Intérêt des données images SPOT 5 et des systèmes d'informations géographiques pour l'extraction et l'identification des formations végétales arborées en milieu bocager. Exemples bas-normands

M.-A. Germaine, A. Puissant, Cyrille Barnerias

► To cite this version:

M.-A. Germaine, A. Puissant, Cyrille Barnerias. Intérêt des données images SPOT 5 et des systèmes d'informations géographiques pour l'extraction et l'identification des formations végétales arborées en milieu bocager. Exemples bas-normands. *Revue forestière française*, 2008, 60 (5), pp.641-656. 10.4267/2042/28077 . hal-03449795

HAL Id: hal-03449795

<https://hal.science/hal-03449795>

Submitted on 25 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INTÉRÊT DES DONNÉES IMAGES SPOT 5 ET DES SYSTÈMES D'INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES POUR L'EXTRACTION ET L'IDENTIFICATION DES FORMATIONS VÉGÉTALES ARBORÉES EN MILIEU BOCAGER. EXEMPLES BAS-NORMANDS

MARIE-ANNE GERMAINE - ANNE PUISSANT - CYRILLE BARNERIAS

Une des missions premières de l'Inventaire forestier national (IFN) est l'observation de la forêt française dans sa grande diversité à la fois en termes de composition spécifique mais aussi de structure. Utilisant largement les photographies aériennes en infrarouges pour son inventaire cartographique, l'IFN s'appuie également de plus en plus sur les images satellitaires, en particulier pour la détection de changements, par exemple, pour évaluer les dégâts des tempêtes (IFN, 2008). En revanche, les scènes satellites ne sont pas utilisées pour mettre à jour l'inventaire forestier entièrement réalisé par photo-interprétation de clichés aériens sur l'ensemble du territoire national.

C'est dans le cadre d'une étude paysagère menée sur les espaces singuliers de vallées à l'échelle de la région Basse-Normandie⁽¹⁾ qu'une méthode d'identification des éléments arborés a été mise en place en collaboration avec l'IFN. Le diagnostic construit dans ce contexte vise à produire une cartographie des modes d'occupation du sol à partir de données satellitaires puis à caractériser les paysages de vallées à partir de l'extraction d'indicateurs génériques traduisant de manière quantitative les caractères visibles du paysage (Germaine et Puissant, 2008). Or, pour différencier les motifs d'occupation du sol caractéristiques de ces espaces originaux, la densité et la structure du réseau bocager comme la dispersion des massifs boisés apparaissent comme des critères aussi indispensables à prendre en compte que l'emprise urbaine ou la fermeture du milieu. En plus des fonctions écologiques et du rôle de réservoir de biodiversité qu'ils représentent à l'intérieur des vallées, les éléments arborés influent effectivement fortement sur l'organisation du paysage : la ripisylve plus ou moins continue commande la visibilité sur et depuis le cours d'eau ; les formations arborées plus denses facilitent ou contraignent l'accessibilité aux berges ; les grands boisements de versants ou de rebord de plateau permettent ou non de larges points de vue sur la vallée ; enfin, les réseaux bocagers plus limités en étendue structurent pourtant l'ensemble du paysage.

Si le traitement d'images satellitaires rend accessible la caractérisation des paysages à petite échelle, il reste souvent difficile de rendre compte de traits spécifiques du paysage tel que la densité du bocage (Dubreuil, 1993). Les méthodes d'extraction automatique de haies bocagères

(1) Ces travaux sont financés par le Conseil régional de Basse-Normandie à travers un programme de recherche dirigé par A. Ballouche et L. Lespez (« La dynamique des paysages de vallées – Enjeux et perspectives, exemples bas-normands », novembre 2005 à novembre 2008).

basées sur des classifications radiométriques d'images se sont en effet longtemps révélées peu efficaces en raison de la trop faible résolution spatiale (pixel de 10 à 30 m) des données. Plusieurs méthodes associant des paramètres complémentaires aux valeurs radiométriques ont néanmoins été développées. Notamment, les recherches développées en Bretagne ont permis d'améliorer les méthodes d'extraction automatique de haies en proposant d'intégrer l'organisation géométrique et la texture d'images dans le traitement de scènes Landsat TM (Hubert-Moy *et al.*, 1995) ou encore de segmenter des images hyperspectrales CASI à partir d'une fusion floue de filtres reposant sur des attributs de forme et de texture (Lennon *et al.*, 2000). Enfin, plus récemment, de nouveaux travaux ont pu être développés à partir d'approches orientées objet pour extraire les structures linéaires du paysage (Hubert-Moy *et al.*, 2003 ; Marangoz *et al.*, 2004). Parallèlement, le développement des programmes d'observation de la terre, et tout particulièrement le progrès des satellites avec l'apparition de nouveaux capteurs, a permis d'améliorer la résolution à la fois spatiale (de 20 à 10 m pour le canal panchromatique SPOT) et spectrale (de 3 à 4 canaux pour SPOT) des images, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives. La méthode proposée ici combine le traitement de scènes SPOT 5 à 5 m de résolution par une approche pixel et l'analyse spatiale sous système d'information géographique (SIG) en s'appuyant sur la morphologie mathématique pour extraire et différencier les formations végétales arborées.

