

FORÊT • NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part de la revue **Forêt.Nature**

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction


foretnature.be

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :
librairie.foretnature.be

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :
foretnature.be

Retrouvez les anciens articles de la revue
et d'autres ressources : **foretnature.be**



© SAW

PRINCIPES DE BASE DE LA TÉLÉDÉTECTION ET SES POTENTIALITÉS COMME OUTIL DE CARACTÉRISATION DE LA RESSOURCE FORESTIÈRE. I. IMAGES AÉRIENNES ET SATELLITAIRES

STÉPHANIE BONNET – FRANÇOIS TOROMANOFF
FRANÇOIS FOURNEAU – PHILIPPE LEJEUNE

Face aux enjeux pesant sur la forêt, la caractérisation de cette ressource multifonctionnelle est primordiale pour une gestion efficace et raisonnée. Cependant, la réalisation d'inventaires forestiers représente un travail substantiel en termes de temps et de budget. Dans ce contexte, les images aériennes et satellitaires deviennent, après l'avènement des Systèmes d'Information Géographique (SIG), des outils indispensables pour analyser la composition et l'évolution de nos forêts. Cet article présente synthétiquement les grands principes de télédétection et les services qu'elle peut rendre au forestier.

Les préoccupations actuelles sur les changements globaux, la déforestation et la séquestration du carbone sont autant d'enjeux qui pèsent sur la forêt. Ces considérations viennent s'ajouter aux fonctions de production, de récréation et de protection de la biodiversité. De ce fait, le besoin d'informations sur notre

ressource forestière n'a jamais été aussi important^{4, 13}. Cette connaissance passe par la description des surfaces forestières (localisation, étendue, composition...) et leur caractérisation dendrométrique, qui sont devenues des préalables indispensables à la gestion et se concrétisent par la réalisation d'inventaires. Ce travail se fait

sur des surfaces pouvant être importantes et mobilise des ressources humaines et financières conséquentes¹⁹.

Après les *Systèmes d'Information Géographique* (SIG), la généralisation de l'utilisation de la télédétection vient enrichir la boîte à outils du forestier, grâce au développement de techniques adaptées à la caractérisation de la ressource forestière¹⁸. Le produit couramment utilisé en télédétection est l'image aérienne ou satellitaire, devenu de plus en plus familier au grand public, notamment grâce à des applications telles que *Google Earth*. La télédétection est pourtant connue depuis longtemps comme source d'information pour la cartographie. En foresterie, les images aériennes servent de « couche de fond » et permettent une interprétation visuelle des éléments présents dans le paysage.

QUELQUES PRINCIPES DE BASE

La télédétection est une technique permettant d'obtenir à distance des images décrivant de manière plus ou moins détaillée une portion de la surface terrestre à un moment donné. Ces images sont acquises par des capteurs installés sur des plateformes aériennes ou satellitaires (avion, hélicoptère, satellite...)¹¹. Ces capteurs enregistrent le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par la surface du globe terrestre^{8, 11}. Il existe différents types de capteurs, produisant plusieurs types d'images pouvant être utilisées dans un grand nombre d'applications environnementales. Au fil du temps et de l'amélioration des techniques, la télédétection a montré qu'elle présentait de nombreux atouts comme outil de monitoring des ressources naturelles^{12, 14, 17} : acquisition rapide

d'observations, facilité de mise à jour des données, possibilité de modélisation de caractéristiques environnementales, production de cartes thématiques, étude de zones très vastes ou difficiles d'accès. Cependant, ces aspects positifs et le gain de coût de main d'œuvre potentiel doivent être analysés par rapport aux coûts d'acquisition pouvant demeurer importants et aux techniques de mise en œuvre parfois complexes⁹.

La perception des images : une question de détails et de couleurs

Dans le jargon de la télédétection, on fait la différence entre les capteurs « actifs » et les capteurs « passifs ». Un système passif ou optique enregistre le rayonnement naturel, émis ou réfléchi par un objet suite à l'éclairage par le soleil (principale source d'énergie électromagnétique reçue sur Terre). Dans le cas d'un système actif, tel que le RaDAR et le LiDAR, il y a émission d'énergie par le capteur lui-même vers l'objet ; le système enregistre le signal renvoyé par la cible¹⁵. Les systèmes actifs ne dépendent pas de l'ensoleillement, ils sont donc moins sensibles aux conditions météorologiques. Les caractéristiques des capteurs et des plateformes (sensibilité, altitude de vol, orbite...) conditionnent les propriétés des images et leur utilisation. Celles-ci sont définies par plusieurs types de résolutions : spatiale, spectrale et temporelle.

