

La télédétection et son application à l'étude de la végétation : quelques principes

Avant d'aborder en détail une série de cas concrets représentatifs des applications de la télédétection, Anne Jolly expose ici les connaissances et principes de base. L'article est un peu long mais il apporte pas à pas, illustrations à l'appui, une initiation bienvenue pour comprendre comment fonctionne la télédétection, ce qu'elle permet... et ne permet pas. Ceci étant, nous avons tout fait pour que chacun des articles de ce dossier puisse être lu indépendamment des autres.

Les définitions de la télédétection sont nombreuses, mais relativement proches. En France, la Commission Générale de Terminologie et de Néologie a retenu la suivante : « Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ». (<http://franceterme.culture.fr/FranceTerme>). C'est donc un domaine très vaste.

L'objectif est ici de donner des « clefs » pour comprendre les divers articles de notre dossier et en compléter l'analyse, sans chercher à être exhaustif. Dans cet article, nous ne considérons donc que la télédétection aérienne et spatiale, qui utilise des données acquises par moyen aéroporté (avion, hélicoptère, ULM...) ou par satellite. Et encore n'exposons-nous ni le cas particulier du Lidar (décrit dans ce dossier dans les articles de J. Bock *et al.* et de J.M. Monnet *et al.*), ni celui du radar spatial.

D'une manière simpliste, on peut représenter la « capture » ou « l'acquisition » de données de télédétection comme un système composé de 3 entités : une source

d'énergie émettant un rayonnement électromagnétique, un objet qui interagit avec l'énergie reçue, un capteur qui enregistre l'effet de cette interaction (figure 1). Cet enregistrement est traduit en données qui, une fois transmises à l'utilisateur, doivent être analysées pour en extraire l'information recherchée.

Aussi nous examinerons successivement le rayonnement électromagnétique (solaire) et son interaction avec les objets, l'enregistrement du rayonnement « en retour » de cette interaction et les caractéristiques des données de télédétection qui en résultent. Puis nous verrons en quoi consiste leur préparation avant utilisation et nous dresserons un panorama des modalités d'analyse de ces données et de vérification des résultats. Pour conclure, nous reviendrons sur les points clefs d'un projet de télédétection.

Le rayonnement électromagnétique et son interaction avec les objets observés

Le rayonnement électromagnétique est un phénomène ondulatoire, dont le vecteur est le photon et qui se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière. On le caractérise ordinairement par sa longueur d'onde ou sa fréquence, qui sont

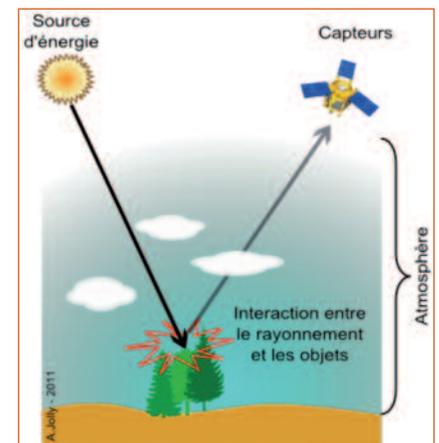


Fig. 1 : principes de la mesure par télédétection

Émission d'énergie par une source naturelle ou artificielle, interaction avec des objets (ou cibles), enregistrement de l'effet « en retour » par un capteur

inversement proportionnelles. Dans cet article, nous utilisons la longueur d'onde, exprimée en nanomètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), en micromètres ou microns ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) ou en centimètres.

Le rayonnement visible par l'œil humain et associé à une perception de couleurs (entre 400 et 700 nm) n'est qu'une petite partie du « spectre » électromagnétique total (figure 2). Les systèmes de télédétection, quant à eux, enregistrent les informations dans une gamme de longueurs d'onde plus étendue.

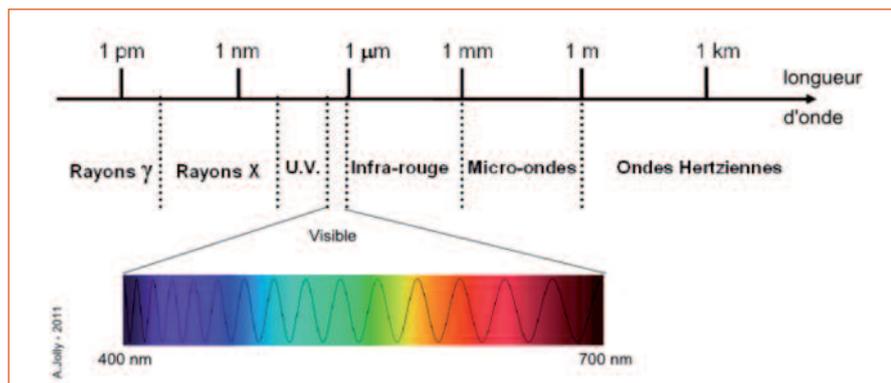


Fig. 2 : le spectre électromagnétique et ses divers domaines

Pour permettre la représentation graphique, l'échelle des longueurs d'onde n'est pas linéaire, mais logarithmique.

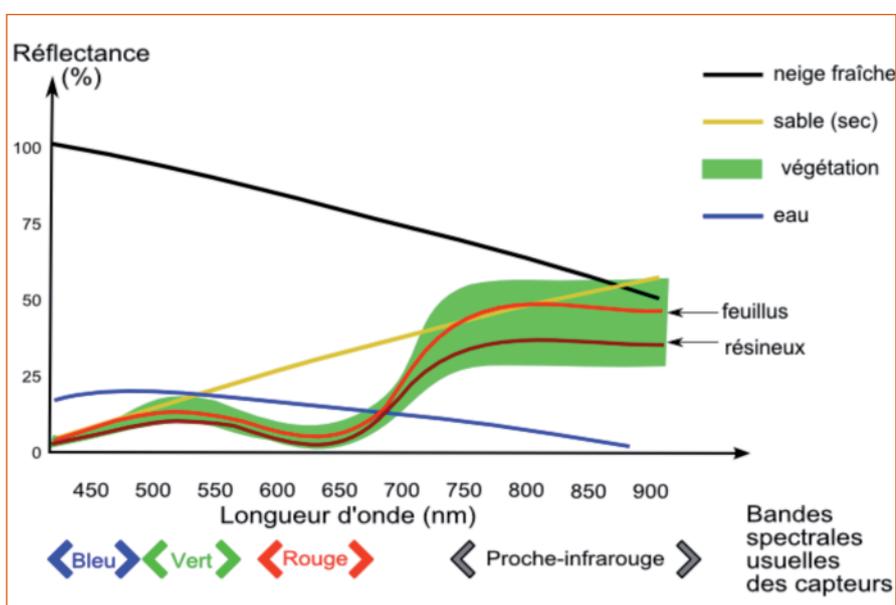


Fig. 3 : courbes schématiques de réflectance (proportion d'énergie incidente réfléchi) de divers types d'objets dans le visible et le proche infrarouge

Pour la végétation, le tracé représente le domaine global de l'ensemble des types de végétation. Pour les autres catégories d'objets il s'agit de la courbe de réflectance (fictive) moyenne.

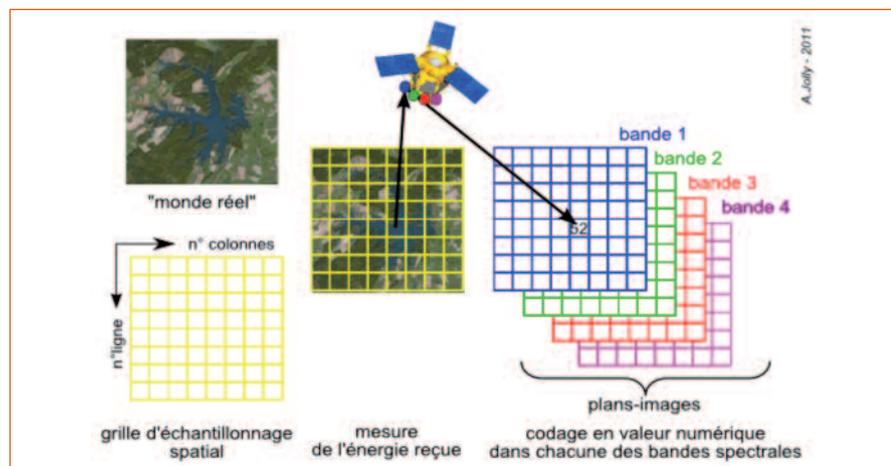


Fig. 4 : principe de l'image numérique de télédétection

Chaque capteur enregistre l'énergie réfléchi dans une bande de longueurs d'onde déterminée et le résultat est stocké dans le fichier « plan-image » propre à cette bande. Les pixels qui composent chaque plan-image portent la valeur ou « compte numérique » de l'énergie réfléchi par la surface élémentaire de terrain correspondante.