Après avoir présenté le site d'étude et les formations végétales à distinguer (ci-dessous), les deux grandes étapes de la méthodologie sont exposées (p. 645). Les résultats et perspectives de ces travaux sont ensuite discutés par la mise en évidence des avantages et des limites de cette démarche dans le cadre d'une étude paysagère ou d'un inventaire forestier (p. 649).

TERRAIN D'ÉTUDE ET NOMENCLATURE DES FORMATIONS ARBORÉES

La Basse-Normandie, par sa situation à l'interface entre Bassin parisien et Massif armoricain, présente l'intérêt d'offrir une mosaïque de paysages variés et représentatifs de différents types de bocage (figure 1, ci-contre) : un bocage très dense comme dans la Manche centrale ou dans le Pays d'Auge, un bocage à grandes mailles dans le Bessin, un bocage dégradé témoin de fortes transformations liées aux remembrements dans le Pré-Bocage, ou encore des paysages mixtes caractéristiques de « l'Entre-Plaine de Caen et le Bessin » (Brunet, 2001). La méthode a été appliquée à l'ensemble des dix principales vallées bas-normandes (figure 1, ci-contre), soit des zones contrastées — aussi bien du fait de la densité du réseau bocager, de la forme du parcellaire que de la taille des haies et de la répartition des massifs boisés — qui ont permis de valider la méthodologie proposée.

Jusqu'en 2005, l'IFN différenciait⁽²⁾ les formations végétales arborées en cinq classes :

- 1) les **bois** : formations boisées supérieures à 4 ha avec une largeur moyenne en cime d'au moins 25 mètres ;
- 2) les **boqueteaux** : formations boisées comprises entre 50 ares et 4 ha avec une largeur moyenne en cime d'au moins 25 mètres ;
- 3) les **bosquets** : formations boisées comprises entre 5 et 50 ares avec une largeur moyenne en cime d'au moins 25 mètres ;
- 4) les **ligneux hors forêts** : formations qui regroupent les alignements et les haies définies comme des lignes boisées d'une largeur inférieure à 20 m et d'une longueur supérieure ou égale à 25 m, où au moins un arbre est recensable tous les 10 m ;
- 5) les **arbres épars** : arbres forestiers de surface inférieure à 5 ares.

(2) Les définitions de la nomenclature ont changé depuis 2006. En particulier, les arbres épars ne sont plus inventoriés.

FIGURE 1

ZONE ET SITES D'ÉTUDE

Dans le cadre de notre étude, une typologie des formations végétales arborées en trois classes est finalement retenue afin d'automatiser la production de cette information. La première classe regroupe les bois, bosquets et boqueteaux en une classe unique dénommée "massif boisé" (figure 2a, ci-dessous). Les ligneux hors forêts (haies et tout autre type d'alignement compris) constituent la seconde classe (figure 2b, ci-dessous). Toutefois, si, au sens de l'IFN, la ripisylve est confondue avec les alignements, ce boisement de bord de cours d'eau constitue dans le cadre des travaux menés sur les vallées un élément important dans le paysage que nous avons souhaité distinguer à partir d'opérateurs contextuels. Enfin, les arbres épars forment une classe à part entière (figure 2c, ci-dessous).

FIGURE 2 LES DIFFÉRENTS TYPES DE FORMATIONS ARBORÉES

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie proposée en deux étapes vise d'abord à extraire automatiquement à partir d'images satellitaires l'ensemble des éléments arborés (ci-dessous). La seconde étape consiste à proposer un protocole d'opérations spatiales afin de différencier des éléments arborés selon les trois classes définies ci-dessus (p. 646).

Cette seconde étape a initialement été développée à l'IFN (Dommanget, 2006) et appliquée au "fond vert" issu du logiciel SEVE⁽³⁾ (système d'extraction de la végétation) à partir d'orthophotographies aériennes en infrarouge couleur avec une résolution spatiale de 50 cm (ré-échantillonnées à 1 m). La méthode proposée ici a donc été adaptée à partir de ce protocole initial (validé sur des données métriques) pour répondre à la résolution spatiale des images satellitaires mobilisées (images multispectrales à 5 m) ainsi qu'à des besoins spécifiques d'identification des formations végétales arborées dans le cadre de l'élaboration d'un diagnostic paysager.

