

Méthodes d'inventaire et de cartographie des accrus forestiers

Jean-Guy Boureau et Michel Deshayes

Une meilleure connaissance des accrus forestiers se fait de jour en jour plus pressante, que ce soit pour des raisons économiques, environnementales ou sociales. Ces demandes se traduisent par un besoin en informations, notamment sous forme cartographique. Or, la dynamique de la végétation liée au boisement naturel des terres agricoles se traduit par la juxtaposition de parcelles très hétérogènes quant à leur degré d'enfrichement ou de boisement, leur composition floristique ou encore le stade de maturité des formations présentes. Cette grande variété dans l'aspect des accrus rend leur cartographie délicate.

Dans cet article, nous nous proposons de passer en revue les données et les traitements disponibles pour procéder à l'inventaire et à la cartographie des boisements naturels. Nous nous appuyons d'abord sur deux exemples, une cartographie à partir de photographies aériennes et d'une image SPOT, et une cartographie automatique à partir de photographies aériennes scannées. Nous discuterons ensuite de l'apport actuel des différents types de données et de traitements, et nous présenterons quelques perspectives.

Une étude avec photographies aériennes et image SPOT

■ Contexte et objectif

Une étude, réalisée par l'Inventaire Forestier National (IFN) à la demande de la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF) et de

l'Association Nationale pour le Développement Agricole (ANDA), a eu pour but l'élaboration d'une méthode permettant de suivre l'extension spatiale des friches et le boisement des terres agricoles (IFN, 1996a).

Du fait de leur hétérogénéité, l'appréhension et la cartographie des accrus nécessitent *a priori* des données-image à très haute résolution (< 1 m) permettant la détection des arbustes et autres ligneux bas. La photographie aérienne paraît alors le support le plus adapté et son analyse stéréoscopique le traitement le plus performant pour appréhender ce phénomène.

Cependant, malgré leur résolution décimétrique, il apparaissait important de s'interroger sur l'apport réel des données Spot, moins pour la réalisation d'une première cartographie des friches et accrus boisés que pour suivre dans le temps l'évolution de ce phénomène.

L'approche développée dans l'étude ne vise en effet qu'à utiliser l'image Spot en complément aux photographies aériennes. Plus précisément, il s'agit de coupler l'image satellitale à des données cartographiques préexistantes, obtenues par photo-interprétation, et de tenter ainsi de mieux appréhender et quantifier la variabilité radiométrique des thèmes friches et accrus boisés. Les résultats de cette démarche permettent alors d'évaluer les potentialités de l'image Spot monotemporelle comme outil de mise à jour d'une carte de l'enfrichement et du boisement naturel des terres agricoles.

**Jean-Guy
Boureau**

IFN
BP 1001 Maurin
34971 Lattes
Cedex

**Michel
Deshayes**

LCT Cemagref-
Engref
Maison de la
Télédétection
34093 Montpellier
Cedex 5

■ Zone d'étude et données

L'étude porte sur une zone d'environ 60 000 ha située dans le département du Cantal, entre le Puy Mary et Champs-sur-Tarentaine. Cette zone intercepte les régions forestières de l'Artense et du Cantal-Cézallier et est représentative du thème envisagé, c'est-à-dire qu'elle a connu ces dernières années des modifications sensibles (en surface) dans ses modes d'utilisation du sol.

L'Artense, au nord-ouest du département correspond à la basse vallée de la Rhue et de ses affluents. Il s'agit d'un plateau vallonné dont les altitudes s'étagent de 700 à 1 000 m. On y trouve un paysage de bocage ouvert à petites parcelles, comportant cultures et pâturages. Le Cantal-Cézallier est une région de montagne qui, dans la zone d'étude, culmine au Puy Mary à 1 787 m. C'est une région de grands plateaux basaltiques au relief massif entaillé de vallées rayonnantes à profil glaciaire en auge. Les pâturages dominent et la forêt n'occupe guère que les flancs de montagne abrupts ou les versants des vallées.

Une seule image Spot XS a été acquise. Cette image, KJ : 43-258 / 7 (Est), a été enregistrée le 27 juillet 1994 à 10 h 34, avec un angle prise de vue de 24°2, et un angle d'incidence de 27°6. Elle a été acquise avec un niveau de pré-traitement radiométrique 1A, c'est-à-dire ne prenant en compte que l'égalisation des détecteurs. Deux conditions ont guidé ce choix :

- obtenir l'information multispectrale la plus riche possible au regard des thèmes à appréhender : distinction des ligneux bas par rapport aux ligneux hauts et aux herbacées, ou encore distinction des ligneux entre eux. D'où le choix d'une image d'été. L'image panchromatique, bien qu'ayant une résolution géométrique plus fine, n'aurait pas permis ces distinctions d'espèces ;

- il était nécessaire également que cette image soit la plus récente possible par rapport à la carte de référence de 1987 afin de tenter d'appréhender l'évolution de la végétation depuis cette date.