Rayonnement réfléchi par les objets

En télédétection, on mesure le rayonnement *réfléchi* par les objets terrestres qui reçoivent le rayonnement *incident* venant d'une source naturelle (soleil) ou artificielle (émetteur RADAR par exemple). On peut aussi mesurer le rayonnement *émis* par l'objet lui-même (domaine de l'infrarouge thermique), mais nous n'en parlons pas dans cet article, car il y a peu d'applications forestières.

Le rayonnement réfléchi subit, comme le rayonnement incident, des effets d'absorption ou de diffusion en traversant l'atmosphère. Ces effets ont une influence notable sur le type de mesure qui peut être réalisée, mais aussi sur sa qualité.

L'interaction du rayonnement incident avec un objet (appelée « réponse spectrale » de l'objet) se compose de trois phénomènes : une partie seulement de l'énergie incidente est réfléchi, une autre partie est absorbée et le reste est transmis « à travers » l'objet. La proportion de ces trois effets dépend de la longueur d'onde du rayonnement, de la nature de l'objet, de sa structure (géométrie, surface – plus ou moins lisse). Ainsi, l'interaction avec un arbre est complexe : elle résulte non seulement des propriétés de feuilles (différentes selon les essences ou les groupes d'essences), de celles des branches et du tronc, mais encore de l'architecture générale de l'arbre (houppier plus ou moins compact) et aussi du sous-bois.

Influence de la nature des objets

Le type de réponse spectrale de certains objets est bien connu : l'eau absorbe fortement le rayonnement infrarouge, la neige réfléchit fortement toute la gamme du visible (c'est pourquoi elle apparaît blanche). Des mesures *in situ* ou en laboratoire ont ainsi permis d'établir des courbes de réflectance, c'est-à-dire des courbes qui représentent le pourcentage d'énergie incidente réfléchi par divers types d'objets (figure 3). La végétation

chlorophyllienne, qui absorbe fortement la lumière dans les longueurs d'onde du rouge et du bleu la réfléchit fortement dans le vert : elle présente donc un « pic » de réflectance vers 500 nm. Elle réfléchit plus encore dans l'infrarouge proche (entre 700 et 900 nm), la réflectance des feuillus dans ce domaine étant supérieure à celle des résineux (voir dans ce dossier l'article de J.G. Boureau). Ainsi, les différences de réponses spectrales permettent de distinguer des classes d'occupation du sol, des groupes d'essences, etc.

Ces grandes différences de comportement spectral sont parfois qualifiées de « signatures spectrales », par analogie à la signature spectrale typique et unique des éléments chimiques simples. Toutefois cette analogie est limitée et abusive, car de nombreux facteurs influencent la réponse spectrale du milieu naturel. D'abord il s'agit d'objets vivants, en ce qui concerne la végétation, qui évoluent au cours du temps (selon les saisons, leur vigueur, leur état de santé) et qui sont donc complexes. Ensuite, leur situation particulière (versant à l'ombre, au soleil), leur environnement proche peuvent perturber le rayonnement réfléchi et d'autres effets interviennent également : par exemple, dans un peuplement forestier les ombres des arbres qui le composent sont différentes d'une date à l'autre, en fonction de l'élévation solaire, et jouent fortement sur la réponse spectrale du peuplement. Aussi la plupart des traitements pour analyser les données de télédétection nécessitent des « calibrations », notamment à partir de secteurs connus.

L'enregistrement du rayonnement réfléchi

Un capteur de télédétection n'est sensible qu'à une partie du spectre électromagnétique, définie entre deux longueurs d'onde ; à chaque capteur correspond donc une

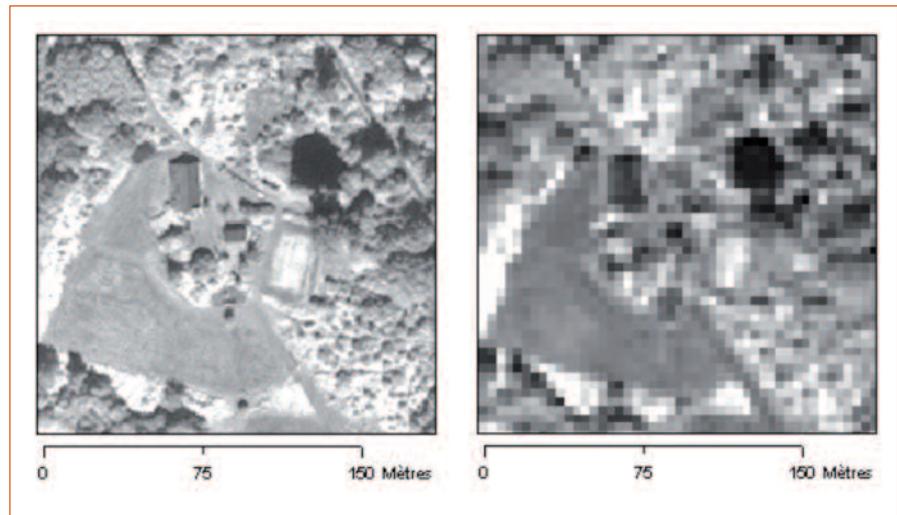


Fig. 5 : exemple d'images d'un même site à des résolutions spatiales différentes

Extrait d'image Ikonos du 6.08.2008 sur la FD de Vierzon (©SpaceImaging) : à gauche le canal panchromatique à 1m de résolution, à droite le canal proche infrarouge à 4m de résolution.

« bande spectrale » (ou « canal »). Les appareils destinés à l'observation des milieux terrestres ont généralement des capteurs qui couvrent au minimum les « canaux » bleu, vert, rouge et proche infrarouge, bien adaptés à l'étude de la végétation. Ils disposent aussi souvent d'un capteur à large bande spectrale, dit « panchromatique » couvrant la totalité du spectre visible (et, généralement, une partie du proche infrarouge).

Les photographies aériennes analogiques

Pour les photographies aériennes « analogiques » ou « argentiques » les capteurs sont les différentes couches du film photographique qui, par leur composition chimique, sont sensibles à certaines bandes spectrales allant de l'ultraviolet au proche infrarouge. Nous renvoyons pour le détail à deux articles de ce dossier : celui de P. Bouvet qui présente un panorama des différents types de photographies argentiques (émulsions panchromatiques noir et blanc, vraies couleurs, infrarouge noir et blanc, infrarouge couleur) et celui de J.G. Boureau qui détaille l'enregistrement des photographies en infrarouge couleurs.

Les images numériques de télédétection

Aujourd'hui, l'imagerie numérique est devenue la norme. L'enregistrement du rayonnement réfléchi par la surface terrestre est réalisé simultanément pour les différentes bandes spectrales dans un fichier qu'on appelle « plan image » de la bande concernée (ou – par simplification – « canal » ou même « bande »). Les données fournies aux utilisateurs (qui résultent d'opérations réalisées « à la sortie » des capteurs ou sur les stations de réception des données de satellites) sont des images, c'est-à-dire des représentations planes de l'espace.

Chaque image numérique est une matrice composée, pour chaque bande spectrale, de « pixels » (abréviation du terme anglais « *picture elements* ») organisés en lignes et en colonnes. Chacun de ces pixels porte une valeur numérique qui représente la mesure par le capteur de l'énergie réfléchie par l'unité de surface correspondante sur le terrain (figure 4). Cette valeur numérique est appelée « compte numérique » ou « valeur radiométrique ».

SATELLITES OPERATIONNELS OU LANCEMENT PROCHE		BASSE RESOLUTION SPATIALE		HAUTE RESOLUTION SPATIALE					
Nom du satellite		TERRA / AQUA	SPOT 4 & SPOT 5	LANDSAT 5	LANDSAT 7	SPOT 4	SPOT 5	Formosat 2	SPOT 6
Capteur(s)		MODIS	VEGETATION	TM	ETM+	HRVIR	HRVIR		HRVIR
Date de lancement		1999 (TERRA) 2002 (AQUA)	"Spot 4 : 1998 Spot 5 : 2002"	1984	1999	1998	2002	2004	prévue 2012
Bandes spectrales	panchromatique				1 bande	1 bande	1 bande	1 bande	1 bande
	multispectral	36 bandes 36 bandes spectrales de 400nm (bleu) à 14,4 microns (IR thermique)	4 bandes Bleu, Rouge, Proche IR, Moyen IR	6 bandes Bleu, Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR 1, Moyen IR 2, IR thermique	6 bandes Bleu, Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR 1, Moyen IR 2, IR thermique	4 bandes Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR	4 bandes Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR	4 bandes Bleu, Vert, Rouge, Proche IR	4 bandes Bleu, Vert, Rouge, Proche IR
Résolution spatiale (au nadir*)	panchromatique				15 m	10 m	2,5 m & 5 m	2 m	1,5
	multispectral	250 m, 500 m et 1 Km selon les bandes spectrales	1 Km	30 m (120 m pour l'IR thermique)	30 m (60 m pour l'IR thermique)	20 m	10 m (20 m pour le Moyen IR)	8 m	6
"Taille de la scène (au nadir*)"		2330 kmx10 km	2200 Km	173 km X 180 km	173 Km x 180 Km	60 Km x 60 Km	60 Km x 60 Km	24 Km x 24 Km	60 Km
Altitude		705 Km	822 Km	705 Km	705 Km	822 Km	822 Km	891 Km	694
"Possibilité de programmation spécifique de la prise de vue"						OUI	OUI	OUI	OUI
Fréquence de revisite théorique au nadir*		1 jour (proche équateur)	1 jour	16 jours	16 jours	26 jours	26 jours		
Fréquence théorique de revisite hors nadir* (avec programmation spécifique)		-	-	-	-	5 jours	5 jours	1 jour	1 j en combinan

* Le nadir correspond au point situé à la verticale sous le capteur. Dans le cas de satellites "programmables", la fréquence de revisite hors programmation n'est généralement pas programmable.
 ** Le red-edge correspond au domaine spectral situé à la limite du rouge et du proche infrarouge, dans lequel la courbe de réflectance de la végétation présente une forte augmentation.

