

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

n° 32 - printemps 2011

patrimoine
sylviculture
progrès

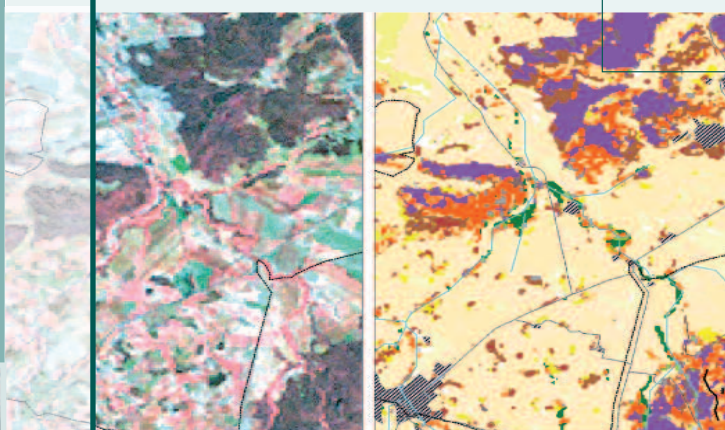
connaissances

économie

forêts et société
environnement

biodiversité

gestion durable



Télédétection et gestion des forêts (2)

p.25

Mécanisation forestière



p. 3

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-Edouard Guillaud, Véronique Vinot

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture

En haut : ONF/image Landsat

En bas : E. Ulrich, ONF

Page d'ouverture du dossier

IFN/ONF-RTM 05/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))

Disponibilité au numéro, abonnement

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 : juin 2011

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

sommaire

n° 32 - printemps 2011

3 méthodes

Développer et optimiser la mécanisation forestière à l'ONF : une stratégie répondant à des besoins multiples

par Erwin Ulrich, Michel Béal, Daniel Buon, Laurent Descroix, Bernard Héois, Jean-François Lafitte, Florence Manoiline, Didier Pischedda

13 pratiques

L'engrillagement mécanisé : une avancée technique, ergonomique et économique

par Erwin Ulrich, Jean-Pierre Thomassin, Jacky Neusch et Bernard Héois

20 pratiques

Les outils électroportatifs : ergonomie, santé et sécurité pour les ouvriers forestiers

par Erwin Ulrich, Yvan Sevrée, Pascal George, François Trottet, Florence Manoiline, Matthieu Mauvezin et Jean-Michel Mourey

25 **dossier méthodes**

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

éditorial

Les aléas éditoriaux ont concentré notre édition printanière sur deux thèmes : la mécanisation forestière et la télédétection. Le second fait suite au consistant dossier ouvert dans notre précédent numéro ; je n'y reviens pas. Quant au premier, il mérite qu'on rappelle ici quelques éléments de contexte.

La mécanisation n'est pas une fin en soi mais c'est une réalité incontournable de notre environnement technico-économique, le secteur de l'exploitation des bois en est un exemple patent. En caricaturant, les avancées de la mécanisation dans ce domaine ont été vécues au début comme une course à la plus grosse machine, selon le principe du « qui peut le plus peut le moins », et parfois subies comme une calamité, en particulier pour les sols. Or il n'y a pas de fatalité : on peut (on doit) s'organiser collectivement pour concilier impératifs technico-économiques et préservation de la biodiversité.

Les dispositions du règlement national d'exploitation forestière ont marqué une première étape avec, parallèlement, les « bonnes pratiques » qui consistent à installer systématiquement un cloisonnement d'exploitation et à le conserver en bon état d'utilisation. Cependant cela ne règle pas certaines situations aux effets pervers. Dans le cas des contrats d'approvisionnement, par exemple, le respect simultané des cahiers des charges et des échéanciers relève parfois de la quadrature du cercle, ce qui pose problème quand l'état du sol nécessite d'arrêter le chantier. C'est pourquoi nous allons vers une deuxième étape : revoir notre façon de contractualiser pour que ce type de dilemme disparaisse. Le principe est d'évoluer vers un contrat pluriannuel à bénéfice réciproque : meilleure « visibilité » pour les entreprises qui pourront s'organiser, adapter leur logistique et investir dans des matériels adéquats, et meilleure qualité environnementale du travail en forêt. C'est le « Contrat global de prestation de service », en bonne voie d'aboutissement.

Par ailleurs, et pour tous les types de travaux en forêt, il nous appartient de « prendre la main », de définir clairement les méthodes mécanisées à promouvoir en interne (agences travaux) en tant qu'optimum technique, économique, ergonomique et environnemental. Ce faisant, nous pourrions aussi interagir avec les entreprises de travaux forestiers et les constructeurs de matériels. C'est de cette stratégie qu'il est question ici.

Le Directeur technique et commercial bois
Bernard GAMBLIN

Développer et optimiser la mécanisation forestière à l'ONF : une stratégie répondant à des besoins multiples

La mécanisation forestière (travaux et exploitation) est un fait socio-économique incontournable. La question n'est pas tant de mécaniser ou pas, mais plutôt de « prendre la main » pour définir clairement les types de besoins et les modalités techniques correspondantes, de façon à optimiser tout ensemble les performances technique, économique, sociale et environnementale. C'est toute une stratégie qui se construit collectivement, dans le cadre d'un programme R & D. Cet article présente la méthode de travail et donne des exemples concrets de projets aboutis (en déploiement dans les agences travaux) ou à prendre en charge.

L'ONF s'est donné pour objectif de mieux prendre en charge les travaux indispensables à la gestion forestière, notamment les travaux sylvicoles parfois sous-traités jusqu'à 100 %, et de mieux répondre à des marchés et conventions pour les clients externes. Pour ce faire, il faut disposer d'une structure efficace. C'est pourquoi, entre 2007 et 2009, l'ONF a créé 9 agences travaux, une dans chaque direction territoriale (DT) ; la 10^e a vu le jour à la Réunion en janvier 2010. La création des agences travaux s'est accompagnée d'investissements importants en tous types de matériel, de la petite tronçonneuse pour les élagueurs-grimpeurs aux tracteurs forestiers, câbles mâts, abatteuses ou porteurs. Ces investissements sont destinés à assurer une économie pour l'établissement par l'internalisation de certains types de travaux, notamment ceux qui sont le cœur de métier. Par voie de conséquence, ils sont destinés à diversifier l'activité des quelques 3 000 ouvriers forestiers de l'ONF et à faire des gains de productivité. À la longue, cette

évolution permettra aussi de réduire notablement la pénibilité du travail et en même temps de maintenir l'emploi des ouvriers forestiers.

Optimisation de la mécanisation forestière : de quoi s'agit-il ?

Le terme « mécanisation forestière » englobe toutes les méthodes de travail en forêt impliquant des engins à moteur, que ce soit pour des opérations sylvicoles ou d'exploitation, pour l'entretien de l'infrastructure ou des équipements d'accueil ou pour des travaux de génie écologique. Il s'agit aussi bien des outils portatifs que d'engins autoportés.

L'optimisation (incluant le développement) des moyens mécanisés, vise des améliorations multiples, sous les aspects suivants, listés sans ordre de priorité :

- gain en termes sylvicole, de performance technique ou de respect de l'environnement ;
- gain de productivité financière (10 % minimum par rapport aux méthodes antérieures) ;

- gain au niveau de la qualité du résultat, comparée à celle de la méthode antérieure (si elle existe) ;
- gain ergonomique et de santé et sécurité au travail.

Selon le sujet, l'un ou l'autre de ces aspects peut être prioritaire, ou bien plusieurs peuvent avoir le même niveau d'importance. En aucun cas, il ne s'agit de maximiser un critère (la productivité financière, par exemple) au détriment d'un autre (qualité du résultat, sécurité...).

Objectif et enjeux de la démarche

Les travaux mécanisés en forêt publique sont au service de la gestion forestière. Dans ce sens, l'objectif premier est d'améliorer les techniques actuelles de travaux en forêt par l'utilisation d'engins spécifiques et des méthodes de travail correspondantes. Ces méthodes doivent être déployées dans les agences travaux, charge à elles, si le volume potentiel d'activité dépasse leur capacité, de les faire appliquer par des entreprises de travaux forestiers (ETF).

Les enjeux sont de taille. L'évolution des marchés a contraint l'ONF depuis 30 ans à diminuer progressivement le nombre de ses ouvriers forestiers, pour atteindre à ce jour une sorte d'effectif « plancher » de l'ordre de 3 000 personnes. Cet effectif se caractérise actuellement par une pyramide d'âges déséquilibrée (fort pourcentage dans la tranche d'âge 45-55ans). Lors du remplacement des départs en retraite, il est souhaitable de profiter du recrutement de jeunes ouvriers pour adapter leur technicité aux nouvelles méthodes sylvicoles et à la mécanisation. Réussir ce challenge permettra à l'avenir de disposer d'une main-d'œuvre plus qualifiée. Cela implique en même temps une plus grande spécialisation pour certains ouvriers et devrait permettre d'obtenir les améliorations mentionnées plus haut.

L'exigence croissante en matière de santé, sécurité, ergonomie et environnement, la transformation constante du marché des travaux, les évolutions techniques considérables des dernières décennies et les prix de sous-traitance engageant l'ONF à faire évoluer ses méthodes de travail.

La mécanisation est inéluctable, en particulier pour des questions de disponibilité de la main-d'œuvre, d'ergonomie et de pénibilité du travail. Maîtriser en interne les techniques mécanisées permet de bien en peser les avantages et inconvénients et d'en mesurer le coût pour mieux analyser les marchés (réponse aux appels d'offres, appels à sous-traitance...). Enfin un autre grand enjeu dans cette transformation partielle, qui préoccupe tous les acteurs au sein de l'ONF, est le maintien à un niveau aussi faible que possible des dégâts occasionnés à la forêt dans son ensemble (peuplements et sols).

État des lieux dans les agences travaux

La mécanisation n'est pas en soi une nouveauté. Les agences travaux réalisent couramment des travaux méca-

nisés, principalement dans la gamme des travaux sylvicoles traditionnels : travaux du sol préparatoires aux plantations, dégagements, nettoisements, dépressages, débroussaillage, abattage des arbres, etc. D'autres sont progressivement pris en charge en fonction des besoins et du volume de travaux potentiel sur plusieurs années en forêt domaniale, ou pour satisfaire des clients externes : fauchage des bas-côtés des routes, élagage des arbres en bordure de chemin avec des lamiers montés sur tracteur, entretien de la végétation sur l'emprise des lignes électriques ou autres. Il s'agit souvent là de travaux mécanisés dont la performance peut être très rapidement améliorée en termes de qualité, de rendement et d'ergonomie. Le tableau 1 donne un aperçu des types de travaux proposés par les agences travaux de l'ONF en 2010.

Cependant les agences travaux n'ont que peu de temps à consacrer au développement, notamment s'il s'agit de sujets d'envergure, car leur objectif premier est de réaliser les travaux et de répondre aux besoins immédiats des clients. L'idée est donc née d'une démarche nationale destinée à leur faciliter l'accès (raisonné) aux innovations, à les aider lors de la prise en charge de nouveaux types de travaux et à faciliter la mutualisation et la standardisation des méthodes de travail dont les besoins sont comparables entre directions territoriales.

La démarche nationale d'optimisation de la mécanisation forestière à l'ONF

Cette démarche est pilotée par la direction technique et commerciale bois, la direction du développement et le département action sanitaire et sociale (direction des ressources humaines).

Repérer ou définir les méthodes mécanisées à développer

Les méthodes à promouvoir peuvent déjà exister (localement) au sein de l'ONF ou hors de l'établissement, ou

bien elles sont à développer *ex nihilo* (ou presque !) afin de répondre à des besoins qui ne sont pas satisfaits.

Dans le premier cas, des équipes locales les ont expérimentées et perfectionnées sur une assez longue période, ce qui permet de les transférer du niveau local à d'autres agences travaux et d'en faire bénéficier l'ensemble de l'établissement. D'autres méthodes sont à rechercher à l'extérieur de l'ONF, en France ou à l'étranger. Dans tous les cas, il faut être à l'affût des développements et des innovations pouvant s'appliquer à nos activités.

Il y a donc trois types de situations :

1. transfert interne de techniques mécanisées éprouvées (développées et perfectionnées) dans une agence travaux vers d'autres agences ayant les mêmes besoins mais ne connaissant pas cette méthode ou ayant toujours sous-traité la tâche concernée aux ETF ;
2. transfert de savoir-faire/techniques existants en dehors de l'ONF, sous réserve éventuellement de les tester dans les conditions de mise en œuvre à l'ONF ;
3. l'acquisition de connaissances techniques pour la mise au point de nouvelles méthodes.

Après la phase de recherche et identification des méthodes, il faut organiser les conditions d'un déploiement pertinent et efficace, à savoir :

- passer dans certains cas (situations n° 2 et 3 surtout) par une phase de comparaisons et de chantier pour proposer les ensembles de machines et méthodes de travail donnant la meilleure satisfaction ;
- définir, formaliser et standardiser ces méthodes pour mise en œuvre dans le contexte ONF ;
- former les personnels des agences travaux, voire de certaines ETF.

Comparer la performance de plusieurs méthodes concurrentes

Il peut arriver que des méthodes complètement ou partiellement mécanisées se « concurrencent ». Pour le déploiement des plants forestiers contre

Type de travaux	Agences Travaux (ATX)										Nombre total d'ATX par type
Les travaux qui utilisent des moyens mécanisés pour une partie de l'opération (même en sous-traitance externe) sont indiqués en gras	Alsace	Bourgogne-Champagne-Ardennes	Centre-Ouest-Auvergne-Limousin	Franche-Comté	Ile-de-France-Nord-Ouest	Lorraine	Méditerranée	Rhône-Alpes	Sud-Ouest	La Réunion	
Abattage manuel (exploitation forestière)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
Abattage mécanisé	X						X				2
Aménagement de périmètres de captage de sources	X		X		X		X		X		5
Arrosage										X	1
Arrosage sur aires de stockage du bois									X		1
Assainissement : création et entretien fossés, mares (pelle mécanique)			X				X				2
Balayage des chaussées (pistes cyclables)	X										
Broyage de la végétation	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
Broyage de souches avec essoucheuse	X			X			X	X	X		5
Câblage d'arbres pour correction de chute	X					X	X	X			4
Cassage/annelation	X										
Confection de stères (façonnage et fendage)	X		X			X		X	X	X	6
Confection et pose de lattis bois	X										1
Création de passages busés			X								1
Création d'andains			X								1
Création de places de dépôt			X								1
Création d'équipements bois (aussi mobilier et aussi pour l'accueil du public) et signalétique bois	X		X		X	X	X	X		X	7
Création et entretien d'emprises (aussi DFCI, à La Réunion aussi fossés pare-feux)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
Création et entretien de limites et parcellaires (débroussaillage, peinture, bornes)	X		X	X		X	X	X	X	X	8
Création et entretien des cloisonnements sylvicoles ou d'exploitation	X	X	X	X	X	X	X	X	X		9
Création et réfection routière (pelle hydraulique, niveleuse, compacteur, camion)	X		X								2
Débardage (grumes, stères)	X		X					X	X	X	5
Débusquage	X				X		X	X	X	X	6
Déchetage du bois	X	X		X	X	X	X	X	X	X	9
Dégagement de plantations et régénération naturelle (le plus souvent à la débroussailluse)	X		X	X	X	X	X	X	X	X	9
Dégagement mécanique par broyage à hauteur			X								1
Dégagement mécanisé (Sylva'cass)						X					1
Dégagements manuels (croissant, bâtonnage de fougère)	X		X	X		X	X			X	6
Démantèlement des arbres avec grue				X				X			2
Dépose de clôtures	X		X				X		X	X	5
Elagage manuel	X	X	X		X	X	X			X	7
Elagage des arbres d'avenir (feuillus ou résineux)	X	X	X	X	X	X	X	X			8
Elagage manuel par grimpage	X	X		X	X	X	X	X	X	X	9
Elagage ou de démantèlement à la nacelle	X		X	X		X	X	X			6
Entretien des lignes RTE (personnel habilité à travailler sous les lignes électriques)	X		X	X		X	X	X	X		7
Entretien des cours d'eau et de leurs bordures et d'autres milieux naturels et sensibles, types ZPS et ZNIEF (aussi à la minipelle)	X		X	X	X	X	X	X	X		8
Entretien des lignes GRT GAZ (personnel formé ATEX : atmosphères explosives)	X		X	X		X		X	X		6
Entretien des voiries, accotements et infrastructures (fauchage, élagage, lamier, épaveuse, hors réfection de routes)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
Entretien espaces verts	X		X		X	X			X		5
Evacuation hélicoptée de déchets										X	1
Exploitation par câble									X		1
Fabrication de piquets	X										1
Génie civil RTM							X	X			2
Hélicoptage chantiers d'altitude							X	X			2
Maintenance du domaine forestier	X		?		X		X				3
Nettoieement/dépressage	X		X	X		X	X	X	X	X	8
Peignage de la ronce			X	X		X					3
Plantation	X	X	X	X	X	X	X		X	X	9
Pose de clôture	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
Pose de réseaux d'irrigation	X									X	2
Pose et entretien d'équipements d'accueil du public	X	X	X	X	X	X	X		X	X	9
Préparation des sols avant plantation (charrue, disques en Alsace, Franche-Comté et Lorraine : réalisation de potets travaillés à la minipelle et avec le cultisoussoleur) COAL:préparateur de sols, pelle ou dent Becker	X		X	X	X	X	X	X	X		8
Préparation pour pose d'ouvrage d'art			X								1
Production de plants forestiers					X					X	2
Production de piquets appointés	X										
Remise en état après coupe à la pelle mécanique			X								1
Taille de formation (en Lorraine avec matériel électroportatif)	X		X	X	X	X	X				6
Taille d'embranchements dans substrat rocheux										X	1
Tonte	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
Traitement phytocides	X		X				X				3
Transport de grumes									X		1
Transport d'engins avec porte char	X		X				X		X		4
Travaux de protection de la dune			X				X				2
Travaux paysagés	X		X	X			X				4
Valorisation de zones humides : mares, zones de crues			X				X				2
Total des types par agence travaux	44	13	41	26	23	29	38	27	29	25	

Tab. 1 : types de travaux mécanisés réalisés en 2010 par les 10 agences travaux de l'ONF

la ronce, par exemple, l'efficacité du travail à la débroussailleuse est en « compétition » avec celle d'un « peigne », tiré par un tracteur forestier, qui griffe le tapis de ronce en arrachant en partie ses racines.

Cette « concurrence » des méthodes peut parfois venir d'une réticence instinctive focalisée sur la qualité du résultat (sans voir les aspects ergonomiques, logistiques, voire économiques), ou bien d'une idée biaisée de la qualité du résultat (tendance à la surqualité ou méconnaissance du bénéfice réel à moyen terme). Quoi qu'il en soit, ces situations exigent des vérifications scrupuleuses, éventuellement par des chantiers test qui feront intervenir les méthodes les plus utilisées actuellement en comparaison avec la/les méthode(s) mécanisée(s) susceptible(s) de s'y substituer. Les chantiers tests permettent de convaincre, de rassurer ou de donner l'occasion aux gestionnaires « d'accorder les violons » sur ce que l'on considère comme un résultat de qualité. Selon le sujet, le résultat de telles comparaisons sera connu immédiatement ou bien seulement au bout de quelques années, comme c'est probablement le cas pour certaines méthodes de préparation mécanisée du sol avant plantation (voir paragraphe sur ce sujet plus loin).

Au cas où plusieurs méthodes donneraient des résultats comparables pour un même problème, il faudra trancher (arbitrer) en faveur de l'une ou l'autre pour une meilleure efficacité des investissements en matériel et en formation.

Maîtriser l'impact sur les conditions de travail, les risques professionnels et le risque financier

Lors du développement de nouvelles méthodes, la concertation avec les partenaires sociaux (par exemple santé et sécurité au travail et comités territoriaux d'hygiène et de sécurité) est obligatoire pour juger des autres aspects que la performance technique ou économique directe. Elle

sera donc recherchée dès les premiers chantiers test, soit bien avant le déploiement effectif.

Comme les investissements seront parfois conséquents, chaque méthode doit être évaluée au regard du risque financier qu'elle représente pour l'établissement, notamment lorsqu'un déploiement à toutes les agences travaux est envisagé. Des scénarios seront élaborés prenant en compte :

- le volume potentiel pluriannuel interne du type de travaux concerné dans les DT, éventuellement le potentiel pour des clients externes ;
- les investissements en matériel et en formation ;
- les coûts de revient en routine, comparés au prix de sous-traitance si ce travail est réalisé aussi par les ETF ;
- les conséquences en terme de santé, sécurité et ergonomie pour les ouvriers spécialisés.

Les fiches techniques « mécanisation forestière », support de la standardisation et du déploiement

La standardisation d'une méthode consiste à en définir correctement toutes les phases et leur enchaînement, de façon qu'elle soit reproductible sans perdre de ses avantages. Elle est l'aboutissement de l'étape de développement, où les différentes phases ont été testées et où les avantages et inconvénients ont été pesés, y compris en terme d'enchaînement. Dès qu'une nouvelle méthode mécanisée a démontré sa performance pour les divers critères, un groupe de travail synthétisera ses connaissances sous forme de deux fiches techniques :

- la fiche « outil », destinée à servir de support pour la formation des ouvriers forestiers, conducteurs de travaux et éventuellement responsables des unités de production ; elle est principalement orientée vers les détails techniques, ergonomiques, santé et sécurité au travail ;
- la fiche « information technique et financière », destinée à informer les donneurs d'ordre (personnels des agences territoriales) et responsa-

bles en agences travaux ; il s'agit de leur présenter les nouveautés techniques, leur efficacité, les rendements, les performances économiques et les exigences éventuelles en matière de programmation pluriannuelle de travaux ou commande de chantiers.

L'objectif de ces fiches est donc d'asseoir les méthodes et de les rendre visibles auprès des futurs utilisateurs et des commanditaires internes. Les deux types de fiche comprennent les rubriques suivantes :

- Contextes d'utilisation
- Caractéristiques de l'outil
- Performances techniques et indicateurs de rendement
- Performances économiques
- Confrontation avec les prescriptions des itinéraires techniques sylvicoles (ITTS)
- Conformité réglementaire en matière de santé et sécurité au travail (SST) et performances ergonomiques
- Performances environnementales, normes et infrastructure minimale
- Conditions de maintenance
- Formations obligatoires ou minimales nécessaires pour la prise en main
- Références d'études/test/chantiers de démonstration/articles/ouvrages

Ces fiches sont préparées par un comité de rédaction et de validation interne (animé par Erwin Ulrich, cf. tableau 2). Les parties les plus techniques sont définies avec les personnes ayant l'expérience pratique (ouvriers, conducteurs de travaux, responsables d'une unité de production) et qui ont une compétence générale en mécanisation (réseau mécanisation de l'ONF). Ensuite, les services compétents dans différents domaines au niveau national sont consultés afin de prendre en compte la panoplie des obligations réglementaires et des engagements de l'établissement. Elles sont enfin déployées sur le terrain dans les agences territoriales (prescripteurs) et les agences travaux (producteurs), qui les feront appliquer le cas échéant aux ETF.

Démarche nationale (suite) : après mise au point, le déploiement

Mise en chantier « grandeur nature » dans une ou deux agences travaux

La mise en place de nouvelles méthodes nécessite d'adapter l'ensemble des pratiques et d'y préparer les équipes de terrain et les gestionnaires. Ceci concerne tout le processus d'exécution d'un chantier : planning des commandes de matériel et des fournitures, planification des chantiers, préparation et assemblage des engins. Cela comprend aussi les nouveaux réflexes à acquérir pour que la qualité des résultats et le rendement s'améliorent rapidement. Pour les gestionnaires, un vrai effort est nécessaire lors de la préparation des commandes, lesquelles doivent bien indiquer les nouvelles prescrip-

tions liées aux nouveaux outils ou matériels.

La « mise en scène » complète des nouveaux types de chantiers doit donc être accompagnée au départ par les personnes qui en sont à l'origine. C'est l'objectif des premiers chantiers « grandeur nature ». Ainsi il sera possible de vérifier ce qu'il faut adapter pour que ces méthodes puissent avoir la réussite prévue dans le contexte ONF.

Déploiement complet et suivi

Le déploiement plus large ne sera organisé qu'à la suite de ces chantiers inauguraux. La micro mécanisation fait cependant exception : l'évolution technique (souvent à l'initiative des constructeurs) du matériel utilisé au quotidien par les ouvriers forestiers peut faire l'objet d'un déploiement rapide et généralisé qui entraîne en peu

de temps une amélioration nette du travail. C'est par exemple le cas des outils électroportatifs professionnels en remplacement des outils thermiques.

Selon les sujets, des indicateurs simples et pertinents seront mis en place, permettant de vérifier sur les premiers chantiers (1-2 ans) si les objectifs visés ont été atteints (ou sont en passe de l'être) dans tous les domaines : santé et sécurité, ergonomie, qualité d'exécution sylvicole et environnementale, satisfaction client, rendement, coût de revient.

Quelle évolution à long terme de l'activité « optimisation de la mécanisation forestière » ?

La gamme des projets concrets est très large (voir les exemples qui suivent) et l'importance relative de chacun d'eux diffère selon les régions.

Intervient au niveau national pour :	Nom	Service/fonction
Pilotage des agences travaux, développement de la mécanisation et appui pour les marchés nationaux	Michel BEAL Marie Leÿs	Direction du développement Département production - chef du département Département Production
Formation	Denis BLANCHET, François MOYSES	Campus ONF Responsable national de formation ouvrier forestier, Chargé de formation
Santé et sécurité du travail	Daniel BUON, Florence MANOILINE	Direction des ressources humaines - Département action sanitaire et sociale - chef du département Responsable national santé et sécurité au travail
Travaux	Bernard HEOIS	Direction technique et commerciale bois Département Forêt - Expert national Travaux
Ouvriers forestiers, conventions collectives, formation, législation etc.	Jean-François LAFITTE puis Capucine ROCLORE-JUBIN	Direction des ressources humaines Département ouvriers forestiers - chef du département
Exploitation forestière et logistique	Didier PISCHEDDA	Direction technique et commerciale bois Département commercial bois - Expert national en exploitation forestière et logistique
Aspects environnementaux	Jean-Michel MOUREY	Direction de l'Environnement et du Développement Durable Responsable politique environnementale et PEFC
R & D, sylviculture, mécanisation	Claudine RICHTER	Direction technique et commerciale bois département recherche Responsable de la mission biométrie-expérimentations
Conformité réglementaire et normative	Florent ROMAGOUX	Département juridique
Itinéraires sylvicoles	Thierry SARDIN	Direction technique et commerciale bois Département Forêt - Expert national sylviculture

Tab. 2 : composition du comité de rédaction et de validation des fiches mécanisation forestière en 2010

Les sujets à traiter changeront tous les 2-3 ans, ce qui crée une véritable dynamique d'optimisation. Dans cette démarche les différents acteurs ONF directement concernés sont associés, notamment les instances représentatives des ouvriers forestiers (Santé et sécurité au travail et comités territoriaux d'hygiène et sécurité).

Ceci étant, le nombre potentiel de méthodes mécanisées pouvant être intégrées dans l'activité des agences travaux ou exigés des ETF est limité. Depuis la création des agences travaux et grâce à leur propre amélioration itérative des travaux mécanisés, des gains importants ont déjà été observés, par exemple pour le fauchage des accotements, le broyage (au broyeur à axe vertical ou horizontal) des cloisonnements dans les jeunes peuplements ou la taille des arbres par grimpage. La stratégie d'optimisation au niveau national portera probablement l'essentiel de ses fruits dans les premières années. À mesure que les sujets les plus urgents auront été traités, le travail d'optimisation sera plus focalisé sur les détails de l'une ou l'autre méthode, améliorant encore ponctuellement tel ou tel aspect de la performance. Après plusieurs années, l'optimisation continue sera entrée dans les habitudes et l'intensité du pilotage au niveau national pourra être réduite.

Deux projets finalisés

Deux projets ont pleinement abouti. Nous les évoquons brièvement ici en renvoyant, pour le détail, aux deux articles suivants.

Engrillagement mécanisé

Nombreuses sont les forêts où la densité de gibier est importante et met en péril la régénération des peuplements forestiers. Si la priorité est de rechercher l'équilibre forêt-ongulés, le résultat des efforts entrepris à cet effet n'est ni immédiat ni uniforme. Aussi l'installation de clôtures reste nécessaire dans bien des cas pour éviter des pertes importantes de plants, des regarnis nombreux et des durées de



E. Ulrich, ONF

Première formation en engrillagement mécanisé réalisé par l'UP Alsace-Nord : l'équipe de l'UP Nord-Pas-de-Calais en apprentissage

régénération trop longues, avec pour conséquence une perte réelle de production et des dépenses cumulées parfois très importantes dans un contexte financier global difficile. Les surfaces engrillagées chaque année représentent environ 1000 ha en forêt domaniale ; l'installation des clôtures nécessite des travaux coûteux, le plus souvent sous-traités à l'extérieur, sauf en Alsace et dans une partie de la direction territoriale Bourgogne-Champagne-Ardenne.

L'agence travaux d'Alsace a optimisé une méthode d'engrillagement mécanisé qui peut être transférée telle quelle aux agences travaux des DT qui engrillagent le plus. Cela conduira à la fois à un enrichissement du savoir-faire des unités de production concernées, à une amélioration de l'ergonomie pour les ouvriers forestiers et à une économie importante pour les DT et l'ONF dans son ensemble. Le coût de revient ONF de cette méthode est le plus souvent inférieur, voire très inférieur au coût de sous-traitance externe. En Alsace, il est en moyenne de 5,8 € HT/ml (toutes charges, amortissement des engins et encadrement compris) avec un maximum de l'ordre de 7€ HT/ml. Ailleurs, par exemple en Ile-de-France Nord-Ouest, s'il arrive que les circonstances

exigent une qualité « exceptionnelle » de grillage et de piquets, le coût de revient interne peut monter à 10 € H.T/ml. Comparé aux prix externes de sous-traitance, qui vont de 8 à 17 € HT/ml, il reste une bonne marge d'économie.

Moyennant une formation d'une semaine et une période de prise en main de quelques mois lors des premiers chantiers, les investissements en matériel pour une seule équipe s'amortissent complètement dès 35 à 120 hectares clôturés (selon qu'on dispose déjà du tracteur ou pas). Cela suppose, de la part des gestionnaires de terrain/prescripteurs (agences territoriales, unités territoriales), un effort préalable d'harmonisation de la commande technique en terme de pratiques et de fournitures : type de grillage (maille, hauteur...), etc.

Petit outillage électroportatif : la tronçonneuse sur perche

Depuis quelques années, les outils électroportatifs destinés tant aux particuliers qu'aux professionnels se développent considérablement du fait de l'amélioration des batteries.

En forêt, le dégagement et le dépressage sont des activités importantes qui représentent une bonne partie du



E. Ulrich, ONF

Dépressage avec la tronçonneuse sur perche électroportative de la société Pellenc

travail de l'année pour un grand nombre d'ouvriers forestiers à l'ONF. Or les outils à moteur thermique utilisés jusqu'à présent ont de sérieux inconvénients : l'ouvrier est soumis toute la journée aux émanations de gaz d'échappement, aux vibrations, au bruit, et il passe du temps au ravitaillement et au remplissage du réservoir d'essence. L'intérêt majeur des outils électroportatifs est de réduire fortement ou supprimer les nuisances et les contraintes de ravitaillement, et de mieux répartir le poids : selon la batterie utilisée, 57 à 66 % du poids est porté sur le dos. Plusieurs centaines d'ouvriers forestiers sont concernées à l'ONF par cette évolution. Des équipes de plusieurs DT, en collaboration avec le département action sanitaire et sociale du siège, sont à l'origine de la démarche qui vient d'aboutir à la conclusion d'un marché national pour l'achat de ce type d'outils.

Des projets à développer en 2011-2012

Exploitation mécanisée dans les premières et deuxième éclaircies feuillues

Plusieurs DT de l'ONF sont confrontées à un problème majeur : l'impossibilité croissante de réaliser ou faire

réaliser les premières éclaircies dans les peuplements feuillus. Les enjeux :

■ Les surfaces concernées en forêt domaniale dans les 15 à 20 ans à venir sont très importantes (estimation grossière de l'ordre de 6 000 à 8 000 ha par an, à quoi s'ajoutent de très grandes surfaces en forêt communale), et on ne peut pas surseoir ou renoncer à ces éclaircies sous peine de dérive grave :

- de la stabilité des peuplements, la forte concurrence entre les tiges étant à l'origine d'une augmentation importante du coefficient d'élancement,
- de la durée de révolution (les arbres mettront plus de temps à atteindre le diamètre d'exploitabilité),
- de la qualité des bois.

■ La valeur des bois récoltés au cours des première et deuxième éclaircie étant faible pour un travail semi-mécanisé (tronçonneuses) onéreux et physiquement pénible, ce type de marché intéresse de moins en moins les ETF et acheteurs de bois sur pied. Les meilleurs clients restent ainsi les cessionnaires (privés) qui « font » leur bois de chauffage en faisant un travail de qualité à faible impact. Mais le

nombre de cessionnaires est en diminution et sans commune mesure avec l'ampleur du problème à résoudre.

■ La mécanisation des éclaircies feuillues pose encore des questions tant au niveau des matériels à utiliser que des organisations à mettre en place (optimisation de la productivité et de la qualité du travail : respect des cloisonnements, impacts sur les arbres restants...)

Afin de répondre à la nécessité d'intervenir à temps dans ces peuplements, il est urgent de trouver des solutions mécanisées adaptées aux enjeux sylvicoles, aux conditions stationnelles et de sol, aux produits à sortir, aux essences concernées, etc. Il en existe déjà quelques unes et d'autres sont à développer pour coller le mieux possible aux multiples besoins. Au-delà des aspects techniques, l'analyse doit évaluer les risques liés à l'investissement en propre (engins, formations et coûts des équipes), préciser les besoins d'organisation des équipes et anticiper les éventuelles évolutions métiers. Les solutions recherchées doivent minimiser le risque financier tout en apportant la meilleure réponse technique aux besoins.



E. Ulrich, ONF

Éclaircie mécanisée dans un jeune peuplement de hêtre en forêt domaniale de Darney : chantier de démonstration du projet Interreg IVa Regiowood (DT Lorraine)

Pour ces raisons l'ONF a commencé à travailler sur :

1. la définition et la catégorisation des enjeux et des besoins de l'ONF en matière de mécanisation des premières et deuxième éclaircies feuillues (surfaces, essences et stations concernées, produits à récolter, conditions des chantiers, contraintes...),
2. l'identification des méthodes d'exploitation mécanisée correspondant aux différentes « catégories » déterminées, (méthodes existantes et les méthodes à développer, à partir des besoins définis en commun),
3. la définition des bases de ce que pourrait être, en pratique et à partir de 2012, le développement de la « mécanisation feuillue » à l'ONF (en interne ou en partenariat avec des ETF),
4. des propositions de chaînes d'exploitation possibles, dont certaines sont innovantes pour la France, mais qu'il va falloir tester en 2011/12.

Préparation du sol avant plantation et plantation mécanisée

L'ONF a l'obligation de réussir les régénérations afin de garantir la gestion durable des forêts bénéficiant du régime forestier. Or toutes les DT de l'ONF sont peu ou prou confrontées aux problèmes d'échec de la régénération artificielle ou naturelle. Les raisons principales de ces échecs sont le plus souvent les suivantes :

- une végétation concurrente trop dense (concurrence pour la lumière et surtout pour l'eau) ne permettant pas aux semis de survivre ;
- une couverture du sol minéral par des tapis de graminées, de très fortes densités racinaires ou couches organiques trop épaisses pour que les graines puissent germer ou atteindre un milieu favorable au développement des premières racines ;
- un blocage physique via le sol (par exemple tassement superficiel ou profond, semelle d labour, hydromorphie temporaire ou horizon induré...).

La phase d'acquisition du nouveau peuplement en est parfois retardée de plus de 20 à 30 ans, ce qui impacte la productivité des surfaces concernées, souvent laissées de côté faute de solution technique. Cependant il existe des méthodes mécanisées de travail destinées à pallier une grosse part de ces problèmes ; d'autres sont encore à développer.

Par ailleurs, une part non négligeable du renouvellement des peuplements forestiers nécessite des plantations, ce qui coûte cher, qu'elles soient réalisées manuellement en interne ou sous-traitées. L'éventail actuel des techniques de plantation n'est pas très large et les planteuses commercialisées ne répondent pas à tous les besoins (taille des plants, taille et diamètre des godets...). Pour optimiser la plantation et proposer en interne une prise en charge mécanisée, adaptée aux besoins, il est d'abord nécessaire de... bien définir les besoins.

