

RenD ez-Vous t e c h n i q u e s

n° 31 - hiver 2011

Dossier
p.17

Télédétection et gestion des forêts

Dunes domaniales à rôle de digue

p.3



patrimoine
sylviculture
progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable

R e n D e z - V o u s t e c h n i q u e s

Directeur de la publication

Bernard Gamblin

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Jean-Marc Brézard, Léo Castex, Benoît Cuillier,
Jean-François Dhôte, Philippe Durand, Didier
François, Pierre-Édouard Guillaud, Véronique Vinot

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture

En haut : Cemagref (image SPOT5)

En bas : Loïc Gouguet, ONF

Page d'ouverture du dossier

IFN, ONF-RTM05, Cemagref (image SPOT5)

Périodicité

4 numéros ordinaires par an

(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)

Accès en ligne

[http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/ Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/ Périodiques))

Renseignements

ONF - cellule de documentation technique, boulevard de
Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : dtcb-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : mars 2011

Toutes les contributions proposées à la rédaction sont soumises à l'examen d'un comité de lecture

sommaire

n° 31 hiver 2011

3

méthodes

*Les dunes domaniales jouant un rôle de digue en Centre Atlantique :
un nouveau regard sur la gestion*

par Loïc Gouguet

10

connaissances

*Les plantes invasives forestières - Éléments de contexte et de stratégie
nationale*

par Jonathan Hareng et Christine Micheneau

17

dossier méthodes

Télédétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels

74

méthodes

*Est-il pertinent d'utiliser l'Indice de Biodiversité Potentielle dans la gestion
courante des forêts publiques ?*

par Vincent Boulanger, Michel Hermeline, Laurence Lefèbvre

79

fiche technique

*Fiche n° 4 – Identifier et gérer les déchets
du plan d'action environnemental*

éditorial

Ce nouveau numéro des Rendez-vous techniques fait la part belle aux questions méthodologiques qui sous-tendent bien des aspects de la gestion forestière dans son acception la plus large, c'est-à-dire aussi bien la production de bois que la conservation de la biodiversité ou la prévention des risques, entre autres.

Cette exploration méthodologique porte surtout sur les apports de la télédétection, qui se « démocratise » avec la banalisation du numérique et qui donne lieu à des applications très variées. D'où un dossier très consistant qui, sans épuiser le sujet, dresse une sorte d'état des lieux avec un aperçu aussi large que possible des applications qui nous concernent, mais aussi des techniques et méthodes d'analyse, avec leurs limites ou leurs perspectives d'évolution ; de sorte qu'un numéro n'y suffit pas et que nous y reviendrons dans la prochaine édition. On n'y trouvera pas d'exemples de « solution miracle », mais des apports déterminants dans de nombreux domaines.

Les apports les plus simples, mais non les moindres, reposent sur la photo-interprétation, plus que jamais d'actualité pour la cartographie des risques en montagne mais aussi pour l'optimisation des opérations d'aménagement forestier et de gestion ordinaire : le développement du SIG, le déploiement de l'outil Canopée et la diffusion de la BDOrtho© infrarouge couleurs concourent désormais à une large appropriation de ces méthodes au plus près du terrain. D'autres applications exigent des compétences particulières en plus d'une solide culture forestière. C'est le cas du traitement des images satellitaires pour appréhender des dépérissements de grande ampleur ou la structure des habitats naturels sur de vastes territoires, ou pour contribuer à la gestion du risque incendie en zone méditerranéenne. C'est aussi le cas du traitement des données du scanner laser (LiDAR) aéroporté, dont on attend des avancées très concrètes pour l'évaluation et la mobilisation de la ressource forestière.

D'une façon beaucoup plus générale, les questions méthodologiques se déclinent aussi sous bien d'autres aspects dont cette édition donne trois exemples très différents : le diagnostic des dunes domaniales au regard des problèmes émergents de défense contre la mer, les contraintes de conception d'une stratégie nationale sur les plantes invasives, ou enfin la discussion de l'Indice de Biodiversité Potentielle.

Le Directeur technique et commercial bois
Bernard GAMBLIN

Les dunes domaniales jouant un rôle de digue en Centre Atlantique : un nouveau regard sur la gestion

Sur le littoral atlantique, la mission de l'ONF a d'abord été de protéger l'arrière-pays des envahissements de sable, puis de conserver aussi les dunes en tant que paysage et patrimoine écologique d'exception. Or certaines dunes ont maintenant un rôle de défense contre la mer qui suppose une gestion particulière et doit s'intégrer dans les démarches d'aménagement des territoires. Cet article reprend la communication de Loïc Gougnet au séminaire « Impacts du changement climatique sur le littoral, conséquences sur la gestion », organisé les 18-19 octobre 2010 à Fréjus dans le cadre de deux projets de recherche diligentés par le ministère de l'Écologie.

L'Office national des forêts gère une grande partie du littoral métropolitain français : 510 km recouvrant 104 000 ha. La principale intervention de l'ONF, en métropole, concerne les dunes domaniales de la côte atlantique (320 km). La plus grande partie de ces dunes fut fixée par boisement à base de Pin maritime au 19^e siècle. Dans la même logique, l'ONF a pour mission première de contrôler la mobilité des dunes pour éviter les envahissements de l'arrière-pays par le sable tels qu'on en a connu au cours des siècles derniers ; mission qui doit conjuguer aussi les multiples fonctions apparues depuis, sociales et écologiques notamment. Les récents événements tempétueux (Xynthia, février 2010) ont brutalement mis en évidence un autre rôle important, exprimé depuis plusieurs années par les gestionnaires : celui que peuvent jouer les cordons dunaires dans la défense des zones côtières basses, en particulier face au risque de submersion.

Nous avons donc entrepris de localiser et caractériser précisément les dunes domaniales atlantiques susceptibles de jouer un rôle de protection déterminant envers des territoires

bas exposés au risque de submersion, situation qu'on rencontre dans le secteur centre-atlantique, c'est-à-dire entre le sud Bretagne et l'estuaire de la Gironde. Cet inventaire permet aussi de proposer une stratégie de gestion adaptée.

Rapide historique des dunes du Centre Atlantique

Les dunes du littoral atlantique se sont formées au cours de l'Holocène (après la dernière glaciation) : issues de l'érosion des massifs montagneux, des stocks de sédiments sableux transportés par les fleuves et qui s'étaient accumulés sur le plateau continental ont été mobilisés lors de la transgression flandrienne. Ce sable, progressivement « remonté » par la houle puis par le vent, a formé des plages et des dunes. Au cours du dernier millénaire, les massifs dunaires ont connu une période de forte mobilité due notamment à l'arrivée massive de sable et à la remise en mouvement de dunes anciennes lors du « petit âge glaciaire » (1450 – 1850), ce qui a alors façonné le littoral actuel. En particulier, les dunes ont isolé progressivement de la mer

les grandes zones basses du littoral centre-atlantique colmatées par les alluvions (Golfe des Pictons, Baie de Bretagne...). C'est ainsi que se sont formés des marais de faible altitude, le Marais Poitevin, le Marais Breton...

Durant les périodes agitées, la totalité des dunes reculait vers l'est, au gré des vents dominants, mettant en péril les installations humaines. Entreprise dès la fin du 18^e siècle en Aquitaine, la fixation des dunes littorales par végétalisation fut généralisée par l'État à partir de 1817, initialement sous l'autorité de l'Administration des Ponts et Chaussées, puis à partir de 1862 sous celle de l'Administration des Eaux et Forêts. La puissance publique s'attribua les terrains dunaires jugés menaçants pour pallier l'incapacité de l'initiative privée à les stabiliser. Il en résulte en Centre Atlantique deux types de propriétés domaniales : un foncier souvent « étroit », simple cordon de dunes donnant sur un arrière-pays bas, et un foncier « épais », constitué par des champs de dunes (désormais boisés) atteignant plusieurs kilomètres de profondeur par rapport au trait de côte.

Une nouvelle mission d'intérêt général pour conforter les dunes-digues ?

(Jean Favennec, chargé de mission Littoral, ONF - département Biodiversité)

Ce nouveau regard sur la gestion des dunes émane de plusieurs sources : réflexions de gestion intégrée (terre et mer, écologie et économie...), inquiétudes sociétales autour des « changements globaux », événements catastrophiques, notamment la tempête Xynthia de début 2010... Est-il de nature à transformer nos modes de gestion des dunes au-delà des débats conjoncturels ? Dès maintenant, on peut identifier plusieurs démarches susceptibles de permettre le passage de la prise de conscience à l'action ; elles concernent divers échelons de responsabilité territoriale.

L'État a engagé courant 2010 un projet de « plan de prévention des submersions marines et des crues rapides » animé par plusieurs directions du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. Ce « plan digues » acte le fait que « les cordons dunaires sont des structures naturelles qui peuvent jouer un rôle de protection contre l'aléa submersion marine ». L'ONF a apporté son expertise dans différents domaines : définition des critères de recensement de ces dunes de défense, retour d'expérience Xynthia, guide national de gestion du trait de côte...

La gestion des dunes littorales domaniales relève des missions d'intérêt général confiées à l'ONF par l'État. Mais actuellement, seul le contrôle de la mobilité des dunes face aux phénomènes éoliens est pris en compte dans le cadre d'une convention entre le ministère chargé de l'Agriculture et l'ONF. La négociation du contrat État/ONF pour la période 2012-2016 offre l'opportunité d'intégrer ce nouveau rôle de digue dans les missions d'intérêt général associées à la gestion des dunes domaniales. Plusieurs réunions ont eu lieu entre l'ONF et les ministères chargés de l'Agriculture et de l'Écologie dans cet objectif.

Parallèlement à cette approche « par le haut », les services départementaux de l'ONF se sont impliqués afin que le rôle des dunes en tant que dispositif de prévention des risques soit pris en compte dans les divers plans et outils réglementaires d'aménagement du territoire, avec une attention particulière pour les PPR et les SCOT.

Deux initiatives sont significatives des évolutions en cours, elles résultent d'un dialogue étroit entre l'ONF et les collectivités locales inquiètes pour leur sécurité. En décembre 2010 une rencontre sous l'égide de la Communauté de Communes de l'île d'Oléron s'est conclue par la mise en place d'un comité technique regroupant les Communes, le Conseil Général, les services de l'État, l'ONF et l'Université de La Rochelle... Cette structure, préfigurant un observatoire littoral, sera un lieu de partage d'expertise et de définition de stratégies de gestion intégrée. Tout récemment, la Commune de Saint-Jean-de-Monts en Vendée a demandé à l'ONF une étude de renforcement, par apport de sable issu de dragage, d'un tronçon de dune domaniale à l'avant d'une zone basse où est implanté un hippodrome. Ce type d'opération demandera une étroite concertation entre services et collectivités locales pour arbitrer les choix de partage harmonieux d'une ressource sédimentaire limitée...

Seule une nouvelle mission d'intérêt général, avec son potentiel effet levier pour des partenariats locaux, pourra déboucher sur des pratiques effectives à l'échelle de la problématique des risques de submersion. Cependant dès maintenant, comme dans l'exemple de Luzéronde à Noirmoutier, nous saisissons toutes les opportunités pour adapter nos actions à cette nouvelle attente sociétale. À la suite de la tempête Xynthia, un crédit spécial accordé par le Ministère de l'agriculture permet d'amorcer ces collaborations, tout particulièrement en Charente-Maritime sur les îles de Ré et Oléron.

Dans les cas critiques, la réaction des aménageurs a été de construire des ouvrages « en dur » pour protéger de l'érosion marine les équipements les plus exposés. Mais de ces défenses rigides sont souvent nés de nouveaux problèmes, car elles ont tendance à aggraver le déséquilibre sédimentaire sur les secteurs adjacents et à exacerber l'érosion en pied d'ouvrage.

Dans le même temps, l'observation des phénomènes conduisait dans les dunes domaniales à la notion de « contrôle souple » du cordon bordier, stock sableux flexible permettant en particulier d'amortir l'énergie marine. Il s'agit désormais de conserver ce stock au plus près de la mer pour conserver les échanges plage-dune et éviter (comme autrefois) que les perturbations frontales, relayées par le vent se transmettent vers l'intérieur.

La problématique nouvelle du risque de submersion

La gestion des dunes domaniales par l'ONF s'appuie sur une connaissance fine des situations locales et s'inscrit dans la logique des processus naturels : c'est pourquoi on parle de contrôle souple, centré depuis l'origine sur la lutte contre l'érosion éolienne. Avec les progrès de la connaissance des processus de la dynamique côtière et l'évolution des attentes de la société, les objectifs se sont élargis et la gestion s'est adaptée avec succès pour assurer la « multifonctionnalité » dévolue aux espaces dunaires :

- protection des forêts et de l'arrière-pays contre l'ensablement (mission historique) ;
- stockage du sédiment au plus près de sa source (en lien avec ce qui précède et pour conserver les processus de dynamique naturelle plage-dune) ;
- préservation d'un paysage apprécié et attractif, facteur de développement touristique ;
- conservation d'un patrimoine biologique et paysager rare et original, et d'écosystèmes fonctionnels et diversifiés ;

L'objectif initial était de piéger le sable au plus près du rivage pour protéger l'arrière-pays (villages et cultures) de l'ensablement, quitte à créer un nouveau cordon littoral à l'avant du précédent dans les cas de remontée sableuse massive ; on pouvait alors végétaliser et boiser les dunes internes dans des conditions d'abri relatif, ce qui fut fait avec succès. Vers le milieu du 20^e siècle, la situation sembla stabilisée et la pression des évolutions sociales (déprise agricole, essor touristique...) amena une multiplication des enjeux sur les côtes du

Centre Atlantique : infrastructures, urbanisation, etc.

L'illusion de stabilité, malgré les dégâts ponctuels de tempêtes, faisait oublier un peu vite qu'un rivage sableux est forcément mobile. Or, le stock sédimentaire s'amenuisant, il s'avéra peu à peu que, globalement, la houle ne ramenait plus assez de sable pour compenser les arrachements observés par gros temps : amaigrissement des plages, création de falaises vives en pied de dune et reprise des agressions éoliennes.

- étude des processus dynamiques, observation et suivi des évolutions du milieu...

Reste que les phénomènes d'érosion marine qui se sont sensiblement accrus au cours des 20 dernières années conduisent à examiner plus en détail les rôles directs et indirects que jouent les dunes face à cette érosion, sur un littoral centre-atlantique particulièrement exposé, compte tenu de sa morphologie, au risque de submersion :

- amortissement souple de l'énergie marine ;
- soutien du budget sédimentaire (réalimentation de la plage après les tempêtes, ce qui contribue aussi à dissiper l'énergie des vagues et diminuer leur pouvoir d'érosion...) ;
- effet de « digue » naturelle vis-à-vis des arrière-pays de basse altitude...

Dans le cadre de ses activités de gestion et des contacts avec les collectivités locales, l'ONF avait repéré depuis plusieurs années un aléa de submersion sur des zones côtières basses simplement précédées de cordons dunaires étroits. Dès 2005, il a engagé une réflexion pour caractériser les cordons dunaires domaniaux en position de « digue » naturelle, situation assez fréquente sur le continent en Vendée et dans les Îles de Noirmoutier, Ré et Oléron, d'en définir une typologie et d'en réexaminer le mode de gestion. La tempête Xynthia du 28 février 2010 a agi comme un révélateur. Sa dépression barométrique particulièrement creuse (969 hPa) a généré des vents forts de plus de 140 km/h et une surcote marine (plus de 1,60 m à La Rochelle), qui se sont ajoutés aux effets d'une pleine mer de fort coefficient (102). La conjonction d'un phénomène météorologique violent et d'un niveau de la mer très élevé (atteignant la cote de 4,506 mètres NGF) a provoqué la submersion du littoral du sud de la Vendée et du nord de la Charente-Maritime sur plusieurs milliers d'hectares, entraînant également le décès de 47 personnes piégées dans leur maison. Cependant le rôle de « dune digue » s'est clairement

concrétisé, les dunes domaniales ayant dans le même temps protégé de nombreuses zones basses au prix, très logiquement, de leur propre fragilisation.

Cette confirmation très brutale des concepts issus de la réflexion et, plus généralement la prise de conscience du rôle que peuvent jouer certaines dunes domaniales dans la prévention du risque de submersion, exigent maintenant un diagnostic précis : caractériser les dunes concernées et les localiser, puis définir les mesures de gestion adaptées. Par ailleurs il faut aussi mobiliser des partenaires pour mettre en œuvre les programmes d'actions qui en découleront.

Le rôle de protection contre les submersions

Certains cordons ont joué et jouent donc encore actuellement un rôle de protection contre les submersions marines des plaines littorales basses. Par leur simple présence, ils forment une « digue naturelle flexible », même si le terme de digue fait référence à des ouvrages artificiels et à une législation particulière qui ne s'applique pas à ces milieux naturels.

Dans ce rôle de protection contre les submersions, la dune est en quelque sorte une digue naturelle flexible qui, contrairement à un ouvrage rigide, a l'avantage d'évoluer selon les phénomènes érosifs. Elle ajuste en permanence sa position et sa forme aux changements de la dynamique sédimentaire (contrairement à un ouvrage en dur qui s'oppose frontalement à l'énergie marine et qui de ce fait nécessite un entretien très important) et, si elle est suffisamment stable, offre donc aux zones basses de l'arrière une défense souple contre les fortes vagues. Ceci dit, toutes les dunes domaniales centre-atlantiques ne sont pas concernées.

En première approche, le concept de « dune-digue flexible » ne s'applique manifestement pas aux propriétés domaniales **larges** qui présentent un cordon bordier plus ou moins haut

devant des champs de dunes plus ou moins élevés. L'aléa submersion, lorsqu'il existe (dépression arrière-du-naire, par exemple) est négligeable par rapport aux enjeux, et la gestion des cordons dunaires bordiers selon le principe du contrôle souple ne soulève pas de difficulté particulière dans la mesure où on a de l'espace : en phase d'érosion marine on organise la translation du système vers l'arrière, en phase d'accrétion on aide à reconstituer les avant-dunes, et en phase d'équilibre on laisse faire la dynamique éolienne.

Les propriétés domaniales **étroites**, en revanche, n'offrent pas les mêmes possibilités de translation. Elles peuvent précéder des terrains suffisamment élevés pour ne pas être exposés au risque de submersion. Mais on trouve souvent à l'arrière des zones basses, constituées principalement de marais ou occupées par des infrastructures à enjeu fort (routes, équipements...) : la dune domaniale joue alors de fait un rôle fondamental de protection contre les submersions marines, car seule sa présence fait obstacle aux attaques des vagues et aux surcotes liées aux tempêtes. Il faut toutefois, pour que la protection soit effective, que le cordon domaniale ait une hauteur suffisante, supérieure aux niveaux marins extrêmes connus (ou modélisés), et que son assise (emprise au sol) lui permette de résister à l'érosion marine. Le gestionnaire va devoir contrôler les phénomènes éoliens pour conserver le stock de sable et maintenir autant que possible un profil aérodynamique qui limite les risques d'arrachement par le vent.

Caractérisation du service de protection contre les submersions

Pour approfondir rapidement la caractérisation du service de protection des dunes domaniales contre les submersions, l'ONF a diligenté en 2010 une approche géomatique, dans le cadre d'un master 2 Cartographie et Gestion de l'Environnement en lien avec l'IGARUN¹, afin de pouvoir ensuite hiérarchiser les zones d'intervention.

¹ Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes – Nicolas Ramont – juillet 2010

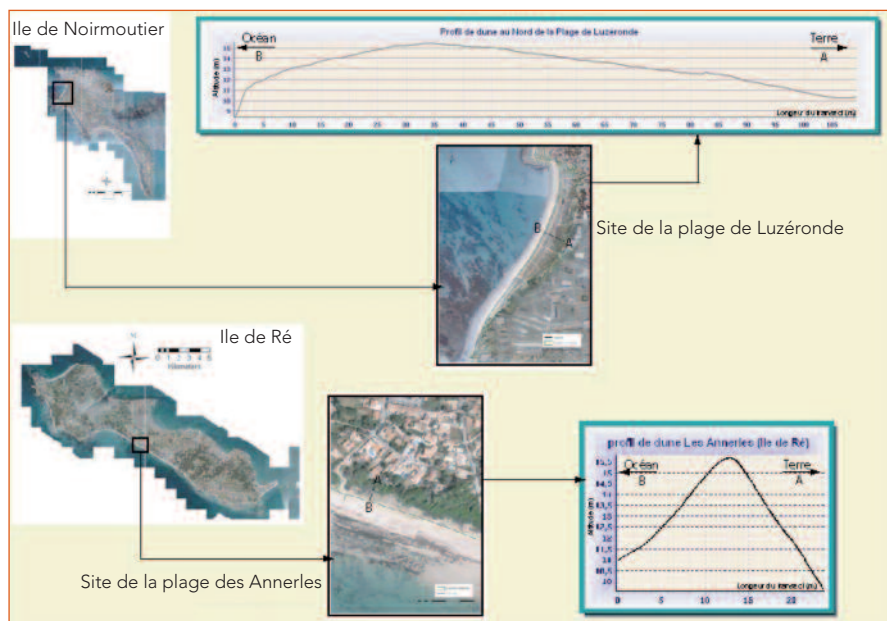


Fig. 1 : exemples de type de profils de l'atlas

Dans un premier temps les propriétés domaniales de moins de 300 mètres de large ont été sélectionnées dans la zone géographique concernée (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes). Ensuite une série d'indicateurs d'état a été établie à partir de l'information numérique disponible pour pouvoir analyser le contexte topographique, historique, spatial et pour évaluer les enjeux de l'arrière-pays.

Les 7 indicateurs (indices calculés issus de l'analyse des données) retenus intègrent les facteurs suivants :

- la topographie du site : hauteur moyenne du cordon dunaire bordier et altitude moyenne de l'arrière-pays (*Utilisation des données issues de la BD ALTI® de l'IGN*) ;
- la dynamique littorale (évolution du trait de côte) et l'aléa submersion marine. (*Étude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen – DHI – décembre 2007, numérisation du trait de côte (archives ONF), PPR érosion marine et carte ONF des impacts de la tempête Xynthia*) ;
- l'évaluation des enjeux : analyse de l'occupation du sol, dynamique communale et localisation des zones les plus sensibles aux inondations par submersion marine, d'après les don-

nées de prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme et les études d'impact. (*Base de données CORINE Land Cover issue du SOeS, données INSEE, PPR, DDRM et études d'impacts (SOGREAH de 2001)*) ;

■ Après pondération, ces 7 indices entrent dans le calcul d'un indice global (**Itot**) d'évaluation du service de protection assuré par le cordon dunaire domanial, qui permet de comparer les différents sites.

Cet indice global permet le classement en 5 catégories en fonction de la qualité de service de protection rendu :

Itot < 1 ⇔ dune non concernée : malgré l'étroitesse de la propriété domaniale, le site d'étude ne représente pas un enjeu au regard du service de protection face au risque de submersion marine. Ce sont généralement des secteurs hors de toute urbanisation, assez élevés et suffisamment larges pour asseoir la stabilité du cordon dunaire, constitués essentiellement d'une dune boisée.

1 < Itot < 2 ⇔ dune fragile : propriété domaniale étroite correspondant le plus souvent à des zones assez naturelles avec peu d'urbanisation.

Cependant, la faible altitude de l'arrière-pays entraîne une vulnérabilité potentielle du site d'étude au risque de submersion marine.

2 < Itot < 2,5 ⇔ dune sensible : zone à enjeu marqué. Le cordon dunaire, d'une hauteur généralement assez importante, assure le service de protection face au risque de submersion marine. Cependant il doit être attentivement surveillé et entretenu pour prévenir le risque d'une rupture pouvant entraîner la submersion des zones basses en arrière (parfois fortement urbanisées).

2,5 < Itot < 3 ⇔ dune vulnérable : état d'alerte. Le cordon de faible altitude (voire absent) est situé près d'une forte zone urbaine ou d'un équipement. Pour assurer pleinement le service de protection, des travaux de consolidation sont à prévoir. Zone à surveiller en priorité.

Itot > 3 ⇔ dune érodée : état critique. Le service n'est plus assuré, la faible hauteur du cordon dunaire ne le permet plus. Zone prioritaire.

Un atlas des dunes digues flexibles

Le résultat de ce travail exploratoire a été formalisé par un atlas cartographique localisant la position des « dunes digues domaniales » et représentant l'indice d'évaluation global du service de protection assuré.

À l'issue de cette démarche géomatique, une vérification de terrain a permis de confirmer ou d'infirmer la localisation des zones les plus sensibles et de caractériser les formes rencontrées.

Cette vérification était nécessaire pour compléter l'approche géomatique, du fait notamment :

- des degrés de précision hétérogènes des données de base pouvant générer des erreurs de classement ;
- des problèmes d'échelle des différentes sources entraînant des localisations parfois approximatives ;



En décembre 2005, le cordon étroit devant des marais est soumis à l'érosion marine ; il faut organiser la translation du sable grâce au vent. Ici le foncier domanial permet la mobilité



En 2009, les travaux de reprofilage, couverture de branchage et plantation ont permis de mettre hors d'atteinte de l'érosion marine le stock de sable en conservant les processus dynamiques

Fig. 2 : dune équilibrée du secteur de Luzérone, sur l'Île de Noirmoutier (85)

- du caractère artificiel des indices proposés par des calculs informatiques, qu'il convenait de compléter par des critères plus directement opérationnels.

Cette analyse de terrain s'est faite selon des transects implantés sur les sites déterminés par l'analyse géomatique et par l'élaboration de profils de dunes géoréférencés (cf. figure 1). Chaque profil est décrit dans une grille d'évaluation à l'aide de paramètres spécifiques permettant d'évaluer l'état du service de protection de la dune de défense :

- paramètres morphologiques (hauteur de la crête de la dune, rapport base/hauteur) ;
- paramètres géomorphologiques (organisation du contact plage /dune, nombre de faciès, densité des caoudeyres) ;
- évaluation de la pression anthropique (nombre d'accès plage, surpiétinement).

La typologie

L'analyse des profils permet de caractériser les formes rencontrées et ainsi de préciser le classement réalisé lors de la phase géomatique en écartant les dunes de la première classe, dites « dunes non concernées ». On distingue donc :

Les dunes équilibrées (type I) : caractérisées par un profil « large » (> à 50 m) et un volume sédimen-

taire conséquent. Leur largeur garantit la stabilité du cordon face aux attaques mécaniques de la houle et des vagues de tempête (érosion marine et brèches de tempête) et permet à la dune d'assurer son rôle d'amortisseur de la houle. De même, leur hauteur permet d'assumer pleinement la fonction de barrière face à la montée exceptionnelle du niveau marin lors d'un événement climatique extrême (> à 8 m). D'un point de vue écosystème, ces dunes présentent les différents faciès, de la dune blanche à la dune grise (figure 2).

Les hauts cordons bordiers étroits (type II) : il s'agit de dunes réduites à un étroit cordon dunaire bordier (parfois moins de 30 m de large comme sur l'Île de Ré). La hauteur du cordon est importante, suffisamment pour faire obstacle à l'intrusion marine, mais l'organisation par le gestionnaire de la translation vers l'intérieur (pour pouvoir restaurer un profil adéquat après un événement violent) se heurte au contact immédiat avec les zones à protéger (figure 3). La faible largeur de la propriété domaniale interdit donc toute possibilité de cinétique dunaire sans impact sur l'arrière-pays, elle diminue également sa stabilité et augmente sa vulnérabilité aux attaques marines. Des événements tempétueux répétés risquent donc à long terme de supprimer la protection que ces cordons offrent.

On peut considérer qu'une dune de défense est de type II à partir du moment où elle n'est constituée que par un cordon bordier (correspondant le plus souvent à la seule dune blanche). Ce type de dune est le plus répandu sur le linéaire étroit étudié.

Les cordons sensibles (type III) : le profil caractéristique est celui d'un cordon dunaire bordier peu développé (généralement peu élevé) fragile, souvent très déstructuré et réduit à un résidu de dune, qui devance une dépression ou une zone plane de basse altitude, champs de dunes ou marais. Ces secteurs sont critiques dans la mesure où l'eau de mer peut rapidement s'étaler dans la dépression d'arrière-cordon en cas de brèche (figure 3).

D'une manière générale, ce sont ces dernières zones (type III) qui sont à prioriser dans une optique de gestion du service de protection. Mais un bon diagnostic doit aussi qualifier l'enjeu protégé pour chaque type de cordon (zone de marais, zone urbanisée, route publique, équipement collectif, milieu naturel...) pour hiérarchiser les secteurs d'intervention et programmer les actions à mener.

Les résultats

Sur les 145 kilomètres de dunes domaniales gérées par l'ONF en Centre Atlantique, il y a 60 km de dunes étroites (foncier < 300 m de large) a



Dune des Anneries à La Couarde en Ré (17) : le cordon bordier, étroit, est directement au contact de l'urbanisation



À Saint-Jean-de-Monts (85), le cordon bordier a disparu, la mer a envahi l'arrière-dune basse (hippodrome) lors de la tempête Xynthia

Fig. 3 : exemples de haut cordon bordier étroit (à gauche) et de cordon sensible (à droite)

priori concernées par la problématique de protection contre les submersions. En négligeant le cas marginal des dunes étroites bordant des terrains assez élevés pour ne pas risquer la submersion, on peut considérer que :

- 15 km sont des dunes stables, en bon état (type I), parfaitement aptes à protéger l'arrière-pays plat contre la mer ;
- 21 km sont des dunes de défense (type II) dans un état satisfaisant pour remplir le service de protection mais dans des conditions de vulnérabilité aiguë face au risque de submersion marine, du fait du contact immédiat avec les enjeux à protéger ;
- 17 km correspondent à des dunes de défense (type II) en état d'alerte, où le service est provisoirement assuré mais peut vite être dégradé ;
- 7 km enfin sont des dunes en mauvais état (type III) qui risquent de ne pas assurer pleinement leur service de protection de l'arrière-pays face au risque de submersion marine.

La gestion

Après le diagnostic vient la question de la remédiation pour que les dunes domaniales topographiquement impliquées dans la protection contre le risque de submersion marine puissent jouer pleinement ce rôle, désormais très attendu. Il s'agit a priori de traiter les dunes de type III au droit des zones d'enjeux importants, et de concevoir l'entretien/res-

tauration des dunes de type II (et III) après un épisode tempétueux. Les dunes de type I relèvent d'une gestion « normale » mais vigilante.

Principes de remédiation

Dans ce cas bien particulier de gestion dunaire, les options couramment admises de laisser faire l'évolution naturelle ou de mettre en place un contrôle souple « ordinaire » ne sont pas applicables. Il reste les options qui consistent à organiser le repli stratégique (lorsque le niveau de risque est si haut qu'un dispositif de protection aurait un coût exorbitant à regard de la valeur des biens à protéger, la délocalisation des biens doit être envisagée) ou bien à maintenir le trait de côte en confortant ou érigeant des structures de défense côtière.

Cette dernière option peut en théorie se décliner en deux techniques, l'une « dure » (digue béton, empierrements...), hors de propos ici, et l'autre souple (confortement du cordon dunaire par rechargement en sable...). En fonction de la situation, le confortement du cordon dunaire peut être réalisé selon plusieurs principes, schématisés figure 4 :

- ① L'érosion marine entaille une falaise qui ne remet pas en cause la stabilité de la dune : rechargement en sable en haut de plage.
- ② Très forte érosion marine qui supprime les capacités du cordon de dune à jouer le rôle de digue : rechargement sur le cordon existant

(devant et/ou derrière).

- ③ L'érosion marine érode le cordon en quasi-totalité : on s'interroge tout d'abord sur la présence éventuelle de cordons anciennement fixés en retrait du trait de côte, sur lesquels le dispositif peut s'appuyer : on maintient alors une zone de liberté pour le cordon bordier érodé, jusqu'à la première ligne topographique significative. Un rechargement peut aussi être effectué au niveau du versant interne (côté terrestre), ou pour conforter les cordons de deuxième ligne. Cela peut parfois passer par la nécessaire acquisition par la puissance publique de parcelles qui permettront une libre évolution du sable.

Bien entendu, de telles opérations doivent s'accompagner des mesures habituelles de gestion des milieux dunaires : canalisation de la fréquentation, information du public, végétalisation au besoin, contrôle de l'envol du sable...

Des opérations qui peuvent être complexes

La technique dite de rechargement est séduisante et efficace pour maintenir les différentes fonctionnalités des dunes domaniales, sans interrompre les échanges plage/dune. Elle nécessite toutefois une phase préalable importante d'études techniques et d'instruction réglementaire, concernant les aspects suivants :

- choix de la zone de prélèvement (zone terrestre, zone maritime, distance de transport...);
- caractéristiques granulométriques des sédiments (comparaison du sédiment d'emprunt avec le sédiment naturel en place...);
- définition du profil d'équilibre de la plage et de la profondeur limite d'action de la houle sur les sédiments;
- estimation du volume à mettre en place (ni trop ni trop peu);
- technique de mise en place possible (clappage, projection, rechargement terrestre...);
- évaluation de la fréquence des rechargements d'entretien, des suivis topographiques à mettre en place;
- coût de l'opération, y compris les entretiens ultérieurs, selon la durée de vie estimée par rapport à l'érosion marine;
- aspect réglementaire de l'opération (Maîtrise d'ouvrage, Loi sur l'eau, intervention sur le DPM, compétences des collectivités locales...);
- aspect financier (Subventions, financements...).

Il faudra veiller également à l'évolution du contexte juridique, car si la législation actuelle relative aux digues de défense ne s'applique pas aux dunes, elle est probablement sujette à évolution. Si tel était le cas, les obligations du propriétaire État ou du gestionnaire ONF devraient être redéfinies (missions, financements...).

Des réalisations

La côte ouest de l'île de Noirmoutier est bordée, sur 19 km, de dunes qui jouent un rôle de « digue » naturelle face aux éventuelles intrusions marines. De manière générale, du fait de la présence du socle rocheux peu profond au large de la côte Ouest de l'île de Noirmoutier, les transports sédimentaires y sont relativement faibles. Le cordon bordier se trouve donc peu alimenté en sable par la mer.

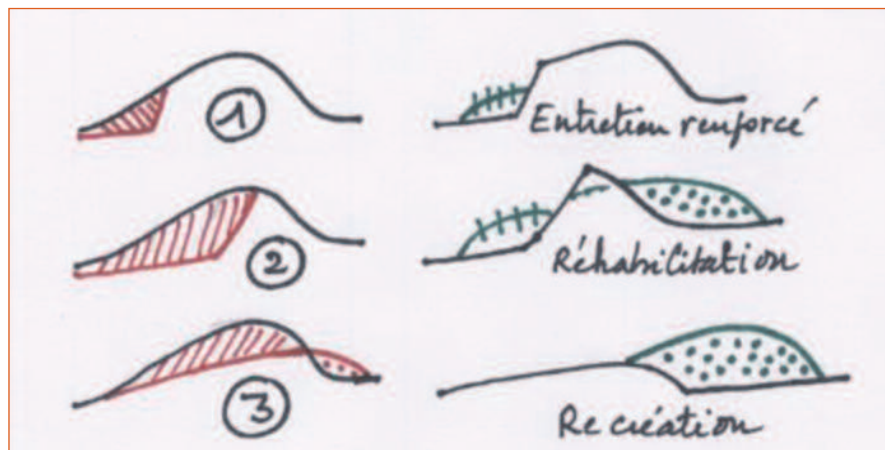


Fig. 4 : schématisation des principes de remédiation (en vert) après une attaque marine (en rouge)

De la Pointe de l'Herbaudière à la Pointe du Devin, le cordon dunaire de Luzérone (5 à 7 mètres d'altitude) s'étend sur une longueur de 4 km et sur une largeur variant de 400 mètres au Nord à 60 m au Sud. Il constitue une barrière naturelle qui protège toute la zone de marais.

À la suite de fortes tempêtes en 2002, qui avaient créé une falaise d'attaque marine, les gestionnaires ont décidé d'organiser le recul du cordon dunaire en exploitant le phénomène d'érosion éolienne, jusqu'à ce que la dune retrouve une bonne assise et un profil aérodynamique. Ainsi le stock de sable piégé hors d'atteinte de l'érosion marine ordinaire permet de remplir le rôle de dune digue (figure 2).

Ce profil, avec un glacis externe suffisamment doux a été partiellement atteint naturellement en 2008, et des travaux ont été réalisés pour le compléter et le fixer : en lien avec la collectivité qui a pris en charge le contrôle de la fréquentation et le « retroussage » de plage (action de remonter le sable du bas de plage vers le pied de dune), l'ONF a procédé à un remodelage de la dune qui a ensuite été couverte de branchages et plantée d'oyat et de chiendent des sables. Devant la réussite des travaux engagés, un tronçon supplémentaire a été traité en 2009.

Conclusion

Quand des dunes précèdent un arrière-pays peu élevé, elles constituent une barrière flexible et vivante qui sous certaines conditions préserve des risques de submersion marine. Ce rôle a été mis en évidence lors des tempêtes de février 2010 et doit maintenant s'intégrer dans une réflexion plus globale d'aménagement des territoires.

L'ONF, opérateur historique des dunes domaniales, a pris conscience de cette importance depuis plusieurs années, et apporte son expérience aux collectivités et à l'État dans le cadre de démarches intégrées et globales de compréhension des phénomènes naturels en jeu. Les effets futurs supposés du changement climatique (élévation du niveau des océans, accentuation de la fréquence et de la force des événements tempétueux...) sont des raisons supplémentaires pour l'ONF d'adapter la gestion de ces espaces naturels fragiles sur lesquels reposent des attentes toutes particulières de la société.

Loïc GOUGUET

Chargé de mission « milieux littoraux »
ONF – DT Centre-Ouest,
Auvergne, Limousin
loic.gouguet@onf.fr

Les plantes invasives forestières

Éléments de contexte et de stratégie nationale

Très liées à la mondialisation des échanges et aux transports, les invasions biologiques sont préoccupantes pour leur rôle majeur dans l'érosion de la biodiversité, leurs effets économiques et les complications pour la santé humaine. Ce constat suscite de nombreuses initiatives, souvent exprimées en termes de lutte (voire éradication) contre les espèces exotiques envahissantes. Mais les situations sont complexes, diverses et appellent des réponses hiérarchisées, dans le cadre d'une stratégie coordonnée à différentes échelles. La France y travaille et l'ONF, entre autres, est invité à participer à cette construction. Voyons plus précisément quel est le contexte en ce qui concerne les plantes.

Les invasions biologiques sont aujourd'hui considérées comme une cause majeure d'érosion de la biodiversité, et de nombreux pays commencent à s'en préoccuper dans leurs politiques et programmes d'action pour l'environnement. L'Europe est particulièrement affectée par ce problème avec plus de 10 000 espèces (faune et flore) ayant « envahi » le continent avec depuis quelques décennies une accélération sans précédent, menaçant d'extinction certaines espèces endémiques (Genovesi et Shine, 2004). Les impacts de ces espèces dites invasives, ou espèces exotiques envahissantes (EEE), ne se limitent pas à l'aspect environnemental mais ont des répercussions également sur l'économie, la santé humaine et les paysages.

Le présent article se propose de faire un rapide panorama des dispositions internationales destinées à prévenir ou contenir ces « invasions » et de montrer comment la France cherche à s'organiser dans ce domaine, notamment vis-à-vis des invasives forestières.

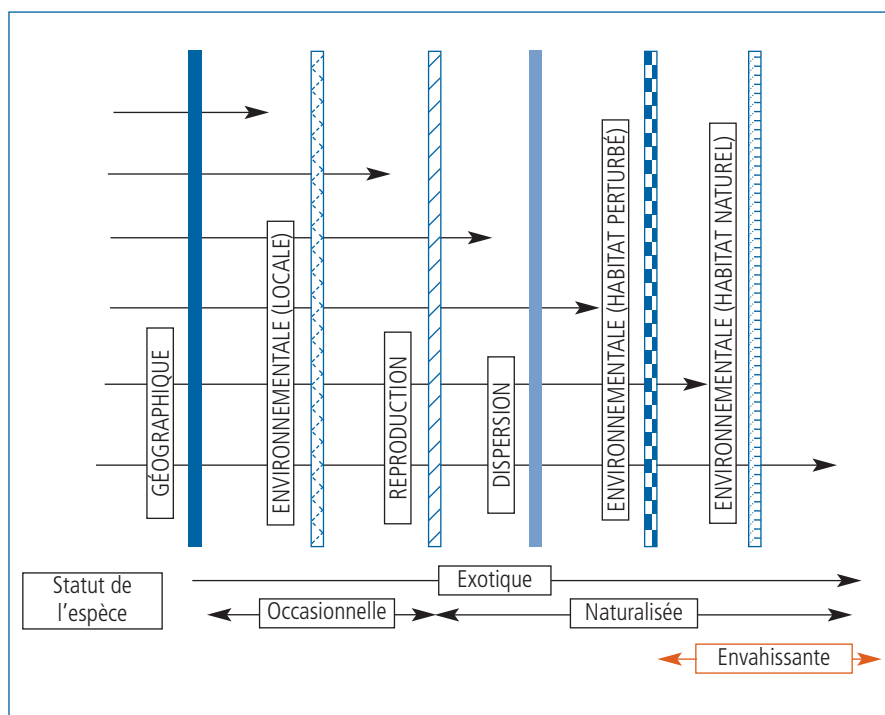


Fig. 1 : représentation schématique des « barrières » qui limitent l'expansion d'une espèce végétale exotique introduite et déterminent son statut

Source : UICN, d'après Richardson et al., 2000

Plantes invasives, de quoi parle-t-on ?

