



HAL
open science

Séminaire Télédétection à très haute résolution spatiale et analyse d'image

P. Maurel

► **To cite this version:**

P. Maurel. Séminaire Télédétection à très haute résolution spatiale et analyse d'image. Cemagref Editions, pp.161, 2001, 2-85362-582-6. hal-02579973

HAL Id: hal-02579973

<https://hal.inrae.fr/hal-02579973v1>

Submitted on 6 Jul 2023

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.

PUB0000 9544

Séminaire

**Téledétection
à très haute résolution
spatiale et analyse d'image**

Montpellier, 14 décembre 1999

Les actes

Réseau d'animation Représentation et Gestion de
l'Information Spatialisée (REGLIS) du Cemagref



Actes de la journée scientifique

Téledétection à très haute résolution spatiale et analyse d'image

Montpellier, 14 décembre 1999

Coordinateur : Pierre MAUREL

Réseau d'animation Représentation et Gestion de l'Information Spatialisée (REGLIS) du Cemagref. Actes de la journée scientifique *Téledétection à très haute résolution spatiale et analyse d'image*; **Montpellier, 14 décembre 1999.**
Coordinateur : Pierre MAUREL. ©2001, Cemagref-Éditions. ISBN 2-85362-582-6. Dépôt légal 3^e trimestre 2001. Impression Ateliers Cemagref. Vente par correspondance PUBLI-TRANS, ZI Marinière 2, rue Désir Prévost, 91080 Bondoufle ; tél. : 01 69 10 85 85. Diffusion aux libraires TEC et DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan, cedex ; tél. : 01 47 40 67 00. **Prix 19,82 € (130 FTTC).**

Organisation

Comité scientifique

Agnès BEGUE (CIRAD)
Christophe DEBAIN (Cemagref)
Xavier DESCOMBES (INRIA)
Michel DESHAYES (UMR3S Cemagref/ENGREF)
Sylvie DURRIEU (UMR3S Cemagref/ENGREF)
Marie-José LEFEVRE (CNES)
André MIRALLES (Cemagref)
Pierre MAUREL (UMR3S Cemagref/ENGREF)

Le comité scientifique a tout d'abord analysé et sélectionné les différentes propositions de communication, puis il a établi le programme de la journée scientifique.

Comité de pilotage du réseau REGLIS

Sylvie LARDON (INRA SAD)
Thérèse LIBOUREL (LIRMM)
Benoît DAVID (MATE)
Robert JEANSOULIN (CNRS)
Jean-Claude LUMMAUX (CNIG)

Coordination

Pierre MAUREL ((UMR3S Cemagref/ENGREF)

Remerciements

Les remerciements s'adressent aux membres du comité scientifique et du comité de pilotage du réseau Réglis, ainsi qu'à l'ensemble des intervenants et participants sans qui cette journée n'aurait pu avoir lieu. Plusieurs personnes de l'UMR 3S Cemagref/ENGREF se sont également particulièrement investies dans l'organisation de cet événement : Sylvie DURRIEU, André MIRALLES, Jean-Stéphane BAILLY et Michel DESHAYES, ce dernier ayant assuré l'animation de la journée, Laurent ALBRECH pour le site Web, Paulette ROBERT et Anny LACOMBE pour le secrétariat et la logistique. Qu'elles en soient ici vivement remerciées.



Sommaire

Organisation	3
Déroulement de la journée	7
Programme de la journée	9

Articles de communications orales

E. Pilich-Blaquière, M. Gay, G. Flouzat - *Incidence de la variation de la 13
résolution spatiale sur la cartographie des zones agricoles par
télé-détection*

M. Launay, M. Guérif, G. Dedieu - *Utilisation d'un modèle de correction 27
atmosphérique (SMAC) pour le calcul des réflectances au sol à partir de
données de télé-détection acquises à très haute résolution*

J.C. Foltète, M. Flitti - *Segmentation d'image en milieu urbain fondée sur 39
la caractérisation des motifs spatiaux - Application à la ville d'Oran
(Algérie)*

M. Bonin - *Définition et identification d'objets sur une image à haute 51
résolution spatiale : application à la différenciation de types de
châtaigneraies.*

X. Descombes, S. Drot, M. Imbert, H. Le Men, J. Zerubia - 63
Segmentation d'image haute résolution par processus Markov objet

V. Barbezat, J., Jacot, J.L. Lamas - *Classification forestière automatisée 73
à partir de photos aériennes numérisées : Le projet CLAPA*

A.G. Manh, G. Rabatel - *Modèles déformables en traitement d'image : 85
notions et exemple d'application*