Extraction de la couche "élément arboré" à partir d'images satellitaires

Puisque les orthophotographies de 2001-2002 ont été utilisées comme référentiel cartographique (validation terrain), il est apparu nécessaire d'acquérir des images satellitaires à une date la plus proche possible (2002-2003) afin d'extraire automatiquement les éléments arborés. Plus précisément, huit images satellites SPOT 5 ont permis de couvrir le territoire régional. Le tableau I (ci-dessous) résume les dates de prises de vue de ces images. Elles ont toutes été acquises en mode multispectral (V-R-PIR-MIR⁽⁴⁾), à une résolution spatiale de 5 m (fusion CNES, 2005) et avec un niveau d'orthorectification 3 (projection Lambert I Nord). Le choix d'une résolution spatiale à 5 m a permis de produire une cartographie fine du territoire à l'échelle du 1/15 000 (Germaine, 2009). La plupart des images ont été prises en saison hivernale (entre novembre et

TABEAU I **Caractéristiques des images utilisées**

Date	Département	Capteur / Instrument / Résolution spatiale (m) / Bandes spectrales
22/07/2002	Calvados	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
15/02/2003	Calvados - Manche	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
15/02/2003	Manche	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
23/03/2003	Calvados - Orne	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
23/03/2003	Calvados	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
04/05/2003	Manche	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
04/05/2003	Manche	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
07/11/2003	Orne	SPOT 5 - MS 10 m (V - R - PIR)
2002	Manche	Orthophotoplan numérique
2001	Calvados - Orne	Orthophotoplan numérique

(3) Il s'agit d'un logiciel de classification d'objets images issus d'une segmentation. Il a été mis en place par l'Institut géographique national (IGN).

(4) V = vert ; R = rouge ; PIR = proche infrarouge ; MIR = moyen infrarouge.

mars) car, durant cette période, la plupart des parcelles agricoles sont à nu et peuvent être facilement différenciées des prairies. Cependant, trois images ont été acquises en saisons différentes (mai, juillet) afin d'assurer une couverture exhaustive du territoire.

Dans un premier temps, la cartographie des modes d'occupation du sol est réalisée par des techniques classiques de traitement d'images (classifications supervisées par maximum de vraisemblance - logiciel ENVI®ITTVIS). La typologie de l'occupation du sol s'articule autour de 5 grandes catégories (bâti, élément arboré, prairie, culture, eau). La classe thématique "bâti" provient d'une base de données vectorielle (DRE, 2004) contenant l'ensemble des taches urbaines supérieures à 1 hectare. Si la végétation peut être identifiée par sa signature spectrale spécifique (la chlorophylle a la propriété d'absorber le rayonnement dans le rouge et de le réfléchir dans le proche infrarouge), les valeurs radiométriques seules ne permettent pas de distinguer les formes de végétation. Une seule classe regroupant l'ensemble des éléments arborés est donc produite.

La qualité des classifications supervisées par maximum de vraisemblance est évaluée par des échantillons de validation obtenus par photo-interprétation (Germaine et Puissant, 2008 ; Germaine, 2009).

À partir de cette cartographie automatique, la classe d'intérêt "élément arboré" est extraite sous forme binaire, c'est-à-dire qu'une nouvelle image est produite où les pixels sont soit boisés (= 1), soit non boisés (= 0).

Protocole d'analyse spatiale sous SIG pour différencier les formations arborées

À partir de la couche raster binaire "élément arboré", les trois grands types de formations arborées sont différenciés par des outils d'analyse spatiale fondés, d'une part, sur la morphologie mathématique en mode raster (figure 3, ci-dessous), d'autre part, sur des critères spatiaux en mode vecteur.

FIGURE 3 OPÉRATEURS DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE BINAIRE

La morphologie mathématique est une théorie de traitement non linéaire très largement utilisée en analyse d'images pour l'étude des objets en fonction de leur forme, de leur taille, des relations avec leur voisinage (en particulier topologiques), de leur texture, et de leurs niveaux de gris ou de leur couleur (Bloch, 2005). Elle offre un grand nombre d'outils que l'on retrouve sous différentes rubriques dans des logiciels d'analyse d'images (ENVI®/ITT) et dans certains SIG (ArcGIS, Spatial Analyst). Les outils proposés permettent le plus souvent d'étudier des images ou objets binaires sous l'angle de leurs relations avec un ensemble fixé. Cet ensemble, dont on choisit la forme et la taille, est appelé *élément structurant* (ES). Étant donné un tel élément structurant et une relation, l'image (ou l'objet) de départ est transformée en translatant l'élément structurant en tout point et en examinant si la relation entre l'objet et l'élément structurant translaté est vérifiée. Les propriétés des opérations ainsi définies et des images transformées découlent de la théorie des ensembles. C'est selon ce principe que sont définies les deux principales opérations : l'érosion et la dilatation binaire.

La figure 3 (ci-contre) illustre un exemple d'une image binaire (figure 3a et 3c) qui renferme un certain nombre de régions (ensemble de pixels connexes) codées à 1 (en bleu) que l'on peut définir comme nos objets d'intérêt, par rapport à un fond codé à 0 (blanc). L'élément structurant choisi (en forme de croix) est déplacé de façon à ce que son centre passe par tous les pixels dans l'image binaire à analyser. Pour chaque pixel, on se pose une question relative à l'intersection (érosion, figure 3b) ou à l'union (dilatation, figure 3d) de l'élément structurant avec les objets de l'image. L'ensemble des points correspondant à une réponse positive permet de construire une nouvelle image qui constitue l'image résultat. Avec l'opération d'érosion (figure 3b), les objets de taille inférieure à celle de l'élément structurant vont disparaître (en jaune), les autres (restant en bleu) seront "amputés" d'une partie correspondant à la taille de l'élément structurant. S'il existe des trous dans les objets, c'est-à-dire des "morceaux" de fond à l'intérieur des objets, ils seront accentués. Les objets reliés entre eux vont être séparés. Avec la dilatation, tous les objets vont "grossir" d'une partie correspondant à la taille de l'élément structurant. Les trous dans les objets seront comblés et les objets situés à une distance moins grande que la taille de l'élément structurant vont fusionner (liaisons en vert). La combinaison de ces deux opérations, érosion puis dilatation, conduit à effectuer une "ouverture" qui permet de séparer des objets proches qui sont fusionnés, ici par exemple les massifs connectés aux haies.