Tab. 1 : caractéristiques de quelques systèmes satellitaires actuels et futurs d'observation

Principales sources utilisées :

document "caractéristiques des satellites d'observation de la terre", de Stéphane Dupuy - Cirad UMR TETIS (http://tetis.teledetection.fr/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=204&Itemid=77)
<http://eoedu.belspo.be/fr/satellites/index.htm>
<http://www.spotimage.com/web/fr/54-produits-et-services.php>

Les caractéristiques des données de télédétection

L'offre de données de télédétection (tableau 1) est de plus en plus variée ; il faut savoir en déchiffrer les caractéristiques pour déterminer celles qui conviennent le mieux à tel ou tel projet.

Résolution spatiale, résolution spectrale

La surface représentée au sol par chaque pixel définit la **résolution spatiale** du système : elle est par exemple de 1 km pour les capteurs Vegetation du satellite SPOT et de 2,5 m pour le capteur panchromatique du même satellite. On dit souvent que la résolution spatiale correspond au plus petit objet observable sur l'image, ce qui est abusif car, pour bien détecter mais aussi bien localiser un objet, la taille du pixel doit être *plus fine* que celle de l'objet.

La **résolution spectrale** de l'image se définit par le nombre (et la largeur) des bandes spectrales auxquelles les

capteurs sont sensibles. Les photographies aériennes numériques les plus récentes sont réalisées dans 4 bandes spectrales (bleu, vert, rouge et proche IR). Les systèmes satellitaires d'observation de la terre disposent également de capteurs pour ces 4 bandes spectrales (on parle de capteurs multispectraux ou de données multispectrales), mais aussi d'un capteur panchromatique, et parfois d'autres bandes spectrales (voir tableau 1). La finesse des différences d'énergie que peut distinguer un capteur est désignée sous le terme de « résolution radiométrique ».

Résolution temporelle

Les principaux satellites d'observation des milieux terrestres effectuent des rotations en orbite autour de la terre afin de couvrir successivement l'ensemble du globe¹ ; il y a donc entre deux « prises de vue » du même point un intervalle de temps qu'on appelle **résolution temporelle**. Elle varie de 1 jour (capteurs SPOT Vegetation) à 16 jours (satel-

lites Landsat) ou 26 jours (capteurs SPOT Haute Résolution Visible et Infrarouge ou HRVIR). En général, une très forte fréquence de revisite (un à quelques jours) n'est possible qu'avec des capteurs à large champ de vision (ou « fauchée »), donc à faible résolution spatiale.

Les satellites programmables offrent des possibilités d'améliorer la résolution temporelle. C'est le cas des nouveaux satellites dits « agiles », dont les capteurs peuvent être orientés « à la demande » pour observer un site d'intérêt particulier à une période spécifiée. Les capteurs HRVIR des satellites SPOT 4 et 5 fonctionnent sur ce principe, de même que les satellites Ikonos ou Worldview. En contrepartie, ces systèmes orientables présentent trois inconvénients. Le premier est de ne pas permettre en même temps l'acquisition des images du site situé à la verticale du satellite, ce qui « défavorise » les zones n'ayant pas fait l'objet d'une programmation spécifique et réduit

¹ Seuls les satellites géostationnaires observent en continu le même point du globe terrestre, mais ils sont utilisés dans le domaine météorologique et leur résolution spatiale est très faible.

		TRES HAUTE RESOLUTION SPATIALE							
SPOT 7	SENTINEL 2 (2 satellites)	KOMPSAT 2	RapidEye (5 satellites)	IKONOS 2	GeoEye 1	Quick Bird	World View 1	World View 2	PLEIADES (2 satellites)
HRVIR									HR
prévue 2014	prévue 2012	2006	2008	1999	2008	2001	2007	2009	Pleiade HR1 : prévue fin 2011 Pleiades HR2 : prévue début 2012
1 bande		1 bande		1 bande	1 bande	1 bande	1 bande	1 bande	1 bande
4 bandes	*13 bandes	4 bandes	5 bandes	4 bandes	4 bandes	4 bandes		8 bandes	4 bandes
Bleu, Vert, Rouge, Proche IR	4 bandes / Visible 6 bandes / Proche IR 3 bandes / Moyen IR	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR	Bleu, Vert, Rouge, red-edge**, Proche IR	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR		Bleu (2 canaux), Vert, Jaune, Rouge, red-edge**, Proche IR (2 canaux)	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR
m		1 m		1 m	0,41 m	61 cm	50 cm	46 cm	70 cm
m	10 m à 30 m selon les bandes spectrales	4 m	6,5 m	4 m	1,65 m	2,4 m		1,84 m	2 m
x 60 Km	290 Km	15 Km x 15 Km	25 Km x 25 Km	11 Km x 11 Km	15 Km x 15 Km	16,5 Km x 16,5 Km	16 Km x 16 Km	16,4 Km x 16,4 Km	20 Km x 20 Km
Km	786 Km		630 Km	680 Km	681 Km	450 Km	496 Km	770 Km	
	OUI pour situations d'urgence	OUI		OUI					OUI
	5 j à l'équateur (avec 2 satellites)	28 jours		14 jours	8 jours				
t les 2 satellites	1-3 jours	3 jours	1 jour (combinaison des 5 satellites)	2-3 jours	3 jours	3-7 jours	2-5 jours	1-4 jours	*2 jours avec 1 satellite quotidien avec les 2"

indiquée par les fournisseurs de données
entation,

de la terre dans le domaine optique (les satellites à capteurs RADAR ne sont pas listés ici)

également l'acquisition d'archives régulière : ces satellites ne sont pas conçus pour réaliser en routine des images sur la totalité d'un territoire (contrairement aux satellites comme Landsat ou le futur Sentinel2 de GMES). Le second est d'avoir une résolution spatiale dégradée en visée oblique. Le troisième est d'engendrer des effets directionnels complexes et qui ne peuvent pas être corrigés, liés à l'angle sous lequel un objet est vu par le capteur. Cela concerne essentiellement les objets d'une certaine hauteur (bâtiments, arbres) et peut limiter les possibilités de distinguer ou de caractériser certains types d'objets ou engendrer des erreurs dans les résultats des traitements.

Par ailleurs la fréquence effective de prise de vue sur un même site dépend très fortement des conditions météorologiques : en effet, les bandes spectrales utilisées sont très sensibles aux perturbations atmosphériques. Les nuages notamment (opaques pour les capteurs) ou les

brumes (qui dégradent la finesse de l'information) rendent souvent les images inutilisables. Pour les satellites programmables, il faut également tenir compte du délai minimal entre la demande de programmation par le « client » (l'utilisateur final) et la prise de vue par le satellite : généralement de quelques jours² à quelques semaines.

Fauchée ou emprise des images
L'emprise géographique couverte par une image, ou « scène », varie de quelques centaines de mètres, dans le cas des photographies aériennes, à quelques centaines de kilomètres, pour les satellites à large champ de vision. Cette dimension, appelée « fauchée », et la résolution spatiale sont liées par les contraintes de stockage des données (sur le système embarqué) et de transfert (vers la station au sol) : les satellites à résolution spatiale fine ont une fauchée plus faible que celle des satellites à basse résolution spatiale (tableau 1).

Stéréoscopie
Visualiser ou calculer le relief de surface de la végétation ne peut se faire - dans le cas de données images - que par stéréoscopie, ce qui suppose que tout point du terrain soit vu selon deux angles de visée différents. La prise de vue stéréoscopique nécessite des missions aériennes conçues spécifiquement (voir l'article de P. Bouvet dans ce dossier) ou des systèmes particuliers d'acquisition par satellite, comme SPOT 4 et 5 qui sont capables de viser « en avant » et « en arrière » du point situé à leur verticale. La précision des modèles numériques de surface (MNS) ainsi obtenus dépend des caractéristiques géométriques de la prise de vue (angle de visée, distance entre deux prises de vues successives), et également de la résolution spatiale des capteurs. D'une manière générale, les MNS issus de données satellitaires sont moins précis que ceux issus de prises de vues aériennes.

