



HAL
open science

Téledétection de la trame verte arborée en haute résolution par morphologie mathématique

Eric Maire, Claire Marais-Sicre, Sylvie Guillerme, Fanny Rhoné,
Jean-François Dejoux, Gérard Dedieu

► **To cite this version:**

Eric Maire, Claire Marais-Sicre, Sylvie Guillerme, Fanny Rhoné, Jean-François Dejoux, et al.. Téledétection de la trame verte arborée en haute résolution par morphologie mathématique. *Revue Internationale de Géomatique*, 2012, 4, pp.519-538. halshs-01020839

HAL Id: halshs-01020839

<https://shs.hal.science/halshs-01020839>

Submitted on 8 Jul 2014

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.

Téledétection de la trame verte arborée en haute résolution par morphologie mathématique

Eric Maire¹, Claire Marais-Sicre², Sylvie Guillerme¹
Fanny Rhoné¹, Jean-François Dejoux², Gérard Dedieu²

1. GEODE (Géographie de l'Environnement), UMR 5602 CNRS-Université Toulouse II Le Mirail, 5 allée Antonio Machado, 31058 Toulouse Cedex 9
eric.maire@univ-tlse2.fr

2. CESBIO (Centre d'études spatiales de la biosphère)
UMR 5126 CNRS - Université Paul Sabatier, CNES, IRD
BPI 2801, 18 av. Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9

RÉSUMÉ. Cet article pointe d'abord les causes et les enjeux des verrous cartographiques dans la mise en œuvre de la politique de la trame verte et bleue (TVB). Une connaissance de l'emprise précise de la trame verte arborée par les acteurs locaux apparaît incontournable. Nous proposons ensuite une méthode de téledétection associée à des algorithmes de morphologie mathématique pour extraire la trame verte arborée à l'échelle métrique à partir d'une image à très haute résolution spatiale. La méthode proposée est une séquence de quatre étapes : 1) analyse en composantes principales (ACP), 2) segmentation par la transformation chapeau haut de forme, 3) élimination du bruit morphologique, 4) restauration des contours arborés par dilatation géodésique. Enfin, une discussion sur les perspectives en termes de conséquences sur les méthodologies de téledétection et sur les politiques publiques environnementales termine l'article.

ABSTRACT. This article shows at first reasons and stakes of the cartographic issues in the implementation of Green and Blue Way (GBW). Knowledge about the accurate wooded green way carried by the local stakeholders seems to be crucial. We present a remote sensing method linked to mathematical morphology algorithms in order to extract the wooded green way at a metric scale from a very high spatial resolution satellite image. Proposed method is a sequence of four steps: 1) Principal Component Analysis (PCA), 2) segmentation by top hat transform, 3) morphological noise elimination, 4) restoration of wooded green way outlines obtained by geodesic dilation. A discussion on perspectives of consequences on the remote sensing methodologies and on the environmental public policies ends the paper.

MOTS-CLÉS : trame verte arborée, téledétection, morphologie mathématique, transformation chapeau haut de forme, politiques publiques environnementales, haie, arbre hors forêt.

KEYWORDS: wooded green way, remote sensing, mathematical morphology, top hat transform, environmental public policies, hedge, tree outside forest.

DOI:10.3166/RIG.22.519-538 © 2012 Lavoisier

1. Préambule

En Europe, si les logiques des trois piliers du développement durable sont bien perçues par la plupart des acteurs et les populations, qu'en est-il des paysages d'arbres hors FORÊT (PAHF) qui structurent les paysages européens (Guillaume *et al.*, 2012) mais sont encore bien peu pris en compte dans les politiques publiques ? Les arbres hors forêt se rencontrent aussi bien dans les paysages remarquables que dans ceux, plus ordinaires, des zones de grande culture où ils ne sont souvent qu'un élément résiduel relégué aux confins des parcelles. Il s'en trouve également dans les régions de montagne où l'arbre hors forêt peut même donner lieu à des accrus forestiers lorsque les pratiques qui les maintenaient sont abandonnées, ou encore dans les espaces urbanisés où la vocation esthétique de l'arbre prédomine. La diminution des espèces fruitières traditionnelles, la filtration insuffisante des eaux de ruissellement polluées, la perte de fonction « corridor de biodiversité » de la trame verte en milieu rural, sont parmi quelques menaces liées aux PAHF (Guillaume, 2010). En France, ces PAHF auxquels on attribue beaucoup des valeurs du développement durable, et qui sont souvent implicitement cités dans la politique de la trame verte et bleue (TVB) issue du Grenelle de l'environnement, sont pourtant mal évalués en termes de cartographie de la « couche arborée hors forêt », alors que le réseau hydrographique correspondant à la trame bleue est, quant à lui, mieux connu et représenté. Le Grenelle de l'environnement a vu l'émergence d'une loi qui met l'accent sur un nouvel outil de zonage écologique afin d'avoir une cohérence à l'échelle régionale. À cet égard, la loi prévoit que les Schémas de cohérence territoriale (SCoT) – et les Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE) se déclinant ensuite dans la réglementation des plans locaux d'urbanisme intercommunaux (PLU/PLUI) – élaborés en concertation avec l'ensemble des acteurs intéressés du territoire, doivent prendre en compte la TVB lors de leur élaboration. Un des enjeux est alors de résoudre les difficultés de la déclinaison des échelles pour intégrer la TVB à une échelle plus fine dans les directives régionales (Cormier *et al.*, 2010). La superposition d'une « couche arbre » au cadastre ou encore au registre parcellaire graphique (RPG)¹ formaliserait mieux la politique de la TVB à l'échelle la plus locale. La cartographie des continuités écologiques offre pour le moment des résultats partiels car le réseau écologique esquissé demande confirmation et validation, bien qu'ils puissent être réalisés en partie de manière concertée avec des experts locaux. Pourtant, disposer d'une carte d'occupation du sol dont la trame verte serait représentée à ce niveau d'échelle est une condition *sine qua non* pour résoudre les problèmes méthodologiques aboutissant à des indicateurs de biodiversité (Liénard et Clergeau, 2009). C'est pourquoi la connaissance directe de l'emprise cartographique de la couche arborée hors forêt et de sa dynamique à

1. Le registre parcellaire graphique (RPG) est un système d'information géographique permettant l'identification des parcelles agricoles. Il est utilisé pour la gestion des aides européennes à la surface. Il contient environ 6 millions d'îlots, soit plus de 27 millions d'hectares, déclarés annuellement par près de 400 000 agriculteurs. <http://www.asp-public.fr/?q=node/856>

une échelle métrique, voire submétrique dans certains cas, et ce sur une emprise de plusieurs dizaines de kilomètres carrés (ce qui correspond bien à l'échelle des intercommunalités) pourrait devenir une des clefs pour une meilleure acceptabilité/appropriation de la politique de la TVB par les acteurs locaux et les citoyens. Il s'agirait alors de réfléchir aux moyens d'une démarche participative plus locale que celle définie lors de l'élaboration des SCoT. De plus, l'approche métrique de connaissance de la trame verte a un sens du point de vue des pratiques agricoles en territoire rural et périurbain, car cela concerne directement les agriculteurs, qui utilisent l'outil cartographique pour faire leurs déclarations en lien avec la politique agricole commune (PAC) européenne. Or, la circulaire DGPAAT/SDEA/C2010-3047 du 25 mai 2010 intègre l'élément arboré en agriculture comme éligible à la conditionnalité d'attribution des aides. La cartographie des éléments arborés en milieu rural va donc représenter de plus un enjeu économique, au-delà de l'enjeu écologique lié notamment à la mise en place en France de la TVB. Nous allons donc voir dans quelle mesure la télédétection et ses nouvelles avancées méthodologiques tant en termes d'instrumentation qu'en termes d'algorithmes (en particulier avec la morphologie mathématique), permettent de cartographier cette couche arbres hors forêt avec une précision qui pourrait dépasser les spécificités des données disponibles, notamment auprès de l'Institut géographique national (IGN, 1999).