D'autres données ont été utilisées, cartes et modèle numérique d'altitude. Plus exactement, les cartes à l'échelle du 1/25 000 utilisées conjointement à l'image sont au nombre de trois :

- la carte issue de la photo-interprétation réalisée sur les clichés IRC de 1987. Le seuil minimum de représentation adopté y est de 0,5 ha. Quant à la numérisation des limites des types de formation, elle a été réalisée directement à partir des photographies, sans passer par le report à vue sur la feuille IGN au 1/25 000. Les éléments numérisés sur la photographie sont corrigés, en temps réel, des déformations de l'image (relief, inclinaison de la caméra, etc.) et géoréférencés (logiciel MDSD *mono/stereo digitizing software* - Carto-Instruments) ;

- la carte réalisée à partir des photographies de 1995 et qui correspond à la mise à jour de la carte de 1987 ;

- la carte des seules évolutions survenues dans la couverture végétale ou l'utilisation du sol entre 1987 et 1995.

La typologie retenue pour la réalisation de ces cartes associe couverture et utilisation du sol. Ainsi ont été distingués :

- F : Formations boisées d'installation ancienne ;
- SF : Boisements morcelés, enclavés dans le paysage agricole ;
- WF : Accrus forestiers ;
- EW : Reboisements artificiels ;
- 41 : Lande à genêt (couvert relatif des ligneux bas > 75 %) ;
- 42 : Lande à fougère aigle (idem type 41) ;
- 43 : Autre lande (y compris tourbière) ;
- 61 : Cultures ;
- 62 : Pâturage, non envahie par les ligneux bas ;
- 63 : Pâturage mouilleuse (zone de sources) ;
- 64 : Pâturage à genêt (existence d'aménagements montrant leur utilisation pour le pâturage) ;
- 65 : Pâturage à fougère aigle (idem type 64).

Enfin, un modèle numérique d'altitude (MNA) a aussi été utilisé. Celui-ci, au pas de 100 m (BD-Alt de l'IGN) a permis la correction géométrique de l'image SPOT.

■ La méthode mise en œuvre

L'extraction d'information d'une image peut s'envisager de différentes manières :

– *par traitement automatique* d'image et notamment par classification. Ces méthodes sont basées sur l'existence de relations biunivoques entre une valeur radiométrique (ou une classe de valeurs) et une formation végétale généralement définie par sa composition spécifique. Or pour les thèmes envisagés ici cette relation biunivoque n'existe que trop rarement, ce qui rend illusoire toute tentative d'extraction d'information sur les friches et accrus boisés par classification d'image ;

– *par interprétation visuelle d'image améliorée*. L'amélioration d'image, en concentrant l'information utile au regard du thème envisagé et en la rendant plus « lisible » peut faciliter l'interprétation visuelle. Cette démarche suppose cependant que chaque type de formation végétale, ou chaque type d'évolution, puisse être mis en évidence par une différence radiométrique, surtout en l'absence d'information texturale liée à un pouvoir de résolution insuffisant. Or, dans le cas des friches et accrus, ces différences radiométriques n'existent pas ;

– *par analyse d'image améliorée couplée à des données externes*. Elle consiste à tenir compte d'informations cartographiques très précises, extérieures à l'image, et à les prendre en compte comme sources d'information complémentaires, lors de l'interprétation de l'image.

C'est cette dernière approche qui a été choisie. Sa mise en œuvre comporte les étapes suivantes : correction géométrique, améliorations d'image, couplage de données raster et de données vecteur, caractérisation radiométrique des thèmes cartographiés, et enfin analyse des résultats et discussion.

La correction géométrique a été réalisée sur une station Sun Sparc avec le module Orthomax d'ERDAS-Imagine. La qualité du résultat obtenu peut être appréciée grâce au calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMS en anglais). Dans le cas présent elle est inférieure au demi pixel.

Les améliorations d'image

Trois types d'améliorations d'image ont été mises en œuvre : compositions colorées de type IRC, analyse en composantes principales et indice de végétation.

Le premier type d'améliorations d'image vise à obtenir des compositions colorées aussi proches que possible des émulsions infrarouge couleur (IRC) tout en valorisant au maximum le contenu informationnel des canaux.

L'analyse en composantes principales, qui est une combinaison linéaire des canaux de départ, a pour but de concentrer le maximum d'information d'une image multispectrale dans deux ou trois néo-canaux décorrélés les uns par rapport aux autres. Un avantage secondaire de l'analyse en composantes principales est d'atténuer les effets de la topographie.

Enfin, l'indice de végétation, (IV) est une combinaison linéaire des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR) de la forme :

$$IV = K (PIR - R / PIR + R)$$

Il existe en effet, une forte corrélation entre la bande rouge et la concentration en chlorophylle et entre la bande proche infrarouge et l'indice foliaire, ou densité de végétation verte, d'où l'intérêt de la combinaison de ces deux canaux pour mesurer la quantité de végétation sur un territoire donné, c'est-à-dire la biomasse verte.

Rappelons enfin que, quelle que soit l'amélioration ou le traitement d'image choisi, des contraintes d'ordre phénologique, physiologique, d'illumination, d'angle de visée ou d'environnement, font qu'une même formation végétale pour le forestier ou l'agronome peut correspondre sur l'image à des unités radiométriquement très différentes.

Couplage de données raster et de données vecteur

Afin de pouvoir être analysées conjointement, les données vecteur obtenues à partir des photos aériennes et les données raster, obtenues à partir de l'image satellitale, doivent être intégrées dans un système d'information géographique (SIG). Les fichiers cartographiques (photo-interprétation de 1987, mise à jour de 1995 et fichier des seules modifications 1987/95), au format export d'ArcInfo, ont donc été importés sous le logiciel de SIG ALLIANCE (Icare Int.) pour être superposés à l'image Spot corrigée géométriquement et géoréférencée. Les plans-image ainsi importés sont au nombre de six :

- les trois canaux de l'image XS, après étalement de la dynamique ;
- les deux premières composantes principales ;
- et l'indice de végétation.