2 Pour certains satellites, ce délai peut - exceptionnellement - être réduit à quelques dizaines d'heures, notamment en cas de crise majeure, dans le cadre de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures ».

Préparer les données avant utilisation : prétraitements géométriques et radiométriques

Les données brutes ne sont pas exploitables telles quelles. Deux types de préparation (ou « pré-traitements ») sont généralement nécessaires : des traitements géométriques visant à rendre les images superposables à un référentiel cartographique, pour pouvoir les combiner à d'autres informations géographiques, et des traitements radiométriques pour corriger les effets qui altèrent le rayonnement mesuré et permettre la comparaison d'images acquises à des dates différentes ou sur des zones différentes. En outre, lorsque plusieurs images sont nécessaires pour couvrir la zone d'étude, il faut les assembler, ou « mosaïquer ». Enfin lorsque les bandes spectrales de l'image ont des résolutions spatiales différentes, il est souvent utile de la transformer à la résolution la plus fine.

Rendre les images superposables à une carte

La géométrie des images « brutes » résulte de celle du système d'acquisition des données : orientation de la trajectoire de prise de vue par rapport au repère cartographique, optique du capteur, position dans l'espace, angle de visée. Elle est aussi influencée par le relief : différences d'échelles en fonction de l'altitude, c'est-à-dire de la distance entre l'objet et le capteur, effet de pente. Il faut donc un processus dit d'orthorectification pour rendre les images superposables à une carte plane.

Les données satellitaires accessibles sont généralement corrigées des distorsions liées à la géométrie du capteur. L'orthorectification nécessite alors des points de calage dont les coordonnées cartographiques sont connues : ce sont des objets ou des parties d'objets repérés sur carte (ou relevés sur le terrain) et qui sont bien visibles sur

l'image. La connaissance de leurs coordonnées cartographiques (X, Y) et le repérage de leurs coordonnées sur l'image (n° de ligne, n° de colonne) permet au système de traitement d'image de calculer la fonction mathématique de transformation entre coordonnées images et coordonnées cartographiques (figure 6). En zone accidentée, il faut aussi faire intervenir un modèle numérique de terrain décrivant le relief à une résolution spatiale aussi proche que possible de celle de l'image à traiter. La formule de transformation des coordonnées est alors plus complexe.

Selon le même principe, l'orthorectification des images aériennes nécessite des points de calage de coordonnées cartographiques connues ainsi que la prise en compte du relief, mais aussi celle des caractéristiques précises de la caméra (distance focale, points géométriques caractéristiques du système optique ; voir aussi encadré).

Les fournisseurs de données satellitaires proposent généralement en standard des données orthorectifiées. L'IGN et l'IFN diffusent également sous forme d'ortho-images (BDOrtho®) les campagnes photographiques récentes. Pour les missions photographiques spécifiques, l'orthorectification est une prestation complémentaire à prévoir (et donc à chiffrer dans le projet).

Corriger les effets atmosphériques ou d'éclairement

La valeur ou compte numérique de chaque pixel, qui représente l'énergie reçue depuis la surface élémentaire de terrain correspondante, varie selon la nature de l'objet visé mais d'autres facteurs interviennent aussi : l'élévation solaire (donc la date de prise de vue), l'angle sous lequel la surface du sol reçoit l'éclairement solaire (relief), les effets atmosphériques (absorption et diffusion), ainsi que de l'environnement de l'objet considéré qui peut réfléchir une partie du rayonnement vers l'objet observé (figure 7 page 10).

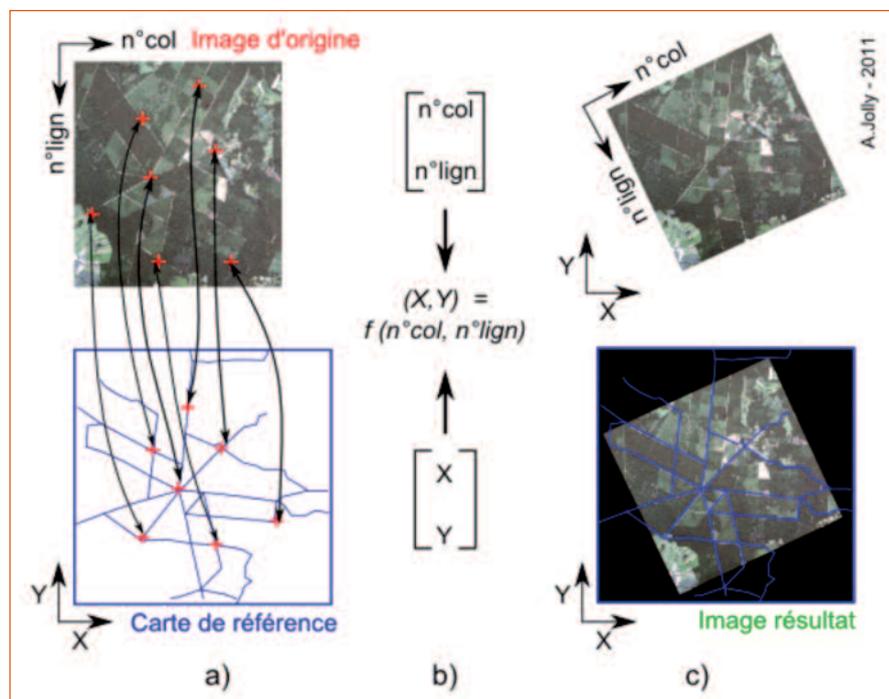


Fig. 6 : principe de la correction géométrique d'une image pour la rendre superposable à une carte (ici sans prise en compte du relief)

Sur l'image d'origine les pixels sont repérés par leurs numéros de ligne et de colonne ; a) saisie de points de calage homologues sur la carte et sur l'image ; b) le système d'équations correspondant donne une formule qui permet de calculer les coordonnées cartographiques X et Y à partir des numéros de lignes et de colonnes ; c) l'application de cette formule donne alors une nouvelle image, superposable à la carte.

Pourquoi les arbres ou les bâtiments paraissent-ils penchés sur les photographies aériennes, même après orthorectification ?

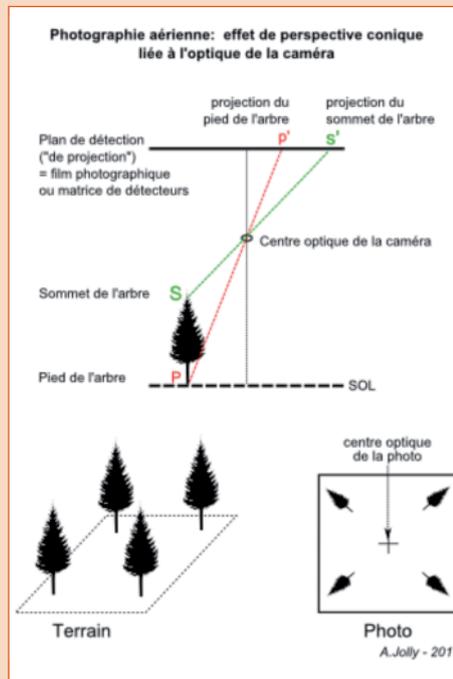
La photographie aérienne, qu'elle soit analogique ou numérique repose sur un système composé d'une optique et d'un plan de « détection » : film photographique ou matrice de détecteurs. Sur ce plan de détection, les objets du monde réel sont « projetés » selon une perspective conique définie par l'optique de la caméra.

Les objets en élévation par rapport au sol, qui sont perçus non seulement par leur sommet, mais aussi par leur côté, apparaissent alors « penchés » vers l'extérieur du cliché, cet effet augmentant avec leur éloignement par rapport au centre optique de la caméra. Plus la distance focale de l'appareil est faible, plus cet effet est important, c'est pourquoi on préconise d'utiliser une focale la plus grande possible lors de la réalisation des missions aériennes.

Le processus d'orthorectification permet de rendre superposables à une carte les éléments situés au niveau du sol. En revanche, il ne corrige pas ces effets de dévers spécifiques aux objets élevés.

Avec le développement des techniques numériques, une nouvelle modalité, la « true orthophotography » (ou orthophotographie vraie) permet de corriger ces effets. Elle nécessite des prises de vue avec un très fort recouvrement stéréoscopique (bien supérieur à celui des missions aériennes habituelles de l'IGN et de l'IFN) et utilise non seulement un modèle numérique de terrain (qui doit alors être très précis), mais aussi le modèle numérique de surface de la canopée, celui-ci pouvant être calculée à partir de la stéréoscopie, ou dans certains cas à partir de données lidar associées. C'est une technique coûteuse (à la fois en temps de vol et en temps de traitement) et lourde à mettre en œuvre.