2. Introduction

S'il est relativement aisé d'extraire les contours des surfaces forestières avec une grande précision, il est plus difficile d'extraire ceux des arbres hors forêt par télédétection, du fait de la grande diversité du couvert végétal environnant ainsi que des réponses spectrales des arbres dans l'espace agricole sur des images à très haute résolution spatiale (THRS), qui peuvent paraître assez similaires à certaines cultures, telles que le maïs à certaines périodes de l'année. Les arbres hors forêt eux-mêmes ne font pas forcément l'objet d'une définition claire et unanime, et leur perception par les populations et les acteurs peut varier en fonction des paysages et des zones pédoclimatiques sur la planète (Bellefontaine *et al.*, 2001). Cependant, pour la France métropolitaine, nous considérons que la composante arborée hors forêt est constituée par les haies arborées, les haies arbustives délimitant les parcelles, les haies discontinues, les arbres fruitiers, les arbres isolés (que ce soit en zone périurbaine au sein des jardins familiaux ou en zone de grande culture), les bosquets, les taillis-futaies, etc. Nous avons pris en considération pour notre recherche tous les éléments arborés hors forêt dont l'épaisseur est au minimum voisine du mètre, car c'est cette diversité qui représente un enjeu à spatialiser. Compte tenu de cette diversité de formes, il est peu aisé d'extraire l'ensemble de cette composante avec un algorithme utilisant peu de paramètres d'ajustement. Les zones rurales, quant à elles, sont jusqu'ici plutôt délaissées surtout à cause de la difficulté d'extraire la composante arborée à une résolution métrique. Toutefois cette question devient cruciale avec la mise en place de la TVB. Les méthodes multi-résolutions incluant des analyses de textures associées à des algorithmes orientés objets ont montré leur

pertinence pour l'extraction de la trame verte sur des photographies aériennes infrarouges (Vannier et Huber-Moy, 2008 ; Sheeren *et al.*, 2009 ; Vannier *et al.*, 2011). Cependant, elles nécessitent des regroupements de classes utilisant des connaissances pointues de terrain pour produire une image finale qui ait une bonne représentativité. C'est pourquoi nous essayons une méthode qui utilise la morphologie mathématique binaire pour extraire cette composante arborée en une seule passe et d'un seul tenant, sans forcément nécessiter des regroupements de classes (pouvant être assez complexes selon la typologie de la végétation ligneuse). Curieusement, les méthodes de morphologie mathématique ne sont pas très répandues pour l'extraction du tissu végétal, hormis les contours des entités forestières (Zheng *et al.*, 1995 ; Laporterie *et al.*, 2001). Cela est sans doute dû aux difficultés engendrées par la nécessité de travailler au départ de façon empirique, d'avoir à manipuler de nombreux concepts de morphologie mathématique, tout en ayant une bonne connaissance du terrain pour appréhender l'emprise des objets à extraire. Pourtant la morphologie mathématique est une algorithmique éminemment géographique (Voiron-Canicio, 1995) même si de prime abord elle est historiquement appliquée à des analyses cytométriques et des processus industriels (Serra, 1988 ; Raymond *et al.*, 1993, Maire *et al.*, 2000). La morphologie mathématique est aussi une méthode adaptée aux réseaux linéiques (Zhang *et al.*, 1999). Le plus souvent, les algorithmes de morphologie mathématique utilisés sur des images THRS sont plutôt dédiés aux croissances urbaines du fait de la prégnance des enjeux économiques a priori supérieurs à ceux des milieux ruraux, comme l'extraction du bâti (Matti-Gallice *et al.*, 2004 ; Sheeren *et al.*, 2007). Nous présentons ici une première approche d'une méthode d'extraction en haute résolution de cette trame verte arborée utilisant la morphologie mathématique, et plus précisément la fonction de chapeau haut de forme et la dilatation géodésique.

3. Matériel et méthodes

3.1. Localisation

Le Gers est un des départements français où la structure bocagère est encore bien conservée. Il reste très agricole et les trois quarts de la surface sont cultivés. C'est un territoire en pleine mutation, qui doit faire face aux multiples incertitudes et enjeux de l'agriculture mondiale mais aussi ceux liés au développement urbain et à son impact sur les campagnes (du fait de la croissance de la ville d'Auch, mais surtout de la périphérie toulousaine). Le site choisi, sur les communes de Cadours et Encausses, à la limite de la Haute Garonne, est situé aux confins nord-est du Gers, où l'influence de la métropole toulousaine se fait déjà ressentir (figure 1).

3.2. Préparation des données

Une première évaluation à l'aide d'un algorithme privilégiant une approche par morphologie mathématique sur images satellites Quickbird dans le Gers est implémentée sur un secteur d'environ 60 km². Il s'agit d'une image acquise en octobre 2008 dans le cadre du programme d'accompagnement ORFEO du CNES. Cette image dispose de 4 canaux à 2,4 m de résolution et du mode panchromatique à 0,65m/pixel.

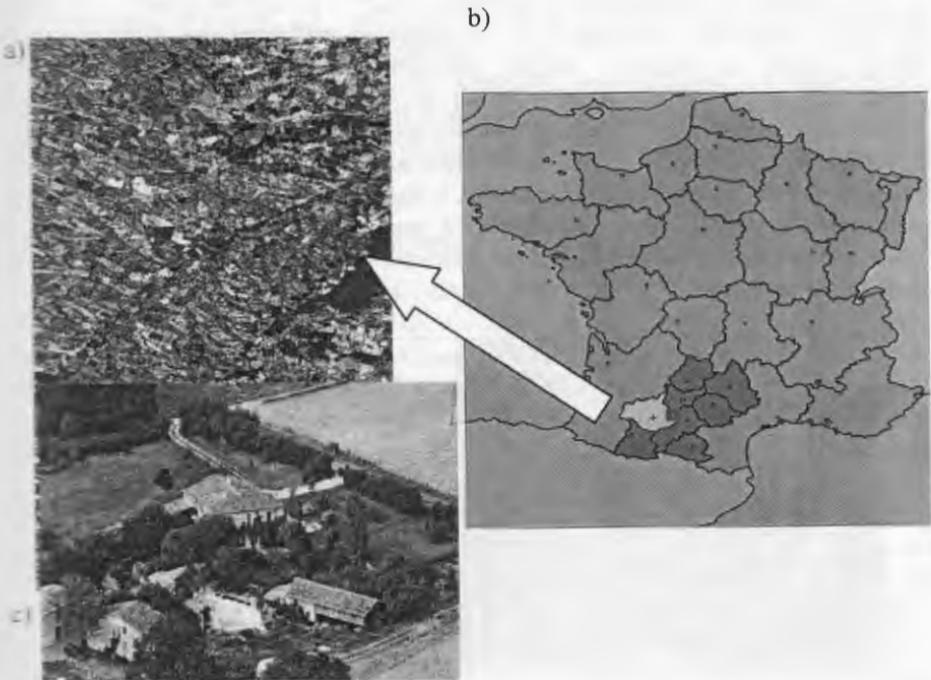


Figure 1. Délimitation de la zone d'étude pour l'extraction de la composante arborée sur la commune d'Encausse (Gers). La composition colorée en haut à gauche a) représente l'emprise de l'image satellite Quickbird choisie pour l'étude.