Le protocole proposé (figure 4, p. 648) compte 3 étapes.

À partir de la couche raster binarisée "élément arboré", la première étape du protocole consiste à effectuer une opération d'ouverture avec un élément structurant de taille 2 x 2 pixels afin d'extraire les massifs boisés.

La seconde étape s'appuie sur le mode vectoriel pour distinguer les trois types de formations arborées à partir de critères de surface et de forme issus de la nomenclature de l'IFN (figure 2, p. 644). Ainsi, à partir de la couche binaire de départ "élément arboré", les arbres isolés sont d'abord reconnus par leur surface inférieure à 500 m². Cette couche initiale est ensuite découpée selon les contours de la couche "ouverture", ce qui permet de ne conserver que les massifs boisés. L'union du résultat avec l'image initiale permet de définir comme des alignements les éléments restants, n'ayant été identifiés ni comme arbres épars, ni comme massifs boisés. La reconnaissance des trois types est enfin affinée par le calcul d'un indice de circularité⁽⁵⁾ (Miller, 1953) pour chaque polygone permettant surtout de réduire les confusions entre haies et arbres isolés. Cet indice varie entre 0 et 1 : plus il est proche de 1 et plus l'objet est circulaire. Enfin,

(5) Indice de circularité = $4\pi \times \frac{\text{Surface}}{\text{Périmètre}^2}$

Également appelé « coefficient de circularité », c'est le rapport entre la superficie du polygone et celle du cercle dont la circonférence est égale au périmètre du polygone.

FIGURE 4

MÉTHODE D'EXTRACTION AUTOMATIQUE ET DE CLASSIFICATION DES ÉLÉMENTS ARBORÉS

TABLEAU II

Validation des résultats

Scènes SPOT	Précision globale de bon classement	Indice de Kappa
22/07/2002	93 %	0,95
15/02/2003	84 %	0,88
15/02/2003	93 %	0,92
23/03/2003	87 %	0,84
23/03/2003	91 %	0,87
04/05/2003	87 %	0,86
04/05/2003	86 %	0,82
07/11/2003	85 %	0,81

au sein des alignements arborés, la ripisylve est différenciée à partir d'opérateurs contextuels : appartenance à une zone tampon autour du cours d'eau.

La dernière étape consiste à valider les résultats. Les trois classes obtenues sont confrontées à la cartographie de réseaux bocagers réalisée par photo-interprétation.

RÉSULTATS

Extraction de la couche "élément arboré"

Les classifications d'occupation du sol sur les huit images ont montré une précision globale supérieure à 85 % avec un indice de Kappa⁽⁶⁾ également toujours supérieur à 0,8 (tableau II, p. 648). Les principales confusions demeurent entre les prairies et certains types de cultures (reconnaissance difficile des sols couverts au printemps ou des cultures d'hiver) mais dans la mesure où nous ne disposons pas de séries multi-temporelles permettant de comparer les couvertures du sol à des saisons contrastées (rotations culturales), il reste difficile de réduire ces incertitudes.

L'analyse détaillée des matrices de confusion montre une bonne discrimination de la classe "élément arboré" sur l'ensemble des scènes traitées avec très peu de confusions avec les autres classes thématiques. Hormis pour deux basses vallées occupées par des marais posant des problèmes de confusion avec les bois (marais de l'Aure et surtout de la Dives), les taux d'omission et de commission moyens constatés pour la classe "élément arboré" sont systématiquement inférieurs à 5 % et en moyenne de 2,3 %. Elle est en effet identifiée avec la plus forte correspondance avec les observations de terrain. Cette classe est extraite des classifications sous la forme d'un raster binaire à 5 m de résolution.

Cependant, il faut noter une tendance à la surestimation des éléments arborés due à des phénomènes d'ombre provoqués par la hauteur de la strate arborée mais aussi par la microtopographie liée aux talus ou aux chemins creux le long desquels sont installées les haies. Ces éléments perturbent la signature spectrale des pixels adjacents aux haies qu'il faudrait identifier comme appartenant à la classe "prairie" ou "culture" le plus souvent mais qui se trouvent parfois confondus avec la classe "bois" (figure 5, ci-dessous). Moins fréquentes, des erreurs par omission peuvent également survenir dans le cas de haies étroites non repérées. Enfin, dans les secteurs de marais ou, de façon plus générale, marqués par une forte humidité, l'extraction de la classe "élément arboré" reste difficile du fait de confusions des bois avec certaines mares ou prairies humides.