L'objet de la procédure d'intégration de données raster et de données vecteur est de pouvoir affecter à chaque polygone d'un plan vecteur une information, ou attribut, issue d'un plan image. Ainsi six attributs (1 par plan image) ont été calculés pour chaque polygone cartographié. Un polygone (telle parcelle d'accru) dans un plan image donné, sera donc caractérisé par une seule valeur radiométrique, celle-ci étant par exemple la moyenne des valeurs radiométriques des pixels qui composent le dit polygone. Le tableau 1 en est une illustration, chaque ligne représentant un polygone.

Chaque polygone cartographié étant affecté d'une valeur radiométrique par plan-image, il devient possible de caractériser radiométriquement un thème sur une image donnée (la pâture à genêt sur IR, par exemple) par l'ensemble des valeurs radiométriques de chaque polygone de ce thème. Moyenne et écart-type peuvent alors être calculés et considérés comme deux caractéristiques radiométriques de ce thème.

Caractériser une parcelle par la moyenne des valeurs radiométriques des pixels qui la composent suppose que cette parcelle soit radiométriquement homogène. Dans le cas présent, cette condition est tout à fait remplie pour la plupart des thèmes. En effet, l'hétérogénéité radiométrique d'un thème est souvent liée à la dimension moyenne des parcelles représentatives de ce thème. Or, le seuil de généralisation adopté ici est de 0,5 ha. C'est-à-dire que toute parcelle dont l'usage ou la composition floristique changent par rapport à son environnement a été isolée si sa superficie était égale à

0,5 ha, soit environ 12 pixels SPOT. Notons encore que graminées, genêts et fougère aigle, contrairement aux formations arborées adultes, ne présentent aucune texture sur image ce qui accroît encore leur homogénéité radiométrique.

Seules certaines forêts adultes peuvent présenter une hétérogénéité radiométrique non négligeable. Ceci est d'autant plus vrai que les houpriers sont bien développés et individualisés, ce qui n'est pas le cas d'un boisement récent (<10 ans) de lande ou de friche. Ces jeunes accrus sont d'ailleurs souvent difficiles à distinguer de la lande, même sur photographies aériennes, la réflectance des ligneux bas étant comparable à celle des jeunes arbres, feuillus ou résineux.

Quant à l'écart-type, calculé à partir des moyennes radiométriques par parcelles, il est ici le reflet de la variabilité interne d'un thème, relativement à une image donnée. Les écarts-type obtenus montrent des dispersions des valeurs radiométriques par parcelle de l'ordre de 10 % autour de la moyenne.

■ Analyse des résultats et discussion

Analyse radiométrique des thèmes cartographiés

La figure 1 présente les moyennes radiométriques, correspondant à la seconde composante principale, pour chacun des thèmes cartographiés. La représentation d'un écart-type autour de cette moyenne montre la difficulté de caractériser ces thèmes indépendamment les uns des autres par des classes de valeurs radiométriques nettement différenciées. Seuls quelques thèmes ont tendance à s'individualiser dans certains canaux ou néo-canaux. C'est le cas par exemple ici des landes à genêt (41) par rapport aux landes à fougère (42).

Malgré ces confusions, des seuillages ont été réalisés afin de tenter de séparer des thèmes en

Tableau 1. – Tableau des valeurs radiométriques associées à deux polygones de pâture à fougère aigle (65). ▼

N° du polygone	Type An 95	XS1	XS2	XS3	IVG	ACP1	ACP2
132	65	76,85	41,04	174,86	205,88	131,42	152,01
249	65	75,39	38,34	175,65	208,53	126,93	159,64

partie confondus sur image. Ces seuillages ont ainsi permis une quantification des erreurs commises en cherchant à identifier et à cartographier les friches et accrus par ce type d'approche.

Concernant la distinction des pâtures à genêts (Type 64) et des pâtures à fougère aigle (Type 65) à partir de la 2^e composante principale, par exemple, l'erreur minimale commise est de 26,5 % (tableau 2).

Un deuxième exemple concerne, toujours à partir de la 2^e composante principale, la distinction des landes à genêts (Type n° 41) par rapport aux landes à fougère aigle (Type n° 42). L'erreur minimale est ici de 19,8 % (tableau 3).

Analyse radiométrique de la carte des « évolutions »

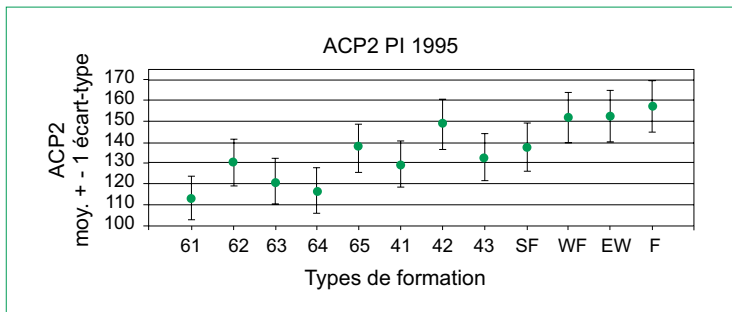
En complément à cette première analyse d'image couplée à des données auxiliaires extérieures à l'image, une analyse radiométrique de la carte des évolutions survenues dans la couverture du sol entre 1987 et 1995 a été réalisée. Il s'agissait de savoir si certaines de ces évolutions pouvaient être mises plus aisément en évidence de cette manière.

