

# La télédétection et son utilisation dans les Évaluations forestières nationales (EFN)

Barbara Koch<sup>1</sup>

## CE CHAPITRE ABORDE LES THÈMES SUIVANTS :

- Présentation des méthodes de télédétection pour les inventaires forestiers.
- Conditions préalables à l'intégration des données de télédétection dans les EFN.
- Les nouveaux capteurs, tels que le Lidar et les radars.
- Exemples d'applications pratiques.

## Introduction

Ce chapitre traite de l'intégration de données de télédétection dans les Évaluations forestières nationales (EFN) Il permettra de comprendre l'essentiel des modalités de cette intégration, et de mettre en valeur ses aspects importants. Il présentera succinctement les différents systèmes de télédétection, les données produites, les avantages et les inconvénients de ces systèmes, ainsi que leur évolution future.

Les données de télédétection sont utilisées dans les inventaires forestiers depuis longtemps. Les professionnels des forêts ont même été pionniers, après les armées, dans le domaine de l'application de la télédétection aux tâches d'inventaire. Nous entendons par télédétection l'ensemble des instruments aéroportés et spatiaux d'observation de la terre, de la photographie analogique aérienne aux instruments numériques spatiaux, tels que le radar à synthèse d'ouverture (RSO) et les systèmes optoélectroniques. Sont exclus de cette définition les systèmes de positionnement et de navigation satellitaires et

les systèmes de télédétection terrestres, tels que la photogrammétrie terrestre ou le balayage laser terrestre. Cependant, les systèmes de positionnement et de navigation, ainsi que les systèmes de télédétection terrestres, sont de plus en plus importants pour réaliser le sondage et les mesures sur le terrain des échantillons retenus. Il ne faut donc pas les négliger dans une présentation sur l'utilisation de la télédétection pour les EFN, mais comme ils ne font pas partie de la télédétection dans son acception la plus courante, nous n'en traiterons pas dans ce chapitre.

### Contexte et objectif

L'utilisation des données de télédétection dans les EFN vient toujours en complément des mesures sur le terrain réalisées par échantillonnage et être intégrée dans un plan d'échantillonnage basé sur des mesures terrestres. L'intégration des données de télédétection dans les EFN s'inscrit dans un contexte soumis à de multiples facteurs.

<sup>1</sup> Department Remote Sensing and Landscape Information Systems, Faculty of Forest and Environmental Sciences, Albert-Ludwigs University of Freiburg

Les arguments principaux en faveur de leur utilisation sont les suivants :

- Couverture d'une zone donnée en relativement peu de temps
- Réduction des coûts en raison de la diminution de l'intensité de sondage (des données par satellite sont librement accessibles sans coûts supplémentaires)
- Description visuelle d'une situation donnée et de son évolution dans le temps
- Production de données cartographiques
- Accessibilité des informations relatives à des régions du globe inaccessibles ou considérées comme étant difficilement accessibles
- Amélioration des capacités nationales en matière de cartographie, de surveillance et d'établissement de rapports
- Possibilité d'harmoniser les informations d'évaluation existantes à l'échelle de l'ensemble du pays
- Possibilité d'une évaluation rétrospective des changements (évolution de la situation antérieure jusqu'à la situation présente)

Les avantages répertoriés ci-dessus ont conduit à l'intégration des informations de télédétection dans les EFN. Cependant, il existe également des inconvénients qui s'opposent encore aujourd'hui à l'intégration totale des données de télédétection dans les EFN et les inventaires forestiers de manière générale. Alors que la photographie aérienne est largement utilisée dans les EFN réalisées en Europe, dans les pays non européens, l'intégration de données satellitaires dans les EFN est plus courante, même si les EFN sont par ailleurs moins fréquentes dans ces pays. Cela s'explique par la superficie souvent très importante des zones à couvrir et par les barrières logistiques limitant l'acquisition de données aériennes. Les obstacles principaux s'opposant à l'intégration des données de télédétection, et surtout des données spatiales, sont les suivants :

- Disponibilité des données (où trouver les données nécessaires et comment y avoir accès)
- Conditions climatiques
- Perspectives à long terme pour les systèmes spatiaux (disponibilité des données sur de longues périodes)
- Difficultés posées par l'attribution des zones arborées et non arborées aux forêts en fonction de leurs définitions respectives
- Coûts supplémentaires si le plan d'échantillonnage terrestre existant est conservé
- Difficultés posées par la production de l'ensemble des paramètres classiques de la ressource forestière à l'aide de données aéroportées et spatiales
- Manque de formation
- Autorisations de vol pour l'acquisition des données aéroportées

Au vu de l'évolution technologique et du nombre croissant de satellites d'observation de la terre en orbite ces vingt dernières années, il est naturel de supposer que les données de télédétection prendront une importance croissante par rapport à la photographie aérienne pour les EFN. Dans un certain nombre de pays, les données de télédétection spatiales font partie intégrante des EFN. L'évaluation des ressources forestières mondiales (FRA) 2010 réalisée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) intègre désormais pleinement un volet télédétection. Après avoir testé l'intégration de la télédétection spatiale dans les FRA précédentes en mettant l'accent sur les forêts tropicales, la FAO déclare : *“Les données satellitaires permettent la collecte d'informations homogènes partout dans le monde, l'analyse de ces données pouvant être réalisée de la même façon à divers moments, ce qui permet d'avoir de meilleures estimations des changements. La télédétection ne remplace pas la collecte de bonnes données de terrain, toujours nécessaires, mais la combinaison de ces deux techniques donne de meilleurs résultats que l'une ou l'autre employée seule.”* (Évaluation des ressources

forestières mondiales 2010). Ainsi, les données spatiales sont maintenant intégrées dans les estimations des zones forestières et de leurs variations dans le monde entier. Une autre possibilité de source de données télédétections, qu'elles soient aériennes ou satellitaires, est l'accessibilité des images de télédétection collectées pour les cartes Google. Toutefois, si elles permettent effectivement d'utiliser les images cartographiques acquises par télédétection, les cartes Google ne donnent aucune possibilité de traitement des informations des données d'image, par exemple la classification automatique des types de forêt. Ce chapitre a donc pour objectif de fournir des informations sur l'intégration des données de télédétection dans les EFN, en examinant d'abord les facteurs à prendre en compte lors de la préparation générale, les types de données disponibles et les méthodes possibles.

Facteurs à prendre en compte lors de la préparation générale de l'intégration des données de télédétection dans les EFN

Avant de déterminer le type de données de télédétection à utiliser et la manière de les intégrer dans les EFN, il est important de définir les informations que l'on souhaite obtenir à l'aide de ces données, ainsi que les résultats de l'estimation du point de vue des informations et des produits livrés. La définition des paramètres forestiers que l'on souhaite tirer des données, ainsi que des résultats des estimations conditionne en grande partie le plan d'inventaire et les données attendues. Si les paramètres forestiers doivent être dérivés d'inventaires en plusieurs phases, le plan d'échantillonnage doit être conçu avec beaucoup d'attention. Par exemple, si un échantillonnage intégrant des données de télédétection (p. ex. des données satellitaires de très haute résolution) est entrepris et que les données télédétections doivent être réétalonnées sur les données d'échantillonnage terrestre, il sera nécessaire d'effectuer une superposition des relevés terrestres et des échantillons télédétections. Dans tous les inventaires forestiers s'appuyant

sur des données de télédétection, celles-ci servent à effectuer des estimations des surfaces forestières et des variations de celles-ci, opération simple à première vue et déjà couramment pratiquée. Pour répondre à une demande de ce type, un certain nombre de facteurs sont à prendre en considération, et certaines décisions doivent être prises. La première décision concerne le résultat de l'inventaire. Faut-il réaliser une cartographie complète, utiliser une approche par sondage ou une combinaison des deux ? Dans de nombreux cas, c'est l'approche combinée qui est préférable, avec une couverture complète et des données de résolution moyenne ou élevée, telles que les données Modis à 0,5 ou 1 km de résolution spatiale, utilisées dans la FRA 2010, ou des données de résolution élevée, telles que les données Landsat TM, intégrées dans les EFN de la Finlande. Le choix d'une résolution moyenne ou élevée dépend principalement de la superficie à couvrir, du budget disponible, de l'échelle et des autres informations que l'on souhaite éventuellement extraire. Un masque forêt ou une carte d'occupation des sols combinée à un masque forêt sont produits à l'aide des données de couverture complète. Même si les données Modis et Landsat TM sont souvent utilisées pour effectuer une cartographie de couverture complète, d'autres satellites peuvent également être utilisés pour effectuer cette tâche. Le choix du type de capteur satellitaire dépend essentiellement de sa durée de vie. Le tableau 1 montre quelques capteurs satellitaires utilisés pour la surveillance des forêts, tels qu'ils sont présentés dans le document de travail 141 de la FRA (Ridder 2007).