J.M. Robbez-Masson, T. Wassenaar, P. Andrieux, F. Baret - 97
*Reconnaissance par télé-détection rapprochée des vignes et analyse de
leur structure spatiale à l'aide d'une analyse fréquentielle intra-parcellaire*

Articles ou résumés des posters

A. Puissant, Weber C. - *Les potentialités des images à très haute 113
résolution spatiale (THRS) pour la reconnaissance des composantes
urbaines.*

J.M. Robbez-Masson, P. Andrieux, T. Wassenaar, F. Baret - <i>Reconnaissance par télédétection rapprochée des états de surface en milieu viticole méditerranéen. Application au suivi des effets des pratiques culturales.</i>	129
N. Stach, J.G. Boureau - <i>Ortophotoplan à l'Inventaire Forestier National</i>	131
F. Bergé, A. Bédécarrats, S. Dupont, N. Sardat - <i>A tool for monitoring landscape modifications impacted by the development of ski resorts. Les Arcs, France.</i>	133
P. Marty-Mahé, G. Raffy, P. Loisel, D. Brossard - <i>Vision Numérique Couleur appliquée à l'évaluation de la Qualité de Carcasses de Dinde.</i>	135
P. Marty-Mahé, D. Legeard, P. Loisel, D. Brossard - <i>Evaluation de la Qualité des jambons frais par Vision Numérique Couleur.</i>	137
H. Nguyen - <i>Un exemple d'utilisation des images à très haute résolution spatiale pour l'aide aux levés de précision cadastrale</i>	139
F. Gascon – J.P. Gastellu-Etchegorry, M.J. Lefèvre - <i>Simulation d'Images Satellitales à Très Haute Résolution</i>	141

Résumés de communications orales

M.J. Lefèvre-Fonollosa - <i>Le Programme SPOT actuel et futur dans le contexte mondial des programmes d'Observation de la Terre à Haute Résolution</i>	147
C. Puech - <i>Images à très haute résolution pour l'observation de la terre</i>	149
J.G. Boureau, T. Delorme, M. Deshayes - <i>Etude de la structure d'images a haute resolution a l'aide des semi-variogrammes. Application aux peuplements feuillus de moyenne montagne</i>	151
F. Berger, P. Couprié - <i>Typologie de peuplements forestiers et traitements de photographies aériennes. Un essai d'approche texturale</i>	153
C. Debain, A. Benassi - <i>Reconnaissance de texture en télédétection par estimation multi-échelles de paramètres fractals</i>	155

Synthèse des débats	159
----------------------------	-----

Déroulement de la journée

Le Cemagref a mis en place en 1997 un réseau d'animation interne à l'établissement autour de l'information géographique. Dans le cadre de ce réseau intitulé REGLIS (Représentation et Gestion de l'Information Spatialisée), un séminaire est organisé chaque année, avec une première journée ouverte sur l'extérieur et dédiée à des communications scientifiques sur un thème particulier, et une deuxième journée consacrée à l'animation interne du réseau.

Le présent ouvrage correspond aux actes de la journée scientifique du troisième séminaire REGLIS, organisé à Montpellier les 14 et 15 décembre 1999.

La journée scientifique du 14 décembre a porté cette année sur la télédétection à très haute résolution spatiale et les méthodes de traitement de ce type d'images. L'objectif était de promouvoir les travaux méthodologiques et thématiques réalisés au Cemagref dans le domaine de la télédétection à très haute résolution et de l'analyse d'image (y compris en vision industrielle) et de les confronter aux travaux réalisés dans d'autres centres de recherche.

Au cours de cette journée, quinze sujets ont été présentés sous forme de communications orales et huit sous forme de posters. Trois sociétés de services étaient également présentes.

Les quatre premières présentations orales ont permis de cadrer la thématique de la journée :

- M.J. Lefèvre, du CNES, a présenté tout d'abord l'évolution des capteurs en matière de résolution spatiale, en particulier pour les satellites SPOT.
- Puis A. Killmayer, de la société GEOSYS, a indiqué comment une société de services en pointe dans le domaine de la géomatique faisait appel de manière opérationnelle à la télédétection à très haute résolution.
- L. Gabet, de la société ISTAR, a ensuite décrit leur programme de constitution de bases de données numériques en 3D à partir de caméras aériennes.
- Enfin, C. Puech, de l'UMR 3S Cemagref/ENGREF, a montré en quoi l'augmentation de la résolution spatiale apportait des informations mais pouvait introduire des perturbations supplémentaires en 2D ou 3D.