Les résultats obtenus font apparaître les mêmes difficultés que précédemment quant à une caractérisation radiométrique de ces évolutions : 18 % d'erreur minimale, par exemple, concernant la différenciation du genêt et de la fougère aigle.

Discussion

Le couplage de l'image Spot-1994 avec la carte dressée à l'aide des photographies aériennes de 1995 montre que toute photo-interprétation des friches et accrus à partir d'une seule image SPOT XS est très délicate, sauf à accepter un pourcentage d'erreur élevé.

Graminées et fougère aigle, en effet, sont difficiles à distinguer même sur photographie aérienne. Quant aux genêts, ils ont des réflectances très proches de celles des boisements résineux. De plus, les conditions phénologiques et physiologiques des plantes, les conditions d'illumination, de visée ou d'environnement sont souvent responsables de variations radiométriques plus grandes que celles liées à la nature des espèces. Enfin, un pouvoir de résolution de 20 m



▲ Figure 1. – Moyennes et écarts-type par thème cartographié après couplage de la 2^e composante principale avec la carte issue de la photo-interprétation de 1995.

Tableau 2. – Distinction des pâtures à genêt (Type 64) et des pâtures à fougère aigle (Type 65) à partir de la 2^e composante principale. ▼

Image = 2 ^e composante principale	Nb. parcelles (%)	Superficie (%)
Parcelles de 64 classées en 65	33,3	38,9
Parcelles de 65 classées en 64	33,5	24,8
Erreur totale	33,4	26,5

Tableau 3. Distinction des landes à genêt (Type n° 41) et des landes à fougère (Type n° 42) à partir de la 2^e composante principale. ▼

Image = 2 ^e composante principale	Nb. parcelles (%)	Superficie (%)
Parcelles de 41 classées en 42	39	36,4
Parcelles de 42 classées en 41	32,4	17
Erreur totale	33,6	19,8

ne permet pas l'identification des arbres et arbustes, comme sur photographies aériennes, palliant ainsi les confusions radiométriques.

Le taux de confusion qui varie de 10 à 30 % selon la formation avec le traitement de l'image Spot monotemporelle, n'est que de 3 % par photo-interprétation de couvertures aériennes IRC. Si l'on voulait obtenir la même précision de 3 % avec l'imagerie SPOT, le surcoût à prévoir serait de l'ordre de 68 %, dû pour l'essentiel à des contrôles au sol beaucoup plus importants.

Cependant, des résultats récents (IFN 1996b) obtenus par l'IFN montrent que la détection

de changements, par rapport à une carte ancienne, à l'aide de comparaisons d'images SPOT prises à des dates différentes est une technique particulièrement performante, bien que plus longue à mettre en œuvre et plus coûteuse (achat de plusieurs images). Ces comparaisons numériques d'images partent du principe que tout changement de caractéristiques radiométriques a pour origine un changement des caractéristiques du peuplement, à condition que les images aient été rendues préalablement comparables. Le suivi de l'enfrichement ou du boisement des terres agricoles avec SPOT reste donc envisageable grâce notamment à l'utilisation de données multitemporelles.

Un exemple de traitement automatique de photographies aériennes

■ Contexte et objectif

Les forestiers suisses ont très largement recours aux photographies aériennes dans le cadre de leurs divers travaux de planification, de gestion ou de contrôle. Elles leur fournissent les indispensables informations nécessaires à l'établissement des cartes de peuplements, à la planification des interventions, à la cartographie des fonctions, à la détermination des limites forestières, à l'évaluation des dégâts aux forêts, à l'estimation de taux de boisement en pâturage boisé...

Ces informations sont extraites des photos par photo-interprétation, à l'issue d'un travail au stéréoscope lent et pénible pour la vue, fastidieux et surtout coûteux. Cependant, l'utilisation d'orthophotos a vu le jour, car elle permet un gain de précision et un report direct et géométriquement fiable des limites repérées. Elle est particulièrement intéressante lorsque l'on dispose d'un SIG, qui permet d'associer différentes couches (cadastre ou autres plans digitalisés) en fonction des besoins. Cependant leur coût, pour l'instant plutôt élevé, en limite fortement l'usage.

Les photos aériennes classiques, non orthorectifiées, gardent donc un intérêt, mais il importe d'évaluer les possibilités d'autres méthodes d'extraction d'informations que la photo-interprétation. Une solution consiste à faire du traitement d'image à partir de photos aérien-

nes préalablement digitalisées pour extraire, de la manière la plus automatique possible, certaines informations : lisières internes et externes de la forêt, clairières naturelles ou artificielles (chablis), taux de boisement, indications sur les essences (au moins une différenciation entre résineux et feuillus) et sur le rajeunissement naturel.