Les études dans le domaine de l'écologie des invasions végétales ont engendré une terminologie aux définitions souvent très implicites et reprise par divers auteurs (et conventions internationales) sous des acceptions sensiblement différentes. Il s'ensuit des confusions d'autant plus grandes que la notion d'invasion évoque l'idée anthropocentrique d'agression. Alertés par cette situation, qui fait obstacle aux généralisations robustes et constructives, Richardson et al. (2000) ont élaboré un lexique de base qui clarifie le propos. C'est à ce lexique, très largement repris dans la littérature, que nous nous référons ici. Il définit pour les plantes les différentes phases du processus de naturalisation/invasion en s'appuyant sur les « barrières » abiotiques et biotiques successives que l'espèce en cause a (ou n'a pas) surmontées, selon le schéma présenté figure 1 (voir aussi l'encadré).

Dans ce système de définition, les plantes « invasives » sont donc des plantes exotiques introduites (ayant franchi du fait de l'homme une barrière géographique majeure), naturalisées (c'est-à-dire capables non seulement de survivre mais de se reproduire spontanément sur le(s) site(s) d'introduction) et qui, de là, se répandent dans la région (le pays...) en fondant de nouvelles populations viables. Soulignons que cette définition des plantes « invasives », ou plutôt des **espèces (végétales) exotiques envahissantes (EEE)**, n'a en soi aucune connotation d'impact.

Le contexte politique et juridique à différentes échelles

Compte tenu des phénomènes en jeu (vecteurs d'introduction, dynamique de propagation...) et des im-

Définitions (d'après Richardson et al., 2000)

Espèce exotique

Une espèce est qualifiée d'exotique si elle est introduite, volontairement ou non, en un lieu qui ne correspond pas à son aire de distribution d'origine (franchissement d'une barrière géographique).

Cette définition reste tributaire des échelles géographique et temporelle. Ici l'échelle géographique est nationale [en cohérence avec la politique à construire] : seules sont prises en compte les espèces dont l'aire d'origine est étrangère [ou ultramarine]. On sait par ailleurs que les introductions remontent à la plus lointaine antiquité mais la plupart des auteurs s'accordent sur la découverte du Nouveau Monde (« 1500 »), début des échanges de grande ampleur, comme point de départ chronologique.

Espèce acclimatée (= « occasionnelle » sur la figure 1)

Pour se développer et atteindre le stade adulte, les graines ou propagules de l'espèce introduite doivent passer la barrière environnementale locale ; on dit que l'espèce s'acclimata.

Espèce naturalisée

Une espèce est dite naturalisée si, en plus d'être acclimatée, elle s'affranchit de la barrière reproductive et se maintient d'elle-même, sans intervention anthropique, sur plusieurs générations.

Espèce exotique envahissante

Les espèces invasives sont des espèces exotiques naturalisées qui franchissent un dernier filtre, la barrière de dispersion, et sont capables de s'étendre au-delà des sites d'introduction. C'est pourquoi il est préférable de parler d'espèces exotiques envahissantes (EEE).

La définition n'inclut pas la notion d'impact*. Pour Richardson et al., certaines sont bénignes (sans impact économique ou environnemental négatif détectable) et les autres, 50 à 80 % selon les impacts constatés et l'idée qu'on s'en fait, peuvent être qualifiées de pestes végétales pour leurs effets nocifs ; les quelque 10 % qui modifient profondément les écosystèmes sont appelées espèces transformatrices (*transformers* en anglais).

* NB : la notion d'impact n'est pas forcément négative : la plupart des espèces exotiques introduites volontairement l'ont été pour un intérêt social ou économique.

pacts constatés ou probables, la problématique des EEE est mondiale ; complexe et débattue, sa prise en compte dans les politiques environnementales nécessite une coopération internationale : des mesures nationales isolées ne sauraient suffire, par exemple, à prévenir les introductions suspectées d'effets nocifs sérieux.

À l'échelle du globe, depuis le sommet de Rio

La Convention sur la diversité biologique (CDB, Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, 1992)¹ pose dans son article 8(h) les fondements

d'une action internationale à l'échelle planétaire, attendant de chaque pays contractant que « dans la mesure du possible et selon qu'il conviendra [il] empêche d'introduire, contrôle ou éradique les espèces exotiques qui menacent des écosystèmes, des habitats ou des espèces ». (Genovesi et Shine, 2004).

Auparavant, les invasions d'espèces exotiques n'étaient (implicitement) traitées qu'en termes de « protection des cultures contre les organismes nuisibles », dans le cadre de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV)

¹ ratifiée par la France en 1994

conclue en 1951 sous l'égide des Nations unies et amendée depuis.

Pour le continent européen, la Convention de Berne

En Europe, il existe de nombreux instruments contraignants ou incitatifs prévoyant le contrôle des EEE, surtout sous l'angle restreint de la protection des végétaux au sens de la CIPV : c'est un des rôles de l'Organisation européenne pour la protection des plantes (OEPP)², organisation intergouvernementale responsable de la coopération internationale dans ce domaine.

Les mesures visant plus généralement la conservation de la diversité biologique viennent de la Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe, dite Convention de Berne³. En particulier, son article 11.2.b engage les Parties « à contrôler strictement l'introduction des espèces non indigènes ». Considérant que, malgré les efforts entrepris, l'Europe avait « pris du retard sur d'autres régions qui se sont [organisées] pour apporter une réponse globale au défi des espèces exotiques envahissantes », le comité permanent a fait adopter en 2003 une Stratégie européenne relative aux espèces exotiques envahissantes (Genovesi et Shine, 2004). Elle vise notamment à améliorer le partage d'information et la coopération entre états pour détecter précocement ou prévenir de nouvelles invasions et atténuer l'impact des EEE déjà implantées.

En France

Dans le cadre de ces conventions internationales, la France s'est dotée en 2004 d'une Stratégie nationale pour la biodiversité pour tenter de « stopper la perte de biodiversité d'ici 2010, comme s'y sont engagés tous les pays de l'Union européenne⁴ ». Dans le domaine

des EEE, cette stratégie repose sur plusieurs axes :

- la sensibilisation et l'éducation du public et des professionnels, notamment en Outre-mer⁵ ;
- l'adaptation de textes réglementaires au niveau national et la mise en place d'un contrôle réglementaire couvrant toutes les politiques publiques ou privées utilisant les espèces exotiques potentiellement envahissantes ;
- la mise en place d'un observatoire des EEE ;
- la poursuite de programmes de recherche ;
- et le lancement d'actions d'éradication ou de confinement dès le signalement d'une EEE.

Au niveau législatif et réglementaire, les mesures les plus anciennes sont celles de la Protection des Végétaux (Code rural), en vertu de la CIPV et des dispositions qui en découlent. Il s'agit de protection et de lutte contre les « organismes nuisibles » ennemis des cultures ou des produits végétaux. Ces organismes sont le plus souvent des animaux (insectes, vers, mollusques...) ou des champignons ; les plantes sont plutôt concernées en tant que vecteurs possibles, ce qui expliquerait qu'aucune plante exotique envahissante ne fasse l'objet de lutte obligatoire à ce titre.

Au-delà de ce cas particulier, le droit commun des espèces exotiques envahissantes est très récent. Il repose initialement sur la loi Barnier de 1995, qui instaure le principe d'un régime d'interdiction d'introduction pour certaines espèces exotiques, puis plus concrètement sur la loi de 2005 relative au développement des territoires ruraux. L'ensemble, codifié à l'article L.411-3 du Code de l'environnement, interdit l'introduction dans le milieu naturel d'espèces à la fois non autochtones et non domestiques (animaux) ou cultivées (végétaux), dont

la liste est fixée par arrêté interministériel (ministre chargé de la protection de la nature et ministre de l'agriculture ou de la pêche dans le cas d'espèces marines), et permet aux préfets d'engager des actions de lutte sur le terrain. Y est également interdite la diffusion d'espèces relevant d'une deuxième liste, incluant leur transport, colportage, utilisation, mise en vente, vente et achat. À ce jour, la première liste est en discussion et la deuxième ne comporte que deux espèces de jussies (*Ludwigia grandiflora* et *Ludwigia peploides*) mais *Cortaderia selloana*, plus connue sous le nom d'herbe de la pampa, devrait également y faire son apparition.

La loi « Grenelle 1 » (loi n° 2009-967 du 3 août 2009) de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, centrée en ce qui concerne les EEE sur des objectifs d'action que nous aborderons plus loin, n'a pas entraîné (via la loi « Grenelle 2 » n° 2010-788 du 12 juillet 2010) de modification du cadre juridique.

Plus précisément, où en est-on en France ?

Le cadre législatif national existe mais il vise essentiellement les introductions nouvelles en restant assez vague sur les EEE déjà installées et reste pour l'heure à l'état de coquille vide. La France n'a pas encore d'outil opérationnel de recensement et d'évaluation ni de plateforme de travail partagée pour tous les acteurs (scientifiques, autorités, gestionnaires forestiers ou d'espaces naturels, acteurs économiques et sociaux concernés, etc.).

Le système d'information

C'est là une des missions du système d'information sur la nature et les paysages (SINP) qui, depuis 2007, se met progressivement en

² LOEPP, fondée en 1951 par 15 pays européens, compte aujourd'hui 48 pays membres couvrant presque tous les pays de la région européenne et méditerranéenne.

³ La convention de Berne, adoptée le 19 septembre 1979 à Berne en Suisse, est entrée en vigueur en juin 1982 ; elle a été ratifiée par 47 pays et entités (l'Union européenne est Partie contractante, en plus de l'adhésion des états membres)

⁴ cf. conclusions du Conseil (des ministres de l'UE) de Göteborg, 15-16 juin 2001

⁵ La biodiversité insulaire, pour diverses raisons, est tout particulièrement vulnérable aux invasions biologiques

place sous l'égide du ministère chargé de l'Écologie dans le cadre de la stratégie nationale pour la biodiversité. Ce système d'information s'appuie sur une organisation régionale et son objectif premier est de structurer les connaissances sur la biodiversité. En ce qui concerne les espèces exotiques envahissantes potentielles ou avérées, il s'agit de coordonner l'élaboration de listes d'espèces hiérarchisées selon le niveau de menace pour l'environnement, l'économie ou la santé, et de surveiller leur état de dissémination de façon à (i) proposer l'évolution de la législation, notamment les arrêtés à prendre au titre de l'article L.411-3 du code de l'environnement, et (ii) définir des mesures de lutte et les évaluer.

Pour l'heure, les nombreux inventaires existants donnent une information souvent riche et documentée mais aussi hétérogène et dispersée. En ce qui concerne les végétaux, l'ouvrage de Serge Müller *Plantes invasives en France*, paru en 2004, donne actuellement la vision la plus complète des EEE installées en France métropolitaine. Au niveau régional, certains Conservatoires botaniques nationaux (CBN) comme le CBN de Brest mettent en œuvre sur leur territoire d'agrément une procédure d'inventaire hiérarchisé de ces espèces qui peut être un support pertinent pour des plans d'action à l'échelle locale. Cependant tous les conservatoires agréés n'ont pas la même démarche et, en outre, ils ne couvrent pas (encore) la totalité du territoire métropolitain. Autrement dit, l'agrégation nationale de leurs inventaires (et ceux d'autres instances également très investies) nécessite une sorte de calibrage préalable.

Les outils d'analyse existants

Dans le domaine de la protection des végétaux, il existe une procédure destinée à évaluer la dangerosité potentielle d'espèces exo-

tiques déclarées « nuisibles » dans d'autres pays et susceptibles d'entrer sur le territoire. Cette procédure, dite analyse de risque phytosanitaire (ARP), est un instrument reconnu au plan international pour justifier de mesures préventives, même lorsqu'elles ont des conséquences sur le commerce international.

Techniquement, l'ARP est applicable à l'évaluation des plantes exotiques envahissantes de droit commun moyennant certaines adaptations : elle permet (i) d'estimer pour une espèce émergente la probabilité d'arriver dans le pays ou de s'y naturaliser, s'y répandre et y produire tel ou tel niveau d'impacts, et donc (ii) de hiérarchiser les priorités d'action et définir les modalités adéquates (Fried et Brunel, 2009). Cependant l'analyse de risque exige beaucoup de temps, elle reste d'application marginale au regard des espèces exotiques à évaluer ; elle n'a pas eu jusqu'ici d'influence notable sur les décisions attendues (arrêtés prévus par l'art. L.411-3 du Code de l'environnement).

Comparaison avec d'autres pays

À titre de comparaison, de nombreux protocoles d'évaluation/classement des EEE ont été mis en place dans le monde. Récemment, le ministère néerlandais de l'agriculture a fait réaliser une étude comparative des principaux protocoles en vigueur (le plus ancien date de 2005) pour établir aux Pays-Bas un système de ce type selon des préconisations appropriées. Verbrugge et al. (2010) ont ainsi examiné les forces et les faiblesses des systèmes d'Australie et Nouvelle-Zélande, de la Belgique, d'Allemagne et Autriche, de l'Irlande, de la Norvège, de la Suisse, du Royaume-Uni et enfin des États-Unis, Canada et Mexique.

Ces huit protocoles diffèrent fortement les uns des autres. La plupart

peuvent s'appliquer à l'ensemble des groupes taxonomiques mais certains sont dédiés à un groupe particulier. La question des impacts est toujours centrale, mais certains se focalisent sur les seuls impacts écologiques tandis que d'autres s'intéressent aussi à l'économie, la santé et aux effets sociaux. En plus des impacts, tous abordent en gros les mêmes étapes « amont » (introduction, établissement et expansion) et « aval » (gestion), mais de façon plus ou moins élaborée, et trois seulement s'intéressent aux tendances temporelles (changements à long terme, tel le changement climatique).

Au final, aucun des protocoles étudiés ne couvre l'ensemble des critères d'évaluation (cumulés pour cette comparaison) et aucun ne correspond idéalement au contexte national hollandais, ce qui se conçoit aisément puisque chacun répond à une situation, une stratégie et des priorités (trans)nationales particulières. Mais la comparaison aboutit à des conclusions d'ordre général intéressantes.

Elle distingue deux approches de la caractérisation du risque :

- des méthodes qualitatives (avis d'expert) de « listage » utilisant une série de questions formalisées pour établir une « liste noire » d'espèces à haut risque ;
- des méthodes quantitatives utilisant la somme des notes de divers critères comme indicateur de risque global faible, moyen ou élevé ; les notations détaillées peuvent ensuite servir, pour les niveaux moyen et élevé, à définir des catégories correspondant à des types d'actions possibles.

La première approche peut donner lieu à des méthodes robustes, très utiles pour un criblage général rapide. La deuxième souffre, en tant qu'indicateur de risque global, des faiblesses inhérentes à l'agrégation des notes ; elle est aussi très gourmande en données et temps de tra-

vail mais devient pertinente pour l'analyse approfondie d'espèces déjà sélectionnées selon la première approche. En conséquence, les auteurs recommandent de combiner les méthodes pour procéder en deux étapes et proposent diverses améliorations. Ils relèvent en particulier un flou assez général sur les règles de notation des critères d'impact écologique et indiquent comment y remédier pour garantir la cohérence des évaluations.

Vers une stratégie plus efficace au niveau européen et français

L'Union européenne vient d'engager une stratégie dédiée aux espèces exotiques envahissantes, à l'issue d'une phase de travaux destinés à « combler les lacunes de la connaissance »⁶, comme le projet européen DAISIE (*Delivering Alien Invasive Species Inventories in Europe*)⁷. Lancé en 2005, DAISIE compile et organise les données sur les invasions biologiques en Europe. Fin 2008, la Commission Européenne a proposé plusieurs options pour progresser « Vers une stratégie de l'Union européenne relative aux espèces envahissantes », selon une approche hiérarchique à 3 phases⁸ : prévention (adaptée aux différentes voies d'introduction), détection précoce et éradication rapide et, pour les EEE implantées et largement répandues, lutte et/ou confinement (COM, 2008). Le Conseil de l'UE a donc adopté le 25 Juin 2009 (2953^{ème} session) des conclusions pour « que soit élaborée [pour 2010-2011] une véritable stratégie qui comble les lacunes existantes au niveau de l'UE et instaure un cadre global de l'UE relatif aux espèces exotiques envahissantes en prévoyant de nouveaux éléments législatifs spécialisés et, si nécessaire, en modifiant

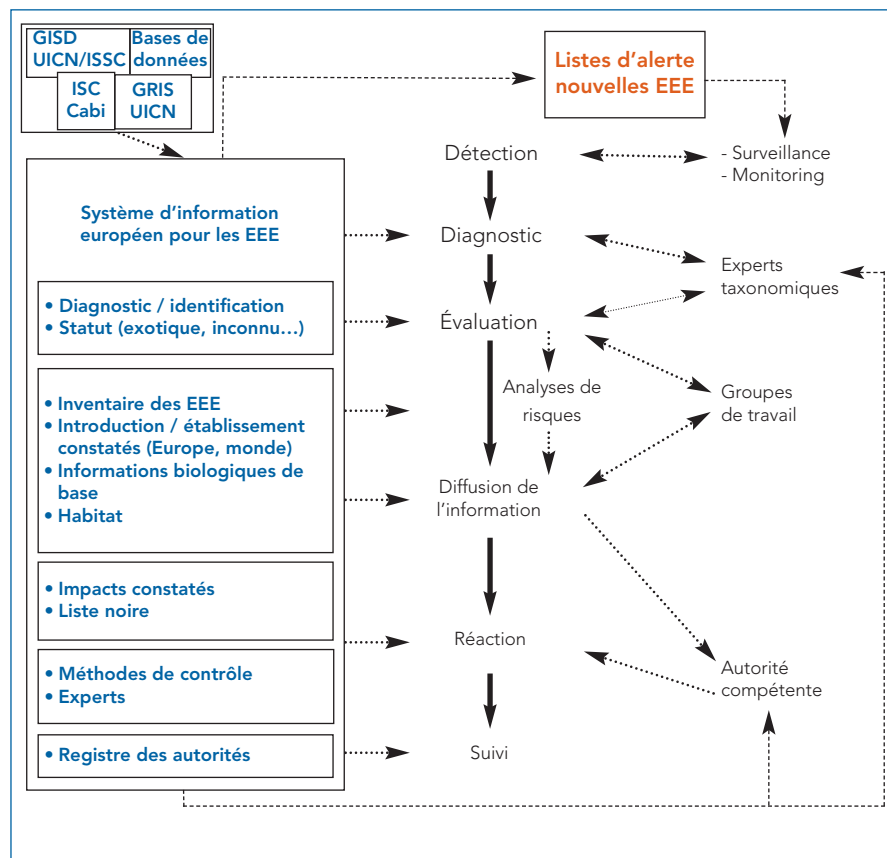


Fig. 2 : structure d'un système de détection précoce des EEE et réaction rapide en Europe, présentée au Conseil des ministres de l'UE (d'après AEE, 2010)

ou intégrant les dispositions existantes ». Le Conseil souligne « qu'il est urgent que la Commission et les états membres élaborent conjointement un système d'information approprié permettant une alerte précoce et une réaction rapide » (voir figure 2), en regroupant l'ensemble des listes d'EEE actualisées des différents pays européens et en coopérant au sein de l'UE ainsi qu'avec les pays voisins et les organisations internationales pour l'élaboration des mesures de biosécurité et de contrôle.

Quant à la France, elle a lancé en juillet 2010 la révision de sa stratégie nationale pour la biodiversité, notamment pour l'articuler avec

les dispositions de l'UE, mais surtout pour mettre en pratique les engagements du Grenelle de l'environnement, dont notamment l'article 23 de la loi Grenelle 1 : « Pour stopper la perte de la biodiversité sauvage et domestique, restaurer et maintenir ses capacités d'évolution l'État se fixe comme objectifs : [...] la mise en œuvre de plans de lutte contre les espèces exotiques envahissantes, terrestres et marines, afin de prévenir leurs installations et leur extension et réduire leurs impacts négatifs ».

Dans la foulée de la loi, le ministère chargé de l'Écologie a missionné deux opérateurs, la Fédération des conservatoires botaniques nationaux (FCBN) pour

6 cf. 6^{ème} programme communautaire d'action pour l'environnement

7 <http://www.europe-aliens.org/>

8 Conformément aux principes directeurs de la Convention sur la diversité biologique (CDB)

les espèces végétales et le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) pour les espèces animales, pour coordonner une stratégie de lutte contre les EEE ayant un impact négatif sur la biodiversité incluant :

- le renforcement des moyens de prévention de l'introduction d'EEE (susceptibles de provoquer des dommages) ;
- la constitution l'animation et la mobilisation d'un réseau national d'experts scientifiques et techniques associant les établissements publics (détection précoce et surveillance) ;
- la mise en place de plans nationaux de lutte contre certaines EEE.

Une stratégie pour le milieu forestier ?

Les choses sont donc en train de bouger et la sphère forestière est évidemment très concernée, pour plusieurs raisons :

■ Les écosystèmes forestiers peu perturbés n'auraient pas forcément la résistance qu'on leur prête généralement. Martin *et al.* (2009) considèrent que l'importance écologique des caractères pionniers des plantes exotiques envahissantes est surestimée car : (i) la majorité des invasions actuellement avérées est le fait d'espèces introduites volontairement, précisément parce que ces caractères en facilitaient l'usage, et (ii) en focalisant l'attention sur les espaces ouverts et perturbés, elle a conduit à négliger des espèces plus aptes à investir des milieux évolués (matures) comme les forêts. Or les auteurs ont recensé dans la littérature (forêts tropicales et tempérées) au moins 139 espèces exotiques ayant envahi des sous-bois sombres et peu perturbés⁹ : ces espèces sont tolérantes

à l'ombre et se développent très vigoureusement dès que le couvert s'ouvre (trouées naturelles ou anthropiques), ce qui accélère ensuite le processus de propagation. Leur analyse est que, si les forêts en phase de maturation/vieillessement sont effectivement résistantes aux invasions de plantes exotiques, l'amorce d'un nouveau cycle est une période critique de forte sensibilité.

■ À la fois milieu « naturel » et espace « cultivé », multifonctionnel, la forêt française est au carrefour de toutes les questions que soulèvent les plantes exotiques envahissantes et leurs conséquences possibles. Il s'agit non seulement des effets sur la biodiversité, mais aussi des effets économiques aussi bien négatifs (blocage de la régénération par *Prunus serotina*) que positifs (fort intérêt du robinier – *Robinia pseudoacacia* – dans certaines stations) et des effets sociaux dans toute leur complexité : de la perception esthétique aux risques allergiques en passant par l'amplification inconsciente des phénomènes... ou des initiatives militantes, entre autres.

■ La forêt est aussi très impliquée dans la prise en compte des changements globaux imputables à l'homme, et l'« explosion » des EEE ces dernières décennies est l'une des composantes des changements globaux, au même titre que les émissions de gaz à effet de serre, par exemple. L'enjeu est à la fois de freiner ces changements et de s'y adapter dans la mesure où ils ont d'ores et déjà quelque chose d'inéluctable. Dans ce contexte, les forestiers doivent adapter les peuplements aux changements climatiques pour qu'ils puissent assurer une fonction de stockage de carbone (peuplements sains sur pied, bois ma-

tériau de construction) et l'utilisation d'essences exotiques est une piste qui se doit d'être sérieusement considérée. Selon la terminologie retenue ici et comme elles pourraient se disperser naturellement, il s'agirait d'espèces envahissantes... à effet environnemental positif. Les décisions dans ce domaine s'annoncent délicates.

Pour l'ONF et les autres acteurs forestiers, l'implication dans le réseau d'experts scientifiques et techniques à construire est une nécessité et une opportunité pour concevoir un dispositif de détection précoce et surveillance pertinent. L'ONF se doit aussi de participer à l'élaboration de stratégies de gestion appropriées.

Conclusion

Bien que la question des plantes exotiques envahissantes soit d'une actualité pressante, la gestion organisée en France commence seulement à se mettre en place. Explicitement convié, en tant qu'Établissement public concerné, à collaborer au futur réseau de surveillance voulu par le cadre du Grenelle de l'environnement, l'ONF doit se saisir activement de cette occasion pour s'inscrire dans le dispositif national et construire sa propre stratégie.

Si les spécialistes s'accordent globalement sur les processus d'invasion, leur ampleur et les mécanismes biologiques et écologiques qui les sous-tendent, les avis divergent sur l'attitude à adopter en réponse au phénomène. Certains, très alarmistes, sont partisans d'une « lutte à tout prix » contre les EEE dans un souci de préservation des écosystèmes autochtones tandis que d'autres, à l'opposé, perçoivent les invasions comme une évolution, au même

⁹ dont, sans surprise, *Prunus serotina*



C. Portejoie, ONF

Un exemple de plante exotique envahissante en forêt : Prunus serotina ; brutale « explosion » dans les peuplements ouverts par la tempête Klaus (1999) dans le massif de Haguenau

titre que les changements qui ont façonné notre monde au cours de l'Histoire.

Or, comme l'ont souligné Richardson et al. (2000), une grande partie des polémiques et confusions vient d'un vocabulaire implicitement belliciste et anxio-gène. Les plantes exotiques envahissantes ne sont pas toutes des pestes porteuses de nuisances. De même, évaluer (analyser) les risques au niveau national et européen ne signifie pas qu'il y ait systématiquement des risques. Il s'agit au contraire de trier, parmi l'ensemble des plantes exotiques envahissantes, celles qui induisent effectivement des dommages significatifs sur le territoire national ou dans les pays voisins ; cela requiert une méthode robuste, des critères objectifs et une organisation transparente. In fine, il s'agit aussi de catégoriser les types de risques et de les mettre en balance, pour chaque espèce évaluée, avec d'éventuels effets positifs pour apporter des réponses adéquates ; lesquelles peuvent re-

vêtir diverses formes qui ne relèvent pas toutes de la « lutte », au sens de guerre coûteuse et acharnée qu'on lui prête ordinairement.

Jonathan HARENG

INRA, UMR1092, LERFoB, Centre
INRA de Nancy
ONF, département R & D

Christine MICHENEAU

ONF département R & D

Bibliographie

Genovesi P., Shine C., 2004. Stratégie européenne relative aux espèces exotiques envahissantes. Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (Convention de Berne) – Sauvegarde de la nature, n° 137. Strasbourg : éditions du Conseil de l'Europe, 75 p.

Müller S. (coord), 2004. Plantes invasives en France. Paris : Muséum national d'Histoire naturelle. 168 p.

Fried G., Brunel S., 2009. Un nouvel outil de hiérarchisation des plantes exotiques : premiers résultats de son application sur une liste de 217 espèces présentes en France. XIII^{ème} Colloque international sur la Biologie des Mauvaises Herbes. Dijon, France, 8 - 10 septembre 2009, pp.477-489

Verbrugge L.N.H., Leuven R.S.E.W., et Van der Velde G., 2010. Evaluation of international risk assessment protocols for exotic species. Department of Environmental Science, Faculty of Science, Institute for Water and Wetland Research, Radboud University Nijmegen. 42 p.

AEE, 2010. Towards an early warning and information system for invasive alien species (IAS) threatening biodiversity in Europe. EEA technical report N° 5/2010. Luxembourg : Bureau des publications officielles de l'Union européenne. 52 p.

COM, 2008. Vers une stratégie de l'Union européenne relative aux espèces envahissantes. Communication de la Commission au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Bruxelles : Commission des communautés européennes. 12 p. + ann.

Martin P., Canham C. Marks P., 2009. Why forests appear resistant to exotic plant invasions : intentional introductions, stand dynamics, and the role of shade tolerance. The Ecological Society of America, Front Ecol Environ, Vol. 7, n° 3, pp. 142-149

Richardson D.M., Pysek P., Rejmanek M., Barbour M.G., Panetta F.D., West C.J., 2000. Naturalization and invasion of alien plants : concepts and definitions. Diversity and Distribution, vol. 6 pp. 93-107

Dossier



Télédétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels (I)

Longtemps réservée à quelques experts, la télédétection se « démocratise » avec la banalisation du numérique, la diffusion d'images satellitaires et le développement des SIG. Elle a cependant des contraintes et des limites et son utilisation requiert de solides compétences. L'ambition de ce dossier coordonné par Anne Jolly est d'installer une « culture » de base, avec des exemples concrets d'applications forestières, dont certaines sont déjà opérationnelles tandis que d'autres restent à développer. En voici la première partie... suite et fin au prochain numéro !

- p. 19 La télédétection et son application à l'étude de la végétation : quelques principes
par Anne Jolly
 - p. 32 L'image aérienne proche infrarouge : une information essentielle pour l'étude et la cartographie de la végétation
par Jean-Guy Boureau
- p. 39 La BD ORTHO© infrarouge couleur, support de référence pour l'étude de la végétation en France métropolitaine
par Louis Maire et Éliane Matter
 - p. 49 Le scanner laser aéroporté en zone de montagne : localiser la ressource forestière et évaluer ses conditions de mobilisation
par Jean-Matthieu Monnet, Nicolas Clouet, Éric Mermin et Frédéric Berger
- p. 55 Utilisation de séries temporelles d'images satellitaires pour cartographier le dépérissement des boisements résineux du sud du Massif Central
par Véronique Chéret, Jean-Philippe Denux, Christelle Gacherieu et Jean-Pierre Ortisset
 - p. 63 La photo-interprétation et les analyses stéréoscopiques, outils indispensables des cartographies de risques en montagne
par Philippe Bouvet et Isabelle Charvet
- p. 69 Comment les outils de la télédétection peuvent-ils aider à la cartographie des habitats forestiers ? Mise au point d'une méthode sur le massif du Vercors
par Vincent Breton, Julien Renaud et Sandra Luque

A suivre (prochain numéro)



Télédétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels (2)

Nous donnons ici dès maintenant le sommaire de la deuxième partie de ce dossier, à paraître dans notre prochaine édition, car plusieurs auteurs font référence à l'un ou l'autre des autres articles du dossier, dont certains ne sont pas encore publiés. Nous nous excusons de cette incommodité pour le lecteur, mais il nous a paru plus sage de procéder ainsi que de corriger en fin de parcours l'ensemble des références, au risque d'introduire des erreurs.

- p. ? La carte forestière version 2 de l'IFN. De la réalisation à la diffusion
Par Thierry Touzet
- p. ? Corbières Orientales : cartographie des habitats d'espèces de la directive oiseaux à partir de données de télédétection
par Vincent Parmain
- p. ? Télédétection et cartographie de l'état sanitaire à l'échelle d'un massif forestier : l'exemple du chêne en forêt de Vierzon
Par Anne Jolly
- p. ? Le Lidar, outil performant pour cartographier la hauteur des peuplements forestiers
Par Jérôme Bock, Jean-Pierre Renaud, G. Dez, F. Martin, M. Leroy, E. Dambrine, J.-L. Dupouey
- p. ? La cartographie de la sensibilité de la végétation aux incendies de forêt en région méditerranéenne - Apport et limites d'usage des images satellites
par Yvon Duché, Rémi Savazzi et Benoît Reymond
- p. ? Applications de télédétection en Guyane, une histoire de diversité
par Pierre Joubert, Stéphane Guitet, Guilhem Debarros, Olivier Brunaux, Sophie Pithon et Adrien Corvisi

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

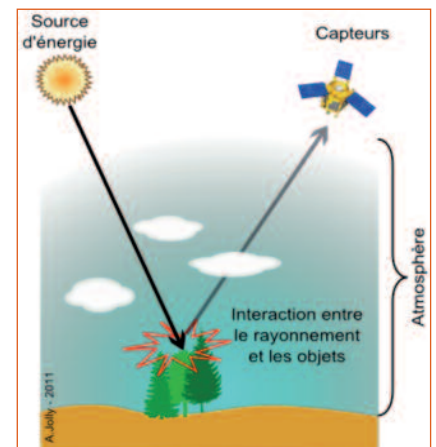


Fig. 1 : principes de la mesure par télédétection

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.

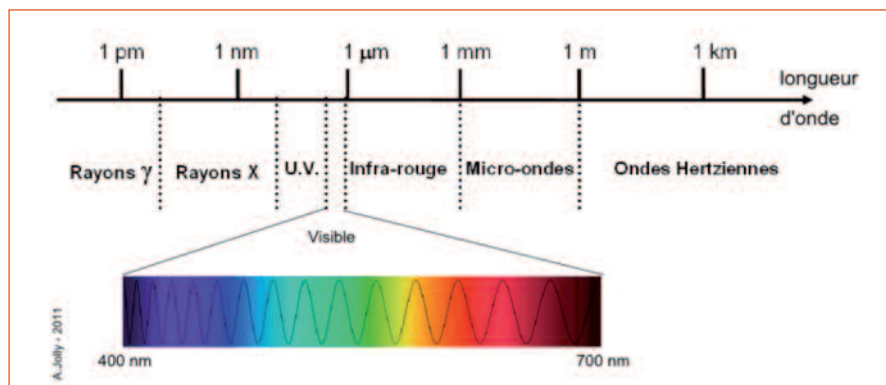


Fig. 2 : le spectre électromagnétique et ses divers domaines

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

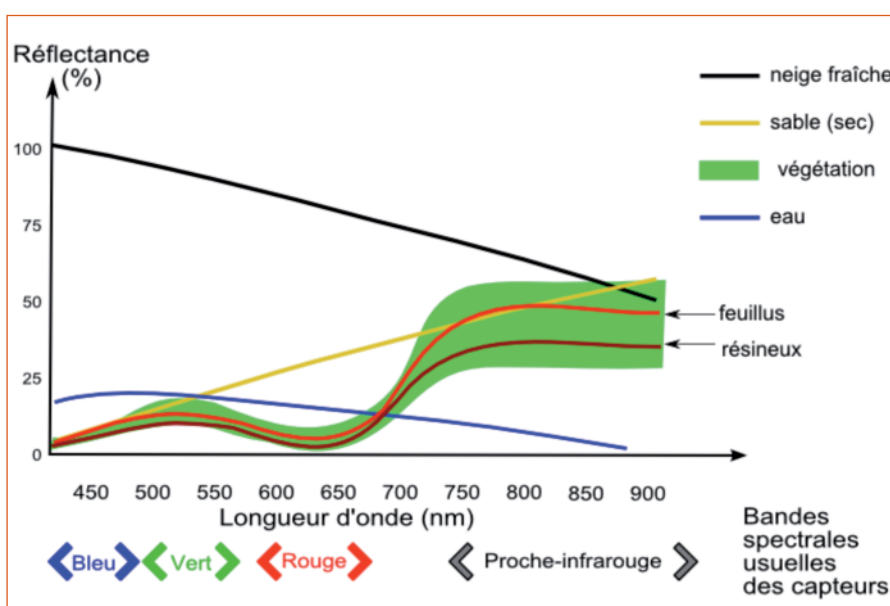


Fig. 3 : courbes schématiques de réflectance (proportion d'énergie incidente réfléchi) de divers types d'objets dans le visible et le proche infrarouge

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.

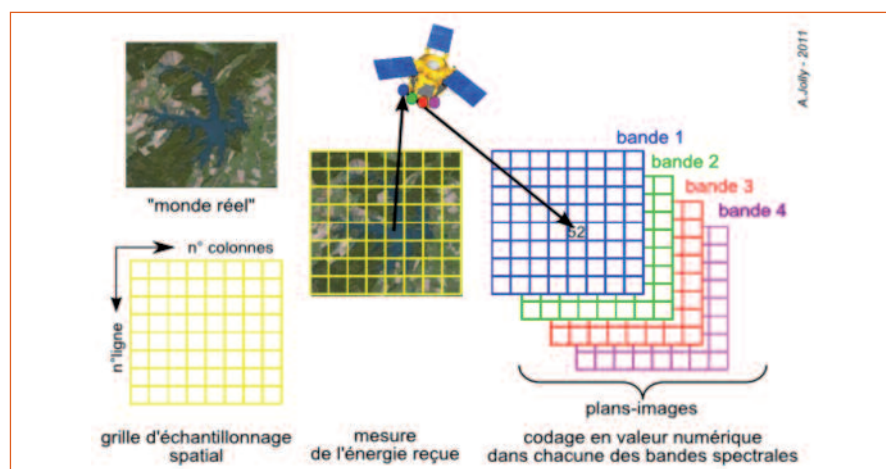


Fig. 4 : principe de l'image numérique de télédétection

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

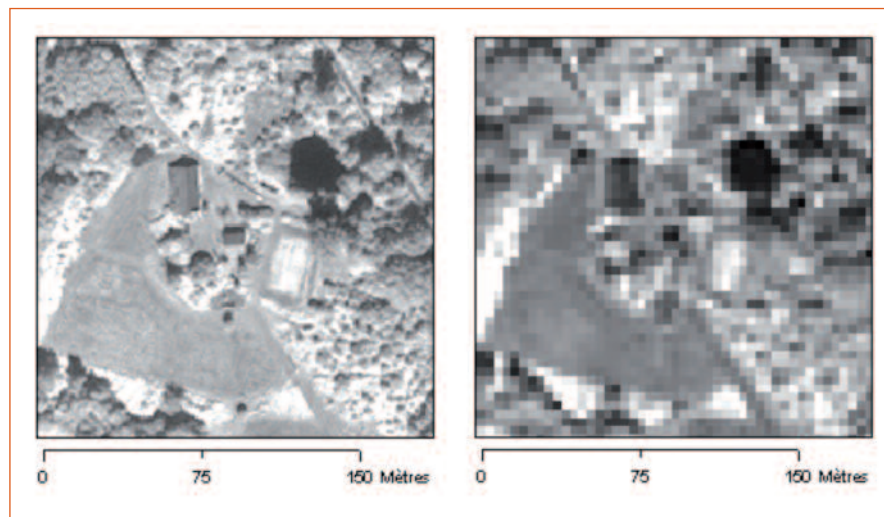


Fig. 5 : exemple d'images d'un même site à des résolutions spatiales différentes

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	4 bandes	6 bandes	6 bandes	4 bandes	4 bandes	4 bandes	4 bandes
		36 bandes spectrales de 400nm (bleu) à 14,4 microns (IR thermique)	Bleu, Rouge, Proche IR, Moyen IR	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR 1, Moyen IR 2, IR thermique	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR 1, Moyen IR 2, IR thermique	Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR	Vert, Rouge, Proche IR, Moyen IR	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR	Bleu, Vert, Rouge, Proche IR
Résolution spatiale (au nadir*)	panchromatique				15 m	10 m	2,5 m & 5 m	2 m	1,5
	multispectrale	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

** 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 augmen

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	Pléiade HR1 : prévue fin 2011 Pléiades 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, mouvements du système, 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).

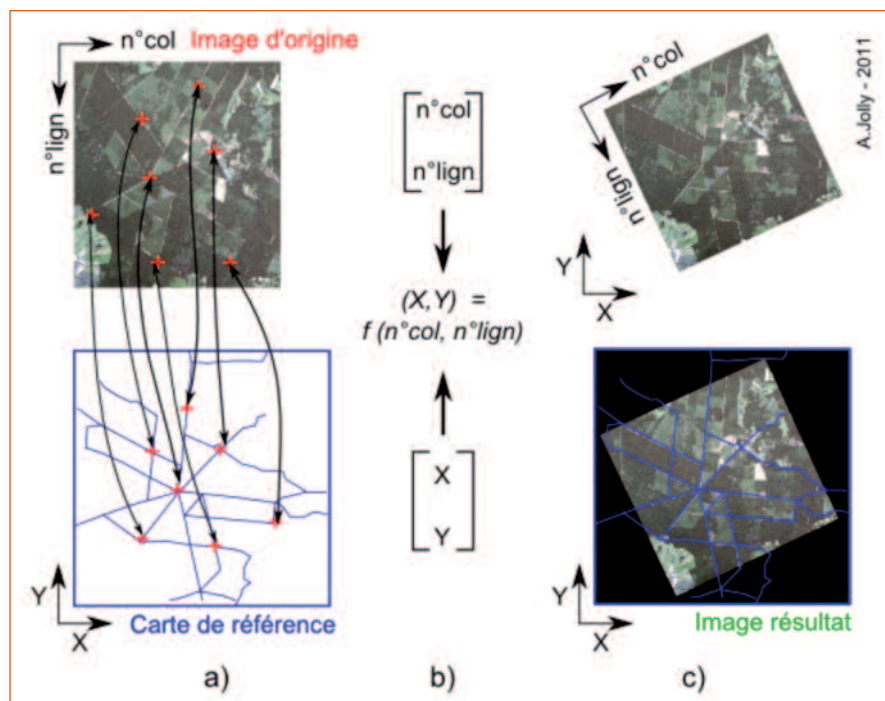


Fig. 6 : principe de la correction géométrique d'une image pour la rendre superposable à une carte (ici sans prise en compte du relief)

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.