Les travaux de télédétection nécessitent parfois de comparer finement des images d'une même zone prises à des dates différentes ou des images de zones différentes, et certaines applications exigent la connaissance de la réflectance. Une correction radiométrique des données s'impose alors. C'est une opération complexe qui nécessite la modélisation du relief, de l'atmosphère, de la surface du sol. Les modèles disponibles pour les effets atmosphériques sont difficiles à mettre en œuvre et il n'existe pas de modèle unique validé dans toutes les conditions : c'est pour-



quoi les fournisseurs de données proposent rarement des images pré-corrigées de ces effets atmosphériques.

Pour les cas simples, ou si on n'a pas besoin de convertir les comptes numériques en réflectance, il existe des façons plus empiriques mais aussi plus limitées de corriger certains effets radiométriques : compensation des effets d'éclairage dus au relief par modélisation des ombres projetées, normalisation rendant comparables les comptes numériques d'images différentes.

Éliminer les zones sous les nuages et leurs ombres

À l'exception des systèmes radar (non abordés ici), les capteurs sont incapables de mesurer un signal à travers les nuages ; or il n'est pas toujours possible d'obtenir une image sans nuages. Pour éviter des artefacts lors des traitements numériques, il est alors nécessaire de masquer ou détourner les nuages eux-mêmes (qui se traduisent par des valeurs radiométriques très élevées dans les canaux du visible), ainsi que leur ombre au sol. Cette opération peut être semi-automatique ou manuelle, lorsque la zone d'étude est restreinte ou peu nuageuse. De même, il est parfois nécessaire de masquer les nappes de brume ou les panaches de fumée (usines, incendies...), ce qui est plus difficile que pour les nuages compacts. Lors des traitements ultérieurs, les zones masquées seront considérées comme « sans information ».

Assembler les images

Quand la couverture de la zone d'étude nécessite plusieurs images, on cherche à les assembler pour constituer un fichier unique sur lequel porteront les traitements. Cet assemblage, ou « mosaïquage », se fait à partir des images orthorectifiées. Les conditions de prise de vue (éclairage, angle de visée, état de l'atmosphère) sont différentes d'une scène à l'autre : ces variations sont assez faibles entre les photographies aériennes d'une même mission mais elles sont évidemment plus fortes pour les prises de vues réalisées à des dates différentes. Il en résulte entre les images des différences de radiométrie, qui sont généralement bien visibles aux zones de raccord. Pour atténuer ces effets, un prétraitement complémentaire d'harmonisation (ou homogénéisation) radiométrique est possible, mais il a des limites : d'une part il altère sensiblement les comptes numériques et peut diminuer les possibilités ultérieures de discrimination sur l'image, d'autre part il ne suffit pas toujours à atténuer les différences, notamment

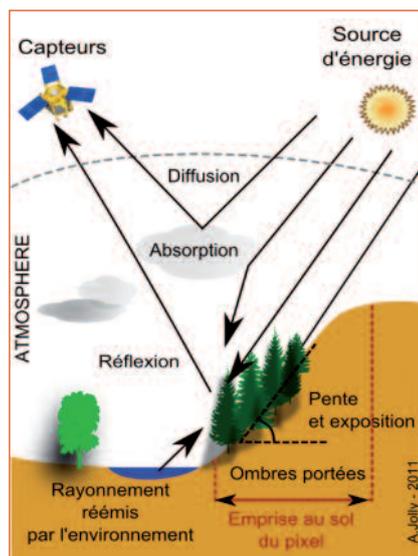


Fig. 7 : principaux facteurs influençant la réflectance d'une surface élémentaire (d'après Caloz et Collet, 2001)

Diffusion et atténuation par l'atmosphère, effets du relief et des ombres portées, rayonnement réfléchi par l'environnement proche

quand les dates de prise de vue sont différentes. L'opération est donc plutôt réservée à la perspective d'une analyse visuelle des données. Pour une analyse numérique, notamment pour des images satellitaires, il est souvent préférable d'éviter l'harmonisation radiométrique et d'analyser chaque image séparément pour en extraire l'information utile (occupation du sol, types de peuplements...), puis d'assembler les résultats finaux.

Ré-échantillonner les données multirésolution à la résolution spatiale la plus fine

Lorsque les données à traiter comportent des bandes spectrales de résolutions spatiales différentes, il est souvent utile de recalculer l'ensemble du jeu de données la résolution la plus fine. L'opération (fusion de données multirésolution) consiste en un traitement géométrique et radiométrique relativement complexe : ré-échantillonnage des images en subdivisant les pixels des bandes de résolution la plus grande, recalcul des comptes

numériques de ces nouveaux pixels, en intégrant les valeurs de la bande de résolution la plus fine.

Augmenter l'information potentielle par le calcul de néo-canaux

Enfin, en plus des canaux existants, il est possible de créer des néo-canaux par des calculs mathématiques, notamment des combinaisons de canaux, qui peuvent être ensuite utilisés dans les traitements : calculs d'indices tels que les « indices de végétation » qui font ressortir l'intensité de l'activité chlorophyllienne (dont l'indice NDVI, utilisé dans ce dossier par V. Chéret et al., V. Parmain et Y. Duché), l'« indice de brillance » qui met en évidence les sols nus ; calculs de « filtres locaux » destinés à accentuer les contrastes locaux ou au contraire à les atténuer, etc.

Extraire de l'information : l'analyse des données de télédétection

À l'issue des pré-traitements, l'analyse proprement dite ou traitement des données peut débuter.

Explorer d'abord l'information accessible, stratifier la zone d'étude

Il est recommandé de passer par une **étape préalable d'exploration** des données : visualisation des images et vérification de leur qualité (par exemple pour détecter d'éventuels nuages ou anomalies), vérification de la superposition avec les autres données géographiques du projet, repérage et observation de secteurs d'intérêt particulier au regard de l'objectif de l'étude. Les secteurs connus représentatifs de l'information recherchée méritent une attention méticuleuse : affichage de chaque plan image séparément, compositions colorées diverses pour vérifier l'information accessible et identifier empiriquement les canaux *a priori* les plus intéressants. Cette exploration préalable peut aussi mettre en œuvre quelques traitements numériques simples.

Afin de réduire certaines sources de confusion, il peut s'avérer nécessaire de **stratifier la zone d'étude** et de traiter ensuite chacune des strates séparément : par exemple traiter séparément les versants exposés au soleil et les versants à l'ombre, les secteurs agricoles et les secteurs forestiers... Cette stratification repose la plupart du temps sur des informations « exogènes » : modèle numérique de terrain, carte générale de l'occupation du sol.

Objectif le plus courant de l'analyse d'image : cartographier des catégories (classes)

En général, l'analyse des images vise à identifier des classes (types de formations végétales, niveaux de dégâts par exemple) permettant la cartographie du phénomène étudié : d'où le terme de *classification*. La typologie recherchée est établie *a priori*, en fonction des besoins de l'étude. Différentes modalités d'analyse sont possibles, et peuvent être combinées entre elles : analyse visuelle (photointerprétation) ou analyses numériques. Les analyses numériques les plus courantes, et que nous décrivons ci-après, consistent à affecter chaque pixel à une des classes possibles (classification « pixel à pixel »). Elles sont bien adaptées quand la taille du pixel est sensiblement équivalente à la taille minimum des objets à cartographier. Les images à très haute résolution spatiale, dans lesquelles les objets à cartographier sont constitués de nombreux pixels de réponse spectrale différente, requièrent des méthodes spécifiques, dites « orientées objet » (encadré).

Il existe également d'autres modalités d'analyse, par exemple la recherche ciblée d'objets d'intérêt, souvent utilisée dans le domaine militaire, qui ne sont pas présentées ici bien que certaines puissent s'avérer utiles dans le domaine forestier (par exemple recherche de taches de mortalité ou d'arbres morts). Enfin d'autres applications visent à calculer la valeur locale

(sur un pixel ou une zone) d'un phénomène : indice foliaire d'une culture, biomasse, concentration d'un polluant dans l'eau. Les méthodes d'analyse correspondantes, qui ont recours à la modélisation (relations entre les informations physiques mesurées par les capteurs de télédétection et le phénomène biophysique étudié, intégrant généralement des données exogènes aux images de télédétection), ne sont pas abordées ici.

Analyse visuelle (photointerprétation)

La photointerprétation des images repose sur l'observation des teintes, des formes, des tailles, de la texture (alignements plus ou moins réguliers, granularité...), de la répartition dans l'espace des formes observées (juxtaposition), mais aussi du contexte : connaissance de la zone géographique, des essences présentes, du type de gestion pratiquée (voir l'article de J.G. Boureau dans ce dossier). Elle est grandement facilitée par les systèmes numériques, notamment les logiciels SIG : ils permettent, sur un mode interactif et dynamique, d'améliorer la lisibilité des images, de zoomer, d'afficher d'autres informations numériques complémentaires (cartes, réseau de dessertes, parcellaire...).