Des informations plus détaillées et mises à jour sont téléchargeables depuis le portail EO (<https://directory.eoportal.org/index.php>). Ce portail fournit également des informations sur les prochaines missions des satellites. Ainsi, la mission Sentinel 2 de l'ASE fournira deux satellites jumeaux produisant des images à haute résolution et à grand champ de vision. Cette mission a été programmée pour avoir une durée de vie longue. Le Brésil et la Chine

**Tab. 1 :**

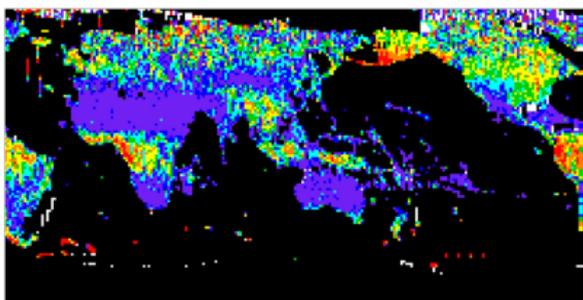
Quelques capteurs satellitaires adaptés pour la surveillance des forêts (source : Ridder 2007)

Image type	Free / low cost	No copy right	Optimised for vegetation	Length of repeat cycle	Available time range	Future sensor continuation
<b>Optical, 5 to 50 m pixel resolution</b>						
ASTER	+	-	+	-(16 days)	2000 onwards	unclear
CBERS CCD + IR-MSS	?	?	+	-(26 days)	2000 onwards	expected
DMC	-	-	+	+(near daily)	2005 onwards	unclear
IRS LISS	-	-	+	-(5-24 days)	1997 onwards	expected
Landsat MSS	+	+	+	-(16 days)	1972-1984	N/A
Landsat TM & ETM+	+	+	+	-(16 days)	1984 onwards, since 05/2003 SLC off	LDCM
RapidEye	-	-	+	+(daily)	2007	unclear
SPOT HRV	-	-	+	-(26 days)	?	expected
<b>Optical, 150 to 1000 m pixel resolution</b>						
CBERS WFI	?	?	+	+(3-5 days)	2000 onwards	expected
IRS WIFS	-	-	+	-(24 days)	1997 onwards	expected
MERIS	?	?	+	+(daily)	2000 onwards	expected
MODIS	+	+	+	+(daily)	2000 onwards	VIIRS
SPOT VEGETATION	+	-	+	+(daily)	1998 onwards	Vegetation 2
<b>SAR</b>						
ERS	-	-	-			
JERS	+	-	+			
RADARSAT	-	-	-			
ENVISAT	-	-	-			
TerraSAR-X	-	-	+/-		To be launched in 2007	unclear
ALOS PALSAR	-	-	+		2006 onwards	unclear

devraient également fournir des satellites à durée de vie longue, tout comme l'Inde et les États-Unis. Lors de la préparation de l'intégration de la télédétection dans les EFN, il faut également tenir compte de la fréquence de réplification du type de capteur choisi. C'est très important, en particulier dans les pays ayant un climat peu favorable. Avant de choisir le type de capteur, il est nécessaire de calculer ou d'estimer la probabilité d'obtenir des images sans nuages, car ce point est critique si les données que l'on cherche à obtenir doivent correspondre à une période de temps donnée. La figure 1 donne un exemple de la fraction nuageuse moyenne probable dans les acquisitions ETM Landsat (Yu et Roy 2007).

À l'avenir, les capteurs fournissant des fréquences de réplification relativement

élevées, telles que le prévoit Sentinel 2, seront particulièrement utiles pour les EFN. La mission Sentinel 2 fournira une fréquence de revisite de 5 jours. Selon une étude de source inconnue basée sur des données Landsat TM simulant une fréquence de revisite de 5,5 jours, la probabilité d'obtenir des images sans nuages augmenterait en moyenne globalement de 30 % par rapport à la fréquence de revisite de 16 jours actuelle. Avec une telle fréquence, seules quelques régions forestières tropicales et sous-boréales présenteraient des problèmes d'acquisition d'images sans nuages sur une période de temps raisonnable avec une fréquence élevée de revisite de 5 jours. Pour ces régions, d'autres capteurs sont nécessaires, tels que des capteurs RSO ou des capteurs optiques avec réplification journalière.



**Fig. 1 :** Fraction nuageuse moyenne dans les acquisitions ETM pour chaque image terrestre en 2002  $0 < \text{violet} < 0,2$ ,  $0,2 = \text{bleu foncé}$   $0,3$ ,  $0,3 < \text{bleu clair} < 0,4 = \text{vert}$   $0,5$ ,  $0,5 = \text{jaune}$   $0,6 = \text{orange}$   $0,7$ ,  $0,7 = \text{rouge} < 1,0$ . (Source : Yu et Roy 2007).

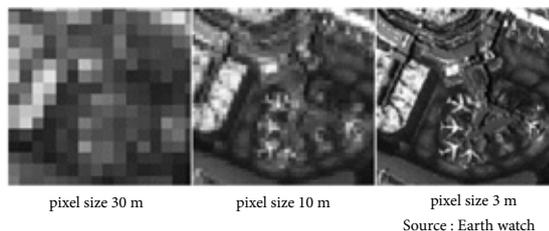
L'époque de l'année a aussi une influence sur la probabilité d'obtenir des images sans nuages. Ainsi, dans de nombreuses régions du monde, l'été et l'hiver sont moins favorables à l'obtention d'images sans nuages que le printemps ou l'automne.

Outre la télédétection spatiale, la télédétection aéroportée peut également être utilisée. L'utilisation des données aéroportées dans les EFN est principalement une question de coût et de faisabilité. Dans de nombreux pays, l'intégration des données aéroportées est impossible du fait des conditions d'autorisation de vol. De plus, dans les pays de grande superficie, il n'est pas possible d'obtenir une couverture totale au moyen de systèmes aéroportés, de sorte que même la production d'un échantillonnage avec des données aéroportées dans le cadre d'un inventaire en plusieurs phases pose des difficultés logistiques.

Les conditions générales ci-dessus ayant été présentées, nous analyserons l'ensemble des capteurs éligibles en fonction de quatre de leurs caractéristiques principales, ce qui permettra d'obtenir la meilleure adéquation entre les capteurs et les exigences en matière d'informations et de cartographie. La façon la plus efficace de sélectionner les capteurs éligibles est à la fois de consulter les organismes qui commercialisent leurs données, et de savoir quelles informations sont requises. Il est toujours avantageux de bien connaître à l'avance la qualité des différentes données satellitaires afin d'avoir une idée des

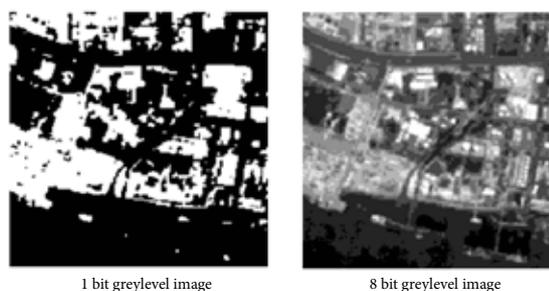
informations qu'il sera possible d'obtenir. Les principaux attributs qui définissent la qualité des images résultantes sont les suivants :

- La résolution spatiale définit le niveau de détail des objets cartographiés.