La résolution spatiale correspond à la dimension des pixels qui constituent les éléments de base d'une image. En général, les images aériennes ont une résolution spatiale plus fine (entre 10 cm et 1 mètre) que les images satellitaires (entre 1 mètre et 1 km)^{3, 15}. La taille du pixel d'une image conditionne la manière avec laquelle on

perçoit le paysage. Des pixels plus petits permettent d'appréhender des niveaux de détails plus fins. À l'inverse, des pixels plus grands vont gommer progressivement les détails présents dans une scène. La figure 1 présente des extraits d'images de différentes résolutions spatiales (allant de 25 cm à 30 mètres), pour un site forestier en Région wallonne.

Les capteurs enregistrent le rayonnement émis ou réfléchi par la surface de la Terre pour certaines gammes de longueur d'onde, qualifiées de bandes spectrales. Celles-ci correspondent à des portions du spectre électromagnétique déterminées (figure 2), dont certaines peuvent faire partie du spectre visible (c'est-à-dire perçu par l'œil humain). La résolution spectrale correspond au nombre et à la finesse des bandes spectrales auxquelles le capteur est sensible.

En fonction du nombre de bandes spectrales enregistré par le capteur, il est possible de produire différents types d'images. Les images panchromatiques sont constituées d'une seule bande couvrant le spectre visible et une partie de l'infrarouge. Les images panchromatiques sont affichées en noir et blanc (ou niveaux de gris). Les images multispectrales résultent de l'assemblage d'au moins trois bandes spectrales et sont généralement affichées en couleurs¹¹. L'affichage des couleurs sur un écran d'ordinateur s'obtient en additionnant en proportions variables les trois couleurs primaires que sont le bleu, le rouge et le vert. Par exemple, la couleur jaune s'obtient en additionnant du vert et du bleu. Ce principe d'addition des couleurs est la base de la notion de composition colorée. Une composition en couleurs vraies consiste à attribuer aux trois cou-

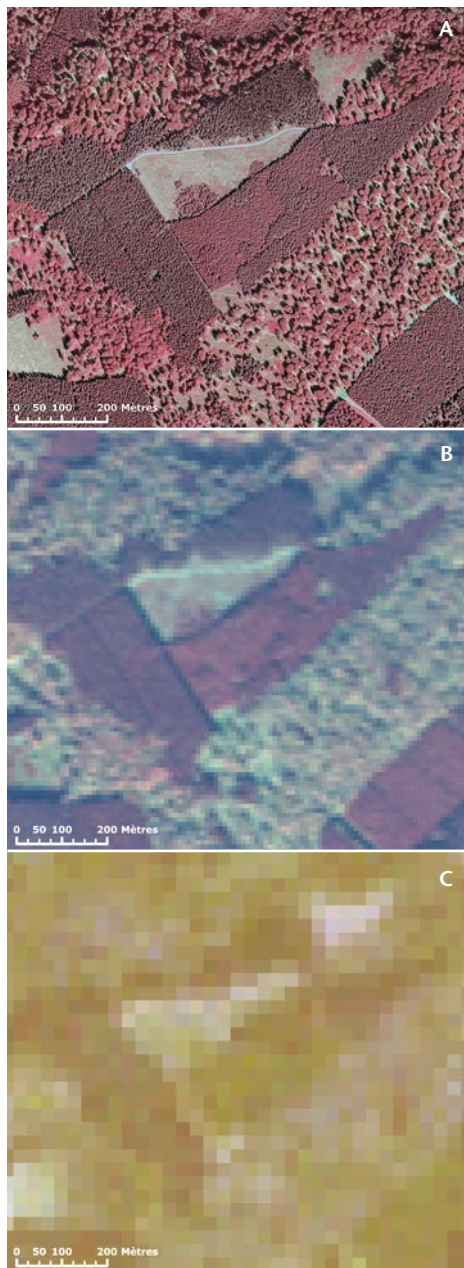


Figure 1 – Images de résolutions spatiales différentes. L'image A est une ortho-photographie aérienne prise en 2009 et d'une résolution de 25 cm. L'image B est une image SPOT 5 d'une résolution de 10 mètres acquise en 2005 et l'image C est une image LANDSAT 5 datant de 2006 et d'une résolution de 30 mètres.