Les deux communications qui ont suivi (E. Pilich-Blaquière de l'ESA Purpan, J.G. Boureau de l'IFN) ont également porté sur les effets de la résolution spatiale pour la perception d'objets thématiques (zones agricoles, peuplements forestiers).

Après une présentation spécifique sur l'adaptation des problèmes de prétraitements radiométriques aux images à très haute résolution (M. Launay de l'INRA), trois présentations ont ensuite traité de la segmentation d'images basées sur la texture (J.C. Foltète du CNRS, M. Bonin du CIRAD, F. Berger du Cemagref). Enfin, les cinq dernières communications (C. Debain du Cemagref, X. Descombes de l'INRIA, V. Barbezat de l'EPFL, G. Rabatel du Cemagref, T. Wassenaar de l'INRIA) ont présenté des méthodes pour l'identification et la caractérisation d'objets basées sur l'utilisation d'informations a priori sur les objets recherchés.

Il est à noter trois communications originales du Cemagref, car relevant du domaine de la vision industrielle : celle de G. Rabatel dans le domaine de l'agriculture, et les deux posters de P. Marty-Mahé sur des applications en agro-alimentaire.

Les 3 sociétés de service disposaient chacune d'un stand : GEOSYS montrait différentes applications en agri-environnement à base de télédétection à très haute-résolution. ISTAR présentait notamment ses nouvelles caméras numériques à très haute-résolution embarquées sur avion et destinées à produire des bases de données numériques en 3D. Enfin, TTI insistait surtout sur leur solution de bases de données altimétriques par laser aéroporté.

Le présent ouvrage rassemble l'ensemble des documents écrits produits à l'occasion de cette journée, à savoir les articles ou les résumés des communications orales, les résumés des posters ainsi que la synthèse du débat final.

Programme de la journée

9h20 - 9h50	Le Programme SPOT actuel et futur dans le contexte mondial des programmes d'Observation de la Terre à Haute Résolution	Marie-José Lefèvre (CNES)
9h50 - 10h10	Utilisation de données de télédétection à très haute-résolution dans une société de services et attentes vis à vis de la recherche. Le cas de GEOSYS. (titre à confirmer)	Alain Killmayer (GEOSYS)
10h10 - 10h30	High Resolution DSM (Digital Surface Model) and Orthoimage using the HRSC Camera (High Resolution Stereo Camera)	Laurent Gabet (ISTAR)
THEME : Effets de l'amélioration de la résolution spatiale		
10h30 - 10h50	Images à très haute résolution pour l'observation de la terre	Christian Puech (Cemagref)
10h50 - 11h10	Incidence de la variation de la résolution spatiale sur la cartographie des zones agricoles par télédétection	Ewa Pilich-Blaquière (ESAP)
11h10 - 11h40	Pause - Consultation des posters et des stands	
11h40 - 12h00	Etude de la structure d'images à haute résolution à l'aide des semi-variogrammes. Application aux peuplements feuillus de moyenne montagne	Jean-Guy Boureau (IFN) et al.
THEME : Prétraitements des images		
12h00 - 12h20	Utilisation d'un modèle de correction atmosphérique (SMAC) pour le calcul des réflectances au sol à partir de données de télédétection acquises à très haute résolution	Marie Launay (INRA) et al.
THEME : Segmentation d'images basée sur la texture		

12h20 - 12h40	Segmentation d'image en milieu urbain fondée sur la caractérisation des motifs spatiaux - Application à la ville d'Oran (Algérie)	Jean-Claude Foltête et al. (CNRS)
12h40 - 13h00	Définition et identification d'objets sur une image à haute résolution spatiale : application à la différenciation de types de châtaigneraies avec CLAPAS	Muriel Bonin (CIRAD)
	Repas - Consultation des posters et des stands	
THEME : Segmentation d'images basée sur la texture (suite)		
14h00 - 14h20	Typologie de peuplements forestiers et traitements de photographies aériennes. Un essai d'approche texturale.	Frédéric Berger (Cemagref) et al.
THEME : Identification et caractérisation d'objets		
14h20 - 14h40	Reconnaissance de texture en télédétection par estimation multi-échelles de paramètres fractals	Christophe Debain (Cemagref) et al.
14h40 - 15h00	Segmentation d'image haute résolution par processus Markov objets	Xavier Descombes (INRIA) et al.
15h00 - 15h20	Automated recognition of forest patterns with aerial photographs	Vincent Barbezat et al. (EPFL)
15h20 - 15h40	Modèles déformables en traitement d'image : notions et exemple d'application	Gilles Rabatel et al. (Cemagref)
15h40 - 16h00	Reconnaissance des vignes et analyse de leur structure spatiale par télédétection à l'aide d'une analyse fréquentielle intra-parcellaire	Tom Wassenaar et al. (INRA)
16h00 - 16h30	Pause - Consultation des posters et des stands	
16h30 - 17h30	Synthèse et discussion	Auditeurs et intervenants