**Fig. 2:** Exemples de photos avec une taille de pixel différente  
Source : Earth watch

- La résolution radiométrique définit le niveau de séparation des différences selon l'énergie réfléchi. Par exemple, supposons deux surfaces planes de 30 x 30 m chacune qui réfléchissent l'énergie solaire de façon similaire dans la région visible du spectre. Dans l'image en noir et blanc d'un capteur dont la résolution radiométrique est faible, il n'y aura pas de différence entre les deux surfaces, alors qu'il y en aura une dans la même image d'un capteur dont la résolution radiométrique est élevée.



**Fig. 3 :** Résolution radiométrique égale à 1 bits et 8 bits (source inconnue)

- La résolution spectrale définit le nombre de plages du spectre dans lesquelles le capteur peut mesurer l'énergie réfléchi. Par exemple, pour une composante couleur, le capteur doit pouvoir mesurer l'énergie réfléchi dans un minimum de trois plages (bandes) spectrales différentes.

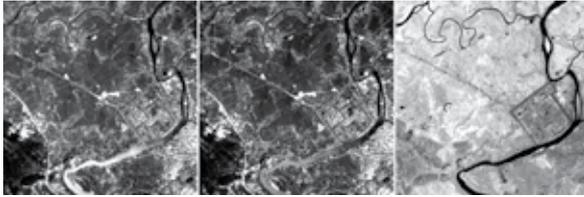


Fig. 4 : Bandes spectrales de Landsat TM (de B2 à B4)

- La résolution temporelle définit la fréquence de réplification du satellite, qui est la séquence temporelle selon laquelle le satellite aura la possibilité éventuelle de répéter l'acquisition des données d'une même surface. Cette fréquence peut être journalière, hebdomadaire, mensuelle, etc.

## Systèmes à capteurs optiques

L'intégration des données provenant de la télédétection dans les EFN concerne principalement les systèmes optiques. La photographie aérienne est depuis longtemps une source d'informations complémentaire, que ce soit pour les EFN ou les inventaires d'entreprise. Définies en fonction des caractéristiques principales ci-dessus, les photographies aériennes ont une résolution spatiale très élevée, une résolution radiométrique élevée et une sensibilité spectrale allant du domaine du spectre électromagnétique visible à celui de l'infrarouge proche (400 nm à 1100 nm). À l'heure actuelle, des appareils numériques aéroportés, en général à quatre bandes spectrales dont trois dans le visible et une dans l'infrarouge proche, ont supplanté les systèmes analogiques antérieurs utilisant des pellicules de film. La résolution temporelle n'est pas un facteur important pour les photographies aériennes, puisque les heures de vol peuvent être programmées plus ou moins sans contrainte. Parce qu'elle permet une plus grande flexibilité d'acquisition des données, la probabilité d'obtenir des images sans nuages par la photographie aérienne est donc plus élevée que par les systèmes optiques satellitaires. La photographie aérienne joue

encore un rôle de premier plan dans les inventaires forestiers, surtout en Europe. Ainsi, dans un certain nombre de pays, les décisions relatives à la nature forestière ou non d'un territoire, et la détermination des variations des surfaces forestières reposent sur la photographie aérienne. Cette utilisation importante de telles données en Europe s'explique sans doute par un usage ancien, leur résolution spatiale très élevée, les relations étroites existant entre les instituts de sondage producteurs de photographies aériennes et l'administration des forêts, le coût relativement élevé des données satellitaires de très haute résolution (encore peu compétitif par rapport à celui des photographies aériennes) et enfin, la plus grande probabilité d'obtenir pour un intervalle de temps donné, des données sans nuages pour la région considérée. Les autres facteurs favorables à la photographie aérienne en Europe sont la relative simplicité d'obtention des autorisations de vol et la taille relativement réduite des unités à cartographier, comparativement aux États-Unis ou à l'Amérique du Sud, par exemple. La photographie aérienne numérique de nouvelle génération favorisera encore certainement davantage l'usage complémentaire des photographies aériennes, en association avec les mesures terrestres, en raison de l'amélioration de leurs caractéristiques radiométriques et spectrales et de l'augmentation des possibilités de traitement des données offertes. Les recherches menées par Hoffman (2010) montrent que des paramètres importants de la ressource forestière, tels que les grands types d'arbres, la présence d'espaces sans arbres ou d'arbres endommagés, ont pu être déterminés par photographie numérique aérienne infrarouge. En revanche, la hauteur des arbres, information pouvant être obtenue par photographie aérienne stéréoscopique, n'est généralement pas utilisée pour évaluer les propriétés supplémentaires que sont les estimations du volume de bois ou de la biomasse aérienne. Dans certains pays, les seules données de télédétection utilisées pour les EFN sont les photographies aériennes.

En Suisse par exemple, le recours à la photographie aérienne permet de diminuer le nombre de placettes d'échantillonnage terrestres nécessaire à une EFN, sans perdre en quantité d'informations ni en précision.

Bien souvent hors de l'Europe, mais également dans certains pays d'Europe, les données satellitaires optiques s'ajoutent aux autres données utilisées lors des EFN. Il s'agit en général non pas de données de satellites à faible résolution mais de satellites à haute résolution comme Landsat TM. Les satellites Landsat sont de loin les fournisseurs d'images les plus utilisés, car la série Landsat offre un coût attractif et une longue durée de vie. Les données satellitaires optiques sont généralement utilisées pour effectuer une cartographie complète, comme dans le cas de l'inventaire finlandais, mais également pour effectuer des cartographies par échantillonnage. Pour ce qui est des 4 caractéristiques de capteur à prendre en compte avant de choisir le type de capteur à utiliser, le critère le plus délicat aujourd'hui est celui de la résolution temporelle des satellites disponibles, les critères de résolution spatiale, radiométrique et spectrale étant satisfaisants pour la plupart des satellites (p. ex. Landsat TM, Spot, IRS). La résolution temporelle est déterminante dans la mesure où les principales régions de forêts sont situées dans des zones à couverture nuageuse importante. Une étude menée en interne par la DLR en Allemagne a montré qu'il faut en moyenne 5 ans pour couvrir le territoire allemand dans son intégralité à l'aide d'images Landsat TM sans nuages. Par conséquent, il est très important d'avoir une résolution temporelle suffisante permettant d'améliorer la disponibilité des données. Les coûts influent également fortement sur le type de données de télédétection à intégrer dans les EFN. En effet, plus la résolution est élevée, plus il sera difficile d'obtenir une couverture complète d'une zone étendue, et plus la réalisation de cette tâche sera coûteuse. La figure 5 illustre le rapport existant entre les zones de couverture pour des images obtenues avec des capteurs différents.

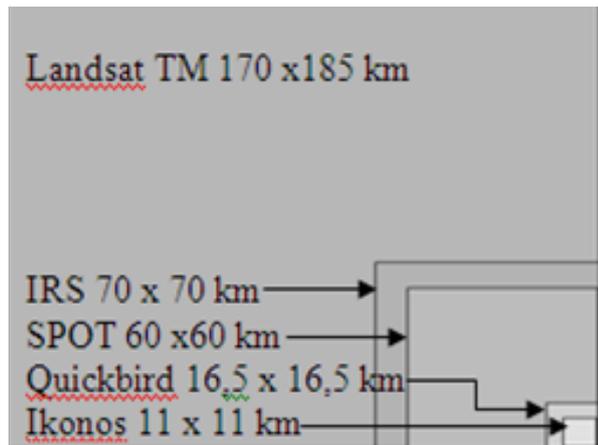


Fig. 5 : Rapport existant entre les zones de couverture obtenues à l'aide de capteurs différents

Dans le cadre d'une EFN, la faisabilité d'une couverture complète en utilisant des satellites à très haute résolution n'est pas avérée en raison des coûts élevés et des problèmes posés par l'obtention d'une couverture complète en un temps raisonnable. Les couvertures complètes sont en revanche utiles pour la stratification et la discrimination forêt - non-forêt (Öhmichen 2007). Les recherches de McRoberts (2002) et de Dees et Koch (1997) montrent qu'une stratification de la zone de forêt à partir de données satellitaires optiques permet soit d'améliorer la précision des estimations, soit de réduire les placettes d'échantillonnage sans perdre en précision. Si la stratification est utilisée, il existe deux approches : la pré-stratification ou la post-stratification. Si la pré-stratification influe sur le plan de sondage retenu, la post-stratification permet de maintenir la précision du plan de sondage existant.