Dans les deux cas, préparation mécanisée du sol avant régénération (naturelle ou plantation) et plantation mécanisée, il est nécessaire de :

- connaître l'éventail des problèmes rencontrés sur le terrain (catégorisation) ;

- recenser si possible les surfaces concernées pour chaque catégorie ;
- associer à chaque problème des solutions techniques, si elles existent, sinon définir le besoin et en saisir l'équipe MGVF (mission gestion de la végétation en forêt), cellule R & D créée par le ministère chargé de l'Agriculture et l'ONF et qui travaille déjà sur ce thème ;
- définir chaque méthode en détail dans des fiches techniques, afin que ces fiches puissent servir de base pour la formation des ouvriers mettant en œuvre ces méthodes (formation donnant lieu à une habilitation) ;
- pour les besoins en performance technique des planteuses, passer éventuellement par une phase de développement d'un prototype modulaire ;
- informer les gestionnaires via la Direction Technique et Commerciale Bois et les Directions Forêt en DT ;
- mettre en place des cycles de formation pour les ouvriers spécialisés des agences travaux et le cas échéant des ETF.

Pour ce faire un groupe de travail a été mis en place en octobre 2010, qui devrait commencer à sortir les premiers résultats à partir de mi-2011. Si certains tests ne peuvent livrer de ré-



E. Ulrich, ONF

Une des méthodes de préparation du sol avant plantation, à cause du blocage complet par la fougère aigle et sont tapis de rhizomes : ici le travail avec le scarificateur réversible développé par Claude Becker en FD de Bord-Louviers

sultat définitif qu'après plusieurs années, il émettra des recommandations à dire d'expert qui seront revues au fur et à mesure de l'acquisition des connaissances.

Création et traçage de cloisonnements à l'aide d'une solution de guidage embarqué sur tracteur

Depuis quelques années, l'agriculture dispose de solutions de guidage par GPS pour optimiser les parcours (entre autres) afin d'éviter la superposition des périmètres travaillés lors des labours, des semis ou des épandages divers, par exemple. Plusieurs équipes, dans plusieurs DT, ont testé et mis en application ces outils en condition forestière. Elles ont délimité les situations dans lesquelles l'utilisation du guidage est utile, rentable et permet d'avoir une reproductibilité fiable. L'intérêt est d'économiser le temps passé au traçage préalable et au piquetage des cloisonnements à créer, temps qui peut être mis à profit pour approfondir la conception d'un réseau de cloisonnements pertinent. Un petit groupe de travail a commencé à définir les bases de cette méthode pour une utilisation plus large à l'ONF. Une attention toute particulière est portée à l'archivage des informations du traçage, de façon à réutiliser les mêmes lignes lors des interventions sylvicoles successives et d'une génération de peuplement à la suivante, pour éviter un tassement généralisé des parcelles après renouvellement par manque de mémoire sur les anciens tracés.

Récolte des bois par câble mât en zone de pente

Le débardage par câble mât a été mis au point dans les Alpes d'Europe centrale (Suisse, Autriche, Allemagne, Nord de l'Italie, pays de l'Est) pour sortir le bois des peuplements qui ne sont pas ou sont difficilement accessibles au tracteur.

Il s'agit essentiellement des peuplements sur forte pente (plus de 30-40 %) et trop éloignés des pistes pour être débusqués au tracteur (en général plus de 50 m à l'amont et 150 m à



E. Ulrich, ONF

Traçage de cloisonnements à l'aide d'une solution de guidage sur tracteur

l'aval des voies de vidange). L'enjeu de la mobilisation de cette ressource, disponible mais devenue inexploitable au fil des évolutions socio-économiques, est particulièrement important. Le débardage par câble est également pratiqué en plaine lorsque des problèmes de portance du sol ou des enjeux environnementaux particuliers interdisent l'usage du tracteur.

La méthode est efficace sous réserve de mise en œuvre dans des conditions adaptées ; elle est actuellement en développement dans les DT concernées par les massifs montagneux : Alpes, Pyrénées, Vosges, Massif central (voir note de service-10-D du 18 mai 2010 « Mobilisation des bois des forêts de montagne en situa-

tion de forte pente ; les conditions de succès ». L'ONF a monté sa première équipe « câble » dans l'agence travaux Sud Ouest. Cette technique fait toujours l'objet d'améliorations importantes au niveau de la logistique et des matériels mis en œuvre.

Exploitation mécanisée des dernières éclaircies et coupes finales (feuillus et résineux)

La mécanisation de l'exploitation forestière est une tendance lourde depuis plusieurs décennies en France. Différents types de machines sont utilisés suivant le degré de transformation du produit (méthode en bois courts, en bois longs voire en arbres entiers ou en plaquettes) : machine de bûcheronnage, porteur, débusqueur à câble, à pince ou à grue. En France, le taux de mécanisation est de 75 % pour les résineux contre 10 % en feuillus.

La mécanisation est un progrès sensible en ce qui concerne l'ergonomie du bûcheronnage et ce dans un contexte où la main-d'œuvre forestière, en constant recul depuis 30 ans, est à juste titre de plus en plus sensible à la pénibilité au travail. Toutefois, pour conduire les engins, cette main-d'œuvre se doit d'être de plus en plus



L. Descroix, ONF

Récolte par câble mât en pente, accompagné par une machine d'ébranchage et de façonnage



D. Pischedda, ONF

Débusqueur à pince sur grue, lui permettant d'éviter d'entrer dans le peuplement à partir du cloisonnement

s'agit d'améliorer la cohérence et l'efficacité de l'ensemble de la chaîne technique, d'anticiper les questions de programmation et d'installer les bons réflexes de commande pour désamorcer les « bugs », etc.

Certaines méthodes pourront être considérées comme méthodes de référence pour le respect des exigences techniques, de santé et sécurité au travail ou de développement durable. En vertu du règlement national des services et travaux forestiers (2010) et/ou du règlement national d'exploitation forestière (2007), l'ONF pourra exiger qu'elles soient appliquées par les entreprises de travaux forestiers.

La démarche fera l'objet de bilans périodiques dont les résultats seront diffusés auprès de l'ensemble des forestiers selon diverses modalités : supports de communication interne de l'ONF, notes de services le cas échéant, article(s) dans la présente revue, etc.

qualifiée à la fois dans le domaine mécanique, hydraulique, électronique et informatique, tout en ayant des compétences forestières minimales.

Ainsi les relations entre les propriétaires/gestionnaires forestiers et les entreprises de travaux forestiers sont en pleine évolution pour tenir compte à la fois des enjeux techniques et économiques de cette activité et des enjeux environnementaux. Pour les forêts publiques, le RNEF et les notes de services sur la protection des sols et la valorisation de la biomasse sont un exemple concret de cette évolution. De plus, des concertations sont en cours avec les représentants des ETF pour faire évoluer les modalités de contractualisation sur le moyen terme et pour leur permettre d'investir en fonction des besoins.

Conclusion

L'ONF s'est engagé depuis plusieurs années dans l'amélioration des techniques des travaux en forêt. Les agences travaux, créées à cet effet, ont pu et doivent encore optimiser et développer grâce à la mécanisation les travaux les plus courants. Cependant elles n'ont souvent pas les moyens de s'investir en profondeur et

en amont sur des sujets complexes qui exigent du temps de réflexion, de la recherche et des chantiers tests. Pour cette raison, une partie de la démarche d'optimisation et développement de la mécanisation est animée au niveau national avec des actions concertées entre directions centrales et en lien avec toutes les DT pour arriver à proposer des solutions partagées, réalistes et applicables en interne comme par les entreprises de travaux forestiers.

Ces solutions, synthétisées dans des « fiches techniques mécanisation » qui seront la base des formations et du déploiement, devront aussi être prises en compte dans les itinéraires techniques des travaux sylvicoles et plus précisément dans les prescriptions de chaque chantier.

Au-delà des personnels des agences travaux, ouvriers forestiers et encadrement (conducteurs de travaux, responsables des unités de production...), les personnels gestionnaires/prescripteurs des unités territoriales et les services de soutien technique (responsables « Forêt » en agence et en DT) devront également recevoir les formations au déploiement de ces nouvelles pratiques. Il

Erwin ULRICH
Laurent DESCROIX
ONF, DTCH
département R & D

Michel BEAL
ONF, DirDev
département Production

Bernard HEOIS
ONF, DTCH
département Forêts

Didier PISCHEDDA
ONF, DTCH
département Commercial Bois

Jean-François LAFITTE
ONF, DRH
département Ouvriers Forestiers
(maintenant agence Haute-Savoie)

Daniel BUON
Florence MANOILINE
ONF, DRH
département Action Sanitaire et Sociale

L'engrillagement mécanisé : une avancée technique, ergonomique et économique

La technique d'engrillagement mécanisé développée dans le cadre de la mission R&D d'optimisation de la mécanisation forestière à l'ONF est en train d'être adoptée par les agences travaux les plus concernées. Voici en détail l'analyse qui a conduit à cet aboutissement.

Malgré les efforts de réduction de la densité de gibier, l'équilibre sylvo-cynégétique n'est pas atteint dans de nombreux massifs forestiers. Le renouvellement des peuplements forestiers nécessite donc assez souvent la mise en place de protection contre le gibier (voir encadré). Chaque année, la surface totale régénérée en forêt domaniale est de l'ordre de 12 000 ha dont 3500 ha par plantation, et les surfaces engrillagées représentent environ 1000 ha. Entre 2006 et 2009, les travaux de « mise en place et entretien des protections contre le gibier » ont coûté 4 millions d'euros par an dans l'ensemble de la forêt publique. Ce montant ne distingue pas les parts respectives de l'engrillagement et des protections individuelles ; cependant, tout pointillisme étant à bannir en matière de travaux forestiers (surface minimum d'intervention = 1,5 ha), la protection individuelle des plants relève en principe de cas marginaux (contraintes paysagères ou d'accueil du public).

La mise en place de clôtures est une méthode éprouvée mise en œuvre en particulier pour la protection des plantations de chênes. Mais elle nécessite des travaux coûteux, confiés pour l'essentiel à des entreprises extérieures sauf dans la direction territoriale Alsace et une partie de Bourgogne-Champagne-Ardennes.

Les exigences de l'équilibre forêt-gibier

La gestion durable des forêts nécessite la recherche et la réalisation d'un équilibre agro-sylvo-cynégétique harmonieux ; il s'agit de rendre compatibles, d'une part, la présence d'une faune sauvage riche et variée, et d'autre part, la pérennité et la rentabilité des activités agricoles et sylvicoles. Plus particulièrement, l'équilibre sylvo-cynégétique doit permettre la régénération des peuplements forestiers dans des conditions économiques satisfaisantes pour le propriétaire, dans le territoire forestier concerné.

La présence de populations d'ongulés, si nombreuses qu'elles imposent la protection systématique des régénérations par des clôtures, induit un coût (y compris entretien et dépose) qui varie actuellement, de 20 €/ha/an à 30 €/ha/an selon les essences concernées*. Par ailleurs cette solution n'est techniquement pas applicable au traitement en futaie irrégulière. Ainsi l'option de l'engrillagement ne saurait constituer une réponse satisfaisante aux situations, trop nombreuses, de déséquilibre ongulés-forêt tant sur le plan écologique (atteinte à la biodiversité sur l'ensemble non protégé de la forêt) que sur le plan économique (surcoût des protections non compensé par un accroissement des revenus de la chasse).

Si nécessaire soit-elle dans l'immédiat, cette option ne peut être qu'un palliatif transitoire, l'objectif étant de parvenir à assurer le renouvellement de la forêt sans dispositif de protection, ce qui a d'ailleurs été spécialement explicité dans certaines directives régionales d'aménagement (DRA) ou schémas régionaux d'aménagement (SRA).

Renaud Klein
ONF, DTCB - Expert national chasse

*Estimation de la charge annuelle de l'engrillagement systématique des régénérations :
Coût clôture (pose, entretien dépose) estimé à 15 €/ml.
Pour des enclos de 4 ha on a ± 800 ml donc 3000 €/ha.
Selon que le renouvellement de l'essence objectif est à 100 ans ou 150 ans, la charge correspondante varie de 20 à 30 €/ha/an.

L'ONF déploie aujourd'hui dans les régions les plus actives en engrillagement une méthode mécanisée dont le coût de revient est le plus souvent inférieur au prix de sous-traitance externe. La prise en charge de ce travail par les agences travaux représentera à la fois un élargissement du savoir-faire des unités de production concernées, une amélioration de l'ergonomie de ce type de tâche pour les ouvriers forestiers et une économie importante pour les directions territoriales et l'ONF dans son ensemble.

Origine et champ d'application de la méthode

L'UT Haute-Marne a été la toute première équipe à développer l'engrillagement mécanisé, il y a près de 15 ans. Sa méthode permet d'utiliser des piquets en fer ou en bois mais fait intervenir 3 ouvriers, ce qui a un impact fort sur le coût de revient. La méthode présentée ici a été optimisée depuis 2003 dans l'agence travaux Alsace (UP Nord Alsace), se basant sur 200 km de clôtures réalisées entre 2005 et 2009. Elle n'utilise que des piquets en bois et ne nécessite que deux ouvriers pour l'installation des piquets et du grillage.

L'engrillagement mécanisé est pratiquement applicable à tous les besoins d'engrillagement, que ce soit pour la protection contre le gibier, y compris sanglier, ou pour d'autres besoins du moment que la hauteur est comprise entre 1,80 et 2,50 m à fleur de sol. Une variante est possible pour la réalisation d'un bas-volet d'environ 30 cm, ce qui réduit d'autant la hauteur (entre 1,50 et 2,20 m). Le bas volet consiste à arrondir le bas du grillage pour l'aplatir au sol (voir Bartoli, 1986) de façon à éviter la rentrée du gibier par-dessous le grillage. Le type de grillage et sa hauteur peuvent être adaptés aux besoins locaux exprimés par le prescripteur dans la limite des possibilités techniques ci-dessus. Les piquets (chêne, robinier, châtaignier, mélèze...) doivent être façonnés et appointés, avoir un diamètre moyen de 12 à 15 cm et une hauteur totale



J. Neusch, ONF

Préparation du périmètre avec un girobroyeur

comprise entre 1,80 et 3 m. Par rapport à la hauteur souhaitée du grillage il est nécessaire de prévoir une surmesure de 30-50 cm pour l'enfoncement.

La méthode est à son optimum en plaine sur tous les sols porteurs (non sujets à engorgement). Elle est également praticable, mais en limite de rentabilité, sur les sols hydromorphes (contrainte des périodes de portance suffisante) ou pentu. Une trop grande densité de fossés ou de bosses peut aussi limiter l'usage du tracteur et conduire à un surcoût, du fait que le tracteur doit se déplacer souvent pour les contourner.

Enfin la méthode est inadaptée sur les sols engorgés toute l'année ou dès que le terrain devient inaccessible pour le tracteur (terrain accidenté, trop d'obstacles...).

Phases de réalisation

Délimitation du périmètre

D'abord, le prescripteur (la plupart du temps c'est l'agent patrimonial, mais cela peut aussi être un client privé) réalise la délimitation du périmètre sur le terrain. La méthode décrite ici permet de s'affranchir des formes géométriques simples (de type carré, rectangle, etc.), habituellement

nécessaires pour gérer les tensions du grillage sur des piquets, souvent installés dans un sol remanié dans lequel il peuvent bouger trop facilement. Sur les tracés rectilignes, des obstacles tels que des rochers, des arbres ou des fossés génèrent souvent de fortes pertes de rendement et seront aussi souvent des points faibles lors de la pose des grillages, facilitant l'intrusion du gibier. La méthode permet de les contourner et de s'inscrire ainsi de manière plus harmonieuse dans le paysage. Cette souplesse de formes sera mieux perçue par les usagers de la forêt. Il y a aussi moins d'angles et pas de tendeurs métalliques susceptibles de blesser quelqu'un.

Préparation de l'emprise

Ensuite, le réalisateur (une équipe d'une unité de production, agence travaux) prépare le périmètre du chantier en fonction des contraintes du sol (mauvaise planéité, encombrement végétal ou présence de rémanents). Cette opération peut se faire au broyeur pour ouvrir une emprise propre qui aidera à la circulation des engins et des ouvriers qui réaliseront la clôture.

Pose des piquets

La distribution des piquets le long du périmètre sera ensuite réalisée par deux ouvriers avec un petit camion ou



E. Ulrich, ONF



J. Neusch, ONF



J. Neusch, ONF

Dispatching des piquets et installation des piquets avec un enfonce-pieu (pendant l'enfoncement l'ouvrier s'éloigne pour éviter d'être atteint par d'éventuels éclats de bois)

un tracteur avec remorque surbaissée qui prendra les piquets à partir d'un lieu de livraison et de stockage le plus proche possible du chantier d'exécution (par exemple une aire de stockage surveillée ou éventuellement le terrain de service de l'agent concerné).

La distance entre les piquets a été optimisée à 4 mètres. Le portail est logé dans ces 4 m et peut être implanté à n'importe quel endroit, du fait de l'équidistance des piquets, selon les besoins des gestionnaires. Si l'on souhaite aller très vite, la pose à l'enfonce-pieu, monté à l'arrière d'un tracteur forestier, peut pratiquement commencer dès que les premiers 50 piquets ont été déposés par l'équipe qui réalise le dispatching (si ce n'est pas la même qui fixe le grillage). L'avancement de l'enfonce pieu est très rapide, de l'ordre de 2 piquets par minute. En conditions normales de chantier, un périmètre de 1000 m (250 piquets), qui correspond à une surface d'environ 3 hectares, peut ainsi être réalisé en 2 heures environ. Les piquets sont enfoncés d'une cinquantaine de centimètres dans un sol non remanié et ont donc une très bonne tenue dans le sol.

Pose du grillage

Dès que les piquets sont enfoncés, l'équipe change d'outils sur le tracteur : elle installe le dérouleur de grillage. Celui-ci permet, comme son nom l'indique, de dérouler le grillage puis de l'agrafer avec une agrafeuse pneumatique. La combinaison de ces



E. Ulrich, ONF

Déroulage du grillage



E. Ulrich, ONF

Agrafage



E. Ulrich, ONF

Passage homme (à droite)



E. Ulrich, ONF

Confection d'un portail léger en 10 minutes

« Performances ergonomiques, environnementales et économiques ». Pour les régénérations qui peuvent être acquises rapidement, c'est-à-dire dans les 5 ans, comme celles des différents pins, une porte légère suffit et son installation se fait en 10 minutes (voir photo). Dans les autres cas, l'utilisation de portes en fer est recommandée (plus chères, mais meilleure tenue dans le temps). En plus des portes, plusieurs « passages d'homme » peuvent être répartis sur le périmètre. Ils consistent en deux piquets distants d'un mètre et sur lesquels deux demi-rondins sont cloués en bas et en haut, distants de 50 cm environ (voir photo). Le grillage à l'intérieur du cadre formé sera coupé sur trois côtés lors de la première entrée des ouvriers, à l'occasion du premier dégagement par exemple. Ces portes évitent des glissements ou des ruptures de barreaux, fréquents quand le passage prend la forme d'échelle. Elles facilitent aussi le passage avec un outil manuel porté.

Performances techniques, ergonomiques, environnementales et économiques

Les différentes phases et la qualité de travail sont standardisées avec, par rapport à la pose manuelle, des gains importants en productivité comme en ergonomie (fatigue physique et postures). Les phases et la technique de pose ont été simplifiées au maximum, tout en répondant aux besoins sylvicoles. Ainsi, tout le travail est réalisé par des équipes spécialisées de deux ouvriers travaillant en autonomie.

Des avantages techniques

Les clôtures « traditionnelles » comportent souvent des angles plus ou moins droits qui sont des points faibles, car la tension du grillage sur le piquet d'angle est importante. Pour éviter que le piquet d'angle soit soulevé et sorti de terre, il lui faut une jambe de force (formée d'un à trois piquets de renfort) et un tendeur,

deux outils permet de diminuer fortement le portage, de tendre le grillage avant agrafage et de l'agrafer sans devoir utiliser de crampillons, ni de marteau. Les agrafes utilisées sont bien plus longues (45 mm) que les crampillons et sont complètement enfoncées dans le bois. En quelques secondes le grillage est fixé sur les piquets, avec un faible effort physique de la part de l'ouvrier et une réduction

très importante des risques de blessure. En particulier, l'agrafeuse n'est active que lorsque elle est appuyée par l'ouvrier contre le piquet.

Portes et passages

Le choix du type de porte influe fortement sur le coût de revient au mètre linéaire (ml), tout comme le choix du type de clôture et des piquets, comme détaillé dans le chapitre

Caractéristiques techniques de l'outil

L'ensemble opérationnel comporte :

- un broyeur sur tracteur (girobroyeur), en cas de besoin ;
- un tracteur avec remorque forestière (avec grappin) pour le transport des piquets du lieu de production locale ou de livraison vers les chantiers (tracteur 100 chevaux, mais le même tracteur pour tous les travaux peut être utilisé ;
- un tracteur quatre roue motrice (puissance optimale est de 75 ch), si possible avec un relevage avant (pour le déplacement des outils portés en une seule fois vers le chantier = gain de temps) ; l'utilisation d'un vieux tracteur, qui est déjà amorti (> 5 ans) et qui a un faible coût de maintenance annuelle, permet de maintenir le prix de revient à un faible niveau. L'achat d'un nouveau tracteur augmente le prix de revient ;
- un enfonce pieux VIBRESCOPIC avec mise à niveau automatique, monté sur la prise de force, avec une cloche pour éviter l'éclatement du piquet ;
- une dérouleuse de grillage CLOTURMATIX GRX (plutôt terrain plat) ou version « PE » à monter sur minipelle pour terrain en pente ;
- une agrafeuse pneumatique (HAUBOLD) pour agrafes (taille 45-50 mm ou moins) ;
- une tronçonneuse pour la confection des portes et passages d'hommes ;
- une pince coupante et un marteau
- éventuellement une pioche pour mise à niveau du bas-volet ;
- les piquets (chêne, robinier, châtaignier, mélèze...) : la hauteur totale du piquet peut varier de 1,80 à 2,50 m ; par rapport à la hauteur souhaitée du grillage prévoir une sur-mesure de 30-50 cm pour l'enfoncement ; diamètre moyen de 12 à 15 cm, façonnés, appointés et livrés sur place ;
- le petit matériel consommable directement lié à cette méthode et dont il faut veiller à disposer toujours d'un stock suffisant : agrafes, clous pour les portes et du fil lisse.

c'est-à-dire un fil de fer attaché à son sommet et relié à un petit piquet enfoncé en biais dans le sol à l'extérieur du grillage. Ce type d'installation n'est pas toujours très pérenne et nécessite des réparations, car le piquet d'angle se soulève quand même tôt ou tard. De plus le tendeur, peu visible, peut provoquer des accrochages et des chutes, lorsque les ouvriers doivent longer la clôture. Avec la présente méthode il n'y a plus besoin de jambe de force, ni de tendeur, parce que les piquets sont enfoncés dans un sol non remanié et parce que la disposition en petit arc de cercle répartit la force sur plusieurs piquets et non plus sur un seul.

Il y a là un vrai gain de temps, de piquets et de consommables. En outre, le tracé curviligne permet de mieux s'intégrer dans le paysage.

La méthode inclut des solutions optimisées pour résoudre certains problèmes : passages d'homme, déjà décrits plus haut, ou franchissement des fossés. L'installation dans les fossés consiste à attacher au bas du grillage une pièce de grillage découpée sur mesure pour bien épouser la forme du fossé et fixée par deux piquets courts aux parois du fossé.

Si la fréquentation du gibier est importante il est possible d'installer des piquets intermédiaires d'une hauteur

d'un mètre seulement avec l'enfonce pieux (limite technique) afin de renforcer le bas du grillage.

Les avantages techniques concernent aussi le démontage, dans la mesure où le fonctionnement de la dérouleuse de grillage peut être réversible (option sur le modèle de base) : on peut s'en servir d'enrouleuse pour récupérer le grillage usagé, soit pour réemploi (économies sur un prochain chantier) soit pour mise en déchetterie. Cette utilisation est ergonomiquement très souhaitable et conduit également à une durée de démontage très réduite, sous condition d'un entretien annuel minimal de la clôture (enlèvement des ronces, chèvrefeuilles, etc.). Les agrafes sont plus faciles à enlever que les crampillons, ce qui facilite également le travail de démontage.

N'oublions pas enfin que la performance technique inclut... l'efficacité de la protection ; or cette efficacité ne dépend pas seulement de la qualité de la clôture, mais aussi de la surface engrillagée. Certaines régions ont l'habitude de faire clôturer de grandes surfaces, dépassant parfois 5 à 6 hectares d'un seul tenant. L'expérience alsacienne a montré que le gibier contourne plus facilement des engrillagements de surface réduite pour poursuivre son chemin et qu'il pénètre davantage les enclos qui prennent de l'ampleur. Forte de ce constat, et comme le rendement de la présente méthode est élevé, la DT Alsace a décidé de ne plus faire d'enclos de plus de 3-4 hectares. Si la surface totale à engrillager est plus grande, on la divise en deux ou plusieurs enclos côte à côte, tout en laissant entre eux un passage permettant au gibier de circuler. On a pu ainsi vérifier que les dommages sur le grillage et la pénétration du gibier s'en trouvent fortement réduits et que les dommages qui restent ne sont pas pour la plupart à mettre sur le compte du gibier mais plutôt sur le compte des arbres tombés, du vandalisme et parfois des engins (ce dernier cas concernant surtout le portail).

Des avantages en terme de santé, sécurité et ergonomie

La méthode d'engrillagement mécanisé conduit à une forte diminution de la pénibilité, car les charges sont portées par le tracteur et parce qu'il y a très peu de clouage manuel, donc un risque bien plus faible de blessures liées au clouage. La fatigue cumulée à long terme est fortement réduite et il y a moins d'accidents et donc moins d'absences (arrêt du travail pour raison médicale) ; *in fine* le rendement annuel des ouvriers forestiers est meilleur et ils sont également plus satisfaits de la qualité de leur travail.

Performances environnementales

Il n'y a pas de changement de la performance environnementale comparée à la méthode manuelle, où le tracteur intervient également, mais uniquement pour la distribution du matériel : tassement éventuel des sols dans le périmètre de travail et risques de fuites éventuelles d'huiles moteurs ou de gasoil. Cependant la récupération facilitée du grillage avec l'enrouleuse augmente les possibilités de réutilisation, ce qui présente aussi l'avantage de limiter les déchets.

Performances économiques

Les performances économiques s'expriment en coût de revient. On le calcule en faisant la somme des coûts observés et attribuables à un chantier précis ; cette somme est ensuite divisée par la quantité de travaux réalisés (ici ce sont les mètres linéaires engrillagés, ml). Cette référence permet de comparer les chantiers et d'établir des statistiques simples guidant la prise de décisions sur de futurs chantiers de conditions techniques locales comparables.

Le coût à l'achat de l'ensemble des gros engins (sauf la remorque pour le dispatching des piquets) est de l'ordre de 60 K€ HT (tracteur 75 chevaux) à 90 K€ HT (tracteur 130 chevaux) : tracteur forestier, enfonceur pieux, dérouleuse de grillage et cloueur pneumatique y compris petit matériel de connexion etc. Si le trac-

teur est déjà disponible, l'investissement se limite à environ 21-24 K€ HT.

Le coût de revient moyen observé en Alsace entre 2007 et 2009, avec du grillage Ursus léger et des piquets produits par l'ONF, est de 5,8 € HT/ml (encadrement compris). Les prix du grillage et des piquets ont un impact fort sur le prix de revient au ml ; il faut donc cerner les besoins réels de qualité au plus juste avant la mise en route des chantiers.

Un chantier réalisé en juin 2010 en forêt domaniale de Fontainebleau (surface de 6 hectares, 1030 mètres, conditions optimales de travail) a bien montré l'incidence du choix des matériaux sur le prix de revient : il s'agissait d'installer un grillage lourd soudé (4,42 € HT/ml) combiné à des piquets de très bonne qualité, certes, mais à 5,95 € HT la pièce, c'est-à-dire 1,49 € HT/ml. À eux seuls, ces matériaux conduisent déjà à un coût de 5,91 €/ml (c'est-à-dire le coût de revient moyen alsacien toutes phases comprises). Au total, le coût de revient du chantier de Fontainebleau a atteint 11,18 € HT/ml, sachant que deux matinées de démonstration ont fait baisser le rendement. Après analyse des coûts, il s'avère que des améliorations faciles à réaliser en rodant le système pourraient ramener le coût de revient à 8,50 € HT/ml.

Les clôtures sont réalisées pour l'essentiel par des entrepreneurs forestiers et les prix de sous-traitance observés vont de 8 à 17 € HT/ml, avec une moyenne qui se situe aux alentours de 11 € HT/ml. Dans ces conditions, il est donc intéressant pour l'ONF de maîtriser (internaliser) une partie de cette activité.

Rendements, logistique et planification des chantiers

Toutes phases réalisées en régie et tous types de chantiers confondus, le rendement moyen observé en Alsace entre 2005 et 2009 est de 45 à 47 ml/heure d'ouvrier. La taille

optimale des surfaces à engrilla-ger est de 3 à 4 hectares, ce qui représente environ 3 jours de chantier pour une équipe de deux hommes.

Dans les conditions optimales de plaine, sol portant sans difficulté particulière et chantiers groupés, l'ensemble des phases « pose de piquets », « pose du grillage », « création des portes et passages » peut-être faite à un rendement de 60 ml/heure pour l'équipe (c'est-à-dire 30 ml/heure d'ouvrier). La simple pose du grillage (hors broyage du périmètre, dispatching et enfoncement des piquets) se fait au rendement moyen de 100-150 ml/heure.

Sur sols pentus, l'avantage de la méthode mécanisée est lié à une meilleure ergonomie via l'assistance au déroulage manuel, avec la dérouleuse positionnée en haut de pente, et via l'agrafage. Il faut alors juste prévoir une rallonge de tuyau pneumatique (50 m au lieu de 20 m sur terrain plat car le grillage sera agrafé autant que possible sur toute la pente en une seule fois). Ainsi, les ouvriers n'ont pas besoin de porter des charges, car le déroulage manuel est fait de haut en bas à partir du tracteur, qui porte les charges.

Le meilleur rendement continu est obtenu si toutes les commandes sont faites en fin de l'année n-1, ainsi qu'une mise à jour annuelle des besoins à moyen terme (4-5 ans) afin de regrouper les chantiers géographiquement proches (broyage groupé des périmètres, livraison groupée des piquets, dispatching groupé, etc.). La connaissance des besoins à moyen terme permet de développer la stratégie d'acquisition du matériel (engins) et de formation des équipes, ainsi que l'achat groupé du consommable (surtout grillage), ce qui peut faire baisser considérablement les prix.

Conclusion

Tant que l'ONF aura besoin de clôturer une part non négligeable des surfaces à régénérer, il est nécessaire d'en maîtriser la qualité et les coûts. La présente méthode d'en grillage mécanique améliore l'ergonomie et la sécurité du travail (donc la santé), tout en augmentant fortement le rendement des équipes d'ouvriers forestiers. Elle s'applique à toutes les situations de plaine et moyenne colline et peut être utilisée en situation de pente pour l'assistance au déroulage manuel du grillage et l'agrafage automatique, évitant ainsi aux ouvriers le port de charges lourdes.

Cette méthode, une fois bien maîtrisée par les équipes ayant reçu une formation initiale d'une semaine, permet de réaliser de vraies économies par rapport aux prix de sous-traitance externe. Les investissements en matériel pour une seule équipe s'amortissent complètement dès 35 à 120 hectares clôturés, selon que l'achat d'un tracteur a été nécessaire ou pas.

Le déploiement dans les agences travaux de l'ONF les plus concernées a commencé fin 2010 et se poursuit en 2011, avec la constitution d'une à deux équipes par direction territoriale.

Erwin ULRICH

ONF, DTCB
département R & D

Jean-Pierre THOMASSIN

Jacky NEUSCH
ONF, agence travaux Asace
UP Nord Alsace

Bernard HEOIS

ONF, DTCB
département Forêts



E. Ulrich, ONF

Formation à l'assistance au déroulage en montagne



E. Ulrich, ONF

Après le déroulage en pente, le grillage est cloué facilement avec la cloueuse pneumatique (ici : formation)

Pour plus ample information

Le personnel de l'ONF peut consulter les fiches N°1 « En grillage mécanique » sur Intranet
http://intraforet.onf.fr/dg/dmd/res-comp/restrav/sommaire/fiches_techniques_me/IF00000238f3

Bartoli M., 1986. Contre le gibier : une clôture efficace et pratique. Arborescence n°2, pp. 12-13.

Les outils électroportatifs : ergonomie, santé et sécurité pour les ouvriers forestiers

Cet article décrit les progrès récents de l'outillage électroportatif et, en prenant l'exemple de la tronçonneuse sur perche et du taille-haie, compare ces outils avec leurs équivalents thermiques encore largement utilisés à l'ONF. Il en ressort que le coût d'investissement seul n'est pas un bon critère de choix pour ce type de matériel et que des critères santé, sécurité et ergonomie emportent facilement la décision. Sans compter que la comparaison des coûts cumulés sur 3 ans est aussi plutôt en faveur de l'électroportatif.

Le dégagement et le dépressage sont au cœur des travaux sylvicoles et représentent une bonne partie du travail de l'année pour un grand nombre d'ouvriers forestiers de l'ONF. Jusqu'à présent, on les réalise avec des outils manuels (croissant) ou, depuis deux décennies, à moteur thermique, avec pour ces derniers des inconvénients majeurs : l'ouvrier est soumis toute la journée aux émanations de gaz d'échappement, aux vibrations et à un bruit important.

Dans un autre domaine, les taille-haies thermiques sont couramment utilisés pour l'entretien des espaces de type parc arboré, que ce soit en forêt ou ailleurs (activités conventionnelles). Ces outils apportent entière satisfaction du point de vue de la qualité du travail et de la puissance, mais le bruit qu'ils génèrent est souvent perçu par les riverains en zone périurbaine comme une nuisance, notamment lorsque les travaux démarrent à 7 heures du matin. Les plaintes, courantes dans ces situations, conduisent à ne démarrer qu'après 8 ou 9 heures et donc à allonger la durée des chantiers en réduisant la plage journalière de travail effectif.

Le développement d'outils électroportatifs pour notre secteur profes-

Description de la perche sur tronçonneuse

L'ensemble opérationnel comporte :

- tronçonneuse sur perche, longueurs fixes de la canne : 1,30 et 1,80 m (les cannes télescopiques ne sont pas assez solides pour le travail en forêt) ;
- harnais de type sac à dos sur lequel est fixée la batterie lithium-ion avec le câble électrique la liant à la tronçonneuse ;
- batteries avec deux capacités : 400 Wh (environ 3-4 heures d'autonomie) et 700 Wh (environ 5-6 heures d'autonomie) ;
- petit matériel consommable, dont un guide chaîne et une ou plusieurs chaînes, de l'huile bio pour la lubrification de la chaîne.

Poids : perche avec tronçonneuses entre 2,7 et 2,8 kg et batteries entre 4 kg (400 Wh) et 6,1 kg (700 Wh).

sionnel offre donc un véritable tremplin vers une nouvelle ère pour les travaux en forêt avec une vraie réduction de la pénibilité et une réduction importante des effets à long terme sur la santé en comparaison des outils thermiques.

Les outils décrits dans cet article, dont les composants sont indiqués en encadré, ont été testés à l'ONF par les ouvriers forestiers eux-mêmes. Ils ont été moteurs dans la démarche qui conduit aujourd'hui l'ONF à lancer une véritable dynamique d'équipement sur ce type d'outils, en concluant un marché national sur deux ans (2011-2013) avec la société Pellenc, leader mondial des outils professionnels électroportatifs.

Utilisation de la tronçonneuse sur perche

En principe, l'utilisation de la tronçonneuse électroportative sur perche ne change rien aux prescriptions des itinéraires sylvicoles, car le travail est le même qu'avec les tronçonneuses sur perche ou petites tronçonneuses thermiques.