Afficher les images en couleur : les compositions colorées

Sur un écran d'ordinateur, les images peuvent être affichées canal par canal, en niveaux de gris variant du noir, pour la valeur radiométrique la plus faible, au blanc pour la valeur la plus élevée. Quand plusieurs canaux sont disponibles, on privilégie l'affichage en couleur, en combinant les canaux par groupe de trois : un canal en dégradé de rouge, un autre en dégradé de vert, et le troisième en dégradé de bleu. Les photointerprètes sont bien habitués à deux de ces combinaisons : la composition en « vraies couleurs » qui utilise les bandes spectrales du rouge, du vert et du bleu et la composition en « infrarouge cou-

Les méthodes d'analyse d'images orientées-objets

Sur une image à très haute résolution spatiale (métrique ou submétrique), chaque objet du monde réel se compose d'un grand nombre de pixels, chacun pouvant avoir des caractéristiques spectrales sensiblement différentes du pixel adjacent. Les analyses « pixel à pixel » ne sont donc pas adaptées pour identifier et caractériser les objets du monde réel. On a alors recours aux méthodes orientées-objets qui analysent l'agencement général des pixels pour localiser et décrire des objets. Il existe divers types d'approches orientées-objets, et de nombreuses recherches leur sont actuellement consacrées. Les méthodes les plus diffusées actuellement (implémentées en particulier dans des logiciels commerciaux opèrent en 4 étapes : a) la segmentation de l'image en groupes de pixels ou segments, b) la caractérisation de ces segments et c) leur classification en catégories, d) des post-traitements pour améliorer la classification.

La segmentation de l'image consiste à regrouper les pixels adjacents de caractéristiques spectrales proches pour créer des segments (ou « objets de l'image »). D'après le contexte, l'opérateur choisit pour cela un certain nombre de paramètres qui influencent la taille des segments, leur homogénéité et leur forme (ces trois critères étant liés entre eux). Cette étape aboutit généralement à un nombre de segments supérieur au nombre d'objets réels tel que le percevrait un photointerprète : par exemple un champ cultivé peut correspondre à plusieurs segments, du fait de l'hétérogénéité de l'état de la culture. Certains logiciels permettent à ce stade de constituer plusieurs niveaux de segmentations, plus ou moins fines, et de gérer ensuite les relations entre les segments des différents niveaux.

La caractérisation des objets consiste à calculer pour chaque segment des « attributs », à partir des valeurs radiométriques des pixels qui le composent (par ex. valeurs moyennes, indices de texture), mais aussi à partir de sa géométrie (surface, périmètre, compacité, etc.), de sa proximité spatiale avec d'autres segments ou des caractéristiques des éventuels segments de niveau supérieur ou inférieur...

La classification s'opère quant à elle de manière comparable aux classifications pixel à pixel (classification par seuillage, classification par comparaison avec des échantillons), la différence principale étant qu'elle traite chaque segment dans sa totalité et non chaque pixel individuellement. Avec certains logiciels cette étape peut intégrer le principe de la « logique floue » qui permet de gérer les « transitions » entre classes (voir l'article de V. Breton et al. dans ce dossier).

Enfin, l'étape de post-traitement comprend généralement le regroupement des segments pour créer des « objets de l'image » représentant au mieux les objets du monde réel : par exemple les différents segments d'un champ cultivé ayant des caractéristiques proches seront fusionnés.

leurs » qui utilise les bandes spectrales du proche infrarouge, du rouge, et du vert. Mais il peut être parfois intéressant de tester des compositions moins classiques, associant notamment un canal du visible avec le proche et le moyen infrarouge (quand on peut en disposer : images Landsat), pour mieux révéler certains types de végétation.

Améliorer le contraste

Les images brutes sont généralement optimisées pour rendre compte de l'information globale sur l'ensemble d'une scène, avec un contraste « moyen ». Si on s'intéresse plus spécifiquement à une partie de

la scène ou à une thématique particulière, on a alors besoin d'optimiser la visualisation pour ce secteur ou cette thématique.

De nombreuses fonctions permettent d'augmenter le contraste. Elles requièrent un peu d'habitude car les visualisations ainsi modifiées peuvent être parfois trompeuses (exagération extrême du contraste perturbant la lisibilité au lieu de l'améliorer, saturation de l'information sur certains types d'occupation du sol...). Enfin, l'opération n'est pas « miraculeuse » : un contraste qui n'a pas été préalablement détecté par le capteur ne sera pas visible à l'écran, quel que soit le type d'affichage choisi.

**Analyse numérique :
classification automatique
ou semi-automatique**

Contrairement à l'interprétation visuelle, l'analyse numérique permet de traiter l'ensemble de l'image (ou de la zone d'étude) sans nécessiter en permanence l'intervention d'un opérateur. Toutefois, le rôle de l'opérateur reste essentiel aussi dans ces processus, ne serait-ce que pour choisir la modalité de traitement la plus adaptée. Certaines classifications sont totalement automatiques (dites « non supervisées »), d'autres nécessitent l'utilisation de zones de référence connues.

Ces traitements numériques utilisent soit l'ensemble des canaux disponibles, soit une sélection de ces canaux, en fonction de l'intérêt qu'ils représentent pour le thème d'étude. L'utilisateur s'appuie pour cela sur des indications bibliographiques, sur son expérience propre ou sur une analyse préalable des caractéristiques spectrales de secteurs (ou objets) connus de sa zone d'étude.

Classification automatique (non supervisée)

Les classifications automatiques sont généralement utilisées lorsqu'on ne dispose pas de connaissances a priori sur la zone d'étude. Le logiciel constitue alors des classes, en recherchant les pixels dont les réponses radiométriques sont proches. Le processus est généralement itératif et stoppe quand il n'est plus possible de créer des classes suffisamment distinctes (selon un critère qui peut être paramétré par l'opérateur), ou quand un nombre de classes fixé initialement par l'utilisateur est atteint. Il existe plusieurs algorithmes de classifications : hiérarchiques, par centres mobiles, ISODATA, etc.

S'il n'intervient pas directement (ou très peu) dans la classification elle-même, l'opérateur joue ensuite un rôle essentiel pour interpréter les classes ainsi obtenues : leur donner

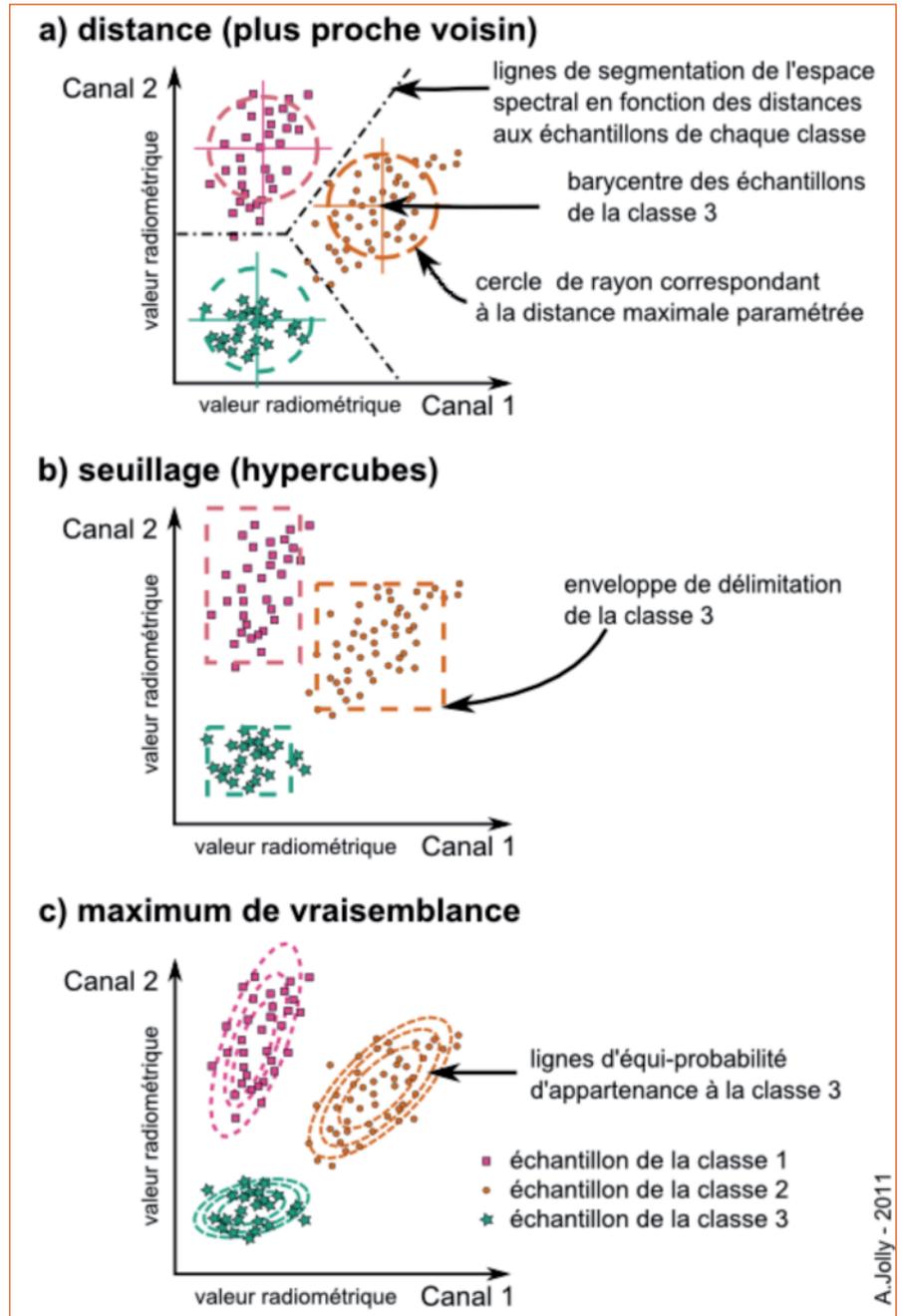


Fig. 8 : principe de trois méthodes de classification supervisée : (a) par distance (spectrale) ou « plus proche voisin »; (b), par seuillage (ou « hypercubes »), (c) par maximum de vraisemblance (d'après Caloz et Collet, 2001)