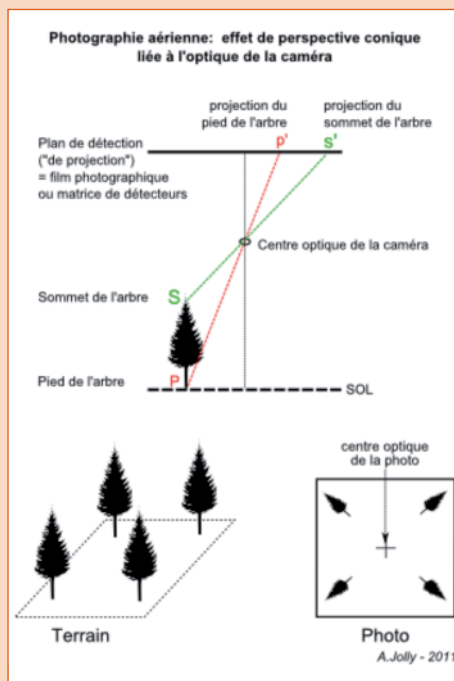
Pourquoi les arbres ou les bâtiments paraissent-ils penchés sur les photographies aériennes, même après orthorectification ?

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.



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

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.

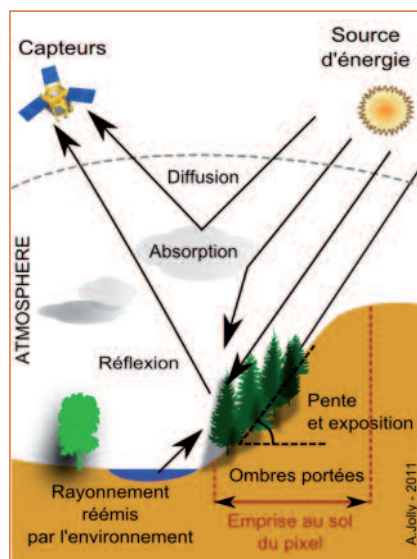


Fig. 7 : principaux facteurs influençant la réflectance d'une surface élémentaire (d'après Caloz et Collet, 2001)

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, 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

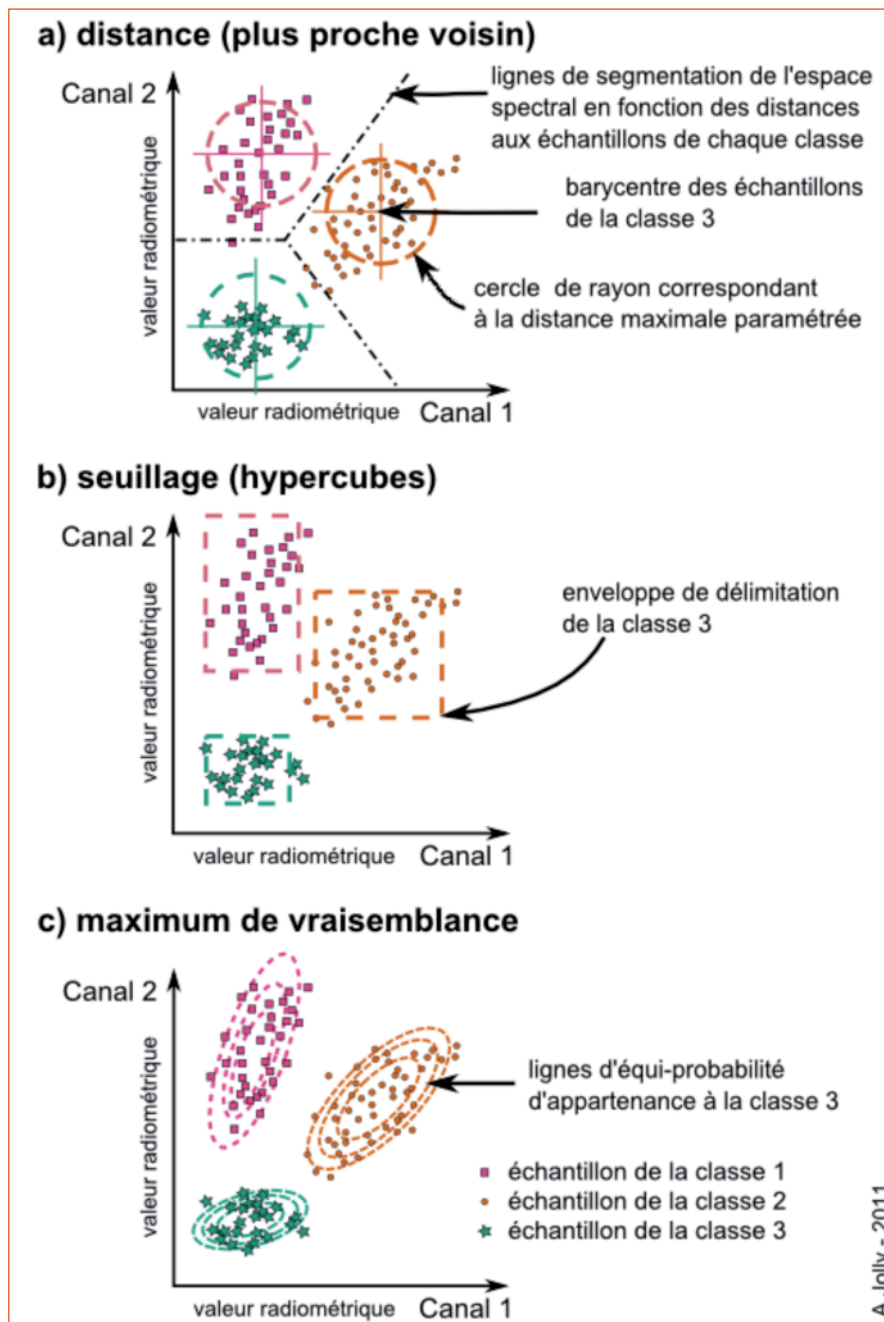


Fig. 8 : principe de trois méthodes de classification supervisée : (a) par distance (spectrale) ou « plus proche voisin »; (b), par seuillage (ou « hypercubes »), (c) par maximum de vraisemblance (d'après Caloz et Collet, 2001)

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.

- 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)
- 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.
- 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.

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.

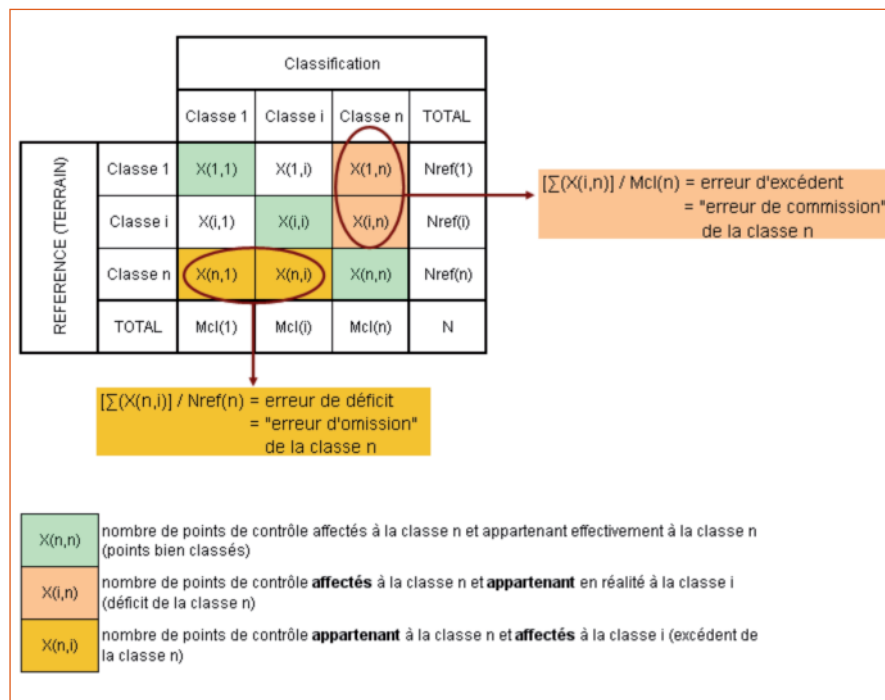


Fig. 9 : principe de calcul d'une matrice de confusion

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 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.

L'image aérienne proche infrarouge : une information essentielle pour l'étude et la cartographie de la végétation

Dès sa création, l'IFN eut recours aux images aériennes infrarouges comme support pour asseoir ses unités d'échantillonnage. À partir des années 1980, celles-ci servirent également à la réalisation de la carte forestière. Mais qu'est-ce qu'une image aérienne proche infrarouge, quel est son intérêt pour l'étude de la végétation ? Quels sont les éléments à considérer lorsque l'on interprète une image de ce type ? Quelques éléments de réponse ont été rassemblés ici tant sur les caractéristiques des images que sur la méthode d'interprétation, laquelle requiert toutefois un minimum d'expérience.

Si les grands types de couverture du sol peuvent être appréhendés à partir d'images « ordinaires », c'est-à-dire panchromatiques noir et blanc ou couleurs naturelles, la distinction des feuillus et des résineux, voire de certaines espèces, n'est possible de façon fiable qu'à l'aide du proche infrarouge. Il en va de même pour le degré d'activité chlorophyllienne des plantes (débourrage, état sanitaire, etc.) ou pour une meilleure perception de l'humidité des sols. L'image dite infrarouge couleur (IRC) est ainsi l'image la plus appropriée pour l'étude de la végétation, même si toutes les espèces arborescentes, arbustives ou herbacées n'y sont pas traduites par une couleur spécifique.

L'infrarouge et son enregistrement

La partie « visible » et photosynthétiquement active du spectre solaire est formée d'un ensemble de radiations colorées (arc-en-ciel) caractérisées par leur longueur d'onde. Ces radiations, comprises entre l'ultraviolet et l'infrarouge, s'étendent

de 400 à 700 nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$). Au-delà du spectre visible et jusqu'à des longueurs d'onde de l'ordre de 1 mm (micro-ondes) se situe le rayonnement infrarouge (IR), lequel se divise en deux ensembles : l'IR réfléchi et l'IR émis ou IR thermique. L'IR réfléchi s'étend de 700 à 3 000 nm environ et s'utilise en télédétection comme le rayonnement visible ; au-delà on est dans le domaine de l'IR thermique, rayonnement très différent tant du spectre visible que de l'IR réfléchi. Le très proche infrarouge (700 à 900 nm), qui présente un grand intérêt pour l'étude de la végétation est le plus utilisé et le plus couramment disponible, en complément des longueurs d'onde du visible.

Enregistrement argentique du proche infrarouge

Les émulsions photographiques sont sensibles de 300 à 900 nanomètres environ. Elles permettent d'enregistrer la partie visible du spectre solaire (films panchromatiques noir et blanc ou couleur), mais également une partie de l'ultraviolet ainsi que le proche infra-

rouge (films IR). Pour enregistrer le proche infrarouge sur un film couleur (IRC) il est nécessaire de lui affecter l'une des trois couleurs primaires. Il est impossible de ce fait, d'enregistrer à la fois l'ensemble des couleurs naturelles et le proche infrarouge. Un « glissement » des trois couleurs de base vers les grandes longueurs d'onde permet d'affecter la couleur rouge au rayonnement proche infrarouge. Le rayonnement rouge réfléchi par le sol est alors traduit par du vert et le vert par du bleu. Le vert, le rouge et le proche infrarouge réfléchis par le sol sont ainsi traduits sur le film IRC par du bleu, du vert et du rouge (figure 1).

Enregistrement numérique du proche infrarouge

L'image numérique infrarouge couleur est constituée de pixels dont la radiométrie est codée avec les niveaux d'intensité enregistrés par les trois canaux vert, rouge et proche infrarouge de la caméra numérique multicanal, traduits respectivement par du bleu, du vert et du rouge comme pour l'enregistrement argentique.

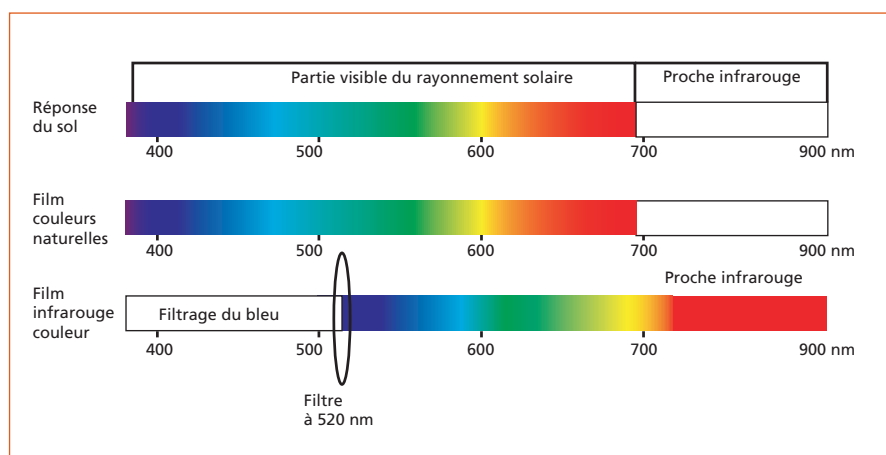


Fig. 1 : principes de création des films couleurs naturelles et infrarouge couleur

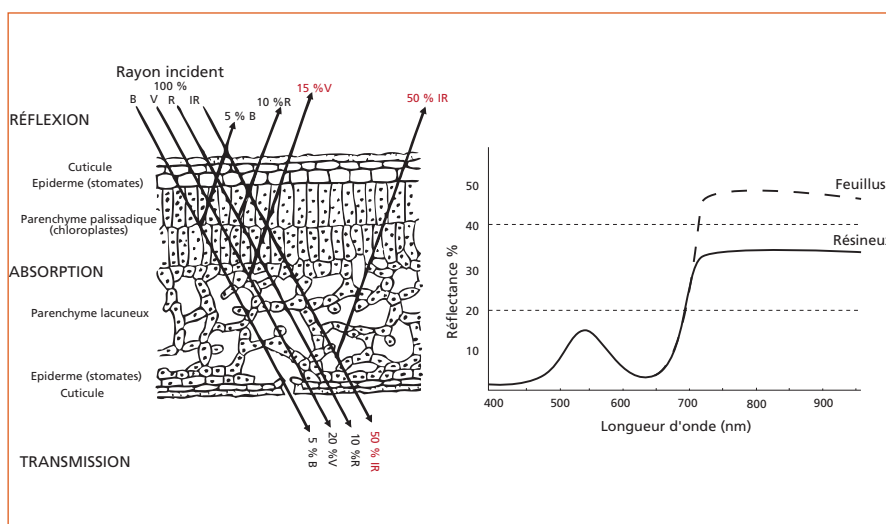


Fig. 2 : réflexion, absorption et transmission du rayonnement solaire par la végétation

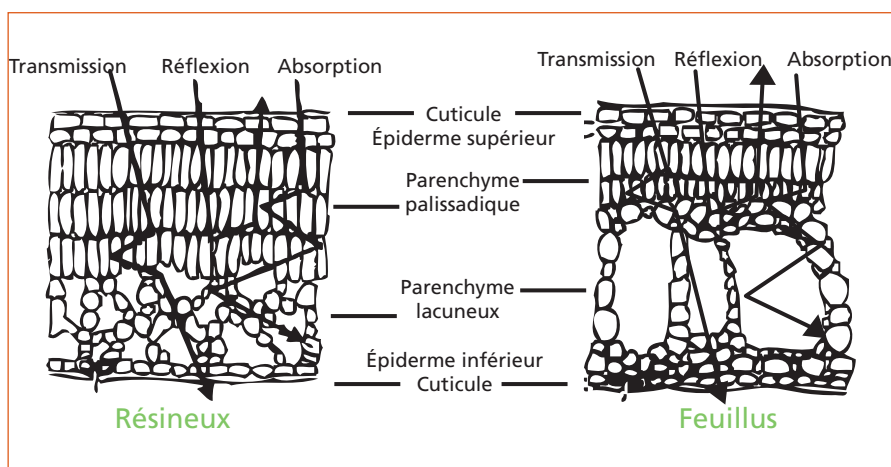


Fig. 3 : structure des feuillus et trajet de la lumière (d'après Girard, 1989)

Les principales caractéristiques radiométriques d'une caméra numérique sont la dynamique (nombre de niveaux de gris discernables), le rapport signal/bruit (il s'agit de minimiser l'influence du bruit par rapport à l'information utile ; voir encadré) et la sensibilité de la réponse du capteur à la lumière. Notons ici que cette réponse est linéaire pour les capteurs numériques (alors que celle des films est logarithmique), ce qui permet d'améliorer la qualité radiométrique de la mosaïque d'images. La richesse radiométrique obtenue (profondeur de l'image) est également bien supérieure à celle des films argentiques numérisés. Initiées dans les années 1990, les études sur les capteurs numériques sont encore aujourd'hui en plein développement.

La réponse des végétaux aux rayonnements visible et proche infrarouge

Le rayonnement solaire intercepté par la végétation est en partie absorbé, en partie réfléchi, le reste étant simplement transmis. La réponse des végétaux aux rayonnements visible et proche infrarouge résulte de la combinaison de ces trois processus. Elle dépend du nombre d'assises cellulaires et des formes plus ou moins régulières des cellules des feuilles (figure 2), celles-ci évoluant au cours de la vie de la feuille.

Dans le proche infrarouge, les pigments foliaires ainsi que la cellulose sont transparents : l'absorption est donc négligeable et le rayonnement incident est soit transmis soit réfléchi. Globalement, la réflectance de la végétation, c'est-à-dire la proportion du rayonnement incident qu'elle réfléchit, est de l'ordre 50 %, c'est nettement plus élevé que dans le rayonnement visible. Là réside l'intérêt du proche IR. Le parenchyme lacuneux est le principal responsable cet état de fait : lorsqu'il est peu développé (c'est le cas des résineux) la réflectance est

Le bruit de l'image

Le bruit est un terme issu du domaine de l'acoustique et désigne un signal parasite. Sur tout signal utile vient s'adjoindre un ensemble d'informations parasites aléatoires. Sur une image, si un objet est bien éclairé, le capteur reçoit beaucoup de photons et, en conséquence, la proportion de photons parasites est négligeable par rapport à l'information utile : le rapport signal/bruit est satisfaisant. Dans les zones sombres, le capteur reçoit peu de photons et cette proportion de photons parasites n'est alors plus négligeable.

Sur film argentique, le bruit prend la forme d'une granulation colorée ou d'un voile uniforme. En numérique, les effets sont comparables même si l'origine du phénomène n'est pas la même : agitation thermique naturelle des électrons, réponse non homogène du capteur ou exploitation du signal.

faible. À l'inverse, lorsqu'il est très développé (feuillus), la réflectance est forte (figure 3). Ceci explique que la distinction entre feuillus et résineux soit nettement plus aisée sur des images en IRC que sur des images en vraies couleurs.

L'influence de la phénologie

L'importance relative des pigments foliaires dépend du stade phénologique de la plante, de son état de stress ou de son état sanitaire (figure 4). Cela se traduit nécessairement sur sa réponse spectrale dans le visible comme dans le proche infrarouge. S'ajoutent à ces facteurs les conditions environnementales et stationnelles ou encore la structure du houppier. À l'échelle du peuplement, la réponse spectrale est influencée par l'âge, la densité, la structuration verticale et la composition, c'est-à-dire la phénologie souvent non uniforme des espèces présentes.

Influence de la date et de l'heure de prise de vue

La réponse des végétaux dépend également de la date et de l'heure de prise de vues. Ces impératifs horaires et saisonniers sont importants à respecter tant au regard de la phénologie des espèces que de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. Il est important, en effet, d'avoir un éclairage maximal de la zone observée et le minimum de zones à l'ombre. Des prises de vues autour du midi solaire

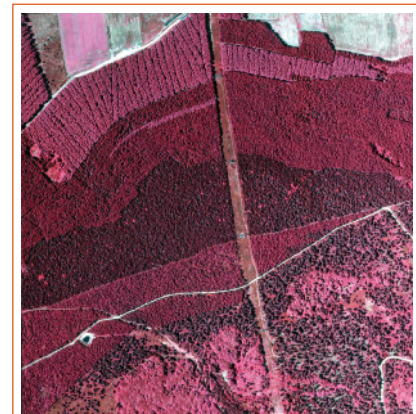
(lorsque le soleil est le plus haut sur l'horizon) sont donc préconisées. Cependant, même dans ces conditions optimales, il reste toujours des zones plus ou moins fortement éclairées et une même espèce n'apparaîtra pas de la même façon selon qu'elle est située sur un versant au soleil ou sur un versant à l'ombre.

Lorsque la date de prise de vues correspond, pour une espèce donnée, à son stade de débourrage, de floraison ou de sénescence des feuilles, son identification est grandement facilitée. Mais ces conditions optimales, caractéristiques du printemps ou de l'automne, sont souvent associées à des hauteurs insuffisantes du soleil au-dessus de l'horizon et donc à des ombres portées trop importantes, même autour du midi solaire. En été la situation est plus favorable. Cependant, le respect d'une hauteur minimale du soleil au-dessus de l'horizon de 30° (norme IGN) réduit le temps de prise de vues à une plage horaire quotidienne de 4 heures environ centrée sur le midi solaire.

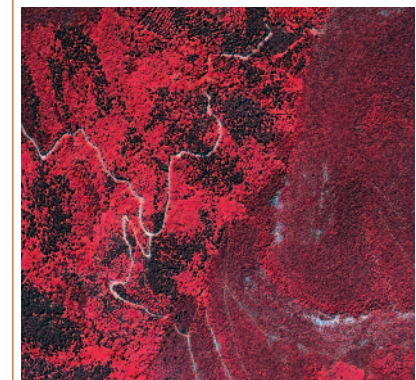
L'ensemble de ces facteurs a pour conséquence le fait que la variabilité intraspécifique est souvent équivalente, voire supérieure, à la variabilité interspécifique rendant délicate toute identification des espèces par leur seule réponse spectrale.



Fig. 4 : diminution de l'activité chlorophyllienne des chênes suite à une attaque de bombyx disparate. La couleur rouge, plus ou moins foncée, des chênes en été devient blanchâtre par place là où les chênes sont attaqués.



Haute-Loire : de haut en bas : plantation de mélèze (rose) d'épicéa commun (brun rouge), de pin sylvestre (sombre). En bas de l'image, épicéas communs adultes mêlés de quelques taches de hêtre.



Gard, Cévennes : peuplement de chênes verts (à droite) et de châtaigniers mêlés de pins maritimes (à gauche).

Fig. 5 : distinction des espèces par leur réponse spectrale

Interpréter la végétation : une combinaison de multiples connaissances

La photo-interprétation fait appel à des raisonnements complexes basés sur la prise en compte de tous les critères observables, ainsi que sur un certain nombre de connaissances acquises, extérieures à l'image, mais toujours mobilisables. « ... des résultats sérieux dans ce domaine ne seront obtenus que si le photo-interpréteur est d'abord botaniste, écologiste ou géographe avant d'être photo-interpréteur » (Rey, 1968). La photo-interprétation exige donc de solides connaissances thématiques et ne dispense pas d'autres modes d'étude du milieu (bibliographie, échanges d'expériences, etc.). Elle ne dispense pas non plus d'un

travail de terrain. La vision d'ensemble que procure la vue aérienne apparaît complémentaire de la vision très locale, mais beaucoup plus exhaustive, que l'on peut avoir en cheminant sous le couvert des cimes.

Distinction des espèces par leur réponse spectrale

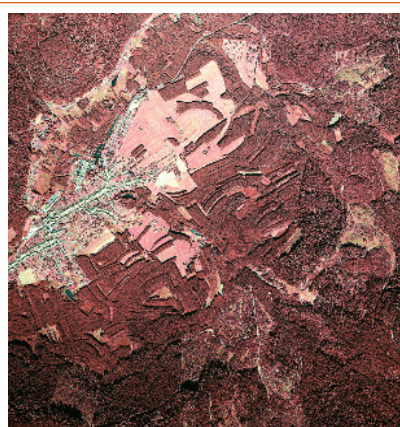
Les peuplements qui, sur une image infrarouge couleur d'été, peuvent être distingués par des différences de teintes, quelles que soient les conditions, sont peu nombreux. Cependant, outre la distinction feuillus (rouges) et résineux (sombres), les pinèdes par exemple, sans distinction d'espèces, se différencient bien des autres résineux (sapins et épicéas notamment). Le cèdre et le mélèze s'identifient également par une teinte assez stable et caractéristique (figure 5).

Avec un minimum d'expérience et de connaissance des milieux, des distinctions plus fines sont possibles sur des images IRC d'été (juil-

let/août), de bonne qualité, à l'échelle moyenne du 1/20 000. Quand les différences de teintes ne sont pas assez discriminantes, d'autres critères d'identification interviennent au premier rang desquels figure l'analyse des formes.

Analyse des formes

Au-delà des couleurs, l'étude des formes est une des bases les plus sûres de la photo-interprétation. En effet, si la forme des objets peut varier dans le temps, elle reste un critère d'identification beaucoup plus stable et donc plus fiable que la couleur. L'observation de la forme des végétaux est possible sur tout type de photographie aérienne. Toutefois, du fait de la forte réflectance de la végétation dans le proche IR, les images utilisant ce canal apportent généralement une information plus riche sur les contrastes locaux et permettent souvent de mieux mettre en évidence certains éléments de forme ou de structure des couverts.



Vosges : la juxtaposition de petites parcelles d'épicéas d'âges différents qui caractérise le boisement des anciennes terres agricoles, tranche avec la pessière qui couvre les flancs de la montagne

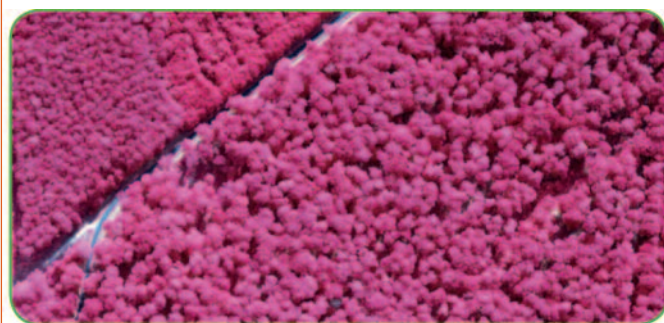


Haute-Saône : peuplement de chênes traité en taillis avec parcelles d'âges différents

Fig. 6 : analyse des formes, dimensions et répartitions spatiales des parcelles



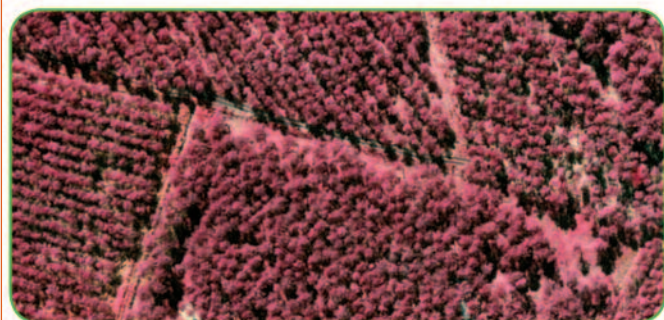
Fig. 7 : hétérogénéité liée à la structure des peuplements



Cher : futaie de chênes ; cimes plutôt rugueuses, hétérogènes, à bords irréguliers



Alpes-de-Haute-Provence : mélèzes ; cimes coniques et pointues



Gironde : pin maritime ; forme assez semblable à celle des chênes décidus, les pins se distinguent bien des autres conifères



Ariège : taillis de robinier ; petites cimes effilées, individualisables, aspect de chou-fleur

Fig. 8 : analyse de la forme des cimes

L'analyse des formes peut concerner trois types d'objet :

- les parcelles ou éléments de type de formation ;
- les arbres et groupes d'arbres ou hétérogénéité intra-parcellaire ;
- les cimes, quelles que soient leur densité ou la structure du peuplement.

À chacun de ces trois types d'objets peuvent être attribuées quatre caractéristiques : le nombre, la dimension, la forme et la répartition spatiale, dans le plan horizontal comme dans le plan vertical.

À l'échelle **parcellaire**, les formes anthropisées ou « naturelles », grandes ou petites, géométriques ou quelconques, connexes ou disjointes, enclavées ou non au sein d'un autre usage du sol, ainsi que leur répartition spatiale, peuvent être porteuses d'information sur le type de milieu, le mode de mise en valeur, le type de sylviculture pratiqué ou l'historique de la parcelle (figure 6 page précédente).

À l'exception des parcelles équiennes, monospécifiques et à couvert plein (futaie régulière de chênes par exemple), les peuplements forestiers présentent une certaine **hétérogénéité intra-parcellaire**. Ils apparaissent ainsi constitués de taches élémentaires différentes, véritables mosaïques d'essences, de structures forestières, de densités ou d'âges, voire de types de couverture du sol. Le nombre de ces constituants et la façon dont ils occupent l'espace caractérisent l'hétérogénéité de la parcelle et permettent son interprétation (figure 7 page précédente). Ainsi, les mélanges de feuillus et de résineux, de futaie et de taillis, la forêt ouverte sont quelques exemples de ces formations dont l'aspect est hétérogène sur l'image. Leur délimitation ne peut dépendre alors que de spécifications extérieures à l'image et notamment de l'objectif poursuivi et de la typologie adoptée.

Enfin, l'identification des espèces, lorsqu'elle est possible, repose sur une observation détaillée de la **forme des cimes**. Ceci nécessite des clichés d'échelle assez fine, 1 / 20 000 maximum, correspondant – en photographie numérique – à une taille de pixel inférieure au mètre. S'il existe bien quelques grands types de forme (arrondie, ovale, effilée, en étoile, rugueuse ou lisse, à bord régulier ou irrégulier), ils sont plus souvent caractéristiques d'un groupe d'espèces (pins/autres conifères) ou d'un stade de développement (jeune/adulte) que d'une espèce particulière (figure 8). De plus, ces formes vont dépendre, pour une même espèce, de son origine (rejet ou semence), de son statut (dominant ou dominé), de son environnement ou de la sylviculture pratiquée.

L'angle sous lequel un arbre est observé, c'est-à-dire sa position par rapport au centre du cliché, et l'an-

gle sous lequel il est éclairé par le soleil vont également influencer son apparence sur l'image. À l'échelle du peuplement, l'homogénéité ou l'hétérogénéité des formes des cimes, la régularité ou l'irrégularité de la distribution des arbres dans le plan horizontal comme dans le plan vertical restent les caractéristiques les plus aisément observables sur l'image et la base de son interprétation.

Prise en compte des critères stationnels

Un peuplement forestier doit être étudié dans son environnement. Les critères appréhendés ici sont ceux qui caractérisent la station écologique et plus largement la micro région : critères bioclimatique, topographique, géologique, géomorphologique ou pédologique. Ces critères sont soit directement observables sur les photographies (pente, exposition, etc.) soit à extraire de documents cartographiques divers. Leur finalité est d'orienter l'interprète dans la formulation de ses hypothèses quant à la nature des espèces présentes. Tel est le cas, par exemple, des oppositions de versants, avec hêtraie en versant nord et peuplement plus xérophile en versant sud, des aulnaies ou frênaies dans les ripisylves,

du châtaignier ou du pin maritime sur sol acide, etc. Si la prise en compte de ces critères ne conduit que rarement à une hypothèse unique, elle limite très sensiblement les choix possibles, surtout après une observation détaillée de la forme et de la couleur des arbres.

Analyse temporelle des évolutions

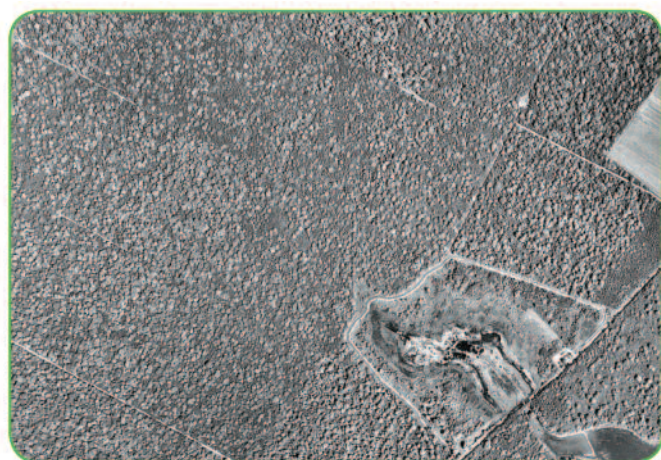
L'analyse multi-temporelle est une source importante d'information et le fonds photographique de l'IFN s'avère ici d'une grande importance. De 1960 à 2004, l'IFN a fait réaliser ses propres prises de vues en infrarouge noir et blanc (IRNB) puis progressivement à partir de 1972 en IRC. De ce fait, l'établissement dispose de plusieurs centaines de milliers de photographies. Chaque département français a été couvert trois ou quatre fois à des échelles variant du 1/15 000 au 1/25 000. Les négatifs IRNB ont été déposés à la Photothèque nationale et les films IRC sont conservés dans les délégations interrégionales. Récemment l'IFN a fait numériser ses couvertures aériennes argentiques en infrarouge couleur selon les standards IGN (résolution de 1 200 dpi). Ce travail concerne 65 départements possédant au moins une couverture aérienne IRC, soit quelque 130 000 clichés numérisés.

L'apport de cette quatrième dimension permet ainsi de passer de l'analyse d'un objet, considéré à un instant donné, à celle d'un processus dont certains stades peuvent être plus aisément identifiables que d'autres (figure 9). Cet apport du multi-temporel, comme critère d'identification des espèces ou des structures forestières, concerne à la fois l'analyse des couleurs (d'un stade phénologique à l'autre) et celle des formes (d'un âge à l'autre, d'une structure à une autre).

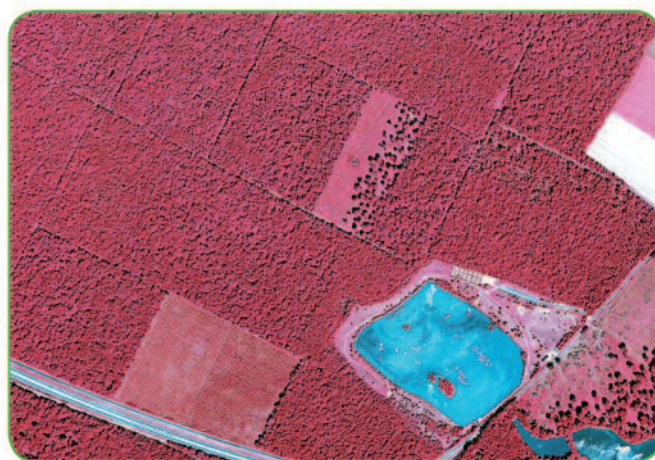
Méthodes d'interprétation : étapes et procédures

Désormais, l'image numérique, l'orthophotographie et la BD ORTHO® en infrarouge couleur remplacent l'image aérienne sur support argentique. Si les techniques d'obtention et les prétraitements de ces images ont évolué, les règles de base et les principales étapes pour en extraire une information utile restent les mêmes et peuvent être schématisées comme suit :

Établissement d'une nomenclature précise : cette définition des besoins peut être faite indépendamment des possibilités offertes par l'image ou en fonction de celles-ci. À l'IFN, par exemple, un



Côte d'Or (1968)



Côte d'Or (2000)

Fig. 9 : analyse des évolutions comme critère d'identification – du taillis-sous-futaie vers la futaie

compromis entre les possibilités de l'image et les besoins de l'établissement a été mis en œuvre pour la définition d'une nomenclature nationale des types de formation végétale (voir dans ce dossier l'article sur la carte forestière -version 2- de l'IFN).

Observation stéréoscopique : la vision stéréoscopique correspond à la vision normale en trois dimensions ; à ce titre, elle représente la seule analyse correcte de la forme des objets sur un couple d'images. Or, les orthophotoplans IRC (couverture départementale orthorectifiée) utilisés aujourd'hui pour l'interprétation ne permettent pas la vision stéréoscopique. En revanche, ces images à l'écran offrent un confort de visualisation bien supérieur à la stéréoscopie, surtout pour de forts grossissements. Certes, la stéréoscopie numérique existe (lunettes, filtres polarisants), mais elle reste onéreuse et peu répandue. Coupler la vision monoscopique à l'écran à la vision stéréoscopique de l'ancienne couverture aérienne argentique est alors la seule solution possible pour une analyse fine de la forme des objets.

Prise en compte des caractéristiques de l'image : pour guider son analyse, le photo-interprète doit connaître, par exemple, l'échelle moyenne du cliché (ou la dimension du pixel) afin de mieux appréhender la dimension du plus petit objet observable. Il doit aussi connaître la date de prise de vues pour tenir compte de la phénologie des espèces. Il doit connaître enfin la situation particulière de la parcelle observée : relief important ou modéré, versant à l'ombre ou au soleil notamment.

Recueil d'informations extérieures à l'image : la consultation de documents tels que cartes topographiques, géologiques, pédologiques, phytosociologiques, les guides de typologie des stations forestières ou encore le recueil d'in-

formations sur l'écologie des espèces, peuvent être une aide précieuse à la formulation d'hypothèses vraisemblables quant à la nature des espèces présentes

Formulation d'hypothèses de travail : la synthèse de toutes les données observables ou mobilisables conduit l'interprète à la formulation d'un nombre souvent réduit d'hypothèses, voire même à une seule, quant à la composition du peuplement observé. Si l'interprète possède de bonnes connaissances forestières, ces hypothèses seront d'autant plus simples à formuler.

Contrôles au sol et généralisation des observations de terrain : les contrôles au sol s'imposent pour confirmer ou infirmer les hypothèses faites lors de l'interprétation. Toute généralisation sur photographie d'observations de terrain, par nature très localisées, devra cependant être conduite de façon prudente et en concertation entre interprètes.

En conclusion

Bien utilisées, les images en infrarouge couleur sont donc très riches en information. Leur exploitation nécessite toutefois de la rigueur et un minimum de savoir-faire, qui doit idéalement allier compétences forestières et connaissances techniques de la photo-interprétation. C'est pourquoi, en accompagnement de la diffusion de la BD-ORTHO® IRC, l'ONF a engagé des sessions d'initiation à la photo-interprétation forestière, assurées par des agents de l'IFN, eux-mêmes également forestiers.

De nombreuses évolutions technologiques sont en cours, notamment à l'IFN, dans le cadre de projets de R&D ou de réalisations plus opérationnelles : segmentation automatique d'image pour délimiter les zones boisées/non boisées (dans le cadre de réalisation de la couche « végétation » de la BD-TPOP®),

estimation automatique de la densité de plantations forestières, etc. Mais sans conteste, l'œil et le cerveau de l'opérateur sont des outils extrêmement performants pour l'analyse des images aériennes. Même si la digitalisation des contours reste pour l'instant manuelle, la photo-interprétation sur écran est donc encore loin d'être dépassée.

Jean-Guy BOUREAU

Ingénieur chargé des études et recherche en télédétection
IFN Nogent-sur-Vernisson

Pour en savoir plus...

Cet article est très largement inspiré du n° 25 de l'IF, lettre trimestrielle de l'Inventaire forestier national, intitulé « L'image proche infrarouge : une information essentielle ». IFN, 12p.

Rey P., 1968. Photographie aérienne et végétation, exploration aérienne et études intégrées, Actes de la conférence de Toulouse, P.187-207

Bureau J.-G., 2008. Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges - Application aux milieux forestiers et naturels. IFN, 268 p.

IFN, 2010. La cartographie forestière -version 2- de l'Inventaire forestier national. Guide technique. 52 p.

< en ligne :
http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/Guide_technique_cartographie_IFN1.1.pdf >

IFN, 2005. *Le paysage forestier vu du ciel*. L'IF n°10, 12 p.

IFN, 2008. *Nouvelle cartographie forestière - De la production à l'utilisation*. L'IF n°20, 8 p.

< en ligne :
<http://www.ifn.fr/spip/?rubrique33> >

La BD ORTHO® infrarouge couleur, support de référence pour l'étude de la végétation en France métropolitaine

La BD ORTHO® est une collection de mosaïques d'orthophotographies numériques en couleurs naturelles et infrarouge couleur (IRC) ; c'est la composante orthophotographique du référentiel à grande échelle (RGE) de l'Institut géographique national (IGN). Comment réalise-t-on la BD ORTHO® IRC, quelles sont ses caractéristiques techniques, quelle est sa disponibilité aujourd'hui ?

La BD ORTHO® infrarouge couleur de l'IGN

La BD ORTHO® est un orthophotoplan départemental, c'est-à-dire un assemblage de photographies numériques orthorectifiées superposable à une carte topographique ; sa résolution (dimension du pixel au sol) est de 50 cm. Depuis les prises de vues de 2005, la production en couleurs naturelles s'accompagne de façon systématique d'une version en (proche) infrarouge (fausses) couleurs.