Sur la photographie en bas à gauche c), on devine que l'extraction de la composante arborée à l'échelle métrique ne sera pas aisée, en particulier au voisinage des zones périurbaines, lotissements ou jardins

La composante arborée, les lisières des bois, les arbres isolés se distinguent parfaitement. Cependant leurs ombres, pouvant se confondre avec la réflectance de la végétation environnante, empêchent une classification directe de leurs contours. Ces images ont fait dans un premier temps l'objet d'une fusion de données (pan-

sharpening) pour une utilisation des 4 canaux à $0,65\text{m}/\text{pixel}^2$. La résolution est donc comparable aux orthophotographies de l'IGN, mais nous avons l'avantage de travailler en multispectral.

3.3. Mode opératoire

3.3.1. L'analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales (ACP) a permis de générer une image facilitant l'usage des techniques de morphologie mathématique d'extraction en tenant compte de plusieurs critères, notamment les caractéristiques des haies champêtres et des arbres au sein même de l'image. Cette ACP a réalisé une décorrélation des bandes en calculant quatre nouveaux canaux. Nous observons que la composante arborée est mieux discriminée sur le second canal, tout en éliminant conséquemment les ombres. Le résultat de la figure 2 montre le potentiel de l'image pour une segmentation de la végétation par des opérateurs de morphologie mathématique qui se prêtent bien à des extractions d'objets à niveaux de gris avec des critères de formes.

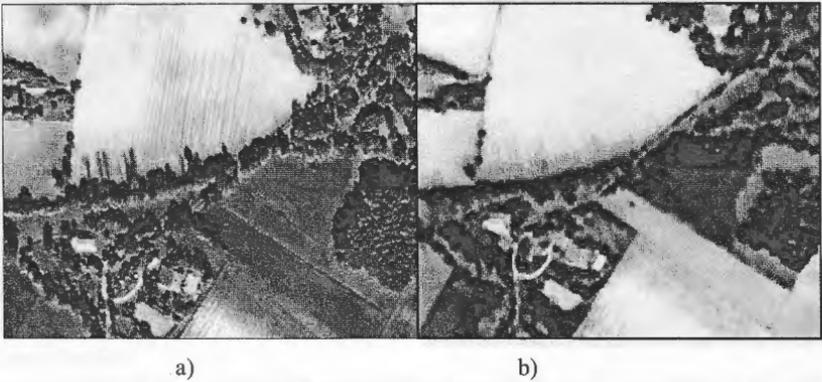


Figure 2. a) un extrait de la composition colorée de l'image Quickbird à $0,65\text{m}/\text{pixel}$. On aperçoit parfaitement les ombres des arbres. b) la seconde composante de l'analyse en composantes principales permet de mettre en valeur la végétation (en noir) et d'atténuer les ombres

3.3.2. Extraction de la composante arborée par les fonctions de morphologie mathématique

3.3.2.1. Préambule sur la morphologie mathématique

Nous pouvons classer les fonctions de morphologie mathématique essentiellement en deux modes opératoires : d'une part, celles qui s'appliquent sur des images binaires et d'autre part, celles qui s'appliquent sur les images à niveaux de gris. La morphologie mathématique binaire utilise la théorie ensembliste à partir d'un élément structurant qui vérifie des formes et des conformations élémentaires dans l'image en créant une nouvelle image binaire (Serra, 1988). C'est souvent déjà une image qui a fait l'objet d'une première segmentation. La morphologie mathématique fonctionnelle opère au contraire sur des images en niveaux de gris et s'applique sur la dynamique des différences de niveaux de gris contenus dans l'emprise de l'élément structurant.

3.3.2.2. La fonction chapeau haut de forme.

Il s'agit d'une fonction qui s'applique sur des images à niveaux de gris. L'intérêt principal de cette fonction est de permettre à la fois d'extraire des différences locales de niveaux de gris des objets en s'affranchissant des variations du niveau de gris du fond et d'extraire les objets selon leur taille conformément à l'élément structurant. En sciences géographiques, et plus précisément en géomorphologie, l'utilisation de la fonction chapeau haut de forme (*Top Hat Transform* – THT) permet par exemple une estimation quantitative d'un volume érodé d'un système hydrographique (Rodriguez *et al.*, 2002 ; Riquelme *et al.*, 2008). Les « sous-fonctions » d'ouverture et de fermeture à niveaux de gris sont utilisées pour définir cet opérateur qui consiste à extraire les pics et les vallées avec une condition de taille en considérant l'élément structurant (Meyer, 1979). Pour extraire les pics, il s'agit de l'opérateur chapeau haut de forme conventionnel (*Top Hat* – TH). Dans notre cas, si on considère les niveaux de gris comme un relief, à l'instar d'un modèle numérique de terrain, nous pouvons extraire les niveaux de gris les plus sombres qui représentent la partie arborée. C'est pour cela que l'on peut parler de chapeau haut de forme inversé (*Black Top Hat* – BTH). Il est représenté par l'équation (1) :

$$\text{BTH} = \{ x : C^\lambda(X) - f(x) \geq t \} \quad (1)$$

où $C^\lambda(X)$ représente la fonction de fermeture à niveau de gris. La fermeture étant une opération de dilatation suivie d'une érosion (Serra, 1988).

La valeur du seuil (t) permet d'extraire les vallées en ne tenant pas compte des niveaux de gris les plus faibles, qui souvent correspondent à du bruit au sein de l'image. La fonction chapeau haut de forme inversé permet alors d'extraire des objets sombres selon des considérations morphologiques (figure 3).

Le chapeau haut de forme s'applique également en trois dimensions sur l'image satellite (soit en réalité les coordonnées géographiques en X et en Y, puis l'intensité en niveaux de gris assimilable à un relief). Nous pouvons donc extraire les objets les moins intenses par rapport au fond local de l'image avec des critères de taille. Pour l'extraction de la composante arborée hors forêt, nous utilisons alors l'image à niveaux de gris provenant de l'analyse en composantes principales. L'opérateur de morphologie mathématique chapeau haut de forme inversé (BTH) interactif permet l'extraction de la composante arborée selon le diamètre de la canopée (9-12 mètres sur le terrain). Cela suppose cependant de bien connaître l'emprise des haies sur le terrain afin de vérifier les résultats obtenus.