C'est ce type d'étude qui a été conduite par l'Institut fédéral suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (FNP), plus exactement par son Antenne romande (AR), installée au sein de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) (Barbezat *et al.*, 1996). Celle-ci a souhaité développer un outil qui réponde aux contraintes suivantes :

- au niveau du logiciel : fonctionnement sur plate-forme PC ou Mac, convivial et d'un manière simple, avec des temps de traitement rapides, et une possibilité d'interactivité par réglages individuels ;
- au niveau des données : utilisation de photos noir et blanc, mais acceptant aussi d'autres types, numérisation des photos par scanner courant du marché, avec association d'un modèle numérique d'altitude (MNA) pour report sur fond topographique, sans création d'orthophotos ;
- au niveau des résultats : sous forme de tableau récapitulatif et d'image traitée (formats courants d'exportation), avec identification et géoréférencement des limites forestières (lisières externes et internes), des arbres isolés et en groupe, et mesures des surfaces.

■ La méthode mise en œuvre

La méthode choisie est basée sur des travaux réalisés dans le domaine de la vision industrielle. Certaines des situations rencontrées visent à repérer des objets en reconnaissant leurs formes. La situation peut être complexe, mais elle se simplifie lorsque l'on connaît *a priori* la forme de ces objets, et qu'il est possible de la représenter par un modèle symbolique. La méthode consiste alors à repérer des correspondances entre le modèle et les objets de l'image, étape en général suivie par une autre où l'objet réel est remplacé par une image virtuelle du modèle. Cela permet de procéder ensuite à tous les calculs sur un modèle simplifié, qui ne con-

tient que des informations utiles et qui est beaucoup plus économe en place mémoire.

■ Résultats et discussion

Le cahier des charges fixé a conduit, grâce à la collaboration avec l'Institut de production microtechnique de l'EPFL, à la réalisation d'un logiciel prototype, nommé CLAPA (Classification Automatisée de Photos Aériennes) (Barbezat et Jacot 1998).

Des exemples de résultats obtenus sont brièvement présentés ci-dessous. Signalons d'abord que l'image est tournée de manière à orienter l'axe des ombres verticalement, cette façon de faire permettant de standardiser les conditions de travail du logiciel et donc de gagner en temps.

Nous présenterons les résultats obtenus d'abord avec des arbres isolés, puis avec des groupes d'arbres ou de la forêt dense. Pour ce qui concerne les arbres isolés (figure 2 et 3), ils sont identifiés grâce à la présence de leur ombre, qui tranche sur le niveau de gris de la prairie. Ces ombres possibles sont comparées au modèle théorique de l'arbre (figure 2), et leurs formes et surfaces permettent de ne conserver que les conifères isolés.

Ensuite la couronne est délimitée, et son diamètre est déterminé ainsi que la longueur de son ombre. À partir de celle-ci et en fonction de la date et de l'heure de la prise de vue et du modèle numérique d'altitude, le logiciel calcule la hauteur de l'arbre.

Pour les groupes d'arbres et la forêt dense, le traitement n'est plus le même. Ce n'est plus l'ombre qui doit être repérée, mais les houppiers (ou parties de houppiers) au soleil. L'image est travaillée de façon assez classique par un filtre à gradient suivi d'un seuillage, d'un filtre passe bas, d'une dilatation, d'un remplissage des trous et finalement d'une érosion. L'interprétation que fait ensuite le système s'appuie sur la modélisation des conifères, ici des épicéas (*Picea abies*), intégrée dans le logiciel de traitement. Les données nécessaires à cette modélisation proviennent de la base de données dendrométriques de l'Institut fédéral suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (Lässig *et al.*, 1992). Les dimensions maximales ainsi que la fourchette dans laquelle évolue le coefficient entre

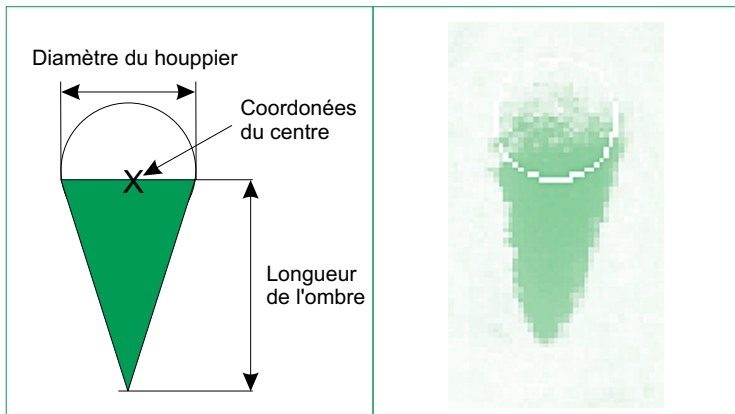


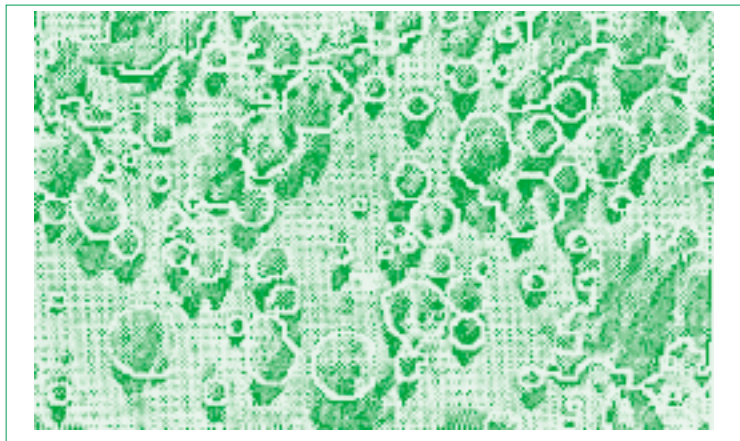
Figure 2. – Représentation schématique (modèle) d'un épicéa isolé avec son ombre, et paramètres associés.