Articles des communications orales

Incidence de la variation de la résolution spatiale sur la cartographie des zones agricoles par télédétection

The spatial resolution incidence on the agriculture areas cartography with remote sensing

Ewa Pilich-Blaquière⁽¹⁾, Michel Gay⁽¹⁾, Guy Flouzat⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire de Télédétection et de Cartographie Numérique, ESAP
75, voie du T.O.E.C. 31076 Toulouse cedex 3
Tél. +33 (0) 5 61 15 30 87, fax. +33 (0) 5 61 15 30 60
Mel : pilich.blaquiere@wanadoo.fr, michel.gay@esa-purpan.fr
<http://www.esa-purpan.fr/LTCN.htm>

⁽²⁾ Université Paul-Sabatier / Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
18, avenue Edouard Belin 31401 Toulouse cedex 4
Tél. +33 (0) 5 61 55 66 38, fax. +33 (0) 5 61 55 85 00
Mel : guy.flouzat@cesbio.cnes.fr

Résumé :

L'objectif de ce travail consiste à mesurer l'influence du changement de résolution spatiale sur les performances d'un algorithme de classification. L'hypothèse de départ est que l'augmentation de la résolution spatiale augmente la variabilité de la réflectance des pixels appartenant à une même entité d'occupation du sol. Les résultats des traitements automatiques en sont donc vraisemblablement affectés.

Cette étude est menée sur deux sites (France et Pologne) avec un paysage agricole très contrasté. Les données de très haute résolution spatiale sont simulées à partir de numérisation de photographies aériennes, avec une plage de résolutions de 1 m à 20 m.

L'analyse des données a comporté trois étapes :

- Dans le but de mettre en évidence une différence de paysage entre les deux sites, un indice de forme des parcelles agricoles est calculé.
- Par le calcul de la variance locale, on mesure la variabilité de la réflectance des parcelles dans ces deux types de paysage agricole.
- Les matrices de confusion des images classées sont analysées afin d'évaluer l'incidence de la résolution sur la qualité de la classification.

Les résultats obtenus montrent que, jusqu'à une valeur limite de résolution spatiale, l'image classée est très similaire à la photographie aérienne d'origine. Cette valeur limite change selon le type de paysage agricole. L'analyse des résultats quantitatifs, en particulier ceux de la variance locale, permet de relier ces seuils de perception à la taille des objets occupant l'espace.

Abstract :

The objective of this work consists in measuring the influence of the spatial resolution change on the supervised classification performances. The assumption is that the increase of the spatial resolution augments the variability of the reflectance of pixels belonging to the same land cover class.

The two study areas are in France and in Poland. They present very contrasted agricultural landscapes.

The data of very high spatial resolution was simulated from digitized aerial photographs, so that we could dispose of a range of spatial resolution from 1 m to 20 m.

The analysis of data included three stages:

- An indication of the shape of agricultural land plots was calculated, with the aim of putting in evidence a difference of landscape between the two sites.*
- The reflectance variability of the parcels in each site was measured with the local variance*
- The confusion matrix of classified images was analyzed to estimate the incidence of the resolution on the classification quality.*

The results show that the classified image is very similar to the original photograph, down to a limit value of spatial resolution. This limit changes according to the type of agricultural landscape. The analysis of the quantitative results, in particular that of the local variance, allows connecting these thresholds of perception with the size of the objects occupying the space.

Introduction

Les spatiocartes de communes rurales polonaises, réalisées avec des images SPOT XS et P, ont montré l'insuffisance de la résolution spatiale de ces images satellitales pour étudier l'occupation du sol des zones agricoles (PILICH, 1996). Cette contrainte et l'arrivée proche des nouveaux capteurs spatiaux à très haute résolution spatiale (THRS) a suscité ce travail sur l'amélioration de la description des agrosystèmes hétérogènes avec des mesures satellitales à THRS. Cette présentation décrit une partie des résultats obtenus.