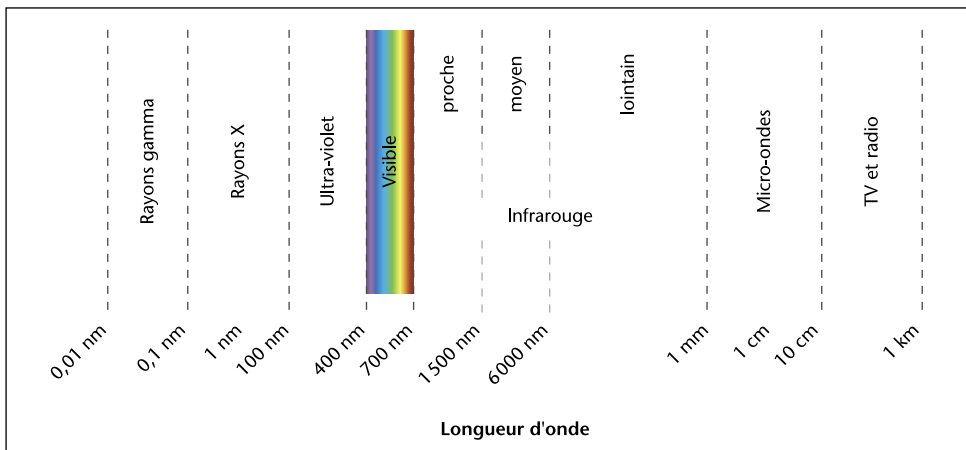


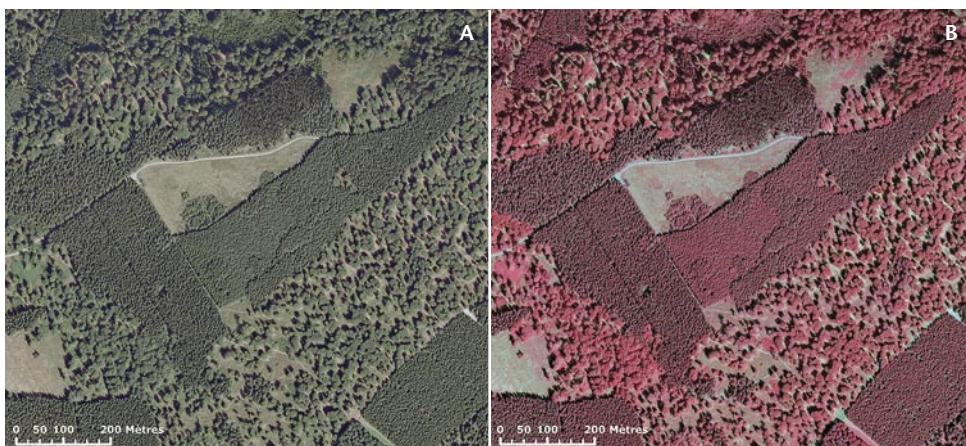
Figure 2 – Schéma illustrant la répartition du rayonnement électromagnétique en différentes gammes de longueurs d'ondes (adapté de BOUREAU³). Le spectre visible, perçu par l'œil humain, est compris entre 400 et 700 nm.

leurs de base les bandes spectrales équivalentes de l'image. On obtient ainsi une image en couleurs « réelles » (par exemple, l'image de gauche à la figure 3). Par contre, la composition « infrarouge fausses couleurs » consiste à attribuer la bande infrarouge au rouge, la bande rouge au vert et la bande verte au bleu. Le résultat est

une image comme présentée à la figure 3 (à droite). Cette technique permet de rendre visibles des informations non perçues par notre œil.

Enfin, la résolution temporelle correspond à la fréquence d'acquisition d'une image à un endroit donné. Cette notion

Figure 3 – Illustration d'un site forestier au moyen d'images aériennes datant de l'année 2009. La photo de gauche correspond à une composition en vraies couleurs alors que celle de droite est une composition infrarouge fausses couleurs.



est surtout employée dans le cas d'images satellitaires, les satellites étant conçus pour survoler les mêmes endroits à intervalle régulier (de 1 à 16 jours)¹¹.

