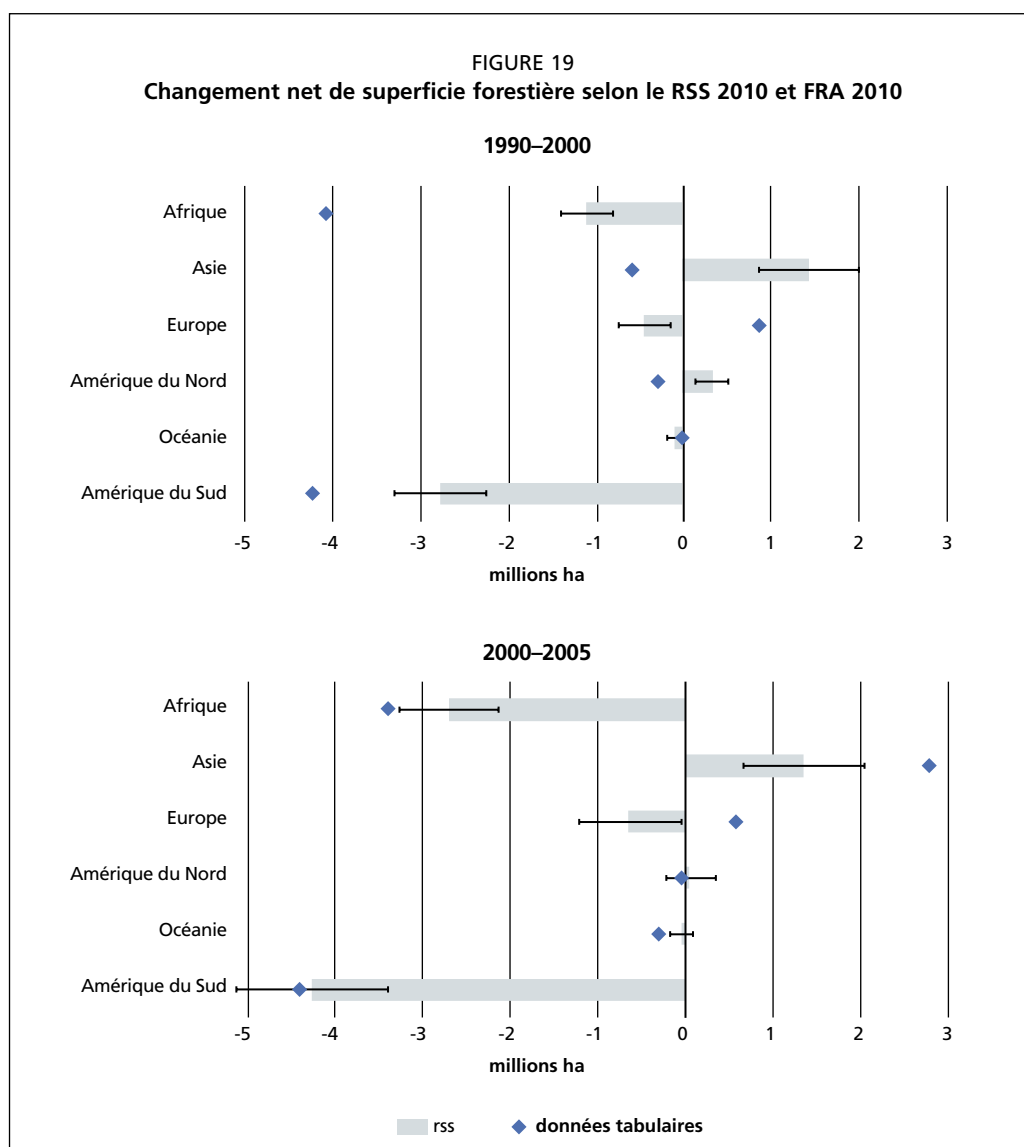
Pour tester la théorie selon laquelle la difficulté à délimiter les forêts à faible couvert arboré (généralement dans les zones de forêts plus sèches) contribue à créer des différences d'estimation de superficie forestière entre le FRA 2010 et le RSS 2010, la proportion de zone écologique sèche par région a été reliée à la différence absolue dans les estimations de superficie forestière. La figure 18 montre un degré élevé de corrélation entre la superficie de terre aride et les différences d'estimations de superficie forestière entre FRA 2010 et RSS 2010; l'incertitude au niveau des estimations de superficie de terre forestière aride peut donc contribuer aux différences d'estimations de superficie forestière.