FIGURE 5

CLASSIFICATION DES IMAGES SPOT 5

© CNES 2003, distribution Spot Image S.A. Images : © SPOT IMAGE / HOA-QUI / EYEDea

(6) Indice de Kappa : il permet de mesurer la précision de la classification sur une échelle de 0 à 1 à partir d'une matrice de confusion en tenant compte des erreurs en ligne et en colonnes.

Distinction des formations végétales arborées en 3 classes

À partir de la couche binaire “élément arboré”, la première étape (ouverture morphologique) permet de produire une nouvelle couche d’information dans laquelle les bordures des grandes surfaces arborées sont identifiées (figure 6, ci-dessous). Plus précisément, l’érosion (figure 6a) a permis de “rogné” l’ensemble des surfaces boisées sur une largeur de 10 m. Or, les alignements mesurant moins de 20 m de large, les haies selon la définition de l’IFN sont éliminées. En revanche, restent les nœuds du réseau bocager qui correspondent à des connexions de haies qui peuvent être plus larges. Les surfaces arborées inférieures à 100 m² ont alors été supprimées afin de ne pas les confondre avec des massifs boisés avant d’effectuer la dilatation (figure 6b). Dans la seconde étape du protocole, la vectorisation du résultat entraîne une perte d’information négligeable dans la mesure où seuls les plus petits éléments sont supprimés (surface inférieure à 5 m²). Ceux-ci représentent moins de 0,001 % de la superficie arborée détectée.

FIGURE 6 ANALYSE SPATIALE EN MODE RASTER : OUVERTURE MORPHOLOGIQUE

Le calcul des critères de surface et de forme pour l’ensemble des couches a permis de réaffecter certains éléments dans la mesure où la couche “arbres épars” est susceptible de contenir des haies ou parce que la couche “haies” peut contenir des éléments non linéaires tels que des bosquets. Pour l’application du critère de forme, des tests ont montré que le seuil de 0,5 permet de différencier les haies de forme allongée (indice de circularité < 0,5) et les arbres isolés plus compacts qui affichent au contraire un fort indice de circularité (proche de 1). Les boisements linéaires de berges (ripisylves) sont enfin distingués des haies proprement dites en sélectionnant les alignements adjacents au cours d’eau dans une zone tampon d’un rayon de 10 m de part et

FIGURE 7 ANALYSE SPATIALE EN MODE VECTEUR : DISTINCTION DES TROIS TYPES DE FORMATIONS ARBORÉES

d'autre du réseau hydrographique. Les trois types de formations arborées sont ainsi distinguées : arbres isolés, massifs boisés et haies (figure 7, p. 650).

Validation des résultats

Afin de valider les résultats, les trois classes obtenues sont confrontées à la cartographie de réseaux bocagers réalisée par photo-interprétation. Cette validation nécessite de disposer de données pour des dates similaires aux images satellitaires utilisées du fait de l'évolution parfois rapide et profonde de la structure des paysages bocagers suite aux opérations de remembrements et aux mutations des pratiques agricoles en œuvre depuis plusieurs dizaines d'années en Basse-Normandie. Quatre secteurs ont pu être renseignés à partir de l'orthophotoplan (2001-2002) et confrontés aux résultats issus des scènes SPOT étalées entre 2002 et 2003 : il s'agit de vallées présentant des paysages et des types de bocage très différents du pays d'Auge, du Bessin, et du bocage virois.

La comparaison entre les résultats obtenus à partir des deux démarches est délicate du fait de la différence de résolution du rendu cartographique qui apparaît de façon particulièrement nette dans le cas de données linéaires. Si le réseau bocager est représenté sous une forme linéaire en photo-interprétation, ici il apparaît de manière plus grossière et est transcrit par des données en mode surfacique correspondant à la largeur des haies (figure 8, ci-dessous). Cette difficulté est amplifiée par le phénomène de surestimation des haies lors de la phase de traitement d'image qui amène fréquemment à identifier des alignements plus larges qu'une haie (voir § p. 649). Cela renvoie également à la question de la définition de la haie qui constitue un véritable problème terminologique du fait de l'absence de consensus sur la définition du bocage entre les différentes disciplines qui s'y intéressent (Baudry *et al.*, 2000 ; Baudry et Jouin, 2003). En particulier, la définition de cet objet est étroitement liée aux échelles géographiques empruntées mais également aux données mobilisées.

FIGURE 8
CONFRONTATION DES RÉSULTATS
AU RÉSEAU BOCAGER EXTRAIT PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

C'est alors à travers le pourcentage d'intersection entre les lignes et les surfaces qu'est évaluée la pertinence de la méthode. Dans le pays d'Auge, dans la vallée de l'Ante plus précisément, cette confrontation a permis de constater un taux de recouvrement satisfaisant : près de 85 % du réseau bocager extrait par photo-interprétation est identifié (figure 8, p. 651). L'observation des erreurs d'omission met en avant la difficulté d'identifier les haies étroites mais aussi les haies connectées à un massif boisé. Le cas d'omission le plus fréquent renvoie à la fragmentation du réseau bocager : une part des haies discontinues est effectivement confondue avec la couche "arbres épars" lorsqu'elles sont trop déconnectées. Les erreurs par commission sont en revanche peu nombreuses et renvoient plus spécialement à des déformations de la morphologie des haies dues à la surestimation des surfaces arborées lors du traitement d'image.