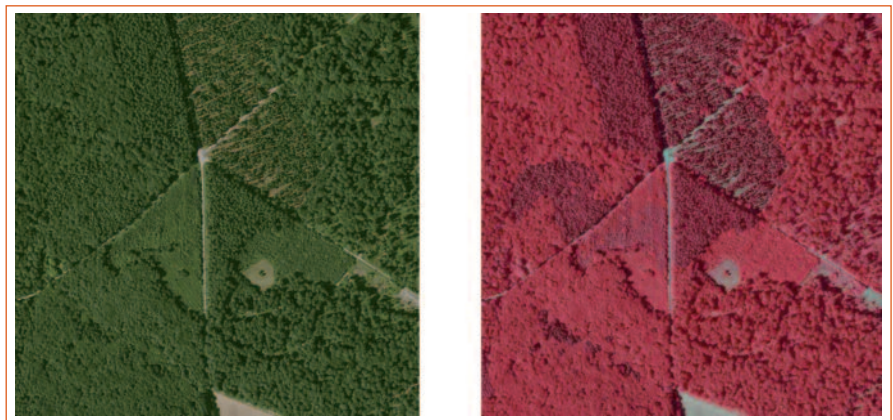


Fig. 1 : extrait de BD ORTHO® en couleurs naturelles (à gauche) et infrarouge couleur (à droite)

Si les grands types de couverture du sol peuvent être appréhendés à partir d'images en couleurs naturelles ou panchromatiques noir et blanc, le proche infrarouge (700-900 nm) permet de distinguer de façon fiable les feuillus et les résineux, voire certaines espèces lorsque la couleur ou la forme sont spécifiques, ainsi que le degré d'activité chlorophyllienne des plantes (débourrage, état sanitaire, etc.) (figure 1). La BD ORTHO® IRC est ainsi la couverture la plus appropriée pour l'étude de la végétation, mais d'autres domaines utilisent l'enregistrement du proche infrarouge : l'hydrologie par exemple, pour la perception de l'humidité des sols.

Support de référence pour la carte forestière de l'IFN

Depuis 2006, l'Inventaire forestier national (IFN) utilise la BD ORTHO® IRC comme référentiel image pour réaliser sa cartographie forestière. Si l'orthophotoplan IRC ne permet pas la vision stéréoscopique, il apporte néanmoins un confort de visualisation bien supérieur aux anciennes photographies argentiques IRC, surtout pour de forts grossissements.

Les étapes de production

Pour réaliser la BD ORTHO® IRC, les trois principales étapes sont la prise de vues aériennes (caméra multicanal), l'orthorectification des clichés et le traitement des images.

Missions de prise de vues aériennes

Initialement constituée à partir du scannage des clichés argentiques couleurs, la BD ORTHO® est passée progressivement au numérique à partir de 2003, avec une caméra numérique aujourd'hui à quatre canaux (rouge, vert, bleu, proche infrarouge) permettant d'obtenir la couleur naturelle et l'IRC à partir d'images simultanées. Le principe est fondé sur la synchronisation directe des têtes de caméras (figure 2). L'image numérique infrarouge couleur est constituée de pixels dont la radiométrie¹ est codée avec les niveaux d'intensité enregistrés par les trois capteurs vert, rouge et proche infrarouge, portés respectivement par les canaux bleu, vert et rouge (figure 3).

¹ La radiométrie est le résultat de la mesure de l'intensité lumineuse par les capteurs de la caméra. Cette mesure est convertie en valeur (« valeur radiométrique ») et codée en couleurs sur l'image correspondant à chaque canal.

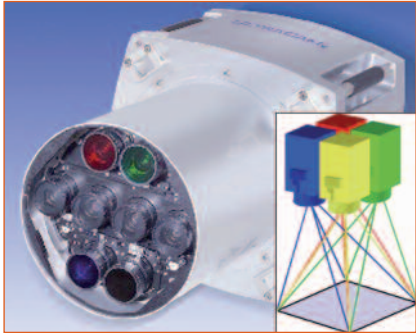


Fig. 2 : caméra Vexcel (capteurs panchromatiques en ligne, entourés des 4 canaux couleur) et principe de synchronisation des canaux couleurs

Alors que la réponse d'un film argentique à la lumière est logarithmique, celle des capteurs numériques est linéaire : ils ont la même sensibilité dans toutes les conditions d'éclairement ce qui améliore la qualité radiométrique² des images.

Canevas photogrammétrique, aérotriangulation et orthorectification

Les paramètres de la caméra (point focal, distance focale, centre du capteur, etc.) et les données de positionnement sont enregistrées lors de la prise de vue (GPS embarqué, voire centrale de navigation inertielle) ; cela permet d'obtenir une première approximation du modèle géométrique du faisceau perspectif associé à chaque cliché. Les recouvrements entre images voisines sont utilisés pour comparer les positions de détails homologues identifiés par corrélation automatique. Les mêmes détails devant être aux mêmes endroits, on en déduit par calcul la position et l'orientation exactes des clichés les uns par rapport aux autres. Enfin, des points mesurés précisément sur le terrain, appelés « points d'appui », permettent de caler la géométrie de l'ensemble des images sur le référentiel géographique. Cette

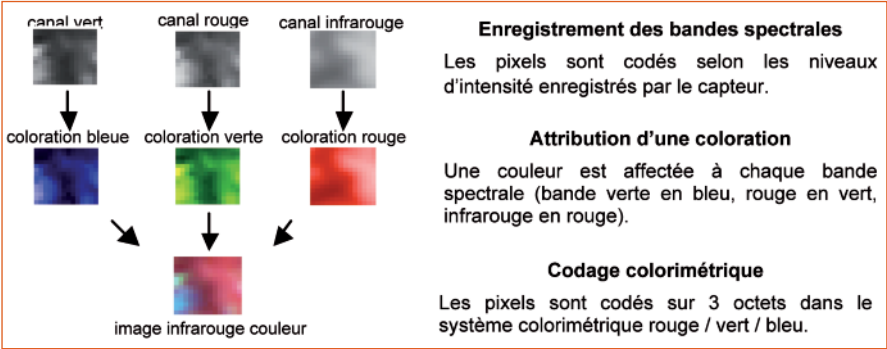


Fig. 3 : principes de création de l'image numérique infrarouge couleur

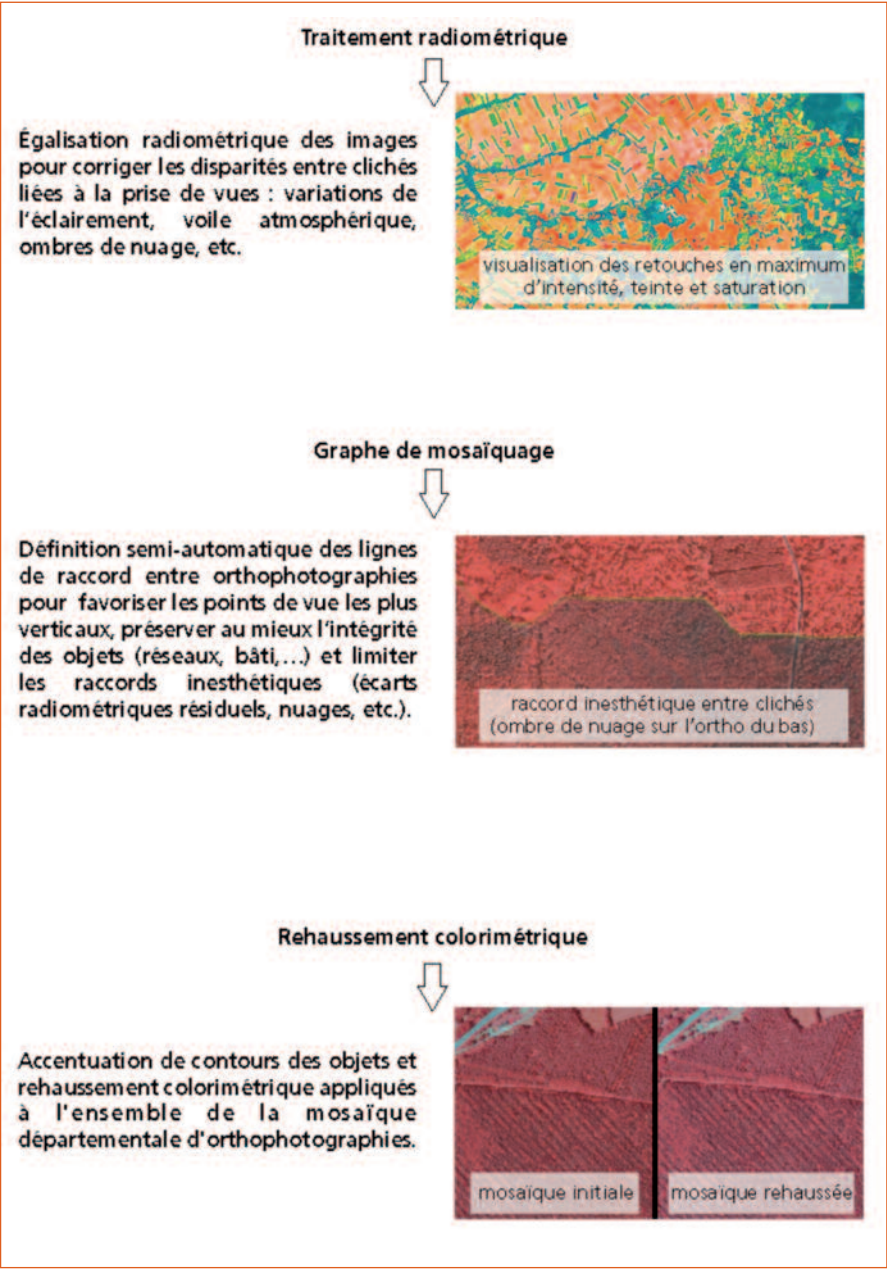


Fig. 4 : traitements des images de la BD ORTHO@IRC

2 La qualité radiométrique d'une image se traduit alors par une large gamme de couleurs ou de nuances et un fort contraste.

La mise à disposition de la BDOrtho® IRC à l'ONF

(Pascal Audureau, département Informatique,
et Anne Jolly, département R&D de l'ONF)

Pour les métiers de l'ONF, la BDOrtho® IRC est un complément « naturel » de la version en « vraies » couleurs puisqu'elle apporte une information encore plus riche sur les milieux naturels et forestiers. Dès la mise à disposition de la BDOrtho® couleurs en 2005, bon nombre de chefs de projets et responsables SIG ont manifesté le besoin de disposer d'images IRC standardisées et couvrant l'ensemble du territoire géré.

Mise à disposition à l'ONF

L'ONF (comme l'IFN) bénéficiait alors du protocole IGN-ministère de l'Agriculture, qui permettait de disposer d'un important jeu de données (dont la BDOrtho® couleurs). Ainsi, quand la couverture par la BDOrtho® IRC a commencé à être suffisante pour envisager son utilisation, l'ONF et l'IFN ont engagé des négociations avec l'IGN pour en obtenir la mise à disposition. Et un premier lot d'images départementales était fourni à l'ONF fin 2009, avec ensuite des compléments tous les 6 mois.

Les données de la BDOrtho® IRC sont fournies en format compressé. ecw, en dalles de 5kmx5km et en Lambert II étendu. Elles sont livrées au responsable SIG national de l'ONF (département informatique), qui opère un certain nombre de contrôles et les rediffuse sur les serveurs SIG.

Situation actuelle

Début 2011, l'ONF dispose de la BDOrtho® IRC sur 92 départements, dont quelques-uns avec deux couvertures à 5 ans d'intervalle. Soulignons que les disponibilités à l'ONF ne correspondent pas exactement à l'état de la production présenté figure 5 : certains départements (outre ceux qui ont été photographiés en 2010 et dont les données ne sont pas encore publiées) n'ont en effet pas été encore livrés à l'ONF. Nous invitons donc les utilisateurs à prendre contact avec leur responsable SIG territorial pour connaître les données disponibles sur leur territoire.

Comme la version « vraies » couleurs, la BDOrtho® IRC est utilisable directement par tous les outils SIG de l'ONF, notamment ceux des serveurs SIG. Elle peut l'être aussi par Canopée®, lorsque les responsables territoriaux ont fait le choix de l'intégrer dans les « packages » de données.

Et ensuite ?

Les modalités d'acquisition par l'ONF sont en cours d'évolution. Le protocole IGN-ministère de l'Agriculture, échu fin 2010, ne sera pas renouvelé, car le Ministère bénéficie désormais gratuitement de la mise à disposition de l'ensemble du RGE (référentiel à grande échelle, incluant la BDOrtho®), en tant que service de l'État. Le statut d'EPIC de l'ONF nécessitant de clarifier les règles qui lui sont applicables vis-à-vis du RGE, un nouveau contrat avec l'IGN va être négocié au cours de l'année 2011. La prochaine livraison n'interviendra donc probablement que fin 2011.

phase, dite d'aérottriangulation, a pour but d'établir les paramètres de la formule photogrammétrique permettant d'associer à un pixel de coordonnées i, j dans l'image brute un point de l'espace dûment repéré en X, Y et $Z(X, Y)$.

On procède ensuite, cliché par cliché, à l'orthorectification des images c'est-à-dire à leur déformation pour les rendre chacune exactement superposable à une carte du territoire qu'elles couvrent. Pour chaque point (X, Y) de l'orthophotoplan à construire, l'altitude $Z(X, Y)$ est donnée par le modèle numérique de terrain (MNT), et le point correspondant de l'image brute est donné par la formule photogrammétrique. On prend alors la valeur radiométrique de ce point dans chaque canal de l'image brute et on l'attribue au point (X, Y) de l'orthophotoplan. On s'aperçoit ici que la précision géométrique d'une orthoimage est liée à la précision du calcul d'aérottriangulation et à la précision du MNT.

Traitements et retouches des images

Différents traitements destinés à modifier les aspects locaux et globaux sont appliqués aux orthophotographies : retouches de radiométrie, assemblage départemental par mosaïquage et rehaussement colorimétrique (figure 4).

Les compétences de l'IFN en matière d'interprétation du signal infrarouge vont conduire à établir des spécifications de co-production avec l'IGN pour affiner le paramétrage du rehaussement colorimétrique et rendre l'IRC plus en adéquation avec les besoins de ses utilisateurs sur l'ensemble du territoire.

Caractéristiques techniques

- **Résolution standard couleurs ou proche infrarouge** : 50 cm (certains départements ont des couvertures orthophotographiques couleurs à 40, 30 voire 20 cm)
- **Exactitude planimétrique** : écart moyen quadratique entre les coordonnées terrain et les coordonnées images des mêmes détails sur les images, de 2,1 m à 0,7 m selon précision du MNT
- **Longueur d'onde enregistrée par le canal infrarouge** : 750 nm – 1060 nm
- **Compatibilité des échelles de travail** : de l'ordre du 1 : 5000 (jusqu'au 1 : 2000 localement)
- **Géoréférencement** : permet l'utilisation dans divers outils SIG (Géoconcept, Mapinfo, ArcView...)
- **Format de livraison** : dalles de 1 km² x 1 km² (TIFF 24 bits couleurs), dalles de 5 km² x 5 km² (ECW)
- **Projections natives** : L2 étendu jusque 2007, L93 ensuite (en outremer : projections locales et UTM), possibilité de dérivation dans d'autres projections.

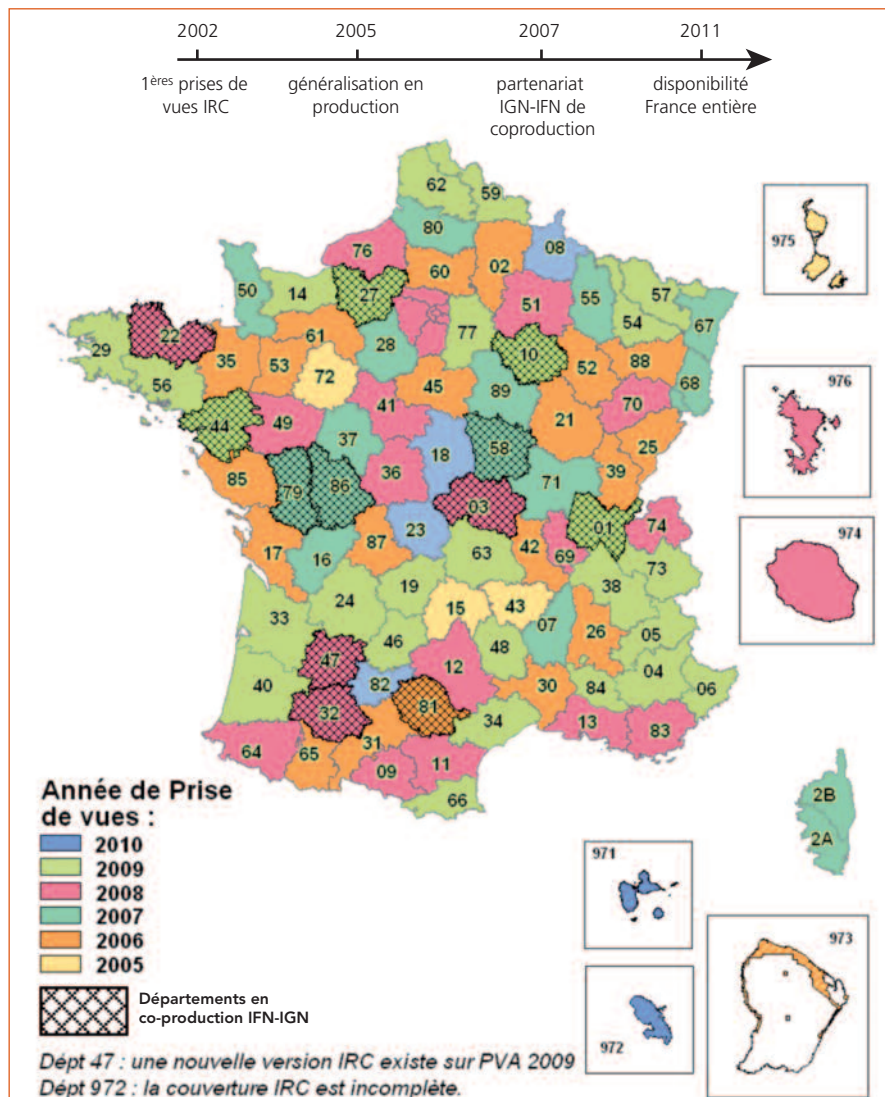


Fig. 5 : historique de la production BD ORTHO® IRC et disponibilité au premier trimestre 2011

Caractéristiques techniques et disponibilité

Depuis sa mise en production en 2005, la BD ORTHO®IRC bénéficie de la même disponibilité et des mêmes paramètres de qualité géométrique et radiométrique que la BD ORTHO® couleurs naturelles, composante orthophotographique départementale du référentiel à grande échelle de l'IGN.

Depuis septembre 2007, l'IGN et l'IFN ont établi un partenariat de coproduction de la BD ORTHO® (couleurs naturelles et infrarouge

couleur). L'atelier de production IFN a ainsi réalisé douze couvertures départementales et il en produit aujourd'hui environ cinq par an. Début 2011, la couverture de la France en BD ORTHO® IRC est en cours d'achèvement (figure 5, encadrés). Les mises à jour départementales sont actuellement de 5 ans environ et elles glisseront progressivement à 3 ans.

Louis MAIRE
Équipe de coproduction BD ORTHO®
IFN - Délégation interrégionale Sud-Est

Eliane MATTER
Service des Bases Images (SBI)
IGN - St Mandé

Pour plus d'information

Site internet IGN : www.ign.fr

Site internet IFN : www.ifn.fr

IFN, 2010. L'image infrarouge : une information essentielle. L'IF n°25, 12p.

L'utilisation de photographies aériennes pour la démarche d'aménagement

Inventaire de la ressource ligneuse, description du milieu forestier et des équipements existants, cartographies thématiques, programmation d'actions de gestion forestière sont des phases clés de la démarche d'aménagement forestier. Ces étapes peuvent très souvent bénéficier d'une contribution pertinente et efficace de la photointerprétation. Les nouveaux outils numériques très largement diffusés donnent un espace de développement important aux techniques s'appuyant sur les orthophotos.

L'utilisation de photographies aériennes lors de l'élaboration des aménagements forestiers n'est pas nouvelle. Ainsi, par exemple, le Manuel d'Aménagement Forestier de l'ONF (dans sa troisième édition parue en 1989 et dans sa version ultérieure de 1997) note l'intérêt de leur utilisation, pour préparer les « *visites de terrain [...] et réaliser une ébauche cartographique* » et pour « [...] *dessiner les limites des types de peuplements* ». La généralisation et la diffusion à l'ONF des orthophotographies de l'IGN (BDOrtho®) permettent désormais d'intégrer directement en format SIG les résultats issus de l'interprétation des clichés. L'évolution de ces données vers des données en infrarouge couleur (IRC), plus riches encore en informations sur le milieu naturel et forestier (voir dans ce dossier les articles de L. Maire et E. Matter et de J.G. Bourreau) constitue une nouvelle étape de modernisation des outils et de méthodes disponibles pour l'aménagement forestier.

L'objet de cet article est donc de rappeler et d'illustrer les apports principaux de l'utilisation des photographies aériennes comme source d'informations pour l'élaboration d'un aménagement forestier, notamment à partir de la BDOrtho®, dans le contexte des forêts gérées par l'ONF et avec les moyens actuellement disponibles dans l'établissement. Il évoque aussi les perspectives qui s'ouvrent avec l'évolution des données et des technologies et les travaux de recherche et développement en cours.

L'apport des photographies aériennes dans la description du milieu

L'analyse du milieu (état des lieux) est l'étape d'élaboration de l'aménagement forestier dans laquelle les photographies aériennes apportent le plus d'information. À ce stade, la photointerprétation constitue une aide à l'analyse des peuplements, des milieux naturels (préparation des inventaires et des descriptions de terrain), mais aussi de la connaissance de la desserte.

En amont, l'observation des photographies aériennes les plus récentes (couplée avec le parcellaire forestier) est également un bon moyen pour un aménagiste « nouvellement arrivé » d'avoir une connaissance rapide et globale de la forêt ou du massif à aménager.

Préparer un inventaire dendrométrique

La première étape pour la mise au point d'un inventaire dendrométrique consiste souvent à discriminer et cartographier les principales occupations de l'espace naturel :

- zones boisées, portant des peuplements denses ou lacunaires (comprenant des vides de petite taille) ;
- zones non boisées (figure 1 page suivante).

Cette approche préalable contribue à définir l'unité d'inventaire¹, sur laquelle sera établie une maille d'échantillonnage permettant l'implantation de placettes de mesures dendrométriques.

En matière d'inventaires par échantillonnage (couramment appelés in-

¹ Unité d'inventaire : domaine que l'on désire inventorier et pour lequel l'on souhaite des résultats. Elle doit être strictement et clairement définie au départ.

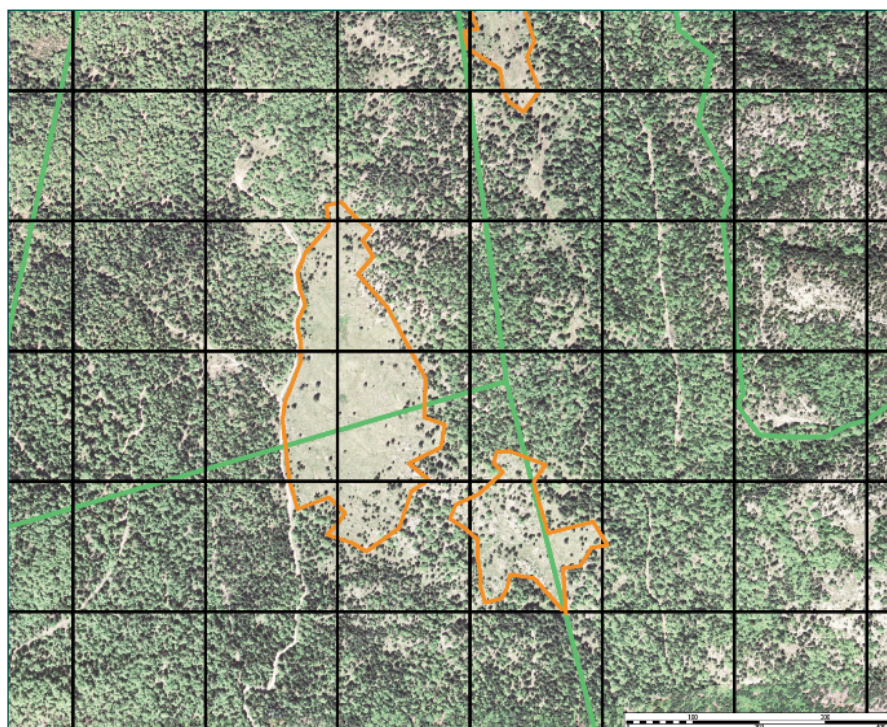


Fig. 1 : exemple d'aide à la préparation d'un inventaire (Tarentaise)

Les zones non boisées, délimitées en orange par photointerprétation, seront extraites de l'unité d'inventaire ; à l'extérieur de ces périmètres, toutes les intersections de la grille correspondront à une placette d'inventaire, même si elles tombent dans des « vides » de petite taille (peuplements lacunaires).

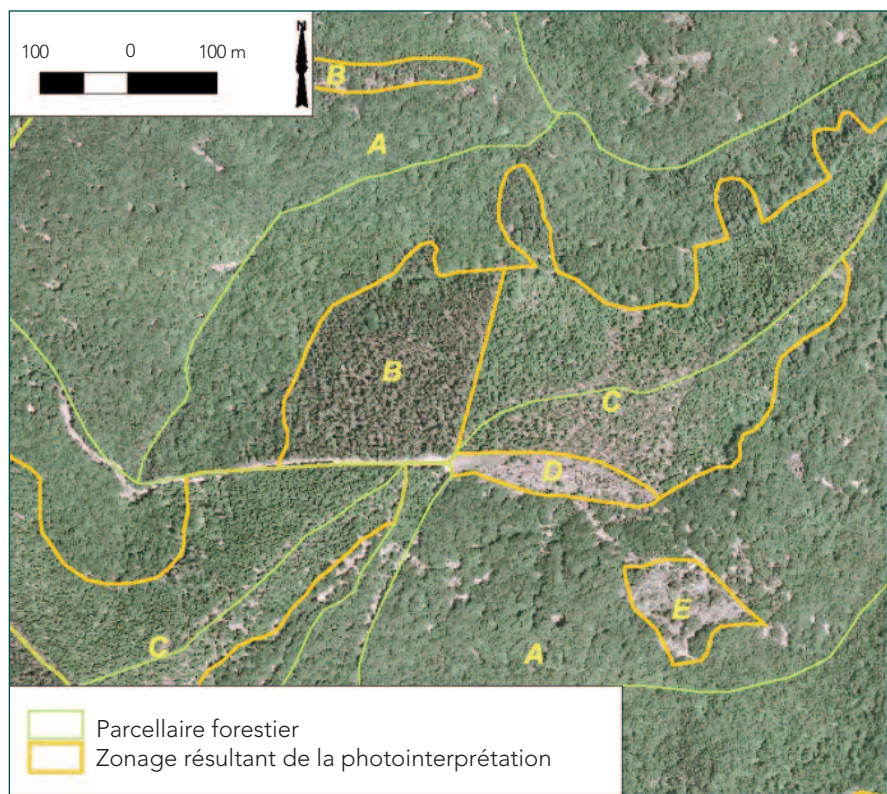


Fig. 2 : cartographie des peuplements préalable à la description de terrain en FD de l'Aigoual ; photointerprétation réalisée sur la BDOrtho® IGN

A = futaie de hêtre adulte ; B = futaie de pins adultes ; C = reboisement résineux de moins de 30 ans ; D = reboisement résineux de moins de 15 ans ; E = zone ouverte (rochers).

ventaires statistiques), une opération complémentaire consiste à stratifier l'unité d'inventaire : il s'agit d'identifier généralement deux à quatre ensembles, appelés strates, regroupant des peuplements à caractéristiques analogues. Cette technique permet d'optimiser les travaux de terrain, à la fois pour en améliorer la précision, mais aussi en maîtriser le coût de réalisation. La photo aérienne permet de prédéfinir, par exemple, des strates de « jeunes peuplements », « futaies adultes », « futaies mûres et/ou âgées »...

Exceptionnellement, il peut être possible d'estimer la densité de certains peuplements lâches, lorsque les houppiers (voire la base des troncs) sont bien visibles. Notons cependant que ce type d'information est difficilement accessible avec la résolution de la BDOrtho® (50 cm) ; ce n'est guère envisageable que si on a accès par ailleurs à des orthophotos de haute résolution (20 cm).

Préparer et réaliser la phase de description du milieu forestier

La description des peuplements et des stations forestières demande toujours une campagne d'observations sur le terrain ; cette phase peut être très utilement préparée grâce à l'observation de clichés pour réaliser une première cartographie de peuplements homogènes (ou apparaissant comme homogènes). Cette délimitation repose alors sur plusieurs critères complémentaires : principalement la composition en essences (essence majoritaire, mélanges), le stade d'évolution - appréhendé par la hauteur apparente et la taille individuelle des houppiers - la densité des houppiers (figure 2 et encadré).

Sur les clichés en infrarouge couleur, la reconnaissance des grands groupes d'essences (feuillus/résineux, ou parmi les résineux épicéas-sapins/pins) est généralement aisée, même avec peu d'expérience. Une typologie plus détaillée

des essences nécessite une bonne pratique et repose sur l'analyse de la teinte des houppiers, de leur forme générale (en boule, en dôme, en cône) et de leur géométrie fine (compacité). Il est également très souhaitable d'avoir une bonne connaissance préalable des conditions écologiques de la zone d'étude et des essences susceptibles de s'y développer.

Le stade de développement peut être appréhendé par la granularité du toit du peuplement (canopée) : futaies adultes avec houppiers bien individualisés, plus ou moins jointifs ; jeunes peuplements ou taillis avec houppiers non individualisés et serrés donnant une apparence de « moquette » à la canopée ; jeunes plantations en ligne apparaissant comme un « velours côtelé ». Enfin, les photos aériennes peuvent aussi donner des informations sur la structure du peuplement : couvert fermé ou non, homogène ou hétérogène, canopée à surface régulière ou non. En plaine, il est notamment possible de différencier une futaie régulière et un ancien taillis sous futaie en conversion, ce dernier type ayant une surface de canopée plus « granuleuse », avec des houppiers de taille variable, dont certains apparaissent « dominants » par rapport à la surface moyenne de la canopée. Avec un peu d'expérience, de tels critères sont observables, y compris en l'absence de stéréoscopie, sur la BDOrtho®.

Cette première cartographie faite en salle, sur écran ou sur plan papier, permet à l'équipe d'aménagement de préparer efficacement sa campagne de terrain, qui en sera grandement facilitée :

- d'après les documents et bases de données issus de l'aménagement précédent et grâce à la connaissance des forestiers de terrain, certains éléments de cette première cartographie peuvent être directement validés ;

- pour les peuplements à parcourir, le cheminement est simplifié, car fortement orienté vers les zones homogènes à décrire ;
- le contour cartographique des peuplements homogènes est alors soit confirmé (cas le plus fréquent), soit modifié dans le cas où la vision aérienne (i) n'a pas permis de dissocier deux unités élémentaires de peuplements homogènes ou bien (ii) a dissocié deux entités cartographiques qu'il convient de regrouper ;
- certaines données sont estimées plus aisément (exemple : appréciation du mélange des essences en couvert principal) ;
- l'appréciation du contexte général (positionnement précis ; proximité de limites, falaises, infrastructures...) permet de lever certains doutes pour un observateur au sol.

Accompagner la réflexion liée à l'amélioration de la desserte

La cartographie détaillée des équipements de desserte fait parfois défaut au gestionnaire : la démarche d'aménagement est l'occasion de mettre à jour les bases de données sur ce sujet, pour identifier les parties de forêt nécessitant des créations, restructurations ou améliorations du réseau de desserte.

Le géo-référencement d'équipements structurants (route, pare-feux, ponts) est possible par saisie à l'écran, lorsque le couvert forestier est suffisamment faible pour qu'on puisse bien les distinguer. Dans certains cas les voies nouvelles, y compris celles de petit gabarit, les pistes de débardage, les lignes de parcelles peuvent être numérisées sur les orthophotographies sans procéder à un levé au GPS, avec une précision satisfaisante et un gain de temps notable. Toutefois, comme seules les infrastructures directement visibles peuvent être relevées de cette manière, on a presque toujours besoin d'appoints ponctuels de terrain pour as-

Apprécier la hauteur d'un peuplement forestier

La hauteur d'un arbre peut être estimée de manière absolue par l'utilisation de la stéréoscopie et des techniques de mesures par stéréoscopie (ou photogrammétrie). Cette mesure n'est toutefois réalisable que par un opérateur spécialiste et nécessite un équipement spécifique.

L'aménagiste utilise la base de données photographiques BDOrtho®, qui ne permet pas de disposer de la stéréoscopie : il ne peut donc effectuer qu'une appréciation locale qualitative et relative de la hauteur du peuplement. Un peuplement lui semblera plus haut ou plus bas que ses voisins par observation de l'ombre des arbres en limite de peuplement, mais aussi en appréciant le stade de développement (jeune futaie/futaie âgée), grâce à la taille des houppiers.

surer des tracés complets et continus (figure 3a page suivante). Il faut donc se demander, selon les situations, si la saisie préalable sur photo apporte vraiment une aide pertinente ou s'il n'est pas préférable de procéder directement à un relevé GPS exhaustif sur le terrain.

Parallèlement, en situation de montagne, la définition d'unités de vidange² présentant des caractéristiques favorables à la mise en place de câbles de débardage est fortement aidée par une observation aérienne : ces assiettes de coupe doivent en effet répondre à des exigences notamment de volume sur pied minimum et de présence significative de gros bois, informations qu'il est possible d'approcher de manière indirecte sur les photos, à partir de la densité du peuplement et de la taille des houppiers visibles (figure 3b).

² Regroupement de parcelles ou parties de parcelles à mode de débardage homogène et présentant un volume mobilisable important. Les unités de vidange pour câbles aériens ont une assiette qui est souvent indépendante des parcelles et des unités de gestion, pour répondre à des exigences techniques spécifiques.

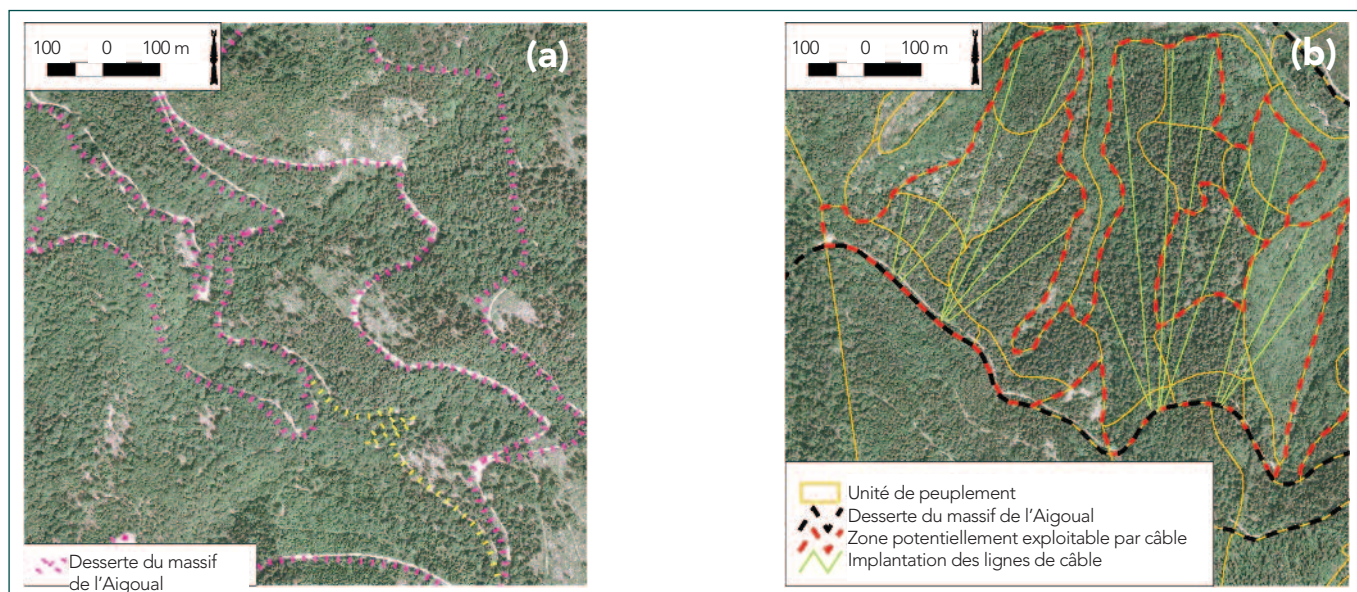


Fig. 3 : exemples d'aide à la cartographie (a) et à la conception de la desserte (b) en FD de l'Aigoual

- a) La saisie d'une portion de piste absente du fond scan25©IGN, mais bien visible sur l'orthophotographie (tracé en jaune) est venue enrichir la base de données desserte
- b) Mise en évidence de zones à exploiter par câble long ou câble-mat, du fait de la distance par rapport à la desserte et de la pente du terrain. Les peuplements adultes à capital sur pied supposé suffisant pour rentabiliser la coupe sont identifiés grâce à leurs houppiers larges et leur couvert fermé. Les lignes de câbles potentielles sont tracées en vert.

Quel rôle reste-t-il à la campagne de description sur le terrain ?

La phase de terrain reste indispensable après interprétation des clichés, pour trois raisons principales. Tout d'abord certaines données ne sont et ne seront probablement jamais accessibles par observation sur photos aériennes (ex. qualité des bois de peuplements feuillus ; présence ou non de sous-étage, régénération sous couvert ; facteurs stationnels spécifiques ; infrastructures masquées par le couvert des arbres...). Ensuite l'analyse de photos aériennes n'apporte pas un diagnostic infaillible : par exemple, la détermination des essences forestières reste délicate, même pour un opérateur spécialisé. Enfin, l'analyse des photographies est parfois très incertaine dans les secteurs situés à l'ombre (en montagne, il est difficile de distinguer de manière fiable les essences, et parfois même les types de peuplements, sur les versants à l'ombre d'une crête).

La phase de terrain doit permettre d'une part de valider ou corriger les

informations issues de la photo-interprétation, d'autre part de relever l'ensemble des autres informations indispensables pour l'élaboration de l'aménagement.

La télédétection par photos aériennes doit donc bien être conçue comme une phase préparatoire à l'organisation des observations de terrain. Moyennant quelques règles élémentaires (encadré), la résultante globale de cette combinaison [photo + terrain] est toujours fructueuse :

- meilleure qualité des analyses descriptives et cartographiques ;
- plus grande homogénéité des cartographies réalisées ;
- meilleure efficacité des cheminement sur le terrain (moins de temps passé, coût d'opération mieux maîtrisé).

L'utilisation de la photographie aérienne en aménagement forestier doit s'amplifier

Après une longue période d'utilisation assez confidentielle, restreinte

à des clichés argentiques sur papier difficilement maniables, la « démocratisation numérique » de la télédétection permet de remettre cette technique au cœur des outils de base indispensables à toute démarche d'aménagement.

Une utilisation dynamisée grâce à l'évolution des outils

La diffusion, généralisée au sein de l'Office National des Forêts, de la BDOrtho®, consultable sur la grande majorité des postes de travail, sous SIG³ ou Canopée⁴, est une évolution fondamentale : facilité de manipulation des données (chargées en un « clic » de souris ou presque), superposition facile avec les cartes IGN ou avec les données forestières existantes, possibilité d'analyser des territoires de superficie importante, possibilité de zoomer, échanges de données facilités entre opérateurs, comparaison des évolutions entre deux missions quinquennales.

3 Système d'information géographique

4 Canopée® : logiciel permettant de visualiser et consulter des données géographiques, d'effectuer des mesures, de dessiner des objets surfaciques, linéaires ou ponctuels.

La mise à disposition de la version infrarouge couleur de la BDOrtho®, au fur et à mesure de sa constitution par l'IGN est une nouvelle étape de cette évolution. La formation progressive des chefs de projets à la photointerprétation (notamment sur données IRC) est amorcée pour leur permettre de valoriser au mieux ces données.

Enfin, lorsque des opportunités locales le permettent, il est possible d'exploiter d'autres sources photographiques, souvent plus précises. Ainsi, plusieurs Conseils Généraux ou Régionaux ont fait réaliser des missions orthophotographiques à résolution plus fine que celle de la BDOrtho® IGN : c'est le cas par exemple du Conseil Général de Lozère qui dispose d'une couverture aérienne à 20 cm de résolution, réalisée en 2008, librement accessible. Sur suggestion de l'ONF, cette mission a été réalisée à la fois en couleurs naturelles et en infrarouge couleur. Si ces données peuvent apporter plus de précision (ou être parfois plus actuelles que la BDOrtho® existante), elles sont également plus « lourdes » à manipuler et à gérer, du fait de leur volume.