Bien souvent, l'intégration des données de télédétection repose sur une approche en plusieurs phases. Le cas échéant, la classification forêt - non-forêt peut être effectuée à l'aide de données de moyenne résolution, puis des données satellitaires à haute et très haute résolution ou des photographies aériennes sont collectées dans un deuxième temps. Dans le cas d'un échantillonnage, les données utilisées peuvent être des données satellitaires à haute ou très haute résolution ou bien des photographies aériennes. Le choix du type de données dépend principalement

des paramètres de la ressource forestière que l'on cherche à obtenir à partir des données de télédétection. Si l'on cherche à cartographier l'état ou l'architecture de la forêt, ou bien les essences d'arbres, il est nécessaire de recourir à la photographie aérienne ou à des données satellitaires à très haute résolution spatiale, spectrale et radiométrique.

Un certain nombre de recherches ont été menées pour estimer les volumes de bois et la biomasse aérienne à partir de données optiques au moyen de régressions. Il existe un lien entre le signal réfléchi et les variables volume de bois et biomasse aérienne dans l'infrarouge proche, l'infrarouge de courte longueur d'onde, et pour certains indices. Il faut noter cependant que la variance est très élevée, et que la corrélation est d'autant plus faible que le volume de bois et la biomasse aérienne sont élevés. Elle disparaît complètement dans les cas de forêts denses avec d'importants volumes de bois et de biomasse aérienne. Les données de télédétection seront très utiles à l'avenir, surtout dans le domaine de la modélisation de la séquestration du CO<sub>2</sub>, la télédétection étant le seul outil capable de fournir des informations sur l'état et la surface des forêts à l'échelle planétaire. L'utilisation de données satellitaires optiques pour la modélisation de la fixation du CO<sub>2</sub> a été décrite succinctement pour la première fois dans le guide de référence du GOF-C-GOLD (2009). À l'avenir également, les informations concernant la biodiversité auront une importance grandissante dans les EFN. Si la biodiversité est cartographiée, elle devra être différenciée en deux types : la biodiversité structurelle et la diversité des espèces. La télédétection pourra alors fournir des informations pour les deux catégories au niveau paysager. L'identification des espèces se limite à celle des essences d'arbres et des types de peuplement. L'identification des essences s'appuie principalement sur des photographies aériennes dans l'infrarouge proche, tandis que la reconnaissance des types de peuplement peut être effectuée à l'aide de données satellitaires à haute et très haute résolution multispectrale. Il faut noter toutefois que

cette identification a ses limites, en données photographiques aériennes comme en données satellitaires. Outre la ressemblance de la signature spectrale de nombreuses essences, l'âge des arbres est une limitation (les propriétés spectrales des arbres variant fortement avec l'âge), ainsi que la configuration des mélanges d'essences et l'état sanitaire des arbres. C'est pourquoi l'identification des types de forêt est souvent impossible dans les zones tropicales et subtropicales dans lesquelles de nombreuses essences sont très mélangées. De plus, il faut aussi tenir compte de la variabilité de l'exposition des surfaces forestières, qui accroît la difficulté d'identification des essences et des types de peuplement. Il n'existe aucun algorithme de correction permettant de supprimer complètement les variations dues à des degrés variables d'exposition au soleil, mais un bon traitement des données permet d'aboutir à des résultats satisfaisants. De plus, les avancées de la recherche en matière de données hyperspectrales permettent d'améliorer la reconnaissance des types de peuplement et d'essence. En général, la diversité structurelle est plus facilement appréhendée par les données de télédétection. En particulier, la diversité structurelle horizontale peut être assez bien cartographiée, voire même mieux que par des mesures terrestres. La qualité des résultats dépend principalement d'une bonne adéquation entre la résolution spatiale et l'échelle de cartographie demandée pour la représentation structurale (Fig. 6).

Selon les recherches menées à FeLis<sup>1</sup>, la structure de l'habitat d'espèces d'oiseaux peut être modélisée en fonction d'informations relatives à l'architecture de la forêt et au type de peuplement, extraites de données Landsat TM et IRS-1D. La probabilité de la présence d'une certaine espèce d'oiseau a pu être calculée par un test d'adéquation (Hosmer et Lesmeshow 2000) pour un modèle logistique exact correspondant, établi en fonction de

---

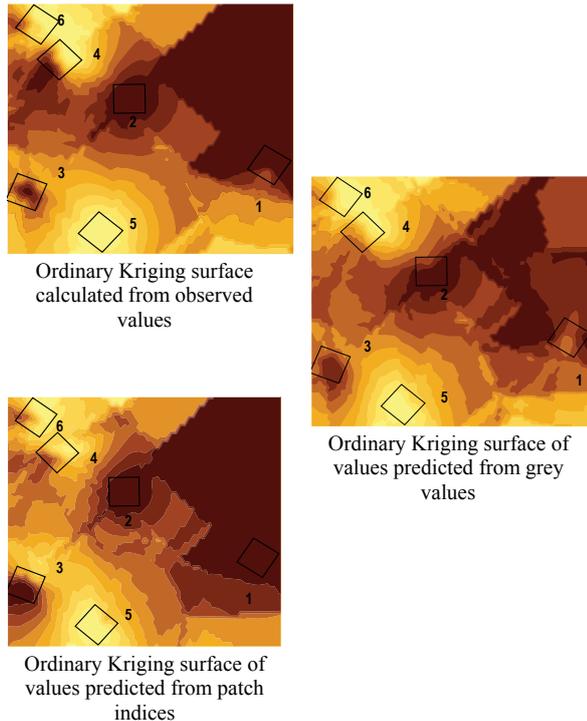
<sup>1</sup> Département de télédétection et des systèmes d'information sur le paysage, université de Fribourg, Allemagne



**Fig. 6 :** Segmentation des surfaces forestières à partir de la fusion d'image IRS-1D et Landsat TM (source : Ivits et al. 2004)

valeurs de gris et d'indices dérivés de valeurs de gris obtenus à partir d'images Landsat TM et IRS-1D ( $C=4,2610$ ,  $P > Khi2= 0,8328$ ) (Herrera 2003). Les résultats indiquent que la probabilité de la présence de ces oiseaux est fortement corrélée aux valeurs de gris dérivées des covariables qui sont incluses dans le modèle. La statistique  $c$  indique que 92,9 % de la probabilité de la présence des oiseaux est déterminée par les covariables en question.

Selon les recherches d'Ivits et al. (2004), les indices d'unités élémentaires du paysage et les valeurs des gris, utilisés pour calculer la présence d'espèces d'oiseaux, sont parvenus à des résultats équivalents. L'analyse de régression logistique a mis en évidence la puissance prédictive des variables de télédétection (Fig. 7). Il apparaît donc que les indices de télédétection peuvent être des indicateurs très utiles de diversité spécifique des oiseaux lorsque les espèces d'oiseaux sont étudiées individuellement, mais moins dans le cadre de l'étude de groupes d'espèces.



**Fig. 7 :** Exemple de surface spatiale de krigeage ordinaire de résultats de régression logistique ; les données observées et calculées à partir des valeurs des gris et des indices d'UEP de l'image Quickbird ont été utilisées comme données d'entrée du modèle ; les surfaces plus foncées indiquent une forte probabilité de présence de l'espèce, tandis que les surfaces plus claires indiquent une forte probabilité d'absence.