Des pourcentages semblables sont obtenus sur d'autres sites bas-normands, notamment dans le Bessin marqué par un bocage à grandes mailles où les haies composées d'une haute strate émondée et d'une basse strate régulièrement taillée sont bien identifiées. La méthode semble en revanche moins efficace dans le bocage virois où une tendance à la surestimation a pu être observée. Enfin, dans les zones de bocage plus dense où les parcelles sont de petites tailles et de forme plus complexe, l'extraction automatique des haies est plus compliquée. En effet, il est très difficile d'isoler les haies des massifs boisés lorsque les processus de déprise agricole amènent à un paysage où se juxtaposent au sein d'un parcellaire très morcelé de petites prairies, des haies plus ou moins bien entretenues, des broussailles, et des friches avancées difficiles à distinguer. Des difficultés semblables apparaissent dans les zones humides (Hubert-Moy *et al.*, 2003).

DISCUSSION : VERS UNE ANALYSE DES PAYSAGES BOCAGERS

La méthode proposée fournit des résultats intéressants et permet d'obtenir, à l'échelle régionale, une cartographie des formations végétales arborées et des informations sur la densité bocagère. Les traitements réalisés, télédétection et analyse spatiale, sont économes en temps et le recours aux images satellitaires permet de traiter de larges territoires.

La démarche proposée comporte cependant des limites. Un des inconvénients majeurs de la méthode est de proposer des résultats en mode surfacique pour des réseaux bocagers. L'intégration des limites cadastrales parcellaires en aval de la démarche doit être envisagée afin d'améliorer le rendu cartographique final mais surtout pour résoudre les difficultés liées à la fragmentation des haies dans le cas de bocages dégradés. C'est ce qu'ont permis de vérifier des tests effectués sur plusieurs cantons pour lesquels nous disposons des limites de parcelles. Le couplage des données parcellaires à la méthode permet une meilleure identification des haies discontinues par la sélection des surfaces arborées en intersection avec les limites de parcelles. Cependant la connexion des haies déconnectées n'est pas si simple et renvoie une fois de plus à des questions de définition et d'échelle. Au sens de l'IFN, une interruption de 10 m entre deux linéaires de haies constitue bien une rupture qui ne doit pas être masquée. De même qu'à une échelle plus grande encore, une ouverture dans la haie — une barrière, un passage pour un tracteur — sera prise en considération par les écologues et forestiers mais pas par le gestionnaire du paysage qui intervient sur des territoires plus vastes. Il faut donc être vigilant pour ne pas masquer la fragmentation du bocage qui fait partie du paysage.

Les données satellitaires utilisées ne peuvent pas procurer un inventaire exhaustif des formations arborées : la maille du pixel utilisé est de 5 m et laisse passer un certain nombre d'informations. S'il est tout à fait envisageable de travailler sur la reconnaissance d'essences d'arbres à partir des signatures spectrales spécifiques aux résineux ou aux feuillus, par exemple pour mieux qualifier les massifs boisés (résineux, peupleraies, maturité ou état de la forêt...), la démarche ne

permet pas de différencier des types de haies (largeur, taille, présence ou non d'un talus, composition des strates...) contrairement à la photo-interprétation.

Enfin, le caractère automatisé de la démarche ne permet pour l'instant pas de rendre compte des spécificités des formations arborées. Il serait intéressant d'intégrer à cette méthodologie la reconnaissance d'autres types de formations arborées ou arbustives. Plus difficiles à reconnaître par traitement d'image du fait de leur composition hétérogène, elles fournissent pourtant des informations riches sur les dynamiques paysagères : il s'agit aussi bien des friches qui témoignent de signes de la déprise agricole, que des plantations de peupliers témoins de l'essor des nouveaux usages en œuvre dans les fonds de vallées humides, ou encore des jeunes plantations de résineux installées sur les plus fortes pentes des vallées encaissées révélant d'importantes contraintes de mise en valeur des parcelles de versants. Cependant, l'échelle d'application des images utilisées ici (1/15 000) ne permet pas d'identifier certains éléments dans la mesure où la résolution spatiale des images joue un rôle prépondérant dans la reconnaissance de ces mosaïques paysagères hétérogènes qui se révèlent très complexes.

Cette démarche a été mise en place pour répondre à une problématique spécifique dans le cadre d'un diagnostic paysager : il s'agissait de proposer une méthode permettant, à partir de scènes SPOT 5, de rendre compte de la répartition des formations boisées et de mesurer la densité du réseau bocager à l'échelle régionale. La cartographie finale des modes d'occupation du sol, et des éléments arborés en particulier, obtenue sur les différents sites d'étude, a permis de construire des indicateurs paysagers quantitatifs et génériques utilisant des variables simples comme la densité de haies, le taux de ripisylve ou le taux de boisement pour calculer des indices de fermeture par exemple (Germaine et Puissant, 2008). Dans ce contexte, la méthode permet de prendre en compte la contribution de l'arbre sous diverses formes à l'aspect du paysage : elle permet d'estimer la place des différents types de formations arborées et de comparer divers secteurs. Ainsi, dans le cadre du diagnostic, nous avons pu comparer le rôle des arbres dans l'organisation paysagère de plusieurs vallées, de tronçons de vallées, ou encore mettre en évidence des distributions différentes entre les vallées et les plateaux environnants.