La précision d'une classification d'images satellitales est la conséquence de deux facteurs. Le premier est lié au nombre de mixels (pixels couvrant plusieurs occupations du sol différentes) : plus la résolution spatiale est fine plus la proportion de ces pixels diminue. Le second facteur dépend de la relation qui existe entre la réponse spectrale de l'occupation du sol et la résolution spatiale des images. Cette réponse spectrale peut être caractérisée au moyen de sa variance. Lorsque la variance intra-classe augmente avec l'augmentation de résolution, cela diminue la séparabilité des classes et la précision de classification s'en ressent. La réduction de la taille des pixels induit ces deux conséquences opposées (Markham, Townshend, 1981 cités par Woodcock & Strahler, 1987). La résolution spatiale appropriée pour les observations est donc fonction du type d'environnement et du type d'information recherchée. Le facteur déterminant pour cela est la structure spatiale de l'image qui est principalement dépendante de la relation entre la taille des objets et la résolution spatiale (Tan, Shih, 1998). Il importe donc de définir d'abord les objets de l'étude et de connaître leur structure spatiale.

Pour déterminer la structure spatiale des objets d'un paysage, Woodcock et Strahler (1987), proposent de mettre en relation les valeurs de variance locale obtenues à différentes résolutions. Le maximum de variance locale définit la résolution spatiale directement liée avec la taille des objets dans l'image. Mais la perception des objets est différente selon la résolution spatiale (Woodcock & Strahler, 1987 - Puech, 1993), ce qui se traduit par l'existence de plusieurs maxima

de variance locale qui correspondent aux différents niveaux de perception. En analysant l'effet du changement de résolution, sur la classification d'image, Woodcock et Strahler (1987) ont montré que dans l'environnement agricole américain, en augmentant la résolution spatiale au-dessous de 80 m, la précision de classification diminue.

Le but de ce travail consiste à démontrer l'incidence de l'augmentation de la résolution spatiale sur la cartographie de deux zones agricoles ayant des paysages très différents. L'augmentation de la résolution spatiale accroît la variabilité de la réflectance des pixels appartenant à une même catégorie d'occupation du sol. Cela revient à anticiper les conséquences attendues du traitement des données des futurs satellites à très haute résolution spatiale et doit permettre de proposer les améliorations nécessaires au maintien d'une bonne qualité des résultats des traitements automatiques.

La notion de paysage que nous utilisons ici peut-être précisée comme perception de l'organisation du territoire, principalement influencée par les structures agraires : occupation du sol, taille et forme des parcelles.

1 Matériel et méthodes

1.1 Les sites d'étude

Le site de Lamasquère se trouve au sud-ouest de Toulouse. Le paysage de ce site est de nature agricole avec un grand parcellaire, plat et peu boisé. Il est localisé sur des alluvions récentes de la Garonne, d'où des sols gravelo-limono-argileux. La majorité de la surface de la zone d'étude est occupée par des terres cultivées (maïs, blé, soja, ray-grass, sorgho). Chaque ferme exploite une surface souvent supérieure à 100 ha.

Le site de Branszczyk se situe en Pologne, au nord-est de Varsovie. C'est un terrain plat, agricole, avec des parcelles étroites (de l'ordre de 10 m) et très longues (2 à 3 kilomètres). La fertilité des sols est faible, ce sont des sables fluvio-glaciaires. Environ 30 % de la surface de la zone d'étude est occupée par des forêts, 60 % par des terres cultivées (blé, seigle, avoine, cultures sarclées) et le reste par des prairies. La plupart des prairies sont situées dans la vallée de la rivière Bug. La surface moyenne exploitée par une ferme est d'environ 7 ha.

En comparant les données relatives à la taille des parcelles et de leur indice de forme, on met en évidence, quantitativement, les différences paysagères de ces deux sites.

Zone d'étude	Lamasquère	Branszczyk
Surface moy. d'une parcelle ¹	4.11 ha	0.44 ha
Surface min. d'une parcelle ¹	0.13 ha	0.05 ha
Surface max. d'une parcelle ¹	25.68 ha	1.64 ha
Surface d'étude	2678 ha	2986 ha
Indice de forme moy. d'une parcelle ¹¹	1.35	2.59
Indice de forme min. d'une parcelle ¹	1.08	1.15
Indice de forme max. d'une parcelle ¹	2.24	5.17

Tableau 1 : Statistiques générales concernant les deux sites d'étude

Pour calculer l'indice de forme nous avons utilisé l'équation (1) de Forman & Godron (1986) :

$$IF = P / (2 \times \sqrt{\pi \times S}) \quad \text{Équation 1}$$

avec : IF - indice de forme ; P - périmètre ; S – surface.