Différences dans le changement net de superficie forestière

Les estimations de changement net de superficie forestière du RSS 2010 diffèrent de celles de FRA 2010. Le changement net global est beaucoup plus faible dans cette étude (66,4 millions d'ha) que dans FRA 2010 (107,4 millions d'ha). L'ampleur du taux annuel de changement était également différente. Les résultats du RSS 2010 indiquent que le taux annuel de perte nette de superficie forestière serait passé d'environ 3 millions d'hectares pour la période 1990-2000 à 6 millions d'hectares pour la période 2000-2005. FRA 2010, d'autre part, indique une réduction du taux annuel de perte nette de forêt qui serait passé de 8,3 millions d'hectares en 1990-2000 à 4,8 millions d'hectares en 2000-2005.

Les différences d'estimations de changement net entre les deux enquêtes sont dues en grande partie aux incertitudes au niveau des superficies forestières et des changements en Afrique, Asie et Amérique du Sud (Figure 19). Durant la période 1990-2005, le RSS 2010 rend compte d'une perte nette de superficie forestière en Afrique et en Amérique du Sud et d'une augmentation nette de superficie forestière en Asie supérieures aux deux périodes par rapport au FRA 2010. Le RSS 2010 indique une augmentation nette de superficie forestière en Asie dans les deux périodes, alors que FRA 2010 présente une perte nette de superficie forestière entre 1990 et 2000 et un accroissement net entre 2000 et 2005.



Il est à noter que FRA 2010 n'aborde pas spécifiquement la perte de forêt en tant que variable distincte et séparée, les estimations de changement de forêt proviennent plutôt de la différence entre les estimations de superficie forestière au fil du temps. Ainsi, les erreurs d'inventaire de superficie forestière conduisent à des erreurs amplifiées pour les estimations de changement de superficie forestière.

CAUSES DU CHANGEMENT D'UTILISATION DES TERRES

Le type ou la cause du changement d'utilisation des terres n'ont pas été évalués dans cette étude comme prévu initialement. L'attribution par des experts nationaux de types d'utilisation des terres à des classes plus détaillées s'est révélée difficile dans le temps imparti lors des ateliers d'examen et de révision des données. Ainsi, alors que la conversion de l'utilisation des terres forestières à d'autres utilisations des terres, et vice versa, peuvent être analysées facilement, les résultats de RSS 2010 ne précisent pas si les pertes de forêt sont attribuables à certaines utilisations spécifiques (pâturage ou cultures par ex.). De même, les gains de superficie forestière pourraient être dus à une expansion naturelle ou à des forêts plantées.

La littérature scientifique existante peut être utilisée pour mieux comprendre les causes de changement d'affectation des terres forestières. Les résultats de l'enquête ont réaffirmé que les zones tropicales enregistrent la plus forte perte nette forestière mondiale. Gibbs *et al.* (2010) ont ré-analysé les données de RSS 2000 et estimé que l'accroissement net total de superficie agricole entre 1980 et 2000 dans les tropiques a dépassé les 100 millions d'hectares, alors que près de 80 pour cent provenaient de l'utilisation de terres intactes auparavant ou perturbées. Compte tenu de la demande soutenue et croissante en produits agricoles à des fins alimentaires et énergétiques, il est probable que la conversion des forêts des régions tropicales à d'autres utilisations pour la période 2000-2005 soit également principalement due à l'expansion de l'agriculture (Lambin et Meyfroidt, 2011).