Figure 3. – Résultat du repérage d'un arbre par le programme CLAPA.

hauteur et diamètre de couronne sont donc connues. Cela permet d'identifier les arbres et de déduire le nombre probable de sujets dans un groupe. La figure 4 montre le résultat d'une classification sur une portion d'images comportant des arbres en bouquets. La figure 5 montre les résultats obtenus sur la même image, mais avec des réglages différents du logiciel. Pour le praticien, cela correspond parfaitement à des choix initiaux : désire-t-il par exemple des informations détaillées sur le rajeunissement naturel et sa dynamique, ou est-il seulement intéressé par des grandes zones de massifs plus ou moins clairiérés ?

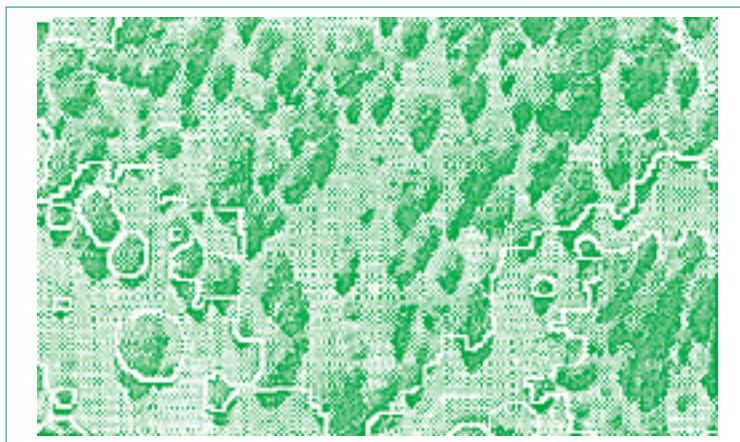
■ Perspectives

Cette première étape, conduite avec peu de moyens, a donc permis d'obtenir une première série de résultats encourageants. Deux choses méritent d'être soulignées. Tout d'abord, le logiciel CLAPA a pu être développé tout en restant adapté aux capacités informatiques des utilisateurs forestiers : il est peu gourmand, a une interface utilisateur simple et peut facilement être paramétré. D'autre part, l'association avec un SIG est fondamentale, car elle permet d'aller chercher des informations nécessaires au traitement (par exemple, la pente pour pouvoir passer de la longueur de l'ombre à la hauteur de l'arbre), et elle permet ensuite de restituer au SIG des informations géoréférencées. Sur le plan du logiciel, de nouveaux développements



▲ Figure 4 – Résultat de classification sur portion d'image avec arbres en bouquets.

Figure 5. – Résultat de classification sur même portion d'image que la figure 3, mais réglages différents du logiciel. ▼



sont en cours, que ce soit au niveau de son architecture, des formats de fichiers, en particulier compressés, ou au niveau des fonctionnalités.

Discussion

L'inventaire et la cartographie des accrus peuvent être envisagés avec deux sources de données, images satellitaires et photos aériennes.

Pour être adaptées à l'étude des accrus, les images satellitaires doivent permettre d'avoir accès à leur grande variabilité spatiale à l'échelle décamétrique. Dans cette gamme de résolution, les images disponibles sont les images SPOT

(résolution multispectrale 20 m) et les images Landsat TM (résolution multispectrale 30 m). Ces images peuvent être utilisées de deux manières : en cartographie initiale et en suivi d'évolution. Pour ce qui concerne la cartographie initiale, nous avons vu dans notre premier exemple que l'importante variabilité des accrus, que ce soit dans leur composition spécifique ou dans leur structure horizontale, se manifestait sur le plan radiométrique par une hétérogénéité ainsi que par d'importants risques de confusion. En conséquence l'image satellitaire actuelle ne permettra pas en général une identification par des outils classiques, tels que les classifications. Par contre, l'installation et l'évolution d'un accru dans une parcelle doivent se traduire par une évolution temporelle de la radiométrie de cette parcelle. Cette évolution temporelle peut être mise en évidence par différentes méthodes de détection des changements (Bartalev *et al.*, 1997) qui utilisent deux images, l'une prise lors de l'état initial et l'autre après que le changement a eu lieu. Ces méthodes peuvent utiliser les canaux bruts ou des canaux transformés - y par différence, ratio, régression, analyse en composantes principales ou transformée dite de Tasseled Cap - analysés ensuite visuellement ou par différentes techniques - classification, supervisée ou non, ou seuillage. La méthode basée sur une différence d'images après normalisation relative a été appliquée dans différents types de milieux forestiers et a donné des résultats intéressants (Bartalev *et al.*, 1997, Durrieu and Boureau 1997, Durrieu et Deshayes 1994). Elle devrait apporter des éléments intéressants pour l'étude des accrus, à la condition d'adapter le nombre d'images à analyser et l'intervalle de temps qui les sépare à la dynamique du phénomène.

Pour ce qui concerne les photos aériennes analysées par traitement numérique, nous avons vu que le logiciel CLAPA permettait d'obtenir des résultats prometteurs. Il faut cependant remarquer que les exemples montrés se caractérisaient par une grande homogénéité de la prairie où s'étaient installés les épicéas. De nouveaux tests - et de nouveaux développements - seront nécessaires pour prendre en compte la variation de différents paramètres, comme par exemple l'éclairement du versant (versant au nord, au sud, pentes variables), le degré de colo-

nisation du pâturage par les ligneux ou la présence d'un mélange d'espèces colonisatrices.