La tronçonneuse sur perche est utilisée à son optimum dans les régénérations à dégager (hauteur de coupe variable en fonction des consignes sylvicoles) ou à dépresser (diamètre à 1,30 m de 10-12 cm, pour une hauteur dominante de 7 à 9 mètres), y compris le démantèlement des houppiers. Elle peut également servir pour l'élagage jusqu'à environ 4 m de hauteur, pour



Y. Sevrée, ONF



Y. Sevrée, ONF

Dépressage à partir du cloisonnement sylvicole

E. Ulrich, ONF

Dépressage à l'intérieur d'une bande boisée

F. Trottet, ONF

Elagage sur des sentiers de randonnée

l'entretien de sentiers pédestres, équestres et VTT, ou pour celui des limites de propriété (par exemple avec des zones habitées).

Les chantiers d'élagage des arbres objectif jusqu'à 6m requièrent une organisation particulière : combiner par exemple deux gammes de perches électroportatives (l'une pour élaguer à 2 m, l'autre pour poursuivre jusqu'à 4 m, avec deux ouvriers ou deux passages successifs du même ouvrier) avec une perche manuelle (Scie sur bras télescopique) pour travailler de 4 à 6 mètres.

Quelques réserves

Par contre, cet outil est inadapté dans des parcelles sans cloisonnement syl-

vicole (≈ 6 mètres d'axe en axe) ainsi que dans les peuplements qui comptent plus de 20-25 % de tiges de diamètre > 12 cm, ce qui requiert une puissance plus importante ; il vaut mieux utiliser alors les perches ou tronçonneuses thermiques.

Mieux vaut également éviter les parcelles à très forte densité (y compris les arbustes d'accompagnement), car la fluidité des travaux y sera contrariée par l'accrochage trop fréquent du câble de liaison entre la batterie et la poignée de la perche. Sur des terrains en pente, on manque actuellement de retour d'expérience.

Pour remédier à l'accrochage du câble de liaison, l'ouvrier peut faire passer le câble à l'intérieur de sa

manche ou bien l'attacher au bras avec un brassard. Dans le premiers cas, il est difficile de se débarrasser du matériel en urgence pour évacuer rapidement le chantier (en cas d'attaque par frelon, par exemple), mais comme les perches électroportatives sont moins encombrantes que les outils thermiques, on peut mieux se mouvoir dans la parcelle. Dans le deuxième cas, une partie du câble reste suspendue en l'air.

L'utilisateur doit enfin gérer les accélérations pour permettre une autonomie maximale : un seul coup de gâchette avec maintien d'une pression stable pour un arbre coupé, au lieu des habituels multiples coups pour l'outil thermique.

Principaux avantages de la tronçonneuse sur perche électropor- tative

Le plus grand avantage de cet outil concerne **la santé des utilisateurs** : c'est la très importante diminution des nuisances sonores et vibrations et la suppression des gaz d'échappement. De plus, l'autonomie que procure la batterie permet de limiter les déplacements : plus de problème de ravitaillement et de remplissage du réservoir, il suffit de changer de batterie à midi. Ce « détail » représente une réduction notable du port de charges dans la journée.

La répartition du poids de l'outil est aussi fortement améliorée par rapport à l'outil thermique, où tout le poids (entre 4,5 et 8 kg, selon le modèle) se trouve concentré sur la perche (donc lourd à porter) : 57% à 67% (selon le type de batterie utilisé) du poids de l'outil électropor-
tatif sont portés sur le dos (4 à 6 kg pour la batterie) et seul le poids de la perche est porté à la main (moins de 3 kg). Enfin cette tronçonneuse diminue le risque de blessure par rebond, du fait de la plus faible vitesse linéaire de la chaîne (environ 8 m/s). Le fait que la chaîne s'arrête instantanément lorsque l'on relâche la gâchette a été noté comme un vrai atout. En comparaison, la chaîne d'une tronçonneuse thermique continue à tourner, même après avoir arrêté la machine, ce qui est une des sources d'accidents.

À la longue, cela fait à la fois moins de fatigue cumulée et moins d'accidents, donc moins d'absences. *In fine*, le rendement annuel est amélioré sans changer le rythme ni la qualité du travail. Les utilisateurs concernés sont en majorité des ouvriers forestiers sylviculteurs. Cet outil peut convenir aux personnes ayant certaines restrictions d'aptitude, par exemple liées au port de charges ou aux troubles musculo-squelettiques (TMS) : c'est donc une solution en terme de maintien dans l'emploi.

Au niveau de la logistique et de l'entretien, il n'y a plus besoin de s'occuper mensuellement du ravitaillement en carburant. Cela représente une économie importante en coût de fonctionnement (dépense énergétique et en lubrifiant). Plus besoin non plus de clé à bougie (le moteur électrique ne nécessite aucun entretien) ; une clé de serrage pour la tension de chaîne est incorporée dans le carter de protection.

Cet outil permet de s'affranchir des restrictions d'utilisation ou interdictions liées au bruit (zone habitée, zone touristique, etc.).

Du point de vue du développement durable un seul outil électropor-
tatif permet d'éviter l'émission d'une tonne de CO₂ en trois ans, en supposant une utilisation de 90 jours par an à raison de 4,5 heures effectives de travail par jour et sachant que 1 litre d'essence produit 2,36 kg de CO₂. Quant à la batterie, elle est reprise par les points de vente qui se sont engagés dans une démarche de recyclage éco-responsable.

Le démarrage instantané du moteur électrique permet probablement d'adapter plus efficacement l'intensité de l'intervention au besoin du peuplement, alors que la perche thermique, une fois arrêtée, doit être remise en route pour couper quelques arbres isolés...

Concernant l'aspect sylvicole, la perche autorise un travail de la végétation en hauteur ce qui maintient l'accompagnement ligneux et améliore l'éducation des tiges dégagées, tout en assurant leur protection physique contre les dégâts de gibier. Avec une tronçonneuse thermique, cette finesse ne peut être réalisée : pour mettre l'utilisateur en sécurité, l'outil doit être maintenu en dessous de la ligne de cœur et son poids provoque rapidement la fatigue lors de mouvements en hauteur à répétition.

Description du taille-haie

L'ensemble opérationnel comporte :
- corps principal du taille-haie ;
- 3 lamiers échangeables de 51, 63 ou 75 cm ;
- batteries avec deux capacités : 400 Wh (environ 3-4 heures d'autonomie) et 700 Wh (environ 5-6 heures d'autonomie) ;
- petit matériel consommable, dont une lame et un câble de rechange.

Poids : taille-haie 4,1 kg, batteries entre 4 kg (400 Wh) et 6,1 kg (700 Wh).

Principaux inconvénients de la tronçonneuse sur perche électro- portative

La vitesse de coupe est plus faible que celle d'une perche thermique, mais cette diminution est compensée par une plus grande régularité, une plus longue durée du temps de travail et moins de fatigue. Deux batteries sont nécessaires par outil pour une journée de travail. Dans les versions actuelles, la disposition du câble d'alimentation entre la batterie et l'outil n'est pas optimale ; le problème est à l'étude chez le constructeur. Enfin, comparé aux outils thermiques, l'utilisateur ressent un déséquilibre de la canne (solution apportée : harnais avec tendeur pour rééquilibrer l'outil).

Utilisation du taille-haie

En principe l'utilisation du taille-haie électrique ne diffère pas de celle de l'outil thermique et les principaux avantages mentionnés pour la tronçonneuse sur perche sont également valables ici. Etant donné que le taille-haie est bien plus utilisé pour l'entretien des parcs et jardins, le fait qu'il soit silencieux devient également un grand avantage : les nombreuses plaintes des riverains à cause du bruit des engins thermiques s'arrêtent du jour au lendemain. La prise en main est rapide et l'autonomie de la batterie



F. Trottet, ONF



F. Trottet, ONF

Le taille-haie, pour les travaux dans les espaces de type parc

est bonne. En fin de journée, il y a donc plus de travail réalisé qu'avec l'outil thermique. Côté puissance, le taille-haie électroportatif n'a rien à envier à l'engin thermique : il a une très bonne puissance et ceci se sent dès la première prise en main.

En revanche, il faut s'habituer à porter le harnais et la batterie, qui peut se « faire lourde » en fin de journée. La connexion de l'outil sur le câble venant de la batterie pourrait être améliorée dans les versions à venir.

Critères valables pour les deux outils

Autonomie des batteries

Les batteries, d'une durée d'utilisation nominale de 4 à 7 heures (types 400 et 700 Wh), peuvent perdre en moyenne une heure d'autonomie (sans perte de performance/puissance) en fonction des travaux réalisés, comparé à l'indication du constructeur. Cela dépend de la densité initiale du peuplement, qui peut varier de l'ordre de 7 000 à 12 000 tiges par hectare dans le dépressage avec un objectif final d'une moyenne de 3 600 tiges par hectare selon le référentiel sylvicole. Selon la société Pellenc (titulaire du marché), les batteries gardent 100 % de leur performance pendant les premiers 800 cycles de recharge (environ 4 ans d'utilisation). Ensuite

la durée d'utilisation baisse régulièrement, mais les batteries restent utilisables et gardent la même puissance jusqu'à l'arrêt automatique à 5 % de charge.

Performances environnementales

Ces outils ont une bien meilleure performance environnementale que celle des outils à moteur thermique dans la mesure où ils ne consomment pas d'essence, ne produisent donc pas de rejets polluants, et réduisent fortement le bruit, ce qui permet de travailler sans protection antibruit.

Les batteries au lithium-ion, cependant, sont dangereuses pour l'environnement, ce qui impose des précautions particulières. Le matériel ne doit en aucun cas être entreposé, même temporairement, sans dispositif de protection à l'intérieur des périmètres de captage immédiats et rapprochés, ainsi qu'à moins de 10 m des cours d'eau et zones humides, conformément aux engagements environnementaux ONF. Les batteries hors d'usage sont des déchets dangereux : jusqu'à leur reprise par le fournisseur, les batteries hors d'usage doivent être stockées dans un bac plastique fermé à l'intérieur de l'atelier qui abrite l'ensemble du matériel électroportatif. Toutes les autres parties du matériel sont des

déchets banals sauf s'ils ont été souillés par des produits ou déchets dangereux.

Gain de temps et coût évités

Si l'on compare avec le déroulement d'une demi-journée de dépressage à la tronçonneuse thermique sur perche, l'outil électrique dispense des phases suivantes :

- remplissage du réservoir d'essence toutes les 45 minutes ;
- remplissage du réservoir d'huile de chaîne à chaque remplissage du réservoir d'essence (pour la tronçonneuse électroportative un plein fait un jour de travail, voire plus) ;
- retendre régulièrement la chaîne, car c'est fait automatiquement.

Avec le taille-haie, c'est également au moins la première phase qui est évitée.

Moyennant une adaptation de l'organisation des chantiers, pour pouvoir recharger les batteries chaque soir et les stocker dans un local sec pendant les périodes non utilisées, il y a là un gain de temps évident. De plus, l'absence de vibrations, de dégagement de chaleur et de gaz d'échappement réduit le stress et compense largement un avancement un peu plus lent en dépressage/dégagement du fait d'une vitesse de coupe un peu plus faible. En plus,

les batteries et le moteur ne nécessitent aucun entretien alors que les perches thermiques exigent un entretien régulier du moteur, ce qui représente un coût souvent oublié dans le calcul des performances économiques à moyen terme.

Une comparaison des coûts cumulés sur trois ans a été faite entre outil thermique et électroportatif. Elle a pris en compte le coût d'investissement initial, le ravitaillement en carburant (mix) ou électricité et en lubrifiant ainsi que le temps passé à ce ravitaillement. Cette comparaison a permis de montrer que, malgré un coût d'investissement des outils électroportatifs dépassant d'un facteur 7 celui des outils thermiques, les premiers permettent de réaliser une économie sur 3 ans de l'ordre de 500 à 1000 Euros H.T. par engin. A cela on peut ajouter un gain « immatériel » ou humain difficilement chiffrable, mais réel. Ce gain, non négligeable, ne doit pas être occulté par la seule économie « matérielle ».

Identification des risques

Il n'y a pas de réel changement de risque par rapport à l'utilisation des outils à moteur thermique. La mise en route à l'arrêt est à tout moment possible, tant que l'interrupteur situé sur la batterie n'est pas mis sur « arrêt ». Il y a là une différence importante avec l'outil thermique, dont le bruit moteur met l'utilisateur inconsciemment en garde contre le danger d'un démarrage possible de la tronçonneuse, dès que l'on appuie sur la gâchette. Comme l'outil électroportatif ne fait pas de bruit, on peut oublier par moment qu'il est prêt au démarrage dès que l'on appuie sur la gâchette. L'outil peut alors être mis en route involontairement si la main est positionnée sur la poignée, par simple appui sur la gâchette de démarrage. Lors de la prise en main de l'outil, il est donc nécessaire de

s'habituer à ce changement de fonctionnement et de développer de nouveaux réflexes. Il faut couper l'alimentation lors des déplacements sans utilisation de la machine.

Il faut éviter de poser la canne par terre au risque de marcher dessus, car elle est en carbone et peut casser (ou faire tomber quelqu'un). Le câble d'alimentation de la perche est renforcé, ce qui devrait éviter de le dénuder accidentellement. Dans la pratique, il est conseillé d'avoir toujours un câble de rechange dans le camion de chantier.

Formation

Pour l'utilisateur, une demi-journée d'initiation sur le chantier est indispensable pour une bonne prise en main. Cette formation devrait couvrir l'apprentissage des principes d'utilisation et d'entretien de la tronçonneuse électrique sur perche (composants de la machine, éléments de sécurité, risques, principes d'organisation et distances de sécurité entre opérateurs, principes d'ergonomie, lubrification, affûtage...).

Pour les futurs encadrants de chantier sans expérience en la matière, une petite formation sur l'organisation des chantiers utilisant la tronçonneuse électrique sur perche doit leur permettre de bien adapter les outils à utiliser par rapport aux chantiers à réaliser.

Conclusions

Ces deux exemples montrent qu'il ne faut pas comparer trop sommairement les engins électroportatifs avec le matériel thermique, car l'avancée technique ne se joue pas uniquement sur un critère, mais sur un ensemble de critères, même si un ou deux d'entre eux sont un peu moins performants. Il faut aussi prendre le temps de s'approprier le matériel, car il s'utilise un peu différemment du matériel thermique.

La nouvelle génération d'outils portés par les ouvriers forestiers marque le début d'une nouvelle ère dans la « petite mécanisation ». Elle permettra d'améliorer les critères de santé et sécurité au travail et de réduire la pénibilité, sans renoncer à la performance. À l'avenir d'autres outils viendront compléter la nouvelle gamme de petits outils. Nous ferons part de ces évolutions dès que des tests en conditions de chantiers courants auront été concluants.

Erwin ULRICH

ONF, DTCB
département R & D

Yvan SEVRÉE

ONF, DT Centre-Ouest Auvergne
Limousin
direction Forêt

Pascal GEORGE

ONF, DT Lorraine
mis à disposition R&D

Matthieu MAUVEZIN

ONF, DT Lorraine
Agence Travaux

François TROTET

ONF, agence Pays de Loire
UT Vendée

Florence MANOILINE

ONF, DRH
département Action Sanitaire et
Sociale

Jean-Michel MOUREY

ONF, DEDD
département Développement Durable

Pour plus ample information

Le personnel de l'ONF peut consulter les fiches N°2 « Dégagement et dépressage avec tronçonneuse électrique sur perche » sur Intranet

http://intraforet.onf.fr/dg/dmd/res-comp/restrav/sommaire/fiches_tecniques_me/IF00000238f3

Dossier



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

Suite et fin du dossier sur la télédétection, commencé au précédent numéro de nos Rendez-vous techniques (n° 31, pp. 17-73). Sans rappeler l'ensemble du sommaire, nous renvoyons en particulier à l'article d'ouverture (RDVT 31 pp. 19-31), où Anne Jolly donne les principes de base pour comprendre la télédétection, ce qu'elle permet. . . et ne permet pas. Ceci étant, chacun des articles du dossier peut être lu indépendamment des autres. Les applications présentées ici complètent le panorama, sans épuiser la question.

- p. 26 La carte forestière version 2 de l'IFN – De la réalisation à la diffusion
par Thierry Touzet
- p. 31 Corbières Orientales : cartographie des habitats d'espèces de la directive oiseaux à partir de données de télédétection
par Vincent Parmain
- p. 39 Le Lidar, outil performant pour cartographier la hauteur des peuplements forestiers
Par Jérôme Bock, Jean-Pierre Renaud, Gregory Dez, Flora Martins, Murielle Leroy, Etienne Dambrine, Jean-Luc Dupouey
- p. 45 La cartographie de la sensibilité de la végétation aux incendies de forêts en région méditerranéenne - Apport et limites d'usage des images satellites
par Yvon Duché, Rémi Savazzi et Benoît Reymond
- p. 62 Applications de télédétection en Guyane : une histoire de diversité
par Pierre Joubert, Stéphane Guitet, Guilhem Debarros, Olivier Brunaux, Sophie Pithon et Adrien Corvisi

La carte forestière version 2 de l'IFN De la réalisation à la diffusion

L'inventaire forestier national (IFN) réalise depuis 1986 une carte des forêts françaises à partir de photographies aériennes en infrarouge couleur. Signé fin 2006, un partenariat avec l'Institut géographique national (IGN) a fait prendre un tournant majeur à l'établissement dans son processus de réalisation de la carte forestière et a conduit à la création d'un nouveau produit : la carte forestière version 2. L'élaboration de cette base de données cartographique des formations végétales forestières et naturelles, tout comme sa description et ses modalités d'obtention sont décrites dans cet article.

Spécifications de la carte forestière version 2

Fin 2006, une convention de partenariat a été signée entre l'IFN et l'IGN afin de produire une couche « végétation » commune à partir de la BD ORTHO® et ainsi garantir une cohérence entre la couche végétation de la BD TOPO® (composante topographique du Référentiel à Grande Échelle) et la cartographie des types de formation végétale de l'IFN.

Toujours réalisée sur une base départementale et avec un rythme décennal, cette nouvelle carte s'appuie sur une nomenclature nationale hiérarchique à quatre niveaux : couverture du sol, densité du couvert, composition d'ensemble, essences. La surface minimale de représentation est de 50 ares (seuil de surface minimale de la définition internationale de la forêt) avec indication de composition dès

le seuil minimal et une caractérisation des essences à partir de deux hectares pour les massifs boisés.

En décembre 2010, 28 départements ont été réalisés selon ces nouvelles spécifications et l'ensemble de la France métropolitaine sera couvert vers 2016 environ.

Le référentiel image : la BD ORTHO® infrarouge couleur

Les photo-interprètes de l'IFN réalisent la carte forestière en deux étapes successives. La première est semi-automatique et utilise un logiciel spécifique développé par l'IGN. La seconde s'appuie sur une photo-interprétation traditionnelle et utilise des applications métiers développées par l'IFN sur systèmes d'information géographique (SIG) et des contrôles sur le terrain. Le processus complet est schématisé figure 1.

L'infrarouge (fausses) couleurs (IRC) est le type d'image le plus approprié pour l'étude de la végétation et de son environnement. Tous les types de couverture du sol peuvent y être distingués sans difficulté et, même si toutes les espèces forestières n'y sont pas traduites par une couleur spécifique, l'infrarouge couleurs reste à ce jour l'outil le plus riche d'informations pour l'étude de la végétation. La création des informations repose donc sur l'interprétation d'orthophotoplans départementaux réalisés à partir d'images aériennes infrarouge couleur et plus précisément sur le produit IGN BD ORTHO® infrarouge couleur réalisé depuis 2005.

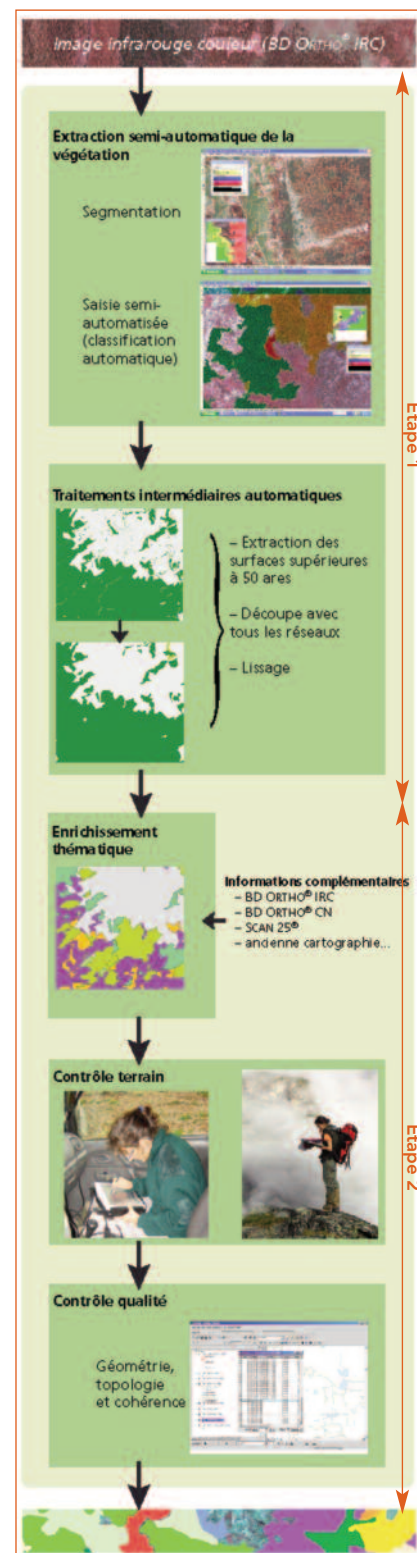


Fig. 1 : les deux grandes étapes de réalisation de la carte forestière

Première étape de réalisation : la couche multi-thème « Végétation »

La première étape est commune à l'IFN et à l'IGN. Elle permet la production simultanée de la couche végétation de la BD TOPO® (produit IGN – « F- Occupation du sol : végétation » version 2) et de la carte des types de formations végétales (produit IFN – carte forestière version 2). La nomenclature et les définitions initiales de la BD TOPO® ont été modifiées pour permettre l'interopérabilité avec le produit cartographique IFN.

Lors de cette étape, sont saisies les limites de la forêt, des landes et des formations herbacées ainsi que celles des autres éléments arborés constitutifs de la couche végétation de la BD TOPO® : les bosquets (appelés bois dans la nomenclature BD TOPO®), les haies, les vergers et certains arbres isolés.

Ce travail de saisie est réalisé par l'IFN pour l'espace rural, puis par l'IGN pour l'espace urbain dense (en moyenne 5 % de la superficie départementale). Ce travail IGN ne concerne guère la description des formations végétales : il s'agit de l'identification des arbres de villes ou des espaces d'agrément, constituants à part entière de la couche végétation de la BD TOPO® et de superficies bien souvent inférieures à 50 ares.

La chaîne de production s'appuie sur plusieurs processus automatiques ou semi-automatiques développés à partir des travaux de recherche des laboratoires MATIS et COGIT de l'IGN.

Extraction semi-automatique de la végétation

Des processus d'extraction et de traitements d'images sont implémentés dans une application dédiée à la saisie en mode image appelée SEVE® (Système d'Extraction de la Végétation) :

■ **la segmentation** : la méthode de segmentation multi-échelles d'images est utilisée pour individualiser les objets allant de l'arbre isolé aux massifs forestiers de grande surface. Ce processus permet de délimiter des zones relativement homogènes en intensité, en texture ou en couleur. Trois échelles significatives de description sont utilisées : une échelle à laquelle les arbres isolés sont individualisés, une échelle moyenne (haies, bosquets...) et une grande échelle à laquelle les massifs forestiers sont agglomérés. Cette grande échelle permet également des généralisations de zones de végétation clairsemée comme les forêts ouvertes ou les landes. À partir de l'image segmentée, il est alors possible de sélectionner les entités correspondant à la couche arborée sans avoir à redessiner les contours, la sélection s'appuyant sur les contours de la segmentation.

■ **La classification automatique** : le processus de classification utilise la méthode d'apprentissage supervisé. Il est caractérisé par un apprentissage rapide (saisie manuelle de la végétation selon les thèmes définis sur quelques dalles kilométriques représentatives d'un ou plusieurs thèmes de végétation arborée) suivi de l'attribution automatique des classes par la méthode des kPPV (k Plus Proches Voisins, ou en anglais *kNN k-nearest neighbors*) pour les autres dalles kilométriques sur demande de l'opérateur. Les mêmes bases d'apprentissage peuvent être utilisées par plusieurs opérateurs et réalisent une pré-saisie qui est ensuite complétée manuellement.

■ **Présélection** à partir de couche préexistante : ce processus fait intervenir les données de la couche végétation de la BD TOPO® déjà réalisée et pour laquelle une mise à jour est envisagée. Les données sont représentées par des

masques de végétation en mode image (noir = bois, blanc = autre). SEVE® permet, si les données sont disponibles, de pré-saisir la végétation en faisant correspondre la couche végétation de la BD TOPO® avec les zones délimitées par la segmentation. Le but est d'importer un masque dans le secteur de travail ce qui aura pour effet de simuler une saisie. La saisie est ensuite complétée manuellement.

Profitant de la segmentation, un ensemble de grands thèmes est caractérisé dès cette première étape : forêt fermée, forêt ouverte, landes ligneuses, formations herbacées, vergers. L'information à ce stade est dans la même géométrie que la source image (pixel de 0,5 m) stockée en format raster.

Traitements intermédiaires automatiques

Cette information est ensuite traitée afin d'obtenir une restitution en mode vectoriel. Le traitement vise à simplifier la géométrie (lissage des contours des massifs boisés) pour manipuler plus facilement les objets tout en garantissant une précision de positionnement inférieure à dix mètres. Un classement automatique des objets permet de séparer les forêts, les haies et alignements, les bosquets (massifs arborés d'une surface compris entre 5 ares et 50 ares) et les arbres isolés. La détection des haies est réalisée avec un algorithme enchaînant des calculs de géométrie algorithmiques (dilatations, érosions, mesures d'élongation, de concavité et de densité). Ensuite une mise en cohérence avec les réseaux routiers, hydrographiques et ferrés de la BD TOPO® est partiellement réalisée. Cette opération fait appel aux principes de l'appariement automatiques de réseaux élaborés au laboratoire COGIT de l'IGN.

Deuxième étape : la carte forestière

À l'issue de la première étape, l'IFN dispose d'un canevas thématique où les espaces forestiers et semi-naturels (landes) de plus de 50 ares, relevant de la carte forestière, sont isolés des autres éléments arborés comme les bosquets ou les vergers, « hors spécifications ».

Enrichissement thématique : la nomenclature

La carte forestière repose sur l'estimation par le photo-interprète des seuils de densité de couvert des arbres. Les plus utilisés sont :

- le seuil de 10 % de couvert absolu des arbres, qui permet de séparer la forêt des autres types de formations végétales, notamment les landes ;
- le seuil de 40 % de couvert absolu des arbres, qui sépare la forêt ouverte et la forêt fermée ;

- le seuil de 75 % de couvert libre relatif des arbres, qui détermine la notion de pureté d'un peuplement selon sa composition ou son essence. Le couvert libre correspond, le peuplement étant vu de dessus, à la surface des houppiers ayant accès à la lumière. Il est qualifié de relatif quand on détermine la proportion d'un sous-peuplement (ex : résineux ou feuillus) dans le couvert libre total.

À l'intérieur des zones supérieures à 50 ares sont cartographiés des types de formation végétale. Un type de formation végétale est un ensemble forestier ou semi-naturel (landes ligneuses, formations herbacées) continu ou discontinu, qui présente une certaine unité pour la couverture et l'utilisation du sol, pour la densité du couvert et pour la composition en essences.

La nomenclature mise en œuvre (figure 2) se décline de deux façons selon les seuils de surface :

- entre 50 ares et 2 ha : cartographie de la densité de végétation (forêt ouverte/forêt fermée) et de la composition (feuillue/résineuse) ;
- au-delà de 2 ha (forêt fermée seulement) : distinction des essences pures par estimation du seuil de 75 % de couvert libre relatif des arbres de même essence.

Il est à noter que la variable d'entrée dans la nomenclature est différente de celle de la version initiale de la carte forestière. Les spécifications de la version 1 s'appuyaient essentiellement sur la structure des peuplements (futaie, taillis, taillis sous futaie...). Maintenant, la couverture du sol puis la composition en essences correspondent à l'enchaînement dans l'arbre de détermination d'un peuplement. Ce changement a été décidé

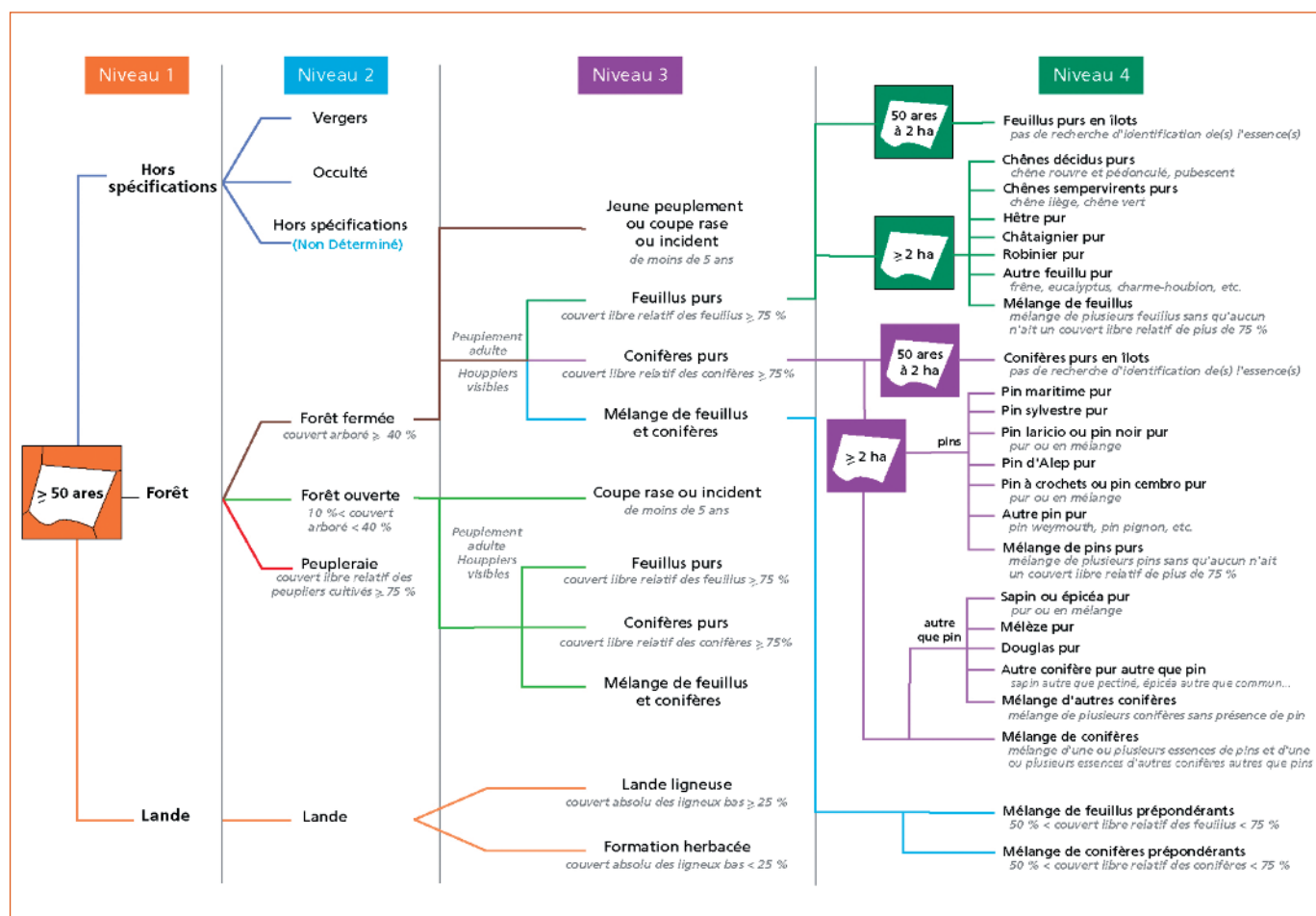


Fig. 2 : principe de la nomenclature utilisée pour l'établissement de la carte forestière

pour mieux répondre aux besoins de l'ensemble des utilisateurs, mais également pour être en adéquation avec les pays qui élaborent une carte forestière. Cette décision rend le produit plus homogène sur l'ensemble du territoire, la structure du peuplement étant une variable difficile à coder et qui très souvent ne donnait pas satisfaction à l'utilisateur final. En conséquence, contrairement à la version 1, la nomenclature est identique pour tous les départements et permet d'assurer une continuité d'interprétation entre départements voisins. Le seuil minimum de représentation est ramené de 2,25 ha à 0,5 ha pour coller à la définition internationale de la forêt.

S'aider des autres sources d'information

Lors de cette seconde étape, des informations complémentaires peuvent fournir une aide précieuse à l'interprétation. Il s'agit des données statistiques IFN, de la cartographie forestière IFN version 1, d'autres types d'images comme la BD ORTHO® antérieure (de 5 ans) à la référence utilisée, mais aussi les photographies IFN des cycles précédents. D'autres sources d'information peuvent également être consultées telles le SCAN 25®, les cartes géologiques, pédologiques, phytosociologiques, les guides de typologie des stations forestières ou encore le recueil d'informations sur l'écologie des espèces.

Notons encore que lorsque la différenciation entre deux peuplements est progressive, on parle alors de limites « floues », le photo-interprète, qui dispose d'une nomenclature précise, fixera une limite selon le critère de plus grande vraisemblance et consultera l'équipe de travail pour obtenir un avis partagé. L'activité de photo-interprétation laisse une place à la subjectivité que les protocoles ne peuvent effacer. La carte forestière reste un produit d'experts.

Enfin, des tournées de vérification sur le terrain restent nécessaires pour confirmer ou infirmer certains types de formation difficilement identifiables sur écran. Elles représentent en-

Utilisation de la Carte forestière version 2 à l'ONF

(Note de la rédaction)

La carte forestière de l'IFN est surtout utilisée pour des études dans le domaine conventionnel ; son intérêt est de fournir la couverture forestière exhaustive d'un département, et pas seulement les forêts publiques. La normalisation des types de peuplement dans la version 2 permet désormais d'avoir des données plus homogènes d'un département à l'autre, et sur l'ensemble du territoire. Au passage, notons aussi que sa réalisation est maintenant indépendante de la production des résultats dendrométriques.

En DT Méditerranée, cette nouvelle version est très utilisée (comme l'était la V1) pour les cartes de combustibilité de la végétation : l'article de Duché *et al.* dans ce dossier en donne deux exemples. Non seulement elle y est utilisée, mais elle a aussi été vérifiée pour le compte du Comité régional de l'information géographique. Les points forts : bonne géométrie (bien meilleure que celle de la V1) et compatibilité avec la BD Topo® IGN. La seule véritable réserve concerne le rythme de mise à jour, prévu tous les 10 ans alors que la BD Ortho® de l'IGN est renouvelée tous les 5 ans. Dans le détail, on constate aussi une petite hétérogénéité dans la forme des limites (différences visuelles entre les tracés manuels et ce qui résulte des traitements automatiques) et quelques erreurs de nomenclature, notamment sur les versants à l'ombre et dans les fonds de vallons.

Les types forestiers de la carte IFN correspondent bien aux grands zonages qu'un aménagiste réalise préalablement à la définition opérationnelle des types de peuplement. Pour autant, la carte forestière IFN ne saurait se substituer à l'analyse des peuplements dans le cadre des révisions d'aménagement. Rappelons aussi que les photographies aériennes (à la base du travail de l'IFN) restent indispensables pour le suivi de la gestion forestière.

viron un tiers du temps consacré à la réalisation de la carte forestière proprement dite.

Les contrôles

Les contrôles de cohérence entre types de formation végétale, mais aussi entre la forêt et les autres objets de la couche végétation sont assurés pendant la saisie au travers d'une application développée sur SIG par l'IFN appelée PAPI® (Programme d'Aide à la Photo-Interprétation). Cette application est complétée par un autre programme de contrôles topologiques et de vérification des types (qualité de la photo-interprétation) sur ArcGis 9.3 (éditeur : Esri) également développé par l'IFN :

- concernant les contrôles topologiques : contrôle des auto-intersections, des superpositions, des vides ;
- concernant les contrôles sémantiques : contrôle des cohérences entre types, sélection d'échantillons tirés à l'intérieur d'une famille de types de formation végétale en vue d'une réinterprétation...

Ces ultimes contrôles permettent le stockage de la carte forestière sous une forme vecteur respectant les recommandations de l'Open Geospatial Consortium (OGC) dans le système gestionnaire de base de données (SGBD) open-source PostgreSQL et son module spatial PostGIS. Le modèle et la structuration des données permettent de garantir l'échange et l'interopérabilité avec d'autres couches de données. Les outils et les développements utilisés tout au long de la chaîne de production permettent de manipuler et de traiter des données surfaciques complexes et aussi de grands volumes de données.