Lorsque l'indice de forme IF se situe entre 1.13 et 1.89, on parle d'un objet compact ($2 / \sqrt{\pi} \approx 1.13$ pour un objet carré), si il prend une valeur entre 1.89 et 3.80, on parle d'un objet compact allongé (p. e. un rectangle 10 fois plus long que large) et quand il est supérieure à 3.80 on parle d'un objet allongé (p. e. un rectangle 50 fois plus long que large) (d'après Robbez-Masson, 1994).

1.2 Les données utilisées

Sur ces deux sites, nous disposons d'images satellitales provenant du satellite SPOT. Nous avons acquis, auprès des Services Géographiques des deux pays, des photographies aériennes en couleurs naturelles. Les dates d'acquisition des deux types de données sont séparées d'un mois au maximum. Le tableau suivant reprend les grandes caractéristiques de ces produits.

Données	Branszczyk (Pologne)	Lamasquère (France)
Localisation	latitude : N 52°36' à 52°38' longitude: E 21°33' à 21°38'	latitude :N 43°28' à 43°29' longitude : E 1°13' à 1°18'
Photo aérienne date de prise de vue échelle type	10 août 1996 1 : 26 000 couleur, dans le spectre visible	16 avril 1997 1 : 22 000 couleur, dans le spectre visible
Image SPOT date d'acquisition type	12 août 1996 XS, P	18 mars 1997 XS
Cartes topographiques	1:25000 ; N-34-128	1:25000 ; 2044 O, 2044 E

Tableau 2 : Données disponibles pour les deux sites d'étude

¹ en prenant en compte des parcelles de vérification, dont on connaît les attributs

1.3 Traitement des images

Les photos aériennes utilisées ont été numérisées avec une sensibilité de 600 dpi, ce qui correspond à une résolution spatiale d'un mètre au nadir. Elles ont été géométriquement corrigées sur la base des cartes topographiques au 1 : 25000 disponibles et échantillonnées à 1 m. Pour les besoins de l'étude, ces images ont été ensuite sous-échantillonnées par moyenne, à des résolutions spatiales de 2, 4, 8, 16 et 20 m.

Les photographies aériennes en couleurs naturelles, numérisées à très haute résolution, présentent deux particularités :

une corrélation importante entre les données des trois fichiers (R, V, B) générés par le scanner couleur utilisé ;

une hausse de la variabilité de la réflectance des pixels appartenant à une même occupation du sol lorsqu'on augmente la résolution spatiale.

Pour tenir compte de cette spécificité, nous avons calculé un canal de variance locale. Ce calcul utilise l'équation 2, appliquée sur une fenêtre glissante d'ordre 3. La valeur d'écart type est attribuée au pixel central de la fenêtre dans une nouvelle image.

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n \times m) - 1} \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Z_{ij} - \bar{Z})^2} \quad \text{Équation 2}$$

où : Z_{ij} = valeur du pixel ij ; n = nombre de lignes ; m = nombre de colonnes.

En utilisant les polygones définissant les parcelles d'entraînement ou de vérification, il est possible d'extraire la variance locale moyenne de chaque parcelle analysée et ce pour chaque résolution. En regroupant les valeurs obtenues pour toutes les parcelles d'un même thème, on peut établir la moyenne de la variance locale de ce thème.

1.4 Parcelles d'entraînement et de vérification

Les parcelles d'entraînement ont été identifiées, par photointerprétation, sur l'image numérisée de 1 m de résolution spatiale. En l'absence d'une campagne de reconnaissance de terrain, six thèmes ont pu être séparés : sol nu (2 types), culture (2 types), bois, eau. Ces thèmes ne sont pas équivalents pour les deux sites du fait de dates de prise de vue différentes et surtout à cause de la spécificité géographique et agronomique de chacun des sites.

	Branszczyk	% ²²	% ³³	Lamasquère	% ²	% ³
Sol nu 1	chaume céréales	0,01	0.36	cultures d'été en préparation	0,58	11.07
Sol nu 2	idem	0,02	0.16	idem	1,55	
Culture 1	prairies	0,10	0.30	céréales d'hiver	0,26	1.30
Culture 2	cultures sarclées	0,10	0.11	idem	0,50	6.80
Bois	forêts	1,89	4.95	bosquets et alignement	0,35	3.11
Eau	rivière Bug et étangs	0,01	0.73	gravière	0,20	0.82
Somme		2,12	6.61		3,45	23,11

Tableau 3 : Nomenclature choisie : les thèmes pour les deux sites test

Dans le cas de la classification sur l'image satellitale, nous avons utilisé les mêmes parcelles d'entraînement, mais les thèmes ont été réattribués. Pour la vérification des résultats, nous avons cherché à élargir le fichier de parcelles. Nous avons numérisé un nombre plus important de parcelles, différentes des parcelles d'entraînement. Chacune d'elles a reçu un thème de la nomenclature.