La recherche-développement ouvre de nouvelles perspectives

Les techniques de télédétection sont actuellement en très forte évolution, à la fois dans le domaine de la prise de données (images aériennes, images satellitaires, données issues de technologies laser), mais aussi dans celui des capacités de traitement numérique des images, dont l'évolution est spectaculaire.

Les axes de recherche actuels sont nombreux et prometteurs pour l'aménagement forestier. On peut notamment citer :

- l'automatisation de la cartographie de certains éléments du pay-

sage (exemples : cartographie des zones non boisées ou faiblement boisées ; délimitation de grands types de peuplements) ;

- la possibilité de disposer de vues aériennes sur terminaux de saisie de terrain permettant de consulter en forêt des images sous format numérique et de réaliser directement sur le terrain des mises à jour d'informations descriptives et des corrections ou complément des contours cartographiques ;

- l'utilisation de la stéréoscopie numérique et d'outils de photogrammétrie numérique, permettant non seulement d'apprécier de manière relative des différences de hauteur, mais surtout de les mesurer, voire de les suivre dans le temps à partir de missions aériennes stéréoscopiques réalisées à dates successives (tous les 5 ans par exemple) ;

- le couplage entre inventaires par échantillonnage (informations localisées, ponctuelles) et zonages réalisés sur photo aérienne, permettant de donner une dimension cartographique aux informations quantitatives des relevés de terrain (« spatialisation » d'informations ponctuelles grâce aux zonages réalisés sur photos) ;

- le couplage avec d'autres techniques complémentaires en fort développement, notamment les capteurs laser aéroportés (LIDAR). Les informations dendrométriques issues de l'analyse des données Lidar devraient ainsi largement accélérer les inventaires de terrain, tandis que les photographies aériennes apporteront les informations sur les essences ou la répartition globale du couvert. D'autre part, les modèles numériques de terrain issus du Lidar permettront une bien meilleure distinction des infrastructures (routes et piste) que l'analyse des photographies aériennes (voir dans ce dossier les articles de J.M. Monnet et de J. Bock).

Conclusion : une technique éprouvée, des évolutions continues

Grâce à l'orthophotographie numérique, l'utilisation de la photographie aérienne a fait d'énormes progrès au cours de la dernière décennie. Ces progrès résultent à la fois des techniques d'acquisition (capteurs numériques), mais aussi des techniques de stockage et de gestion des données (compression d'images) et des outils d'affichage et d'exploitation des données.

L'ONF a « franchi le cap » du numérique avec la diffusion de la BDOrtho® IGN dans sa version « couleurs naturelles » puis en infrarouge couleur. Il a pris le parti de vulgariser cette information auprès d'un grand nombre d'opérateurs de terrain grâce à un outil simple d'utilisation (Canopée®). L'analyse de ces données permet de préparer l'élaboration de l'aménagement forestier, notamment pour la description du milieu et des peuplements. La photointerprétation fait alors gagner un temps précieux dans la description et la compartimentation du territoire, avec en gage une meilleure homogénéité. Pour autant elle ne dispensera jamais de la phase d'analyse sur le terrain, notamment pour la description détaillée des peuplements et pour la validation des découpages réalisés.

La photointerprétation, moyennant un minimum de formation et d'expérience, reste actuellement la méthode la plus efficace pour extraire ces informations. Les développements d'outils de traitement automatiques ou semi-automatiques visent dans un premier temps à faciliter et fiabiliser la délimitation des zones homogènes, puis à les caractériser en leur affectant un type ou une classe.

Quelques règles pour la photo-interprétation

Recenser les données disponibles et en connaître les caractéristiques

La première donnée concernée est évidemment l'orthophotographie elle-même, dont il faut connaître la date de prise de vue (année et période de réalisation). En effet, plus la mission est récente, plus les informations qui en seront extraites seront « fidèles » à la réalité. À l'ONF, pour la BDOrtho®, cette information est indiquée lors de la diffusion des données et est disponible – notamment – auprès du responsable SIG territorial, ou – mieux – dans des métadonnées (informations générales décrivant les caractéristiques de jeux de données numériques).

Mais d'autres informations sont utiles pour aider à la photointerprétation : carte ou base de données des types de peuplements de l'aménagement précédent, carte ou base de données des dessertes, courbes de niveau, éventuels relevés au sol déjà réalisés, etc.

Définir les thématiques à cartographier et les objets recherchés

Toute photointerprétation repose sur une « typologie », plus ou moins fine, permettant à la fois de délimiter et de décrire les zones cartographiées. Cette typologie doit être établie en tenant compte de la nature de l'information recherchée pour l'aménagement, et des possibilités réelles de la photographie aérienne. Ainsi il est illusoire de chercher à déterminer des classes quantitatives de volume sur pied à partir des seuls clichés aériens. En revanche, il est possible de distinguer les peuplements à couvert fermé, dans lesquels les arbres ont des houppiers bien développés, susceptibles de comporter les plus gros arbres.

Dans certains cas, il n'est pas aisé de définir a priori une typologie explicite pour la photointerprétation (par exemple « futaie pure de chêne »). En revanche, l'œil humain est capable de comparer des zones entre elles et

d'identifier si elles sont semblables ou non. Il est alors possible de délimiter des zones homogènes en leur attribuant à chacune un code (A, B, C...). Les descriptions de terrain, ou l'utilisation de données existantes (cartes de peuplements antérieures par exemple) permettront ensuite de donner une signification explicite à chaque code.

Définir la taille des objets à cartographier

Pour l'aménagement forestier, on se fixe généralement une limite minimale de 1 ha (voire 0.5 ha dans certains cas particuliers), pour considérer une zone homogène comme devant être digitalisée. Il sera donc nécessaire de tolérer une certaine hétérogénéité au sein de chaque « unité homogène ».

Choisir une échelle de travail adaptée et la faire varier

Les outils de visualisation (SIG, Canopée®) permettent de faire varier l'échelle d'affichage des orthophotographies. Plus cette échelle est grande, plus il est possible d'observer de détails (bien sûr dans la limite de résolution de la photographie elle-même). Il est généralement conseillé de travailler à une échelle de visualisation proche du 1 : 10 000 qui permet de visualiser suffisamment de détails, sans entrer dans une approche trop pointilliste : un zoom plus fort permet parfois de lever un doute sur l'interprétation d'un type, un zoom plus faible permet de « prendre de la hauteur » en vérifiant l'homogénéité du zonage (taille des unités).

Valider et contrôler la photointerprétation

Évidemment, toute photointerprétation doit être validée et complétée, lors des relevés de terrain.

C'est également l'occasion pour l'opérateur d'améliorer ses compétences en identifiant les causes de ses erreurs, et si possible de « ré-étalonner » son regard de photointerprète.

À l'avenir, le développement et le couplage de différentes sources de télédétection (notamment images aériennes ou satellitaires numériques et données issues de techniques LASER) devraient permettre de constituer un nouveau socle technique pour préparer les informations nécessaires à l'élaboration des aménagements forestiers.

Jocelyn BOULLOT

Service bois-aménagement
ONF, agence de Lozère

Xavier GAUQUELIN

Expert national aménagement
ONF, département forêts

Anne JOLLY

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

Le scanner laser aéroporté en zone de montagne : localiser la ressource forestière et évaluer ses conditions de mobilisation

En zone de montagne, la gestion des peuplements forestiers est rendue difficile par les contraintes topographiques qui limitent les possibilités d'inventaire terrain et les opérations d'exploitation. Dans l'optique d'une mobilisation accrue des ressources forestières, la télédétection LiDAR représente une technique prometteuse pour cartographier les peuplements ainsi que leur accessibilité.

En zone de montagne, le relief accidenté engendre une variabilité très importante des facteurs affectant les espèces ligneuses : type de sol, disponibilité en eau, ensoleillement, mais également exposition à des stress externes comme les avalanches et les chutes de blocs rocheux. Cette variabilité des conditions de croissance se traduit par une forte hétérogénéité spatiale des massifs forestiers et rend difficile la délimitation de peuplements homogènes et l'estimation de leurs caractéristiques (surface terrière à l'hectare, densité de tiges, hauteur dominante, volume sur pied...). Les inventaires forestiers basés sur des méthodes statistiques (échantillonnage sur une grille régulière) fournissent des valeurs utilisables à l'échelle d'un massif mais peu pertinentes à l'échelle de travail concrète des gestionnaires forestiers qui planifient les opérations sylvicoles et d'exploitation. Les contraintes d'accessibilité et les difficultés de progression en terrain accidenté rendent impossible humainement et économiquement la densification de l'échantillonnage requise pour une description fine des peuplements. Ce manque d'in-

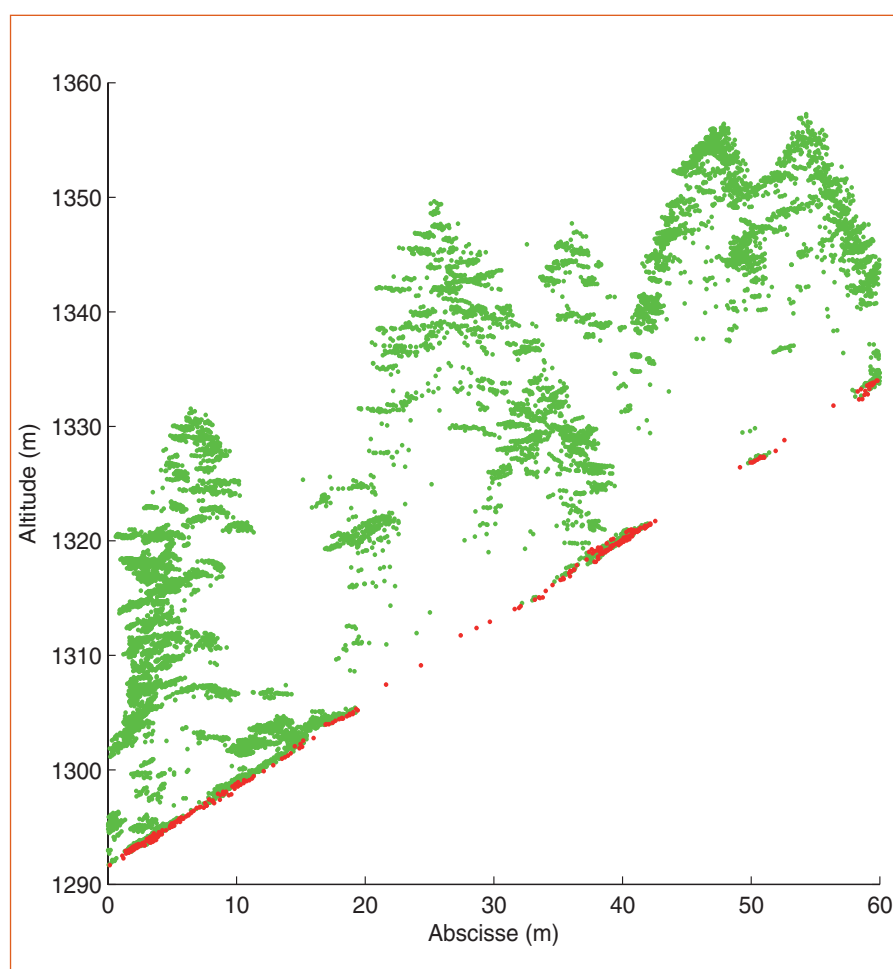


Fig. 1 : exemple de nuage de points LiDAR sur la forêt communale de Vaujany (transect dans le sens de la pente, épaisseur 4 m)
Les points classés « sol » et « sursol » sont représentés respectivement en rouge et en vert.

formation locale est d'autant plus handicapant que les objectifs de mobilisation accrue de bois supposent de s'intéresser à des zones aujourd'hui mal connues et souvent mal desservies.

Dans de telles zones, le réseau de desserte a un fort effet structurant. Il facilite la caractérisation des peuplements et rend possible leur exploitation. Cependant, le réseau de desserte en zone de montagne se caractérise par un coût de construction et d'entretien très élevé (respectivement 13 à 67 €/m et 0.5 à 1 €/m/an (ONF, 2008)). Il est donc nécessaire d'évaluer a priori l'opportunité de la construction de nouvelles infrastructures de voirie forestière ou les possibilités de recours à des modes d'exploitation alternatifs comme le débardage par câble. Cela suppose de disposer d'informations précises et localisées sur :

- les peuplements forestiers, pour déterminer les volumes sur pied disponibles ;
- le relief, pour évaluer la possibilité de construction d'une nouvelle infrastructure et la proportion des peuplements effectivement rendue accessible.

Le laser scanner (ou LiDAR, acronyme de Light Detection and Ranging) aéroporté est une technique de télédétection permettant de caractériser les éléments de la surface terrestre sous la forme d'un nuage de points géoréférencés correspondant aux objets ou aux parties d'objets de la surface qui ont intercepté les impulsions laser émises par un scanner embarqué dans l'aéronef (figure 1 page précédente). Les données peuvent être utilisées pour produire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à haute résolution (de l'ordre du mètre) et pour caractériser le couvert forestier. Dans les pays scandinaves, où les peuplements sont moins complexes et le relief moins accidenté, cette technologie est uti-

lisée pour la gestion opérationnelle des peuplements forestiers depuis le début des années 2000 (Næsset, 2004). Au Cemagref de Grenoble, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de ce type de données dans un objectif de valorisation des forêts de montagne. Il s'agit de valider le potentiel des données laser pour l'estimation des caractéristiques des peuplements complexes de montagne et pour la cartographie de leur accessibilité.

Des données laser aux variables forestières

Deux principales approches peuvent être utilisées pour caractériser les peuplements forestiers à partir des données laser.

L'approche « arbre » consiste à reconstituer l'enveloppe de la canopée à partir du nuage de

points puis à détecter les arbres via leurs sommets. Si cette première méthode permet d'envisager une gestion forestière de précision à l'échelle de l'arbre, ce qui représente une plus-value importante dans l'optique d'une mobilisation forestière par des techniques alternatives (exploitation par câble par exemple), elle présente toutefois certaines limites. Elle fonctionne bien pour les peuplements où chaque houppier est facilement individualisable et présente un sommet dominant (plantation résineuse par exemple), mais est plus difficile à mettre en œuvre pour les peuplements feuillus et notamment le taillis. Elle requiert par ailleurs des données laser à forte densité (>5 points/m²), dont le coût d'acquisition est plus élevé que pour un levé LiDAR à faible densité (~ 1 point/m²).

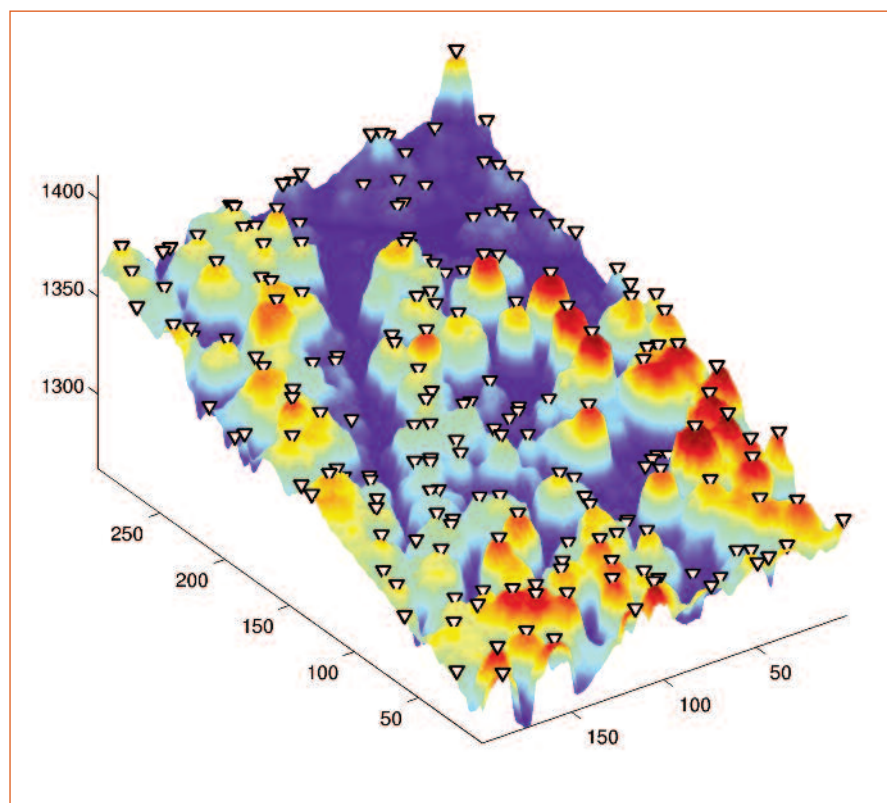


Fig. 2 : aperçu en perspective du MNS (reconstitution du couvert forestier à partir de données LiDAR), pour une zone de 100 m x 200 m en forêt communale de Vaujany

L'échelle de couleur correspond à la hauteur du couvert forestier (de bleu à rouge pour des hauteurs de 0 à 35 m), les triangles blancs sont les sommets d'arbres détectés.

L'approche « surfacique » consiste à établir des relations entre les statistiques locales du nuage de point (quantiles⁸ de hauteur, densité) et les variables forestières du peuplement (hauteur dominante, surface terrière et volume à l'hectare, nombre de tiges à l'hectare). Elle ne permet pas de fournir des informations à l'échelle de l'arbre, mais elle est aussi robuste, sinon plus, pour estimer les variables du peuplement forestier sur de grandes surfaces.

L'approche « arbre » : détection des sommets

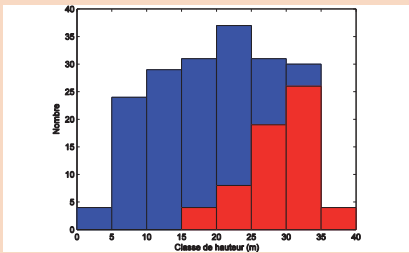
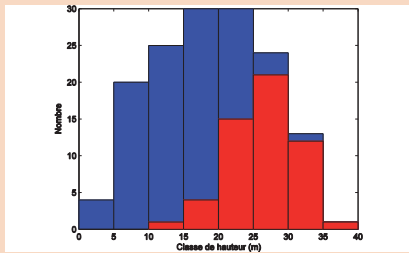
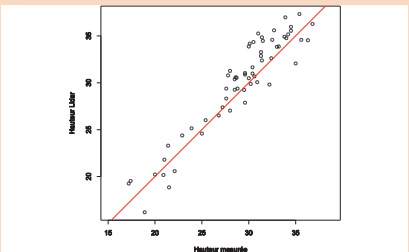
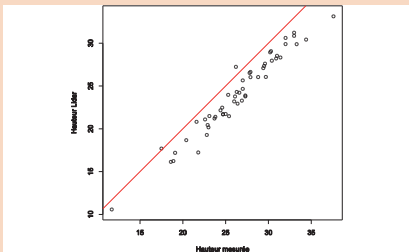
Un algorithme de détection d'arbres a été développé avec le logiciel de calcul numérique Matlab (Clouet *et al.*, 2009). Tout d'abord le MNT est calculé à partir des points laser classés « sol ». Le Modèle Numérique de Surface (MNS), qui représente l'enveloppe supérieure du couvert forestier, est calculé en prenant en compte les points classés « sursol » les plus élevés sur un voisinage donné. Un filtrage est ap-

pliqué à l'image du MNS afin de combler les pixels pour lesquels l'information est manquante ou aberrante (bruit de mesure) et pour lisser les contours des houppiers (suppression des artefacts liés aux branches et irrégularités du feuillage). Enfin une recherche des maxima locaux par fenêtre glissante permet de sélectionner les positions possibles des sommets des arbres (figure 2). La hauteur d'un arbre est estimée en faisant la différence entre l'altitude d'un sommet et celle du point du MNT situé à la verticale.

Les résultats de détection obtenus par comparaison avec les mesures terrain sur deux placettes de référence sont présentés dans le tableau 1. L'essentiel du volume sur pied est correctement détecté, malgré un taux de détection global relativement faible. En effet les arbres manqués sont majoritairement les arbres dominés ainsi que quelques codominants. La précision de la

hauteur estimée par LiDAR est similaire à celle obtenue par les mesures sur le terrain. Sur la placette située en vallée de Chamonix, la hauteur est légèrement sous-estimée. Ce biais a été déjà identifié dans les études menées dans d'autres pays. Il est dû au fait que les impulsions laser n'interceptent pas forcément le sommet de l'arbre. Sur la placette de Vaujany, où les arbres sont souvent penchés vers l'aval, on constate par contre une surestimation de la plupart des hauteurs.

Cette méthode permet donc d'établir une cartographie des arbres et d'estimer leurs caractéristiques dendrométriques individuelles (diamètre, volume) en appliquant des fonctions « allométriques », c'est-à-dire reliant la hauteur d'un arbre à ces autres paramètres. Après import de ces informations dans un Système d'Information Géographique (SIG) il est possible de calculer les para-

Placette de référence	Forêt communale de Vaujany (38) Exposition Nord-Ouest, Altitude 1300 m, 0.7 ha	Forêt communale de Chamonix (74) Exposition Nord-Ouest, Altitude 1150 m, 0.25 ha
Arbres inventoriés	190 (Sapin 56 %, Hêtre 26 %, Erable sycomore 8 %, Epicéa 7 %...)	147 (Epicéa 90 %, Sapin 5 %, Mélèze 3 %...)
Résultat identification	61 arbres correctement détectés (32.1 %), 2 fausses détections	54 arbres correctement détectés (36.7 %) 1 fausse détection
Distribution des hauteurs sur la placette (bleu). En rouge les arbres correctement détectés.		
Hauteur estimée en fonction de la hauteur mesurée, pour les arbres correctement détectés		

Tab. 1 : résultats de la détection d'arbres (méthode « détection des sommets ») sur les deux placettes de référence
Le trait rouge est la droite $Y = X$.

* Valeurs prises à des intervalles réguliers d'une fonction de distribution cumulée d'une variable. En pratique il s'agit d'abord de classer les individus de la population étudiée (ici des points LiDAR appartenant à une placette) par ordre croissant selon la variable mesurée (ici, la hauteur), puis à les répartir en sous-ensemble d'effectifs égaux. Ainsi lors d'une analyse en 4 quantiles (ou « quartiles »), le 1^{er} quartile regroupe les 25% d'individus les plus « petits ».

mètres de peuplement (surface terrière et volume à l'hectare, hauteur dominante) pour des zones prédéterminées ou selon un maillage régulier, afin d'obtenir une information plus synthétique à l'échelle d'un massif. Cependant les données obtenues sur de grandes zones doivent être considérées avec précaution dans la mesure où la méthodologie se base actuellement sur un nombre limité de placettes servant à calibrer les algorithmes de reconnaissance et les fonctions allométriques. La fiabilité des estimations obtenues sur des peuplements très différents de ceux des placettes de référence reste à évaluer.

L'approche « surfacique » : estimation directe de paramètres du peuplement

La méthode « surfacique » est actuellement utilisée par des gestionnaires forestiers scandinaves pour caractériser des forêts de production assez homogènes. Les essais menés sur des peuplements plus complexes sont encore rares. Nous l'avons testée sur un versant boisé (environ 4 km²) situé sur la commune de Saint Paul de Varcès (Isère) (Monnet *et al.*, 2010) ; 30 placettes de rayon 10 m ont été inventoriées sur le terrain pour calibrer les régressions multiples entre les paramètres du peuplement et les statistiques locales des données laser (variables liées à la distribution locale de la hauteur des points). Les modèles obtenus sont présentés dans le tableau 2. La précision^{**} des estimations est inférieure à 20 % pour le diamètre moyen, la hauteur dominante et la surface terrière à l'hectare, ce qui est satisfaisant dans le cas de massifs forestiers très hétérogènes. Ces relations permettent ensuite d'estimer la valeur des variables du peuplement sur des zones prédéterminées ou selon un maillage dont la taille doit être du même ordre de grandeur ou supérieure à celle des placettes utilisées pour la calibration. Les recherches menées dans d'autres configura-

tions forestières montrent que la précision des estimations est légèrement améliorée lorsque des relations spécifiques sont établies pour chaque grand type de peuplement.

Cartographier l'exploitabilité des peuplements

La caractérisation des peuplements donne une représentation spatialisée de la ressource, encore faut-il qu'elle soit réellement mobilisable. Pour connaître l'accessibilité globale rendue possible par le réseau de desserte existant, le Cemagref de Grenoble et l'ONF ont mis en place le modèle CARTUVI, qui modélise les surfaces forestières débordables par tracteur forestier, en fonction de la voirie et des pentes

du terrain (Clouet et Berger, 2009). Le modèle intègre le débusquage et le débardage pour réaliser les cartes d'accessibilité.

Le débusquage consiste à sortir les bois de la parcelle : le tracteur, posté sur la voie de vidange, treuille les bois abattus pour les ramener contre son tablier. En montagne, la largeur de la zone de treuillage de part et d'autre de la voie est généralement de 50 m à l'amont et de 150 m à l'aval, mais cette limite ne concerne pas les zones peu pentues où le tracteur peut pénétrer dans les peuplements. Pour représenter cela, les MNT sont utilisés pour réaliser des calculs de pente et délimiter les zones accessibles au tracteur ne dépassant pas 25 % de

Variable	Relation	R2	Précision** (%)
Hauteur dominante (m)	$2,03 \times h_{s0}^{-0,86} \times h_{d0,5}^{1,65}$	0.74	17.6
Diamètre (cm)	$1,97 \times h_{p0}^{-1,88} \times h_{p0,75}^{-0,49} \times h_{pmoy}^{3,09}$	0.69	13.3
Surface terrière (m ² .ha ⁻¹)	$20,5 \times h_{p0,25}^{6,06} \times h_{d0}^{2,24} \times h_{pmoy}^{-4,26} \times h_{dmoy}^{-3,85}$	0.80	18.9
Densité (ha ⁻¹)	$49020 \times h_{s0,25}^{1,30} \times h_{d0,75}^{-2,32}$	0.43	29.2

Tab. 2 : relations entre les paramètres forestiers et les données LiDAR (méthode « surfacique »)

La première lettre de l'indice indique s'il s'agit du groupe des premiers (p), derniers (d) ou échos seuls (s). La suite de l'indice indique la statistique de hauteur utilisée : minimum (0), premier quartile* (0.25), médiane (0.5), dernier quartile (0.75), maximum (1) ou moyenne (moy).

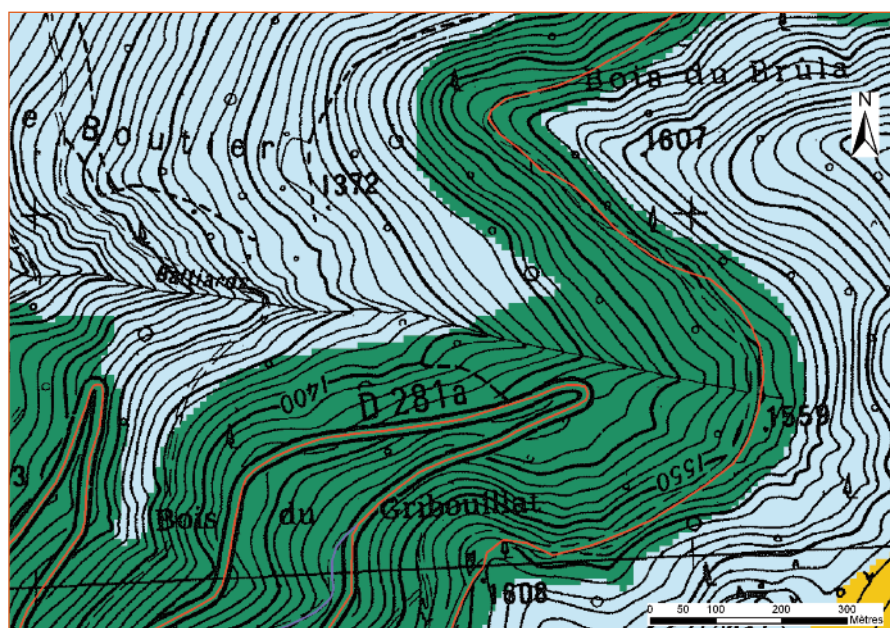


Fig. 3: zones tampons (buffers) asymétriques, correspondant à la distance maximale de treuillage à partir des routes, en fonction de la pente et de la position en amont (ici à droite) ou en aval de la route

** Rapport entre la racine de l'erreur quadratique moyenne et la moyenne des valeurs

Vers un outil d'aide à la décision pour le gestionnaire forestier

Une cartographie à forte valeur ajoutée

Le traitement des données de scanner laser aéroporté rend possible la production d'une cartographie quantitative des variables forestières là où les inventaires statistiques et la photo-interprétation n'apportaient qu'une cartographie qualitative et des données quantitatives non localisées. La valeur ajoutée de ces données est d'autant plus importante qu'elles peuvent être importées dans un SIG et croisées avec la couche de l'accessibilité des peuplements (figure 5 page suivante). À l'échelle d'un massif, le gestionnaire forestier pourra évaluer l'efficacité du réseau de desserte existant et optimiser les nouveaux aménagements.

Par ailleurs, le développement du débardage par câble, qui permet de valoriser des zones inaccessibles au tracteur forestier, est actuellement considérablement freiné par les difficultés de prospection. En effet, les conditions nécessaires à l'implantation économiquement viable d'une ligne de câble sont difficiles à réunir. Un volume de bois important doit être accessible sur une bande d'environ 40 m de largeur et longue de plusieurs centaines de mètres. Plusieurs parcelles, appartenant éventuellement à des propriétaires différents, seront concernées en partie ou en totalité, d'où la difficulté d'évaluer à partir des données d'aménagement le volume potentiellement récoltable. D'autre part, la qualité des informations sur le relief tirées des cartes Scan25 ne permet pas d'évaluer avec précision les possibilités et les coûts d'installation d'une ligne de câble. La cartographie des volumes disponibles issue de l'analyse de données LiDAR facilite le tracé de lignes potentielles de câble. À partir du MNT à haute précision, il est possible d'extraire pour

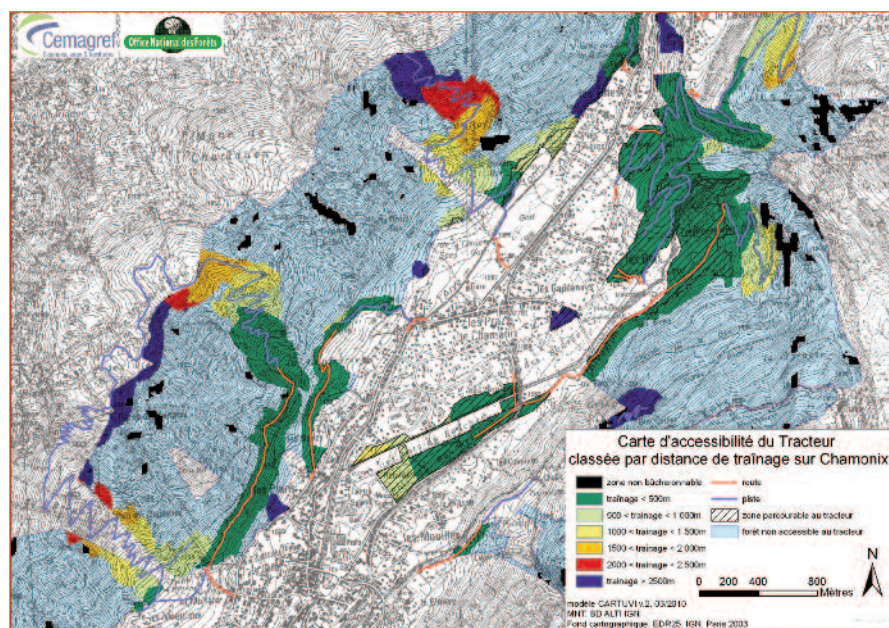


Fig. 4 : carte d'accessibilité du tracteur forestier sur la commune de Chamonix (74)

pente. Les largeurs amont et aval s'ajustent en permanence en fonction de la pente et sont finalement cartographiées sous la forme de zones tampons (« buffers ») asymétriques (figure 3). Le débardage consiste ensuite à traîner les bois (jusqu'à 10 m³ par rotation) jusqu'à la place de dépôt accessible au grumier la plus proche. La distance de traînage est une composante importante du coût global d'une exploitation : au-delà de 1 500 m, le surcoût est non négligeable. Ici, le modèle calcule les distances que le tracteur doit parcourir entre tout point accessible et la route la plus proche et crée des classes d'amplitude 500 m (figure 4).

Jusqu'à présent, les MNT utilisés proviennent de l'Institut Géographique National et sont au pas de 25 ou 50 m de résolution en X, Y (la BD Topo® ou la BD Alti® respectivement). Ces résolutions ne rendent pas compte des microvariations topographiques, mais permettent, pour de vastes surfaces, d'obtenir rapidement une estimation de l'efficacité de la desserte grâce à la cartographie des surfaces accessibles au tracteur par classe de traînage. Cette analyse permet

d'améliorer la connaissance de l'accessibilité d'une forêt par rapport aux indicateurs synthétiques qu'on utilise actuellement comme la densité de pistes aux 100 ha. Ainsi, pour deux massifs ayant la même densité de pistes à tracteur, CARTUVI peut mettre en évidence que l'un sera beaucoup mieux desservi que l'autre du fait de la moindre redondance fonctionnelle de certaines pistes trop proches les unes des autres ou des moindres longueurs de traînage moyennes.

Il reste qu'une surface accessible importante n'induit pas forcément un volume mobilisable conséquent. La technologie LiDAR ouvre des perspectives intéressantes, car elle apporte à elle seule deux informations précieuses pour le modèle CARTUVI : les données dendrométriques spatialisées issues de l'analyse du nuage de points et le MNT au pas de 1 mètre qui retranscrit fidèlement la réalité du terrain. Les résultats cartographiques peuvent être affinés et croisés avec les estimations volumétriques calculées d'après les données LiDAR, pour obtenir une carte de l'accessibilité et du volume mobilisable associé, réparti par classe de traînage.

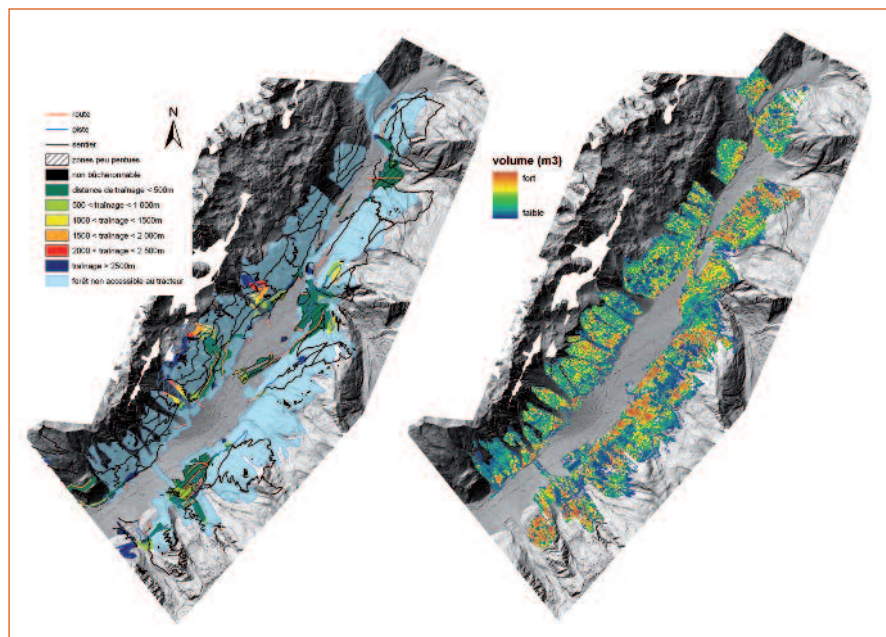


Fig. 5 : cartographie préliminaire de l'accessibilité et de la répartition indicative des volumes sur la vallée de Chamonix

L'analyse croisée des deux couches d'information permet d'estimer les volumes mobilisables par classe d'accessibilité et de hiérarchiser les investissements en desserte forestière. NB : l'édition d'une carte quantitative et validée nécessite des placettes de référence supplémentaires.

chaque ligne de câble envisagée le profil du terrain pour évaluer la faisabilité et le coût de l'implantation.

Quelles perspectives opérationnelles pour l'utilisation de données LiDAR en montagne ?

Si les premiers développements méthodologiques et tests réalisés à l'échelle du massif forestier sont prometteurs, un important travail est encore nécessaire avant d'envisager le déploiement opérationnel de cette technologie. La complexité des forêts de montagne, mais également la diversité des matériels et des spécifications d'acquisition LiDAR sont tels qu'il sera difficile d'automatiser totalement la procédure de traitement. L'enjeu de futurs travaux de recherche est de déterminer quel est le compromis optimal entre l'effort de terrain requis pour calibrer les modèles et le niveau de précision attendue des estimations. Cette analyse doit mettre en balance la valeur ajoutée des informations spatialisées et l'investissement matériel et humain que représentent l'acquisition

LiDAR et les relevés des placettes de calibration. L'effort de développement méthodologique devra également porter sur les possibilités d'automatisation du positionnement des lignes de coupe à câble puis d'intégration de ce module au logiciel de cartographie des unités de vidange. L'objectif serait de disposer d'un outil permettant de tirer profit des complémentarités de ces deux modes de débardage dans une perspective d'aménagement et de valorisation à long terme des massifs forestiers de montagne.

À ce stade, il nous paraît essentiel d'associer et d'organiser les utilisateurs futurs de ces données (agents, techniciens, aménagistes) pour définir les différents éléments d'une chaîne de traitement et le type d'information produite. Les estimations tirées de données de scanner laser aéroporté seront d'autant plus précises qu'elles intégreront des informations de terrain (placettes de calibration, relations hauteur/diamètre et tarifs de cubage, descriptions qualitatives

comme les types de peuplement). Il s'agit de tirer profit des synergies entre les données de télédétection et le savoir-faire de terrain pour fournir au gestionnaire forestier des informations plus précises et des outils plus performants.

Jean-Matthieu MONNET

Nicolas CLOUET

Éric MERMIN

Frédéric BERGER

UR Ecosystèmes Montagnards
Cemagref Grenoble

Bibliographie

Clouet N., Berger F., 2009. Modélisation des surfaces débardables au tracteur forestier en zone de montagne. *Géomatique expert*, n°70, pp. 75 – 79

Clouet N., Monnet J.M., Berger F., 2009. Estimation du volume de bois exploitable en montagne par scanner laser aéroporté (LiDAR). *Géomatique expert*, n°70, pp. 32 – 37

Monnet J.M., Mermin E., Chanussot J., Berger F., 2010. Using airborne laser scanning to assess forest protection function against rockfall. *Proceedings of the Interpraevent 2010 International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan 26-30 april*. pp. 586-594.

Næsset E., 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 19 n° 2, pp. 164 – 179

ONF, 2008. Guide méthodologique en vue d'une automatisation spatialisée des coûts de mobilisation des bois. Application au site classé de la Grande Chartreuse. Rapport technique Office National des Forêts, AgroParisTech Engref

Utilisation de séries temporelles d'images satellitaires pour cartographier le dépérissement des boisements résineux du Sud Massif Central

La canicule de 2003 a provoqué dans le Sud Massif Central des dépérissements résineux brutaux et massifs. Après la crise est venu le temps de l'analyse, en évaluant d'abord l'étendue des impacts, ne serait-ce que pour organiser les reconstitutions à l'échelle régionale. La méthode de télédétection imaginée et mise en œuvre avec succès est bien adaptée à ce type de phénomène, avec ceci d'original qu'elle intègre les coupes sanitaires d'urgence comme indicateur de l'intensité du dépérissement. Mais gardons-nous de généraliser, car de ce fait même elle ne se prêterait pas à l'évaluation d'autres types de dépérissement, plus diffus ou aux symptômes plus « subtils ».

Les conditions climatiques de 2003 ont été exceptionnelles et se sont caractérisées, en France et dans une grande partie de l'Europe, par de très hautes températures durant l'été associées à un déficit de pluviométrie qui s'est prolongé dans certaines régions jusqu'au printemps 2004 [Rebetez et al., 2006]. À la suite de cet épisode de nombreux impacts se sont fait ressentir sur les milieux forestiers, avec notamment des déficits foliaires d'intensité variable selon les espèces et une mortalité, plus importante chez les résineux que chez les feuillus (Pauly, 2006).

D'importants dépérissements ont alors été constatés dans les peuplements de résineux des deux départements du Sud Massif Central, le Tarn et l'Aveyron. Les symptômes observés sont des rougissements, puis des dessèchements partiels ou totaux de certains arbres. Dès la fin de l'été 2003, ces symptômes sont apparus massivement sur le Douglas et l'épicéa avec, au printemps 2004, des mortalités en taches sur

le sapin pectiné ou de Vancouver. L'affaiblissement des peuplements a permis le développement de parasites en particulier sur le sapin de Vancouver et l'épicéa. Plusieurs milliers d'hectares de forêts privées et publiques sont affectés par le phénomène : de 2003 à 2005, 1 700 ha au moins ont fait l'objet de coupes d'urgence (récolte anticipée) et en 2007 le total dépassait 4 000 ha. D'où l'inquiétude des propriétaires publics et privés : quelle était l'ampleur réelle du phénomène ? Comment évoluerait-il et, dans la mesure où ce type d'événement risquait de se « banaliser » avec le changement climatique, comment orienter la reconstitution ?