Le caractère généralisable de l'ensemble de la méthode autorise ainsi à envisager des comparaisons à l'échelle régionale ou suprarégionale de paysages bocagers (densité, structure...). Cela est d'autant plus vrai que l'application de la méthode, initialement développée à partir de données métriques, est également envisageable à partir d'images présentant une résolution spatiale différente. La condition est alors d'adapter la taille des éléments structurants utilisés en morphologie mathématique ainsi que les distances d'érosion et de dilatation en fonction des objets recherchés par les opérateurs spatiaux.

La forme des résultats obtenus se situe donc entre une carte d'analyse et une carte d'inventaire. La cartographie produite présente des intérêts évidents pour la création d'indicateurs, la différenciation de grandes zones ou la construction de typologies fonction de la densité du bocage dont elle fournit un aperçu pertinent sur de vastes espaces. En revanche, la méthode ne permet pas de présenter de cartes d'inventaire exhaustives et précises qui correspondent parfois plus aux attentes des gestionnaires forestiers comme de l'IFN.

CONCLUSIONS

La méthodologie proposée en deux étapes et fondée sur des opérateurs spatiaux raster et vecteur présente l'avantage de pouvoir caractériser de façon automatique et pertinente des formations arborées sur de vastes espaces, et notamment des réseaux bocagers. Ceci se révèle indispensable dans le cadre d'un inventaire, d'une analyse ou d'un suivi des paysages bocagers.

Les données SPOT 5 s'avèrent bien adaptées pour répondre à ces objectifs. Leur résolution de 5 m permet de produire une cartographie au 1/15 000 mieux adaptée que les données génériques telles que Corine Land Cover (1/100 000) pour traiter du rôle que jouent les éléments arborés dans le paysage. Cette démarche appliquée à l'ensemble de la Basse-Normandie fournit des résultats intéressants aussi bien en milieu bocager lâche que dans les régions de bocage plus dense. Ces résultats répondent aux besoins que peuvent rencontrer les gestionnaires du paysage et les aménageurs du territoire, en particulier dans les régions bocagères de la façade atlantique, en proposant un protocole reproductible pour mettre en évidence la densité du bocage. Ils ouvrent surtout des perspectives intéressantes du point de vue de l'étude et de l'analyse des paysages bocagers à des échelles variées lorsqu'il s'agit de mettre en avant leur originalité, d'évaluer leur diversité ou de mesurer leur évolution.

Marie-Anne GERMAINE
Laboratoire Géophen
UMR 6554 CNRS LETG
UNIVERSITÉ DE CAEN BASSE-NORMANDIE
Esplanade de la Paix
F-14000 CAEN
(marie-anne.germaine@unicaen.fr)

Anne PUISSANT
Laboratoire Image et Ville
UMR 7011 CNRS ULP
UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR
3, rue de l'Argonne
F-67000 STRASBOURG
(anne.puisant@lorraine.u-strasbg.fr)

Cyrille BARNERIAS
INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
73, rue Marie Curie
F-14200 HÉROUVILLE-SAINT-CLAIR
(cyrille.barnerias@ifn.fr)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CNES par qui nous avons pu acquérir des scènes SPOT 5 dans le cadre du programme ISIS, ainsi que le Conseil régional de Basse-Normandie qui soutient ce programme de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- BAUDRY (J.), JOUIN (A.). — De la haie au bocage : organisation, dynamique et gestion. — Paris : INRA, 2003. — 474 p.
- BAUDRY (J.), BUNCE (R.G.H.), BUREL (F.). — An international perspective on their origin, function and management. — *Journal of Environmental Management*, 60, 2000, pp. 7-22.
- BLOCH (I.). — Morphologie mathématique. — Polycopié de l'UE RDMM Représentations discrètes et morphologie mathématique. — 2005. — pp. 95-126.
(<http://www.tsi.enst.fr/~bloch/ANIM/morpho.pdf>).
- BOUDIER (T.). — Morphologie mathématique, Définition et applications. — 2008.
(http://www.snv.jussieu.fr/~wboudier/ens/cours_inb1/o6_MorphoMath.pdf).