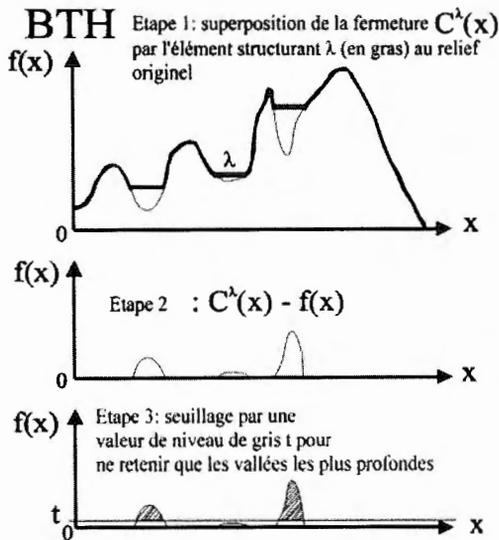


Figure 3. Méthode d'extraction des pics de niveaux de gris les plus faibles par la méthode du BTH sur un relief en deux dimensions.

Cela permet de sélectionner les vallées avec des critères de profondeur et de largeur via le dimensionnement de l'élément structurant λ

3.3.2.3. La reconstruction géodésique

En réalité, l'utilisation du BTH produit une image (masque) binaire. Cette stratégie de binarisation présente l'avantage d'être simple et rapide à mettre en œuvre et s'affranchit du fond de l'image. Cependant les pics de bruit de quelques pixels de largeur extraits par le BTH doivent ensuite être nettoyés. La reconstruction géodésique permet de supprimer de l'image les petits objets qui ne sont pas des arbres, et de ne conserver que les objets d'intérêt. Nous effectuons tout d'abord une érosion correspondant à l'emprise d'un houppier inférieure à 9 pixels, soit environ 5 mètres carrés. L'image résultat constitue l'image marqueur. La reconstruction

La reconstruction géodésique consiste à restaurer la forme originale des objets de l'image binaire en pratiquant une dilatation de l'image marqueur (image ayant subi une opération d'érosion) conditionnellement à l'image d'origine. Pour cela, nous utilisons les deux opérateurs morphologiques de base que sont l'érosion et la dilatation, respectivement notés $A \ominus B$ et $A \oplus B$, A étant l'image binaire à traiter et B l'élément structurant. L'opération de reconstruction géodésique (ou encore appelé dilatation conditionnelle) est appliquée ici sur le résultat de la segmentation par le BTH, en considérant l'érodé de taille du masque binaire du BTH comme marqueur. Formellement, la reconstruction géodésique s'écrit :

$$A \oplus_C B = (A \oplus B) \cap C \quad (2)$$

A est dilaté par un élément structurant B conditionnellement à l'image initiale C . A est l'image marqueur comme précisé. B est l'élément structurant utilisé pour dilater l'image marqueur. C est l'image initiale (image binaire issue de la BTH) conditionnant la dilatation. L'opération de dilatation est itérée jusqu'à idempotence, à l'instar de l'image d'un feu de prairie qui s'arrête quand il atteint une étendue d'eau. La figure 4 montre le résultat de la dilatation géodésique.

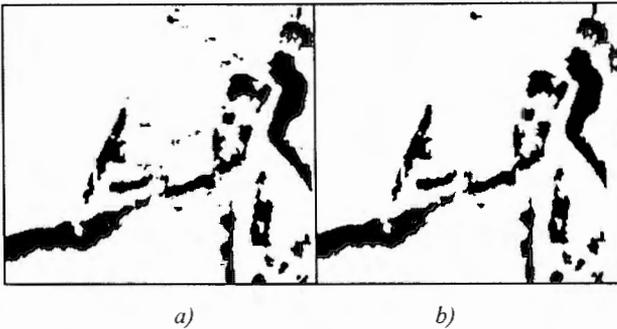


Figure 4. a) Extraction de la composante arborée par le BTH de taille 14.
b) Résultat de l'élimination des composantes les plus petites par une opération de dilatation géodésique

3.3.3. Méthode d'extraction de la composante arborée semi-automatique

On parle ici de méthode semi-automatique car les connaissances des paysages sur le terrain interviennent sans cesse pour la calibration et les critères d'extraction des opérateurs morphologiques. Il s'agit notamment de choisir la taille de l'élément structurant du BTH en fonction de la taille maximum de la structure arborée à extraire, de manière à ne pas extraire les structures forestières proprement dites puisqu'il s'agit seulement de la composante arborée hors forêt. Comme cela est mentionné dans les sous-chapitres précédents, la méthode se déroule ainsi (figure 5) :

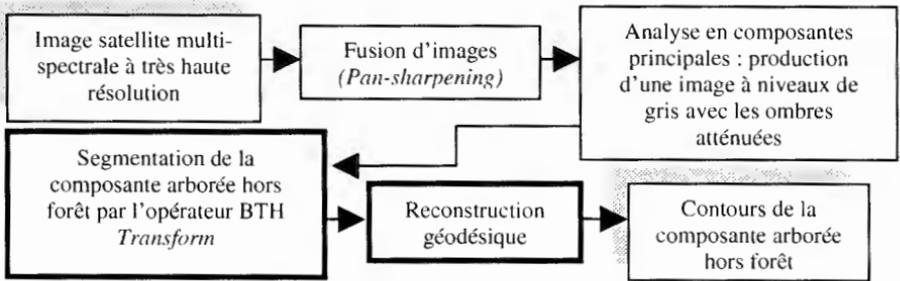


Figure 5. Méthodologie de l'extraction de la composante arborée hors forêt

4. Mise en œuvre et principaux résultats

Nous découpons dans l'image satellite une zone de 20 km² compatible avec la gestion mémoire du logiciel de morphologie mathématique³ pour traiter d'un seul tenant les images haute résolution (figures 6 et 7). Nous effectuons ensuite deux agrandissements de plus en plus importants sur des zones moins étendues (figures 8 et 9).

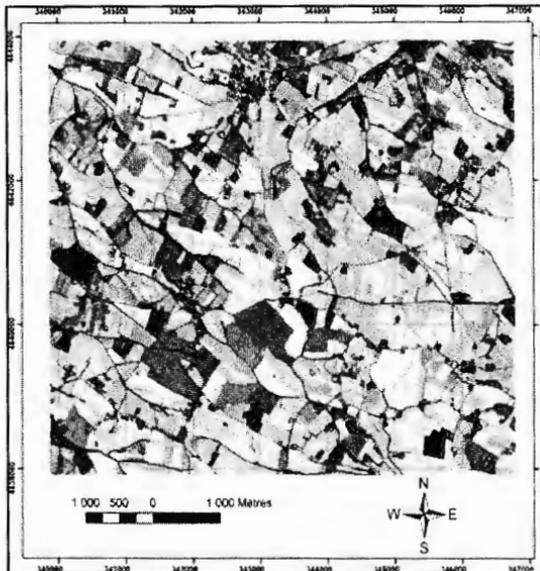


Figure 6. Emprise de l'image destinée à l'extraction de la trame verte arborée par notre méthode. Il s'agit d'une image à niveau de gris dont l'ombrage est atténué par une analyse en composantes principales. Cette zone représente une surface d'environ 20 km² et sera traitée en une seule passe. Projection : UTM 31N. Datum : WGS 84