Début 2006, la Commission Régionale de la Forêt et des Produits Forestiers de Midi-Pyrénées a chargé l'Office national des forêts (ONF) et le Centre régional de la propriété forestière (CRPF) de dresser l'état des lieux : décrire le dépérissement en s'appuyant sur le réseau d'observation du Département santé des forêts

(DSF), le quantifier à l'échelle régionale et analyser les facteurs de causalité. [CRPF Midi-Pyrénées et al., 2008]. Pour l'aspect quantitatif, cependant, les données sur les coupes de dépérissement ne donnant qu'une vision incomplète de la situation, l'École d'ingénieurs de Purpan (EIP) a été sollicitée pour une approche complémentaire d'évaluation cartographique par télédétection. Cette démarche s'est imposée comme la seule économiquement acceptable dans le cadre de la commande, pour une observation rapide et complète sur un territoire étendu : les surfaces en résineux couvrent plus de 90 000 ha répartis sur deux départements.

Nous ne traitons ici que de la méthode de télédétection proposée (et mise en œuvre), par traitement de séries temporelles d'images satellitaires. Les surfaces analysées se basent sur les données cartographiques de l'Inventaire forestier national (IFN) pour les résineux, lesquelles ne permettent pas de distinguer chaque essence, mais



A. Triou, ONF

seulement trois groupes : « sapins/épicéas », « douglas » et « autres conifères ». Au-delà des résultats obtenus pour l'étude de ce dépérissement à échelle régionale, nous évoquons aussi l'intérêt de ce type d'« outil » pour la détection des situations à risque au regard des changements climatiques.

Des données de télédétection adaptées au suivi de l'activité végétale

Les images satellitales peuvent apporter une aide significative pour la connaissance de la couverture végétale et le suivi de son état. Les capteurs embarqués recueillent l'énergie solaire réfléchi et la transforment en images qui peuvent être analysées, à partir des propriétés de réflectance des objets étudiés (partie de l'énergie réfléchi, différente selon les longueurs d'onde). Pour la végétation, les ondes dans le rouge sont absorbées par les pigments chlorophylliens ; à l'inverse, les ondes dans le proche infrarouge sont fortement diffusées par la structure du mésophylle des feuilles et en particulier du parenchyme lacuneux, lieu d'échange entre l'oxygène et le gaz carbonique pour la photosynthèse et la respiration. En situation de stress hydrique ou dans le cas de sénescence naturelle du

végétal, la réflectance augmente dans le rouge du fait d'une baisse du taux d'activité de la chlorophylle. Parallèlement, la déstructuration du mésophylle s'accompagne d'une diminution de la réflectance dans le proche infrarouge.

Choix d'un indice synthétique caractérisant l'état de la végétation

Dans notre démarche, la première étape est de caractériser l'état de la végétation (peuplements résineux) par un indice qui combine, en tout point de l'image, les valeurs de réflectance de différentes longueurs d'onde. Il existe un grand nombre d'indices construits pour diverses applications : la plupart combinent les valeurs de réflectance mesurées dans le proche infrarouge (NIR : *near infrared*) et dans le rouge (R) et le plus largement utilisé est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* ou indice de végétation normalisé) :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$$

Pour un végétal sénescent ou subissant un stress hydrique la mesure du NDVI est plus faible que pour un végétal en pleine activité photosynthétique. Des variations anormales de NDVI peuvent être liées à une perturbation environnementale ayant entraîné un défi-

cit foliaire ou un dessèchement du feuillage.

Cet indice, dont la robustesse est démontrée, est fortement corrélé à des paramètres biophysiques de la végétation. Il peut être considéré comme étant un bon indicateur de l'activité chlorophyllienne et donc de la vigueur de la végétation. Sensible aux variations spatiales et temporelles il est adapté pour le suivi de la dynamique de la végétation (Huete *et al.*, 2002). Des applications ont montré son intérêt pour l'évaluation du dépérissement forestier, la détection des dommages dus à la sécheresse ou encore la cartographie de la défoliation des arbres, dans le cas où ces phénomènes entraînent une modification brutale et importante de l'activité photosynthétique (Deshayes *et al.*, 2006; Solberg *et al.*, 2007).

Choix des images : séries temporelles à moyenne résolution

Lorsqu'elle concerne un massif ou un suivi de parcelles, la cartographie de dommages forestiers est généralement abordée par analyse d'images à haute, voire très haute résolution spatiale qui permet une observation à une échelle fine. (Morin *et al.*, 2007). Mais ces images, qui ne couvrent que des surfaces relativement restreintes (quelques dizaines de km), conviennent mal à l'échelle régionale qui nous concerne ici et présentent encore des contraintes d'acquisition ou de disponibilité (coût, dates, archive). De plus, leur répétitivité limitée dans le temps rend difficile le suivi d'un phénomène qui résulterait de mécanismes continus et progressifs perturbant par exemple la phénologie.

En revanche, les images du capteur MODIS embarqué sur le satellite Terra sont particulièrement bien adaptées au suivi continu de la couverture végétale. Il s'agit d'images à moyenne résolution spatiale (pixel de 250 m) couvrant chacune une très grande surface (1 200 km x

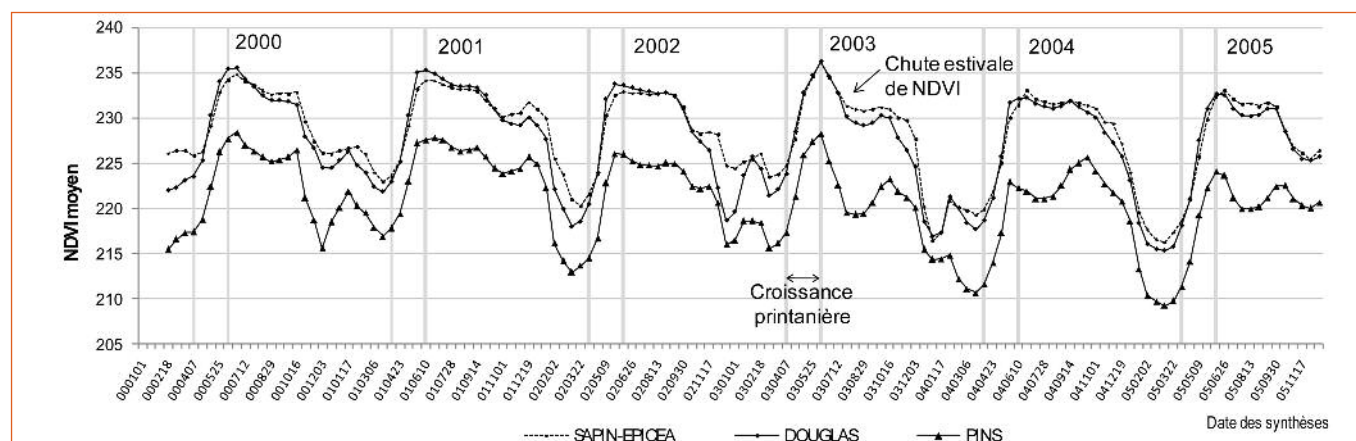


Fig. 1 : profils pluriannuels de NDVI pour trois groupes de résineux de la zone d'étude

1 200 km), ce qui permet un traitement homogène à l'échelle régionale. De plus, leur couverture journalière permet une approche basée sur le suivi de la dynamique des couverts végétaux en lien avec leur phénologie. Enfin, la disponibilité des images en archive permet une analyse rétrospective des événements depuis 2000.

Nous avons choisi de travailler sur une série d'images MODIS pour deux raisons principales : la couverture journalière de l'ensemble de la zone d'étude et la résolution spatiale, qui est la plus fine parmi les satellites à haute répétitivité temporelle. Afin de s'affranchir pour partie des effets liés aux différences de conditions d'acquisition des images d'un jour à l'autre, tels que les perturbations du signal liées aux conditions atmosphériques, nous avons utilisé des synthèses représentant le NDVI de chaque pixel calculé sur 16 jours. La série d'images disponible couvre la période 2000-2007. Les variations temporelles des valeurs de NDVI que l'on peut mesurer avec ces images accompagnent l'évolution saisonnière de l'activité végétale forestière.

Profils temporels de NDVI et mesure de l'activité végétale

En établissant les profils temporels de NDVI on peut caractériser le cycle phénologique spécifique des formations considérées. Les profils

pluriannuels de NDVI établis pour les trois types de peuplements (figure 1) mettent en évidence le cycle saisonnier ainsi que les variations de comportement interannuelles. Les courbes des deux groupes sapin-épicéa et douglas sont très proches. Pour les « autres conifères », c'est-à-dire ici les pins, les valeurs sont nettement plus faibles pour l'ensemble du cycle, mais la forme de la courbe est globalement similaire.

Repérer les stades phénologiques clés

On peut clairement identifier sur les courbes les phases importantes de la dynamique saisonnière correspondant au démarrage de l'activité photosynthétique au début

du printemps, puis la phase de croissance jusqu'au maximum atteint en fin de printemps, marquant la fin de la production de biomasse. Cette saison de croissance est suivie d'une phase de décroissance estivale indiquant la sénescence progressive de la végétation, plus ou moins rapide selon les années. On peut observer que la sécheresse de 2003, par exemple, se traduit par une chute très brutale de NDVI dès le début du mois de juillet. Une remontée de NDVI est parfois observée en automne, celle-ci accompagne la reprise des précipitations. En hiver, les mesures de NDVI peuvent être extrêmement perturbées par le couvert neigeux pour les sites les plus élevés en altitude.

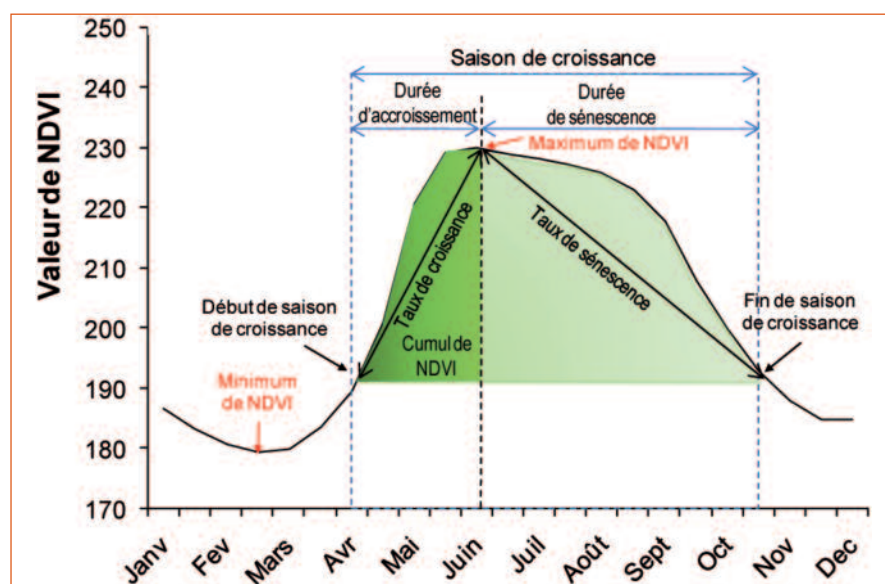


Fig. 2 : profil annuel de NDVI et « phenologic metrics » (d'après B.C. Reed)

Comme le montre un profil type de NDVI (figure 2 page précédente), on peut repérer des stades phénologiques « clés » et relever ainsi une série d'observations liées au comportement de la végétation telle que : la date de démarrage de l'activité printanière, les valeurs de NDVI indiquant le niveau d'activité photosynthétique au début et en fin de la saison de croissance, la durée de la saison de croissance... (Jackson *et al.*, 2001; Reed, 2006).

Calculer un indicateur d'activité de la végétation (SG) à partir des profils de NDVI

Ces observations, nommées « phenologic metrics » par B.C. Reed ne correspondent pas directement à des mesures conventionnelles de phénologie faites sur des individus ou des espèces in situ, mais fournissent des indicateurs du comportement et de la dynamique du couvert végétal (Moulin *et al.*, 1997).

L'activité printanière correspond à la phase d'accroissement maximal et peut être définie comme sur la figure 2, à partir des principaux « phenologic metrics ». Par le cumul de NDVI sur cette période d'accroissement végétal (avril-juin), on obtient un indicateur annuel du niveau d'activité de la végétation que l'on nomme **SG (spring greenness)** et qui est lié à la production primaire nette.

Méthode d'identification et cartographie des variations de l'activité végétale

Pour donner une vue globale du dépérissement et de son évolution, l'objectif du travail était de localiser cartographiquement les situations où les peuplements forestiers ont présenté des perturbations physiologiques suffisamment fortes pour engendrer des variations significatives de l'indicateur annuel de vigueur SG. La valeur de SG de chaque pixel a été calculée comme indiqué figure 3 pour chacune des années de la période 2000-2007, de manière à montrer, par comparaison, les fluctuations interannuelles.

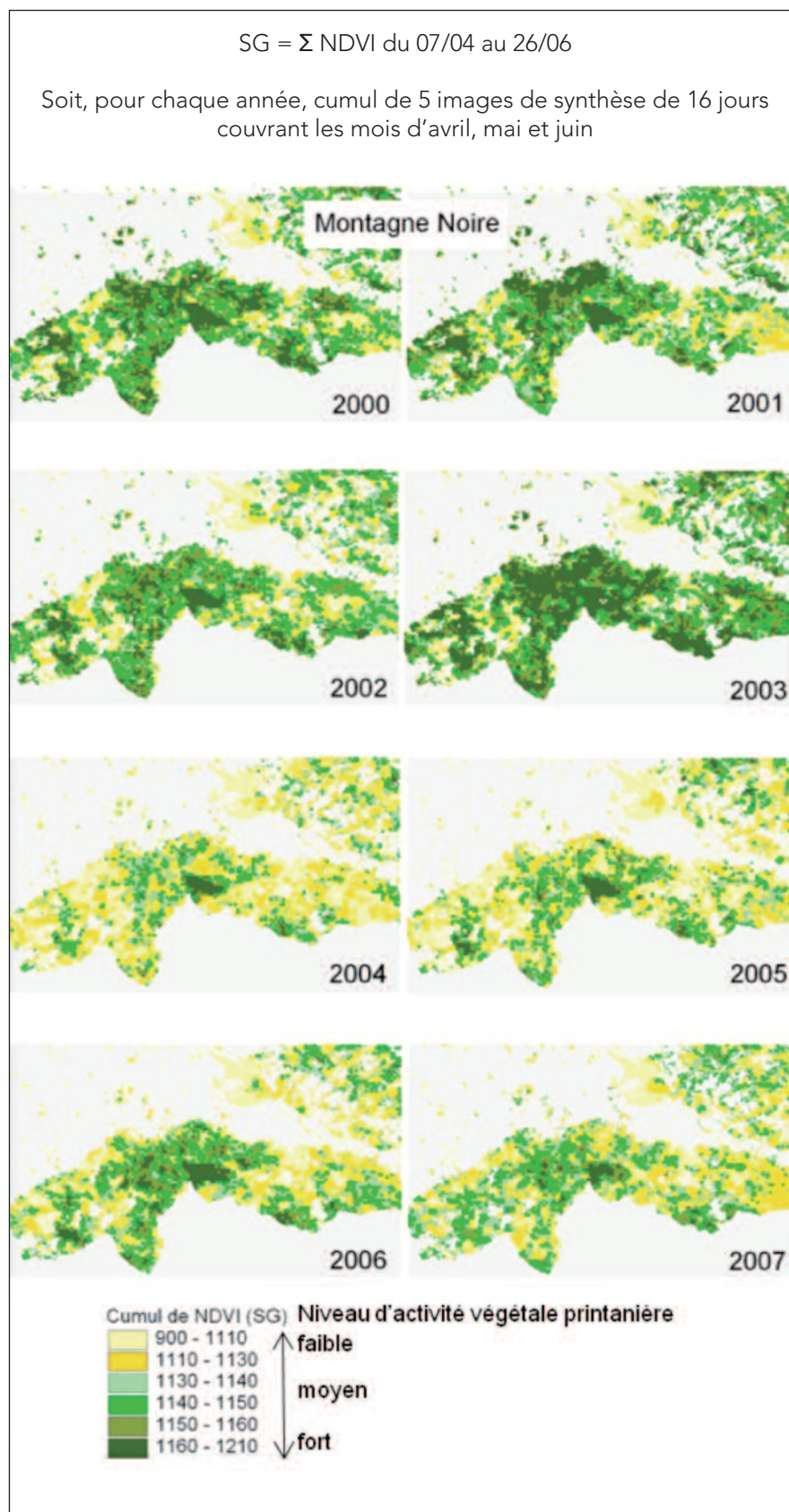


Fig. 3 : calcul de l'indicateur de vigueur SG pour notre étude et extrait cartographique pour l'ensemble du couvert forestier de la Montagne Noire (Tarn)

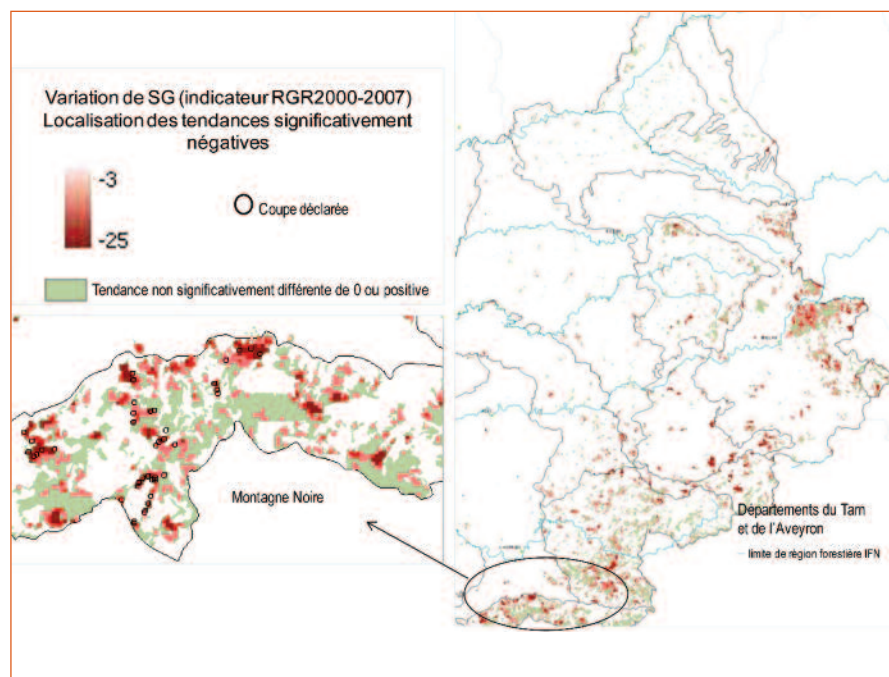


Fig. 4 : cartographie des tendances d'évolution de l'indicateur de vigueur entre 2000 et 2007 ; les valeurs négatives indiquent une perte de vigueur (activité printanière) d'autant plus aiguë qu'elles s'éloignent du zéro

Variabilité spatiale et interannuelle de l'activité végétale

La figure 3 est la représentation cartographique de l'indicateur SG pour le massif forestier de la Montagne Noire, pour les huit années d'observation.

On peut constater une hétérogénéité intra-massif faisant ressortir les secteurs de plus forte activité végétale printanière. À cette variabilité spatiale s'ajoute une variabilité temporelle : le niveau d'hétérogénéité intra-massif se maintient, mais avec des valeurs de SG globalement plus faibles à partir de 2004 sur l'ensemble du couvert végétal. Clairement, l'activité printanière globale est relativement stable de 2000 à 2003 (voire légèrement « boostée » au printemps 2003, avant que se manifestent les phénomènes de stress), puis elle chute en 2004 et peine à se rétablir ensuite.

Caractérisation de l'évolution de la vigueur de la végétation au cours de la période 2000-2007

Pour chaque pixel, l'évolution des valeurs de SG sur plusieurs années

peut être caractérisée par une tendance qui rend compte de la variation de l'activité végétale entre deux extrêmes : tendance à la baisse en cas de perturbation physiologique, ou à la hausse si accroissement de la végétation. La tendance de la série des SG annuels d'un pixel donné répond au calcul d'un coefficient de pente (a) qui donne le sens (positif ou négatif) et l'importance (valeur) de l'évolution de l'activité.

Ce coefficient peut être cartographié pour représenter l'intensité du « changement » ou de la perturbation observé(e) sur la période 2000-2007 dans les peuplements résineux. Il fait d'abord l'objet d'un test statistique pour identifier les situations où il traduit une tendance significative (Reed, 2006), c'est-à-dire les cas où il est significativement différent de la pente de référence a_0 (pente nulle).

$$t = (a - a_0) / (\sigma / \sqrt{n})$$

a : pente de la tendance

a_0 : pente de référence considérée nulle

σ : écart-type

n : nombre d'années d'observation

Les valeurs négatives significatives au seuil de probabilité de 0,01 traduisent une baisse d'activité végétale. Les valeurs positives significatives traduisent au contraire le maintien, voire une augmentation, de la vigueur de la végétation. La pente (a) de la ligne de tendance, calculée pour chaque pixel, constitue notre indicateur de « changement » ou de perturbation observé sur la période de 2000 à 2007. Celui-ci, nommé RGR2000-2007 peut être cartographié pour toutes les surfaces en résineux comme le montre la figure 4.

Étalonnage des 4 classes de perte de vigueur

Pour établir la validité de cette cartographie et donner une définition concrète aux classes de tendance proposées, nous avons fait l'hypothèse que les zones de forte chute d'activité végétale, sur la période d'observation, correspondaient aux dépérissements et/ou coupes sanitaires, pour l'essentiel bien documentés par l'ONF et le CRPF. Le croisement avec des données d'inventaire localisées de coupes sanitaires, certaines déjà réalisées à la date des images (situation extrême), d'autres programmées (permettant d'identifier des surfaces dépérissantes) a permis de définir les seuils de regroupement des valeurs en classes correspondant à des niveaux de dépérissement ou de comportement de peuplement sain.

Seules les coupes de plus de 4 ha ont été retenues pour cet « étalonnage », soit un total de 114 points de coupe. La nomenclature finale distingue 4 classes (figure 5 page suivante) :

- 1- très forte chute de l'activité végétale, peuplements dépérissants et coupes rases,
- 2- chute importante de l'activité végétale, peuplements souvent dépérissants et/ou à évolution incertaine,
- 3- faible chute de l'activité végétale, peuplements à évolution incertaine,
- 4- chute très faible, voire augmentation de l'activité végétale, peuplements *a priori* sains.

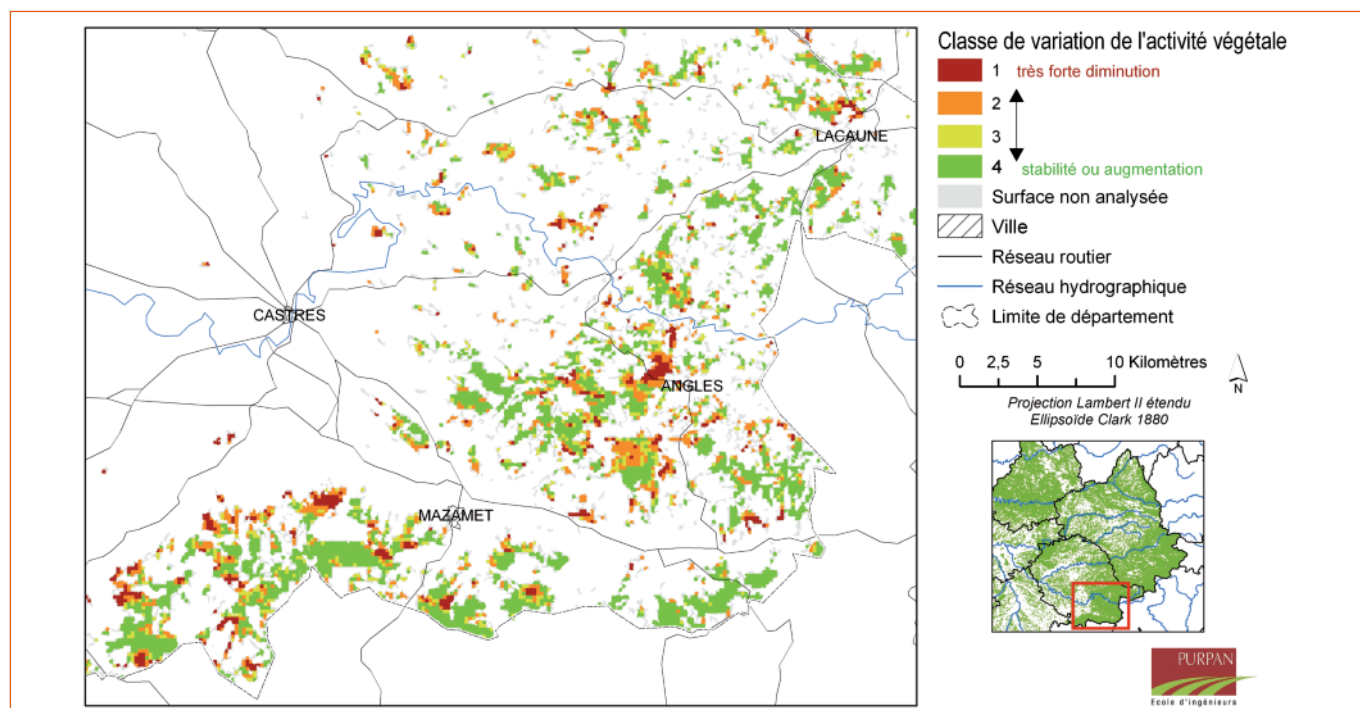


Fig. 5 : carte du phénomène de baisse de l'activité végétale des peuplements résineux entre 2000 et 2007 (Sud du Tarn)

Résultats et bilan de l'étude du dépérissement

L'utilisation des données de télédétection a permis de mettre en évidence et de cartographier une baisse d'activité végétale sur l'ensemble des deux départements concernés. Les observations de terrain ayant confirmé le lien entre cet indice et l'état de vigueur des peuplements, ces cartes indiquent les grandes zones dépérissantes ou susceptibles de l'être.

L'extraction des surfaces par classe de baisse d'activité a permis de quantifier globalement le phénomène sur l'ensemble de la zone d'étude. Il en ressort qu'en 2007, la surface des peuplements sujets à dépérissement, avéré ou probable (classes 1 et 2), représente 29 % des surfaces résineuses. L'analyse par groupe d'essences (selon la typologie de l'IFN) indique que 5 400 ha pour le douglas, essentiellement situés dans l'Aveyron et 5 800 ha pour l'ensemble épicéa-sapin, ont été significativement affectés par la canicule de 2003.

Par ailleurs, cette exploitation des données de télédétection a aussi contribué à l'étude des facteurs de causalité, par croisement avec les données cartographiques disponibles (d'échelle compatible). S'il n'a pas été possible d'explorer de cette façon l'ensemble des facteurs stationnels, l'utilisation d'un modèle numérique de terrain a montré que l'altitude est un facteur explicatif significatif. Dans le Tarn, on observe qu'au-delà de 750 m pour le douglas et de 800 m pour le sapin-épicéa, le risque semble réduit. Pour l'Aveyron, seul le cas du douglas est significatif (le groupe sapin-épicéa y est beaucoup moins représenté que dans le Tarn) : les dépérissements ne diminuent fortement qu'au-delà de 900 m.

Bilan de l'étude

La méthodologie utilisée dans cette étude a montré son intérêt pour analyser un phénomène de dépérissement sur une grande zone géographique. Cependant il est important de signaler les éléments suivants :

- Les cartes obtenues donnent une bonne vision d'ensemble, mais ne

doivent pas être utilisées à une échelle plus détaillée. En effet, la taille des pixels des images satellitaires utilisées n'est pas adaptée à une lecture locale : petite forêt et encore moins parcelle. De même, la méthode ne permet pas de tenir compte des peuplements fragmentés ou de petite taille.

- Les données cartographiques IFN des limites de peuplements utilisées pour l'analyse n'ont pas permis de distinguer chaque essence. Ainsi, l'épicéa et le sapin sont confondus en un groupe d'essences unique.

- L'analyse des données sur l'activité végétale printanière, fournie par les images satellitaires, reflète bien la souffrance des peuplements résineux et la probabilité de dépérissement. Pour autant, on ne doit pas tirer de conclusion hâtive et alarmiste sur l'avenir des peuplements à partir de ces seuls résultats : il faut aussi une analyse par essence, complétée d'observations de terrain. En l'occurrence, une différence nette de comportement est apparue entre les essences : si le groupe épicéa-sapin a présenté des dépérissements justifiant de

nombreuses coupes rases, les peuplements de douglas ont souvent pu être maintenus. L'absence de cortège parasite pour cette essence « exotique » pourrait fournir un élément d'explication.

Malgré ces limitations, L'utilisation de la télédétection s'est confirmée comme la seule méthode économiquement pertinente dans le cadre de l'étude commandée. Elle a permis une observation rapide et complète sur une large zone géographique pour un coût réduit, et pourra orienter les futures observations de terrain. La localisation et la quantification des zones à risque de dépérissements tirées de cette étude vont permettre de revoir les recommandations de choix d'essences dans les documents directeurs utilisés par les forestiers. Ainsi, un projet de modification des tableaux maîtres de la DRA-SRA « Sud Massif Central » est en cours. En particulier, la relation établie entre le dépérissement et le facteur altitude permet de préciser les conditions d'utilisation du douglas.

Contraintes de la méthode

Ce bilan encourageant ne doit pas faire oublier que les développements basés sur l'exploitation des séries temporelles d'images à moyenne résolution spatiale présentent un certain nombre de contraintes.

Contraintes de prétraitement des séries d'images

La première concerne la qualité initiale des images et la nécessité de prétraitements adaptés. Les images peuvent présenter des niveaux de qualité variables du fait de perturbations du signal liées aux conditions atmosphériques, à la topographie et aux effets de sols, aux caractéristiques de prise de vue. Ces principales sources de perturbations ont généralement pour effet de faire baisser les valeurs de NDVI. Elles existent pour tous les types de données de télédétection,

mais, pour travailler sur des données continues dans le temps, il est nécessaire de réduire ces erreurs en appliquant une correction de type « lissage » calculée de pixel à pixel, en comparant les dates entre elles. Plusieurs techniques de lissage sont utilisées et répertoriées en deux types :

- 1) le filtrage : les valeurs aberrantes sont détectées à partir de leurs propriétés originales et de règles prédéfinies et remplacées par combinaison des valeurs voisines
- 2) l'ajustement à une fonction : qui consiste en la construction d'une nouvelle série temporelle suivant un modèle théorique ajusté aux données disponibles.

Pour chacun de ces deux types il existe des méthodes relativement robustes, mais aucune n'est « parfaite » et il est nécessaire de faire un choix selon le contexte, généralement sur la base de tests. Les méthodes par ajustement de fonction (groupe 2) sont adaptées à l'étude de cycles caractéristiques d'un développement régulier de la végétation, mais pas à celle de phénomènes exceptionnels et accidentels. Nous considérons que les méthodes de filtrage (groupe 1) sont mieux adaptées à notre type d'étude. Toutefois un choix approprié et surtout un travail d'ajustement et de paramétrage sont indispensables pour obtenir un compromis entre l'élimination de variations en « dents de scie » des valeurs de NDVI dues à des erreurs de mesures, et la conservation de variations même brutales dues à des modifications du comportement de la végétation (mortalité, coupe, incendie...).

Difficultés de validation des résultats

Parmi les nombreuses applications basées sur l'exploitation d'images MODIS, peu présentent des éléments de validation des informations produites, très souvent par manque ou insuffisance de références de terrain. La difficulté réside dans la na-

ture et surtout l'échelle des phénomènes comparés ; les valeurs mesurées et l'échelle spatiale des images MODIS sont difficiles à relier à des observations de terrain. Dans notre étude, le croisement avec des informations disponibles sur des coupes sanitaires localisées, consiste d'abord à rechercher le seuil de l'indicateur le plus adapté pour rendre compte de la baisse de l'activité végétale qu'en une véritable validation. Et bien que la méthode basée sur des données MODIS ait déjà montré son utilité pour détecter des dommages forestiers [Eklundh L. et al., 2009], sa capacité à estimer une intensité du phénomène reste à démontrer. Pour appréhender cette intensité on peut envisager, en complément des données à moyenne résolution, un recours à des données de télédétection à haute résolution spatiale ce qui nécessiterait de mettre en œuvre une procédure spécifique de combinaison de données d'échelle différentes.

Bien que des tests et des protocoles de validation soient encore nécessaires, cette étude ainsi que les résultats publiés dans la littérature indiquent que des outils pour la surveillance générale des changements des forêts peuvent être développés sur la base de données MODIS.

L'utilisation de séries temporelles : un potentiel réel pour le suivi des changements d'état des forêts

L'exploitation d'images de télédétection à haute répétitivité temporelle présente un grand intérêt pour la caractérisation et le suivi de la phénologie des peuplements forestiers à une échelle régionale. L'accès à des informations sur la phénologie nécessite de disposer d'observations acquises à des dates très proches, sur toute la période de végétation. La dimension spatiale de ces images répond bien au besoin d'analyse à échelle régio-

nale pour une vision globale des impacts et de devenir des peuplements. C'est bien sûr cette double composante « **spatiale** » et « **temporelle** » des séries d'images utilisées que se basent les développements de modèles régionaux, dont cette étude fait partie.

Les développements en cours dans ce domaine visent à transformer les informations issues des images en indicateurs d'état et du comportement de la végétation, pour repérer des dégâts ou des changements de phénologie, et à caractériser leurs tendances d'évolution temporelle. Il s'agit, d'une part, de mesurer des anomalies que l'on peut assimiler aux « effets immédiats » d'une perturbation environnementale (crise sanitaire, effet sécheresse...) et, d'autre part, d'approcher les « effets retardés » d'une perturbation sur un pas de temps pluriannuel : tendance à la dégradation continue de l'état de vigueur des peuplements et à l'amplification des dégâts ou, au contraire, à une récupération progressive. Il existe désormais des outils de modélisation des séries temporelles de type STL, BFast [Verbesselt *et al.*, 2010] permettant de qualifier les tendances d'évolution du comportement saisonnier des peuplements en réponse aux facteurs du milieu, et que l'on pourra appliquer à ce type d'analyse. Ces travaux sur le suivi phénologique s'inscrivent dans le développement d'outils adaptés à la veille et au repérage des situations à risque, en anticipation de possibles déplacements d'aire potentielle des essences résineuses sous l'influence du changement climatique. En combinant les résultats de télédétection avec des données descriptives des conditions d'environnement et de station, ils contribuent à fournir des éléments de caractérisation de la vulnérabilité des forêts et du devenir des peuplements.

Véronique CHÉRET

Jean-Philippe DENUX

Laboratoire de Télédétection et
Gestion des Territoires
École d'Ingénieurs de Purpan,
Toulouse

Christelle GACHERIEU

ONF, agence de Castres
Unité spécialisée aménagement

Jean-Pierre ORTISSET

CRPF Midi-Pyrénées

Bibliographie

CRPF Midi-Pyrénées, ONF, EI-PURPAN, 2008. Dépérissement des reboisements du Sud Massif Central - État des lieux et propositions d'analyse, 2ème tranche - Départements de l'Aveyron et du Tarn, Rapport de fin d'étude, 43 p.

Deshayes M., Guyon D., Jeanjean H., Stach N., Jolly A., Hagolle O., 2006. The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems, *Ann. For. Sci.*, vol. 63 pp.579-595

Eklundh L., Johansson T., Solberg S., 2009. Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data, *Remote Sensing of Environment* vol. 113, pp. 1566 - 1573

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, vol.83, pp. 195-213

Jackson R.B., Lechowicz M.J., Li X., Mooney H.A., 2001. The roles of phenology, growth, and allocation in global terrestrial productivity. *In* *Terrestrial Global Productivity: Past, Present and Future*, edited by H.A. Mooney, and J. Roy, Academic Press. pp. 61-82

Morin N., Jolly A., Legay M., Kochert T., 2007. Operational prospects in the use of remote sensing for the monitoring of forest decline potentially related to climate change, *In* *Proceedings of the ForestSat'07 International Conference: spatial operational tools for forestry*, Montpellier (France), 7p.

Moulin S., Kergoat L., Viovy N., Dedieu G., 1997. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements, *Journal of Climate*, vol. 10, pp. 1154-1170

Pauly H., 2006. Résultats 2005 du réseau complémentaire canicule, Bilan de la santé des forêts en 2005. Ministère de l'agriculture et de la pêche, Département de la santé des forêts. 9 p.

Rebetez M., Mayer H., Dupont O., Schindler D., Gartner K., Kropp J.P., Menzel A., 2006. Heat and drought 2003 in Europe : a climate synthesis, *Ann. For. Sci.*, vol. 63, pp. 569-577

Reed B.C., 2006. Trend analysis of time series phenology of North America derived from satellite data, *GIScience & Remote Sensing of Environment*, vol.43 n°1, pp. 1-15

Solberg S., Eklundh L., Gjertsen A.K., Johansson T., Joyce S., Lange H., Naesset E., Olsson H., Pang Y., Solberg A., 2007. Testing remote sensing techniques for monitoring large scale insect defoliation, *In* *Proceedings of the ForestSat'07 International Conference: spatial operational tools for forestry*, Montpellier (France), 5p.

Verbesselt J., Hyndman R., Newnham G., Culvenor D., 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series, *Remote Sensing of Environment*, vo. 114 n°1, pp. 106-115

La photo-interprétation et les analyses stéréoscopiques : outils indispensables des cartographies des risques en montagne

À l'ère des satellites, du laser aéroporté, des modèles numériques de terrain et autres outils des plus modernes, la « bonne vieille » photo-interprétation stéréoscopique pourrait paraître surannée. Elle est pourtant plus que jamais d'actualité et sait se renouveler dans le domaine plutôt « pointu » de la cartographie des risques en montagne.

Les étapes fondamentales et indispensables pour la localisation et la cartographie des risques en montagne sont la recherche de témoignages (archives, habitants...), la photo-interprétation et les observations directes sur le terrain. Pour des cas particuliers, il peut être justifié de compléter ces « fondamentaux » par d'autres approches (modélisations, expertises plus complexes...). Pour tous les types de phénomènes (les avalanches, les inondations et débordements torrentiels et presque tous les mouvements de terrain), aucun de ces « fondamentaux » ne peut être négligé même si leurs apports respectifs n'ont pas toujours la même importance dans le résultat final : par exemple, les photographies aériennes apportent énormément d'informations sur les avalanches, mais un peu moins sur les chutes de pierres.

Cet article rappelle quelques notions de base pour l'utilisation des photographies aériennes. Il détaille ensuite l'utilisation de ces photographies à partir de 2 exem-

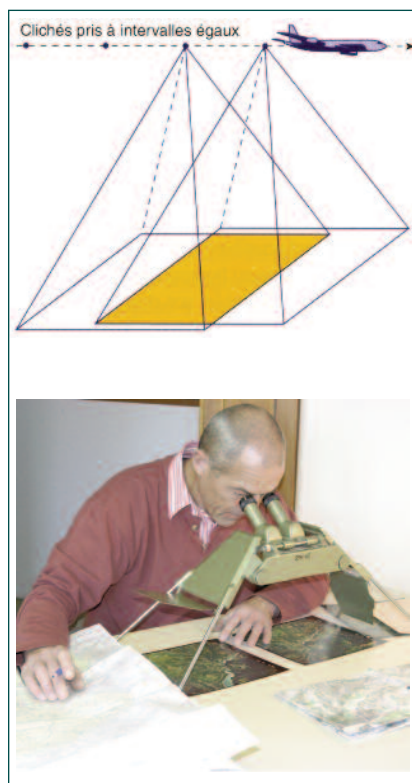


Fig. 1 : principes de réalisation de clichés stéréoscopiques et Visualisation « 3D » d'un couple de photographies aériennes, avec un stéréoscope à miroirs

ples : la cartographie des avalanches et celle des glissements de terrain. Il présente enfin une méthode plus récemment adoptée pour les expertises de falaises, reposant sur des prises de vues numériques et la visualisation « 3D » sur ordinateur.

La vision stéréoscopique : un objet, deux points de vue

Nous percevons le relief parce qu'un même objet est vu par chaque œil sous 2 angles légèrement différents. Le relief peut aussi être perçu via des photographies. Il faut d'abord que le même objet ait été photographié de 2 points de prise de vue légèrement décalés. Puis, il faut regarder simultanément (le plus souvent avec l'aide d'un stéréoscope) la photo de gauche avec l'œil gauche et la photo de droite avec l'œil droit (figure 1).

Dans le cas des services de Restauration des Terrains de Montagne (RTM), les photographies aériennes les plus couramment utilisées sont celles de l'IGN ou de l'IFN. Ce sont des photogra-

phies de la surface du sol prises verticalement depuis un avion. Pendant le vol, les photographies sont réalisées à intervalle régulier permettant un recouvrement d'environ 60 % entre 2 clichés. C'est sur cette surface de 60 % commune à 2 clichés successifs que le photo-interprète pourra, avec son stéréoscope, percevoir le relief.