## Données RSO et de scanner au laser

### Données RSO

Si en toute vraisemblance, les données de télédétection optiques revêtiront une importance accrue pour les EFN à l'avenir, les applications des données RSO resteront probablement limitées, en raison de la grande complexité du traitement des données radar et des limites de cette technologie en région montagneuse. L'avantage principal des données radar réside dans la transmission du signal au travers des nuages, ce qui favorise l'indépendance des données par rapport aux conditions climatiques. Les données de bande L rendent la discrimination forêt - non-forêt assez aisée et permettent d'évaluer de manière satisfaisante les changements du couvert forestier (Håme et al. 2009), même

en utilisant des procédures de classification automatisées. Les données de bande C et de bande X permettent également d'interpréter les zones de forêt sur l'image obtenue (Fig. 8).

Cependant, l'utilisation des données radar est fortement limitée en région montagneuse en raison de problèmes d'ordre radiométrique et géométrique. Même s'il existe un certain nombre d'algorithmes de correction, l'ombre du radar et les variations d'intensité de la rétrodiffusion radar en fonction de l'angle d'incidence ne peuvent pas être totalement corrigés, ce qui limite l'utilisation des données radar dans les EFN, même pour la discrimination forêt - non-forêt. L'extraction de paramètres de la ressource forestière à partir de données radar est difficile à effectuer et ne donne pas de résultats cohérents. Il existe des algorithmes et des modèles ; encore à l'état expérimental, ils ne peuvent pas être intégrés aux EFN dans la pratique. Des travaux considérables ont été entrepris pour utiliser des données radar pour réaliser des évaluations de la biomasse aérienne (Koch 2010) ; cependant, les études ne s'appuient pas sur des essais robustes et ne s'appliquent pas spécifiquement au domaine des forêts et de l'acquisition de données. Les évaluations de la biomasse aérienne réalisées au moyen de données radar sont limitées par la saturation atteinte dans les zones de forêt à volume de bois ou biomasse aérienne importante.



**Fig. 8 :** Image TerraSAR du nord de Munich chromocodée. Données acquises le 26 juin et le 7 juillet 2007, 5 : 26 UTC, résolution : 3 m, mode : Stripmap, polarisation : VV et HH (source : DLR, Allemagne)

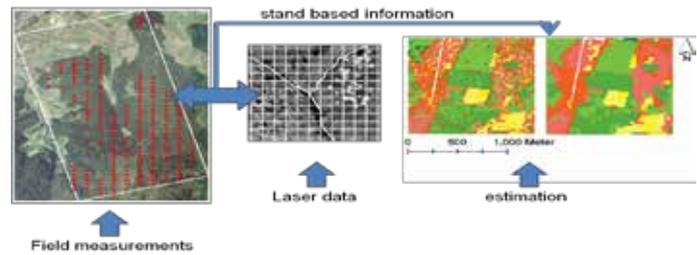
Néanmoins, dans les zones de forêt à biomasse aérienne peu importante comme dans les régions boréales ou sous-boréales, des estimations fiables sont possibles. En résumé, les données radar peuvent parfaitement être intégrées aux EFN dans la mesure où certaines conditions environnementales sont satisfaites, telles que les données de zones planes à vallonnées et les données d'une biomasse aérienne relativement faible par rapport au volume de bois. De nouvelles recherches semblent indiquer que le problème de saturation pourrait être minimisé. Il s'agit donc uniquement d'un problème de recherche. Nga (2010) écrit que les données de bande L et de bande P à polarisation croisée sont les plus sensibles à la biomasse aérienne, comme l'ont déjà montré d'autres auteurs (LeToan 1992, Kurvonen 1999). En particulier, la bande P à polarisation croisée pourrait être très utile lors de la modélisation de la biomasse aérienne (Henderson et Lewis 1998), en raison du lien existant entre la rétrodiffusion en polarisation croisée dans la bande L et la bande P et la diffusion volumétrique, elle-même corrélée à la biomasse aérienne. La saturation peut être réduite avec de plus grandes longueurs d'onde, mais selon Nga (2010), elle reste problématique dans les forêts caractérisées par une biomasse aérienne supérieure à 200-250 Mg/ha. À notre connaissance, l'identification des essences et des types de peuplement est impossible à partir de données radar. Même la distinction forêt de feuillus - forêt de conifères n'est pas très fiable. Compte tenu des limites et de la complexité du traitement des données radar, ainsi que de l'absence de séries de données de longue date, l'intégration des données radar dans les EFN ne semble guère faisable à l'heure actuelle. L'utilisation de systèmes aéroportés est possible bien que fort coûteuse et peu d'organismes commerciaux offrent ce type de données qui permettraient d'intégrer des données radar aéroportées dans les EFN.

## Données laser

L'utilisation de données laser dans les inventaires forestiers a connu un certain

essor ces dernières années. Quoique toujours en phase expérimentale pour la plupart, des projets pourraient s'avérer très intéressants sur le plan de leurs applications pratiques pour les inventaires forestiers (Næsset, E., 2004, McRoberts 2010). L'utilisation des scanners laser aéroportés (SLA) pour des applications forestières constitue probablement l'innovation la plus remarquable de ces dix dernières années dans le domaine de la télédétection appliquée aux inventaires forestiers. Le potentiel énorme des données SLA provient essentiellement de la possibilité de modéliser la surface et le sol de la forêt à partir d'un ensemble de données unique. Ces données permettent également d'évaluer l'architecture verticale de la forêt. L'extraction d'informations exactes relatives à la hauteur des forêts permet de modéliser plusieurs paramètres importants de la ressource forestière. La hauteur est une variable d'entrée qui se prête presque aussi bien à la modélisation de paramètres importants de la ressource forestière, comme le volume de bois et la biomasse aérienne, que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP). Le DHP et la répartition du DHP sont des variables qui peuvent toutes deux être évaluées à partir de la hauteur. Il existe deux approches de modélisation des paramètres de la ressource forestière. La première est une approche de zone et convient aux données de faible densité (Fig. 9) ; la seconde est une approche par pied d'arbre et requiert des données de densité élevée, c'est-à-dire 8 à 10 points par m<sup>2</sup> pour obtenir des résultats satisfaisants. De nombreuses recherches ont été menées sur ce thème. Hyppä et al. (2009) donnent une synthèse exhaustive de l'état des données SLA pour les inventaires forestiers.

Les approches de zone peuvent être effectuées à partir d'une analyse de régression, d'une analyse kNN ou en employant les méthodes des tables de production. Elles sont décrites en détail par Straub et al. 2009. Selon les recherches menées par Latifi et al. (2010), l'utilisation d'informations obtenues au



**Fig. 9** : Schéma d'une approche de zone visant à estimer les paramètres de la ressource forestière

moyen de lasers donne de meilleurs résultats que les données Landsat TM et que les photographies aériennes en ce qui concerne l'estimation de paramètres importants de la ressource forestière, tels que le volume de bois et la biomasse aérienne (Tab. 2). Outre les estimations fiables des volumes de bois et de la biomasse aérienne qu'elle permet d'obtenir, l'approche de zone au moyen de données laser permet également de déterminer, avec un degré élevé de qualité, d'autres paramètres dont l'importance est grandissante dans les EFN, tels que la densité des houppiers et l'architecture de la forêt, indicateurs de biodiversité forestière. En revanche, l'identification des essences ou des types de peuplement demeure pratiquement impossible. Même s'il existe divers moyens de distinguer les feuillus des conifères, les données laser ne permettent pas de réaliser une identification plus poussée des essences ou des types de peuplement, et ce malgré certaines recherches probantes utilisant des informations géométriques et physiques obtenues à partir de données de laser aéroporté pour identifier les arbres (Heinzel and Koch 2011, Vauhkonen et al. 2010, Hollaus et al. 2009, Höfle et al. 2008). Les résultats ne permettent pas encore une application opérationnelle dans une EFN. Au cours des dernières années, l'approche par pied d'arbre a fait l'objet d'un intérêt accru dans les inventaires forestiers. Certaines études montrent que l'intégration d'informations recueillies sur un échantillon de pieds d'arbres est particulièrement utile pour la planification de la gestion, de la récolte et de la protection écologique des peuplements matures. La délimitation des pieds d'arbre pose des difficultés, la qualité des résultats étant

fonction de la qualité des données, des types de peuplement et des algorithmes utilisés. Dans le cadre du projet WoodWisdom (Fig. 10), des chercheurs ont comparé plusieurs algorithmes dans différents types de peuplements (Vauhkonen et al. 2010). Alors que les différents algorithmes fonctionnent de façon quasi identique, le problème principal reste le type de peuplement. Les taux de détection étaient bien meilleurs dans les peuplements résineux que dans les peuplements feuillus pluristratifiés.