1.5 Classification et validation

Les images ont été classées au moyen d'un algorithme de maximum de vraisemblance (seuil de rejet fixé à 5 %). La validation des classifications a été réalisée sur la base des matrices de confusion établies avec les parcelles de vérification. L'importance des traitements (combinaison de lieux et de résolution) nous a conduit à organiser une base de données rassemblant tous ces résultats.

2 Résultats

En combinant les deux lieux, les six résolutions spatiales des photographies aériennes et les images satellitales, nous disposons de nombreux résultats. Trois aspects seront envisagés pour leur présentation.

2.1 Analyse visuelle

L'observation des différentes images classées et leur comparaison avec les photos aériennes originales à 1 m de résolution spatiale permet de réaliser une analyse qualitative (figures 6-16). On constate ainsi que l'organisation du paysage joue un rôle important : Au-delà d'une résolution spatiale de 4 m, l'image classée du site de Branszczyk (figures 6 et 10-13) ne permet plus la distinction des détails significatifs de ce paysage. Dans le cas de Lamasquère (figures 7 et 14-16), c'est seulement au-delà de 8 m de résolution spatiale que la distinction devient difficile.

² surface des parcelles d'entraînement en pourcentage de la surface de la photo aérienne

³ surface des parcelles de vérification en pourcentage de la surface de la photo aérienne

On met bien en évidence l'existence d'une relation entre la perception correcte de l'organisation d'un paysage et la résolution spatiale du capteur qui est utilisé.

2.2 Les matrices de confusion

Les résultats des classifications peuvent être synthétisés par la figure suivante (figure 1) qui indique la précision moyenne cartographique en fonction de la résolution spatiale. On appelle précision moyenne cartographique la moyenne des taux moyens de précision cartographique calculés pour tous les thèmes c'est à dire du rapport du nombre total de pixels bien classés sur le nombre total de pixels existant effectivement dans le thème d'après les données de terrain (parcelles de vérification), habituellement exprimé en pourcentage.

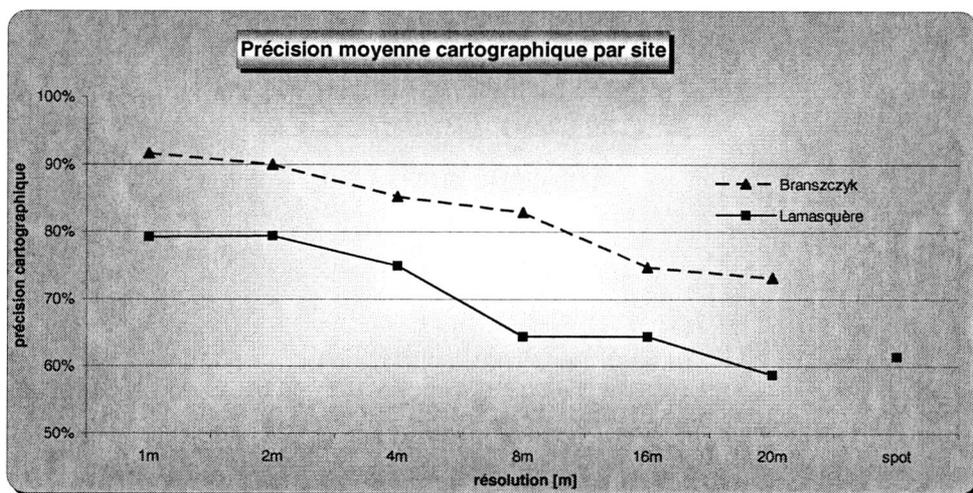


Figure 1 : Précision moyenne cartographique par site en fonction de la résolution spatiale

Cette précision décroît en fonction de la diminution de la résolution spatiale. Sur le site de Branszczyk, cette valeur passe de 91 % à 73 %, pour une résolution évoluant de 1 à 20 m. Dans le cas de Lamasquère, la précision cartographique moyenne est plus faible, elle évolue de 79 à 59 %. Alors que la décroissance est régulière pour Branszczyk, on peut observer deux plateaux sur la courbe de Lamasquère : entre 1 et 2 m, puis entre 8 et 20 m. Cette valeur de précision est équivalente entre les données de la photo aérienne et de l'image satellitale, pour la même résolution spatiale (20 m).