Comment disposer de la carte forestière IFN version 2 ?

La carte forestière version 2 est actuellement disponible pour environ un tiers des départements (figure 3). Ceux dont la carte version 1 était la plus ancienne ont été réalisés prioritairement.

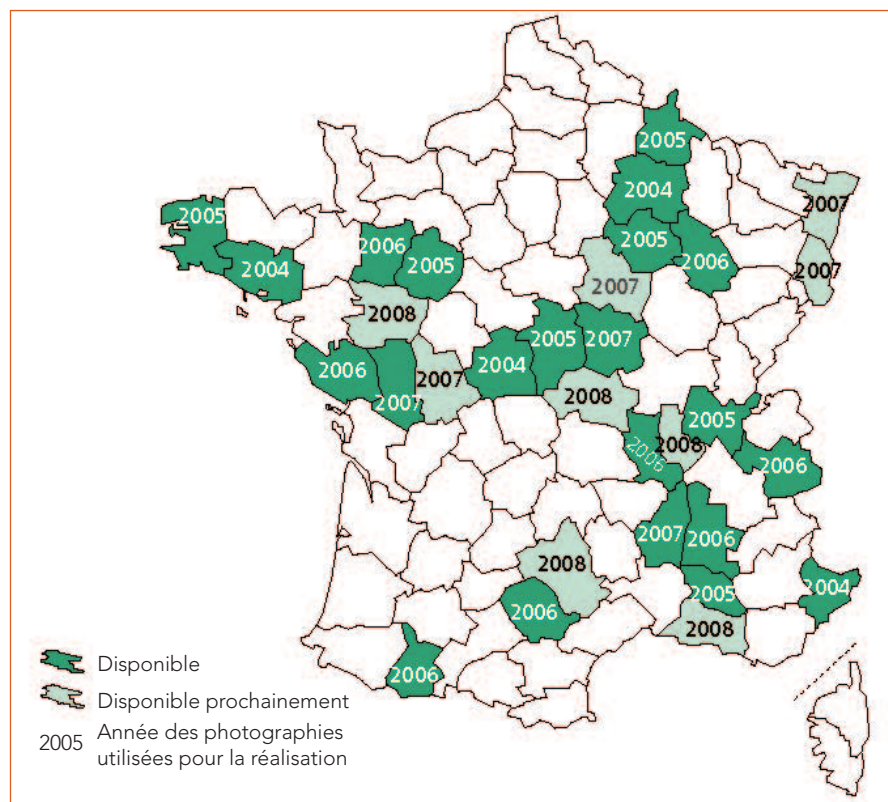


Fig. 3 : disponibilité de la carte forestière version 2 (état fin 2010)

Différents supports

Cette carte est diffusée sous forme d'une couche d'information géographique au format *géodatabase* ou *shapefile* prête à être intégrée dans son propre système d'information géographique. Cette couche peut être acquise pour l'ensemble d'un département ou pour une zone d'intérêt quelle que soit sa superficie (communauté de communes, bassin d'approvisionnement, zone protégée, etc.). Le coût est lié à la superficie sur laquelle l'IFN apporte une information précise, c'est-à-dire la superficie des espaces forestiers et semi-naturels, communément appelé « surface cartographiée ».

La nouvelle carte forestière peut également être consultée sur le site Internet de l'établissement dans un module de cartographie dynamique présentant de nombreuses fonctionnalités (gestion de l'ordre d'affichage des couches, de la transparence, outils d'interrogation,

etc.). Sa disponibilité, dans un second temps, sur le Géoportail est à l'étude.

Une réflexion est également en cours, conjointement avec l'IGN, pour juger de la pertinence de diffuser cette information sous la forme d'une carte papier.

Des produits dérivés

L'IFN propose de réaliser différents traitements géomatiques basés sur cette carte, faisant intervenir ou non d'autres sources d'information : organisation spatiale du couvert forestier, quantification des lisières forêt/non forêt, part de la forêt protégée, surface de forêt par habitant ou sous influence urbaine, caractérisation des surfaces forestières incendiées, etc.

De la donnée dans un tableur à une interface Web spécifique de saisie et de génération automatique de rapports, toutes les formes de restitution de l'information sont *a priori* possibles.

Conclusion

Fond référentiel commun avec l'IGN, amélioration de la précision, nomenclature nationale plus détaillée s'appuyant davantage sur la composition en essence des peuplements, tels sont les atouts de la carte forestière version 2 par rapport à la précédente. De ce fait ses utilisations sont multiples. Destinée en premier lieu aux gestionnaires d'espaces forestiers, elle intéresse de plus en plus les acteurs liés à la biodiversité, à l'organisation des paysages et plus généralement à tous ceux en charge de l'aménagement du territoire.

Thierry TOUZET

Responsable de la production
de la carte forestière
IFN - Service information
géographique

Bibliographie

Braun A., Halbeq X., Lecordix F., Le Gallic J.-M., Prigent F., 2007. Une nouvelle chaîne de production pour les cartes topographiques à l'IGN, CFC n° 194

Guigues L., Trias-Sanz R., Chahata N., Taillandier F., Deveau M., 2006. Segmentation multi-échelles d'images : théorie et applications. Bulletin d'information scientifique & technique de l'IGN n°75 (2006/1), pp. 41-58

Duprez M., Lucas S., 2008. L'IF n°20, Nouvelle cartographie forestière – De la production à l'utilisation, IFN, 8 p. < en ligne : http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IF20_carto.pdf >

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 >

Corbières Orientales : cartographie des habitats d'espèces de la directive oiseaux à partir de données de télédétection

À l'échelle d'un site Natura 2000 individuel, la cartographie des habitats met le plus souvent en œuvre des méthodes « terrestres », encore que la photointerprétation puisse être un préalable précieux. Dans certains cas cependant, le recours au traitement d'images satellitales s'avère la méthode la plus pertinente. C'est le cas ici pour des sites de grande extension où l'enjeu consiste à cartographier la mosaïque des formations végétales selon des critères d'intérêt ornithologique. Sur les Corbières Orientales, Vincent Parmain a mis au point une méthode qui a pu être consolidée et appliquée sur plusieurs sites voisins.

La production de Documents d'objectifs pour les sites Natura 2000 de grande superficie, telles le Pays de Sault (71 500 ha) ou les Corbières Orientales (25 400 ha), suppose la réalisation rapide et avec des moyens économes de cartographies des habitats naturels ou des habitats d'espèces.

Nous avons été sollicités par la LPO de l'Aude, agissant en tant qu'opérateur du Document d'objectifs (Docob) du site des Corbières Occidentales, pour réaliser une cartographie des habitats d'oiseaux. Le site relève en effet de la Directive Oiseaux et c'est à ce titre qu'il a été désigné comme Zone de Protection Spéciale (ZPS) au sein du Réseau Natura 2000 : l'aigle de Bonelli, le bruant ortolan, le cochevis de Tekla, la fauvette pitchou et le pipit rousseline sont les principaux nicheurs qui ont justifié cette désignation. La ZPS des Corbières Orientales se situe dans le département de l'Aude, sur la partie la plus orientale du massif des Corbières, et s'intègre dans un réseau dense de ZPS couvrant tout le sud du département et le littoral (figure 1).

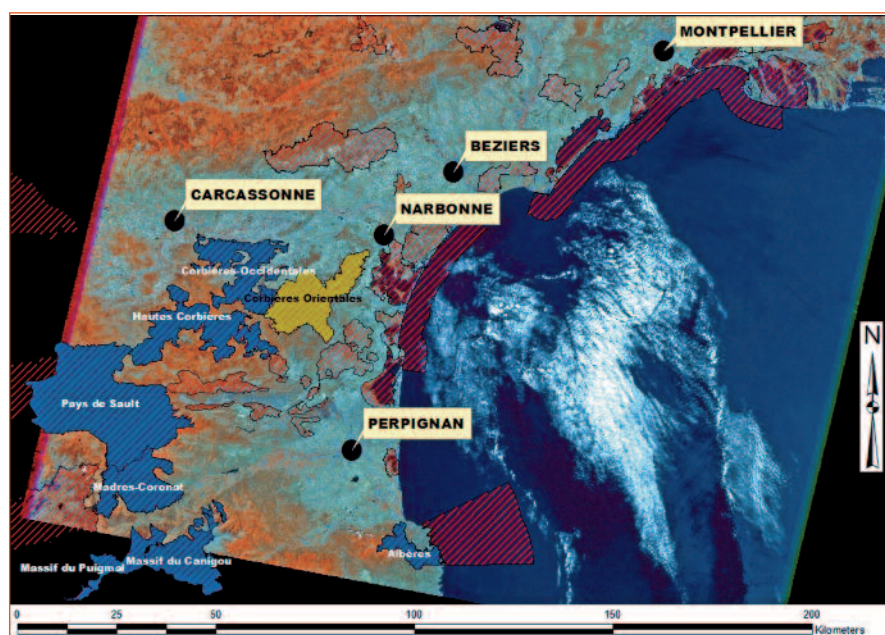


Fig. 1 : localisation de la ZPS des Corbières Orientales (jaune), parmi l'ensemble des ZPS du Languedoc-Roussillon (hachures), dont la plupart sont aussi, en tout ou partie, des Zones Spéciales de Conservation (ZSC) en instance de désignation au titre de la Directive Habitat ; en bleu, les autres ZPS traitées par la méthode décrite dans l'article

Le fond de carte est constitué par l'image Landsat ETM+ utilisée qui couvre une emprise de 170kmx185km. Le canal 7 est codé en rouge, le canal 5 en vert et le canal 4 en bleu.

L'amplitude altitudinale y est modeste : de 35 à 630 m environ. Les pentes sont modérées, mais de nombreuses configurations d'op-

positions de versants sont à noter. Les végétations sont essentiellement sclérophylles et de faible élévation.

La cartographie des habitats étant demandée sous la forme d'une carte des structures de végétations (principal facteur de répartition et d'abondance des différentes espèces, en particulier de passe-reaux), nous nous sommes tout d'abord orientés vers la valorisation de la base CORINE Land Cover. Ces données d'inventaire biophysique de l'occupation du sol reposent sur une nomenclature (homogène pour les 38 pays du continent européen concernés) en trois niveaux emboîtés, le niveau le plus fin pouvant constituer dans certains cas une information préalable utile à la cartographie des milieux naturels pour les documents d'objectifs. Destinées à une utilisation à l'échelle du 1/100 000 (la taille minimale du zonage élémentaire étant de 25 ha), elles ne correspondaient malheureusement pas aux attentes du commanditaire, celui-ci souhaitant bénéficier d'un rendu au 1/25 000. Par ailleurs les données fournies par l'IFN, quant à elles, ne proposent pas une typologie adaptée à notre objet.

C'est pourquoi nous avons développé une **méthodologie spécifique basée sur la télédétection** à partir d'image satellite à moyenne résolution : nous en présentons rapidement la démarche avant d'en expliquer chaque étape au long de cet article.

Démarche adoptée

Nous avons mis au point notre démarche en tenant compte de la nature des informations recherchées, mais aussi des exigences du projet en termes de délais et de coûts de réalisation. Dans un premier temps, nous avons recherché l'image satellite la plus pertinente au regard des caractéristiques du terrain, des besoins de cartographie (types de végétation, échelle d'utilisation des résultats) et du budget disponible. Cette image a ensuite fait l'objet de traitements préliminaires afin d'optimiser son potentiel en informations.

La cartographie des types de végétation, cœur de notre analyse, a été décomposée en deux grandes étapes.

■ Ne disposant pas de références de terrain pertinentes pour étalonner le traitement de l'image, nous avons dû réaliser un premier traitement totalement automatique pour obtenir une ébauche de cartographie, à laquelle nous avons intégré des informations utiles qui, techniquement, ne pourraient pas ressortir de l'analyse de l'image satellite : réseau hydrographique modélisé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), mais aussi des éléments comme les vignes ou les falaises, bien repérables sur la BDOrtho® IGN. Sur cette base, nous avons déterminé les points de relevés ornithologiques de terrain (écoute et description de végétation selon la typologie LPO), échantillonnage ciblé par souci d'économie sur les secteurs à végétation ouverte. Les échantillons de référence pour les autres types de végétation ont été repérés par photointerprétation sur la BDOrtho® IGN.

■ L'ensemble de ces échantillons de référence a permis un second traitement de l'image par classification dite supervisée, pour obtenir la carte des types de végétation sur l'ensemble de la ZPS, dont nous avons évalué la qualité sur une centaine de points de contrôle. La cartographie finale intègre à la fois les résultats de cette classification et les informations complémentaires issues de la photointerprétation et du traitement du MNT.

Image satellite utilisée pour décrire le milieu naturel

Si les éléments relatifs au milieu physique sont aisément disponibles à partir de données ou de modèles existants et éprouvés (BDAlti® IGN, AURHELY® Météo-France), il n'en va pas de même pour les données d'occupation du sol tout particulièrement indispensables dans une étude environnementale.

La réalisation de cartes de description de la couverture végétale est habituellement effectuée par observation directe du terrain ou/et par photointerprétation d'une image aérienne (orthorectifiée ou non). Ces méthodes simples sont pratiquées et ont fait leurs preuves depuis longtemps, mais nécessitent des temps d'investigation relativement longs ; on estime le rendement normal d'un opérateur de terrain à 150 ha/jour et celui d'un photointerprète à 750 ha/jour.

C'est pourquoi nous avons cherché à développer une approche basée sur les techniques de télédétection, qui permettent d'appréhender rapidement des superficies importantes de façon homogène (en minimisant les biais liés aux observateurs) pour peu que l'on dispose de secteurs de référence pertinents à même de couvrir la totalité de la typologie que l'on souhaite utiliser.

Critères de choix

Les images à utiliser pour l'analyse doivent répondre à plusieurs critères. Tout d'abord, elles doivent couvrir la totalité de la zone d'étude. Dans le cas où plusieurs images sont nécessaires elles doivent avoir été obtenues sous des conditions d'élévation solaire identiques afin qu'un type de végétation donné présente les mêmes caractéristiques quelles que soient ses coordonnées.

Dans les secteurs à relief marqué, comme ici, il est également nécessaire de limiter le plus possible les effets de versants, en choisissant une image acquise à une date où l'élévation solaire est la plus forte possible. La date de prise de vue doit par ailleurs permettre de bien discriminer les formations recherchées.

Enfin, les images doivent posséder une résolution suffisante pour une restitution de l'analyse à l'échelle souhaitée (ici le 1/25 000) et avoir des caractéristiques spectrales permettant de bien discriminer les for-



Fig. 2 : extrait de la BDOrtho® (forêt de Fontfrède, Aude) présentant une limite de mosaïquage très visible (flèche)

mations recherchées. Dans notre cas, il était en particulier nécessaire de disposer d'informations dans l'infrarouge, domaine spectral le plus intéressant pour l'analyse de la végétation (voir dans le numéro 31 l'article de J.G. Boureau).

Les images aériennes proposées par l'IGN, dont la résolution serait bien adaptée (50 cm), ne permettent pas une analyse pertinente des couleurs et des nuances. Elles ne sont pas suffisamment homogènes : dans certains secteurs les limites de mosaïquage apparaissent nettement, notamment lorsque plusieurs missions aériennes ont été nécessaires pour couvrir un département (figure 2). Cette hétérogénéité, lorsqu'elle se produit sur la zone d'étude, rend l'interprétation visuelle délicate, mais surtout elle rend les données impropres à des traitements automatiques. De plus, sur notre site d'études, la version infrarouge couleur de cette donnée n'était pas disponible.

Nous nous sommes donc orientés vers l'utilisation d'images satellitaires qui répondent valablement aux critères relatifs aux conditions de prise de vue. Les caractéris-

tiques de résolution par contre sont variables en fonction des satellites (voir dans le numéro 31 l'article de A. Jolly) :

- Ikonos : 4 m en multispectral, 1 m pour le panchromatique ;
- Landsat 3 MSS : 80 m ;
- Landsat 7¹ ETM+ : 30 m en multispectral et 15 m pour le panchromatique ;
- Spot V : 2.5 à 10 m ou 20 m en multispectral.

Données retenues

En raison de leur disponibilité, de leur qualité acceptable en terme de résolution, du grand nombre de canaux disponibles et de la gratuité de leur acquisition, les images Landsat 7 ont été retenues pour cette étude. Ces images sont constituées d'un canal à 15 m de résolution spatiale (canal 8 - panchromatique), de 5 canaux de 30 m de résolution spatiale (canaux 1 = bleu, 2 = vert, 3 = rouge, 4 = proche infrarouge, 5 et 7 = moyen infrarouge) et d'un canal de 60 m de résolution spatiale (canal 6 = IR thermique). Chacune couvre une emprise de 170 km x 185 km (voir figure 1).

Les images fournies sont bien adap-

tées pour l'étude de l'occupation du sol, elles sont corrigées des effets atmosphériques principaux et orthorectifiées. L'image retenue pour le traitement a été prise le 13/08/2001, elle est exempte de couverture nuageuse ou de voile atmosphérique ; par ailleurs les végétations y apparaissent bien contrastées, à l'exception peut-être des zones de garrigue. La figure 3 présente une composition colorée des canaux 4/3/2 correspondant à une visualisation classique dite infrarouge fausses couleurs.

Tous les traitements spécifiques de télédétection ont été réalisés sous Erdas 9.2 ; les traitements de mise en forme ont été effectués sous Arcgis 9.2.

Analyse de l'image

Traitements préliminaires

L'image obtenue est tout d'abord rééchantillonnée à la résolution du canal panchromatique (15 m) ; ce rééchantillonnage ne consiste pas seulement en la division des pixels, mais incorpore également l'information liée à la couche panchromatique. Chaque pixel de 30 m de l'image multispectrale est subdivisé en 4 pixels de 15 m. La valeur radiométrique de chacun de ces pixels est alors calculée en tenant compte de la répartition des valeurs radiométriques des 4 pixels correspondants sur l'image panchromatique. La définition est ainsi améliorée tout en incorporant de l'information complémentaire, on parle alors de « fusion d'image ».

Afin de minimiser les effets du relief et de l'exposition sur les caractéristiques de l'image, un néocanal est généré pour le calcul de l'indice de végétation normalisé (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) ; c'est une transformation utilisant les canaux R et PIR qui pose

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R).$$

Cet indice exploite la propriété

¹ Les images Landsat sont disponibles depuis 1972 à partir des 6 satellites de la série ; seuls Landsat 5 et 7 sont encore aujourd'hui en service, bien que Landsat 7 soit affecté d'une panne du miroir oscillant depuis 2003 (Landsat 6 s'est abîmé en mer lors du lancement). Les images sont disponibles sur le site suivant : http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Satellite_Products

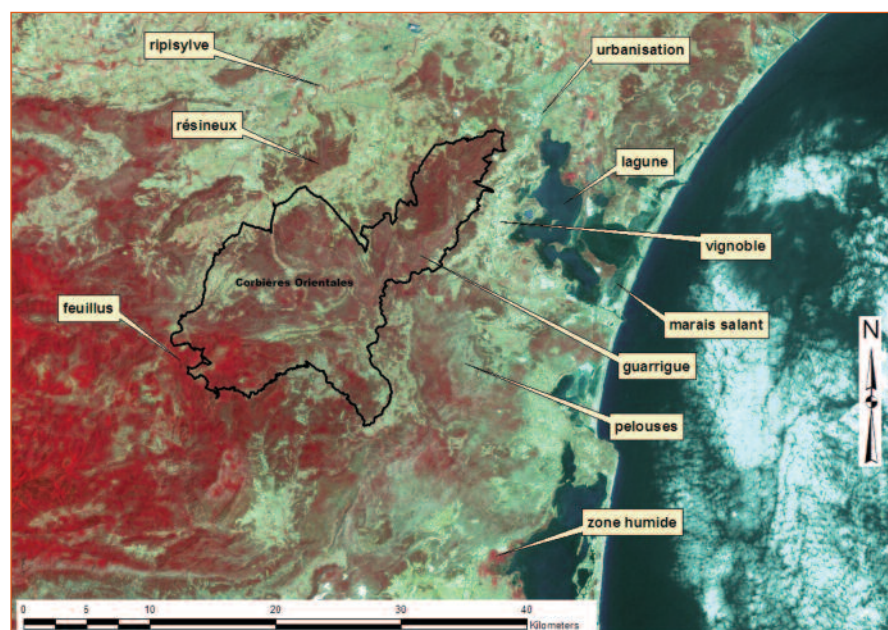


Fig. 3 : composition colorée de l'image Landsat ETM+ utilisée ; le canal 4 est codé en rouge, le canal 3 en vert et le canal 2 en bleu

que possède la chlorophylle d'absorber le rayonnement rouge et il est peu dépendant de l'illumination (exposition) pour une scène donnée. De manière simpliste, il peut être interprété comme un indicateur de la quantité de biomasse chlorophyllienne². La couche NDVI est ajoutée à l'image préparée précédemment.

Précartographie préalable aux relevés de terrain

Comme nous ne disposions initialement pas de données de référence sur le secteur d'étude à même de nous fournir des secteurs d'apprentissage, nous avons choisi de réaliser une première approche purement spectrale par classification non supervisée. L'objectif de cette première phase n'est pas à proprement parler de réaliser une cartographie des structures de végétation, mais simplement de visualiser l'hétérogénéité spectrale de l'image de la zone d'étude.

Nous avons utilisé, pour cette classi-

fication non supervisée, la méthode ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) que nous avons appliquée à une composition colorée à trois canaux (vert, rouge, proche infrarouge, voir figure 3) combinaison considérée comme significative dans l'étude de la végétation. Les classes résultant de cette opération sont ensuite analysées visuellement par comparaison avec l'orthophoto IGN 2003 (BDOrtho®) pour leur attribuer une signification et pour effectuer des regroupements.

La précartographie obtenue (figure 4) est indicative du contenu statistique de l'image analysée, mais n'a pas vocation à constituer la cartographie définitive ; son objectif est de servir de support à un tirage stratifié des points d'écoute³ qui seront également des points de description de la végétation. Elle représente les plages de végétation « homogènes » par leurs caractéristiques spectrales issues de l'image et supposées homogènes sur le terrain.

Données complémentaires et campagne de terrain

En raison d'une résolution limitée, il est apparu rapidement que la seule analyse de l'image Landsat 7 ne suffirait pas à rendre compte de toutes les structures de végétation.

Intégration d'informations complémentaires

La difficulté concerne en particulier les secteurs de vigne cultivée, dont la réponse spectrale est souvent analogue à celle de végétations naturelles. La résolution des images Landsat 7 ne permet pas de mettre en évidence les motifs répétitifs (texture) formés par les alignements de vigne. En effet, la taille des plants et l'intervalle entre les lignes sont bien inférieurs à la résolution de l'image. C'est pourquoi, et pour gagner un temps précieux lors des traitements ultérieurs nous avons décidé de digitaliser manuellement les vignobles à partir de l'orthophoto IGN 2003. Cette donnée a été incorporée à la précartographie. Les secteurs de falaises ont également été extraits par cette procédure.

La connaissance du réseau hydrographique pouvait également constituer une source d'information complémentaire utile pour la création de la carte finale. C'est donc à ce stade que nous avons généré le réseau hydrographique du secteur d'étude, à partir du MNT⁴ et en modélisant les écoulements sur les bassins versants. La méthode que nous avons utilisée (méthode Stahler) apporte de plus une information liée au nombre de confluences enregistrées tout au long d'un écoulement ; on dispose ainsi d'une indication sur l'importance en un point donné du cours d'eau. Cette couche est intégrée à la cartographie finale.

² En toute rigueur, le NDVI devrait être calculé après avoir réalisé une correction des effets atmosphériques, dont l'influence peut être différente d'un canal à l'autre, mais surtout d'une image à l'autre lorsque plusieurs images sont nécessaires. Une seule image étant ici utilisée, il reste possible d'utiliser cet indice comme un NDVI classique.

³ Pour l'inventaire ornithologique nécessaire par ailleurs à l'élaboration du Docob

⁴ Le MNT utilisé ici est la BDAlti® de l'IGN, décrivant le relief du territoire selon une maille carrée de 50mx50m.

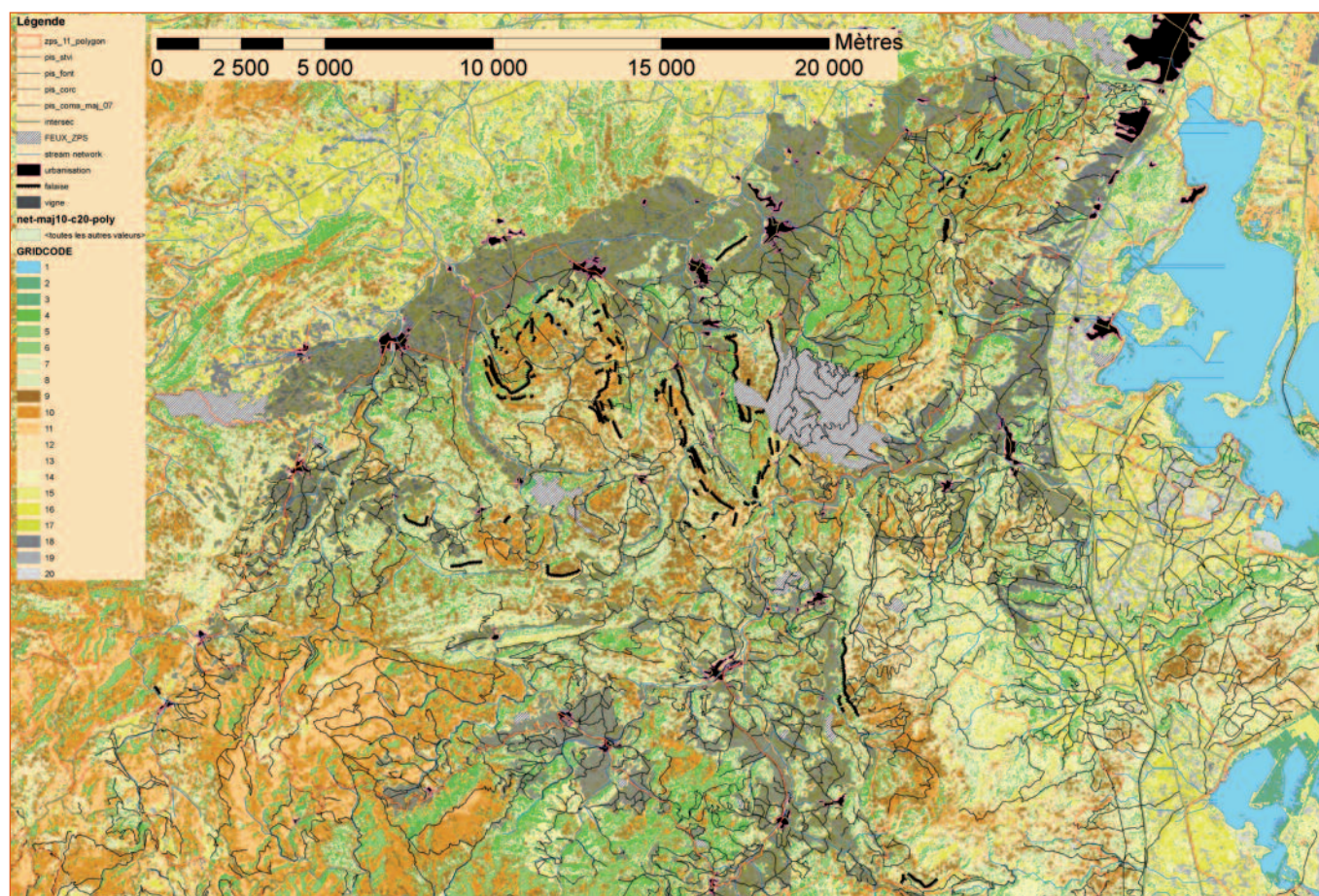


Fig. 4 : précartographie d'après les caractéristiques spectrales de la végétation

Typologie des structures de végétation, « points d'apprentissage »

La typologie optimale recherchée pour la construction de la cartographie (tableau 1 page suivante) est celle qu'utilise la LPO dans le cadre de sa méthode éprouvée d'inventaire ornithologique. Elle se fonde sur les structures de végétation qui conditionnent la répartition et l'abondance des différentes espèces, en particulier de passereaux (les oiseaux à grand territoire, comme l'aigle de Bonelli répondent à d'autres facteurs non identifiables par cette voie).

L'inventaire ornithologique conduit par la LPO sur la base de la précartographie a donc fourni les « points d'apprentissage » nécessaires pour affiner la précartographie, en faisant le lien entre les caractéristiques spectrales et les

habitats, en l'occurrence les structures de végétation. Cependant, le nombre des points d'inventaire (100) étant contraint par un budget serré, il a été choisi de porter l'effort prioritairement sur les secteurs à végétation ouverte.

Élaboration de la cartographie finale

Intégration des points d'apprentissage

Pour affiner le modèle de végétation, nous disposons donc après la campagne de terrain d'une bonne représentation des classes pelouses et ligneux bas. L'information manquante a été obtenue pour les autres types de végétation sur la base combinée de la cartographie CORINE Land Cover et d'une photointerprétation visuelle (ortho IGN 2003) des secteurs non représentés.

L'hétérogénéité de certains types a conduit à créer des subdivisions : c'est le cas des vignes, mais également des forêts de feuillus et des pelouses, ainsi que la classe eau. Ces sous-types ont ensuite été regroupés dans la carte finale, pour simplifier la légende et faciliter l'interprétation des résultats. Par ailleurs, nous avons rapidement constaté que certains types de végétation, aux caractéristiques physiques très proches, ne pouvaient pas être mis en évidence à partir de l'image. La nomenclature utilisée pour l'élaboration de la carte finale ne respecte donc pas strictement la typologie optimale définie par la LPO, mais reste cohérente avec l'objectif recherché et a donc nécessité une adaptation technique de la part du commanditaire. En particulier, les catégories relatives à des ligneux

hauts dominant un sous-étage plus ou moins dense ne sont pas accessibles par les moyens mis en œuvre ici. C'est pourquoi le rendu final comprend moins de classes qu'envisagé lors de la commande. L'intégration sur l'image de ces

points de type d'occupation du sol connu (« points d'apprentissage ») nous a permis de créer un fichier dit de « signatures ». Ce fichier représente chaque type de végétation par ses caractéristiques spectrales (moyenne, écart-type, etc.)

dans chacun des canaux de l'image, auxquels nous avons ajouté le NDVI. Nous avons ensuite classé l'image en utilisant ce fichier de signatures comme référence, selon un processus de classification supervisée. Ce processus compare chaque pixel à la « signature » de chacun des types et le classe dans celui auquel il « ressemble » le plus, cette ressemblance étant analysée au travers d'une « distance spectrale ». Lorsque cette distance est supérieure à un seuil défini par l'opérateur, le pixel n'est affecté à aucun type. Les pixels sans affectation font alors l'objet d'une deuxième étape de classification, qui tient compte à la fois des types spectralement proches, mais aussi du classement des pixels adjacents. Il en résulte une carte dans laquelle tous les pixels sont affectés à un type (figure 5).

Contrôle de la carte et mise au point

Nous avons soumis le document au technicien de la LPO pour un premier contrôle en fonction des connaissances acquises au cours de la campagne de terrain. Ce retour a permis d'affiner les résultats en apportant des précisions sur des limites de classes insuffisamment discriminées. Nous avons ainsi affiné le classement de certains types (en utilisant notamment le NDVI) et nous en avons renommé d'autres pour mieux « coller » à la réalité du terrain et produire ainsi la carte finale (figure 5). Par ailleurs, nous avons intégré dans la carte finale les informations complémentaires déjà utilisées lors du prézonage (vignes, falaises, réseau hydrographique).

Ce contrôle a également mis en évidence des cas où la résolution de l'image Landsat ne permet pas d'appréhender certains éléments pourtant significatifs du paysage végétal. C'est le cas par exemple des ripisylves qui ne peuvent pas être détectées systématiquement dès que leur largeur est inférieure à la résolution de l'image analysée, comme le montre l'exemple de la figure 6.

Types d'espaces, structures de végétation
eau
ruisseaux et rivières
rochers, éboulis
falaises
pelouses écorchées, pelouses rocailleuses (recouvrement < 50 %) et lb < 10 % et lh < 10 %
pelouses denses (50 % < recouvrement < 100 %)
pelouses en cours de fermeture (h présent ; 10 % < lb < 25 % ; 10 % < lh < 25 %)
ligneux bas clairs (LBC) (25 % < lb < 50 % ; lh < 25 %)
ligneux bas denses (LBD) (50 % < lb < 100 % ; lh < 25 %)
ligneux hauts clairs et pelouse (lb < 25 % ; 25 % < lh < 50 %)
ligneux hauts clairs et ligneux bas clairs (25 % < lb < 50 % ; 25 % < lh < 50 %)
ligneux hauts clairs et ligneux bas denses (LBDLHC) (50 % < lb < 100 % ; 25 % < lh < 50 %)
ligneux hauts et pelouse (lb < 25 % ; 50 % < lh < 75 %)
ligneux hauts (25 % < lb < 100 % ; 50 % < lh < 75 %)
ligneux hauts denses (75 % < lh < 100 %)
vignes
vergers
champs cultivés
urbanisation
routes

avec h = végétation herbacée, lb = ligneux bas et lh = ligneux hauts, les pourcentages expriment le recouvrement par classe

Tableau 1 : la typologie LPO des structures de végétation

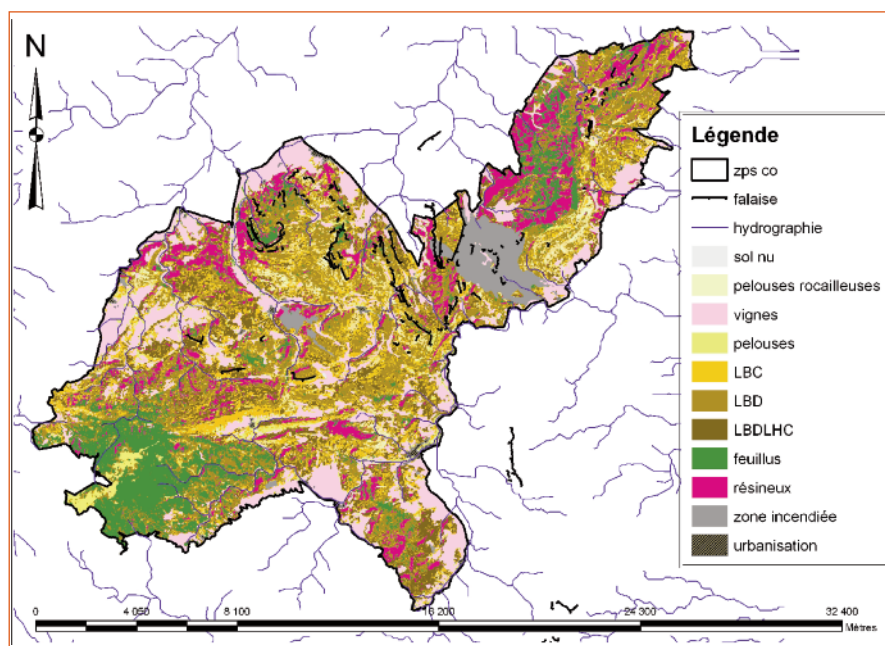


Fig. 5 : cartographie finale des types de végétation

Évaluation statistique des résultats : matrice de confusion

Indépendamment du retour des experts, nous avons procédé à une évaluation de la carte finale selon la procédure de « matrice de confusion ». Cette matrice (tableau 2) fournit une évaluation de la précision globale de la cartographie et des résultats pour chacune des classes thématiques retenues. L'intention initiale était d'utiliser une partie des points d'inventaire ornithologique pour réaliser cette évaluation, mais ça n'a pas été possible, car, l'effectif étant restreint, ils ont tous servi à étalonner la cartographie (fichier de signature). Nous avons donc effectué un nouveau tirage aléatoire de 100 points de contrôle sur l'emprise de la ZPS. Le contrôle a été effectué par interprétation visuelle à partir de l'orthophoto IGN 2003 : il prend en compte la définition des images utilisées (on n'analyse pas le point, mais son contexte immédiat) ainsi que les imprécisions de géoréférencement de l'image sa-

tellite. Lorsqu'un point tombe en limite de deux zones cartographiées, on teste ainsi les deux classes.