Les lasers étant des systèmes aéroportés, les données laser ne peuvent être intégrés aux EFN que dans le cadre d'un inventaire en plusieurs phases réalisé à partir de placettes de sondage. Le seul système embarqué sur satellite, IceSat/Glas, est hors service. Il ne fournit du reste que des données à caractère expérimental. Le système satellitaire Lidar prévu ne sera opérationnel que dans quelques années. Pour ces raisons, les données laser ont une application limitée dans les pays de grande superficie. Dans le cadre d'inventaires en plusieurs phases, par contre, elles fournissent des informations très intéressantes sur de nombreux paramètres de la ressource forestière évalués lors des EFN. L'utilisation de données Lidar permettra de réduire le nombre de placettes de sondage terrestres nécessaire et/ou la précision. Les informations extraites de ces données sont certainement

plus intéressantes sur le plan de l'extraction de données forestières que les autres données de télédétection. Cependant, les données ne sont pas encore standardisées. Elles sont aussi plus coûteuses que les photographies aériennes, ce qui est une contrainte importante pour l'intégration des données Lidar dans les EFN aujourd'hui. Dans de nombreux pays, il est difficile d'utiliser des données Lidar compte tenu du nombre insuffisant d'entreprises fournisseurs et des restrictions de vol. Elles présentent par ailleurs l'inconvénient de fournir insuffisamment d'informations sur les essences d'arbres. Par conséquent, des recherches plus poussées dans le domaine des lasers sont nécessaires. Elles doivent étudier des approches de capteurs multiples sur plateforme unique. Ainsi, les systèmes laser combinés à des scanneurs multispectre ou les systèmes Lidar à longueurs d'onde multiples sont des options à envisager. Des recherches plus poussées dans le futur pour une meilleure exploitation des informations matérielles et pleine onde, comme l'intensité, sont également nécessaires.

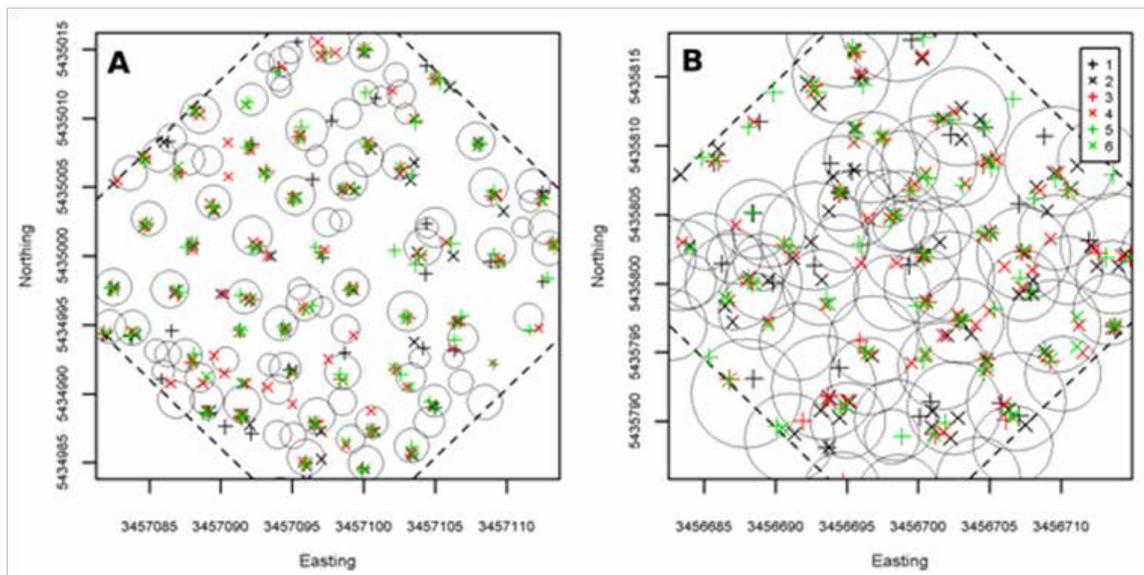
## Traitement des informations

L'exploitation des informations provenant des données de télédétection peut grandement varier. Dans de nombreuses applications

**Tabla 2 :**

ET, ET% et biais% du volume de bois sur pied et de la biomasse aérienne à l'échelle de la parcelle estimés à partir de données d'images IRC, Landsat TM et LiDar pour différentes méthodes d'imputation (source : Latifi et al. 2010)

	CIR image			TM image			LiDAR data		
	RMSE	RMSE%	Bias%	RMSE	RMSE%	Bias%	RMSE	RMSE%	Bias%
<b>Euclidean distance</b>									
Volume	154.31	58.65	1.93	142.73	54.25	-2.91	119.61	45.46	0.75
Biomass	95.49	56.92	1.79	88.43	52.71	-2.80	74.46	44.38	0.30
<b>Mahalanobis distance</b>									
Volume	145.76	55.40	2.65	158.74	60.33	1.68	127.55	48.48	2.42
Biomass	89.15	53.14	2.28	97.37	58.04	1.71	79.60	47.45	2.56
<b>MSN</b>									
Volume	145.54	55.32	0.57	148.40	56.4	-0.33	98.411	37.40	0.72
Biomass	92.55	55.16	2.09	90.68	54.05	-3.39	61.59	36.71	1.94
<b>RF</b>									
Volume	109.21	41.51	-1.84	117.12	44.51	-1.48	54.438	23.97	-1.97
Biomass	65.01	38.75	-3.16	69.90	41.66	-3.31	37.32	22.24	-2.44



**Fig. 10 :** A- Peuplement résineux et B- Peuplement feuillu pluristratifié (Allemagne) Les nombres de 1 à 6 représentent les différents algorithmes

pratiques, l'interprétation visuelle des images convient le mieux pour extraire les informations nécessaires. Dans le cadre de la FRA 2010 et de l'initiative REDD, l'interprétation des images est utilisée pour identifier la zone de forêts, les changements de surface, ainsi que la dégradation des forêts. Cependant, elle est d'un coût élevé et elle est subjective. Ses résultats dépendent fortement de la formation des interprètes et se prêtent mal à la comparaison. La classification en zone de forêt est elle-même subjective dans la mesure où le repérage des contours de forêts n'est pas toujours évident. Bien entendu, les évaluations terrestres ne sont pas non plus à l'abri d'interprétations subjectives.

Pour la classification, on préfère utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique, principalement pour des raisons d'efficacité et de standardisation des procédés. Même s'ils ne sont pas plus exacts que ceux obtenus par interprétation, les résultats sont transparents. Un certain nombre de systèmes d'analyse d'images sont bien connus. Les systèmes fondés sur **la distance minimale, le maximum de vraisemblance et les réseaux neuronaux** sont utilisés depuis de nombreuses années. La méthode la plus simple est celle de la distance minimale, qui calcule uniquement les distances vectorielles

spectrales les plus courtes dans l'espace multidimensionnel fondées sur la moyenne des classes d'entraînement, tandis que la méthode du maximum de vraisemblance calcule la probabilité statistique (de Bayes) d'appartenance d'un pixel à une classe donnée, fondée sur la moyenne des vecteurs et les covariances des classes d'entraînement. Pour cela, on fait l'hypothèse d'une distribution gaussienne, chaque classe étant supposée équiprobable (NASA 2010). Cette hypothèse de distribution gaussienne est souvent peu réaliste pour les valeurs de gris. Les réseaux neuronaux ne sont pas tellement utilisés dans la pratique, dans la mesure où ces systèmes d'analyse d'images demandent une puissance informatique considérable, sans que leur supériorité n'ait été démontrée. Les algorithmes des réseaux neuronaux sont censés reproduire les structures neuronales du cerveau. Partant d'un ensemble de données d'entrée, ces algorithmes apprennent par comparaison avec des classifications réelles connues, les résultats des comparaisons servant de nouvelles données d'entrée, capables de modifier l'algorithme du réseau autant de fois que nécessaire (Zhang et al. 2000).