Différents types de photographies

Ces photographies aériennes sont issues des missions régulières réalisées par l'IGN et l'IFN. Leurs caractéristiques (échelle, type d'émulsion) peuvent être différentes d'une mission à l'autre. Dans cette partie de l'article, nous n'évoquons que les photographies aériennes « analogiques », c'est-à-dire réalisées à partir d'un film photographique.

L'échelle

L'échelle dépend de l'altitude du vol et de la focale de l'appareil de prise de vue. Usuellement, les missions IGN ou IFN sont disponibles à des échelles du 1/30 000 au 1/15 000, avec des échelles intermédiaires (1/17 000, 1/20 000), 1/25 000. Ce sont des échelles approximatives n'autorisant pas des mesures de distance précises.

L'émulsion

Pour les prises de vue, on peut utiliser plusieurs « émulsions » correspondant à plusieurs types de films photographiques. Elles diffèrent par leur résolution, leur contraste et surtout leur sensibilité spectrale (enregistrement des rayonnements visibles et/ou ultraviolets et/ou infrarouges). Les émulsions utilisées ont évolué au cours du temps, avec l'amélioration des techniques photographiques.

Les émulsions **panchromatiques noir et blanc** sont les plus fréquentes parmi les missions anciennes. Elles enregistrent les rayonnements ultraviolets et visibles.

Les émulsions en « **vraies couleurs** » sont les plus proches de la vision humaine. Elles enregistrent seulement les rayonnements visibles et restituent les couleurs naturelles par superposition de trois couches colorées, respectivement dans le bleu, le vert et le rouge.

Les émulsions **infrarouges noir et blanc** enregistrent tous les rayonnements de l'ultraviolet au proche infrarouge, mais sont particulièrement sensibles à ces derniers et permettent en particulier de bien distinguer les zones humides. Les clichés résultants sont en noir et blanc

Enfin les émulsions **infrarouges couleurs** dites « fausses couleurs » sont constituées de trois couches sensibles à trois domaines différents du spectre lumineux : une couche sensible au proche infrarouge (restituée en rouge), une couche sensible au rouge (restituée en vert) et une couche sensible au vert (restituée en bleu). Ces photos sont particulièrement utilisées pour étudier l'activité chlorophyllienne et permettent, par exemple en zones forestières, de distinguer facilement les feuillus (rouge clair) et les résineux (rouge foncé, voire brun).

Cartographier les avalanches : importance de l'infrarouge

Depuis 1970, le CEMAGREF et l'IGN publient les Cartes de Localisation des Phénomènes d'Avalanches (CLPA, à l'échelle du 1/25 000). Ces cartes localisent l'ensemble des avalanches passées connues, cette connaissance des événements passés étant une base indispensable à la gestion du risque. Les CLPA sont des documents très normalisés, réalisés sous la directive du Ministère en charge des risques naturels. Avec le Cemagref, le RTM est l'un des opérateurs chargés de leur réalisation.

Un conseil

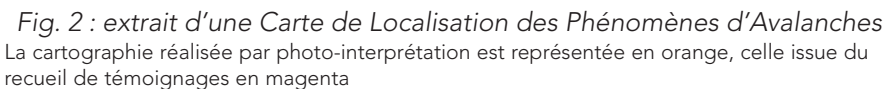
À chaque fois que cela est possible, utilisez plusieurs missions différentes (émulsions ou échelles différentes,...). Certaines missions sont particulièrement intéressantes : missions des décennies 70 ou 80 (les boisements, qui masquent beaucoup d'indices, y étaient moins importants qu'aujourd'hui), missions réalisées peu de temps après des événements marquants (grandes crues, avalanches...).

La photo-interprétation : une information à part entière

Deux méthodes indépendantes et complémentaires sont mises en œuvre : d'une part le recueil de témoignages, d'autre part une photo-interprétation de l'ensemble des clichés aériens disponibles en archives (IFN et IGN). Pour les cartes actuelles (depuis 2003), une enquête de terrain complète la photo-interprétation, ce qui n'était pas le cas pour les cartes de 1^{re} génération. Sur la carte (figure 2 page suivante), les délimitations en couleurs orange sont celles de la photo-interprétation et, en couleurs magenta, celles issues des témoignages. Il n'y a pas de synthèse ou de rapprochement entre les 2 approches, les délimitations sont simplement superposées sur les cartes.

Rechercher des traces sur les photos puis analyser la topographie

Il faut d'abord rechercher les traces laissées par les avalanches passées. Les traces les plus évidentes sont les trouées en forêt (selon la ligne de plus grande pente) : trouées récentes, zones clairsemées dans un mélezin, arbres plus jeunes ou différents du peuplement environnant (aulnes, bouleaux...) et correspondant aux recolonisations de trouées plus anciennes. Ces traces peuvent être vues sur différents types de photos, mais surtout sur des photos infrarouges fausses couleurs (figure 3 page suivante). Il est également possible de déceler des traces de dégâts



(arbres cassés ou renversés, bâtiments en ruines...) ou de dépôts (arbres ou branches, éboulis, blocs traînés, moraines nivales...).

Ces traces permettent surtout de caractériser le trajet (et parfois la zone d'arrêt) des avalanches. Pour les zones de départ (fréquemment situées au-dessus de la limite forestière), l'opérateur doit passer à une phase plus précise, nécessitant davantage d'expertise et dans laquelle la stéréoscopie s'avère essentielle. Il procède à un examen minutieux de la topographie et recherche divers indices géomorphologiques favorables au déclenchement des avalanches : pentes fortes (30 à 50°) avec une dénivelée suffisante et particulièrement avec un profil longitudinal convexe, terrain lisse (éboulis fin, dalles, glacier, herbe couchée...), présence de sources ou de végétation arbustive (rhododendron...).

Quant aux délimitations des zones d'arrêt, en l'absence fréquente de traces évidentes, le photo-interprète ne peut faire appel qu'à son expérience pour « arrêter » les avalanches à l'aval. L'enquête de terrain effectuée pour les cartes de 2^e génération peut être alors une aide précieuse en révélant des traces trop discrètes pour être vues sur les photos.

Valider et compléter sur le terrain

Sur les CLPA de 1^{re} génération, les délimitations faites par la seule photo-interprétation étaient publiées sans enquêtes de terrain. Sur les CLPA récentes, une enquête de terrain complète la photo-interprétation. Son but, outre le contrôle de la validité de la photo-interprétation, est la recherche d'indices supplémentaires manifestes que cette dernière n'aurait pas fait apparaître (tels que les branches cassées sur les côtés d'un couloir, les troncs brisés isolément, des dégâts sous couvert forestier, l'existence de microreliefs ou d'altérations très localisées du couvert végétal ou du sol...).

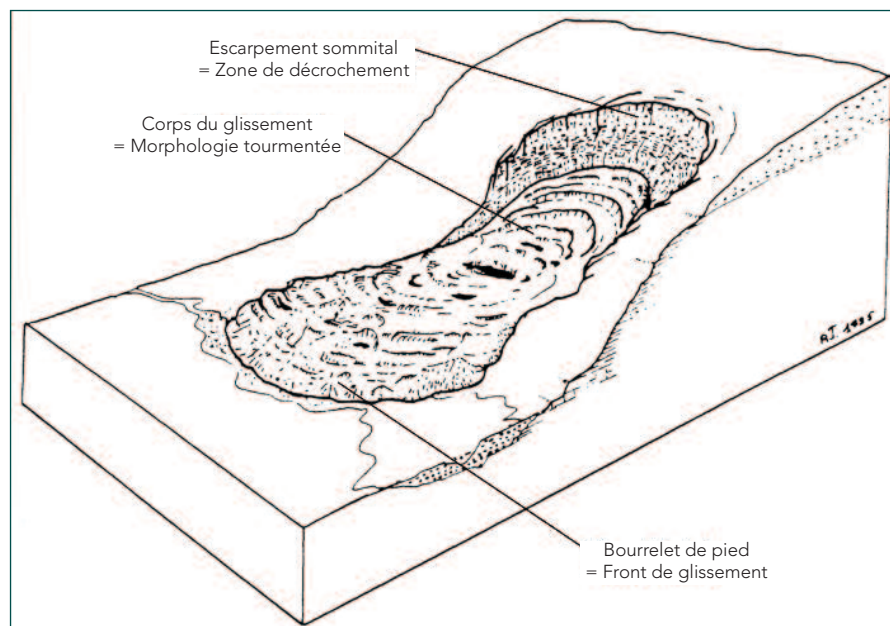


Fig. 4 : schéma type d'un glissement de terrain

Cartographier les glissements de terrain : combiner examen des détails et vision d'ensemble

Les mouvements de terrain sont un terme générique qui désigne une grande diversité de phénomènes naturels (glissements de terrain, chutes de blocs, écroulements de falaise, affaissements, retrait et gonflement des terrains argileux, coulées de boue, etc.). Les services RTM interviennent sur ces phénomènes à titre préventif, dans le cadre des plans communaux de prévention des risques ou de démarches plus globales (à la demande d'un département, par exemple), ou bien à titre curatif (diagnostic, travaux de correction). Nous n'évoquerons ici que les glissements de terrain, pour lesquels la photo-interprétation est particulièrement riche d'information. La morphologie usuelle d'un glissement de terrain est représentée sur la figure 4.

De la recherche d'indices à une interprétation d'ensemble

Les indices à rechercher sont d'abord : un escarpement sommital concave et très raide, un bourrelet

de pied convexe, une morphologie tourmentée tranchant avec la morphologie environnante plus calme, une végétation différente, des zones humides... Là encore, la stéréoscopie est une aide importante pour analyser le relief. Une phase plus experte d'interprétation permet de délimiter un glissement dans son ensemble et de « fermer les contours ». Même avec peu d'expérience, il est assez vite possible de déceler et de cartographier des glissements conformes au schéma type, en gardant bien à l'esprit les effets d'échelle : une telle morphologie peut aussi bien correspondre à un mouvement de quelques dizaines de m² (souvent qualifié de « coup de cuiller ») qu'à un mouvement affectant tout un versant de montagne (figure 5).

Mais une cartographie plus complète des glissements de terrain dans des zones complexes nécessite une grande expérience. Il faut savoir déceler et délimiter des zones où les indices sont plus ténus (fluages, glissements lents...). Il faut aussi savoir analyser les vastes zones en glissement en isolant et délimitant des zones homogènes (glissements actifs/glissements moins actifs).



Fig. 5 : ébauche de délimitation d'un glissement de terrain de grande ampleur, sur photo aérienne couleurs

Des allers retours indispensables entre terrain et photos aériennes

Les compléments et validations terrain sont indispensables pour une bonne cartographie des glissements. Le terrain permet de confirmer (ou non) les indices décelés sur les photos (voire d'en déceler de nouveaux). Par contre, le terrain ne permet généralement pas une vue d'ensemble des mouvements complexes. La synthèse des multiples indices et informations recueillies pour délimiter les contours finaux se fait ainsi le plus souvent grâce aux photos.

À la différence des cartes d'avalanches, il n'y a pas de dispositif standard de cartographie pour l'information sur les glissements de terrain à partir de la seule photo-interprétation. Sauf exception les validations de terrain sont incontournables pour ce genre d'événement.

Progresser en photo-interprétation

Pour chaque cartographie, il est recommandé de commencer par la photo-interprétation et de dessiner complètement une première carte avec ces seuls éléments (carte « depuis le bureau »). La phase de terrain vient ensuite pour compléments et validation. La comparaison entre la 1^{re} carte « depuis le bureau » et la carte finale est riche d'enseignements : erreurs d'interprétation sur les photos, ce qui n'a pas été décelé sur les photos alors que c'était possible, ce que le terrain apporte en propre et ne peut pas venir des photos...

En quelques cas traités ainsi, le photo-interprète progresse vite et ses cartes initiales « depuis le bureau » deviennent bien meilleures.

L'étude des falaises en vision stéréoscopique horizontale

En cartographie, la photo-interprétation se fait le plus souvent avec des couples de photographies de la surface du sol prises verticalement depuis un avion. Il est tout à fait possible d'adopter les mêmes principes et méthodologies pour obtenir une vision stéréoscopique de surfaces verticales, comme les falaises, avec des photos prises horizontalement.

L'hélicoptère est souvent le meilleur moyen pour faire de telles prises de vue : à l'altitude choisie, il se déplace sur un axe parallèle au plan général de la falaise et les prises de vue sont faites à intervalle régulier (pour obtenir un recouvrement d'au moins 60 % entre 2 photos successives). Dans des cas favorables, les prises de vue peuvent aussi se faire « à pied » depuis le versant d'en face.

Travailler en « tout numérique »

Contrairement aux cartes d'avalanches et à l'analyse des glissements de terrain qui reposent sur

l'utilisation des photographies réalisées en routine par l'IGN et l'IFN, l'étude des falaises nécessite le recours à des photographies réalisées spécifiquement. Aujourd'hui, la majorité des photographies se faisant avec des appareils numériques, il est toujours possible d'imprimer et d'étudier les couples de photos avec des stéréoscopes à miroir (attention à la qualité des tirages, recourir à de vrais tirages photo). Mais ces images numériques peuvent aussi être analysées directement sur ordinateur, grâce à des systèmes de vision stéréoscopique numériques. Il existe différents types d'outils de ce type, qui diffèrent par leurs fonctionnalités : de l'affichage stéréoscopique simple jusqu'aux calculs automatiques de reliefs, en passant par la réalisation de mesures topographiques en « 3D ».

Pour la visualisation en « 3D », le plus simple est d'utiliser un logiciel réalisant des montages anaglyphes. Le principe d'un anaglyphe est de « colorer » séparément chaque image du couple stéréoscopique : celle de gauche en rouge et celle de droite en cyan. L'observation simultanée de ces deux images avec des lunettes « 3D » colorées (verre rouge à gauche, cyan à droite) permet alors de superposer les deux vues : l'œil gauche ne voit ainsi que l'image de gauche, et l'œil droit l'image de droite. Plusieurs opérations sont nécessaires pour réaliser un anaglyphe à partir d'un couple stéréoscopique : calage géométrique des images, puis opérations de filtrage et de « colorisation ».

Les anaglyphes restituent bien les reliefs, mais altèrent sensiblement la restitution des teintes des images. Ils ne sont donc pas adaptés quand on doit réaliser une photo-interprétation fine avec, par exemple, l'analyse de la végétation.

Les services RTM utilisent le logiciel gratuit StéréoVue qui permet de réaliser l'ensemble de ces opérations (<http://ggrillot.free.fr/stereoovue/>). Il existe d'autres systèmes permettant une vision en relief (filtres polarisants sur les lunettes, logiciels spécialisés asservissant images et lunettes, écrans miroirs...). Le développement actuel des visualisations « 3D » (cinéma, télévision...) est basé sur ces différents systèmes.

Des expertises performantes

Lorsque les montages anaglyphes sont réalisés, l'expert géologue peut, directement sur l'écran, étudier longuement la falaise et ses discontinuités, avec des déplacements ou des zooms très aisés. C'est un complément très précieux (voire une alternative complète) aux autres moyens d'examen visuel des falaises (observations à la jumelle, déplacements sur cordes en falaise, vol stationnaire en hélicoptère).

Le montage présenté figure 6 (page suivante) illustre un cas réel où un 1^{er} examen a été conduit avec les méthodes traditionnelles (déplacements en falaise, sur cordes) ; il a permis d'identifier plusieurs masses à stabiliser. Lors d'un 2^e examen stéréoscopique sur photos, d'autres masses ont semblé également menaçantes. Un retour sur le terrain a permis de constater que 90 % des masses détectées par l'étude stéréoscopique devaient aussi être traitées.

Conclusion

Ces trois exemples d'applications, qui sont au cœur du métier des services RTM, illustrent l'apport essentiel de la télédétection par photographie et des visualisations en 3 dimensions. Technique déjà ancienne et éprouvée, la photographie aérienne permet de disposer actuellement de près de quarante ans d'archives (parfois plus), issues des missions IGN et IFN, sources d'informations essentielles sur l'his-



Fig. 6 : expertise d'une falaise par visualisation « 3D » d'un montage anaglyphe : système de visualisation et exemple de montage anaglyphe

Les masses menaçantes identifiées lors de la première analyse depuis le terrain sont cerclées en orange et les masses menaçantes identifiées lors de la deuxième phase d'analyse, par stéréoscopie, le sont en bleu. Le montage anaglyphe ne serait vraiment lisible qu'avec les lunettes colorées... qui ne sont pas fournies avec RDVT.

torique des phénomènes surveillés. Les évolutions techniques continues depuis l'invention de la photographie permettent actuellement de disposer de données numériques, directement analysables sur ordinateur. Loin d'être une source d'information dépassée, la télédétection par photographie se révèle ainsi tout à fait adaptée aux besoins du RTM et les visualisations « 3D » sont, pour les experts, une source d'informations essentielle et complémentaire des enquêtes de terrain et des recherches de témoignages ou de données historiques.

Philippe BOUVET

Chef de service
ONF, service RTM des Hautes Alpes

Raphaële CHARVET

Géologue
ONF, service RTM des Hautes Alpes

Bibliographie

Rhody B., 1965. Expériences de photo-interprétation et de cartographie à des fins forestières. *Revue Unasylva* n° 77

Borrel G., 1994. La carte de localisation probable des avalanches. *Revue Mappemonde* n°4/94, pp. 17-19

Ministère de l'Équipement des Transports et du Tourisme et Ministère de l'Environnement, 1996. Cartographie des zones inondables – Approche hydrogéomorphologique. 100 p.

LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), 1999. L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain. 128 p.

CEMAGREF, 2004. Guide d'utilisation de la CLPA. 7 p.

IFN (Inventaire Forestier National), 2005. Le paysage forestier vu du ciel. *Revue IF*, n° 10, 12 p.

DIREN PACA, 2007. L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens – Une méthode de détermination des zones inondables. 66 p.

Boureau J.-G., 2008. Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges - Application aux milieux forestiers et naturels. IFN, 268 p.

Comment les outils de la télédétection peuvent aider à la cartographie des habitats forestiers ? Mise au point d'une méthode sur le massif du Vercors

Le réseau Natura 2000 doit faire périodiquement l'objet d'évaluation nationale en ce qui concerne l'état de conservation des habitats (et des espèces). Au-delà des procédures de suivi mises en place pour chacun des sites du réseau, le contrôle des grands équilibres, la mise en évidence des tendances supposent une cartographie des habitats à une tout autre échelle, avec des exigences d'homogénéité, de reproductibilité... et de coût raisonnable. Avec un tel « cahier des charges », on pense forcément à la télédétection ; mais la démarche est complexe et n'en est encore qu'à la phase de recherche, comme en témoigne l'exemple présenté ici.

Cartographier la végétation est une tâche qui, en fonction des surfaces et des échelles de précision demandées, peut s'avérer difficile et nécessiter un lourd travail de terrain. Or les besoins sont de plus en plus importants ; en témoignent actuellement les nombreux travaux sur les habitats naturels, en particulier ceux mis en œuvre sur certains zonages de protection par les Conservatoires Botaniques Nationaux (CBN). C'est aussi une exigence de l'Union Européenne : dans le cadre de la directive européenne « Habitats, faune, flore » (Dir. 92/43/CEE du 21 mai 1992), les pays membres doivent communiquer tous les 6 ans, l'état de conservation des habitats d'intérêt communautaire, ce qui inclut de dresser leur inventaire et de donner leur répartition biogéographique.

Avant d'envisager des travaux cartographiques sur des échelles aussi vastes que celle du territoire national, il paraît essentiel d'évaluer l'in-

térêt des outils actuels de la télédétection. C'est dans cet objectif que le MEEDDEM a confié au Cemagref la réalisation d'un travail de recherche. Il s'agit de préciser les possibilités offertes par l'imagerie aérienne et satellitale et de proposer un cadre méthodologique pour préparer la cartographie des habitats naturels et semi-naturels sur la France entière et à l'échelle 1/50 000 (Olivier et al., 2010). Plusieurs équipes du Cemagref ont été impliquées et la répartition des tâches s'est faite en fonction des milieux étudiés (forêts, milieux ouverts de montagne, milieux méditerranéens, milieux humides). Les résultats présentés ici ne concernent que les travaux réalisés sur les milieux forestiers par le Cemagref de Grenoble, sur le site d'étude du Vercors. L'article ne vise pas à faire une description détaillée de l'ensemble des outils et des données évalués et mis en œuvre. Il s'agit surtout d'expliquer les applications de ces recherches et de montrer, au travers de la description d'une mé-

thode expérimentale qui a été mise au point dans le cadre de ce travail, ce que peut apporter la télédétection pour la cartographie des habitats naturels.

Quelles données, pour quelle utilisation ?

L'objectif était dans un premier temps de rechercher les données spatialisées intéressantes pour notre étude, c'est-à-dire adaptées à notre échelle cartographique et disponibles aussi bien sur la zone d'étude que sur le reste du territoire national (« données génériques »). Il s'agissait aussi de rassembler toutes les connaissances utiles à la caractérisation écologique des habitats forestiers potentiellement présents sur le site du Vercors, connaissances étayées à la fois par des éléments bibliographiques de synthèse et par les données géographiques locales telles que les cartographies d'habitats préexistantes et les relevés floristiques (en l'occurrence ceux du

CBN Alpin). Nous nous sommes appuyés sur l'utilisation de deux types de données (tableau 1) : 1) d'une part les images de télédétection (imagerie satellitale, photographies aériennes) qui permettent via certains traitements numériques d'acquérir des informations sur le couvert végétal, 2) d'autre part les données dites « environnementales » qui contiennent déjà des informations plus ou moins précises sur l'environnement (relief, météorologie, végétation).

Segmentation et classifications de l'image

L'analyse de l'image SPOT (© CNES [2009], distribution Spot Image SA) a été réalisée avec le logiciel *Définiens®* qui permet de combiner différents modes de traitement de l'image et de pouvoir intégrer des données environnementales (d'autres outils logiciels proposent aussi ces fonctionnalités). On distingue deux principales étapes de traitement de l'image : une phase de segmentation puis une phase de classifications hiérarchiques des objets issus de la segmentation.

La segmentation (figure 1b) consiste à regrouper des pixels présentant des caractéristiques spectrales similaires. Les éléments ainsi obtenus sont appelés « segments » ou « objets ». Un paramétrage préalable du « facteur d'échelle » détermine la taille des objets à délimiter. Le processus de segmentation intègre également les « préférences » spécifiées par l'opérateur sur des critères de radiométrie et/ou de forme (compacité) des objets.

Pour les classifications, nous avons choisi de travailler avec la nomenclature CORINE Biotope (CB), sachant que les techniques et méthodes utilisées peuvent tout à fait s'adapter aux autres nomenclatures (Eur 27 [Natura2000], EUNIS, Alliance...). Une première classification dite « supervisée » (en utilisant des échantillons d'objet dont on

Base de données	Données brutes	Données calculées	Utilisation
Données de télédétection			
Imagerie SPOT	Scène SPOT5 © CNES (2010) du 15-07-2005 (résolution 10 m), 4 bandes spectrales (vert, rouge, proche IR, moyen IR)	Indice de végétation normalisé (NDVI)	cartographie des grands types forestiers (feuillu, résineux, mixte) après segmentation de l'image et classification niveau 1
BD-Ortho IGN	- Couverture 2006 infrarouge couleur (Drôme), - Couverture 2003 couleurs naturelles (Isère).		photo-interprétation pour données de validation
Données « environnementales »			
BD-Alti (IGN)	Modèle Numérique de Terrain (résolution 50 m)	Pentes	définition des fonctions d'appartenance
MétéoFrance (méthode AURELHY)	cartographie des normales mensuelles (précipitations, températures), au pas de 1 km	ETP, bilan hydrique, Indice de Martone	définition des fonctions d'appartenance

Tab. 1 : données génériques et utilisation pour la méthode

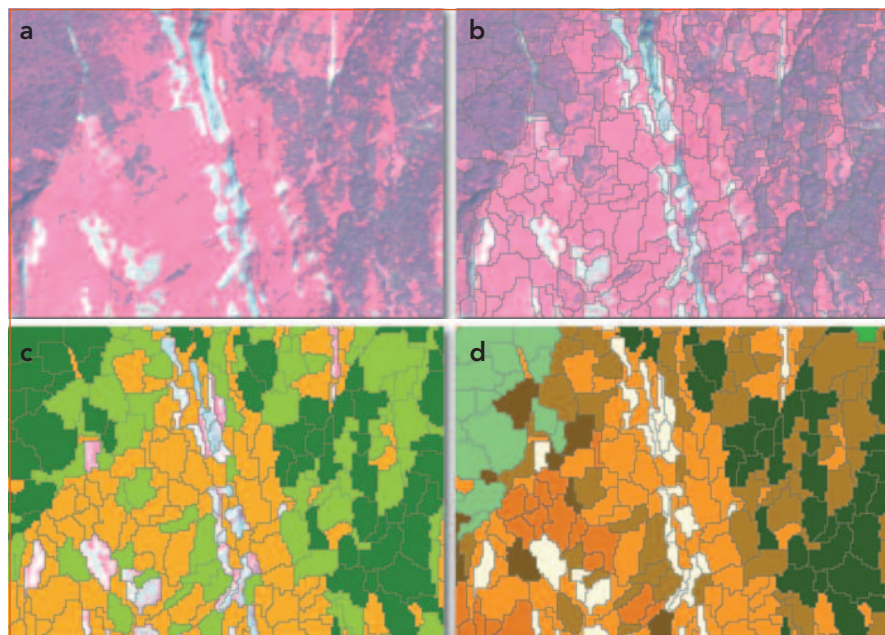


Fig. 1 : segmentation et classifications de l'image

a) image SPOT5 (© CNES [2009]); b) image segmentée, c) classification de niveau 1 : CB 41, 42, 43 respectivement en vert foncé, orange et vert clair ; en transparence, les milieux non forestiers (rocher nu...); d) classification de niveau 2 (exemple CB 41.1 : Hêtraies, 41.4 : Forêts mixtes de pentes et ravins, 41.7 : Chênaies thermophiles et supra-méditerranéennes...)

connaît la classe) est construite uniquement sur les valeurs spectrales des objets (figure 1c) et permet la distinction en trois grands types de peuplements : feuillus, résineux ou mixtes, correspondant respectivement aux classes CB 41, 42 et 43. Une deuxième classification (figure 1d) — dont le procédé est décrit précisément dans les paragraphes qui suivent — se base sur les variables environnementales ; elle vise un niveau hiérarchique plus fin de type 41.1 (« Forêts dominées par *Fagus sylvatica* ») ou 41.11 (« Hêtraies acidiphiles médio-européennes à *Luzule blanchâtre* du *Luzulo-Fagenion* »).

La classification de niveau 2 : notions de fonction d'appartenance et de logique floue

La deuxième classification intègre les variables environnementales précédemment collectées et disponibles sur l'ensemble du Vercors, à savoir : l'altitude, la pente, la température moyenne annuelle, les

précipitations moyennes annuelles, et le bilan hydrique (différence entre les précipitations moyennes annuelles et l'évapotranspiration annuelle selon Turc ; voir exemple en figure 2). Ce choix répond à diverses contraintes : disponibilité des données sur l'ensemble du territoire, adaptation à notre échelle d'étude, format spatialisé compatible avec les traitements qui seront décrits par la suite (notamment la nécessité de travailler sur des variables quantitatives). Cela nous a obligés à mettre de côté — au moins dans cette première phase exploratoire — d'autres paramètres qui auraient un intérêt évident, comme ceux portant sur la géologie, le sol, l'exposition. Le principe est de définir une connaissance « experte » des habitats forestiers sur la base de différentes sources d'informations, qu'elles aient une portée générale ou plus spécifique à notre zone d'étude : 1) le travail de typologie et de caractérisation des habitats forestiers de Gégout *et al.* (2008), 2) l'expertise d'un phytosociologue du CBN Alpin spécialiste

des milieux montagnards et 3) les relevés floristiques géoréférencés et la cartographie des habitats naturels du Vercors récemment construite par le CBN Alpin.

Ce travail a permis à la fois de lister l'ensemble des habitats forestiers susceptibles d'être observés dans le Vercors et d'apporter des éléments chiffrés sur les conditions écologiques qui sous-tendent à leur répartition spatiale. Grâce aux relevés floristiques et à la cartographie du CBN Alpin, nous disposons de données précises sur la localisation de ces habitats. Notre travail a consisté à extraire, sur une série de points appartenant à ces localisations, les valeurs des variables environnementales correspondantes. Les informations sont synthétisées pour chacune des variables et pour chaque habitat sous forme de fonction d'appartenance (voir exemple figure 3). C'est à partir de ce « système expert » que se base ensuite l'automatisation de l'interprétation des données (voir page suivante le synoptique de la méthode, figure 4).

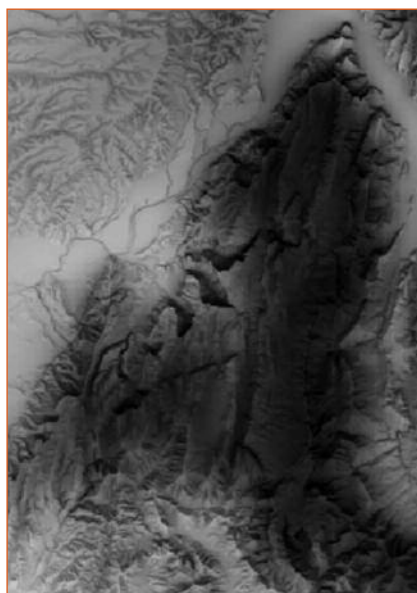


Fig. 2 : exemple de présentation de données « environnementales » (ici, le bilan hydrique annuel) sur le Vercors

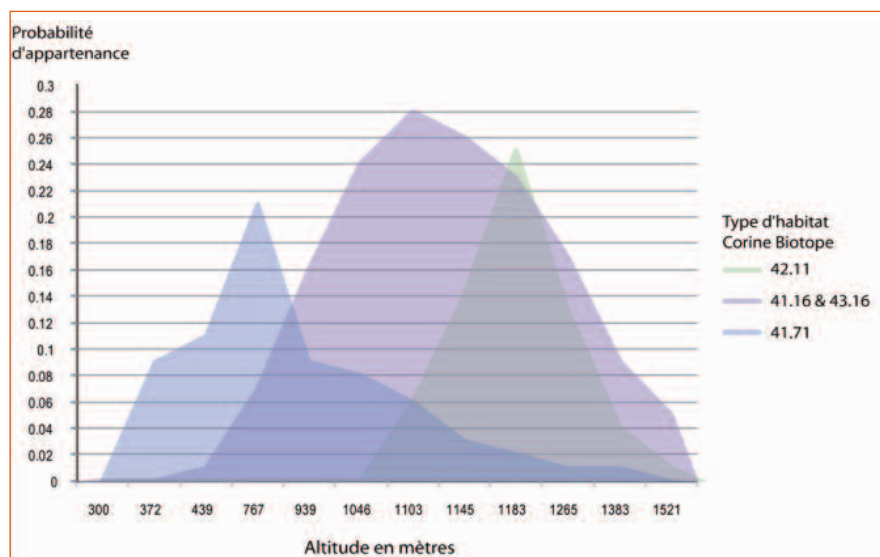


Fig. 3 : exemple de fonctions d'appartenance sur trois types d'habitat pour la variable altitude

Les peuplements correspondant à l'habitat CB 42.11 se répartissent entre 1 050 et 1 600 m d'altitude avec une fréquence plus élevée vers 1 200 m. On note qu'entre 1050 et 1500 m, les trois habitats peuvent être observés, mais avec des probabilités d'occurrence variable dans cet intervalle. Ce sont ces informations qui sont prises en compte dans le logiciel. L'exemple porte ici sur seulement trois habitats et le paramètre altitude. Sur le niveau 1^{er} décimale de la nomenclature CB (41.1...), le modèle général concerne 9 habitats et 5 paramètres.

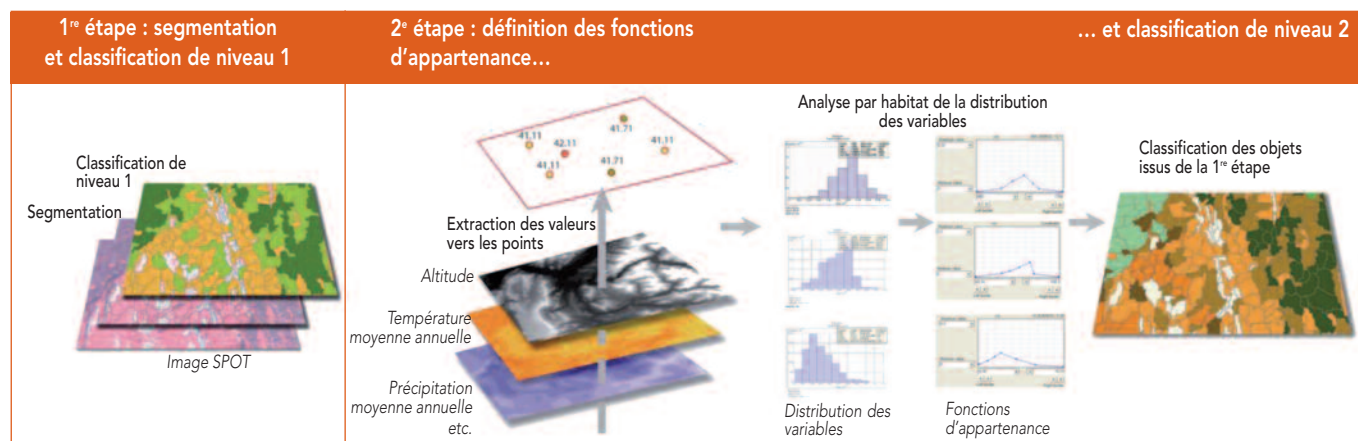


Fig. 4 : schéma synoptique de la méthode

Notre démarche d'analyse repose alors sur un mode de raisonnement particulier, spécifique à l'utilisation de données imprécises ou incomplètes, communément appelé « logique floue » (Ducrot D., 2005). Le fait par exemple qu'il n'est pas possible de prédire qu'à telle altitude on trouvera tel habitat et aucun autre, illustre bien le manque de précision de nos données, au sens de cette analyse. La réalité du terrain nous impose une interprétation souvent compliquée, par exemple : *les peuplements purs de Sapin pectiné sont observés de façon non exclusive entre 1 000 et 1 500 mètres, mais avec — au sein de cet intervalle — une probabilité de présence variable (généralement plus rares sur les extrêmes)*. Ainsi, nos informations ne permettent pas d'aboutir à des valeurs d'interprétation de type binaire (« vrai » ou « faux »), mais plutôt à des degrés d'appartenance (qui varient entre 0 et 1). Plusieurs variables peuvent se combiner (exemple : *les peuplements purs de Sapin pectiné sont observés entre 1000 et 1500 mètres, mais dans cette amplitude altitudinale, si les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à 1 200 millimètres on trouvera plus probablement des hêtraies*). Nous avons implémenté ces informations dans *Definiens®*. Le logiciel permet de « situer » les

différents objets – dont on connaît les valeurs moyennes pour chacune des variables environnementales – par rapport aux fonctions d'appartenance. Les résultats sont donnés pour chaque objet sous forme de probabilité d'appartenance à chacun des habitats.

Précision des résultats

Pour le premier niveau de classification (forêt feuillue, résineuse ou mixte), nous avons procédé à une validation par comparaison entre la classification et une photo-interprétation de l'image sur 348 points sélectionnés aléatoirement. Les résultats obtenus sont tout à fait satisfaisants : pour 86 % des points, l'identification est correcte.

Pour la classification de niveau 2, ces premiers résultats sont basés sur la probabilité d'appartenance la plus élevée, puis ils sont comparés avec une autre série de points de validation (570 points issus d'un second échantillon de relevés, provenant de la cartographie du CBN Alpin). La précision globale s'élève à 51 %. En précision par type, sur les neuf types, 3 sont à plus de 65 % et 3 à moins de 30 %, ce qui est plutôt encourageant dans cette étape de la méthode. Pour aller plus loin dans l'analyse nous pourrions tenir compte de la 2^e plus forte probabilité d'apparte-

nance, éventuellement la 3^e, notamment pour les types les moins bien classés. On pourrait ainsi admettre que dans certaines situations notre prédiction ne permet réellement pas de dissocier deux, voire trois types d'habitat. Il pourrait être intéressant d'accepter une marge d'erreur et de proposer un choix d'habitats potentiellement présents. Rappelons que l'objectif final est d'apporter une aide à la réalisation d'une cartographie, et qu'une validation sera de toute façon impérative, par photo-interprétation ou, si nécessaire, contrôle de terrain.

Un travail exploratoire à approfondir

Ces recherches correspondent à un travail exploratoire qui nous a conduits à faire une sélection parmi les différentes données et techniques d'analyse existant actuellement pour proposer une méthode de télédétection des habitats forestiers qui se situe encore à un stade expérimental. En l'état, son principal intérêt est de permettre de combiner la pratique de la géomatique et l'expertise en phytosociologie : la géomatique s'appuie sur la télédétection (traitement du signal) et optimise les prédictions en intégrant l'ensemble des informations disponibles, notamment celles issues du travail

des phytosociologues ; ces derniers restent maîtres du choix et de la définition des variables environnementales pertinentes, et leur expertise est impérative pour valider et finaliser la cartographie. Nous avons volontairement développé dans cet article les techniques et les outils de la télédétection, mais la validité de la méthode est subordonnée à la qualité du travail préalable d'analyse et à la contribution indispensable des spécialistes des milieux étudiés.

À ce stade, les résultats sont à la fois encourageants et encore insuffisants. L'intérêt de la télédétection est confirmé, mais sa mise en œuvre pour une cartographie à l'échelle nationale nécessite une phase préalable d'amélioration et de validation. Il reste aussi à étudier la faisabilité à l'échelle du territoire national et évaluer les moyens financiers et humains nécessaires à un déploiement effectif.

Pour améliorer la précision des résultats, il conviendra de rechercher et intégrer d'autres données environnementales, notamment concernant le sol. On peut espérer obtenir des informations sur le pH par interpolation des relevés floristiques ponctuels du CBN Alpin en s'appuyant sur les valeurs indicatrices des plantes issues des travaux du LERFoB (Gégout et al, 2008) ; de même pour l'humidité du sol à partir de la base de données ECOCLIMAP :

(<http://www.cnrm.meteo.fr>).

D'autres informations géographiques n'ont pas encore été prises en compte et auront très

certainement une utilité : les documents d'aménagement spatialisés dans le cas des forêts gérées par l'ONF, et la cartographie forestière de l'IFN. Il faut également tester la méthode dans des contextes forestiers différents de celui du Vercors, qui se caractérise par une grande étendue et une forte variabilité des facteurs environnementaux (altitude, climat) : par exemple dans des situations plus homogènes en termes de relief et de climat, et notamment dans le cas de massifs plus petits en situation de plaine. Il conviendra aussi de rassembler des données de validation indépendantes, différentes de celles utilisées pour caractériser les habitats.

N'oublions pas enfin l'évolution de la qualité des données de télédétection : l'avenir est à la très haute définition (LIDAR, MNT et images satellites à des résolutions inférieures à 10 mètres), et notamment pour les données génériques. Ces évolutions laissent envisager à court ou moyen terme de meilleurs résultats en termes de précision des prédictions et de niveau d'échelle.

Vincent BRETON

Julien RENAUD

Sandra LUQUE

Cemagref Grenoble

prenom.nom@cemagref.fr

Les auteurs tiennent à remercier le CBN Alpin, et notamment J.-C. Villaret, pour son aide précieuse dans le travail de définition et de description des habitats étudiés.

Bibliographie

Ducrot D., 2005. Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources. Extraction de caractéristiques du paysage. Mémoire de recherches (HDR). 210 p.

Gégout J.-C., Rameau J.-C., Renaux B., Jabiol B., Bar M., Marage D., 2008. Les habitats forestiers de la France tempérée. Typologie et caractérisation. AgroParisTech-ENGREF, Nancy. 720 pages, 6 annexes. Version provisoire nov. 2008

Olivier J., Hendoux F., Gaudillat V. Deshayes M., (coord.) 2010. Cadre méthodologique pour une cartographie nationale des végétations naturelles et semi-naturelles terrestres en France (2010-2018, et au delà). Paris : FCBN, MNHN-SPN, Cemagref, MEEDDM, 207 p.

Est-il pertinent d'utiliser l'Indice de Biodiversité Potentielle dans la gestion courante des forêts publiques ?

En 2009, deux ingénieurs du Centre national professionnel de la propriété forestière ont publié « une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers » : l'Indice de Biodiversité Potentielle. L'outil séduit beaucoup de nos partenaires dont certains (communes forestières, parcs nationaux ou régionaux, associations naturalistes) s'étonnent du peu d'empressement de l'ONF à l'adopter. C'est que, si pratique et sérieux soit-il, l'IBP convient mal au suivi de nos engagements pour la biodiversité.