3. Visilog 6.9 Imaging Software - Noesis (2011).

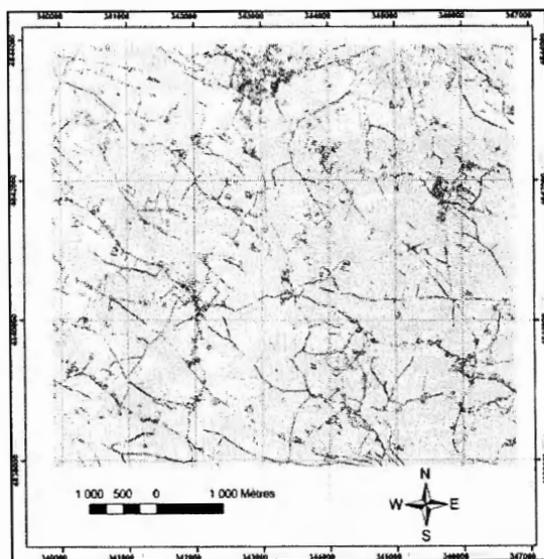
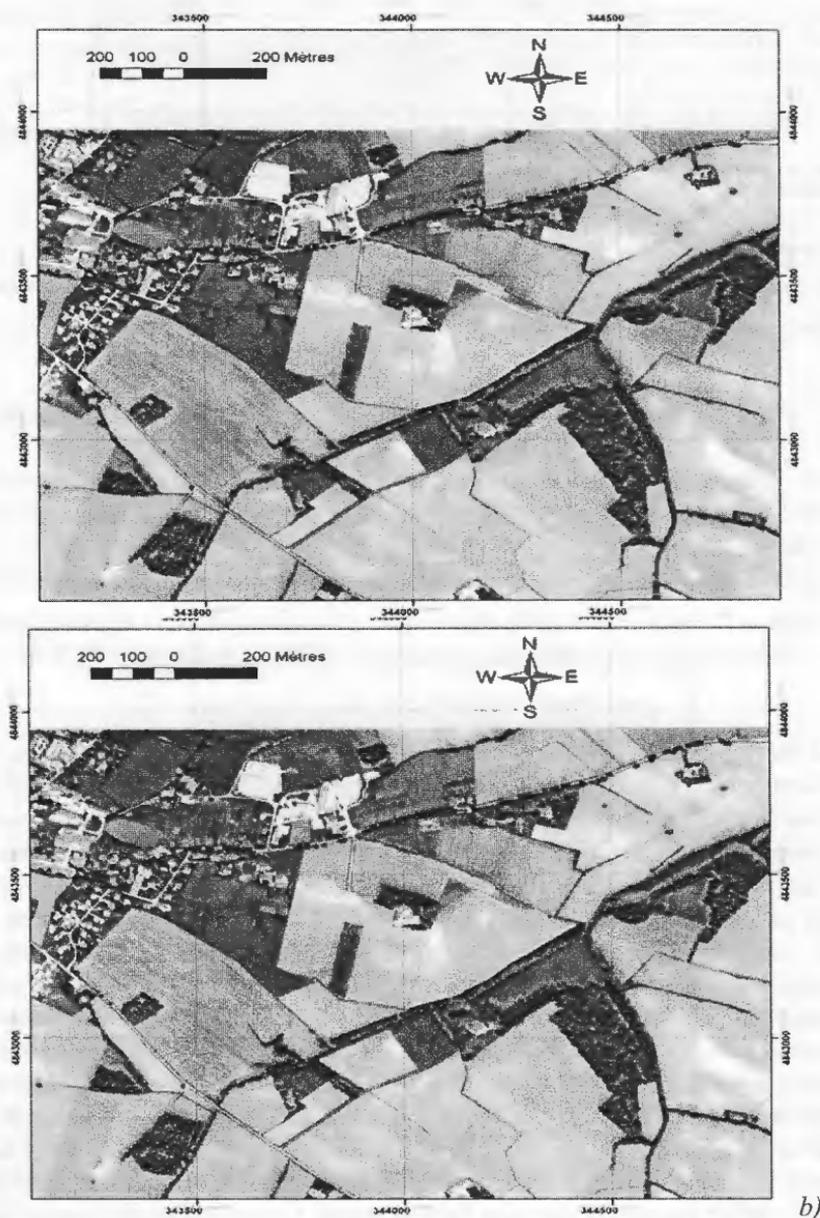


Figure 7. Image finale de la trame verte arborée selon notre méthode par morphologie mathématique. Projection : UTM 31N. Datum : WGS 84

La phase délicate de l'extraction par le BTH est le réglage de ses paramètres, même si ils sont peu nombreux comparativement aux méthodes classiques de classification. Cela implique une évaluation de la dynamique des niveaux de gris de l'image associée aux critères de tailles qui définissent les arbres hors forêt. En réalité, nous adoptons une taille de 14 pixels comme rayon de l'élément structurant de l'opérateur BTH. Cela signifie simplement que le diamètre moyen du houppier le plus grand extrait est de 28 pixels – soit environ 18 mètres, ce qui peut correspondre à de très grands arbres. A contrario, les plus petits arbres et arbustes seront rejetés et calibrés par la taille de l'élément structurant de la reconstruction géodésique, à savoir un diamètre de houppier légèrement inférieur à 2 mètres. L'examen des différences locales de niveaux de gris s'effectue sur le calcul intermédiaire de l'opérateur BTH, à savoir la différence entre l'image après fermeture et l'image d'origine (cf. équation (1)). La valeur du seuil permettant d'éliminer le fond de l'image bruité est déterminée par la mi-hauteur moyenne des niveaux de gris des objets à extraire. En effet, le seuil à mi-hauteur permet de mieux définir un contour avec une fiabilité accrue. La dynamique de l'image issue de l'analyse en composantes principales est normalisée à 8 bits (256 niveaux de gris) ce qui donne comme seuillage le plus pertinent pour l'opérateur BTH une valeur de 110. Pour cette région, nous obtenons un pourcentage de couverture d'arbres hors forêt de 3,1 % du territoire, ce qui est conforme aux données indépendantes recueillies localement⁴.

4. Source : Association arbres et paysages du Gers.



*Figure 8. Zoom sur la partie est du village de Cadours. En a) image en niveaux de gris issue de l'analyse en composantes principales. En b) extraction de la composante arborée. On constate que les bois (ou forêts) ne sont pas pris en compte, seuls les arbres hors forêt sont extraits, ce qui est conforme à nos attentes. Les arbres en zone villageoise sont également extraits.
Projection : UTM 31N. Datum : WGS 84*

La validité des résultats en haute résolution est difficile à appréhender car la constitution d'une image de référence représente un travail conséquent compte tenu de la résolution métrique. En dépit de sa résolution proche du mètre, la couche végétation de la BD topo de l'IGN (IGN, 1999), qui n'affiche pas cette composante arborée de manière exhaustive (notamment les arbres isolés les plus petits, les arbres des vergers pris de manière isolée, les haies dégradées ou encore les arbustes isolés), est d'un intérêt limité pour cette validation même si cela pourrait donner une première indication. À cet égard, il est relativement plus aisé de constituer une image de référence contenant les structures arborées (linéaires de quelques pixels d'épaisseur pour les structures bocagères) pour valider des classifications en résolution moins élevée (entre 2,5 m et 10m pixel issues d'images SPOT par exemple). La difficulté est plus grande dès que l'on passe en résolution submétrique car le nombre d'objets segmentés croît de manière significative.