Les accrus couvrant des millions d'hectares, il faudra aussi se pencher sur la question du volume des données. En effet, une photo aérienne standard, au format 23 x 23 cm, scannée avec une résolution de 1 mètre, représente un volume de 21 Mo (millions d'octets) en noir et blanc, et 63 Mo en couleurs. Or pour une échelle de 1/20 000^e, elle n'occupe au sol qu'une surface de 4,6 x 4,6 km². Soit pour un département d'une superficie moyenne de 6 000 km², un volume de 6 Go (milliards d'octets) en noir et blanc, et 18 Go en couleurs. Ces importants volumes de données rendront le recours à des algorithmes de compression intéressant, et il sera important d'étudier les performances de ceux-ci.

Cependant, le repérage et la caractérisation des arbres présents dans les accrus ne seront pas suffisants. Il faudra définir des règles d'agrégation, qui permettront de regrouper les arbres dans des unités homogènes, dont les critères (densité, hauteur des arbres...) seront définis en fonction des besoins des utilisateurs. Enfin, et en fonction des performances de CLAPA, il pourrait être intéressant de réfléchir à l'intérêt d'un outil d'analyse stéréoscopique des photos aériennes. En effet le logiciel CLAPA détermine la hauteur des arbres par mesure de la longueur de l'ombre projetée, ce qui peut conduire à des erreurs liées à la détermination de la pente locale. De son côté, un outil stéréoscopique permettrait de mesurer celle-ci par parallaxe. Cela suppose que la base du tronc soit visible (le sommet l'est toujours), mais cette situation doit être assez commune dans des milieux ouverts comme des accrus.

Conclusions et perspectives

Nous venons de voir que le suivi de l'enfrichement et du boisement des terres agricoles peut aujourd'hui s'appuyer sur l'extraction d'informations à partir de photos aériennes. À côté de la photointerprétation classique, les résultats obtenus avec le logiciel CLAPA, encore en cours de développement, montrent que les progrès de l'informatique permettent d'envisager que l'on puisse disposer assez ra-

pidement de logiciels spécialisés dans l'extraction automatisée d'informations forestières à partir de photos aériennes scannées. Ces développements reposeront sur une bonne collaboration entre utilisateurs, photointerprètes, spécialistes du traitement d'images en télédétection mais aussi spécialistes du traitement d'images industriel. Les méthodes de reconnaissance de forme sont en effet un des axes de développement de la vision industrielle, où elle peut être appliquée aussi bien à la reconnaissance de pièces détachées pour alimenter une chaîne de montage, ou au repérage de pommes dans un verger pour un robot cueilleur.

Deux facteurs favorables au développement et à l'utilisation de tels logiciels sont à mentionner. Le premier est le développement prévisible du marché de la photo aérienne numérique. En effet, un schéma directeur SIG est en cours de discussion au ministère de l'Agriculture et la pêche. Comme dans tout schéma portant sur un système d'information, celui-ci prévoit des actions à trois niveaux : matériel informatique (et logiciels), données et formation des personnels. Dans son volet données, il prévoit notamment la mise à disposition d'un orthophotoplan, ou photomosaique orthorectifiée, au 1/5 000^e. Cet orthophotoplan doit servir de référentiel permettant la localisation ou le report d'objets géographiques, telles que oliveraies, ou parcelles ou groupes de parcelles, comprises dans un plan d'épandage ou concernées par des mesures agri-environnementales. Ce référentiel photo serait mis à jour, ou plutôt renouvelé, tous les 5 ans. Il serait constitué à partir de couvertures photos déjà existantes, par exemple de l'IGN ou de l'IFN. Signalons d'ailleurs que l'IGN commercialise déjà sur CD-ROM des photos numérisées avec une résolution de 0,60 à 0,80 m, et qu'il prévoit de couvrir 7 à 8 départements par an. De son côté, l'IFN réfléchit à un programme de numérisation de ses couvertures infrarouges.

Le second facteur est relatif à la probable arrivée sur le marché de nouvelles images satellitaires à très haute résolution (1 à 3 m). En effet, plusieurs programmes de minisatellites commerciaux ont été annoncés. Le premier d'entre eux, EarlyBird, a même été lancé fin décembre 97, mais il a été perdu au moment du lancement.

Le prochain, appelé Ikonos, doit être lancé en juin 1999. Les résolutions annoncées sont de 0,80 m en mode panchromatique et 3 m en mode couleurs. Il doit être suivi fin 1999 - début 2000 par deux autres minisatellites, QuickBird et OrbView 3, qui annoncent des résolutions voisines, 1m en mode panchromatique et 4 m en mode couleurs. Les fauchées de ces satellites, de 6 à 22 km, seront réduites par rapport à ce que l'on connaît aujourd'hui (60 km avec SPOT et 180 km avec Landsat TM), mais les opérateurs prévoient de vendre les données au km² et donc de mosaïquer des traces adjacentes afin de proposer des couver-

tures d'un seul tenant. La qualité de ces données et leur résolution effective devront bien évidemment être évaluées, de même que leur prix, non annoncé aujourd'hui, devra être comparé à celui des données aériennes.