Les résultats du RSS 2010 indiquent que la superficie forestière a augmenté dans le domaine tempéré, probablement en raison de l'augmentation des plantations forestières en Asie tempérée. Liu et Tian (2010) notent une forte augmentation (51,8 millions d'hectares) des superficies forestières en Chine en raison du développement des plantations, un processus qui a commencé dans les années 50 et se poursuit aujourd'hui. FRA 2010 a confirmé en partie ces données sur la Chine, signalant une augmentation de superficie forestière d'environ 2,5 millions d'hectares par an – sur un total de 49,7 millions d'hectares – entre 1990 et 2010.

Les résultats du RSS 2010 montrent également une augmentation de la superficie forestière dans le domaine boréal, même si cette augmentation est une surprise et est plus difficile à expliquer. Cette augmentation peut être due à la repousse de la forêt qui a eu lieu sur de grandes surfaces de terres agricoles abandonnées depuis l'effondrement de l'ancienne Union soviétique: Kuemmerle *et al.* (2010) par exemple, estiment le taux d'expansion naturelle sur les terres agricoles abandonnées en Ukraine depuis 2000, à 8 600 hectares par an. Des taux similaires d'expansion naturelle des forêts peuvent être enregistrés sur près de 26 millions d'hectares de terres agricoles abandonnées de la Fédération de Russie, la Biélorussie et le Kazakhstan (Lambin et Meyfroidt, 2011).

Une autre explication possible de l'augmentation de superficie forestière détectée dans le domaine boréal pourrait provenir d'une identification erronée des zones brûlées en tant qu'utilisation des terres non forestières pour la période initiale. Au Canada, une révision largement automatisée des classifications d'occupation des sols a été réalisée en utilisant l'immense base nationale de données sur les feux de forêt du Canada (Stocks *et al.*, 2002) pour identifier les zones brûlées et reclasser *Autre occupation des sols* en *Utilisation des terres forestières* lorsqu'un incendie a été considéré comme étant la cause de disparition des forêts. La base nationale de données sur les feux de forêt du Canada enregistre les feux de plus de 200 hectares et couvre environ 97 pour cent de la superficie

totale brûlée annuellement au Canada (Stocks *et al.*, 2002). L'erreur de labellisation des petits feux en tant qu'utilisation des terres non forestières ou autres disparités entre la détection d'occupation des sols du RSS 2010 et la base nationale de données sur les feux de forêt du Canada pourraient avoir contribué à une augmentation artificielle de la surface d'utilisation des terres forestières comme zones brûlées régénérées.

ÉVALUATION DE LA PRÉCISION

Une évaluation formelle de la précision de la classification d'utilisation des terres n'a pas été effectuée dans le cadre de cette étude. Il est difficile de trouver des sources d'images de plus grande résolution spatiale, de résolution temporelle appropriée ou d'une plus grande fiabilité, en particulier à l'échelle mondiale, contre lesquelles vérifier les labels d'utilisation des terres classés automatiquement et révisés par les experts. Une comparaison des labels d'occupation des sols classés automatiquement avant et après la révision des experts indique un accord global de 77-81 pour cent (Lindquist *et al.*, soumis). Les comparaisons des classifications d'occupation des sols révisées par les experts avec des images satellite de haute résolution pour les sites sélectionnés en Fédération de Russie, ont indiqué que les révisions des experts pouvaient permettre d'obtenir un système de classification dichotomique forêt/autre terre d'une précision de près de 100 pour cent (Bartolev, 2012 données non publiées).

On s'attend, dans la plupart des cas, à ce que l'occupation des sols reflète l'utilisation des terres sous-jacente; le degré de précision obtenu grâce aux méthodes utilisées devrait donc fournir une idée de la précision des estimations globales. Toutefois, les exceptions concernant la généralisation de l'équivalence occupation des sols/utilisation des terres sont importantes et significatives. Il faudra donc s'efforcer à l'avenir de fournir des efforts supplémentaires pour élaborer une méthode d'évaluation de la précision de la classification de l'utilisation des terres.