Dans les années 90, les algorithmes de classification orientée-objet (Lillesand et al.

2008) ont fait l'objet d'un intérêt croissant. Ils se fondent sur une approche en deux temps. La première étape consiste à effectuer une segmentation en fonction des propriétés de réflectance (couleur), de texture et de forme. La combinaison de valeurs spectrales et le contexte peuvent également être pris en compte. Il s'agit d'établir une classification hiérarchique en objets selon l'échelle optimale attendue. La phase de segmentation est suivie de la deuxième étape consistant à classer les segments. Dans de nombreux cas, on utilise le système d'analyse d'images du **Plus proche voisin** (McRoberts 2011), semblable à celui de la distance minimale. Ce système s'appuie sur les distances spectrales multidimensionnelles. Il existe également le système de classification fondé sur des **fonctions d'appartenance floue**. Ce système tente de tenir compte des pixels mixtes. Ce dernier tente de tenir compte des pixels mixtes, en calculant une fonction d'appartenance pour chaque pixel et en déterminant sa probabilité d'appartenance à l'une ou l'autre classe (Nedeljkovic 2004). Le logiciel de classification orientée objet le plus fréquemment utilisé est eCognition. Les systèmes d'analyse d'image du type **Machines à vecteurs de support** et **Forêts aléatoires** sont relativement nouveaux. Ils sont actuellement au centre de l'attention de la communauté scientifique. Ils permettent tous deux de parvenir à de bons résultats de classification dans les domaines de l'occupation des sols et des forêts. Il a été démontré que les machines à vecteurs de support (MVS) étaient mieux à même de traiter des espaces d'attributs à dimensionnalité élevée et des problèmes de discrimination en classe complexes que les autres méthodes (Heinzel et al. 2010, Mountrakis et al. 2011). La classification MVS est une technique d'apprentissage statistique non paramétrique supervisée, qui ne nécessite pas de poser d'hypothèse relative à la distribution des données sous-jacentes. C'est l'avantage principal de ce système d'analyse. Il correspond toujours à une discrimination en deux classes dans un espace d'attributs multidimensionnel. Les discriminations en

classes multiples peuvent être effectuées par division du problème en problèmes à deux classes, combinés de diverses manières. Le système MVS vise à rechercher de manière itérative l'hyperplan minimisant les erreurs de classement à partir des exemples d'entraînement. La classification Forêts aléatoires repose sur de nombreux arbres de décision individuels. Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage supervisé capable de traiter un grand nombre d'attributs, d'exécution efficace sur des ensembles de données de grande taille. Quel que soit le nombre des attributs et des exécutions, ce système d'analyse ne sera pas confronté à un surapprentissage. Il a fourni des précisions élevées pour de nombreuses classifications (Klassen et Paturi 2010). Selon Latifi et al. (2010), le système d'analyse Forêts aléatoires a de meilleures performances que le système MVS pour la classification des attributs de forêt. Il présente l'avantage d'évaluer les classifications lors du traitement. Le système forêts aléatoires utilise des « amorces », qui sont des échantillons pris dans l'ensemble des données d'entraînement. Il génère des arbres de classification parallèles, et tire un échantillon aléatoire de variables à chaque nœud. Il réalise la division la plus performante, l'arbre croissant le plus possible. L'arbre ayant le taux d'erreur le plus faible est ensuite choisi comme système d'analyse le plus performant.

Outre les systèmes d'analyse présentés plus haut, l'estimateur du **Plus proche voisin (kNN)** est une méthode très efficace d'utilisation des données de télédétection, permettant de générer des informations de couverture complète lorsqu'elle est utilisée en association avec les placettes de sondage. La méthode kNN est utilisée de manière performante lors des EFN en Finlande (Tomppo 2002). Cette méthode repose sur une régression entre les caractéristiques spectrales des pixels d'image de zones pour lesquelles on dispose de mesures de terrain et des pixels d'image pour lesquels on n'en dispose pas. En s'appuyant sur des mesures de distance de Mahalanobis ou euclidiennes d'un nombre  $k$  de voisins les plus

proches, les pixels sans informations de terrain se voient assigner les informations de terrain des pixels qui leur correspondent le mieux. Les informations provenant des mesures de terrain sont ainsi transmises aux zones sans informations de terrain. Dans le domaine de la foresterie, de nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation de la méthode kNN avec différents types de capteurs. L'utilité de la méthode kNN a été éprouvée, mais le type de données selon les capteurs utilisés et le type de peuplement influent considérablement sur les résultats (Latifi et al. 2011).

## Observations finales

Avec ce bref exposé, nous ne prétendons pas avoir donné un tableau complet de l'utilisation de la télédétection dans les inventaires forestiers nationaux. Nous avons néanmoins voulu fournir une synthèse des aspects importants, en nous appuyant sur notre expérience. Nous n'avons pas fourni d'informations sur les plans de sondage dans la mesure où ces aspects sont présentés par d'autres auteurs ayant une expérience plus pointue dans ce domaine. Nous conseillons la bibliographie ci-dessous pour les personnes souhaitant approfondir leurs connaissances sur le thème de la télédétection.

## Glossaire

SLA	scanneur laser aéroporté
DHP	diamètre à hauteur de poitrine
IRC	infrarouge couleur
ASE	Agence spatiale européenne
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FRA	Évaluation des ressources forestières
GOFC-GOLD	Global Observation for Forest et Land Cover Dynamics
IRS 1D	Satellite de télédétection indien
kNN	Système d'analyse d'image kNN (k plus proches voisins)

Landsat ETM	Landsat Enhanced Thematic Mapper
Landsat TM	Landsat Thematic Mapper
Modis	Spectroradiomètre imageur à résolution modérée
NFA	EFN, Évaluation forestière nationale
REDD	Programme de réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement
ET	Écart-type
RSO	Radar à synthèse d'ouverture
MVS	Machine à vecteurs de support

## Bibliographie

**Dees, M. and Koch, B.,** (1997) : Poststratifizierung bei Klumpenstichprobendesign zur Nutzung von Fernerkundung und GIS bei Waldinventuren. In : Pelz, D. R. (Hrsg) : Sammlung von Beiträgen aus der 10. Jahrestagung der Sektion Forstliche Biometrie und Angewandte Informatik des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten, 24-26 Sept. 1997 in Freiburg Br.

**Forest Resource Assessment 2010**, Main Report, FAO Forestry Paper 163, Rom 2010, p. 340.

**GOFC-GOLD**, Sourcebook – Reducing Greenhouse Gas Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries : A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring, Measuring and Reporting. 2009, p. 108. ource book GOFC- Gold

**Häme, T., Rauste, Y., Sirro, L., Stach, N.,** 2009. Forest cover mapping in French Guiana since 1992 using satellite radar imagery, Proceedings of ISRSE 33 Symposium. Stresa, Italia, 4 - 9 May 2009.

**Heinzel, J. and Koch, B.,** 2011. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification./ International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation/, \*13\*, 152-160

**Heinzel, J., Ronneberger, O., Koch, B.,** 2010, A comparison of support vector and linear classification of tree species. Proceedings of SilviLaser 2010, 14.-17. September 2010, Freiburg, Germany, Enßle, F. and Weinacker, H. (Eds.), 479-488.

**Herrera, B.,** 2003. Classification and Modeling of Trees Outside Forest in Central American Landscapes

by Combining Remotely Sensed Data and GIS. Doctoral thesis. Faculty of Forestry and Environmental Sciences, Department of Remote Sensing and Landscape Information Systems, University of Freiburg, Germany.