- Chaque point représente un échantillon, sa position sur le graphique correspondant à sa « signature spectrale » (ici dans deux canaux) et son symbole à la classe qu'il décrit.
- a) la méthode de distance segmente l'espace des signatures spectrales en fonction de la distance spectrale de chaque point au barycentre de la classe. Chaque pixel est alors affecté à la classe dont il est le plus proche. Généralement, on paramètre pour chaque classe une distance maximale centrée sur le barycentre au-delà de laquelle les pixels restent non classés (sur l'exemple, le seuil de distance est identique pour chaque classe)
 - b) la méthode du seuillage consiste à définir pour chaque classe des seuils (minimum et maximum) de valeurs radiométriques en veillant à éviter les chevauchements entre classes. Les pixels dont les valeurs radiométriques ne correspondent à aucune des emprises (ou hypercubes) ainsi définies restent non classés.
 - c) La méthode du maximum de vraisemblance utilise la théorie des probabilités conditionnelles en calculant, à partir des échantillons, des limites d'équi-probabilité d'appartenance à la classe concernée. La comparaison des valeurs spectrales avec ces zones d'équi-probabilité permet alors d'affecter chaque pixel à la classe à laquelle il a la plus grande probabilité d'appartenir. Au-delà d'un seuil de probabilité paramétré par l'opérateur, les pixels restent non classés.

A.Jolly - 2011

une signification concrète, regrouper manuellement des classes qu'il considère proches au regard de sa thématique de travail.

À l'usage, les classifications non supervisées se révèlent souvent décevantes et permettent rarement de mettre en évidence des typologies fines. Elles peuvent toutefois être utiles comme approche préliminaire d'une classification plus élaborée.

Classification semi-automatique avec prise d'échantillon (supervisée)

Les classifications supervisées reposent sur le principe des signatures spectrales. Celles-ci étant dépendantes des conditions d'acquisition des images ou de la situation locale des objets, les signatures des catégories à cartographier sont, dans une première phase dite « d'apprentissage », « modélisées » (ou « calibrées ») pour l'image considérée, d'après des échantillons de caractéristiques connues. Ces échantillons, qui doivent couvrir l'ensemble des classes recherchées et être assez nombreux pour en être « représentatifs », sont repérés préalablement sur le terrain, par photointerprétation ou grâce à d'autres informations géographiques disponibles.

Dans la seconde phase, la classification proprement dite consiste à affecter chaque pixel de l'image à la classe ainsi « calibrée » dont il est spectralement le plus proche. L'opérateur doit alors paramétrer l'algorithme pour définir la modalité d'affectation à une classe : critère de « distance spectrale » (au barycentre de la classe ou à un certain nombre des zones échantillons), seuillage sur les valeurs radiométriques, test statistique (probabilité d'appartenance à une classe : méthode dite « du maximum de vraisemblance ») (figure 8), Si la différence entre les caractéristiques spectrales d'un pixel et chacune des catégories se révèle trop forte (selon un paramétrage préalable fixé par l'opérateur), le pixel reste alors non classé.

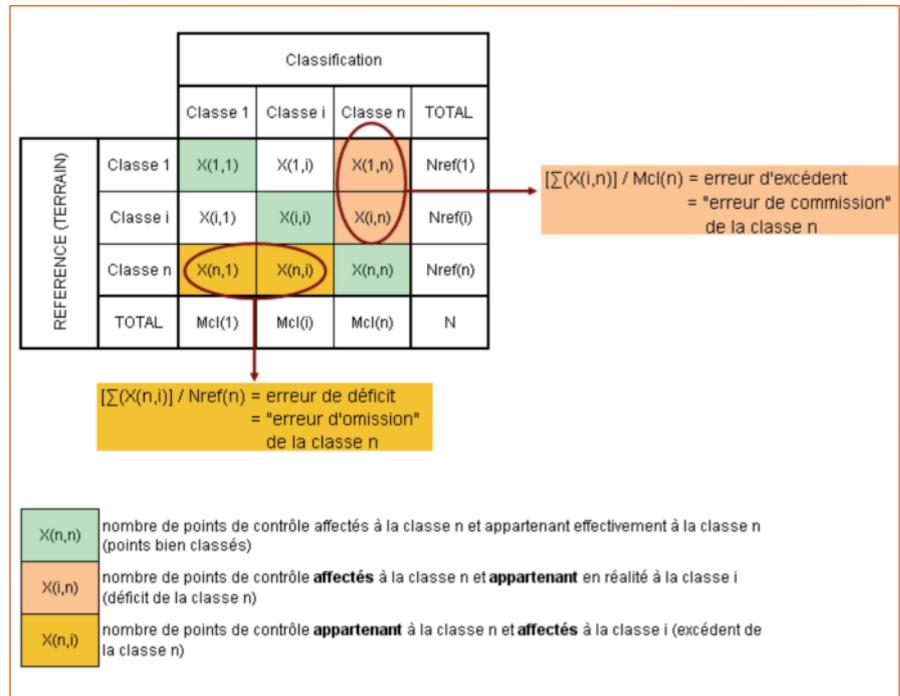


Fig. 9 : principe de calcul d'une matrice de confusion

Pour un ensemble de N points de contrôle, la matrice de confusion est un tableau qui représente :

- en lignes : leur répartition dans les différentes classes « réelles »
 - en colonnes : leur répartition d'après l'algorithme de classification
- Les principaux indicateurs de qualité de la classification calculés à partir de la matrice de confusion (exprimés en %) sont :
- la précision globale = pourcentage total de points bien classés
 - la « précision-utilisateur » = $100\% - \text{total des erreurs d'excédent}$ (l'erreur d'excédent de chaque classe étant calculée comme indiqué sur la figure)
 - la « précision-producteur » = $100\% - \text{total des erreurs de déficit}$ (l'erreur de déficit de chaque classe étant calculée comme indiqué sur la figure)
 - l'indice Kappa qui représente la réduction proportionnelle de l'erreur comparée à l'erreur que produirait une classification totalement aléatoire.

Vérifier les résultats : une étape à part entière

Dans tous les cas (photointerprétation, classification), la fiabilité des résultats doit être vérifiée, selon deux approches possibles : en utilisant des zones échantillon de caractéristiques connues (nécessairement différentes des zones « d'apprentissage » dans le cas d'une classification supervisée) ou bien en tirant au hasard un ensemble de points de vérification, ce qui est préférable d'un point de vue statistique, mais pas toujours aisé à mettre en pratique.

Pour chaque point (ou zone) de vérification il s'agit alors de comparer la classe à laquelle l'algorithme l'a

affecté et la catégorie à laquelle il appartient « réellement ». Cette « réalité terrain » peut être contrôlée sur le terrain, ou vérifiée par photointerprétation de l'image elle-même (ou d'une image plus précise quand il est possible d'en disposer sur une partie de la zone d'étude). On obtient alors un tableau, appelé « matrice de confusion » (figure 9) qui donne lieu au calcul de différents indicateurs pour évaluer la qualité de la classification : taux de pixels bien classés ; taux de pixels de classe connue effectivement affectés à cette classe ; taux de pixels affectés à une classe appartenant effectivement à cette classe ; indice kappa qui compare la matrice de confusion à ce que donnerait une classification totalement aléatoire.

Lors de la validation, il est important d'analyser les erreurs constatées. Cela conduit souvent à vérifier l'échantillon d'apprentissage (certaines zones échantillon sont-elles hétérogènes ? certaines classes ne sont-elles pas décrites par un nombre trop restreint de zones ?) ou à refaire la classification en corrigeant les paramètres. On peut aussi devoir regrouper certaines classes, qui ne peuvent pas être distinguées avec suffisamment de fiabilité (et qui ont une certaine proximité thématique). Enfin il peut s'avérer utile de recourir à des classifications successives selon des règles dites « de logique floue » tenant compte non seulement de la classe « optimale » pour l'affectation d'un pixel (classe à laquelle il a la plus forte probabilité d'appartenir, dans le cas de la méthode du « maximum de vraisemblance »), mais aussi des autres classes, si les probabilités d'appartenance ne sont pas très différentes.