- BRUNET (P.) avec la collab. de GIRARDIN (P.). — Inventaire des paysages de Basse-Normandie. — Caen : Conseil régional de Basse-Normandie ; DIREN Basse-Normandie, 2001. — 2 tomes, 871 p.
- CNES. — Résolutions et modes spectraux. — *Les fiches techniques SPOT*, 2005, 4 p. (http://www.spotimage.fr/automne_modules_files/standard/public/p152_8b67b973e9c38cc9dbc430b9ea683b4fres_modes_F.pdf).
- DRE Basse-Normandie. — Utilisation de la télédétection pour la mesure de la "tache urbaine" en Basse-Normandie, 2004. — 35 p.
- DOMMANGET (A.). — Détection, caractérisation et généralisation des haies à partir d'une segmentation automatique. — IFN Caen, 2006. — 64 p. (Rapport de stage).
- DUBREUIL (V.). — Télédétection et cartographie à petite échelle des paysages de la France de l'Ouest. — *Mappemonde*, Montpellier, n° 2, 1993, pp. 18-21.
- GERMAINE (M.-A.). — Vers une gestion intégrée des "paysages ordinaires" des petites vallées du nord-ouest de la France : l'exemple de la vallée de la Seulles. — *Bulletin de l'Association des Géographes français*, vol. 1, 2009, pp. 12-31.
- GERMAINE (M.-A.), PUISSANT (A.). — Extraction d'indices paysagers et analyse quantitative des paysages de "vallées ordinaires" à partir de données images : l'exemple de la Seulles (Calvados, France). — *Cybergéo*, 2008, 15 p.
- HUBERT-MOY (L.), CLEMENT (B.), LENNON (M.), HOUET (T.), LEFEUVRE (E.). — Étude de zones humides de fond de vallées à partir d'images hyperspectrales CASI : application à un bassin versant de la région de Pleine-Fougères (Bretagne, France). — *Photo-Interprétation*, vol. 39, 2003, pp. 33-43.
- HUBERT-MOY (L.), COTONNEC (A.), GOUERY (P.). — Extraction du réseau bocager à l'aide de données satellitaires Landsat Thematic Mapper. Application à un bassin versant en Bretagne centrale. — *Photo-Interprétation*, n° 4, 1995, pp. 258-263.
- IFN. — Les imageries satellitaires pour la gestion forestière. — *L'IF*, n° 18, 2008, 8 p.
- LENNON (M.), MOUCHOT (M.C.), MERCIER (G.), HUBERT-MOY (L.). — Segmentation of hedges on CASI hyperspectral images by data fusion from textures, spectral and shape analysis. — *Geoscience and Remote sensing Symposium*, Proceedings, IGARSS 2000, IEEE 2000 International, vol. 2, 2000, pp. 825-827.
- MARANGOZ (A.M.), ORUC (M.), BUYUKSALIH (G.). — Object-oriented image analysis and semantic network for extracting the roads and buildings from Ikonos pan-sharpened images, 2004, PS WG III/4.
- MILLER (V.C.). — A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee. — Columbia : Columbia University Department of geology, 1953, Technical report, n° 3.

INTÉRÊT DES DONNÉES IMAGES SPOT 5 ET DES SYSTÈMES D'INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES POUR L'EXTRACTION ET L'IDENTIFICATION DES FORMATIONS VÉGÉTALES ARBORÉES EN MILIEU BOCAGER. EXEMPLES BAS-NORMANDS [Résumé]

Dans le cadre de problématiques relatives à la gestion de la forêt mais aussi du paysage, la réalisation de diagnostics d'ensemble appuyés sur des productions cartographiques et des inventaires doit permettre de distinguer les différentes formations végétales arborées et de comprendre leur répartition spatiale à des échelles régionales qui sont de plus en plus celles des observatoires et des aménageurs. Une démarche est proposée pour extraire et différencier, selon la nomenclature de l'Inventaire forestier national, les massifs boisés, les haies et les arbres épars à partir de données images. Elle combine l'analyse de scènes satellites SPOT 5 et des traitements d'analyse spatiale (raster et vecteur) réalisés sous Système d'informations géographiques. Une couche "élément arboré" est d'abord extraite à partir de classifications supervisées. Un protocole est ensuite proposé pour distinguer les différentes formations arborées : cette méthode reproductible et itérative s'appuie sur des opérateurs de morphologie mathématique et des opérateurs spatiaux. Les résultats obtenus à l'échelle de la Basse-Normandie permettent une caractérisation pertinente des éléments arborés indispensable pour un inventaire, une analyse ou un suivi dans le temps des paysages bocagers.

VALUE OF SPOT 5 IMAGE DATA AND OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR EXTRACTING AND IDENTIFYING TREE COMMUNITIES IN A BOCAGE ENVIRONMENT - EXAMPLES IN LOWER NORMANDY (Abstract)

For the purposes of forest and landscape management, overall diagnoses supported by mapping and inventories must be capable of distinguishing the various tree communities and understanding their spatial distribution at regional scales that observatory and planners typically use. The article offers an approach for extracting and differentiating wooded forest areas, hedgerows and disseminated trees, in accordance with the National Forest Inventory nomenclature, on the basis of image data. It combines an analysis of SPOT 5 satellite scenes and spatial analysis processing (raster and vector) conducted with geographic information systems. A "tree element" layer is first extracted using supervised classifications. Next a protocol for distinguishing various tree communities is offered. This reproducible, iterative method is based on mathematical morphology operators and spatial operators. The results obtained on the scale of Lower Normandy yield a suitable characterization of the tree communities for the purposes of conducting an inventory, an analysis or for tracking bocage landscapes over time.