Les résultats sont présentés dans le tableau 2. Ils sont globalement satisfaisants, selon l'indice Kappa qui évalue l'accord entre les résultats obtenus (carte) et la « vérité terrain » photo-interprétée. Cet indice variant de 0 à 1, on retient généralement les seuils suivants :

- 0 < accord très faible < 0.20
- 0.21 < accord faible < 0.40
- 0.41 < accord modéré < 0.60
- 0.61 < accord substantiel < 0.80
- 0.81 < accord bon < 0.90
- 0.91 < accord excellent < 1.00

Par ailleurs, ces résultats appellent quelques commentaires :

- certaines classes ne figurent pas dans la matrice, les types de végétation étant situés essentiellement à l'extérieur de la ZPS ;
- les confusions concernent des classes voisines sur lesquelles la distinction n'est pas toujours facile à opérer (même sur le terrain) ;
- la classe LBDLHC (ligneux hauts

clairs et ligneux bas denses) présente un mauvais taux de classement. Cependant, le très faible nombre de points concernés rend le calcul du taux de concordance peu significatif. Si on fusionne avec la classe « résineux », ce qui se justifie en terme de structure de peuplement (couvert arboré important) comme en terme de réponse spectrale (résineux et chêne vert présentent des spectres très voisins), on obtient alors un Kappa de 0.88 (au lieu de 0,83) ; la variation est modérée, en raison de la faible représentativité de la classe dans la cartographie. Cette modification est intégrée dans le produit final.

Enfin, la méthode de contrôle n'est pas exempte de partialité (très faible nombre de points de contrôle pour certaines classes, absence de vérification précise sur le terrain), mais les moyens impartis n'ont pas permis la mise en œuvre d'un protocole plus complet, incluant un sondage *in situ*.

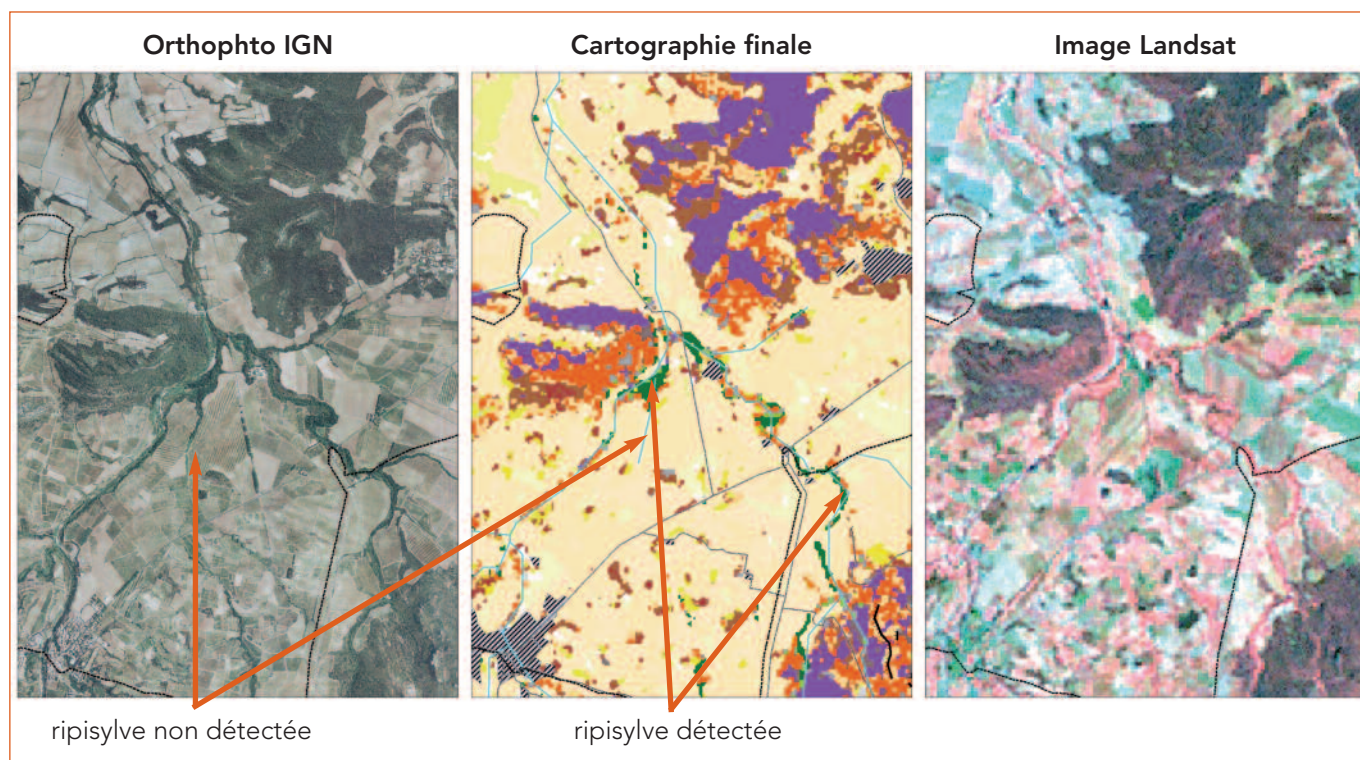


Fig. 6 : la résolution de l'image Landsat ne permet pas de cartographier, selon notre méthode, des détails fins, mais déterminants pour l'avifaune, comme certaines ripisylves

Terrain (d'après photo-inter- prétation)	cartographie													total	précision %
	eau	eau peu profonde	marais	sol nu	vigne	pelouses rocailleuses	pelouses	LBC	LBD	LBDLHC	feuillus	résineux	incendie		
eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
eau peu profonde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
marais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sol nu	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	67
vigne	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	17	100
pelouses rocailleuses	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
pelouses	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	6	100
LBC	0	0	0	0	0	0	3	18	1	0	0	0	0	22	82
LBD	0	0	0	0	0	0	0	4	31	0	0	0	0	35	89
LBDLHC	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	50
feuillus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	8	100
résineux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	11	0	17	65
incendie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	18
total	0	0	0	2	18	0	9	22	33	7	8	11	3	113	
précision globale de la cartographie %														85,84	
indice Kappa														0,83	

Tab. 2 : résultat de l'évaluation, « matrice de confusion »

Bilan et perspectives

Les tests statistiques indiquent un résultat de bonne qualité, corroboré par le retour des opérateurs de terrain qui jugent le produit satisfaisant. Toutefois, la méthode proposée montre ses limites :

- en terme d'acquisition des données d'apprentissage, qui sont insuffisantes en l'état ;
- en terme d'actualité des images (images Landsat 7 de 2001) : la végétation a parfois pu évoluer de façon significative (plantations forestières ou cultures agricoles par exemple) ;
- en terme de définition, un pixel à 30 m, même rééchantillonné à 15 m, ne permet pas d'appréhender des détails fins (ripisylves, haies) importants pour l'avifaune ; de même, des couverts arborés diffus ne peuvent être distingués de la végétation au sol ; enfin, les textures (vignes, plantations) ne sont pas accessibles à l'investigation dans ces conditions.

Des améliorations pourront donc être apportées par l'utilisation d'images récentes à haute résolution et par l'application, en complément de l'analyse spectrale, d'une logique objet (voir dans le n° 31 l'article de V. Breton, J. Renaud et S. Luque). Celle-ci consiste à identifier les éléments à cartographier non plus uniquement sur une base spectrale, mais en intégrant la forme et le contexte des éléments recherchés. Une autre approche pourrait chercher à exploiter la haute précision des données LIDAR, qui sont non seulement utilisables pour l'analyse dendrométrique des peuplements (voir dans ce dossier l'article de J. Bock *et al.*), mais qui sont de plus en plus utilisées dans des projets de recherche pour analyser la structure verticale de la végétation, en lien avec les habitats d'espèces.

En attendant, la **consolidation de la méthode** a été rendue possible par des commandes complémen-

taires sur les ZPS voisines (voir figure 1). Ce sont ainsi près de 200 000 ha qui ont été traités sur deux ans.

Bien que techniquement limitée en termes de résolution et de discrimination des classes de végétation, la méthode proposée s'est révélée adaptée en ce qu'elle a permis d'atteindre globalement les objectifs de rendu fixés par le commanditaire. Dans un bref délai, puisque non contraint par les saisons et les conditions météorologiques, et pour un coût en adéquation avec un budget restreint, 10 jours de travail seulement ont été nécessaires pour mener cette étude (hors mise au point méthodologique et acquisition des données terrain, indispensables par ailleurs pour l'étude ornithologique).

Vincent PARMAN

Chef de projet études
ONF, DT Méditerranée

Le Lidar, outil performant pour cartographier la hauteur des peuplements forestiers

En mars 2007, un avion équipé d'un laser aéroporté a scanné l'ensemble de la forêt de Haye. Ce projet, fruit d'une collaboration entre l'ONF, l'INRA et la DRAC, est une première puisqu'il s'agit d'un des plus grands massifs forestiers feuillus inventoriés par cette technique en Europe. Les résultats de recherche ouvrent des perspectives nouvelles pour la gestion des forêts... qui peuvent bénéficier à la fois d'une couverture Lidar et de l'expertise nécessaire pour la traiter.

La hauteur dominante est un paramètre clé pour caractériser les peuplements forestiers. Il est souvent utilisé pour décrire les jeunes peuplements par rapport à un stade de développement : c'est ainsi une variable essentielle dans la base de données régénération de l'ONF. C'est également une clé d'entrée dans la plupart des guides de sylviculture dont les itinéraires sont calés sur des courbes de croissance en hauteur données pour différentes classes de fertilité. Et cette notion de fertilité, qui traduit les capacités de production d'une station pour une essence donnée, est elle-même estimée par la hauteur dominante à un âge déterminé.

Or, cette mesure est souvent fastidieuse, difficile et généralement entachée d'erreurs, même dans le cas de mesures très rigoureuses (1 à 1.6 % d'erreur relative selon Rondeux et Pauwels, 1998). Elle est donc rarement relevée par le forestier. En conséquence, les données disponibles sur un massif sont ponctuelles et fragmentaires... ou très approximatives.

Les récents progrès réalisés dans les domaines des lasers, du GPS et de la navigation inertielle ont permis le développement d'un outil de télédé-

tection, le laser aéroporté (Lidar), qui offre des applications forestières très prometteuses, en particulier pour l'estimation rapide, précise et complète de la hauteur des peuplements forestiers.

Cet article présente l'élaboration d'une méthode de cartographie de la hauteur dominante des peuplements qui se base sur des données Lidar acquises sur les 112 km² de la forêt domaniale de Haye dans le cadre d'un projet de recherche réunissant l'ONF, l'INRA et la DRAC (Bock et al., 2008). Les applications pratiques pour le gestionnaire forestier sont discutées en fin d'article.

Le Lidar permet de mesurer précisément et cartographier les hauteurs en forêt

Le Lidar aérien est une technique de télédétection qui permet l'acquisition de données topographiques à haute résolution. Son principe repose sur l'émission d'impulsions laser à très haute fréquence par un émetteur embarqué dans un avion. L'onde lumineuse est réfléchiée par les différentes cibles rencontrées : feuilles, branches, troncs, sous-étage, sol. Un capteur embarqué dans l'avion enregistre les échos re-

tours de l'onde lumineuse et le temps de retour permet de déduire directement l'altitude de la cible (voir Bock et al., 2008). Le résultat est un nuage de points dont les coordonnées XYZ sont calculées en tenant compte de la position et de l'orientation de l'avion qui sont enregistrées en continu par des mesures GPS et inertielles¹. La densité de ce nuage de points dépend notamment des spécifications préalables : densité de points émis par m², altitude de vol... Cela conditionne grandement le coût de la campagne Lidar, une densité de points élevée nécessitant un temps de vol important.

Le Lidar peut enregistrer plusieurs échos d'une même impulsion permettant ainsi de modéliser simultanément le sol, par un modèle numérique de terrain (MNT) et la végétation (sur-sol) par un modèle numérique de surface (MNS). Ils sont obtenus par traitement du nuage de points (classification et interpolation). On a ainsi une description très fine de la topographie du sol et de la canopée, avec une précision planimétrique et altimétrique d'une dizaine de centimètres. La hauteur de chaque point de la végétation est alors calculée par différence entre son altitude et celle du MNT.

¹ Une centrale inertielle est un système permettant de mesurer en temps réel l'inclinaison de l'avion par rapport au plan horizontal (roulis, tangage)

Cette technique est utilisée en routine depuis plus de 10 ans pour des applications forestières dans de nombreux pays : pays scandinaves, Canada, USA, Autriche, Allemagne, Russie... Cependant, la plupart des résultats existants concernent des peuplements résineux à fort enjeu de production. Il existe peu d'exemples d'utilisation en peuplements feuillus, dont les structures sont plus complexes et souvent hétérogènes.

Nous avons donc exploré les possibilités du laser pour estimer la hauteur dominante dans des peuplements feuillus plus ou moins hétérogènes, avec 3 objectifs :

- rechercher, parmi les indicateurs calculables sur le nuage de points Lidar, le meilleur estimateur de la hauteur dominante et évaluer sa précision ;
- vérifier sa pertinence en étudiant les paramètres susceptibles d'influencer sa précision ;
- établir la carte exhaustive des hauteurs dominantes (à la date de la campagne Lidar).

Construction de la méthode : placettes de calibration et analyse des données

Pour mettre au point la méthode et valider les résultats obtenus, il est indispensable de disposer d'une description de la « réalité de terrain ». Celle-ci est constituée de 120 placettes de 6 ares, implantées pour l'occasion dans des peuplements feuillus de 6 m à plus de 40 m de haut (voir tableau 1). Il s'agit de peuplements composés principalement de hêtre, plus ou moins mélangé avec du chêne et d'autres feuillus. L'effet de la structure du peuplement a été contrôlé en échantillonnant 67 futaies régulières, 26 taillis sous futaies et 27 peuplements intermédiaires (TSF plus ou moins convertis). Par ailleurs, l'effet de la densité de points Lidar a été analysé en installant les

Type de peuplement	N	hauteur dominante mesurée sur le terrain (en m)		
		moyenne	mini	maxi
futaie	67	22.1	6.8	40.5
intermédiaire	27	25.1	19.0	34.5
TSF	26	24.4	15.1	33.0
Total	120	23.3	6.8	40.5

Tab. 1 : description sommaire de l'échantillon terrain
(N = nombre de placettes)

placettes sur deux gammes de densité : moins de 30 points/m² ou plus de 30 points/m².

Placettes de calibration

La hauteur dominante a été estimée en mesurant sur le terrain la hauteur totale des 5 plus gros arbres de chaque placette. Cette mesure a été réalisée le plus précisément possible, au Vertex, en faisant pour chaque arbre la moyenne de 2 mesures prises à 180° sur le même bourgeon, le plus haut. L'effet observateur a été limité en demandant à une seule et même personne de mesurer l'ensemble de cet échantillon, soit 600 arbres au total.

Pour pouvoir extraire le nuage de points Lidar correspondant à chaque placette, la position de toutes les placettes a été relevée sur le terrain au GPS (modèle Trimble GéoXT) avec un minimum de 60 points et correction différentielle (par post-traitement) avec l'antenne fixe la plus proche. La fiabilité de cette mesure GPS sous forêt a été contrôlée sur 30 placettes en réalisant une triangulation au télémètre laser à partir de repères topographiques visibles au Lidar et sur le terrain (trou d'obus, galette de chablis, croisement de limites de parcelles...). La comparaison montre un écart d'environ 3 m (1 à 7 m) dont il a fallu tester l'effet éventuel sur la fiabilité des résultats (voir plus loin).

Analyse Lidar : déterminer les estimateurs pertinents de Ho

Cette position GPS permet d'extraire le nuage de points laser de chaque placette. De nombreuses statistiques peuvent alors être calculées pour ce nuage de points. On les classe en trois principaux types :

- des indicateurs de distribution comme la hauteur maximum, différents percentiles² (10, 20, 30... 90, 95, 99 et 99.5 %) la hauteur moyenne, la hauteur médiane, l'écart type des hauteurs... ;
- des indicateurs de densité comme le nombre de points par tranche de hauteur, le pourcentage de points de chaque tranche par rapport au nombre total de points... ;
- des indicateurs de maxima locaux, selon les méthodes A et B exposées en figure 1.

Plus d'une centaine d'indicateurs ont ainsi été testés pour identifier les meilleurs estimateurs de la hauteur dominante. Les estimateurs ont été classés par ordre de précision croissante du modèle (erreur quadratique moyenne, biais, pourcentage d'explication – R²).

Des résultats méthodologiques très encourageants...

Quel que soit l'estimateur utilisé, il existe moins d'un mètre d'écart entre la hauteur dominante calculée à partir des données Lidar et la mesure de terrain. Les meilleurs estimateurs Lidar présentent moins de 80 cm d'écart avec la mesure de terrain. Il faut savoir que cette référence de terrain présente elle-même une erreur estimée dans le meilleur des cas à environ 30-50 cm. La liste des 10 meilleurs estimateurs est fournie dans le tableau 2, les trois meilleurs étant la hauteur du percentile 95 % (Hlid95), puis les 2 estimateurs de maxima locaux calculés avec la méthode B (Hdoman5) et la méthode A (Hmv5).

² Les percentiles divisent une série ordonnée en groupes de taille égale. Ainsi le percentile 10% est la limite de hauteur qui permet de séparer les 10% de points les plus bas.

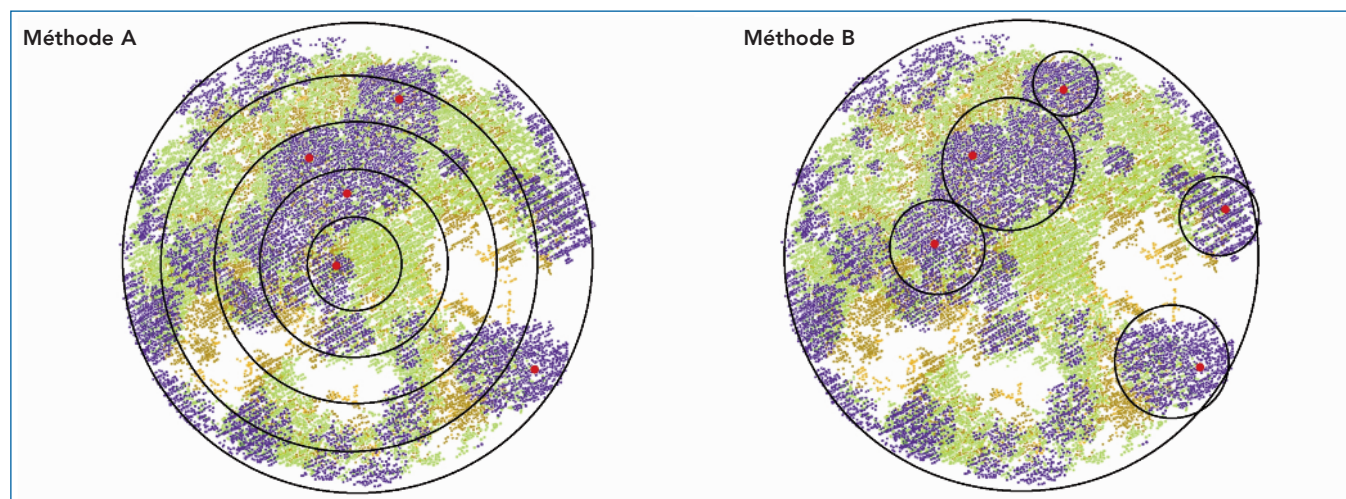


Fig. 1 : principe de calcul des maxima locaux dans le nuage des points Lidar, selon deux méthodes

Méthode A : la placette est divisée en 3, 4 ou 5 cercles concentriques et les hauteurs maxima dans chaque cercle sont moyennées

Méthode B : on identifie le point le plus haut de la placette, puis on ignore les points dans un rayon d'exclusion dépendant de la hauteur de ce point. Ce rayon est calculé d'après des relations allométriques hauteur de l'arbre-diamètre du houppier établies sur plus de 800 hêtres et chênes mesurés par l'INRA ($r^2 = 0.54$). On cherche ainsi de suite les 2e, 3e, 4e et 5e points les plus hauts de la placette.

On présume que la méthode B permet d'éviter de sélectionner plusieurs points dans un même arbre. En outre, c'est elle qui se rapproche le plus de la définition de la hauteur dominante : moyenne des hauteurs des 5 plus hauts arbres sur 6 ares.

LIDAR metric	RMSE	R ²
hlid 95	0,83	0,99
hdoman5	0,86	0,99
hmv5	0,89	0,99
hdoman4	0,89	0,99
hdoman3	0,92	0,99
hmv3	0,94	0,98
hlid 99	0,95	0,98
hdoman2	0,96	0,98
hmv2	0,99	0,98
hlid 99,5	1,01	0,98
hlid max	1,10	0,98
std	1,11	0,98

Tab. 2 : classement des 10 meilleurs estimateurs Lidar de la hauteur dominante en fonction de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et du coefficient de prédiction (R^2).

Une mesure fiable de Ho

Une analyse plus fine (analyse multivariée) réalisée sur ces 3 meilleurs estimateurs permet de préciser la portée du résultat.

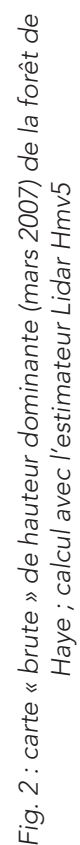
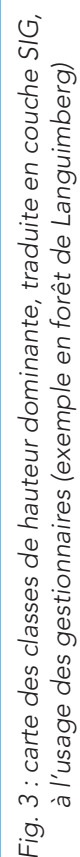
D'abord, l'estimation de la hauteur dominante n'est pas significativement influencée par le type de peuplement : qu'on se concentre sur le TSF, la futaie ou le type intermédiaire, la précision reste la même que pour l'ensemble des placettes. Ensuite, l'imprécision du GPS ne semble pas problématique. Cela a été évalué en faisant varier le rayon d'extraction des points Lidar de 5 à 30 m autour de la position GPS du centre de la placette de calibration (la placette installée sur le terrain faisant 13,8 m de rayon), pour simuler l'imprécision du GPS : quel que soit le rayon d'extraction, les performances des estimateurs restent relativement stables.

Le type d'ajustement du MNT n'a pas non plus d'influence sur la précision de la « mesure » de hauteur

dominante : la précision du résultat est la même quelle que soit la méthode d'interpolation choisie pour calculer le MNT à partir du nuage de points Lidar sol de la placette. L'ajustement le plus simple (plan) peut donc être retenu. On pensait aussi que la microtopographie (présence de fossés, buttes, pierriers...) pouvait avoir une influence³ : manifestement, ce n'est pas le cas dans nos conditions de plateaux calcaires de Lorraine aux reliefs peu marqués.

Plus surprenant enfin, la densité de points Lidar ne semble pas peser sur la qualité d'estimation de la hauteur dominante. Il faut réduire de plus de 90 % la densité de points (au sol et dans la végétation), soit moins de 3 points/m², pour commencer à voir une dégradation des performances des estimateurs de hauteur dominante. Il faut noter toutefois que la densité de points initiale est relativement élevée : 2 à 3 points par m² au sol et une douzaine de points par m² dans la vé-

³ La hauteur d'un arbre étant obtenue par différence entre l'altitude de son point haut et celle du point sol à sa verticale, des arbres situés au bord d'un fossé, par exemple, auraient pu induire une surestimation de la hauteur



gétation. Ce résultat indique qu'il ne devrait pas y avoir de perte d'information (pour l'estimation de H_o) si on réduit la densité de points émis lors du vol. Ceci reste cependant à vérifier en comparant des missions réellement effectuées avec des densités de points différentes.

Des retombées immédiates pour le gestionnaire de la forêt de Haye...

Grâce à ces résultats, la première cartographie exhaustive de hauteur dominante des peuplements feuillus a donc été réalisée sur les 112 km² de la forêt de Haye (voir figure 2). Elle a été présentée au service gestionnaire qui y a trouvé un intérêt pratique immédiat car elle permet de représenter différents types de peuplement déterminés d'après les seuils de hauteur dominante fournis dans les guides de sylviculture.

D'après ce qui suit, on imagine aisément ce que seraient les gains de productivité (programmation) et les améliorations sylvicoles (appropriation/mise en œuvre des référentiels) si on pouvait disposer de données périodiques Lidar généralisées à coût raisonnable (comme on dispose désormais de la BD Ortho® IRC).

Le forestier peut ainsi dresser l'état de la régénération par classes de hauteur et actualiser très rapidement la base de données régénération à la date de la campagne Lidar : il a un « état zéro » parfaitement « propre » et la possibilité de calibrer les diagnostics terrain. Sur un massif touché à plus de 25 % par la tempête comme la FD de Haye, la programmation des travaux (pour les quelques années qui suivent) peut être optimisée en fonction du stade de développement (gamme de H_o). Le croisement avec la carte des stations permet alors d'affiner les consignes et de cibler les interventions selon les essences potentiellement intéressantes. Dans les

peuplements mités, hétérogènes, le problème du suivi des taches de régénération se simplifie puisque les trouées sont localisées précisément et quantifiées (voir figure 3).

De même, les peuplements concernés par la sortie de phase de qualification (1ère éclaircie) peuvent être immédiatement localisés et quantifiés en surface. Il est possible d'y distinguer différentes gammes de hauteurs dominantes (voir figure 3). Cela permet, en croisant avec la carte des essences objectif, de programmer les interventions au profit des essences principales, et aussi celles – plus précoces – qui concernent les feuillus précieux. On peut distinguer en particulier les peuplements compris entre 12-14 m haut pour anticiper la sortie des feuillus précieux (selon la station). Pour les essences principales, on peut faire la distinction entre les peuplements de 14-16 m haut et ceux de 16-18 m de haut pour mieux programmer les sorties de qualification en fonction des surfaces en jeu, des comportements des essences et des stations concernées.

Au-delà de 18 m, l'information de hauteur dominante est un peu moins pertinente au regard des référentiels sylvicoles, sauf :

- pour identifier les peuplements en retard d'éclaircie (gamme 16-20 m jamais éclaircie) ;
- pour identifier les zones à risque de dégâts de tempête en fonction de H_o ($H_o > 25m$), de la station, de la topographie issue du MNT (voir Bock et al., 2004).

Poursuite des opérations : améliorer l'utilisation opérationnelle et enrichir l'information

Cette première carte de hauteurs dominantes étant une carte par pixels de 25x25m, on a travaillé ensuite à la traduire en couche SIG plus directement utilisable par le gestionnaire. Il s'agit d'une part de créer automatiquement des poly-

gones de **types de peuplements homogènes caractérisés par une classe de hauteur** et, d'autre part, de les croiser avec les données stationnelles pour en déduire une carte de préconisations sylvicoles.

La robustesse de cette méthode de cartographie « automatique » des peuplements est en cours d'évaluation sur d'autres massifs forestiers ayant bénéficié d'une couverture Lidar : FD Languimberg (57), FD Montiers (55), Chamonix (74)... On pourra alors apprécier dans quelle mesure les relations appliquées sur la FD de Haye sont généralisables à d'autres contextes avec ou sans recalibration. Ajoutons que l'évaluation, concomitante à la révision d'aménagement de la FD Languimberg, a permis pour la première fois d'organiser la réflexion en fonction de la carte des hauteurs dominantes et de l'intégrer dans le document d'aménagement.

Le Lidar peut aider à cerner le capital sur pied...

Pour les peuplements de plus de 18 m, l'information de hauteur dominante seule ne suffit pas : il est nécessaire de l'accompagner du capital sur pied, de la composition et de la qualité. Si les deux derniers éléments nécessitent des observations de terrain, les premiers tests sur nos données Lidar laissent entrevoir des perspectives prometteuses concernant l'estimation de la surface terrière et de la biomasse.

Pour être pleinement utile aux gestionnaires, l'estimation du capital sur pied doit aussi renseigner sur les catégories de bois présentes (PB, BM, GB). Les études en cours sur la segmentation des couronnes des arbres ou des strates de peuplement devraient permettre de déterminer les tailles de houppier et d'en déduire les catégories de bois - à condition de développer pour les feuillus des outils aussi performants que pour les résineux. Les données Lidar pourraient permettre également de quantifier (en sur-

face et hauteur) les trouées consécutives à la récolte d'arbres et affiner ainsi le suivi des régénérations, notamment dans les peuplements hétérogènes. De même, le nombre, la taille des trouées et la hauteur des peuplements environnants pourraient permettre de calculer la distribution (en classes de grosseur) de tiges prélevées. Cette distribution, mise en relation avec les fiches de martelage, donnerait un outil pour contrôler les coupes ainsi que la cohérence des tarifs de cubage appliqués.

... et à mieux connaître la fertilité

À plus long terme, ces résultats ouvrent des perspectives pour une meilleure connaissance de la fertilité. Cette information nécessite habituellement de disposer de l'âge des peuplements, donnée difficile à obtenir et restant donc souvent très imprécise. La comparaison de deux campagnes Lidar offre la possibilité d'une approche de la fertilité sans avoir recours à l'âge, en étudiant les accroissements en hauteur dominante en fonction de la hauteur dominante initiale.

On pourrait alors « visualiser » les variations à fine échelle de la fertilité et du capital sur pied et disposer ainsi d'un outil d'optimisation des ressources et de la récolte. Par ailleurs, les chercheurs pourront tenter d'élucider ces variations de fertilité à la lumière d'autres informations : paramètres environnementaux ou anthropiques, utilisation des sols ancienne ou récente...

En conclusion

Ce projet permet d'ores et déjà de disposer d'une méthode de cartographie exhaustive et précise de hauteur dominante, y compris avec une faible densité de points Lidar. Cette carte permet d'identifier et caractériser très précisément les jeunes peuplements selon les stades de hauteur déterminants, ce qui constitue en soi un outil d'aide

en la décision sans équivalent avec les méthodes de terrain. Les perspectives semblent prometteuses pour caractériser les peuplements plus âgés, en particulier en ce qui concerne la surface terrière et la fertilité.

Les résultats ouvrent aussi de nouvelles voies pour concevoir, par télédétection et grâce au Lidar en particulier, des indices de productivité basés sur la hauteur, ce qui n'était pas possible jusque-là. C'est un des arguments forts qui ont encouragé l'ONF à être l'un des instigateurs du projet FORESEE (*Forest Resource Estimation for Energy*) accepté par l'Agence nationale de la recherche à l'issue de son appel d'offres « Bioénergies 2010 ». Ce projet, qui regroupe les partenaires les plus pertinents en France dans le domaine de l'évaluation des ressources forestières⁴, vise à fournir des méthodes et des outils pour estimer et cartographier la ressource forestière sur pied, ainsi que ses conditions d'exploitation (zones non bûcheronnables en montagne, desserte, accessibilité par rapport à la desserte), à l'échelle de grands massifs forestiers ou bassins d'approvisionnement.

Les acquis de tous ces travaux peuvent d'ores et déjà être mis en œuvre à l'échelle de massifs dont les enjeux justifient une campagne Lidar (grandes forêts domaniales, forêts patrimoine comme Verdun ou Val-Suzon, bassins d'approvisionnement d'un site de production de biocarburants, etc.). L'idéal serait évidemment de disposer d'une couverture généralisée : nos résultats de R & D mettent en évidence l'avantage considérable des données Lidar pour répondre entre autres aux divers engagements de la France liés à la ressource bois et, bien au-delà de la sphère forestière, le Lidar permet des avancées capitales dans tous les secteurs de l'aménagement du territoire. Aussi certaines collectivités songent-elles

à acquérir la couverture Lidar exhaustive de leur territoire et à la redistribuer aux partenaires intéressés, le coût étant alors très acceptable pour toutes les parties. À moins qu'une stratégie de ce type ne se dessine au niveau national...

Jérôme BOCK

ONF, département recherche
Pôle de Chambéry

Jean-Pierre RENAUD

Gregory DEZ

Flora MARTINS

ONF, département recherche
Pôle de Nancy

Murielle LEROY

Service régional de l'Archéologie
de Lorraine

Étienne DAMBRINE

Biogéochimie des Écosystèmes
Forestiers
INRA-Nancy
(Université de Savoie depuis juillet 2010)

Jean-Luc DUPOUEY

Écologie et Écophysiologie
Forestières
INRA-Nancy

Bibliographie

Bock J., Vinkler I., Renaud J.P., Duplat P. 2004. Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999 dans le Nord-Est de la France. *Rendez-vous techniques de l'ONF* n°3. pp. 29-34

Bock J., Dupouey J.L., Dambrine E., Georges-Leroy M. 2008. Les structures archéologiques et les peuplements de la forêt domaniale de Haye analysés par laser aéroporté. *Rendez-vous techniques de l'ONF* n° 20. pp. 15-18

Rondeux J., Pauwels D. 1998. Le forestor Vertex : une nouvelle génération de dendromètre. *RFF* vol. 50, pp. 59-63

⁴ Cemagref, FCBA, IFN, IGN, INRA, ONF, UCFF et Sintégra, une PME spécialisée dans l'acquisition de données de télédétection aérienne.

Cartographie de la sensibilité de la végétation aux incendies de forêts en région méditerranéenne : apports des images satellites et limites d'usage

À la direction territoriale Méditerranée, les pôles DFCI et SIG se sont fait une spécialité de l'analyse des images satellites pour la lutte et la prévention contre les incendies de forêt. Les applications, très opérationnelles, sont aussi très diversifiées et l'article revêt donc une forme un peu particulière. Il explique la démarche qui sous-tend l'ensemble de ces études : comment on caractérise la végétation au regard du feu et à quels objectifs doit répondre la cartographie, puis les spécifications et les étapes techniques de ce type d'opération. Parallèlement, un échantillon synthétique de quatre cas d'étude illustre l'ampleur de cette activité et ses limites... actuelles.

Pour mener à bien leurs missions, tous les acteurs investis dans la protection des forêts méditerranéennes contre les incendies ont besoin d'avoir une connaissance aussi précise que possible de la sensibilité de la végétation auxdits incendies.

Ces acteurs peuvent être 1) des personnels de services opérationnels, chargés de lutter contre ces incendies, 2) des propriétaires ou gestionnaires forestiers ou des personnels de services responsables de l'aménagement du territoire, plutôt préoccupés de prévention.

Ils ont donc des attentes différentes, les premiers ayant surtout besoin de connaître au moment de leur intervention quel sera le comportement de la végétation par rapport à la source d'ignition (étincelle, mégot...), puis face au front de feu, les seconds aspirant plus à connaître, sur le territoire dont ils ont la charge, l'état potentiel de la végétation en conditions de référence,

c'est-à-dire en général dans l'hypothèse des conditions climatiques les plus défavorables. Après incendie, tous auront à cœur d'avoir une estimation précise des superficies brûlées, avec si possible une appréciation du niveau de dégât subi par la strate arborée (dans le cadre de procédures de restauration ou pour établir un historique précis des feux...). C'est dire que les besoins sont divers et toujours renouvelés, la sensibilité à l'incendie devant être étudiée de différents points de vue et à différentes échelles, dans un contexte où l'enjeu de sécurité, pour ne parler que de celui-là, est énorme.

Dans tous les cas, les études reposent sur une cartographie de la végétation, ou plutôt de ses propriétés vis-à-vis de l'incendie. Pour cette démarche, dès lors que le territoire à cartographier dépasse l'échelle de quelques parcelles, l'analyse automatisée des images satellitaires est à la fois source de progrès et de gain économique une fois l'outil maîtrisé, ce qui nécessite une certaine exper-

tise et une certaine pratique. Le pôle territorial DFCI de la direction territoriale Méditerranée, s'appuyant pour les traitements informatiques sur le pôle SIG territorial, qui a été érigé sur cette thématique en pôle d'excellence SIG, s'en est donc fait une spécialité et les résultats obtenus sont aujourd'hui appréciés et reconnus par nos partenaires et nos donateurs d'ordre.

Cet article expose les spécifications, étapes et possibilités (ou limites) de ce type d'analyse, en les illustrant à travers 4 cas d'étude très contrastés.

Rendre compte du comportement de la végétation face au feu

Un feu de végétation est une combustion à l'air libre, se propageant librement, qui consomme des combustibles végétaux naturels, c'est-à-dire l'humus, les herbes, les buissons, et les arbres (Trabaud, 1989), pour former essentiellement du gaz carbonique (CO₂) et de l'eau, en émettant une grande quantité d'énergie.

Les propriétés déterminantes au regard de l'incendie de végétation

La combustion varie en fonction de la teneur en eau des végétaux, de leur plus ou moins grande propension à la pyrolyse (gazéification du bois sous l'effet de la chaleur) ainsi que des gaz qui en résultent, dont la composition dépend principalement des espèces végétales qui constituent le peuplement forestier.