La signature spectrale... une empreinte digitale

En observant une image, notre cerveau parvient à différencier les éléments qui constituent le paysage (zone d'habitat, cultures, forêt...). Cette différenciation s'opère principalement grâce aux variations de teinte de ces différents éléments. En interceptant la surface terrestre, le rayonnement solaire est réfléchi. La proportion de rayonnement réfléchi, appelée la réflectance, est très variable. En effet, le pourcentage de réflexion varie non seulement avec la longueur d'onde mais également avec la nature des objets présents. Elle dépend de la composition, de l'humidité de l'objet, de même que des conditions atmosphériques et d'éclairage. L'importance de la réflectance selon la gamme de longueur d'onde forme la « signature spectrale ». C'est cette notion qui est exploitée pour différencier les éléments constitutifs de la scène^{8, 15}.

Certaines bandes spectrales sont donc plus intéressantes que d'autres pour différencier des objets^{3, 8, 15}. Dans le cas de la végétation, l'énergie réfléchie est importante dans le proche infrarouge¹⁵, principalement à cause de la structure interne des feuilles. Les différentes couches de cellules et les différents pigments foliaires qui composent la feuille varient en fonction de l'espèce, de l'âge, de la saison, de l'état sanitaire ou du niveau de stress. Cette structure interne influence le comportement des végétaux face au rayonnement lumineux et donc notre perception de la couleur des feuilles. L'évolution de

la composition et du taux des pigments est responsable des variations de couleurs au cours de la saison (par exemple, la diminution des chlorophylles en automne accentue la réflexion du rouge)^{3, 8}. De plus, l'âge, la densité, la structure, la composition et les conditions stationnelles vont avoir une influence sur les propriétés de réflexion d'un peuplement, et donc sur notre perception³. Un exemple de différenciation des espèces par leur signature spectrale est disponible dans la figure 3 où les résineux apparaissent plus sombres que les feuillus dans la composition infrarouge fausses couleurs.

APPLICATIONS DE LA TÉLÉDÉTECTION

L'utilisation des données de télédétection se décline selon trois grandes approches : la photo-interprétation, la photogrammétrie et la classification numérique d'images.

Photo-interprétation

La photo-interprétation est l'interprétation visuelle d'une image par un opérateur. C'est la forme d'analyse d'images aériennes ou satellitaires la plus ancienne. L'interprétation d'une image peut être très performante grâce aux capacités de reconnaissance du cerveau humain. Elle nécessite cependant beaucoup d'entraînement et d'expertise.

En gestion environnementale, l'occupation du sol est une information primordiale, qui peut être analysée par photo-interprétation⁸. Dans un premier temps, on peut chercher à distinguer quelques grandes catégories d'occupation du sol : forêts, landes, prairies, cultures, sol nu. Par la suite, elle peut être définie avec plus ou

moins de finesse, par exemple, en cartographiant plus en détails les différents types de couvertures forestières. Interpréter une image aérienne d'une zone forestière constitue une première façon de faire un inventaire ou de cartographier des peuplements³. L'avantage d'une photo est qu'elle constitue une vue instantanée d'une grande portion de territoire, sans entrave de la topographie ou difficulté de déplacement due à la densité des peuplements.

Plus spécifiquement, les surfaces forestières peuvent être analysées en cherchant à différencier les parcelles feuillues, résineuses ou mixtes, la futaie, le taillis ou le taillis-sous-futaie, plusieurs classes de densité, plusieurs classes de hauteur ou d'âge. En photo-interprétation, il est important de bien prendre le temps de définir les besoins et une nomenclature précise des informations à cartographier^{3, 8}. La photo-interprétation d'images d'archive permet également de visualiser les modifications apportées au territoire au cours du temps (évolution des occupations du sol, progression ou régression

des surfaces forestières, voir un exemple à la figure 4).

Si l'on s'intéresse brièvement aux critères d'identification des essences et des types de peuplements, la couleur, la forme et la répétition spatiale sont prises en compte. Le choix de la composition colorée est directement lié aux différences des réponses spectrales des végétaux. De même, la date de prise de vue est un critère important à considérer, certaines périodes étant plus propices pour distinguer telle ou telle espèce (valable aussi en classification numérique). De même, des informations extérieures à l'image telles que la connaissance de la région et des pratiques sylvicoles, peuvent permettre une meilleure compréhension du paysage. Les formes de cimes vont dépendre pour une même espèce de son statut, de son environnement, de l'âge, de la sylviculture, du type de peuplement (monospécifique ou mélange)³...

Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique relativement complexe qui permet de réali-

Figure 4 – Évolution entre 1990 et 2009 d'une zone boisée en chemin de fer dans la région de Remicourt.



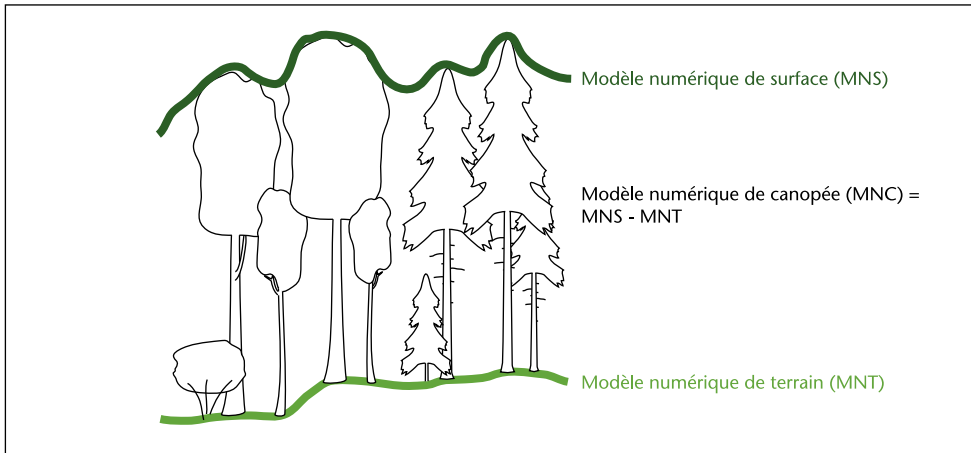


Figure 5 – L'estimation de la hauteur du couvert forestier peut se faire grâce à un modèle numérique de canopée (MNC). Il est produit en soustrayant le MNT du MNS.

ser des mesures de hauteurs, de distances et d'angles sur des images aériennes observées en stéréoscopie^{3,8}. L'effet stéréoscopique est obtenu en observant simultanément deux images couvrant une même scène avec des angles de vue différents. Cette technique est mise en œuvre dans des logiciels spécifiques qui sont utilisés notamment pour produire des ortho-images et des modèles numériques de surface (MNS).

Une ortho-image est une image corrigée des déformations dues à la prise de vue et au relief. Elle est géoréférencée dans un système de projection défini, ce qui la rend superposable à d'autres cartes. Par rapport aux cartes topographiques classiques, les ortho-photos contiennent des informations supplémentaires quant à l'occupation et l'utilisation du sol. L'ensemble des photographies rectifiées est assemblé en une mosaïque, souvent découpée en dalles (dont la dimension varie avec la résolution des images)^{3,8}. Les MNS sont des images où chaque pixel se voit affecter la valeur d'altitude des objets en

surface du sol, alors que l'on parle de modèles numériques de terrain (MNT) dans le cas de l'altitude du sol.

L'intérêt de la photogrammétrie en foresterie réside dans l'utilisation du MNS pour étudier les hauteurs des arbres ou des peuplements (figure 5) et dans la création d'ortho-image pour la réalisation de cartes, de photo-interprétation ou de traitement d'image. Le lecteur trouvera un exemple d'utilisation d'un MNS photogrammétrique pour l'estimation de la hauteur de peuplement résineux dans le numéro 98 de Forêt Wallonne (pages 53-59).

Classification numérique d'image

L'objectif de la classification est d'exploiter l'information d'une image pour produire une carte thématique (par exemple, carte d'occupation du sol ou de biomasse forestière). On s'intéresse généralement à l'occupation du sol au sens large ou plus spécifiquement, dans le contexte forestier, à la cartographie des types de végétation ou peuplements. Par rapport à la photo-

QUELQUES EXEMPLES D'INTERPRÉTATION DE PHOTOS AÉRIENNES



Cette image aérienne de 2009 permet d'illustrer le contraste entre des zones de mises à blanc, de plantations résineuses avec layons d'exploitation et de forêts feuillues.