Le développement actuel des systèmes d'information géographique et du marché des images métriques devrait donc accélérer le développement de logiciels de traitement d'image à vocation forestière, lesquels permettront à court terme de réaliser un inventaire et une cartographie des accrus dans des conditions économiques acceptables. ■

Résumé

Une meilleure connaissance des accrus forestiers se fait de jour en jour plus pressante, que ce soit pour des raisons économiques, environnementales ou sociales. Ces demandes se traduisent par un besoin en informations, notamment sous forme cartographique. Nous nous proposons de passer en revue les données et les traitements disponibles pour procéder à l'inventaire et à la cartographie des boisements naturels.

La dynamique de la végétation liée au boisement naturel des terres agricoles comprend souvent une phase intermédiaire correspondant à l'envahissement par les ligneux bas des espaces anciennement cultivés. Une première étude menée dans le Cantal permet de se rendre compte que les différentes classes de friches sont en général trop variables et présentent trop de confusions sur le plan radiométrique pour pouvoir être identifiées d'une manière fiable avec des données satellitales Spot monotemporelles. Par contre, une approche diachronique par comparaison d'images permettrait de repérer les zones ayant subi des évolutions radiométriques, qu'il s'agirait ensuite de caractériser.

Quant à la photographie aérienne, elle semble être le support le plus adapté et son analyse stéréoscopique le traitement le plus performant pour appréhender le phénomène. Cependant le traitement numérique de photos progresse. Un second exemple présente les résultats obtenus par un logiciel suisse de classification automatisée de photos aériennes numérisées, dans le repérage de formations forestières, depuis l'arbre isolé jusqu'à la forêt fermée. Rendu possible par les progrès de l'informatique, ce type d'application devrait se développer. Il devrait être favorisé par le développement du marché de la couverture aérienne numérique, ainsi d'ailleurs que par l'arrivée prévue sur le marché en 1999 de nouvelles données satellitales avec une résolution de 1 m ou 2 m.

Abstract

A better knowledge of forest extensions is becoming more and more urgent whether for economical, environmental or social reasons. This is shown by a demand for information, notably in the form of maps. We propose to look over the data and the processing methods available for listing and mapping spontaneous forest extensions.

The dynamics of the vegetation related to the natural reforestation of abandoned agricultural land often comprises an intermediate phase corresponding to the invasion by low ligneous vegetation of the species originally cultivated. A first study performed in Cantal shows that the various classes of fallow land are generally too variable and show too much radiometric confusion to allow reliable identification using Spot satellite images taken at any given moment. However a diachronic approach by comparison of images allows identifying the areas which show radiometric changes and then characterise the changes.

As for aerial photography, it seems the most suitable medium and its stereoscopic analysis is the best method for identifying the phenomena. However, the digital processing of photographs is fast developing. A second example presents the results obtained by Swiss software automatically classifying digitised aerial photographs in forest formations from isolated trees to closed forest. This type of application, made possible by recent progress in data processing, should develop further. It should be favoured by the development of the market for digital aerial photographs as well as by the arrival on the market in 1999 of new satellite data with a resolution of 1 or 2 m.

Bibliographie

BARBEZAT, V., JACOT, J., 1998, The CLAPA project : automated classification of forest with aerial photographs. In: *Proceedings international forum. Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*, Victoria (Colombie Britannique, Canada), 10-12 février 1998, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Réseau sur l'aménagement des paysages.

BARBEZAT, V., KREISS, P., SULZMANN, A., JACOT, J., 1996, Automated Recognition of Forest Patterns using Aerial Photographs. In: Meyer, G.E.; DeShazer, J.A.(eds): *Optics in Agriculture, Forestry, and Biological Processing II*, Proceedings SPIE. Bellingham (Washington), SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2907, 30-41.

BARTALEV, S., DESHAYES, M., DURRIEU, S., FABRE, G., STACH, N., and SUKHIKH, V., 1997, Monitoring by change detection in three different forest environments In Kennedy P.J. (Ed.) *Proceedings of the International Workshop Applications of Remote Sensing in European forest Monitoring*, Vienna, 14-16 October 1996, European Commission publication CL-NA-17685-EN-C, 293-308.

DURRIEU, S., BOUREAU, J.G., 1997, Studying possibilities for updating French forest survey map using SPOT images, In Kennedy P.J. (Ed.) *Proceedings of the International Workshop Applications of Remote Sensing in European forest Monitoring*, Vienna, 14-16 October 1996, European Commission publication CL-NA-17685-EN-C, 179-191.

DURRIEU, S., DESHAYES, M., 1994a, *Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements en milieu forestier ; application aux Monts de Lacaune (Tarn, France)*. Ann. Sci For, 51, 147-161.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, 1996b, *Étude de faisabilité et mise au point d'une méthode d'évaluation de l'extension spatiale des friches et du boisement des terres agricoles*. Rapport d'étude 94H20101 - DERF - ANDA, 51 p.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, 1996, *Mise à jour et enrichissement de la carte forestière de l'IFN à l'aide d'images satellitaires*. Contrat N° 94/CNES/0441. 73 p.

LÄSSIG, R., BRÄKER, O., BARBEZAT, V., 1992, *Untersuchungen zum Wachstum freistehend und im Bestand erwachsener Fichten im Schweizer Jura*, Projet no 5.93.776. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, CH-8903 Birmensdorf.

A. Guyon, CRPF Auvergne



A. Guyon, CRPF Auvergne