La propension d'un peuplement forestier à la pyrolyse dépend quant à elle des caractéristiques physiques des végétaux qui le composent, en particulier de leurs parties les plus fines (3 à 6 mm de diamètre), qui sont celles qui contribuent le plus à la pyrolyse (notamment du fait de leur ratio surface/volume et de leur densité volumique) ; elle dépend aussi en second lieu de l'architecture du peuplement (continuité horizontale et verticale, hauteur de la base du houppier...).

Lorsque le front de feu qui aborde le peuplement forestier est important et intense, le rayonnement et la convection sont tels que la pyrolyse (émission de gaz ± inflammables) peut être engagée à distance, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres en avant du front de feu.

Décrire la sensibilité au feu d'un groupement de végétation quelconque revient donc à caractériser son comportement face au feu, soit d'une part sa capacité à s'enflammer au contact d'une source de chaleur (**inflammabilité**), d'autre part sa propension à propager l'incendie établi, tant par l'énergie dégagée lors de la combustion (**combustibilité**) que par la vitesse de propagation de l'incendie au sein de ce groupement de végétation.

Du principe à la caractérisation pratique des formations forestières

L'inflammabilité et la combustibilité individuelles des principales espèces méditerranéennes sont connues, car

elles ont fait l'objet d'expérimentation en laboratoire (test d'échantillons de quelques grammes). Mais on a assez peu de références scientifiques pour la description de peuplements hétérogènes, composés d'une multitude d'individus d'espèces différentes. En conséquence, les modalités de description de la végétation vont varier en fonction des outils qu'on mettra en œuvre pour modéliser le comportement du feu, mais aussi en fonction des superficies à cartographier.

Les modèles les plus complexes (comme le modèle FIRETEC actuellement développé par l'INRA d'Avignon en collaboration avec le Los Alamos National Laboratory) exigent une description très fine de la végétation, en 3D et par cubes de 50 cm de côté, et les calculs font appel à des ressources informatiques extrêmement puissantes. De ce fait, ce type de modélisation se limite aujourd'hui à des paysages de faible dimension (et pour des formations déjà documentées en détail).

Les méthodes les plus courantes à l'échelle du massif forestier ou de la région combinent des aspects expérimentaux et empiriques, pour avoir une approche plus macroscopique du feu. Elles ne nécessitent pas de décrire chaque arbre ou bouquet d'arbres, mais des formations végétales de quelques ares au minimum. Ces formations élémentaires sont ensuite regroupées en un nombre réduit de types de végétation qui correspondent à un comportement prévisible unique et que l'on dénomme modèles ou types de combustible. Par exemple les services forestiers américains utilisent une série de 13 modèles de combustible, qui leur permettent de décrire toute la végétation des USA.

En pratique, pour des cartographies du combustible sur des territoires assez vastes, ce sont des modèles de ce type, adaptés au contexte méditerranéen, qui sont utilisés. Les caractéristiques de chacun de ces mo-

dèles comprennent en général au moins une évaluation de la masse combustible fine (en valeur absolue, ou en valeur relative), et une description des espèces dominantes qui composent le peuplement (espèce, couvert, hauteur...).

Les objectifs de la cartographie

Nos travaux de cartographie répondent aux besoins des divers acteurs de la protection des forêts contre les incendies qui les utilisent pour :

- des missions opérationnelles : modulation de dispositif de surveillance en fonction des variations du niveau de danger d'incendie, utilisation de modèles de propagation pour estimer le comportement d'un incendie déclaré, estimation de l'intensité potentielle d'un front de feu en un point donné, cartographie des zones incendiées...
- des missions d'aménagement du territoire : cartographie de l'aléa d'incendie sur un territoire, cartographie des types combustible.

Les travaux concernant la **sensibilité de la végétation**, autrement dit les types de combustible, sont assez nombreux. Des échelles locales (quelques hectares ou dizaines d'hectares) à l'échelle nationale, en passant par divers niveaux intermédiaires (massif forestier, département, région méditerranéenne), deux approches ont principalement été poursuivies :

- cartographie de la **variabilité spatiale** décrivant, pour une situation dite de référence, la position sur le territoire des divers types de combustible (cas d'étude n° 2 p. 52) ou de leur sensibilité au feu (cas d'étude n° 3 p. 56) (cette situation de référence correspond à la situation observée lors des principaux feux historiques connus dans le secteur d'étude ; les paramètres influant sur la sensibilité au feu ou sur l'état du combustible sont alors fixés aux valeurs observées lors de la situation de référence) ;

■ cartographie de la **variabilité temporelle** de ces modèles, essentiellement du fait de la variation de la teneur en eau des végétaux vivants au cours de l'année (fonction des différentes phases phénologiques, des réserves en eau disponibles dans le sol), ou au moins au cours de la saison estivale (cas d'étude n° 4 p. 58).

En plus de ces travaux sur la végétation, la **cartographie de zones incendiées**, avec possibilité de nuancer les niveaux d'atteinte aux peuplements arborés, a été développée avec succès, soit pour documenter l'historique des feux sur un territoire en reconstituant les contours de feux anciens (cas d'étude n° 1 p. 49) soit, dans la phase d'urgence après incendie, pour évaluer rapidement les dégâts et les risques induits (érosion, chute de blocs, inondation torrentielle, chute d'arbres, etc.). Dans la seconde hypothèse, ce n'est généralement pas l'ONF qui procède aux analyses faute d'accès direct aux images en temps réel : nous récupérons les données déjà traitées dans le cadre de la charte internationale « Espace et catastrophes majeures » qui permet aux autorités nationales (sécurité civile) de disposer d'images régulières pour le suivi des sinistres majeurs au jour le jour.

Choisir les images en fonction de l'information recherchée et du site d'étude

Le tableau 1, qui regroupe page suivante les spécifications des 4 cas d'étude, illustre la discussion qui suit et les compromis à trouver pour le choix d'images pertinentes.

La résolution spectrale

Nous recherchons tout d'abord des images dont les bandes spectrales (ou « canaux ») sont pertinentes pour les analyses de végétation : ce sont principalement celles du vert, du rouge et du proche infrarouge (voir les articles de A. Jolly et J-G. Boureau dans la première partie du dossier). D'autre part, il est également intéressant de disposer du canal panchroma-

tique, qui couvre tout le domaine du visible et une partie du proche infrarouge, les données correspondantes ayant une résolution spatiale plus fine et apportant une information intéressante sur les contrastes locaux (par exemple, distinction des pistes par rapport à la végétation environnante).

La combinaison des bandes rouge et proche infrarouge permet également d'enrichir l'information par calcul de l'indice de végétation (voir plus loin le paragraphe relatif à l'enrichissement des données).

Le coût des images

Le coût d'accès aux images satellitaires est très variable, surtout si on le rapporte au coût au kilomètre carré couvert. Il varie en fonction des satellites et augmente en général avec la finesse de résolution et/ou le nombre de canaux disponibles. Il dépend également de la date de prise de vue, les clichés les plus récents étant les plus chers. Si on a besoin d'images pour une période bien précise, ce qui impose une programmation spécifique des prises de vue, le prix augmente d'autant plus que la période de réalisation est stricte. Le prix du produit livré varie aussi selon le niveau de prétraitement choisi (voir plus loin).

Enfin, certains produits sont accessibles gratuitement, telles les images SPOT végétation (pixel d'un kilomètre) ou MODIS (pixel de 250 à 500 m).

La résolution temporelle

Les images « à la demande » sur programmation spécifique ne sont possibles qu'avec certains types de satellites (par exemple SPOT, IKONOS). Les autres satellites ont un éphéméride de prises de vues prédéfini en fonction de leur trajectoire. Le délai de revisite d'un même site est alors d'autant plus faible que le « champ de vue » (la fauchée) des capteurs est large : 1 jour pour les capteurs à basse résolution spatiale (SPOT-Végétation ou MODIS-Terra), 15 à 30 jours pour les satellites à haute résolution spatiale (10-30 m).

Mais la fréquence temporelle réelle de disponibilité des données dépend des conditions atmosphériques au moment de la prise de vue, les capteurs dans le domaine du visible et du proche infrarouge étant incapables de « voir » à travers les nuages.

La résolution spatiale

Au-delà du coût des images, la très haute résolution (<5 m : satellites IKONOS, QUICKBIRD), est trop élevée pour les besoins de la cartographie de modèles de combustible, qui sont comme indiqué précédemment des modèles représentatifs du comportement moyen d'un peuplement forestier de quelques ares. L'analyse automatisée d'images aussi fines conduirait à une cartographie de détail alors qu'on ne sait aujourd'hui ni décrire les sensibilités élémentaires ni comment les combiner pour en déduire la sensibilité moyenne du peuplement forestier (modèle de combustible).

Par contre, les satellites à haute ou moyenne résolution, tel SPOT-HRV (2,5 à 5 m pour le canal panchromatique, 10 m pour les autres canaux) ou LANDSAT ETM+ (15 m pour le canal panchromatique, 30 m pour les autres canaux), qui disposent des canaux utiles pour des analyses de végétation, sont bien adaptés au besoin de la cartographie des modèles de combustible.

Des images adaptées au territoire d'étude : notions de scène et de fauchée

La dimension du territoire d'étude influe également sur le choix de l'image retenue car chaque type de satellite fournit des images de dimension spécifique, appelées scènes, toujours centrées sur l'axe de sa trajectoire (ou autour de cet axe pour les satellites « programmables »). Selon l'axe de prise de vue et la fauchée du satellite (largeur de la scène), le territoire d'étude pourra être couvert par une scène unique ou nécessitera plusieurs scènes.

	Cas d'étude n° 1	Cas d'étude n° 2	Cas d'étude n° 3	Cas d'étude n° 4
Objet de l'étude	Cartographie rétrospective des incendies historiques de l'été 1986 dans l'Estrel-Tanneron, en y distinguant des niveaux de dégâts	Cartographie des types de végétation combustible sur le massif forestier des 4 Termes (13). Par croisement avec d'autres données, cette étape de base permettra de modéliser l'intensité des éventuels incendies.	Cartographie de la sensibilité de la végétation à l'incendie sur le département des Alpes de Haute Provence (étape de base pour cartographier ensuite, par croisement avec d'autres données, l'aléa feu de forêt)	Cartographie zonale, sur la région méditerranéenne (15 départements), de la sensibilité potentielle de la végétation et production des cartes quotidiennes de sensibilité selon l'état de sécheresse, pour la gestion des moyens de lutte
spécifications pour l'image				
résolution spectrale	les 3 canaux visibles, le PIR et panchromatique, permettant de travailler sur l'indice de végétation normalisé (NDVI)			
résolution spatiale	Précision suffisante par rapport à la taille des incendies (~ 2400 et 3400 ha) et couverture permettant de ne traiter qu'une seule image => entre 15 et 30 m, fauchée de 180 km	Précision suffisante par rapport à la taille du massif forestier et couverture permettant de ne traiter qu'une seule image => entre 10 et 30m, fauchée de 60 à 180 km	Précision suffisante par rapport à la taille du département et couverture permettant de ne traiter qu'une seule image => entre 15 et 30 m, fauchée de 180 km	Entre 30 et 100 m, avec une fauchée importante
résolution temporelle	Image prise peu de temps après le feu et après les pluies de septembre pour pouvoir distinguer les zones seulement parcourues, où la végétation peut redémarrer	Image prise peu de temps avant les grands feux qui ont touché le massif en 2003 et 2005	Image prise 2 à 3 ans avant l'étude pour limiter le coût (les images récentes sont 2 à 3 fois plus chères), sachant qu'il n'y a pas d'impact de feux importants récents	- Image prise 1 à 2 ans avant l'étude pour la description et cartographie des types de végétation - Images quotidiennes pour l'état de sécheresse de la végétation au jour le jour
solutions possibles et image(s) choisie(s)	=> Scène Landsat 5 TM orthorectifiée du 17 octobre 1986 (environ 3000 €)	Possibilité de recours à des images SPOT-HRV à 10 m, ou LANDSAT 7 ETM+ à 30 m (réductible à 15 m par combinaison avec la couche panchromatique). => Scène LANDSAT 7 ETM+ orthorectifiée du 21 juillet 2001 (environ 3000 €)	Le recours à des images SPOT-HRV aurait conduit à l'acquisition et au traitement de plusieurs scènes pour couvrir la totalité du département. => Scène LANDSAT 7 ETM+ orthorectifiée de juillet 1999 (environ 1000 €)	Pour la cartographie de la végétation, les images LANDSAT (résolution 30 m) sont les mieux adaptées, mais il aurait fallu 10 scènes (fauchée 180 km) pour couvrir le territoire d'étude : coût rédhibitoire de l'accès à la donnée brute et du prétraitement des données. Un satellite de grande fauchée tel MODIS (2400 km) couvre la zone méditerranéenne : ses images quotidiennes sont accessibles gratuitement mais de résolution insuffisante (250 m), et elles nécessitent des prétraitements longs et complexes. => Pas d'image(s) répondant aux spécifications de l'étude à un coût raisonnable
Analyse, traitements				
Préparation de l'image (prétraitements)	Aucun	Ré-échantillonnage des bandes spectrales sur la résolution de l'image panchromatique	- Travail préparatoire pour limiter l'impact des ombres portées dans un département présentant des reliefs très accentués - Ré-échantillonnage des bandes spectrales sur la résolution de l'image panchromatique	Sans objet
Analyse de l'image	- Classification supervisée de l'image sous Erdas Imagine, avec une cinquantaine de placettes d'entraînement saisies par photo-interprétation et décrivant deux catégories : zones incendiées / zones indemnes - Utilisation du NDVI : seuillage manuel pour distinguer les zones brûlées et celles simplement parcourues	- Classification supervisée sous Erdas Imagine, avec une centaine de placettes d'entraînement décrivant 8 grandes catégories d'occupation du sol. - Utilisation du NDVI pour distinguer différents types de garrigues : seuillage manuel en 4 classes, ramenées à 3 après contrôle terrain.	- Classification supervisée sous Erdas Imagine, en utilisant une centaine de placettes d'entraînement - Utilisation du NDVI pour affiner les types de végétation, par un seuillage manuel	Sans objet
Autres traitements	Aucun	Traitements correctifs sous grid, après contrôle terrain du traitement brut. Recours à diverses bases de données : IFN, occupation du sol PACA, et digitalisation de certaines zones cultivées sur BD Ortho.	Traitements complémentaires par application d'une typologie bioclimatique et d'un indice de rayonnement solaire	Solution alternative à l'analyse d'images satellitaires, en attendant les progrès dans ce domaine : combinaison de la carte des types de peuplements de l'IFN et de la carte de sécheresse quotidienne calculée par Météo-France

Tab. 1 : récapitulatif des spécifications et traitements des 4 cas d'étude présentés

Cas d'étude n° 1 - Cartographie des superficies incendiées en juillet et août 1986 dans le massif de l'Estérel-Tanneron

Dans le cadre de l'élaboration d'un plan de prévention des risques d'incendies de forêts, le problème est de reconstituer les contours de deux grands incendies une vingtaine d'années après leur déroulement, si possible en y distinguant des niveaux de dégâts.

Spécifications et traitements : voir tableau 1

Traitement de l'image et résultat

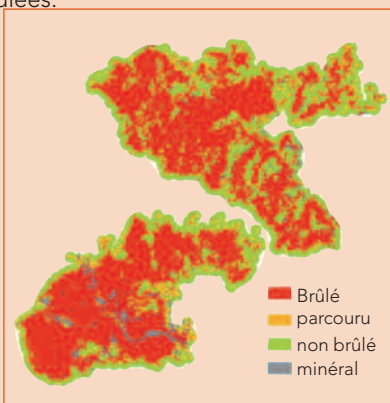
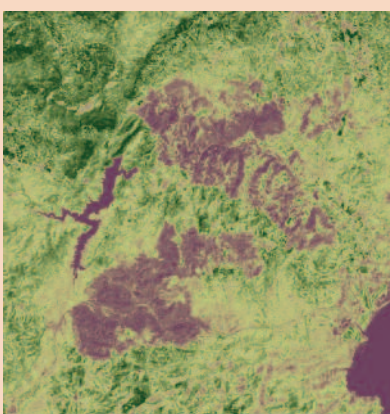
Classification supervisée sur la base d'une typologie très simple car on ne s'intéresse ici qu'à l'emprise des incendies : « brûlé » (en rose), « végétation » (en vert), « minéral » (en gris). Les placettes d'entraînement correspondantes sont choisies par photo-interprétation respectivement dans : des secteurs brûlés de manière homogène sur plus de 10 hectares, des zones forestières et de maquis haut, des zones urbaines et secteurs agricoles.

Ce traitement brut fait apparaître en brûlé certaines zones manifestement non concernées comme le lac de Saint Cassien à l'ouest ou des secteurs de blocs rocheux au sud-est. Pour la suite du traitement on a donc sélectionné manuellement les secteurs concernés.

À l'intérieur d'une zone délimitée à 200 m autour de la zone brûlée, les résultats sont affinés avec l'indice de végétation (NDVI) qui permet de tirer parti du comportement différencié de la végétation dans le rouge et le PIR. En effet, en octobre les zones seulement parcourues ont repris une activité photosynthétique et se distinguent aisément des zones plus profondément brûlées.

De haut en bas :

- Image satellite = extrait de la scène Landsat5 orthorectifiée du 17/10/1986 (17.15 km x 17.75 km)
- Résultat brut de la classification
- Carte du NDVI
- Produit final : cartographie des zones parcourues et incendiées



x 185,2 km, soit plus de 3 millions d'hectares) sont adaptées pour des territoires départementaux. Pour des territoires plus vastes, comme par exemple la région méditerranéenne, il faut soit multiplier les images (10 scènes LANDSAT pour couvrir les 15 départements méditerranéens), soit diminuer la résolution en se reportant vers des satellites à basse résolution (largeur de la scène SPOT Végétation de 2 400 km).

Combinaison d'images sur un même territoire

Outre l'augmentation du coût des données, la combinaison de plusieurs images pour un même territoire peut fortement complexifier les traitements. Nous utilisons en général des images d'archives disponibles sur catalogue. Pour chaque scène, qui est couverte régulièrement (cf. résolution temporelle), le vendeur sélectionne et propose l'image comportant le moins de défauts : peu de déformation, peu de « bruit », peu ou pas de nuages, le moins d'ombres portées possibles. Mais, d'une scène à la voisine, il s'agit rarement d'images prises le même jour, et dans certains cas, l'écart peut atteindre plusieurs mois.

Pour combiner les scènes, il faut donc procéder à des travaux préalables d'harmonisation (pour atténuer les différences liées aux dates de prise de vue), puis les assembler entre elles en gérant les problèmes de recouvrement (mosaïquage). La préparation d'un ensemble réparti sur 2 à 3 scènes est un travail important qu'il faut évaluer au regard de l'intérêt du traitement de l'image satellitaire pour le résultat attendu.

Lorsque le nombre de scènes augmente, ce travail préparatoire peut se révéler très supérieur à celui de l'analyse proprement dite. D'autre part, il n'est pas toujours suffisant pour permettre ensuite le traitement automatique global, notamment quand les dates des différentes images sont très décalées. C'est pour cette raison que nous avons du renon-

cer, pour l'instant, à utiliser des images à moyenne résolution (LANDSAT) pour l'analyse de la sensibilité de la végétation sur la globalité de la région méditerranéenne (10 scènes à assembler, cf. cas d'étude n° 4 p. 58).

Préparation des images satellitaires : les prétraitements

Les scènes prises par les différents satellites sont enregistrées à l'état « brut ». Pour les analyser, les traiter et les ajuster à une base cartographique, plusieurs prétraitements sont nécessaires.

Orthorectification, géoréférencement

Les distorsions géométriques de l'image imputables au système optique de prise de vue ou à la stabilité du satellite sont généralement corrigées directement par les fournisseurs dès la réception des images. Celles qui sont dues au relief relèvent ensuite d'une correction géométrique spécifique, l'orthorectification, qui consiste à recalculer l'image à partir de points repérés sur le terrain et de coordonnées géographiques connues (en x, y et z).

Dans un second temps, pour pouvoir confronter la scène aux données géographiques propres au territoire d'étude, il est nécessaire de transformer l'image dans la même projection géographique que celle retenue pour ce territoire (dans notre cas, il s'agit de la projection Lambert II étendu) : c'est le géocodage, ou géoréférencement.

Ces deux phases de préparation sont plutôt l'affaire de spécialistes, et sont en général proposées par les fournisseurs, qui vendent des scènes avec des niveaux de traitement plus ou moins poussés mais comprenant le plus souvent au moins l'orthorectification et le géoréférencement. Pour nos usages, nous choisissons systématiquement ces produits élaborés, évidemment plus chers, mais d'utili-

sation beaucoup plus aisée que les images brutes.

Corrections des effets parasites, rééchantillonnage, mosaïquage

La troisième phase de prétraitement consiste en un filtrage de l'image, pour éliminer des effets parasites (différences d'éclairement entre versants au soleil et versants à l'ombre, présence de petits nuages...). Il s'agit donc de corrections physiques. Pour les images disposant d'un canal panchromatique, on « affine » également les images des autres canaux en les rééchantillonnant à la résolution spatiale plus précise du canal panchromatique. Les algorithmes de « fusion d'images multirésolution » subdivisent alors les pixels images des canaux vert, rouge et proche IR. Les nouveaux pixels plus fins ainsi obtenus « héritent » alors de la variabilité locale mesurée dans le canal panchromatique.

Lorsque le territoire d'étude est à cheval sur plusieurs scènes, il reste un dernier prétraitement géométrique à réaliser, qui consiste à assembler les scènes utiles en un seul ensemble, en gérant les problèmes de recouvrement entre images ; cette opération est appelée mosaïquage.

Ces derniers prétraitements sont réalisés en interne et peuvent être relativement lourds, en particulier lorsqu'on cherche à traiter plusieurs scènes prises à des dates différentes (donc avec des conditions atmosphériques et une inclinaison du soleil différentes).

Enrichissement des données : calculs d'indices composites

À partir des images dans les bandes spectrales « natives » du satellite, il est possible enfin de calculer toute une série de nouvelles images, par diverses combinaisons de ces bandes. Nous utilisons ainsi régulièrement l'indice de végétation normalisé (NDVI) calculé à partir des données du Rouge et du Proche Infrarouge (PIR-R)/(PIR+R), qui per-

met de distinguer de grandes classes de densité de végétation.

Analyse de l'image : types de traitements mis en œuvre

À l'issue des prétraitements, l'analyse proprement dite de l'image peut débiter. L'objectif consiste à traduire les informations de l'image en classes thématiques que l'on souhaite cartographier (dans notre cas, les modèles de combustible ou les zones incendiées).

Pour cette classification, il faut établir la ressemblance, en terme de signature spectrale, de chaque pixel de la zone d'étude avec l'une des classes thématiques (calculs de « distance » ou de probabilité) et définir des critères d'attribution pour qu'il soit affecté à ladite classe. Les nombreux processus de classification testés au cours des dernières années ont donné lieu à une littérature scientifique assez riche, qui distingue deux grandes familles : les classifications « manuelles » et les classifications « automatiques ».

Classifications manuelles ou automatiques ?

Les classifications manuelles consistent à analyser, bande spectrale par bande spectrale puis pour des combinaisons de bandes, l'histogramme de répartition des pixels du territoire étudié ; les histogrammes sont découpés par interprétation visuelle pour définir des classes, qu'il convient ensuite de qualifier.

Cette technique est peu utilisée pour une analyse globale de territoire, mais peut être testée lorsqu'on cherche à isoler une seule classe au sein d'un ensemble. Certains auteurs utilisent des techniques dérivées de ce principe pour cartographier les zones incendiées : cela revient à essayer d'isoler de tout le reste du territoire, par analyse spectrale, la classe des pixels brûlés (dont la photosynthèse est devenue nulle, ce qui est assez discriminant dans le spectre infrarouge).

Pour nos besoins, nous utilisons plutôt des méthodes de classification automatique ou semi-automatique, et plus particulièrement les techniques dites de classification non supervisée ou de classification supervisée, que nous employons en fonction des applications recherchées. En effet, du fait de la très forte hétérogénéité des formations forestières et des espaces naturels combustibles (landes, garrigues, maquis, pelouses, friches) en région méditerranéenne, tant spatiale que structurelle, les classifications manuelles sont très difficiles à mettre en œuvre (histogrammes complexes du fait d'un très grand nombre de pixels isolés sur le territoire), et surtout elles ne sont pas reproductibles à l'identique d'un territoire à l'autre. Au contraire, les classifications (semi-) automatiques, qui font appel à des typologies de combustibles réutilisables d'un territoire à l'autre, sont plus lourdes à mettre en place, mais ensuite plus faciles à interpréter ; le bilan final fait donc apparaître un gain de temps de réalisation, et une fiabilité plus élevée.

La classification (automatique) non supervisée

La classification non supervisée n'est pas illustrée dans les cas d'étude que nous présentons ici ; elle se fait de manière automatique, sans typologie préalable, par application de divers algorithmes qui vont évaluer la « proximité », en terme de signature spectrale, de pixels entre eux et les regrouper en classes. L'opérateur doit alors interpréter ce que chacune de ces classes représente et donc définir *a posteriori* les classes thématiques qui ont ainsi été créées. Des tests sont ensuite effectués sur des zones bien documentées pour vérifier la pertinence de description de chaque classe thématique.

La classification (automatique) supervisée

La méthode de classification supervisée, illustrée par les cas d'étude 1 à 3, suppose que les classes théma-

tiques (typologie) auxquelles on veut affecter les pixels sont définies *a priori* : dans notre cas, chaque classe correspond à un type de végétation (modèle de combustible).

Des échantillons représentatifs de chacune des classes (parcelles homogènes, de plusieurs hectares) sont dûment repérés et décrits en combinant en général photo-interprétation et tournées de terrain. Une partie de ces échantillons est utilisée comme « zones d'entraînement » par les algorithmes de classification. Par une série de tests statistiques, tous les pixels sont comparés aux caractéristiques des pixels situés dans les zones d'entraînement et rattachés aux classes correspondantes, le plus souvent selon la méthode dite du maximum de vraisemblance, réputée la plus efficace.

Le reste des échantillons, numérisé dans une couche séparée, servira à évaluer la qualité de la classification (zones de test).

Un traitement en plusieurs étapes, utilisant au maximum la richesse spectrale des images

Bien souvent, un premier traitement permet de distinguer des grands types de végétation dont certains, trop grossiers pour nos applications, nécessitent d'être affinés. Dans plusieurs de nos applications, nous réalisons ainsi un premier traitement utilisant les seules données des canaux vert, rouge et proche IR, puis un second traitement qui met en œuvre le NDVI. La mise au point de cette démarche repose sur l'expérience de l'opérateur, qui doit avoir une bonne connaissance de son sujet d'étude et maîtriser les concepts et les outils de la télédétection. Le choix des données à utiliser dans cette analyse (canaux bruts, NDVI, autre indice...) peut quant à lui être guidé par des analyses statistiques préalables, réalisées souvent sur les zones d'entraînement. Enfin, la démarche d'analyse globale repose souvent

sur une combinaison entre données images et autres sources de données (voir plus loin le paragraphe sur les limites d'emploi des images satellitaires).

Évaluation des traitements automatisés

Pour évaluer la validité des classifications automatiques, nous utilisons divers procédés informatiques, en particulier ceux qui comparent les résultats des classifications automatiques avec la description effective des zones de test identifiées à l'avance.

Dans certains cas, nous recourons à une vérification plus classique qui consiste à aller sur le terrain avec la cartographie réalisée pour en comparer le résultat avec la réalité observée. De telles campagnes d'évaluation ont été mises en œuvre pour tester des classifications réalisées à partir d'images SPOT et d'images LANDSAT sur des massifs de l'ordre de 10 000 ha, en particulier pour les lisières entre types forestiers et non forestiers. Ces interfaces forêt-urbanisme sont en effet les plus susceptibles d'erreurs de classification alors que les enjeux y sont particulièrement importants. Les évaluations ont montré que, même sur ces bordures, la classification était pertinente avec des taux de confiance très élevés (supérieurs à 90 %) et avec une erreur géométrique de l'ordre d'un pixel en toutes directions. Les zones présentant le plus d'anomalies sont :

- les zones de contact boisé/sol nu (chaussée, parking...), pour lesquelles la réponse spectrale d'un pixel mixte peut donner une radiation qui ne correspond à aucun des types de ce pixel (par exemple pour un pixel couvert pour moitié par une route, et pour l'autre moitié par une futaie, on peut obtenir la réponse spectrale d'une lande basse) ;
- les peuplements très ouverts faiblement boisés (garrigues peu

→ Suite p. 61

Cas d'étude n° 2 - Cartographie de la combustibilité de la végétation du massif forestier des 4 Termes (Bouches du Rhône)

Dans le cadre de la révision de son plan d'aménagement des forêts contre les incendies, un syndicat de communes souhaite disposer d'une cartographie actualisée de l'aléa d'incendie sur le massif des 4 Termes, sis dans le département des Bouches du Rhône : l'objectif est dans un premier temps d'élaborer une carte des types de végétation combustible sur ce massif forestier.

Cette carte doit servir ensuite, par croisement avec d'autres données, à produire une cartographie de l'intensité des éventuels incendies sur ce massif.

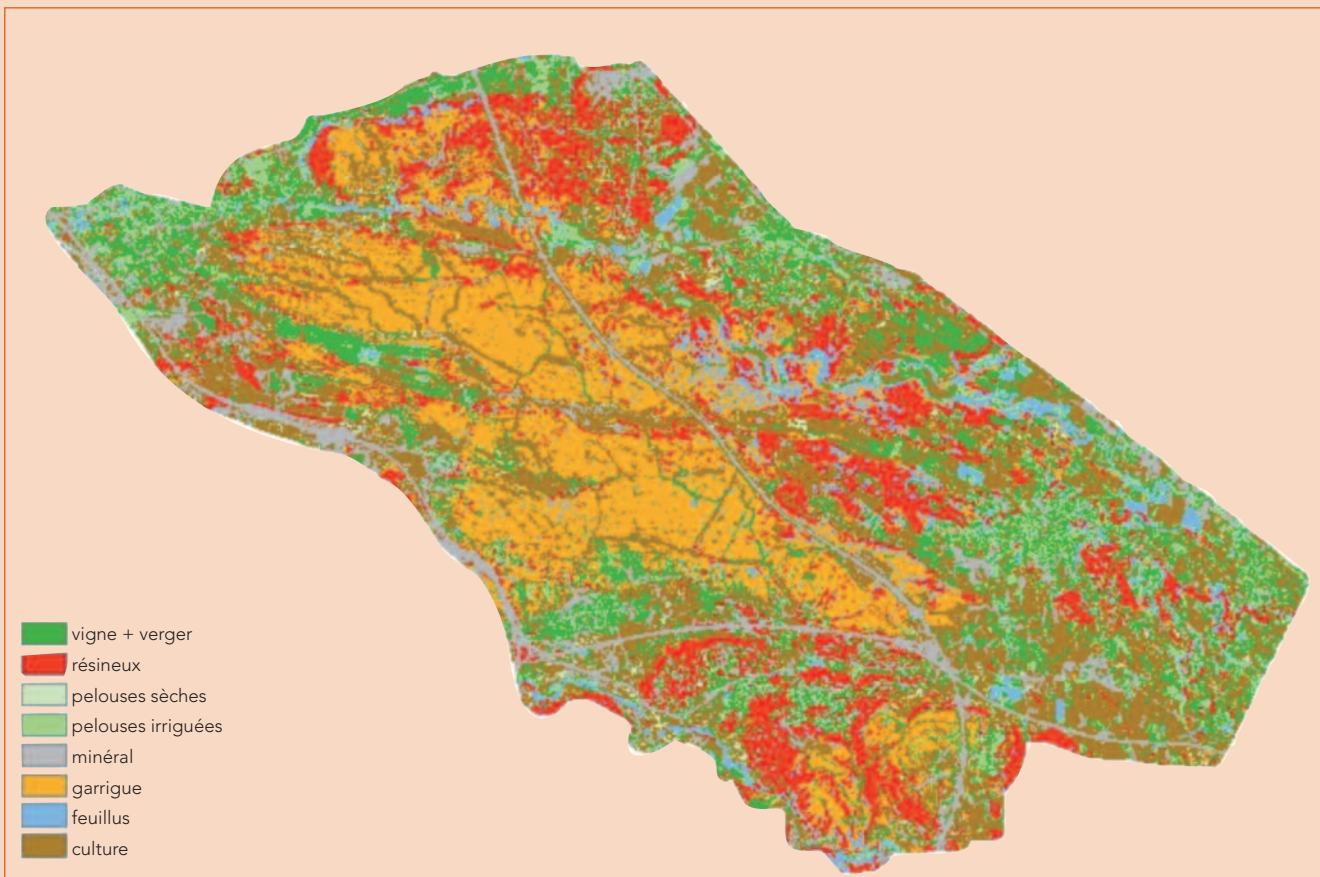
Spécifications et traitements : voir tableau 1



Extrait de la scène LANSAT7 orthorectifiée du 21/07/2001 correspondant au massif étudié (étendue 25x15km ; l'image est détournée selon l'emprise du syndicat de communes commanditaire de l'étude)

Analyse de l'image

La classification automatique ne permet de distinguer qu'un nombre limité de types forestiers (en général, les feuillus et résineux, les peuplements en mélange, ainsi que peuplements peu ou pas arborés, tels les garrigues, landes et les pelouses). D'où un premier résultat brut en 8 classes thématiques :



Résultat brut de la classification supervisée

Les traitements complémentaires de l'image et résultat final

Pour aboutir à la typologie plus détaillée répondant aux objectifs de l'étude, des analyses complémentaires sont nécessaires, soit directement à partir de l'image satellitaire (indice de végétation NDVI), soit à partir de bases de données externes, à savoir :

- occupation du sol (couche préexistante ou digitalisation de certains types sur la base de l'orthophoto) ;
- pistes DFCI ;
- cartographie des peuplements (IFN).

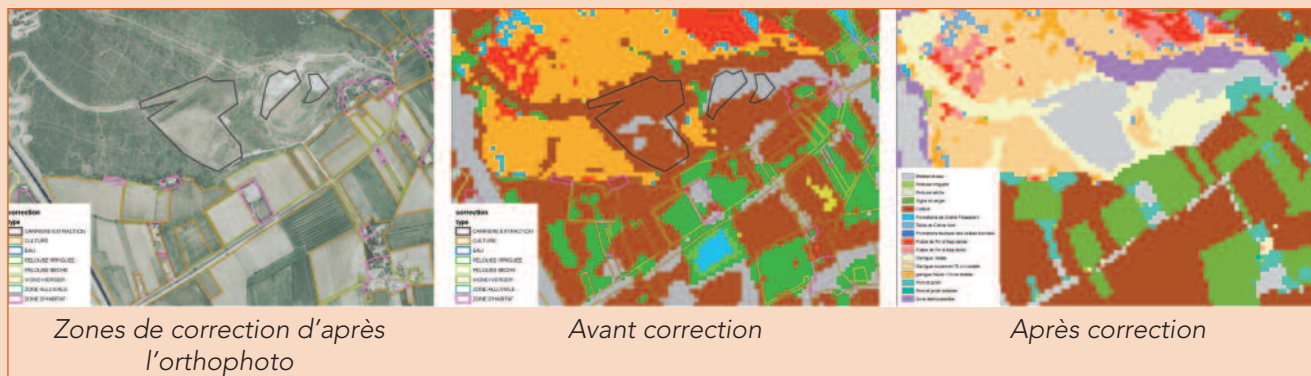
Ces traitements permettent de vérifier/ajuster la classification et de subdiviser certaines classes en types plus pertinents.

.../...

Cas n° 2 - suite

■ Ajustements liés aux grands types d'occupation du sol

La superposition du résultat brut avec les zones d'habitat permet d'affecter une partie des classes « pelouse » (sèche ou irriguée) « culture », « vigne et verger », « résineux » et « feuillus » aux types « parc et jardin » (arborés ou non). Par ailleurs, les classes « culture » et « vigne et verger » couvrent bien plus que les espaces agricoles correspondants d'après les données d'occupation des sols : le surplus est affecté pour l'essentiel au type « garrigue basse », car ces formations végétales ont la même réponse spectrale, et ce post-traitement est le seul moyen de les distinguer.