Peuplements feuillus et résineux dans la région de Spa. L'image a été prise en avril 2010. Les résineux sont bien identifiables par rapport aux feuillus, pour lesquels on distingue une essence déjà en feuille (probablement du hêtre) et une seconde pas encore (probablement du chêne).



Image aérienne d'une zone forestière dans la région de Tournai datant de 2009. On y remarque un contraste de faciès entre des peupleraies à plusieurs stades et les forêts feuillues.



Sur cette photo aérienne de 2009, on peut observer une hêtraie claire avec un îlot résineux dans le cantonnement de Florenville.

Le lecteur intéressé par la photo-interprétation forestière peut consulter le « Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges. Application aux milieux forestiers et naturels », écrit par BOUREAU^{1,2} et édité par l'Inventaire forestier national français (IFN).

interprétation, le traitement numérique d'image permet d'automatiser les processus et, par conséquent, de gagner du temps notamment pour travailler sur des grandes surfaces.

La classification repose sur des traitements statistiques plus ou moins complexes. Dans les grandes lignes, on peut faire la distinction entre classification supervisée ou non supervisée¹⁶. Une classification supervisée nécessite une connaissance *a priori* des classes thématiques ciblées. Cette connaissance s'acquiert en sélectionnant dans l'image des échantillons d'entraînement de chacune des classes. Ces sites de référence servent à « apprendre » à l'algorithme de classification à reconnaître ces classes. Par contre, en classification non supervisée, l'algorithme crée automatiquement des groupes de pixels sur base de leur similarité. Il revient ensuite à l'opérateur d'analyser la signification de ces classes en regard des classes thématiques qu'il souhaite voir apparaître dans la carte finale¹⁰.

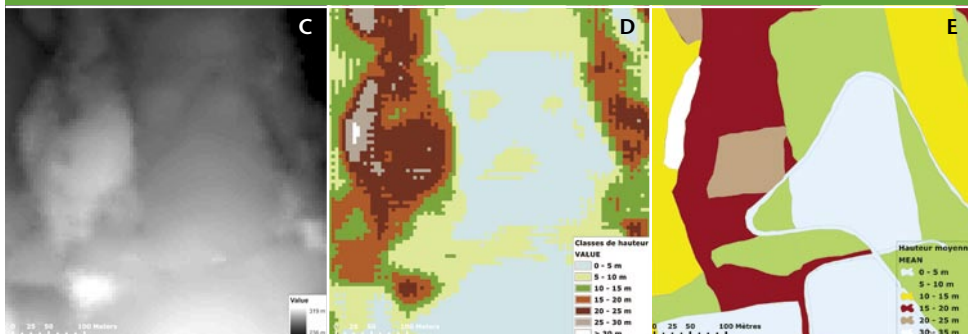
Parallèlement à l'amélioration continue de la résolution spatiale des images, les approches de classification d'image ont aussi dû s'adapter. Historiquement, les classifications se basaient sur l'analyse des caractéristiques de chaque pixel composant l'image (approche « orientée-pixel »). L'apparition d'images à très haute résolution permet d'obtenir un niveau de détail élevé mais produit des signatures spectrales très hétérogènes. Par exemple, en zone forestière, un pixel de 20 mètres ne pose pas de problème d'interprétation, alors qu'un pixel de 0,25 mètre pourra tantôt correspondre à une partie de cime éclairée ou ombragée, à une portion de sol ou à de la végétation basse. Dans ce cas,

un groupe de pixels a plus de sens qu'un pixel isolé. Face à ce constat, le traitement par pixel est devenu moins adapté^{1,2}. L'approche « orientée-objet » repose sur la notion de segmentation, qui divise l'image en « objets » ou « segments ». Ce sont des groupes de pixels de propriétés spectrales et spatiales similaires, générés à partir de critères d'homogénéité¹. Les segments produits entreront par la suite dans une étape de classification.