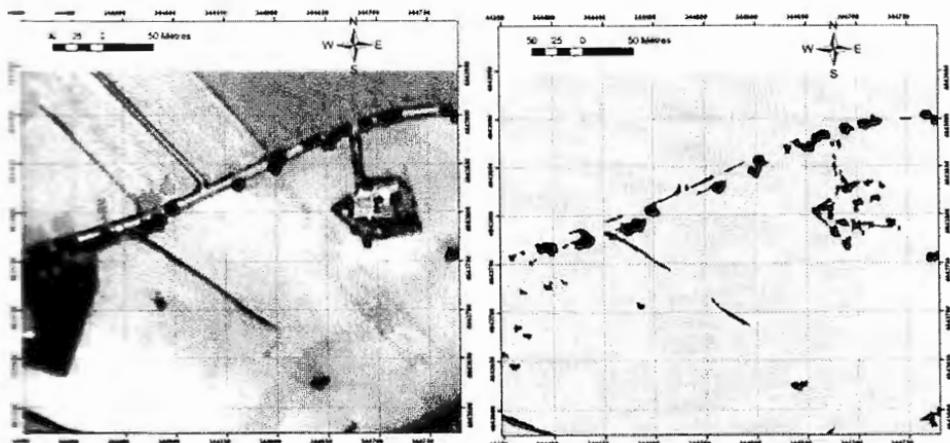


Figure 9. Partie est de Cadours. Détails à l'échelle du parcellaire agricole. À droite, on observe que les petites haies sont bien segmentées. Les sillons dans les grandes cultures ne sont pas pris en compte. Les arbres en bords de route ou en limite de propriété sont extraits, ainsi que les arbres isolés en plein champ. Projection: UTM 31N. Datum : WGS 84

Le travail de délimitation de la couche arborée sur le secteur géographique étudié est réalisé dans le cadre d'un autre programme de recherche, en vue de recenser les ressources mellifères en lien avec la composante arborée autour d'un rucher expérimental⁵. Nous proposons d'utiliser cette délimitation à titre de validation partielle. Il s'agit d'une image de la typologie de la végétation vectorisée manuellement à partir de photographies aériennes récentes orthorectifiées (BDOrtho

⁵ Contribution des arbres hors forêt et des paysages agroforestiers au maintien de l'abeille domestique en milieu agricole. Laboratoire GEODE UMR CNRS UTM 5602. 2009-2013.

de l'IGN à 50 cm/pixel), conformément aux inventaires de végétation effectués en 2011 et 2012. L'intérêt de ce travail pour notre validation est que cette délimitation est englobante comme une zone tampon autour de toutes les ressources ligneuses dès que leur emprise dépasse 50 cm². Nous superposons donc cette composante issue de relevés de terrain avec l'image de l'extraction obtenue par morphologie mathématique (figure 10). Cette superposition montre un léger décalage qui a plusieurs causes : l'erreur de troncature de la reprojection géographique des données de terrain (base BDOrtho Lambert 93) en coordonnées UTM WGS 84, les contours des entités arborées vectorisées manuellement en zone tampon, et l'erreur de calage initial de l'image Quickbird. Nous établissons donc une matrice de confusion (tableau 1) en tenant compte de ces erreurs, en élargissant l'image de validation à l'aide d'une zone tampon d'un mètre de large.

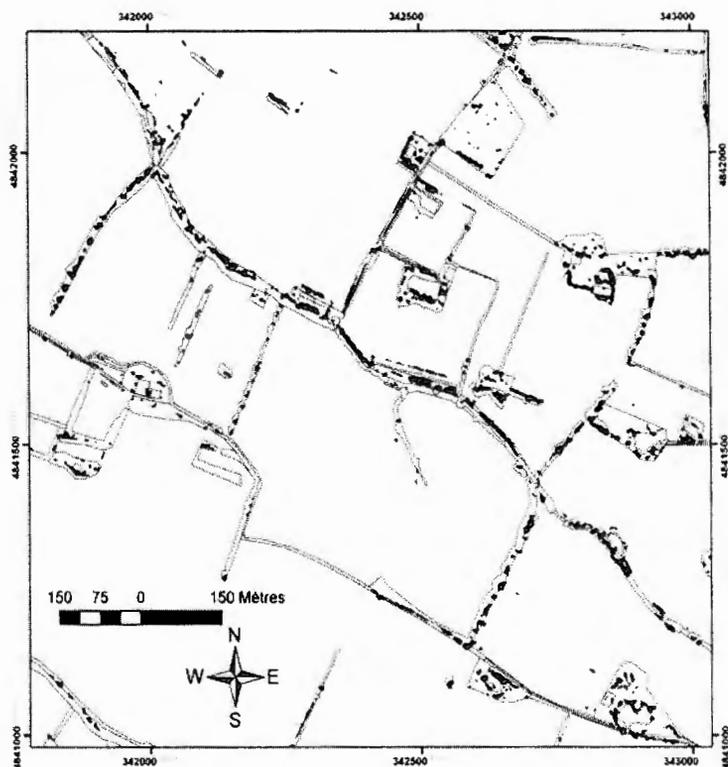


Figure 10. Partie sud de la commune de Cadours. Détails à l'échelle de la haie. Les contours noirs correspondent aux relevés de la végétation arborée effectués en 2011 et 2012, et constituent l'image de référence. La base de ce travail est effectuée à l'aide de la BD Ortho de l'IGN. La composante arborée extraite par morphologie mathématique qui lui est superposée est représentée sous forme de taches noires. Nous remarquons ainsi que la plupart des haies et des arbres sont circonscrits dans nos relevés de terrain, attestant de la fiabilité du résultat. Projection: UTM 31N. Datum : WGS 84

Tableau 1. Matrice de confusion calculée (en %) sur une zone correspondant à 30 % de la surface totale de l'image classifiée par morphologie mathématique. Précision globale : 0,85 Kappa : 0,77. Les données de référence sont positionnées en colonne (validation). Les données classées sont positionnées en ligne (classification)

Classification	Validation (%)	
	Non classés	Classés
Non classés	85,24	9,6
Classés	14,76	90,4

En fait, il s'agit plus d'évaluer le fait que les objets classifiés par morphologie mathématique sont contenus dans les contours délimités par les relevés de terrain que de comparaison de contours *stricto sensu*. En réalité, la précision de la méthode est supérieure car les contours des relevés sont vectorisés manuellement. Cela signifie que dans l'image de référence, la haie est toujours représentée d'un seul tenant même si sur le terrain elle est discontinue, ce qui est bien montré avec l'extraction par morphologie mathématique. Nous avons donc également procédé à une seconde validation complémentaire. Des haies sont digitalisées par superposition à l'image Quickbird, elles comportent 73 251 pixels et sont réparties dans l'espace de façon à être représentatives (différences d'orientation, de pentes, de cultures contiguës, etc.). À ce niveau de résolution la digitalisation est particulièrement délicate car il est plus aisé d'établir manuellement les contours des haies arborées que les haies buissonnantes ou même les petits arbres isolés. Ceci étant la nouvelle matrice de confusion a donné 81 % de composante arborée bien classée. Cela permet de valider la capacité de l'algorithme à travailler à des résolutions métriques en respectant les emprises. Cependant la validation complète à haute résolution exigerait encore une précision accrue. Cela peut passer également par un relevé de nuages de points effectué en mode GPS différentiel, l'utilisation des nouvelles données ORTHO HR à 20 cm/pixel (dont la couverture totale de la France sera assurée par l'IGN à l'horizon 2014) et de faire appel à des images issues de données LIDAR multi-échos. Pour de telles images à la demande, leur coût sur une grande emprise géographique reste toutefois important. Cette technique permettrait pourtant de faire des validations précises par zones, notamment de rechercher des différences d'efficacité de classification en zone habitée, de grandes cultures et de structures bocagères. Par ailleurs, les arbres qui ne sont pas inclus dans les contours de l'image de référence (apparaissant sous la forme de points noirs isolés situés à l'extérieur du tracé de l'image de référence) peuvent aussi correspondre d'une part, à des modifications très locales du paysage d'une année à l'autre (dues à des changements de pratiques agricoles notamment, et qui sont bien visibles à ce niveau de résolution) et d'autre part, à quelques rares fausses détections produites par l'algorithme de classification par morphologie mathématique.