Ajustements liés aux grands types d'occupation du sol

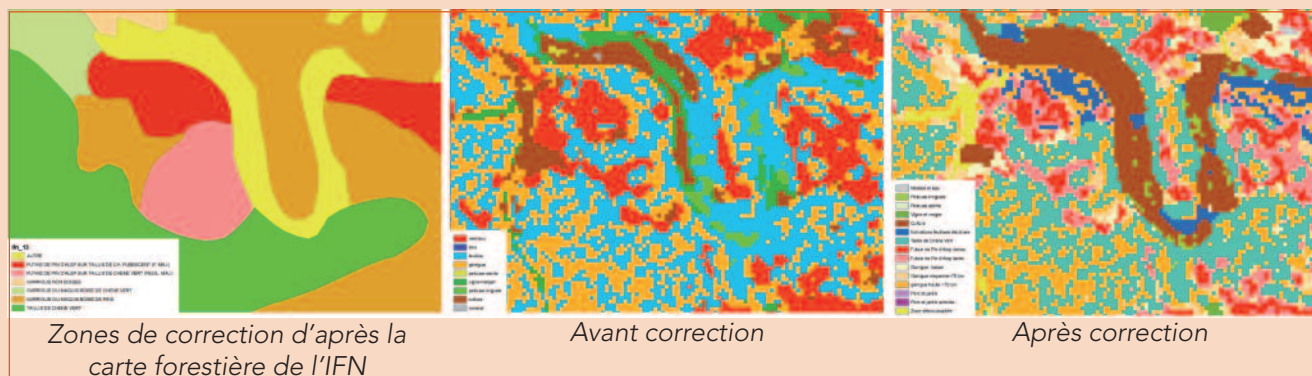
■ Ajustement lié aux zones débroussaillées

De même, la classification automatique a tendance à considérer les zones débroussaillées entretenues comme des cultures ou des vignes et vergers car elles présentent elles aussi un mélange d'individus arborés et d'espaces de terre nue et ont donc des signatures spectrales très proches. En croisant le traitement brut avec un tampon de 50 m appliqué au tracé de toutes les pistes DFCI, on réaffecte la partie correspondante des classes « culture » et « vigne et verger » au type « zones débroussaillées ».

■ Ajustements liés aux grands types de peuplements de l'IFN

L'Inventaire Forestier National produit une cartographie dont la précision ne permet pas d'être utilisée pour la cartographie du combustible à grande échelle, mais qui permet de reclasser les « feuillus » en 2 types :

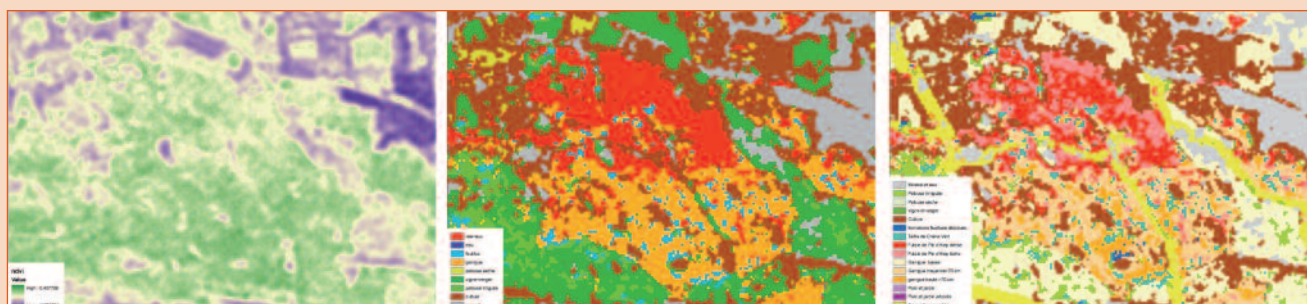
- les « feuillus » coïncidant avec les catégories IFN à chêne pubescent dominant, mélange de taillis et de futaie feuillue (dans les Bouches du Rhône, ça correspond souvent aux ripisylves) ou autres, sont affectés au type « futaie feuillue décidue » ;
- les « feuillus » coïncidant avec les catégories IFN à chêne vert dominant de garrigue et pinède (où les feuillus en mélange sont le plus souvent des chênes verts) sont affectés au type « taillis de chêne vert ».



Ajustements liés à la connaissance des grands types de peuplements de l'IFN

■ Ajustements liés à la densité de la végétation, analysée grâce à l'indice de végétation NDVI

L'indice NDVI décrit bien l'activité photosynthétique, ce qui permet parfois de subdiviser certains types forestiers en une variante plus ouverte ou de végétation plus basse et une variante plus fermée ou de végétation plus haute ; mais il n'est pas déterminant dans toutes les situations car il reste parfois difficile à interpréter. Nous avons pu l'utiliser ici pour distinguer deux types dans la classe « garrigue » (moyenne ≠ haute) et dans celle des « résineux » (pinèdes lâches ≠ denses).

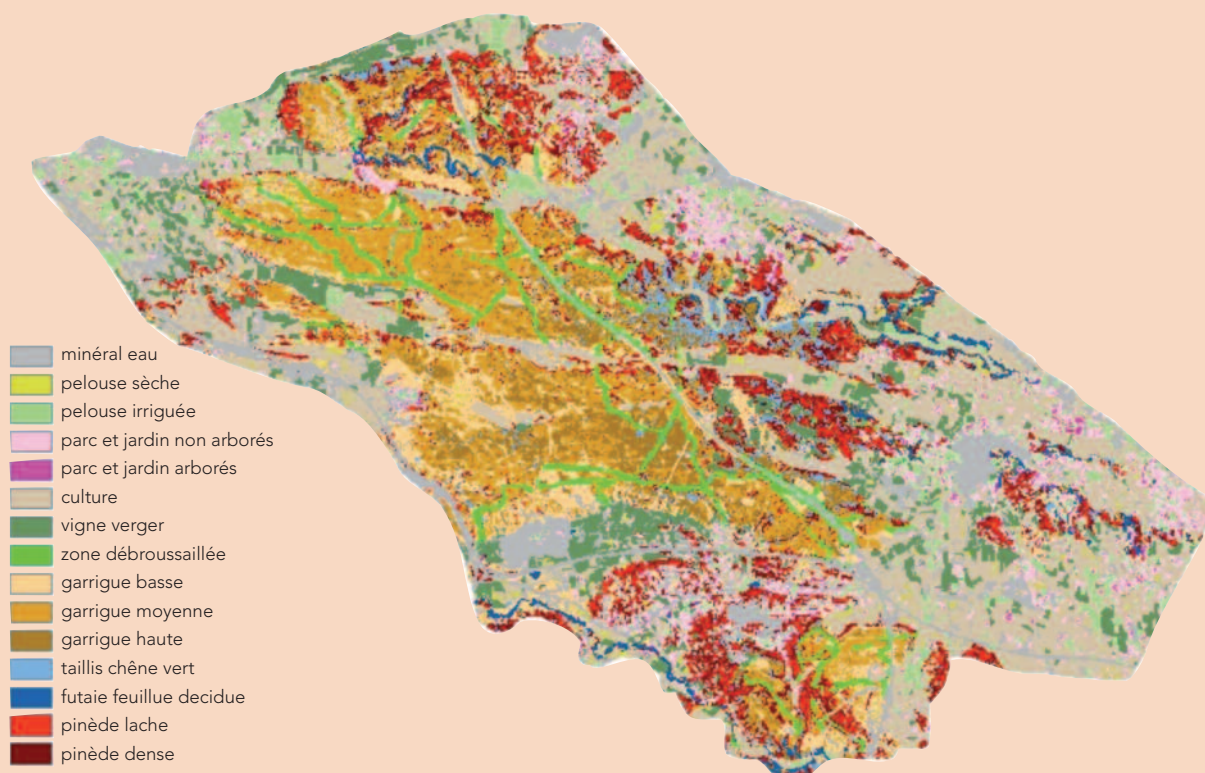


Zones de correction d'après le NDVI

Avant correction

Après correction

Ajustements liés à l'analyse de l'indice de végétation NDVI



Cartographie finale en 14 types de végétation combustible

Cas d'étude n° 3 - Cartographie de la sensibilité de la végétation aux incendies sur le département des Alpes de Haute Provence

Dans le cadre de l'élaboration de son plan départemental de protection des forêts contre l'incendie, la préfecture (DDAF) des Alpes de Haute Provence a passé commande à l'ONF d'une cartographie départementale de l'aléa incendie de forêt. L'objectif est dans un premier temps d'élaborer une carte hiérarchisant la sensibilité de la végétation aux incendies estivaux sur tout le département des Alpes de Haute Provence. Cette carte doit servir ensuite, par croisement avec d'autres données, à produire une cartographie départementale de l'aléa d'incendie de forêts.

Spécifications et traitements : voir tableau 1

Analyse de l'image

Le résultat brut de la classification supervisée distingue 6 classes thématiques (types de végétation combustible) :

- les zones sans végétation (eau, minéral),
- les zones naturelles avec peu ou pas de végétation (éboulis, pelouses sèches),
- les pelouses,
- les landes,
- les boisements à dominante de feuillus,
- les boisements à dominante de résineux.

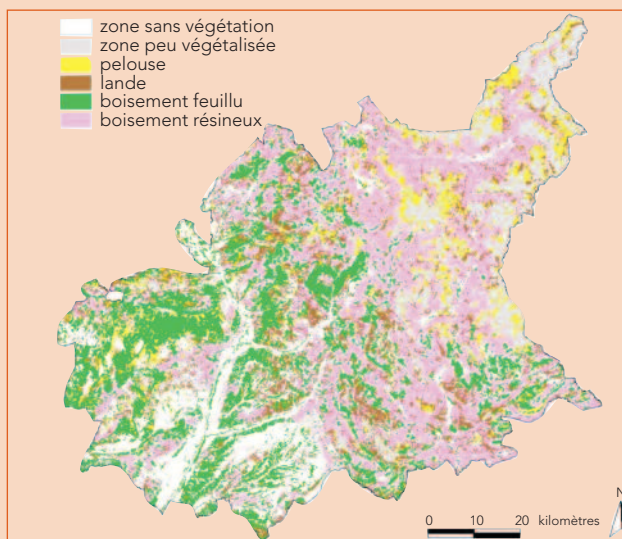
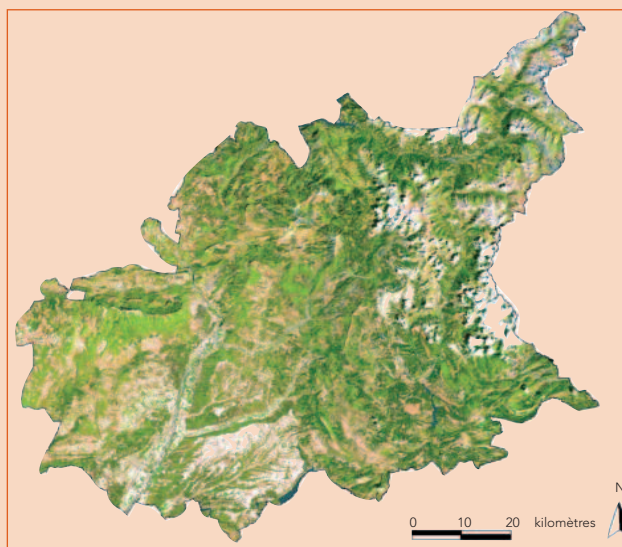
Traitements complémentaires de l'image et résultat final

Le résultat brut est ensuite croisé avec d'autres données pour reclasser les 6 grands types obtenus selon une typologie plus fine, qui intègre les critères de sensibilité en matière d'incendie : ces données sont l'indice NDVI, la répartition bioclimatique de la végétation et les différences d'ensoleillement.

L'indice de végétation NDVI permet ici de distinguer les formations à biomasse élevée des formations à biomasse plus faible : une valeur élevée de l'indice indique une forte activité photosynthétique donc une grande quantité de combustible fin et vivant.

De haut en bas :

- Extrait de la scène Landsat7 ETM+ orthorectifiée
- Résultat brut de la classification supervisée
- Résultats du traitement NDVI, qui donne un indicateur indirect de la quantité relative de biomasse fine présente au sein des formations analysées

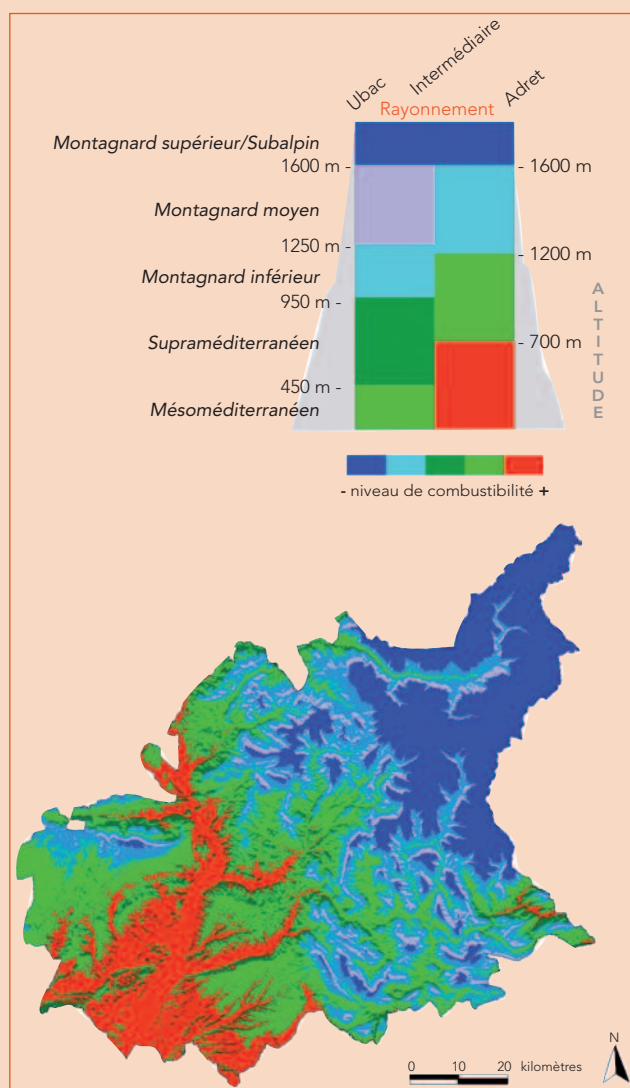


Nous avons établi une typologie bioclimatique des formations végétales en délimitant les étages bioclimatiques selon une combinaison de l'altitude, de l'exposition (calcul sur modèle numérique de terrain de l'IGN) et de la pluviométrie (étude régionale CRPF-ONF) : elle permet de distinguer des sous-types homogènes qui rendent compte de l'étagement des formations forestières (découpage des types «boisement feuillu» et «boisement résineux») et de leur attribuer un niveau relatif de combustibilité sous forme d'un indice variant de 1 à 5.

Pour affiner, nous avons croisé avec un indice de rayonnement solaire représentant la quantité de rayonnement solaire reçue par les différentes formations forestières et qui traduit des niveaux de dessèchement potentiel de la station en saison estivale. On calcule au préalable la course solaire sur la période de référence de juin à septembre, qui fournit un indicateur de la quantité

maximale de lumière potentiellement reçue par chaque pixel du secteur d'étude. Puis, par calculs sur le modèle numérique de terrain de l'IGN au pas de 50 mètres, on estime le rayonnement reçu par chaque pixel en fonction de son exposition et des ombres portées par le relief environnant. Cet indice est finalement réparti en 3 classes : adrets peu confinés, ubac ou fort confinement, expositions intermédiaires.

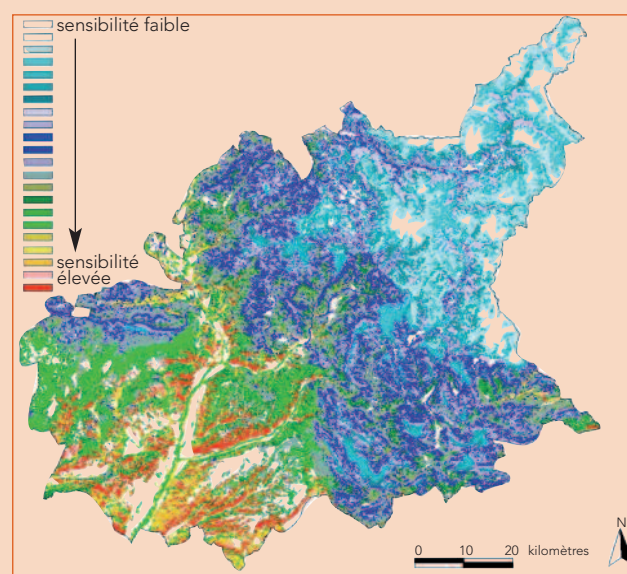
Le résultat du croisement de la classification supervisée avec les couches correspondant à ces indices se décline sous forme d'un indice final de sensibilité de la végétation aux incendies estivaux.



Résultats de la typologie bioclimatique des formations forestières, qui permet de déterminer 5 niveaux relatifs de sensibilité de la végétation aux incendies



Carte de l'indice de rayonnement solaire, en 3 classes, traduisant des niveaux de dessèchement potentiel de la végétation



Carte finale de la sensibilité de la végétation à l'incendie sous forme d'un indice numérique

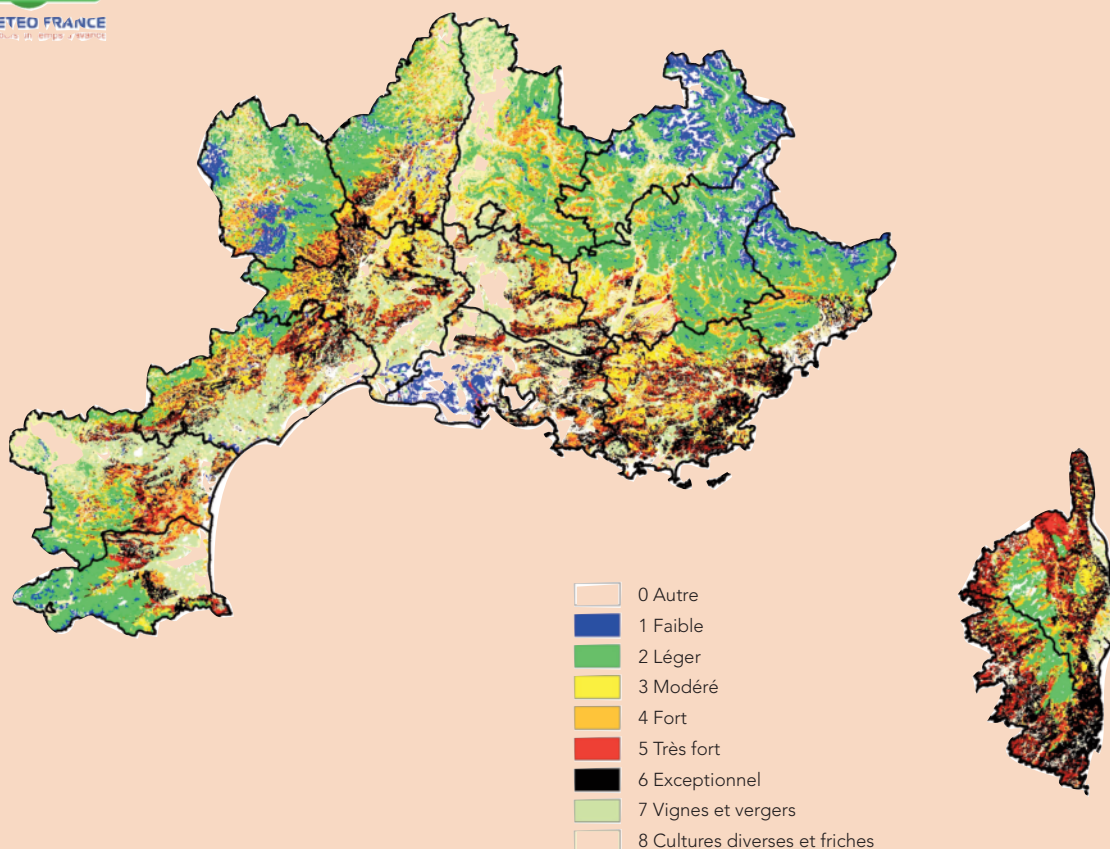
Cas d'étude n° 4 - Cartographie zonale quotidienne de la sensibilité de la végétation

L'état major interministériel de la préfecture de zone de défense sud (EIMZsud) a besoin en été d'une cartographie quotidienne de la sensibilité la végétation aux incendies de forêts. L'objectif est donc d'élaborer une carte de sensibilité potentielle de la végétation en période estivale sur la région méditerranéenne (15 départements), puis de la croiser avec des données traduisant la sécheresse pour produire une cartographie quotidienne de la sensibilité la végétation aux incendies de forêts. Cette carte est utilisée par l'EIMZ sud et son centre opérationnel de zone (COZ) comme outil d'aide à la décision pour la gestion des affectations de renforts nationaux (avions bombardiers d'eau et colonnes de renforts) aux départements touchés par les sinistres, en complément des éléments de danger météorologiques fournis par Météo France, et des informations sur l'activité opérationnelle provenant des services d'incendie et de secours.

Les contraintes d'accès aux images, exposées au tableau 1, sont telles que nous n'avons pas pu trouver d'images répondant à la fois aux spécifications techniques et aux exigences d'un budget raisonnable.

Alternative aux images satellite pour la cartographie du combustible (sensibilité potentielle)

Dans un premier temps, la cartographie zonale de sensibilité potentielle de la végétation a donc été réalisée sans recours aux images satellitaires, en s'appuyant sur la cartographie des types de peuplements de l'inventaire forestier national (nous détenons une concession d'utilisation pour les 15 départements méditerranéens).



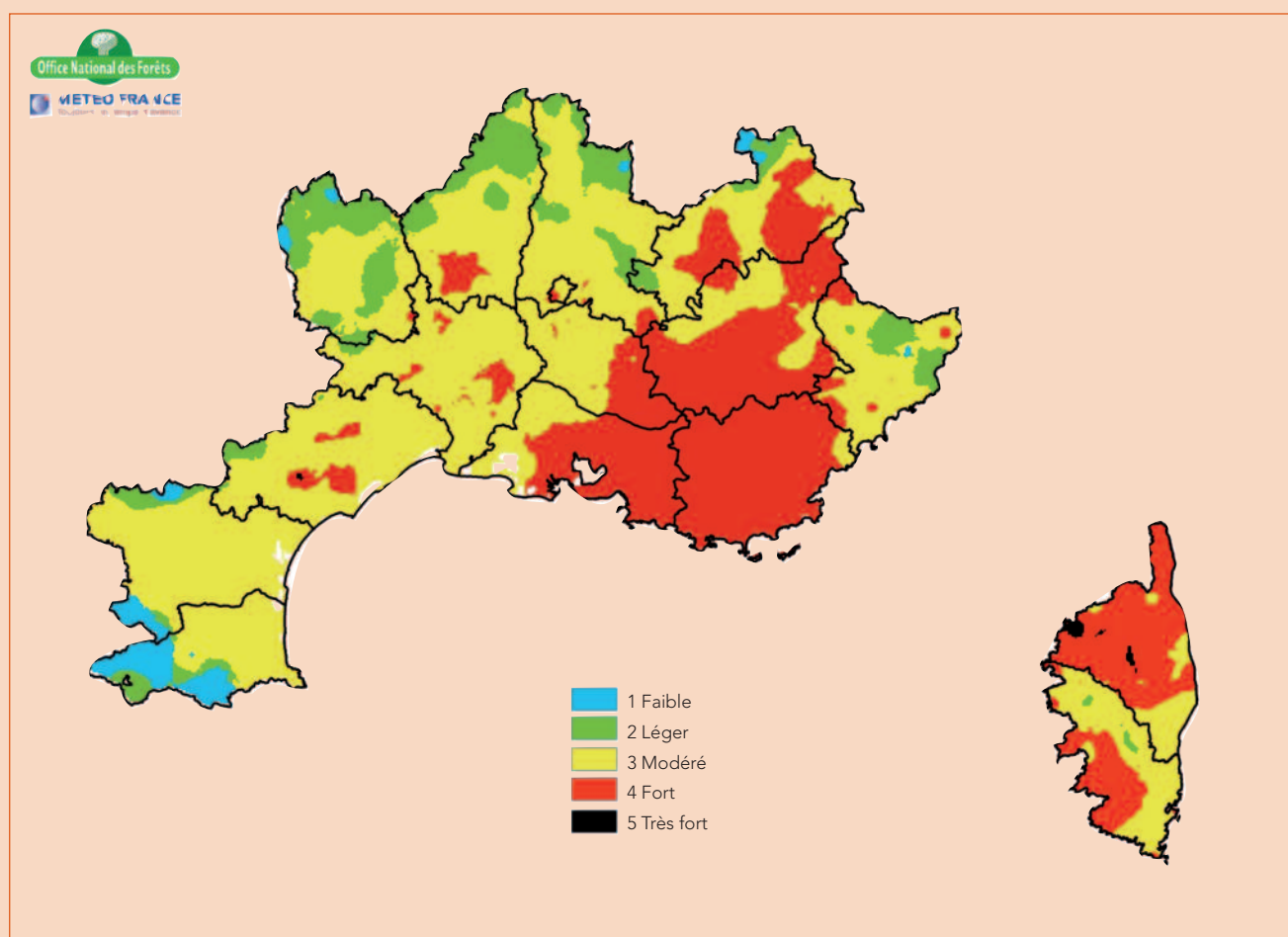
Carte de sensibilité potentielle de la végétation par sécheresse forte sur toute la zone

Les types de peuplements IFN sont d'abord rassemblés en **29 groupes homogènes** vis-à-vis de leur comportement au feu puis **classés en 6 niveaux de sensibilité** en période estivale (variant de faible à extrême). Ce classement se fait en application des connaissances scientifiques disponibles et d'après les connaissances empiriques issues des retours d'expérience sur les incendies des dernières décennies ; il utilise l'échelle de danger d'incendie familière à tous les acteurs de la DFCI, avec une hypothèse de forte sécheresse homogène sur toute la zone. Les secteurs non forestiers (agricoles, urbains ou autres), qui ne répondent pas aux mêmes logiques de sensibilité au feu, sont classés à part.

Alternative aux images satellite pour le suivi de l'état de sécheresse (sensibilité réelle)

Pour connaître la sensibilité réelle pour un jour donné, il faut ensuite moduler cette sensibilité potentielle en fonction de la sécheresse observée ou prévue.

Pour les besoins de l'EIMZ sud, la sécheresse de la végétation est actuellement approchée par un indice de sécheresse du sol (dérivé de la méthode canadienne de l'Indice Forêt Météo) calculé chaque jour par Météofrance. Car l'imagerie satellite n'apporte pas de solution satisfaisante pour l'instant.



Carte de l'Indice de sécheresse des sols produite par Météo France pour le 10 août 2010

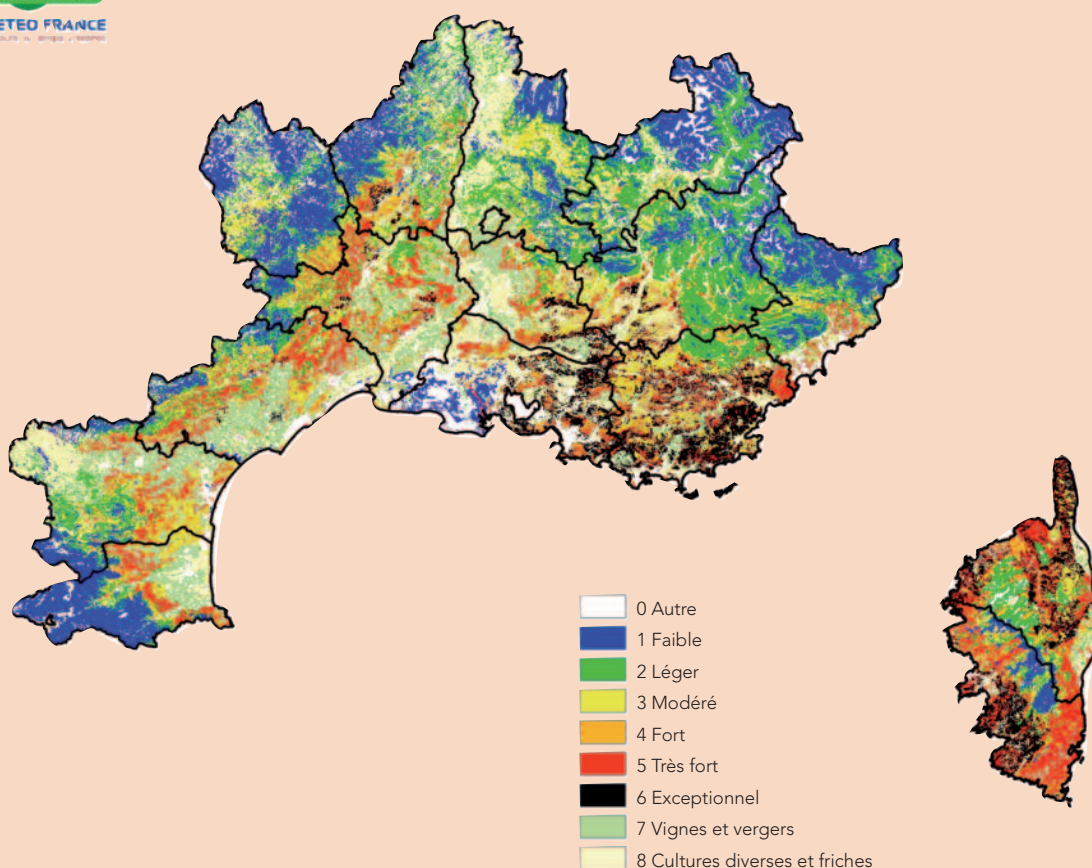
.../...

Le suivi quotidien des variations de teneurs en eau des végétaux méditerranéens a fait l'objet de plusieurs projets de recherche (en particulier le projet Forest Focus intitulé : « indices satellitaires et stress hydrique de la végétation méditerranéenne du bosquet au pixel ») et de thèses (voir Dauriac, 2004). Mais ces travaux ont surtout mis en évidence une très forte hétérogénéité de la teneur en eau des broussailles méditerranéennes, tant au sein d'un individu donné (différences pouvant être élevées entre les feuilles sommitales exposées au soleil et celles des branches basses les plus abritées) qu'entre individus. Dans ces conditions, il est quasiment impossible de mettre en évidence des corrélations entre la teneur en eau d'un peuplement moyen et la réponse spectrale des principaux satellites actuellement accessibles avec une donnée quotidienne, d'autant que leur résolution est assez faible (250 m à 1 km) et que chaque pixel peut couvrir des situations très disparates.

En l'état des connaissances et des techniques, la cartographie quotidienne de la sensibilité de la végétation sur la région méditerranéenne ne peut donc être directement déduite de l'analyse d'images satellitaires, mais des recherches (Chéret *et al.*, 2007) auxquelles nous nous associons sont poursuivies pour les intégrer au moins partiellement à la chaîne de traitement à mesure que de nouveaux satellites sont accessibles et que nos capacités d'analyse s'améliorent.

En pratique, la direction sud-est de MétéoFrance, qui met en place une cellule dédiée à l'assistance feux de forêts, adresse automatiquement ses données à l'ONF sous forme de couches SIG, qui sont croisées avec les données de sensibilité potentielle de la végétation afin de pondérer la sensibilité de chaque pixel en fonction de la sécheresse.

Le résultat final est la carte de sensibilité de la végétation pour une journée donnée.



Résultat final : carte de la sensibilité de la végétation pour la journée du 10 août 2010

boisées avec des cépées de feuillus, en général denses au milieu de pelouses sèches) ;
- les formations débroussaillées récemment.

Les limites d'emploi des images satellitaires

L'utilisation des images satellitaires seules ne permet généralement pas de distinguer l'ensemble des catégories de végétation recherchées. Pour obtenir un résultat opérationnel, il est nécessaire dans la plupart des cas de compléter ces classifications initiales par des analyses complémentaires ou de recourir à des informations contenues dans d'autres bases de données (cas d'étude n° 2, 3) : description de végétation des aménagements forestiers, bases de données de l'Inventaire forestier national... Les traitements complémentaires peuvent parfois être plus longs et plus complexes que le traitement de l'image satellitaire proprement dit ; de plus, ils ne sont pas toujours reproductibles d'une image à l'autre.

Conclusion

À ces réserves près, les produits de haute résolution des satellites SPOT et LANDSAT sont aujourd'hui utilisés en routine dans le cadre d'études DFCI. Ils permettent de décrire de manière très satisfaisante la variabilité spatiale sur les territoires étudiés des divers types de combustible, avec un rapport coût/efficacité très supérieur aux méthodes traditionnelles se fondant principalement sur une combinaison de relevés de terrain et de photo-interprétation. La validité des cartographies obtenues est bonne et satisfait pleinement nos donneurs d'ordre.

Le recours à des images à très haute résolution (ex. IKONOS) est pour le moment marginal, car il répond assez mal à nos besoins de classification de modèles de végétation (combustible) classiques. Nous pourrions cependant y recourir pour mieux ap-

procher les modèles de végétation en zones périurbaines anthropisées. Dans de telles zones, ces images pourraient permettre d'aller au-delà des classifications spectrales menées jusqu'à présent en les combinant par exemple avec des analyses de textures, qui permettent notamment de repérer des structures de végétation régulière (comme les vignes ou les vergers), de discriminer des milieux qui restent confus pour l'instant.

D'autres recherches sont aussi poursuivies en lien avec l'école d'ingénieurs de Purpan sur les utilisations potentielles des images MODIS, qui n'ont qu'une résolution moyenne (250 m) mais qui pourraient permettre de rajouter une dimension temporelle à nos analyses, par exemple pour caractériser l'évolution de la teneur en eau de certaines formations végétales au cours de la saison estivale (Chéret *et al.*, 2007). En attendant l'aboutissement de ces recherches, une méthodologie alternative de cartographie de la sensibilité quotidienne de la végétation en région méditerranéenne a été mise en place (cas d'étude n° 4) pour répondre à une demande forte des responsables des dispositifs de surveillance et d'alerte, mais aussi de l'état-major interministériel de la préfecture de zone sud ; elle s'appuie sur la cartographie des types de peuplements de l'IFN, et sur les calculs d'évaluation quotidienne de la sécheresse des sols.

Yvon DUCHÉ

Rémi SAVAZZI

Benoît REYMOND

Pôle territorial DFCI
ONF- DT Méditerranée

Ève CARNUS

Lionel CRESPI

Pôle territorial SIG
ONF- DT Méditerranée

Remerciements

Cet article s'appuie pour partie sur des travaux réalisés par Jean-Luc Kicin (du pôle SIG de la Réunion) lorsqu'il était en poste au pôle territorial SIG Méditerranée. Il a également bénéficié d'un important apport méthodologique, d'organisation, de mise en forme et de relecture de la part d'Anne Jolly et de Christine Micheneau.

Bibliographie

Dauriac F., 2004. Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque feu de forêt. Thèse de doctorat, unité mixte de recherche CEMAGREF-ENGREF «structures et systèmes spatiaux», Montpellier, 221 p.

Trabaud L., 1989. Les feux de forêts, mécanismes, comportement et environnement. Editions France-sélection, 279 p.

Chéret V., Denux J.P., Sampara W., Gay M., 2007. Time series analysis of remote sensing to calculate and map operational indicators of wildfire risk. Remote sensing and land management laboratory-École d'Ingénieurs de Purpan, Toulouse, France, 6 p.

Zammit O., 2008. Détection de zones brûlées après un feu de forêt à partir d'une image satellitaire SPOT 5 par techniques SVM. Thèse de doctorat, université de Nice-Sophia-Antipolis — INRIA, Sophia-Antipolis, 146 p.

ONF, 2004. Dossier « Incendies de forêt ». Rendez-vous techniques de l'ONF n°4, pp. 17-52

Applications de télédétection en Guyane : une histoire de diversité

La Guyane est un territoire d'élection pour la télédétection, avec son immense massif forestier à la croisée d'enjeux considérables. Nos Rendez-vous techniques en ont déjà donné des exemples (numéros 17 et 20), mais les besoins sont énormes et l'exploration se poursuit, dans une perspective très pratique d'aménagement du territoire et gestion de la biodiversité.

La Guyane bénéficie d'une position tout à fait privilégiée pour le développement d'outils et de compétences en télédétection. L'installation d'une station de réception SPOT Image à Cayenne depuis 2005 améliore notablement la couverture du secteur par ce prestataire. Le projet SEAS (Surveillance de l'Environnement Amazonien par Satellites), piloté par l'IRD et qui accompagne cette installation, permet la mise à disposition gratuite des images pour les projets de recherche et d'aménagement menés par les établissements publics de Guyane. Enfin, la présence sur le département d'organismes de recherche investis dans la télédétection, comme l'IRD et le CIRAD, favorise la formation des opérateurs et le transfert d'outils vers les gestionnaires, dynamique d'autant plus active qu'un Groupement d'Intérêt Scientifique (IRISTA) structure de nombreux échanges entre recherche et gestion.