L'étape finale de post-classification permet également d'améliorer la qualité cartographique du résultat : élimination des pixels isolés (classés ou non classés) pour les regrouper avec les classes des pixels environnants, intégration d'éléments cartographiques connus (par exemple limites de parcelles).

Pour conclure, les points clés d'un projet de télédétection en forêt

Quand faut-il (idéalement) recourir à la télédétection, de préférence à une méthode « 100 % terrain » ? Il n'existe pas une réponse unique à cette question. En dehors des projets de R & D (visant spécifiquement à évaluer les données, les outils ou à développer des méthodes), la télédétection s'avère généralement pertinente quand l'information recherchée n'est pas accessible ou très difficile à relever sur le terrain (observation de la canopée, terrain difficile d'accès), quand la zone d'étude est très étendue, quand il

est nécessaire d'effectuer des observations répétées sur une large surface, de réaliser une cartographie exhaustive d'un territoire, ou une évaluation globale d'un phénomène... Dans tous les cas l'utilisation de la télédétection sera d'autant plus efficace que le projet est préalablement bien préparé. Deux éléments sont alors essentiels : le choix des données et celui des modalités de leurs traitements. Pour guider ses choix, le responsable de projet doit s'appuyer sur des connaissances propres ou celles d'experts, ou sur une analyse bibliographique préalable.

Choisir les données les plus adaptées à un projet

Tout d'abord il identifie les bandes spectrales nécessaires à l'étude du phénomène dont il veut rendre compte. S'agissant de la végétation, ce sont au moins les bandes du bleu, du vert, du rouge et du proche infrarouge, qui sont disponibles sur la plupart des satellites d'observation terrestre. Mais d'autres bandes spectrales, parfois disponibles en plus de ces quatre bandes « standard » peuvent également se révéler intéressantes, par exemple le canal jaune (sur le satellite Worldview 2), pour l'étude de phénomènes saisonniers (sénescence par exemple) ou le moyen infrarouge (satellite Landsat ETM+), sensible à l'humidité des sols et la teneur en eau des végétaux.

Ensuite, la taille des objets à cartographier oriente le choix de la résolution spatiale, sachant que la résolution la plus fine n'est pas forcément la meilleure : certains phénomènes s'observent mieux avec une résolution de 10 à 20 m qu'avec une résolution d'un mètre (c'est le cas par exemple des unités de végétation qui permettent de cartographier la sensibilité aux incendies de forêts ; voir l'article d'Y. Duché). La très haute résolution, qui paraît très séduisante, ne répond pas à tous les besoins forestiers, loin s'en faut.

De même, la taille de la zone d'étude détermine la « fauchée » souhaitable, puisqu'il est préférable de travailler sur une image unique que sur une mosaïque qui complique les traitements et peut diminuer la qualité du résultat. Sur un grand territoire il faudra arbitrer entre fauchée et résolution spatiale.

La nécessité d'une prise de vue à une période bien précise et d'une résolution spatiale élevée (de 1 à 20 m environ) peut orienter, si les délais de réalisation du projet le permettent, vers des données acquises par un satellite programmable, ou vers la réalisation d'une mission aérienne spécifique. Le besoin de données d'archives (par exemple pour réaliser une analyse rétrospective) nécessitera quant à elle de recourir à des données de satellites tels que SPOT 1 et 2, Landsat TM ou ETM+ (ou à l'avenir celles du satellite Sentinel 2 de GMES), ou à rechercher dans les catalogues de données des satellites programmables si la zone d'intérêt a éventuellement déjà été couverte. Si une résolution élevée ne s'impose pas (ce qui est relativement peu fréquent), les données de type Spot Vegetation ou Modis peuvent alors s'avérer utiles.

Au final, le choix des données résulte d'un compromis entre les possibilités techniques des systèmes, les conditions d'acquisition des données (ennuagement), le délai maximal accepté pour disposer des données et... le budget du projet. Le coût des données augmente généralement avec le nombre de bandes spectrales, la finesse de résolution spatiale, la nécessité d'une programmation spécifique et la contrainte de la période de prise de vue (plus elle est courte, plus le coût de programmation est élevé). Il arrive parfois qu'il faille renoncer (cf. article d'Y. Duché, cas d'étude n° 4).

Estimer le coût et les contraintes de préparation et traitement des données

Un budget « serré » peut inciter à réaliser en interne des pré-traitements indispensables à l'exploitation des données. Toutefois, ces opérations requièrent des compétences techniques parfois éloignées de celles des opérateurs « forestiers ». Les grands fournisseurs proposent généralement des produits pré-traités de bonne qualité qui peuvent permettre de gagner du temps, et de se consacrer aux opérations qui font appel aux compétences forestières. Le surcoût correspondant doit donc être évalué au regard du temps qu'on s'épargne. De même, quand certains pré-traitements ne sont pas proposés en standard par les producteurs, il peut s'avérer plus économique de les faire réaliser par un prestataire spécialisé.

Le traitement des données et l'évaluation des résultats constituent le cœur du projet. Leurs modalités doivent être choisies en fonction des informations recherchées, de la taille de la zone d'étude, et aussi des outils bien maîtrisés par l'opérateur, sans céder à la fascination de la technique. Ainsi, la photo-interprétation reste un outil pertinent, en soi ou préalablement à un traitement numérique. Enfin, certains traitements numériques sont des processus complexes, qui nécessitent souvent des ajustements ; il faut les anticiper dans la mesure du possible et prévoir évidemment les indispensables données de terrain, tant pour la mise au point des analyses que pour l'évaluation de leurs résultats.

Une cartographie sans aucune erreur est illusoire, quelle que soit la méthode utilisée, avec ou sans télédétection. Plus l'information recherchée est fine, plus les risques de confusion sont importants, et certaines informations demeurent non accessibles par télédétection (par exemple la qualité des bois, la

composition floristique fine d'un milieu). L'opérateur doit donc être conscient au départ des risques d'erreurs, voire des informations qui ne pourront (très probablement) pas être obtenues, et en informer le destinataire des résultats. Pour cela, il doit s'appuyer sur la bibliographie, sur la veille R & D et les projets « pilotes », sur son expérience propre ou celle de ses collègues...

S'il est essentiel de minimiser les erreurs, cela a un coût : augmentation du nombre d'échantillons, classifications par itérations successives, intégration de données complémentaires (à acquérir ou à relever sur le terrain), etc. Bien que cela soit frustrant, il faut parfois savoir se contenter d'un résultat de télédétection « moyen », tant qu'il reste plus pertinent qu'une étude au sol. Il faut également avoir en tête que les résultats d'une étude de terrain, quelle qu'elle soit, comportent aussi des erreurs. Mais elles donnent rarement lieu à une évaluation des résultats, ce qui rend souvent difficile la comparaison avec les méthodes qui font appel à la télédétection.

Télédétection et terrain : des informations complémentaires

Utilisée à bon escient et avec méthode, la télédétection est un outil très performant. Les évolutions techniques, la multiplication des sources, la diffusion généralisée de certaines données (comme aujourd'hui la BDOrtho®), les algorithmes de plus en plus performants des logiciels de traitement, les capacités accrues de stockage et gestion de données numériques, et les travaux de R & D ont déjà conduit à un développement important de ses applications opérationnelles. Pour autant, la télédétection se substitue-t-elle aux observations de terrain ? Certainement pas, ne serait-ce que parce qu'il faut des connaissances de terrain pour « calibrer » les traitements ou en évaluer les résultats. En outre, toutes les informations ne sont pas acces-

sibles par la télédétection. En revanche, elle peut aider à préparer des phases de terrain, à les alléger ou à les concentrer sur des secteurs ou des types de relevés bien précis. L'avenir est donc à la complémentarité des sources possibles : relevés de terrain, télédétection, données géographiques, statistiques ou issues de modélisation... Et surtout, leur bonne utilisation, la mise au point des traitements et l'interprétation des résultats nécessitent de bonnes connaissances forestières.

Anne Jolly

Chargée de R&D Télédétection - SIG
ONF, pôle R&D de Nancy

Bibliographie

Ressources Naturelles Canada, Centre Canadien de télédétection (sans date). Tutoriel : Notions fondamentales de télédétection, 266p. (http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php)

L'observation de la terre pour tous : <http://eoedu.belspo.be/>

Girard M.-C., Girard C.-M., 2004. Traitement des données de télédétection. Paris : Dunod. 528p.

Bonn F., Rochon G., 1996. Précis de télédétection – Volume 1 – principes et méthodes. Presses Universitaires de l'Université du Québec/AUPELF. 485p.

Caloz R., Collet C., 2001. : Précis de télédétection – Volume 3 – Traitement numériques d'images de télédétection. Québec : Presses l'Université du Québec/AUF. 386p.