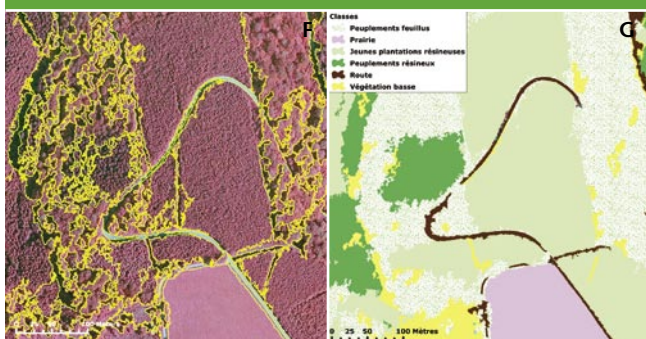
L'objectif d'un processus de classification d'image est d'attribuer un pixel ou un objet à une classe thématique. Pour cela, les algorithmes de classification se basent sur les propriétés de ces pixels ou objets. Celles-ci sont appelées les « attributs discriminants ». Ces attributs permettent de différencier les objets ou pixels correspondant aux différentes classes thématiques que l'on cherche à identifier dans une image^{7, 10}. Il en existe plusieurs catégories mais on peut s'intéresser plus spécifiquement aux attributs spectraux. Ceux-ci désignent des indices calculés à partir des bandes spectrales des images (rouge, vert, bleu et infrarouge le plus souvent). Les indices de végétation sont des indices spectraux. Ils sont issus d'opérations arithmétiques effectuées à partir des canaux de l'image, par exemple, l'indice de végétation NDVI, très couramment utilisé dans l'étude du couvert végétal¹¹. De tels indices tirent parti de la différence de réflectance de la végétation entre le visible et l'infrarouge, et sont dès lors utilisés pour déduire les propriétés de la végétation en isolant sa contribution d'autres types de « matériel », comme l'eau ou le sol. Dans le cas d'une analyse « orientée-objet », les valeurs des attributs spectraux ne sont plus considérées par pixel mais calculées à partir des valeurs de l'ensemble des pixels

1. Cet exemple a pour but d'illustrer succinctement les applications et produits possibles au départ d'une image aérienne multispectrale (rouge, vert, bleu, proche infrarouge) de 2006, à 50 cm de résolution (figure A).

2. La figure B est le résultat d'une photo-interprétation ; l'opérateur a digitalisé les éléments importants du paysage et mis en évidence les peuplements feuillus, les peuplements résineux, les jeunes plantations, la végétation basse et les routes. Les zones forestières ont été digitalisées en distinguant différentes essences de résineux ou différents stades.



3. La figure C illustre le MNS sur la même zone. À partir de ce MNS et d'un MNT, on peut produire un MNC qui permet de dériver une carte de classes de hauteur (figure D). Ensuite, un calcul de la hauteur moyenne des parcelles digitalisées est fait à partir du MNC (figure E). Cependant, cette carte demeure imprécise car elle n'a pas été créée en combinant des mesures sur le terrain. De plus, les MNS et MNT de départ sont, dans le cas présent, de résolution moyenne.



4. Enfin, les figures F et G illustrent l'approche de classification « orientée-objet ». Une segmentation et une classification supervisée sont faites sur la zone à l'aide d'*eCognition Developer*, afin de mettre en évidence les classes « feuillus », « résineux », « jeune plantation résineuse », « végétation basse » et « prairie ».

constituant le segment (moyenne, écart-type, minimum...).

Après avoir réalisé une classification d'image, il faut pouvoir évaluer la qualité du résultat. L'évaluation de la précision d'une classification est importante car elle permet de juger la fiabilité de l'information que l'on souhaite utiliser. Pour ce faire, l'approche la plus largement utilisée est la matrice de confusion^{5, 16}. Derrière ce terme technique, on compare simplement deux informations : les classes obtenues par la classification et les classes correspondant à des données de référence. Ces données de référence, considérées comme correctes, consistent le plus souvent en une interprétation visuelle d'une image de meilleure résolution que celle qui est classifiée⁶.

CONCLUSIONS

Les applications de la télédétection en foresterie sont très nombreuses et en constant progrès. La télédétection permet avant tout de disposer d'une image régulièrement actualisée et de plus en plus précise de l'étendue de nos massifs forestiers. La recherche scientifique permet d'exploiter et d'analyser, de manière plus ou moins automatisée, ces quantités importantes de données pour en dériver des cartes thématiques susceptibles d'intéresser directement le gestionnaire de terrain : délimitation des peuplements, estimation de la biomasse ou de paramètres dendrométriques, suivi de l'état sanitaire...