5. Discussions et conclusion

La méthode de morphologie mathématique utilisant la fonction chapeau haut de forme inversé (BTH) sur une image en niveaux de gris permet de travailler sur une grande emprise géographique si les paramètres de l'élément structurant sont bien ajustés en fonction des critères recherchés, à savoir les emprises des structures arborées. Ces méthodes sont donc des procédés de segmentation qui relèvent aussi de la reconnaissance de formes. Il est possible de les améliorer encore par des opérations de lissage morphologique telles que l'enveloppe convexe et la séparation morphologique des objets (Serra, 1988) pour notamment envisager une première séparation des objets avant le remplissage de la table attributaire sous un logiciel SIG à l'aide de relevés botaniques effectués sur le terrain. À ce niveau de résolution métrique, il est non seulement nécessaire d'avoir de bons résultats en termes de classification mais aussi en termes de délimitation des contours des entités arborées. En effet, il ne faut pas perdre de vue que nous recherchons une couche arborée sur une grande emprise géographique, qui est à l'échelle d'une ou plusieurs communautés de communes au sein d'un département rural. Elle doit alors être directement utilisable pour les versions numériques géoréférencées des PLU /PLUI mises en œuvre par les collectivités locales. Nous avons donc trouvé un algorithme de morphologie mathématique qui nous permet d'extraire assez simplement une couche arborée relativement fiable.

Les classifications orientées objet ont montré leur efficacité du point de vue de la classification des zones arborées (et/ou des corridors écologiques utilisés en écologie du paysage) du fait de la grande variabilité des paramètres que l'on peut ajuster en fonction des structures paysagères rencontrées (Tansey *et al.*, 2009 ; Sheeren *et al.*, 2009). Cela réclame un tri dans un nombre important de classes adaptées à chaque type de structure de paysages, voire d'unités paysagères, pour obtenir une classification performante. Ceci est un avantage lorsque l'on souhaite distinguer avec précision des sous-classes de végétation en haute résolution spatiale. Mais sans cette expertise indispensable, elle peut aussi apparaître comme un inconvénient car parfois complexe à mettre en œuvre. Cependant, la méthode basée sur la segmentation par morphologie mathématique est non seulement relativement simple à mettre en œuvre avec peu de paramètres à ajuster, mais elle peut traiter une grande zone d'un seul tenant avec fidélité, tant en milieu urbanisé, en milieu de grandes cultures qu'en secteur bocager. C'est donc une méthode qui est relativement robuste face aux variabilités de la structure paysagère en milieu rural. Toutefois à ce jour, il existe des facteurs qui limitent sa mise en œuvre. Le calage des données initiales issues des données satellitaires par rapport aux données de référence ou de validation doit avoir une précision au moins égale à la taille du pixel sur l'ensemble de l'image (dans notre cas 0,65 mètres). Cela peut engendrer un surcoût supplémentaire qui n'est pas forcément à la portée d'une collectivité locale. Nous proposons alors d'associer les différentes méthodes de classification par télédétection pour mieux discriminer cette « couche arbre » haute résolution (figure 11).

Un des autres problèmes de la cartographie de la trame arborée en haute résolution est l'évolution de son emprise spatiale d'une année sur l'autre, et même au cours d'une année, du fait de conditions climatiques parfois très différentes, mais aussi de changements dans les pratiques agricoles (coupes, élagages, plantations, etc.). Aussi, des acquisitions multidates seraient nécessaires pour d'une part, avoir une plus grande richesse d'informations sur le développement végétatif arboré et d'autre part, pour en réactualiser les contours. Il serait ainsi utile d'utiliser un grand nombre d'informations sur, par exemple, les rotations de cultures, la géomorphologie ou la nature des sols, afin d'éviter des classifications fausses au recensement de cultures dont la réflectance est assez proche de la composante arborée recherchée. Ici les méthodes ne s'opposent pas, elles peuvent être complémentaires en fonction de leurs qualités intrinsèques et des objectifs recherchés (cf. figure 11).

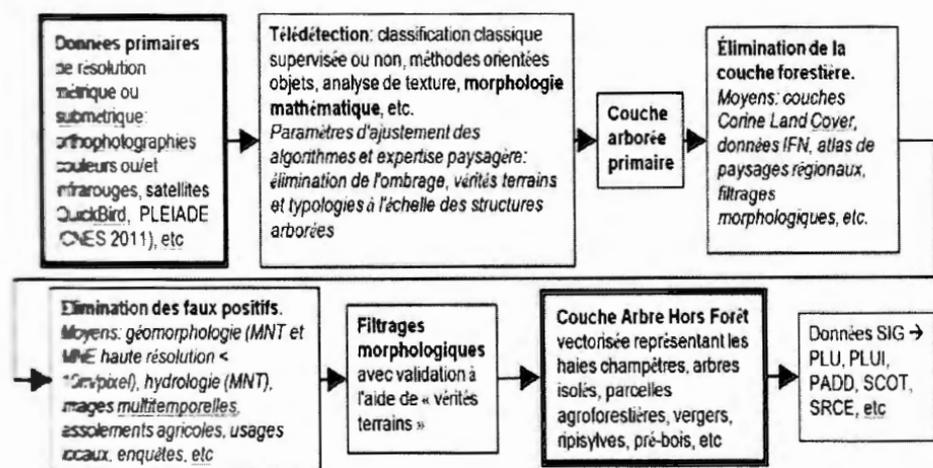


Figure 11. Proposition d'une méthodologie d'extraction par télédétection de la couche arborée hors forêt jusqu'à sa possible intégration dans les documents d'urbanisme locaux. Afin d'augmenter la robustesse de l'extraction, certaines étapes peuvent être semi-automatiques mais font largement appel à l'expertise environnementale et à la collecte de données de différentes origines dont la fiabilité doit être évaluée et validée

Avec le lancement de nouveaux satellites comme Pléiade, les images à haute résolution spatiale à la demande prendront une place de plus en plus importante pour répondre aux besoins des acteurs locaux pour mettre en œuvre les politiques environnementales sur le territoire. Cela préfigure la future utilisation des images de résolution métrique ou submétrique du satellite Pléiades pour cartographier la TVB lancée en janvier 2012. Il y a là de nouvelles perspectives pour la télédétection, de façon à pouvoir répondre à des besoins sociétaux pour l'appropriation des logiques d'aménagement du territoire par les citoyens et les acteurs locaux. De la même

façon que la cartographie des éléments arborés va représenter un enjeu économique et écologique grandissant (en lien notamment avec la réforme de la PAC en milieu agricole ou avec la mise en place de la trame verte et bleue), nous ne pouvons désormais plus nous affranchir des concepts techniques des méthodes de télédétection, en particulier en haute résolution, lorsqu'elles concernent les paysages et ont pour but de mettre en évidence les représentations spatiales de la diversité des pratiques locales. Les certifications des produits de terroir font appel également de plus en plus à des critères paysagers, donc de fait aux structures arborées. Dans son cahier des charges, l'agriculture dite « écologiquement intensive » repose sur la conservation de certains éléments topographiques (ce qui suppose une connaissance précise de leur spatialisation), en particulier les arbres. Une surveillance annuelle par cartographie métrique de la couche arborée sera-t-elle alors, par exemple, une manière de favoriser et d'accompagner la mise en place de modes de culture permettant de réduire l'emploi des produits phytosanitaires à grande échelle ?