- Hoffmann, K.**, 2010. Erfassung von Waldstruktur- und Waldzustandsparametern aus digitalen Luftbilddaten der sachsenweiten Befliegung. Forstliche Forschungsberichte Nr. 209, „Der gepixelte Wald – Forstliche Fernerkundung vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen in Umwelt und Technik. Fachtagung in Freising, 25. Januar 2008, S. 18-29.
- Höfle, B., Hollaus, M., Lehner, H., Pfeifer, N., Wagner, W.**, 2008. Area-based parameterization of forest structure using full waveform airborne laser scanning data. Proc. Silvilaser 17-20. Sept. 2008, Edinburgh, Scotland, 227 – 235.
- Hollaus, M., Mücke, W., Höfle, B., Dorigo, W., Pfeifer, N., Wagner, W., Bauerhansl, C. and Regner, B.**, 2009. Tree species classification based on full-waveform airborne laser scanning data. 9th International SilviLaser Conference, October 14-16, 2009, Texas A&M University, College Station, TX, USA, pp 54-62.
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S.** 2000. Applied Logistic Regression. 2nd Edition. Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Hyyppä, J., Hyyppää, H., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M.**, 2009. Forestry inventory using small-footprint airborne. Topographic Laser Ranging and Scanning, J. Shan and C.K. Toth (eds.), (Boca Raton : CRC Press), 335-370.
- Ivits, E., Koch, B., Waser, L., Chamberlain, D.** 2004. Modelling Biological Data with segmented Landscape Objects and Image Grey Values. Presented at the 1. Göttingen GIS and Remote Sensing Days, 7. – 8. Oktober 2004. J. D. Sauerländer's Verlag Frankfurt a. M., ISBN 3-7939-5138-3, Bd. 138, S. 349-359.
- Ju, J. and Roy, D.P.**, 2008. The availability of cloud-free Landsat ETM data over the conterminous United States and globally. Remote Sensing of Environment 112 (2008) 1196-1211.
- Koch, B.** 2010. Status and Future using New Laser Scanning, Synthetic Aperture Radar and Hyperspectral Remote Sensing Data for Forest Biomass Assessment. In : ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote. 65(2010) 581-590.
- Kurvonen, Q., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y. and Palm, C.A.**, 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. Forest Ecology and Management 146 (1-3), 199
- Latifi, H., Nothdurft, A., Koch, B.** 2010. Non-par-

ametric prediction and mapping of standing timber volume and biomass in a temperate forest : application of multiple optical/LiDAR –derived predictors. Forestry 83(4) : 395-407

- LeToan, T., Beaudoin, A., Riom, J., Guyon, D.**, 1992. Relating forest biomass to SAR data. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 30 (2), 403-411.
- Lillesand, T., M., Kiefer, R., W., Chipman, J., W.**, 2008. Remote Sensing and Image Interpretation. 6th ed. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc.
- McRoberts, R., M., Wendt D. G., Nelson, M., Hansen, M., H.**, 2002. Using a land cover classification based on satellite imagery to improve the precision of forest inventory area estimates. Remote Sensing of Environment (81), 2002, 36-44.
- McRoberts, St.**, 2010 : Advances and emerging issues in national forest inventories. Scandinavian Journal of Forest Research 25 : 368-381.
- McRoberts, St.**, 2011 : Estimating forest attribute parameters for small areas using nearest neighbors techniques. Forest Ecology and Management (in press), Science direct (<http://www.sciencedirect.com/>)
- Mountrakis, G., Im, J., Ogole, C.**, 2011. Support vector machines in remote sensing : A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66 (2011) 247-259.
- Naesset, E.**, 2004. Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest ecosystems. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36 Part 8/W2, 3-6 October 2004, Freiburg, Germany, 145-148.
- Nga, N. T.**, 2010. Estimation and mapping of above ground biomass for the assessment and mapping of carbon stocks in tropical forests using SAR data – a case study in Afram Headwaters Forest, Ghana. Dissertation at International Institute for Geo-Information, Science and Earth-Observation, ITC, Enschede, Netherland, 2010, pp. 79.
- Öhmichen K.**, 2007. Satellitengestützte Waldflächenkartierung für die Bundeswaldinventur. Dissertation an der Universität, Hamburg, 2007, 105 S.
- Ridder R. M.**, 2007, Options and recommendations for a global remote sensing survey of forests. Food and Agricultural Organisation, Working paper 141, Rome 2007, p. 55.
- Straub, C., Weinacker, H., Koch, B.** 2009. A Comparison of Different Methods for Forest Resource Estimation using Information from Airborne Laserscanning and CIR Orthophotos. In : European Journal of Forest Research DOI 10.1007/s10 342-010-0391-2 (online).
- Tomppo, E., A. Pekkarinen**, 1997 : Methodenerpro-

bung der Finnischen Nationalen Multiquellen-Waldinventur in Nordrhein-Westfalen. In : Landeswaldinventur –Konzeption, Verfahrenstest, Ergebnisse, Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen Heft 5, 52-67

**Vauhkonen, J., Korpela, I., Maltamo, M. And Tokola, T.**, 2010. Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity and alpha shape metrics. Remote Sensing of Environment. Doi 10.1016/j.rse.2010.01.016

**Vaukonen, J., Ene, L., Gupta, S., Heinzl, J., Holmgren, J., Pitkänen, J., Solberg, S., Wang, Y., Weinacker, H., Hauglin, K.M., Lien V., Packelen, P., Gobakken, T., Koch, B., Naeset, E., Tokola, T., Maltamo, M.**, 2010. Comparative testing of single-tree detection algorithms. Proceedings of SilviLaser 2010, 14.-17. September 2010, Freiburg, Germany, Enßle, F. and Weinacker, H. (Eds.).

**Zhang, G., P.**, 2000. Neural Networks for Classification : A survey. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C : Applications and Reviews, Vol. 30, No. 4, November 2000, 451-461.

ESA, GMES Observing the Earth – Living Planet Programm [http : //www.esa.int/esaLP/SEMM4T4KX-MF\\_LPgmes\\_0.html](http://www.esa.int/esaLP/SEMM4T4KX-MF_LPgmes_0.html), (last access 17.02.2011)

**Klassen M., and Paturi, N.**, 2010. Web document classification by keywords using random forests. NDT (2), 2010, 256-261. [http : //robles.callutheran.edu/~m-klassen/doc/NDT2010.pdf](http://robles.callutheran.edu/~m-klassen/doc/NDT2010.pdf) (last access 28.2.2011)

**Leo Breiman and Adele Cutler, Random Forest**, [http : //www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc\\_home.htm](http://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_home.htm) (last access 28.2.2011)

**NASA, Remote Sensing Tutorial** 2010, Image processing and Interpretation [http : : //rst.gsfc.nasa.gov/Sect1/Sect1\\_19.html](http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect1/Sect1_19.html) (last access 28.2.2011)

**Nedeljkovic, I.**, 2004. Image classification based on fuzzy logic. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XX, 2004. [http : //www.google.de/search?hl=de&q=IMAGE+CLASSIFICATION+BASED+ON+FUZZY+LOGIC&aq=f&aqi=&aql=&oq=](http://www.google.de/search?hl=de&q=IMAGE+CLASSIFICATION+BASED+ON+FUZZY+LOGIC&aq=f&aqi=&aql=&oq=) (last access 28.02.2011)

Neural Network Classification, [http : //www.resample.com/xlminer/help/NNC/NNClass\\_intro.htm](http://www.resample.com/xlminer/help/NNC/NNClass_intro.htm) (last access 28.2.2011)

**Tomppo, E.**, 2002. Development of more efficient tools for the 21st century forest inventory using field and satellite data. In Proceedings ForestSat 2002 National Forest Inventory, August 6, 2002. [http : //www.metsla.\\_/pp/ETom/index-en.htm](http://www.metsla._/pp/ETom/index-en.htm) (last access 28.2.2011)