L'indice de biodiversité potentielle (IBP) est un outil développé par Laurent Larrieu (ingénieur CRPF Midi-Pyrénées) et Pierre GONIN (IDF, Toulouse). La présentation de cet indice a reçu un accueil très favorable auprès des instances de la forêt privée et de nombreux acteurs de l'environnement (parcs nationaux, parcs naturels régionaux, associations de protection de la nature, chargés de mission en DREAL...). Tous y voient en effet la possibilité de disposer d'un outil simple à mettre en œuvre, ne nécessitant pas de connaissance particulière sur les différents groupes taxonomiques et dont une représentation graphique permet une synthèse illustrée de la complexité de la biodiversité taxonomique.

Cet indice est parfois compris comme une nouvelle variable permettant de comparer les niveaux de biodiversité entre les peuplements et au cours du temps. Ainsi, le gestionnaire pourrait identifier les facteurs sur lesquels intervenir en priorité pour améliorer efficacement le niveau de biodiversité.

L'ONF ne s'est pas prononcé jusqu'à présent sur l'opportunité d'utiliser l'IBP dans le cadre de la gestion courante des forêts relevant du régime forestier, les avantages et les lacunes de cet outil devant être préalablement examinés. L'objectif de cet arti-

cle est d'évaluer la pertinence de l'IBP pour le suivi des objectifs « biodiversité » de l'ONF.

Analyse critique de l'IBP comme indicateur de biodiversité forestière

Avant de discuter cet indice, rappelons que la biodiversité forestière s'envisage couramment selon trois composantes :

- **composition** (paysages, habitats, communautés, espèces, génotypes) ;
- **structure** (types de peuplement, taille des unités paysagères, fragmentation, connectivité des habitats) ;
- **fonctionnement** (cycles biogéochimiques, anthropisation).

Il est possible d'obtenir des estimations de composition et de structure via des mesures assez simples (quoique parfois coûteuses, auquel cas elles nécessitent la définition et l'utilisation d'indicateurs indirects), et l'appréciation du fonctionnement de l'écosystème est souvent dérivée des paramètres de structure et de composition.

Constitution de l'IBP

La notation IBP repose sur l'évaluation de 10 variables, chacune donnant une note (0, 2 ou 5) sur un aspect de la zone considérée. La valeur IBP correspond à la somme de ces

10 notes. Ainsi, il est très simple de détailler la contribution de chaque facteur pour identifier les points forts et/ou faibles, et donc affiner les interprétations. L'IBP est donc par construction un indicateur dit « composite » de la biodiversité.

À noter que, malgré une demande formulée par les gestionnaires – pressés par les politiques – dans le courant des années 90, les indicateurs composites comme l'IBP n'ont pas été soutenus par les scientifiques, qui préconisaient plutôt l'utilisation d'un faisceau d'indicateurs, chacun ciblant un compartiment ou une caractéristique de la biodiversité.

Parmi les variables retenues pour la construction de l'IBP,

- deux sont strictement des variables de composition : ancienneté de l'état boisé - susceptible de favoriser la richesse et impacter la composition de la flore - et richesse en essences ;
- huit font référence à la structure : structure verticale de la végétation, gros bois, bois mort, arbres porteurs de micro-habitats, et mosaïque de milieux.

Des paramètres fonctionnels peuvent être dérivés des variables de bois mort (espèces saproxyliques) ou de milieux ouverts (insectes pollinisateurs) par exemple.

Dans sa construction et par les variables prises en compte, l'IBP se rapproche des standards de référence des indices composites de biodiversité.

Notons le nombre important de variables de structure, et notamment celles liées aux vieux bois et bois morts que les auteurs justifient par l'importance des cortèges associés, tant en nombre d'espèces que pour leur rôle fonctionnel. En outre le principal effet négatif de la sylviculture sur la biodiversité est de tronquer les phases de sénescence, habitat pour de nombreuses espèces (d'où l'engagement de l'ONF dans la mise en place d'une trame de vieux bois dans le cadre de la gestion courante).

Objectifs de l'IBP

Un indice de biodiversité n'a pas de validité intrinsèque : les nombreux indices qu'on trouve dans la littérature se proposent de donner une mesure de la biodiversité forestière **en référence à des objectifs divers**.

Les auteurs de l'IBP indiquent que « cet indice permet d'identifier les peuplements les plus intacts sur le plan écologique ». Il est donc clair qu'il vise principalement à identifier dans quelle mesure le peuplement évalué présente une similarité avec ce qu'il serait en l'absence d'actions sylvicoles au sens large (coupes, plantation, etc.). La valeur maximale de l'IBP correspond donc à des conditions de peuplement semblables à celles qu'on observe dans les forêts laissées en libre évolution. Les variations de l'IBP par rapport à ce maximum indiquent que le peuplement est de moins en moins semblable à celui d'une forêt en libre évolution.

En cela, cet indice se révèle être essentiellement **un estimateur du degré de naturalité du peuplement**.

Comparaison avec les engagements de l'ONF en faveur de la biodiversité

En 2009, l'instruction « biodiversité » de l'ONF¹ précise les pratiques à mettre en œuvre dans la gestion courante des forêts publiques en vue de la conservation de la biodiversité pour répondre à quatre objectifs : (i) garantir le bon fonctionnement des écosystèmes sur le long terme, (ii) connaître et comprendre la diversité du vivant, (iii) préserver des ressources potentiellement utiles pour l'humanité et (iv) respecter un patrimoine que nous nous devons de léguer aux générations futures dans le meilleur état possible.

Ces pratiques ont un spectre d'action particulièrement large et nous proposons ci-après une analyse de la correspondance entre les engagements de l'ONF et les éléments pris en compte par l'IBP. L'idée est de voir si l'IBP peut être utilisé comme un outil d'évaluation de la tenue de ces engagements.

Les variables de l'IBP rejoignent certains des engagements de l'ONF

Nous nous intéressons ici aux sept facteurs liés à la gestion des peuplements, les trois autres (continuité temporelle de l'état boisé, diversité des habitats aquatiques et des milieux rocheux) pouvant être considérées comme des données invariantes (figure 1). Pour chaque facteur, nous présenterons d'abord l'hypothèse écologique liant l'indicateur relevé à un aspect de la biodiversité, puis la valeur cible (celle qui permet d'obtenir la note maximale). Chaque facteur est alors mis en regard des engagements de l'ONF d'un point de vue qualitatif (ce facteur apporte-t-il une indication sur l'un des engagements ?), et quantitatif (la valeur cible est-elle cohérente avec les engagements ONF ?).

Facteur A : richesse en essences forestières autochtones

Hypothèse : la biodiversité aug-

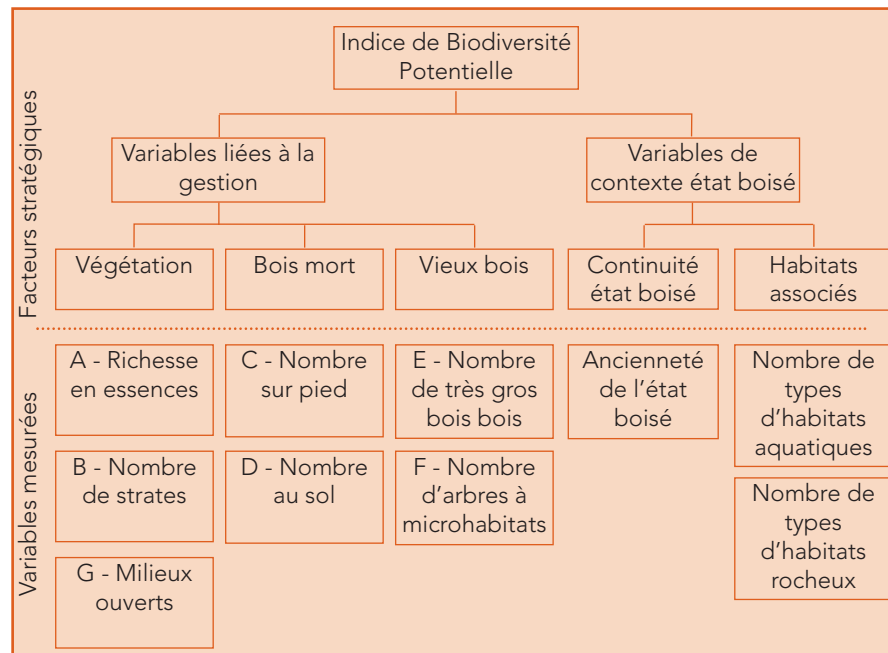


Fig. 1 : structuration de l'Indice de Biodiversité Potentielle (adapté d'après Larrieu et Gonin, L'indice de biodiversité potentielle (IBP) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. 2008, Revue Forestière Française)

¹ Instruction du 29 octobre 2009 relative à la conservation de la biodiversité dans la gestion courante des forêts publiques (INS-09-T-71)

² Barbier et al., (2009) Improving biodiversity indicators of sustainable forest management : tree genus abundance rather than tree genus richness and dominance for understory vegetation in French lowland oak hornbeam forests. Forest Ecology and Management.

³ La richesse correspond à un comptage du nombre de genres présents sur une zone donnée, l'abondance relative est une valeur dérivée des ratios de surface terrière par essence.

mente avec le nombre d'essences autochtones (basé sur les genres, ce qui est tout à fait cohérent avec les travaux publiés par le Cemagref², bien que ces derniers recommandent d'utiliser l'abondance relative des genres plutôt que leur nombre³). Valeur cible : 5 genres autochtones différents (3 à l'étage subalpin).

Les engagements de l'ONF sur la diversité des peuplements ne portent pas simplement sur un nombre d'essences mais sur la qualité de ces essences : diversification des essences d'arbres dominants en accord avec les potentialités stationnelles, intégration de l'enjeu changement climatique, travail sur les essences compagnes (objectif fixé : 20-30 % du couvert en essences secondaires en futaie régulière). L'IBP ne cible ici que les essences autochtones alors que le recours maîtrisé à des essences exotiques acclimatées (ex : cèdre) est aujourd'hui une piste sérieuse pour l'adaptation aux changements climatiques ; par ailleurs l'aspect strictement numérique ne prend pas en compte les différents rôles que peuvent jouer les essences pour les différentes composantes de la biodiversité (taxonomie, fonctionnement des réseaux trophiques, etc.).

⇒ Pour ces deux raisons, le facteur A est trop réducteur par rapport aux objectifs de l'ONF.

Facteur B : nombre de strates présentes

Hypothèse : la stratification verticale du peuplement favorise la biodiversité (particulièrement l'avifaune et les lépidoptères nocturnes).

Valeur cible : présence des 4 strates de végétation, avec un minimum de 10 % de recouvrement pour chaque strate.

La stratification verticale au sein des habitats forestiers ne fait pas l'objet de recommandation spécifique par l'ONF, dont les engagements portent de manière plus générale sur la diversification du sous-étage.

D'après les études scientifiques publiées, ce facteur IBP apparaît comme un bon indicateur indirect de la diversité pour certains taxons animaux.

⇒ Le facteur B peut tout à fait servir à évaluer les mesures en faveur de la diversification du sous-étage.

Facteurs C et D : bois mort de grosse circonférence, respectivement sur pied (C) et au sol (D)

Hypothèses : le bois mort abrite des cortèges d'espèces qui lui sont propres, la diversité de ces cortèges augmente avec la quantité et les types de bois mort présents (d'où la distinction entre les bois morts sur pied et ceux au sol).

Valeur cible : bois mort sur pied : au moins 3 pieds/ha de hauteur minimum 1,5 m et diamètre minimum 40 cm (30 cm si station peu fertile) ; bois mort au sol : 3 troncs/ha (mêmes critères de taille) l'absence de petits bois étant limitante (max 2 si absents).

Au sujet des arbres morts sur pied, l'ONF s'est fixé pour objectif la conservation d'un arbre mort ou sénéscent par ha, de 35 cm de diamètre minimum. Cette proportion est estimée comme moyenne par le facteur C, qui assigne un objectif quantitativement plus ambitieux. L'évaluation est réaliste dans la mesure où les objectifs fixés par l'ONF sont bien donnés en tant que valeurs minimales.

⇒ Le facteur C est donc pertinent pour l'ONF.

En matière de bois mort au sol, l'ONF ne fixe pas d'objectif numérique, mais un engagement sur la diversité des types de bois mort au sol à conserver. Les récentes recherches ont en effet montré que la biodiversité attachée au bois mort était bien plus liée à la diversité des types de bois mort au sol (diamètres, essences, décomposition) qu'à sa quantité.

En ciblant les gros bois morts, avec une clause restrictive d'absence de petits bois, l'IBP propose la prise en compte de paramètres complexes à travers deux critères simples.

⇒ Le facteur D est un peu restrictif par rapport à nos engagements.

Facteurs E et F : très gros bois vivants (E) et arbres porteurs de microhabitats (F)

Hypothèses : Les gros bois vivants et arbres porteurs de microhabitats, caractéristiques des peuplements âgés, offrent des habitats très diversifiés et des conditions écologiquement stables. De nombreuses espèces sont strictement dépendantes de telles conditions (insectes, oiseaux, etc.). C'est dans ces milieux que l'on retrouve l'essentiel des espèces strictement liées aux arbres.

Valeur cible : (E) au moins 5 arbres/ha, d'un diamètre minimum de 70 cm (sauf stations peu fertiles où le diamètre minimum est abaissé à 45 cm) ; (F) au moins 6 arbres/ha présentant au moins un type de microhabitat : cavité, fente ou décollement d'écorce, nécrose, large plage sans écorce, sporophore, grosse branche brisée ou morte, liane.

L'ONF associe gros bois et arbres porteurs de microhabitats dans un même objectif, fixé à deux arbres/ha. Cet objectif vient en complément de celui évoqué précédemment d'un arbre mort ou sénéscent par ha.

⇒ Comme le facteur C, les facteurs E et F sont plus exigeants sur le plan quantitatif que la recommandation minimale de l'ONF, nettement moins stricte et plus souple.

Facteur G : milieux ouverts

Hypothèse : les milieux ouverts accueillent un grand nombre d'espèces végétales et contribuent à la diversification des habitats au sein des peuplements forestiers dont dépendent de nombreuses espèces animales.

Valeur cible IBP : une proportion intermédiaire de milieux ouverts dans le peuplement, entre 1 et 5 % de la surface (prise en compte du linéaire de lisières), soit 3 à 4 zones pour 10 ha.

L'instruction de l'ONF ne donne pas de norme quantitative pour les milieux ouverts intraforestiers et les lisières, elle préconise de maintenir l'existant, de laisser évoluer librement la végétation des trouées en futaie régulière.

⇒ Ce facteur IBP propose donc une évaluation quantitative raisonnée d'un paramètre visé par l'instruction.

En résumé

Les 7 facteurs liés à la gestion forestière proposés par l'IBP traduisent donc, de manière plus ou moins fidèle, des concepts visés par l'instruction relative à la conservation de la biodiversité dans la gestion courante. Les objectifs minima de l'ONF correspondent à des notes moyennes dans la référence IBP. Les maximums de l'IBP sont basés sur un savoir empirique ou scientifique ; ainsi, certains des indicateurs permettraient d'identifier à la fois les efforts supérieurs mais aussi les lacunes par rapport à nos engagements.

L'instruction « biodiversité » de l'ONF va bien au-delà des variables de l'IBP

L'instruction ONF envisage une stratégie de restauration des stades tronqués des cycles sylvigénétiques à large échelle à travers des îlots de vieux bois et la mise en place de trames de vieux bois et d'arbres à haute valeur biologique. Pour les îlots, la cible n'est pas le nombre d'arbres, mais un pourcentage de surface à l'échelle d'un massif forestier, avec une répartition cohérente et fonctionnelle à l'échelle des territoires. L'IBP, évalué à l'échelle d'un peuplement forestier (quelques ha maximum), ne prend donc pas en compte les engagements de cohérence spatiale à grande échelle pris par l'ONF dans une logique de trame. De même, si l'IBP accorde une grande importance aux gros bois et bois mort, il ne prend pas explicitement en compte les stades pionniers également considérés par l'ONF comme un élément important de la préservation de la biodiversité forestière.

L'IBP envisage la biodiversité à travers les habitats des espèces (angle autécologique), or les interactions entre les espèces (synécologie) jouent également un rôle essentiel. En particulier, les engagements de l'ONF portent sur le maintien ou le rétablissement d'un **équilibre**

grands ongulés-flore compatible avec le maintien, le renouvellement et la diversité des écosystèmes forestiers ». Or aucun facteur IBP ne peut être interprété comme un indicateur de l'équilibre faune-flore. Les espèces exotiques envahissantes peuvent aussi être un enjeu majeur pour les espèces forestières natives, or l'IBP se limite à exclure du dénombrement des essences présentes celles qui ne sont pas autochtones (et qui ne sont pas forcément les plus menaçantes pour la biodiversité). Aucune variable ne traduit la contrainte que certaines exotiques envahissantes peuvent exercer sur la régénération des peuplements ou la biodiversité en général (ex : Cerisier noir - *Prunus serotina*, Renouée du Japon - *Fallopia japonica*).

Enfin, la **préservation des sols** est aussi un des engagements phares de la politique de conservation de la biodiversité de l'ONF. Les sols forestiers étant le support des peuplements, base du fonctionnement des écosystèmes, la prise en compte d'indications sur la gestion des sols est une absolue nécessité dans le cadre d'un indicateur global de biodiversité ; l'IBP ne propose rien de la sorte.

Pertinence de l'IBP comme outil de suivi de la biodiversité

L'IBP aborde la biodiversité par une évaluation du potentiel écologique des milieux et traduit un niveau possible de biodiversité. S'il est évident que pour des raisons pratiques, la biodiversité forestière ne peut être mesurée et suivie directement, les indicateurs utilisés doivent se baser sur des relations validées avec la biodiversité réelle. Pour l'heure, aucune preuve tangible de la relation entre cette biodiversité probable (estimée par l'IBP) et la biodiversité réellement présente n'a été apportée. L. Larrieu travaillera sur la validation de cet indice dans le cadre d'un partenariat avec le programme de recherches Gestion, Naturalité, Biodiversité (GIP ECOFOR), associant l'INRA, RNF et

l'ONF et piloté par le Cemagref de Nogent s/Vernisson. Les mesures d'IBP seront confrontées aux relevés de biodiversité taxonomique pris sur les mêmes sites. Les résultats de cette étude (attendus d'ici 3 ans) apporteront des éléments d'évaluation scientifique essentiels.

L'ONF s'est engagé à effectuer des suivis d'indicateurs de biodiversité pertinents et raisonnés. Le suivi de tels indicateurs suppose que leur méthode d'évaluation est reproductible dans le temps, et que les différences constatées soient effectivement liées à des évolutions réelles, et non pas attribuables à des variations d'appréciation entre les observateurs. Les auteurs ne donnent aucune information sur d'éventuels effets opérateurs. Ils précisent que l'IBP n'a pas été conçu à l'origine pour effectuer des suivis dans le temps. En effet, nous pouvons identifier ici deux sources de variation majeures : (i) la délimitation de la zone évaluée et (ii) les notes attribuées pour chaque facteur. Cette deuxième source de variation peut être minimisée avec une formation des observateurs visant à harmoniser les choix. En revanche la manière de délimiter la zone d'application n'est pas précisément décrite (une zone de peuplement homogène), et est donc susceptible de varier d'un observateur à un autre. Ce point critique apparaît rédhibitoire dans le cadre d'une démarche de suivi de la biodiversité.

Conclusion et perspectives

Dans sa construction, l'IBP transparaît clairement comme une estimation du degré de naturalité, même si elle reste incomplète (non prise en compte de la fréquentation du public par exemple). Dans sa version actuelle, l'IBP souffre de lacunes et d'insuffisances pour évaluer la biodiversité à l'échelle d'une forêt ou d'un territoire.

Au-delà, il n'apparaît pas pertinent pour mesurer et suivre l'ensemble des engagements environnementaux de l'ONF, précisés dans l'instruction bio-

diversité, le règlement national d'exploitation forestière, le règlement national des travaux et services forestiers et qui font partie des engagements ISO 14001 (et PEFC). Certains paramètres observés dans l'IBP relèvent certes de cette politique (bois mort à terre et sur pied, diversité des essences et des structures...), mais ces éléments – comme les autres – font l'objet de suivis réguliers par l'ONF et, pour partie, d'une publication au bilan patrimonial des forêts domaniales (tableau 1).

In fine, le recours à l'IBP n'apparaît pas spécialement utile pour la gestion des

forêts publiques, car il ne permet pas de mesurer l'avancement du plan d'action en faveur de ces engagements ; il apparaît plus important pour l'ONF de focaliser ses moyens sur le suivi des indicateurs techniques définis par les textes directeurs internes, en mettant en place un suivi par sondage ciblé pour certains points.

Il n'est donc pas opportun d'utiliser l'IBP à grande échelle dans le cadre de la gestion courante, en forêt domaniale ou dans les forêts des collectivités, sauf dans un but purement pédagogique de sensibilisation aux

aspects de la biodiversité liés à la naturalité dans les seuls espaces où cet objectif est recherché (RBI, îlots de sénescence, zones en libre évolution).

L'ONF porte actuellement une attention particulière au choix et à l'utilisation d'indicateurs de biodiversité, tant pour le suivi de ses engagements dans ce domaine que pour apporter des éléments d'appréciation aux maires, et au public en général. Le questionnement porte sur des aspects de fond (objectifs, niveaux d'appréciation de la biodiversité), mais aussi sur la forme (pertinence de résumer un concept aussi complexe au sein d'une unique valeur). Il est prévu de s'appuyer largement sur les travaux menés par le GIP ECOFOR sur les indicateurs de biodiversité (rapport à paraître prochainement) pour proposer une méthode qui permette d'évaluer avec précision et efficacité les engagements pris par l'ONF en faveur de la biodiversité. À cet égard, des chercheurs autrichiens ont récemment publié une proposition d'indicateur de biodiversité (figure 2) qui mérite d'être étudiée, parce qu'en raison de la largeur de son spectre, elle s'avère plus adaptée que le recueil d'IBP.

Vincent BOULANGER

Chargé de R & D biodiversité
ONF - DTCB

Michel HERMELINE

Chef du département biodiversité
ONF - DEDD

Laurence LEFEBVRE

Chef du département forêts
ONF - DTCB

Référence

Larrieu L., Gonin P. : 2010 - L'Indice de biodiversité potentielle ou IBP : un outil pratique au service de la biodiversité ordinaire des forêts. Forêt-entreprise, n° 190, janv. 2010 - pp. 52-57

Facteur IBP	Indicateur correspondant du bilan patrimonial
À : richesse en essences forestières autochtones	2.3 : mélange d'essences dans les peuplements
B : nombre de strates présentes	2.2 : Structuration verticale des peuplements
C et D bois mort de grosse circonférence, respectivement sur pied (C) et au sol (D)	2.4 : Volume de bois mort
E et F : TGB vivants	1.4 répartition par classes de diamètre et 2.9 (nouvelle version) : îlots de sénescence et de vieillissement
G : espaces ouverts	pas d'indicateur

Tab. 1 : correspondance entre facteurs pris en compte par l'IBP et indicateurs du bilan patrimonial des forêts domaniales (2006)

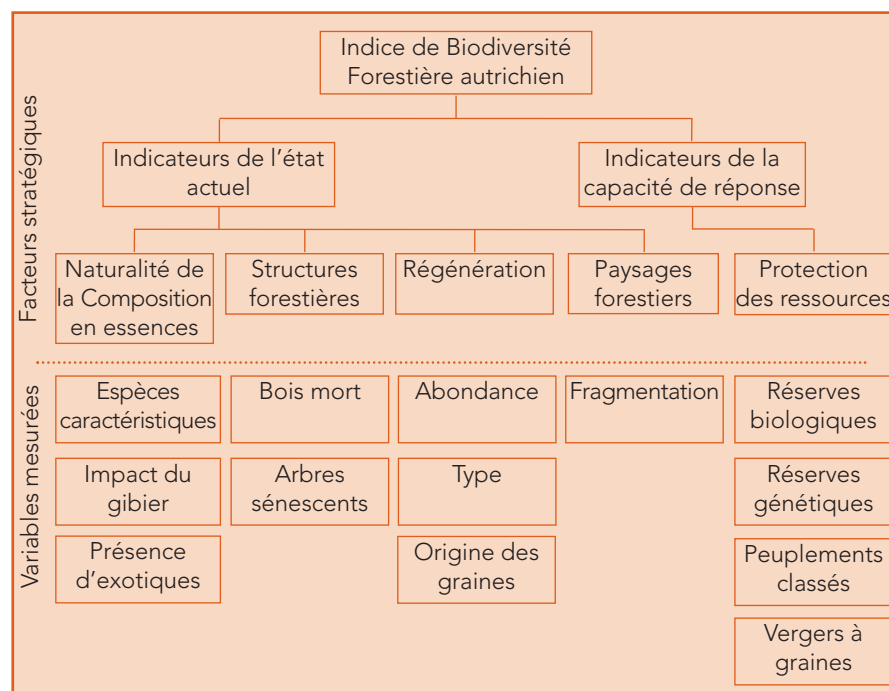


Fig. 2 : structuration de l'Indice de Biodiversité Forestière autrichien (adapté d'après Geburek et al., The Austrian Forest Biodiversity Index : all in one, 2010, Ecological Indicators)

Fiche technique - Gestion des déchets

Identifier et gérer les déchets générés par les activités de l'ONF ou abandonnés en forêt



Contexte général pour l'ONF

Respecter la réglementation

L'ONF doit agir conformément à la réglementation, notamment celle figurant dans le code de l'environnement.

Une **ECE** (évaluation de conformité environnementale) est réalisée une fois par an par les pilotes de processus dans les différents services (Agences, DT et DR, Siège) pour :

- contrôler la conformité avec la réglementation et nos engagements (PEFC, développement durable) ;
- prendre les mesures correctives jugées nécessaires.

> La **note de service 08-P-66** détermine la manière dont la gestion des déchets doit être appliquée et maîtrisée dans les services de l'ONF, tout en étant conforme avec la réglementation.

Réduire la production de déchets

La gestion éco-responsable est devenue incontournable pour tous, l'État devant être exemplaire.

Dans le contexte du Grenelle de l'environnement, l'ONF doit s'engager notamment à réduire la production de ses déchets.

Cet engagement est inclus dans les objectifs de l'axe 5 « Éco-responsabilité », conformément à la politique environnementale de l'ONF, faisant l'objet de :

- l'**instruction 10-P-3** ;



Tri et stockage de déchets informatiques ONF en vue de leur évacuation et de leur traitement

Crédit : J.-M. Mourey / ONF

- la **déclaration de politique environnementale** (9200-10-EMAI-STR-009).

Gérer en toute sécurité les déchets, notamment ceux qui sont dangereux

Toute personne de l'ONF qui intervient dans la gestion de déchets, qu'il soient :

- générés par les activités de l'établissement ;
 - abandonnés en forêt,
- doit le faire dans le respect des règles en vigueur, notamment en matière de SST (santé et sécurité au travail).

Dans la continuité des actions déjà mises en place au titre du processus DEC « Gérer les déchets » intégrées au plan d'action de la politique environnementale, dénommée SPE (suivi du programme environnemental), et en lien avec les aspects liés à la SST, cette fiche technique :

- rappelle le contexte réglementaire en matière de gestion des déchets ;
- fixe les points essentiels de la démarche de gestion et de prévention à engager ;
- identifie les principaux risques auxquels sont exposés les opérateurs selon les catégories de déchets ;
- édicte des règles de SST à appliquer pour se protéger contre les risques particuliers liés à leur manipulation.

Méthodes et savoir-faire

Mise en œuvre à l'ONF et mesures de prévention

La prévention des risques dans le domaine de la gestion des déchets doit normalement intervenir en amont, aussitôt après le choix des lieux de travail et méthodes d'évacuation, d'autant que de nombreux déchets font partie de la catégorie des déchets dangereux, chacun présentant des risques environnementaux et/ou sanitaires particuliers.

1. Identifier les déchets

- > Cette identification préalable est :
 - impérative avant toute manipulation de déchets dont on ne connaît pas l'origine et la dangerosité (dépôts sauvages) ;
 - conseillée pour les déchets apparemment inertes, qui peuvent se révéler dangereux (cas des déchets amiantés).

- > En cas de doute sur l'origine ou le contenu d'un dépôt sauvage, les services de gendarmerie ou de police doivent être alertés.
- > La plus grande vigilance s'impose avant toute manipulation de déchets inconnus (ex. : résidus de liquides). Les produits à manipuler doivent être très clairement identifiés.



Crédit : D. Mondin / ONF

▲ Sur un dépôt sauvage, l'identification des déchets est un préalable

2. Évaluer les risques

- > L'évaluation *a priori* des risques est primordiale :
 - faire une analyse fine de l'environnement ambiant, compte tenu des types et des quantités de déchets à évacuer ;
 - procéder à une évaluation des risques liés aux contextes de travail, à consigner par écrit dans le **DUER*** ;
 - communiquer les consignes de sécurité adaptées aux risques identifiés et aux contextes de travail ;
 - veiller à donner à tous les intervenants concernés l'information et la formation nécessaires sur la nature, la composition et la dangerosité des déchets.

- > Les principaux risques considérés lors de cette évaluation sont liés :
 - à la nature du déchet (chimique, cancérigène, biologique...) ;
 - aux procédés mis en œuvre ou aux tâches à accomplir pouvant générer troubles de santé, TMS* ou accidents, suite à l'exposition aux gaz, poussières, bruits, vibrations... ;
 - aux sites de collecte et à l'organisation du travail (déplacement des personnes, nature de l'endroit où a lieu la collecte, activités multiples dans le même espace de travail).



Crédit : D. Guyader / ONF

▲ Mélange de déchets amiantés et inertes dans un dépôt sauvage

3. Respecter les règles de SST et les modes opératoires

- > Une gestion des déchets bien maîtrisée nécessite :
 - des opérateurs formés ;
 - des équipements et des mesures de sécurité adaptés ;
 - une organisation évaluée et des règles de stockage respectées.
- > Les personnels doivent être équipés de matériels et EPI* adaptés, en tenant compte :
 - de l'évaluation des risques liés à cette activité indiquée dans le DUER de

- chaque direction territoriale ou régionale, conformément à la **note de service 05-D-281** ;
- des déchets effectivement ramassés l'année précédente.

Le détail des mesures figure en page 4.

- > Il faut veiller à limiter le nombre de personnels exposés aux risques et réduire leurs temps d'exposition.

- > Le **mode opératoire 9200-07-MOP-DEC-001** doit être connu et respecté.



Crédit : Ph. Drouet / ONF

▲ Tri et stockage d'aérosols usagés ONF en vue de leur évacuation et de leur traitement

4. Assurer la traçabilité du traitement

- > Comme l'exige la réglementation, pour tout traitement de déchets dangereux, l'ONF émet un **BSD*** et veille à ce qu'il soit retourné dans le délai d'un mois, dûment complété par les prestataires.

- > Afin de mieux connaître la variété et le tonnage de tous les déchets gérés et d'agir en conformité avec la réglementation et les engagements pris, les opérations d'évacuation sont progressivement enregistrées dans les principaux sites d'activités de l'ONF

sur des registres conformes au **formulaire 9200-07-FOR-DEC-001**. Cette procédure permet notamment de suivre l'évolution des coûts de gestion et de justifier les demandes de financement externes (cas des dépôts sauvages).

*Voir glossaire page 5

Méthodes et savoir-faire

Les principales mesures de SST à appliquer

Dans tous les cas



▲ Les risques d'infection peuvent être importants

Crédit : D. Mondin / ONF

Avant le chantier

- procéder aux **visites médicales** régulières et renseigner, pour la médecine du travail, la fiche individuelle d'exposition aux travaux pénibles si c'est une occupation significative des ouvriers ;
- être à jour pour les **vaccinations anti-tétaniques** ;
- préférer les prestations de services en cas de moyens ONF inadaptés ;
- privilégier les moyens mécaniques pour faciliter la manutention et éviter les TMS* ;
- établir la fiche de chantier avec les consignes techniques et de SST ;
- prévoir une trousse de premiers soins.

Pendant et après

- avoir sur le chantier un **secouriste ONF** formé ;
- consulter de toute urgence un **médecin**, en cas de blessure lors de la manipulation de déchets, afin de recevoir les mesures prophylactiques adaptées ;
- disposer de **numéros d'appel d'urgence**, notamment celui du centre anti-poison ;
- permettre aux salariés de se doucher après les collectes et avant de se restaurer ;
- éviter de boire, manger, fumer pendant les collectes ;
- disposer d'eau, savon et liquide nettoyant pour les yeux dans les véhicules de ramassage.

Déchets dangereux

- déchets amiantés ;
- déchets de bois traité ;
- huiles usagées ;
- batteries, piles et accumulateurs hors d'usage ;
- ampoules et tubes néon hors d'usage ;
- produits chimiques hors d'usage et leurs contenants (solvants, peintures, produits phytosanitaires) ;
- déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ;
- déchets des activités de soins à risques infectieux (DASRI) ;
- emballages souillés par des produits ou des déchets dangereux...



Principaux risques :

coupures, écrasements, intoxications, contaminations.

- équiper les intervenants d'EPI* adaptés (combinaisons étanches résistant aux acides, chaussures ou bottes de sécurité, gants et si nécessaire lunettes de protection, masques respiratoires) ;
- fournir les outils de ramassage adaptés (pinces et gants pour la manutention) ;
- disposer des FDS* pour les produits chimiques recensés.

- utiliser des contenants conformes à la réglementation notamment pour les DASRI* (tels les seringues) et adaptés au volume, à la lourdeur et aux propriétés physico-chimiques des déchets ainsi qu'à leur résistance aux effets extérieurs (intempéries) ;
- ne pas faire de mélanges de produits.

Déchets banals

- papiers et cartons usagés, plastiques usagés ;
- emballages usagés mais non souillés ;
- pneumatiques usagés ;
- palettes et caisses bois usagés ;
- métaux usagés...

Se souvenir que tout déchet souillé par un produit ou déchet dangereux doit être considéré comme dangereux. Les pneumatiques ne doivent en aucun cas être brûlés.



Principaux risques :

coupures, pincements, écrasements.

- équiper les intervenants d'EPI adaptés (chaussures ou bottes de sécurité, gants, casques et si nécessaire lunettes de protection) ;
- fournir les outils de ramassage adaptés (pinces et gants pour la manutention).

- utiliser des contenants adaptés au volume et à la lourdeur des déchets.

Déchets inertes

- briques, ciment ;
- gravats, déblais...

Se souvenir que tout déchet souillé par un produit ou déchet dangereux doit être considéré comme dangereux.



Principaux risques :

lombalgies, écrasements, coupures (lors de la manutention).

- équiper les intervenants d'EPI adaptés (chaussures ou bottes de sécurité, gants, casques et si nécessaire lunettes de protection).

- utiliser des contenants adaptés au volume et à la lourdeur des déchets.

*Voir glossaire page 5

> 4



L'organisation des sites de stockage temporaire

Une bonne organisation permet d'optimiser la gestion et le suivi des flux de déchets, mais aussi de limiter les risques d'accidents liés aux manipulations, aux transports et aux risques chimiques et biologiques :

- **trier** les déchets à traiter ;
- choisir en vue de leur stockage **des lieux identifiés et réservés**, facilement accessibles aux véhicules et protégés contre les intempéries ;
- utiliser pour leur stockage des **conteneurs adaptés** à chaque type de déchet, procéder à leur identification et si besoin à leur étiquetage, lorsqu'il s'agit de produits chimiques.

Si des entreprises extérieures interviennent pour évacuer les déchets, il faut élaborer et mettre en œuvre le **protocole de sécurité** requis pour les opérations de chargement/déchargement, conformément à la **note de service 06-G-1296**.



Crédit: D. Mondin / ONF

▲ Utiliser des véhicules correctement équipés pour la collecte



Crédit: D. Mondin / ONF

▲ Organiser des zones de stockage identifiées et réservées à chaque type de déchet

Glossaire

BSD : bordereau de suivi des déchets

DASRI : déchets des activités de soins à risques infectieux (seringues, pansements...)

DEC : processus "Gérer les déchets"

Déchets inertes : déchets minéraux non pollués, ne se décomposant pas, ne brûlant pas et ne produisant aucune réaction physique

Déchets banals : déchets non inertes et non dangereux

Déchets dangereux : déchets pouvant être nocifs pour l'homme ainsi que pour l'environnement

DEEE : déchets d'équipements électriques et électroniques (ordinateurs, imprimantes et leurs cartouches, téléphones...)

DUER : document unique d'évaluation des risques

EPI : équipement de protection individuelle contre un risque donné, variable selon l'activité exercée et normalisé.

FDS : fiche de données de sécurité

ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement

SST : santé et sécurité au travail

TMS : troubles musculo-squelettiques

Plus d'informations

Sources externes

- > Guide sur la lutte contre les dépôts sauvages
Conseil général de l'Essonne, 2009
- > Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)
<http://www.ademe.fr>
- > Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS)
<http://www.inrs.fr>
- > Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL)
<http://www.developpement-durable.gouv.fr>
- > Inspection des installations classées pour la protection de l'environnement (partie déchets)
<http://installationsclassées.ecologie.gouv.fr/-dechets-.html>
- > Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)
<http://www.ineris.fr>
- > Base de données SINOE
<http://www.sinoe.org>
- > Gestion des déchets de l'exploitation forestière (site Gédéon)
<http://www.fcba.fr/gedeon/>

Sources internes

- > Politique environnementale de l'ONF : Instruction 10-P-3
- > Déclaration de politique environnementale de l'ONF : 9200-10-EMAI-STR-009
- > Gestion des déchets et politique environnementale de l'ONF : Note de service 08-P-66
- > Document unique d'évaluation des risques "DUER" - Évaluation des risques professionnels, méthodologie d'évaluation : Note de service 05-D-281
- > Prévention des risques professionnels en cas de coactivité d'entreprise : Note de service 06-G-1296
- > Mode opératoire sur les déchets : 9200-07-MOP-DEC-001
- > Registre des déchets : Formulaire 9200-07-FOR-DEC-001
- > Synthèse juridique sur les déchets trouvés en forêt : Guide 9200-10-GUI-JUR-003
- > Dossier thématique "Réduire notre empreinte écologique"
Rendez-vous techniques n°21
- > Intraforêt : n° ebf5 et ada0

Contact

Dans les agences :
Correspondants DEC

Dans les DT et DR :
Pilotes DEC
Responsables et animateurs SST

Au Siège :
Aspects techniques et réglementaires :
Jean-Michel Mourey (DEDD)
jean-michel.mourey@onf.fr
Florent Romagoux (DJ)
florent.romagoux@onf.fr
Aspects santé et sécurité au Travail (DRH/DASS) :
Monique Noël
monique.noel@onf.fr
Daniel Buon
daniel.buon@onf.fr

Cette fiche est éditée grâce au FEDD, conformément au plan d'action de la politique environnementale (SPE : action H10).

Direction de la publication
ONF – DEDD/DTCB/DGCOM

Rédaction
Jean-Michel MOUREY
Jacques BAUDELOT

Hiver 2011



Direction Générale
2, avenue de Saint-Mandé
75570 Paris Cedex 12
Tél. 01 40 19 58 00
www.onf.fr
Certifié ISO 9001 et ISO 14001

à suivre

Prochain dossier

Téledétection appliquée à la gestion des forêts et milieux naturels (2)

Suite et fin de notre dossier avec notamment des applications à la cartographie de la hauteur des peuplements, aux problèmes d'incendies de forêts, à la cartographie d'habitats d'oiseaux et divers développements en Guyane.

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* en ligne

Sur intraforêt : pour les personnels ONF, tous les articles sont accessibles au format pdf dans le portail Intraforêt des centres de documentation : pavé Ressources, à gauche de l'écran, > Centres de documentation, puis lancer une recherche dans la base commune des Centres de documentation.

Sur internet : <http://www.onf.fr/> (rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques)

La revue *RenDez-Vous techniques* est destinée au personnel technique de l'ONF, quoiqu'ouverte à d'autres lecteurs (étudiants, établissements de recherche forestière, etc.). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires que sont les guides et autres instructions de gestion. Son esprit est celui de la gestion durable et multifonctionnelle qui, face aux défis des changements globaux, a abouti à l'accord conclu en 2007 avec *France nature environnement* : « Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité ». Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique.

Sous l'autorité du directeur de publication assisté d'un comité directeur *ad hoc*, la rédaction commande des articles, suscite des projets, collecte les propositions, organise la sélection des textes et assure la relation avec les auteurs. N.B. : certaines propositions, parfaitement légitimes en soi, ne se justifient pas forcément dans *RDV techniques* et méritent d'être orientées vers d'autres revues forestières. Enfin le comité éditorial, siégeant une fois par an, est informé de cette activité et émet ses avis, critiques ou suggestions.

Si vous désirez nous soumettre des articles prenez contact avec :

ONF - Département recherche
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 25
Courriel : rdvt@onf.fr