Remerciements

Ce travail est soutenu par le programme ORFEO du Centre national d'études spatiales (CNES) et par le projet de recherche INTERFACE (dir. Sylvie Guillaume, GEODE) intitulé « Dynamiques paysagères et perceptions des interfaces arborées : quels enjeux pour la mise en place de la Trame verte et bleue ? » (programme paysage et développement durable du MEDE). Il bénéficie également du travail de relevés de terrain effectué dans le cadre du projet FRB-LU : « Contribution des arbres hors forêt (AHF) et des paysages agroforestiers au maintien de l'abeille domestique en milieu agricole » (dir. Éric Maire, GEODE)

Bibliographie

- Baatz M., Schäpe A. (2000). Multi-resolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In *12th Angewandte Geographische Informationsverarbeitung* (Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag), p. 12-23.
- Bellefontaine R., Petit S., Pain-Orcet M., Deleporte P., Bertault J-G. (2001). *Les arbres hors forêt, Vers une meilleure prise en compte*. Rapport de la FAO.
- CEMAGREF (mars 2010). *Étude de l'intégration des continuités écologiques dans les SCOT en 2009 avant l'approbation de la loi Grenelle 2*, Rapport Cemagref-Meeddm.
- Cormier L., Bernard De Lajarte A., Carcaud N. (2010). *La planification des trames vertes, du global au local : réalités et limites*. Cybergeographie : European Journal of Geography [En ligne], Aménagement, Urbanisme, article 504, mis en ligne le 06 juillet 2010, consulté le 27 mars 2012. URL : <http://cybergeographie.revues.org/23187> ; DOI : 10.4000/cybergeographie.23187.
- Guillaume S. (2010). *Les paysages d'arbre hors forêt (PAHF). Multi-valorisation dans le cadre d'un développement local durable en Europe du Sud, Rapport final de recherche. Programme Paysage et Développement Durable du MEDDTL*. <https://pdd.cemagref.fr/>

dossier telechargement public/ rapports-finaux / RF_Guillerm. pdf Septembre 2010, GEODE.

- Guillerm S., Alet B., Briane G., Coulon F., Maire E. (2009). L'arbre hors forêt en France. Anciens usages et nouvelles perspectives. *Revue Forestière Française*, n° 5, numéro spécial, *Les nouveaux usages de l'arbre*, p. 543-560.
- Guillerm S., Jimenez Y., Moreno D. (2012). Les paysages d'arbres hors forêt, marqueurs de développement durable ? *Paysage et développement durable*, Luginbühl Y. et Terrasson D. (coord.), Paris, Editions Quae.
- IGN (1999). *Descriptif technique de la BDtopo*. Institut Géographique National.
- Laporterie F., Flouzat G., Amram O. (2001). Mathematical morphology multi-level analysis of trees patterns in Savannas. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'01)*, Sydney, Australia, p. 1496-1498.
- Lenard S., Clergeau P. (2011). Trame Verte et Bleue : Utilisation des cartes d'occupation du sol pour une première approche qualitative de la biodiversité», *Cybergeo: European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, article 519, mis en ligne le 01 mars 2011, modifié le 01 mars 2011. URL : <http://cybergeo.revues.org/23494>. Consulté le 17 mars 2011.
- Maire E., Lelièvre E., Brau D., Lyons A., Woodward M., Fafeur V., Vandebunder B. (2000). Development of an ultralow-light-level luminescence image analysis system for dynamic measurements of transcriptional activity in living and migrating cells. *Anal. Biochem.* April 10, vol. 280, n° 1, p. 118-27.
- Matti-Gallice C., Collet C. (2004). Morphologie mathématique et échelle. Extraction du bâti à différentes résolutions spatiales, *Revue internationale de Géomatique*. vol. 14, n° 3-4, p. 441-463.
- Meyer F. (1979). Iterative image transformations for an automatic screening of cervical cancer. *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, p. 128-13
- Rodriguez F., Maire E., Courjault-Radé P., Darrozes J. (2002). The Black Top Hat function applied to a DEM: A tool to estimate recent incision in a mountainous watershed (Estibère Watershed, Central Pyrenees). *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n° 6.
- Raymond E., Raphael M., Grimaud M., Vincent L., Binet J-L., Meyer F. (1993). Center Analysis With the Tools of Mathematical Morphology on Graphs', *Cytometry*, 14, p. 848-861.
- Roqueime R., Darrozes J., Maire E., Héral G., Soula J-C. (2008). Long-term denudation rates from the Central Andes (Chile) estimated from a Digital Elevation Model using the Black Top Hat function and Inverse Distance Weighting: implication for the Neogene climate of the Atacama Desert. *Revista Geologica de Chile*, vol. 35, n° 1, p. 105-121.
- Serra J. (1988). *Image analysis and mathematical morphology*, *Theoretical Advances*, Academic Press, London.
- Sheeren D., Lefèvre S., Weber J. (2007). La morphologie mathématique binaire pour l'extraction automatique des bâtiments dans les images THRS, *Revue internationale de Géomatique*. vol. 17, n° 3-4, p. 333-352

- Sheeren D., Bastin N., Ouin A., Ladet S., Balent G., Lacombe J.-P. (2009). Discriminating small wooded elements in rural landscape from aerial photography: a hybrid pixel/object-based analysis approach. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n° 19, p. 4979-4990.
- Tansey K., Chambers I., Anstee A., Denniss A., Lamb A. (2009). Oriented classification of very high resolution airborne imagery for the extraction of hedgerows and field margin cover in agricultural areas, *Applied Geography*, n° 29, p. 145-157.
- Vannier C., Hubert-Moy L. (2008). Detection of wooded hedgerows in high resolution satellite images using an object-oriented method. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'08. IEEE International*.
- Vannier C., Vasseur C., Hubert-Moy L., Baudry J. (2011). Multiscale ecological assessment of remote sensing images. *Landscape Ecology*, vol. 26, p. 1053-1069. DOI 10.1007/s10980-0011-9626-y
- Voiron-Canicio C. (1995). *Analyse spatiale et analyse d'images*. Montpellier. GIP RECLUS (coll. « Espaces modes d'emploi »), 190.
- Zhang C., Murai S., Baltasvias E.P. (1999). Road network detection by mathematical morphology. *Bulletin de la SFPT*, 153, p. 94-96.
- Zheng X., Gong P., Strome M. (1995). Characterizing spatial structure of tree canopy using color photographs and mathematical morphology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 21, n° 4, p. 420-428.