Si ces techniques apparaissent comme très séduisantes, elles ne sont pas exemptes de contraintes : volume de données im-

portant, relative complexité des logiciels, nécessité d'une expertise de base pour les opérateurs. En outre, pour qu'elles puissent être exploitées et interprétées correctement, les données de télédétection doivent toujours être complétées d'observations réalisées *in situ* permettant à l'opérateur ou au logiciel de se référer à une « vérité terrain ». Ce constat est d'autant plus vrai que les données sont utilisées dans des processus de quantification ou de mesure. Cette dernière catégorie d'applications sera développée dans un prochain article qui s'intéressera plus spécifiquement à l'exploitation des données LiDAR pour l'estimation des caractéristiques dendrométriques de peuplements forestiers. ■

BIBLIOGRAPHIE

- 1 BAATZ M., SCHÄPE A. [2000]. *Multiresolution Segmentation, an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. In *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. Beiträge zum AGIT-Symposium. Salzburg.
- 2 BLASCHKE T. [2010]. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(1) : 2-16.
- 3 BOUREAU J.-G. [2008]. *Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges. Application aux milieux forestiers et naturels*. Inventaire Forestier National, 268 p.
- 4 BOUSSON E. [2003]. *Gestion forestière intégrée. Approche basée sur l'analyse multicritère*. Les Presses agronomiques de Gembloux, 303 p.
- 5 CONGALTON R.G., GREEN K. [2009]. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data*. Boca raton : CRC Press, Taylor & Frabis Group, 183 p.
- 6 CZAPLEWSKI R.L. [2003]. *Accuracy assessment of maps of forest condition*. In *Remote Sensing*

- of Forest Environments - Concepts and Case Studies*, M.A. Wulder and S.E. Franklin, Editors, Kluwer Academic Publishers., p. 115-140.
- ⁷ FRANKLIN S.E. [2001]. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. CRC Press, 407 p.
- ⁸ GIRARD M.-C., GIRARD C. [1999]. *Traitement des données de télédétection*. Dunod, 529 p.
- ⁹ HOLOPAINEN M., KALLIOVIRTA J. [2006]. *Modern Data Acquisition for Forest Inventories*. In *Forest Inventory - Methodology and Applications*, A. Kangas and M. Maltamo, Editors, Springer, p. 343-362.
- ¹⁰ JENSEN J.R. [2005]. *Introductory Digital Image Processing (Third Edition)*. Pearson Prentice Hall, 526 p.
- ¹¹ JENSEN J.R. [2007]. *Remote Sensing of the Environment - An Earth Resource Perspective (Second Edition)*. Pearson Prentice Hall, 592 p.
- ¹² KING D.J. [2000]. Airborne remote sensing in forestry : Sensors, analysis and applications. *Forestry Chronicle* 76(6) : 859-876.
- ¹³ KOCH B. [2010]. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(6) : 581-590.
- ¹⁴ KÖHL M., MAGNUSSEN S.S., MARCHETTI M. [2006]. *Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory*. Springer, 373 p.
- ¹⁵ LILLESAND T.M., KIEFER R.W., CHIPMAN J.W. [2008]. *Remote Sensing and Image Interpretation (Sixth Edition)*. John Wiley & Sons, 756 p.
- ¹⁶ LU D., WENG Q. [2007]. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing* 28(5) : 823-870.
- ¹⁷ MCROBERTS R.E., TOMPPA E.O. [2007]. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing and Environment* 110(4) : 412-419.

¹⁸ NAESSET E. [2002]. Determination of Mean Tree Height of Forest Stands by Digital Photogrammetry. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17(5) :446-459.

¹⁹ RONDEUX J. [1999]. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers (deuxième édition)*. Les Presses agronomiques de Gembloux, 521 p.

Les auteurs tiennent à remercier le Service public de Wallonie pour le soutien apporté au travers des différentes conventions de recherche confiées à l'Unité de gestion des ressources forestières et des milieux naturels (GxABT, ULg) en rapport avec la télédétection.

Cet article est issu d'une recherche menée notamment dans le contexte de l'Accord-cadre de recherche et vulgarisation forestières 2009-2014 (DNF, UCL, ULg, Forêt Wallonne asbl).

L'ensemble des images aériennes utilisées pour illustrer cet article est la propriété du SPW.

STÉPHANIE BONNET

s.bonnet@ulg.ac.be

FRANÇOIS TOROMANOFF

FRANÇOIS FOURNEAU

PHILIPPE LEJEUNE

Unité de Gestion des Ressources
forestières et des Milieux naturels,
GxABT, ULg

Passage des Déportés, 2
B-5030 Gembloux