Compte tenu de l'étendue de la forêt publique en Guyane (7,5 millions d'hectare) et du faible nombre de personnels forestiers au regard de cette surface, les premières applications développées par l'ONF et ses partenaires se sont initialement portées sur la surveillance avec pour objectif

d'améliorer la maîtrise par le gestionnaire des activités se développant sur son domaine. Des traitements ont été mis au point sur des images SPOT4 et SPOT5 pour détecter les sites défrichés par l'orpaillage mais aussi les pollutions de l'eau qui en résultent (Joubert *et al.*, 2008). Ces premiers résultats ont été suivis de la mise sur pied d'un véritable observatoire minier combinant une veille (traitements d'image réguliers) et un système d'alerte et de diffusion de l'information aux acteurs impliqués dans le contrôle de cette activité (DRIRE, Gendarmerie, Forces armées, Parc amazonien...).

D'autres algorithmes ont été développés sur les images SPOT afin de détecter les ouvertures de canopée et les plages de sol nu (dégradations du sol) inhérentes à l'exploitation forestière (Guitet *et al.*, 2007). L'exploitation s'étendant généralement sur plusieurs saisons sèches et sur des parcelles de surface moyenne dépassant les 300 ha, cet outil permet d'obtenir un état d'avancement relativement précis du chantier et d'orienter si nécessaire les lourds contrôles de terrain en fonction des indices relevés (trouées importantes, possibles ouvertures...). Il autorise surtout une vision globale et un bilan complet des impacts sur la parcelle en fin d'exploitation.

Ces premiers pas ont été suivis ces dernières années d'une plus grande diversification des thèmes d'étude et des méthodes employées. Appuyés par différents partenaires, l'ONF Guyane s'est ainsi lancé dans le développement de plusieurs applications visant à accroître nos connaissances sur la structuration de la biodiversité et sa prise en compte dans les problématiques d'aménagement. La télédétection est aussi de plus en plus sollicitée pour les évaluations de stocks et de flux de carbone, dans une région où aucun inventaire forestier de type IFN n'est mené.

Aménagement du territoire et biodiversité

La mise en place d'un Code Forestier pour la Guyane est très récente (Loi du 28 Juillet 2005 suivie des décrets d'application des 2 juillet et 14 novembre 2008). Une des suites de cet événement a été la définition et la délimitation d'un Domaine Forestier Permanent (DFP) de 2,2 millions d'hectares, situé sur une bande de 70 à 100 km en retrait de la zone littorale habitée et sur lequel s'applique le Code Forestier. C'est sur ce domaine en particulier que s'exerce la majeure partie des activités de l'ONF : aménagement forestier, création de desserte, exploitation, mise en place de Réserves...

Le territoire compris entre le domaine forestier permanent et le trait de côte, soit presque 750 000 hectares, concentre environ 95 % de la population guyanaise, population qui a une croissance démographique parmi les plus fortes au monde, ce qui engendre un développement foncier extrêmement rapide. Mais ce territoire héberge aussi des milieux naturels riches et diversifiés, spécifiques à la bande côtière de la Guyane française, voire, pour certains, spécifiques à la bande côtière du plateau des Guyanes : forêts sur sables blancs, forêts littorales sur sols rocheux, marécages boisés... Ainsi de nombreux conflits d'intérêt apparaissent ou vont apparaître dans les années à venir entre un développement agricole et urbain rapide et des

milieux naturels spécifiques parfois vulnérables. L'aménagement du territoire est donc une problématique extrêmement présente en Guyane et très conflictuelle. Aucun document ne fait un état des lieux objectif de l'occupation du sol et des dynamiques foncières, d'où la volonté de combler ce manque par la création d'une donnée cartographique d'occupation des sols, fortement inspirée de la base de données CORINE Land-cover utilisée dans l'union européenne (figure 1).

Cartographie et dynamique de l'occupation des sols

La cartographie a été réalisée pour les années 2001 et 2005 à partir des couvertures de photographies aériennes fournies par l'IGN (BDOrtho©, à

50 cm de résolution spatiale). Le foncier évoluant à une vitesse fulgurante, il a été nécessaire de faire une mise à jour 2008 à partir de prises de vue satellites afin de suppléer à l'absence de nouvelle campagne IGN. Cependant deux inconvénients majeurs apparaissent avec l'utilisation de ces données : la perte de précision et l'enneigement. Pour compenser au maximum la perte de précision, nous avons utilisé des images SPOT 5 à 2,5 m de résolution¹. Ces images ne remplacent pas des photographies aériennes mais permettent la mise à jour d'une donnée déjà existante. Le fort taux d'enneigement, problématique propre aux zones intertropicales, nous oblige à utiliser 3 à 5 images de dates différentes par KJ², pour que chaque

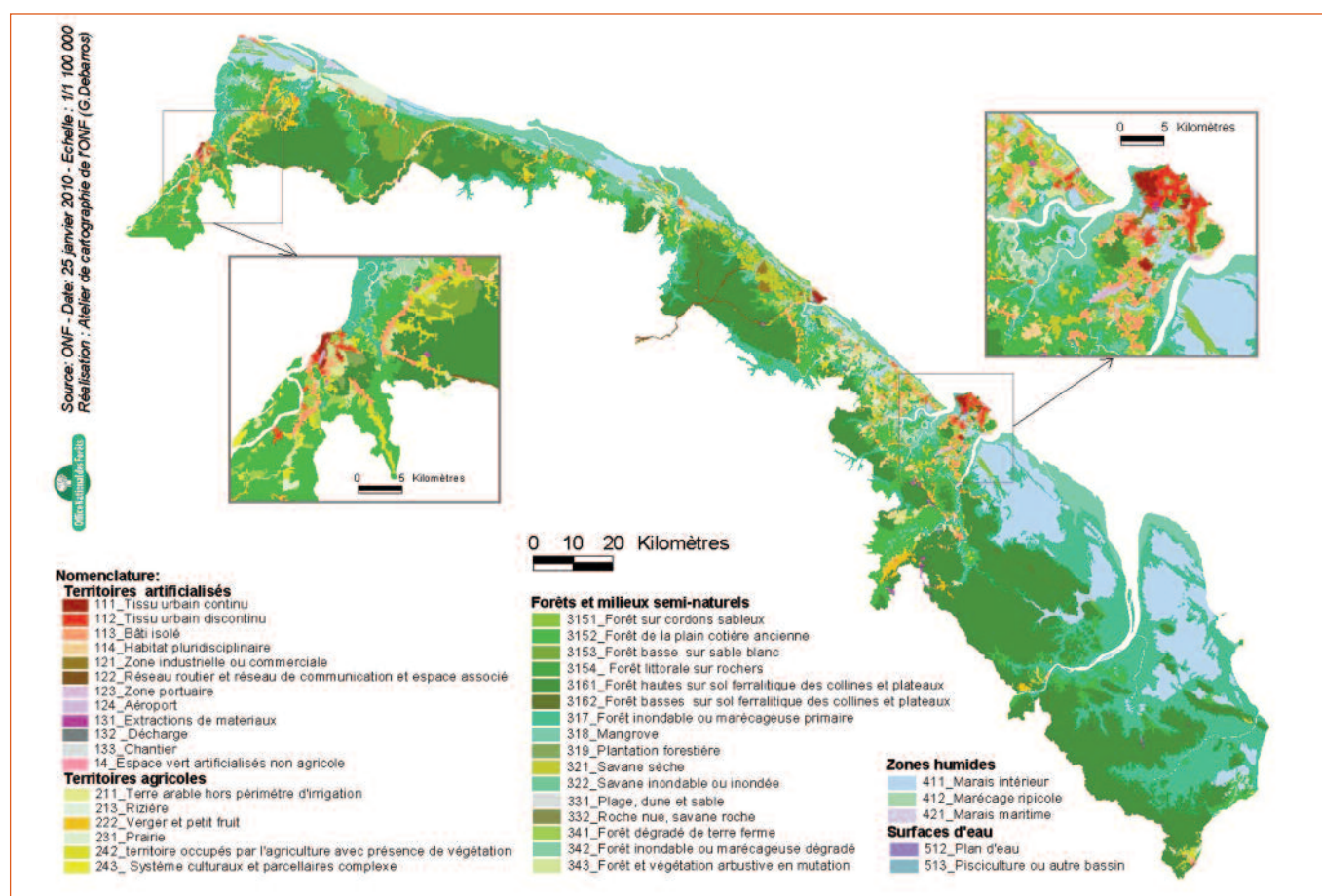


Figure 1 : cartographie de l'occupation des sols 2008, entre la côte et le domaine forestier permanent, une région où les problèmes d'aménagement du territoire sont énormes

¹ Les images du satellite SPOT 5 ont une résolution de 10 mètres en multi-spectral et de 5 mètres dans le canal panchromatique. L'innovation par rapport aux autres satellites SPOT est sa capacité de prendre deux images panchromatiques simultanément, décalées d'un demi pixel, ce qui permet de créer des images panchromatiques à 2,5 mètres de résolution et, par croisement avec des images multi-spectrales d'obtenir des images couleur à 2,5 mètres.

² Un KJ correspond à l'emprise de chaque image satellite

point de la zone d'étude soit vu par au moins une image sans nuage. La cartographie des types de végétation s'est faite par photo interprétation, c'est-à-dire par observation, analyse et délimitation à l'écran des différentes entités. Ce travail, considérable, a été couplé à des missions de terrain pour lever des doutes ainsi qu'à une mission hélicoptère en fin d'étude qui a permis de valider la donnée cartographique.

Le croisement des couches SIG des 3 années (2001, 2005 et 2008) permet d'étudier les dynamiques foncières et d'identifier les secteurs à enjeux ainsi que les (modestes) « fronts pionniers », sources de conflits actuels ou à venir. Ainsi sur la bande côtière de la Guyane française, pour la période 2005- 2008, chaque année, 1440 hectares de milieux naturels sont mis en culture et 986 hectares deviennent des territoires artificialisés. Si l'on tient compte des forêts dégradées ce sont 2669 hectares de milieux naturels qui sont anthropisés tous les ans. Ces données sont très précieuses pour les acteurs locaux, que ce soit dans l'aménagement du territoire pour l'élaboration des documents d'urbanisme (PLU, etc.), pour l'aide à la prise de décision (délimitation de nouveaux espaces agricoles...), dans l'environnement (modernisation des ZNIEFF), ou encore pour différentes études sociales (par exemple l'étude Oyapock « un fleuve en partage » du CNRS).

Application au réseau écologique des DOM, pour la Guyane

Au sein de l'ONF, cette connaissance de la dynamique foncière a deux utilisations distinctes. Tout d'abord pour la surveillance du territoire puisque cette donnée permet d'identifier les occupations illégales sur le domaine privé de l'état. Mais elle permet aussi l'identification de milieux naturels pouvant bénéficier d'une mesure de protection particulière, soit par l'extension des

forêts relevant du DFP, soit dans le cadre du réseau écologique des DOM (REDOM), à l'étude sous l'égide du ministère chargé de l'environnement. Il s'agit d'une adaptation de NATURA 2000, qui consiste à identifier un réseau pouvant bénéficier de mesures de gestion particulières. La donnée cartographique d'occupation des sols va servir de base pour une matrice qui prendra en compte différents critères (critères d'occupation, habitats menacés, habitats patrimoniaux, richesses,...) qui seront ensuite croisés avec le maximum de données faunistiques et floristiques.

Biodiversité encore : détecter les reliefs pour cartographier les habitats

L'énorme réservoir de biodiversité que constitue le massif Guyanais ainsi que son appartenance à un des derniers grands massifs de forêt tropicale humide épargnés par la destruction justifient pleinement que la préservation de la biodiversité soit l'enjeu majeur de l'aménagement forestier en Guyane. Cependant, la prise en compte de cette diversité dans les documents d'aménagement nécessite non seulement une caractérisation fine mais aussi une bonne com-

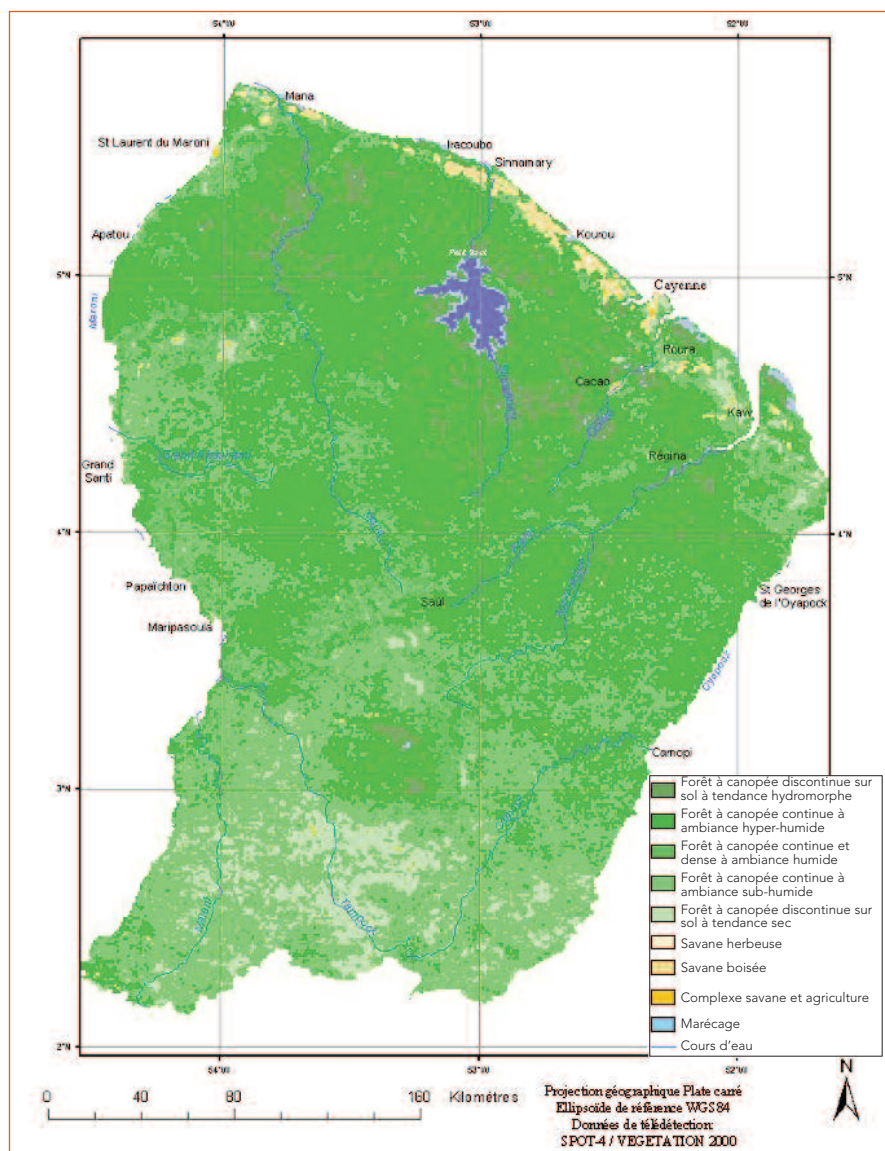


Figure 2 : carte de végétation de la Guyane réalisée à partir d'images SPOT-Vegetation de l'année 2000, d'après V Gond 2009

préhension de sa structuration spatiale, préalable à tout effort d'analyse et de cartographie à l'échelle de la forêt. Or les données concernant les massifs forestiers en cours d'aménagement sont encore peu nombreuses et le recueil de nouvelles données naturalistes précises sur le terrain, trop exigeant en moyens pour être généralisé, ne peut être que ponctuel. La télédétection s'impose dans ce cadre comme outil de diagnostic des milieux naturels à l'échelle du massif et à moindre coût.

Limites de la cartographie de la végétation guyanaise

Des travaux de cartographie de la diversité des formations forestières ont déjà été entrepris en 2005 par des chercheurs de l'IRD et du CIRAD à partir d'une mosaïque d'images SPOT 4 (capteur VEGETATION, réalisant des acquisitions journalières à 1 km de résolution spatiale) obtenues par compilation de prises de vue sur l'année 2000 sur l'ensemble du plateau des Guyanes (Gond *et al.*, 2009). Cette approche basée sur des signatures spectrales³ a permis de reconnaître 5 différents types forestiers sur la Guyane, ce qui est une gageure. En effet, ces forêts de feuillus sempervirentes irrégulières et totalement diversifiées, sont *a priori* très semblables les unes aux autres en termes d'activité photosynthétique ou d'humidité relative. Ces différents types ont cependant pu être interprétés comme des variations d'ouverture de la canopée et de grosseurs moyennes des bois, liées notamment à un gradient climatique Nord-Sud. Des variations phénologiques pourraient aussi expliquer ces groupes différenciés.

Cette typologie qui dégage une grande structuration biogéographique reste cependant une approche régionale assez générale (figure 2). Aussi une deuxième approche indirecte via le relief a été tentée considérant, d'après divers travaux en pays tropicaux, que la di-

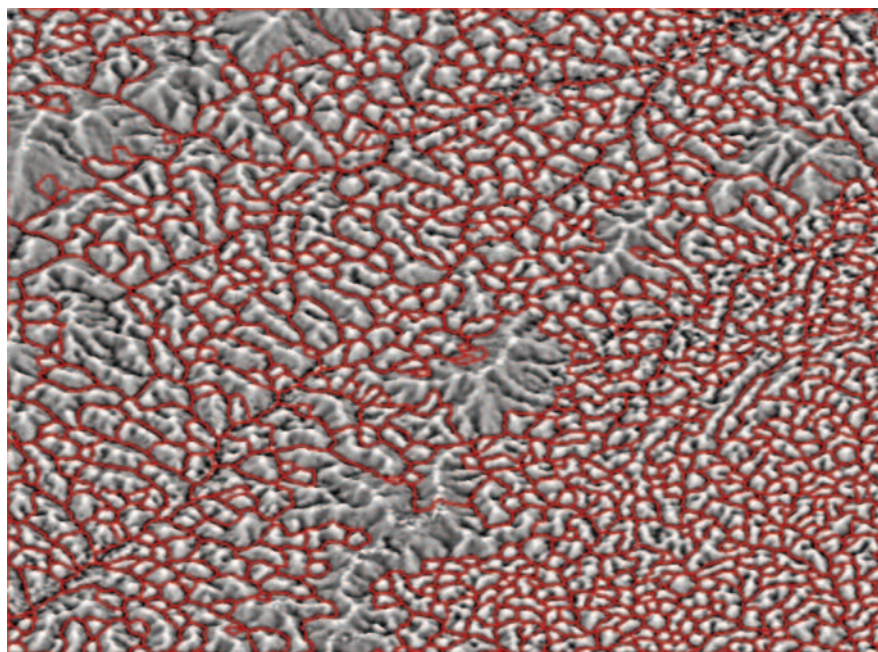


figure 3 : Modèle Numérique de Terrain SRTM avec délimitation des unités de modelé

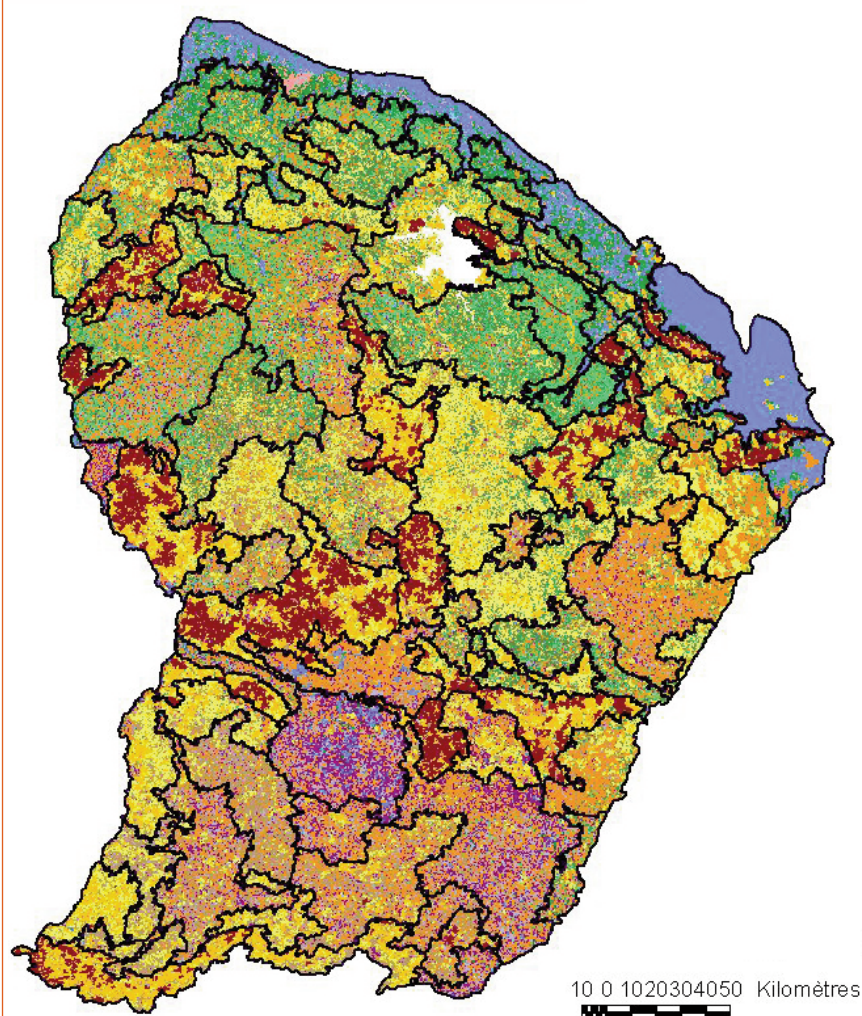
Les unités de modelés sont délimitées par les criques, cols et ensellements qui séparent des lignes de crêtes ou des plateaux bien individualisés

versité des habitats forestiers s'organise en fonction de la géomorphologie à toutes les échelles : celle du massif (macro-reliefs) mais aussi celle du paysage (mésorelief) et celle des stations (micro-relief) (Sabatier *et al.*, 2007). Pour développer cette approche, le modèle numérique de surface SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, à 30 m de résolution spatiale) a été exploité. Ces données permettent de disposer d'une description du relief du sursol, et sont généralement utilisées par approximation comme une description du relief du terrain (sol). L'objectif était de découper l'espace guyanais en unités géomorphologiques les plus fines (unités de modelé), puis d'en tirer diverses statistiques (forme, dénivelé, profil des versants...) permettant de les classer finement en types de modelés. L'analyse spatiale de la répartition de ces différents types permet ensuite de délimiter des unités de paysage, par ailleurs fortement liées à la géologie, et d'aboutir à la cartographie de zones naturelles.

Du modelé élémentaire aux grands types de paysages

L'ensemble du territoire guyanais a ainsi été segmenté en unités de modelé définies, à partir du modèle numérique, comme des interfluvies délimités par un modèle d'écoulement et bouclés automatiquement au niveau des cols et ensellements (figure 3). Ces travaux ont pu être menés grâce à un Volontaire à l'Aide Technique hautement spécialisé et avec l'appui d'un géomorphologue de l'UMR Géode (Université de Toulouse). Au total, cette segmentation a abouti au découpage de près de 225 000 unités de modelé, pour chacune desquelles 17 descripteurs topographiques ont été calculés en vue de l'étape suivante : une classification multivariée non supervisée (analyse multivariée de type ACP suivie d'une classification de type « K-mean ») destinée à définir des types de modelés. Le résultat de la classification a été confronté aux 15 géomorphotypes proposés par le géomorphologue d'après l'observation

³ La signature spectrale d'un objet correspond à l'ensemble des valeurs de réflectance de l'objet pour différentes longueurs d'onde (encore appelées bandes spectrales) sélectionnées – leur combinaison permet de distinguer différentes catégories d'objets (grands types forestiers par exemple)



JF Comu, O Brunaux, S Guitet, J Betbeder (ONF) et JM Carozza (UMR Geode), 2010



Figure 4 : carte des unités de relief issue de l'analyse du SRTM
En poursuivant l'analyse on montre que ces 82 unités de relief répondent finalement à 12 types de paysage

du modèle numérique ; finalement, 13 types de modelés ont été retenus (figure 4).

L'analyse (sur SIG) de la répartition spatiale des types de modelé au niveau régional a été effectuée en deux temps : (1) segmentation en zones homogènes (dites unités de relief) à dire d'expert, en se basant sur la dominance de types de modelé par zones ; (2) confrontation des limites proposées avec les résultats de trois statistiques zonales (calculées avec le logiciel Fragstats), pour valider ou modifier la segmentation. Les 82 unités de relief qui en résultent (figure 4) ont ensuite été réparties en différentes catégories par classification ascendante hiérarchique (CAH), effectuée à partir d'une ACP (analyse en composantes principales) basée sur deux des indices statistiques et sur les proportions relatives des différents types de modelés. Pour finir, une analyse factorielle discriminante (AFD) de ces mêmes variables a mis en évidence les caractéristiques qui permettent d'interpréter les 12 catégories obtenues comme autant de types de paysages.

Cette stratification de la Guyane en 82 zones naturelles (les unités de relief, pour 12 types de paysages) oriente une grande campagne d'échantillonnage de terrain combinant relevés forestiers, relevés botaniques des plantes du sous-bois et inventaires de la grande faune (IKA). Ces relevés mènent en parallèle à la définition de types d'habitats précisément caractérisés. Ce projet, intitulé HABITATS, a été amorcé grâce à l'apport financier du FEDD et est actuellement poursuivi grâce à des aides FEDER de l'UE.

Apport de la télédétection pour les inventaires de biomasse

Autre sujet d'actualité auquel le forestier ne peut échapper : la biomasse et le carbone. En Guyane, pas d'inventaire de type IFN permettant de suivre les stocks et évaluer les flux. La forêt guyanaise représente cepen-

dant sans nul doute un stock quasi-équivalent à celui de la forêt métropolitaine. Protocole de Kyoto oblige, des méthodes rapides et fiables ont dû être développées pour pallier cette absence d'inventaire global et de suivi des flux (IFN, 2008).

Un nombre important de données d'inventaires a déjà été collecté pour donner une estimation acceptable de la biomasse des forêts du Nord de la Guyane (Guitet *et al.*, 2006), mais les incertitudes restent grandes notamment concernant les stocks des forêts du Sud. Le projet GUYAFOR, actuellement mené par le CIRAD en partenariat avec l'ONF fait appel aux méthodes de télémétrie laser pour tenter de fiabiliser et faciliter ces estimations de la biomasse. Plusieurs campagnes de LiDAR aéroporté ont été effectuées sur des sites expérimentaux comprenant des placettes permanentes documentées par des inventaires précis. Sur ces placettes, tous les arbres de plus de 10 cm de diamètre à hauteur de poitrine sont positionnés et mesurés régulièrement lors des relevés de terrain. L'objectif des mesures LiDAR est d'accéder à une mesure précise de la hauteur individuelle des gros arbres émergents par extraction et soustraction du MNS (modèle Numérique de Surface à partir des maxima locaux) et du MNT (Modèle Numérique de Terrain à partir des minima locaux) et d'améliorer ainsi la précision des calculs de biomasse par des relations entre la hauteur (H) et le diamètre (D). Les premières analyses ont aussi montré l'efficacité de relevés LiDAR (mode simple retour à 3,6 points/m²) pour caractériser les différences de structure forestière qui pourraient être de bons indicateurs du niveau de stock local (Vincent *et al.*, 2009). Une autre technique est aussi testée par le CIRAD et le CNRS en collaboration avec l'ONERA, le CNES et l'Université de Toulouse. Le projet nommé Tropisar vise à mettre au point un nouveau radar actuellement aéroporté mais voué à un embarquement sur satellite permettant une mesure directe de la biomasse.

La combinaison d'une stratification objective de l'espace forestier issu du projet HABITATS et de mesures précises de la biomasse sur un échantillon de sites ateliers bien répartis devrait ainsi permettre d'améliorer significativement les estimations de biomasse pour le massif forestier guyanais et de fournir des outils robustes pour les mesures de flux et la valorisation de projets REDD (Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts) dans notre département. Ces résultats sont aussi attendus pour renseigner les inventaires nationaux relatifs au protocole de Kyoto. Là encore, les méthodes de télédétection ont permis à l'IFN d'aborder cet aspect en effectuant un bilan des changements d'utilisation des terres entre 1999 et 2008 dans le cadre d'une expertise spécifique, avec l'appui de l'ONF. Un échantillonnage à densité variable selon la probabilité de perturbation anthropique a été effectué sur une mosaïque d'images SPOT2, 4 et 5 (16 786 points de sondage répartis sur l'ensemble du territoire). Si les taux de déforestation mesurés sont faibles, ils démontrent cependant une accélération du phénomène (0,06 % entre 1990 et 2006 – 0,05 % entre 2006-2008) lié à une croissance démographique extrêmement dynamique (+ 3,6 % annuellement). L'amélioration des estimations de biomasse selon les milieux permettra de transcrire ces changements d'affectation des sols en flux de carbone. L'enjeu est important compte tenu des engagements de réduction d'émission de l'État français, la Guyane étant un territoire essentiel pour ce bilan.

Conclusion

La diversification des outils de télédétection et l'investissement de l'ONF dans ce secteur sont des sources de gains d'efficacité et de fiabilité dans la quasi-totalité de nos branches d'activités : surveillance foncière, aménagement forestier, aménagement du territoire, expertises... La formation d'une cellule géomatique forte, stable et qualifiée en matière de télédé-

tection est une des pièces maîtresses pour la Direction Régionale de l'Office National des Forêts afin de conforter sa position en Guyane. Ces techniques permettent dans la mesure du possible de pallier le faible potentiel humain au regard de l'espace forestier à couvrir. Ces efforts méritent d'être confortés dans l'avenir, le potentiel de valorisation étant très important tant en interne qu'en prestation extérieure (voir encart étude WWF page suivante).

Pierre JOUBERT
ONF, DR Guyane
responsable SIG

Stéphane GUITET
ONF, département R & D
pôle Cayenne

Guilhem DEBARROS
ONF, DR Guyane
opérateur SIG

Olivier BRUNAUX
ONF, département R & D
pôle Cayenne

Sophie PITHON
ONF, DR Guyane
(VCAT)

Adrien CORVISI
ONF, DR Guyane
opérateur SIG

Bibliographie

IFN, 2008. Protocole de Kyoto et changements d'occupation du sol en Guyane française. l'IF n°18, pp7-8 (http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/L_IF18_img-sat.pdf)

Gond V., et al. 2009. Analyse multi-échelles de la caractérisation des écosystèmes forestiers guyanais et des impacts humains à partir de la télédétection spatiale. In : Ecosystèmes forestiers des Caraïbes – actes du colloque de décembre 2005 en Martinique. Karthala édition. Pp. 461-481

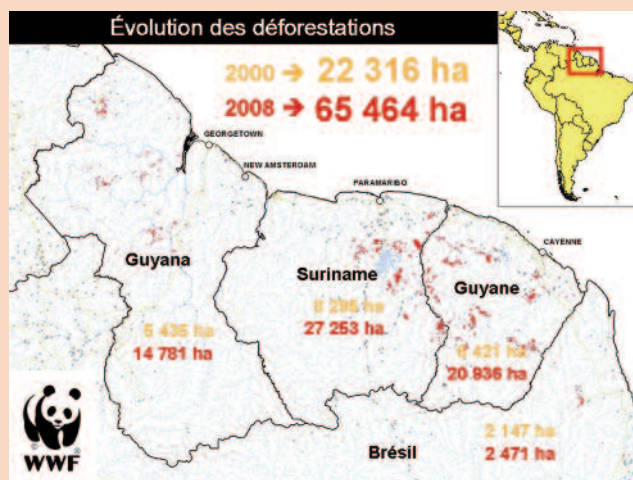
Étude WWF de l'impact de l'activité aurifère sur le plateau des Guyanes

La ruée vers l'or en Guyane, évoquée dans RDV Techniques n°20, ne se limite pas à notre plus grand département français d'Amérique mais touche une grande partie des pays où cette ressource minière est présente. La crise financière de 2009 a accentué ce phénomène en faisant grimper le cours de l'or à des niveaux jamais atteints. Le WWF, présent en Guyane française mais aussi au Suriname, au Guyana et au Brésil a sollicité l'ONF pour évaluer l'impact et la dynamique de l'activité aurifère sur le plateau des trois Guyanes.

Jusqu'à présent, aucune donnée ne permettait de quantifier l'impact de ce phénomène destructeur tant au niveau environnemental que social et sanitaire. Sans données, pas de prise de conscience possible et pas d'actions de lutte ou de contrôle. C'est donc forte de son expérience guyanaise (Joubert et al., 2008) que la Direction Régionale de l'ONF en Guyane a proposé un cadre méthodologique simple visant à évaluer l'évolution des impacts de l'activité minière aurifère entre 2000 et 2008 sur le plateau des trois Guyanes (Guyana, Suriname, Guyane française) et une partie de l'état brésilien d'Amapa.

Les données sources ont été choisies pour leur disponibilité et leur faible coût. L'utilisation d'images SPOT accessibles gracieusement grâce au programme SEAS (Surveillance de l'espace amazonien par satellite) a bien sûr rendu cette étude possible mais, comme on le voit de plus en plus, Internet regorge de sources de données gratuites, notamment LANDSAT*.

Ainsi une trentaine d'images LANDSAT prises entre 1999 et 2001 ont d'abord été traitées par analyse spectrale (détection des déforestations) puis par numérisation manuelle. C'est ensuite plus de 300 images SPOT (2, 4 et 5) prises entre 2006 et 2008 qui ont été sélectionnées (parmi plus de 800 passées au crible d'un barème «maison» prenant en compte les qualités spectrales et spatiales, l'enneigement et d'autres critères de qualité). Chaque image a été recalée, puis photo interprétée en prenant en compte les observations réalisées sur les données LANDSAT de 1999 – 2001. Ces traitements ont permis de localiser et de mesurer les surfaces déforestées ou dégradées sur plus d'un demi-million de km² entre ces deux périodes (2000 et 2008).



Autre source d'information utilisée : les données radar SRTM à 90 m (Shuttle Radar Topography Mission)**. Ces données ont permis de calculer les réseaux d'écoulement théorique et d'évaluer les réseaux hydrographiques directement et potentiellement impactés par cette activité minière fortement nuisible pour les hydrosystèmes lorsqu'elle n'est pas réalisée dans les règles de l'art.

Le bilan est éloquent : en quelques années plusieurs dizaines de milliers d'hectares ont fait les frais du développement de cette activité aurifère. Les marchés financiers peuvent se targuer d'avoir favorisé le développement d'une activité (légale et illégale) fortement impactante pour l'environnement et les hommes sur une portion du bassin amazonien réputée pour sa biodiversité exceptionnelle et ses écosystèmes et sociosystèmes rares et fragiles.

Cette étude a été achevée en mars 2010 et a fait l'objet de présentation du WWF auprès des différents gouvernements des pays concernés.

* <http://glcf.umd.edu/data/landsat/>

** <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Guitet S., Blanc L., Chave J., Gomis A., 2006. Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national des gaz à effets de serre pour la forêt guyanaise. Rapport Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. 38p + annexes

Guitet S., Gond V., Brunaux O., Joubert P., 2007. Les satellites au service du forestier guyanais pour améliorer l'organisation et le contrôle de l'exploitation forestière. RDVT n°17, pp. 17-20

Joubert P., Linares S. et Gond V., 2008. Face à la ruée vers l'or en Guyane : un observatoire de l'activité minière. RDVT n°20, pp. 10-14

Sabatier D. et al. 2007. Evaluation Multi-Echelles de la diversité spécifique, structurale et fonctionnelle des arbres en forêt Guyanaise : Prise en compte du substrat géologique, des sols et de la dynamique sylvigénétique. Rapport final programme Ecotrop du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Cayenne, Guyane Française, 122p.

Vincent G., Weissenbacher E., Sabatier D., Blanc L., Proisy C., Coueron P., 2010. Détection des variations de structure de peuplements en forêt dense tropicale humide par lidar aéroporté. Revue française de photogrammétrie et de télédétection.

à suivre

Prochain numéro :

Contrairement à celui-ci, le prochain numéro portera sur des sujets divers, sans véritable dossier.

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* en ligne

Sur intraforêt : pour les personnels ONF, tous les articles sont accessibles au format pdf dans le portail de la direction technique et commerciale bois (Recherche et développement / La documentation technique) ; pour un article particulier, utiliser le moteur de recherche de la base documentaire.

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

La revue ***RenDez-Vous techniques*** est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique 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 47

Courriel : rdvt@onf.fr