Analysé par thème, l'évolution de la précision cartographique est présentée sur les figures 2 et 3. Dans le cas de Branszczyk, on perd de l'ordre de 10 % pour les deux types de sol nu, sur l'ensemble des résolutions spatiales étudiées. Cette perte est trois fois plus élevée dans le cas des secteurs en cultures. Dans le cas de Lamasquère : Un des deux thèmes culture (« culture 1 ») se maintient entre 98 et 88 %, jusqu'à une résolution de 16 m, puis il chute à 60 %. L'autre thème

« culture » est à 60 % à 1 m, il décroît à 40 % de manière régulière. La précision des résultats, pour le thème « sol nu » est à 98 % à 1 m, puis baisse pour atteindre 79 % à 8 m ensuite elle croît jusqu'à 92 % à 16 m, et se stabilise.

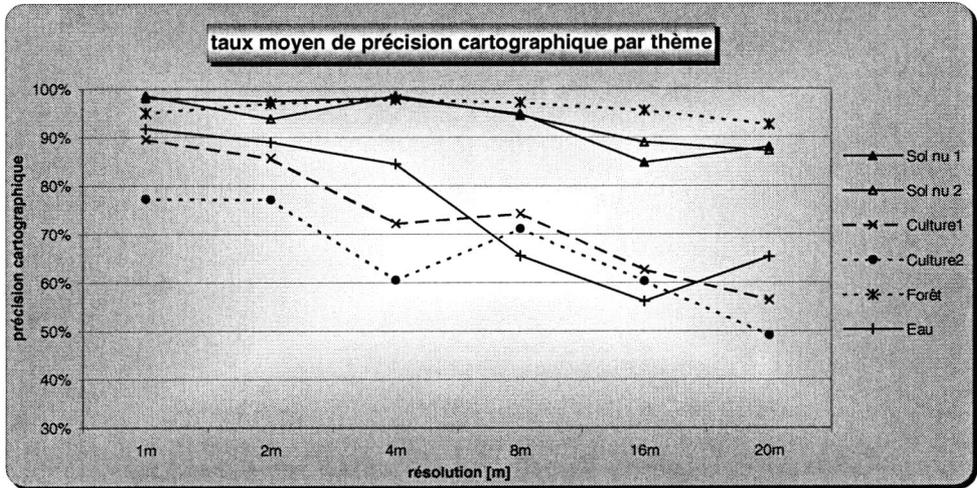


Figure 2 : Evolution du taux moyen de précision cartographique en fonction de la résolution pour le site de Branszczyk

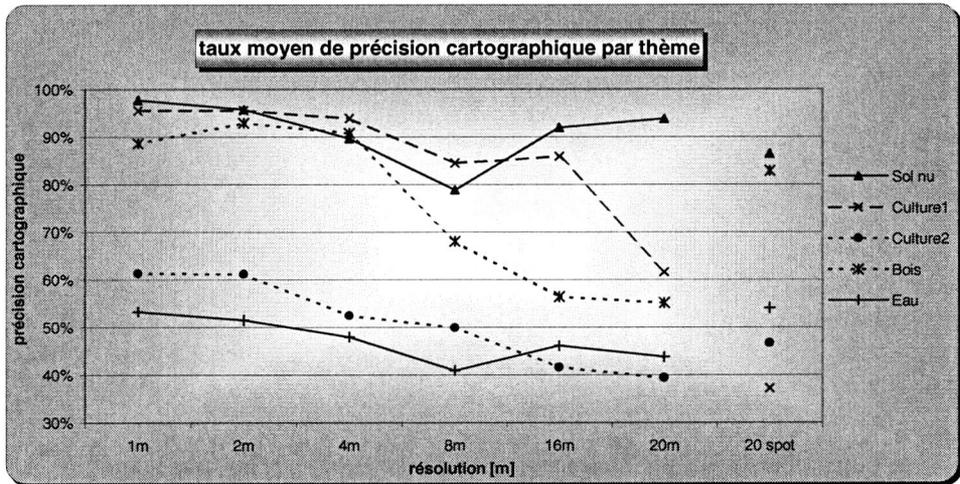


Figure 3 : Evolution du taux de précision cartographique en fonction de la résolution pour le site de Lamasquère

2.3 Etude de la variance locale

La valeur moyenne de la variance pour les différents thèmes d'occupation des deux sites est obtenue en utilisant le canal de variance locale et les limites des parcelles. La figure 4 présente le cas de Branszczyk.

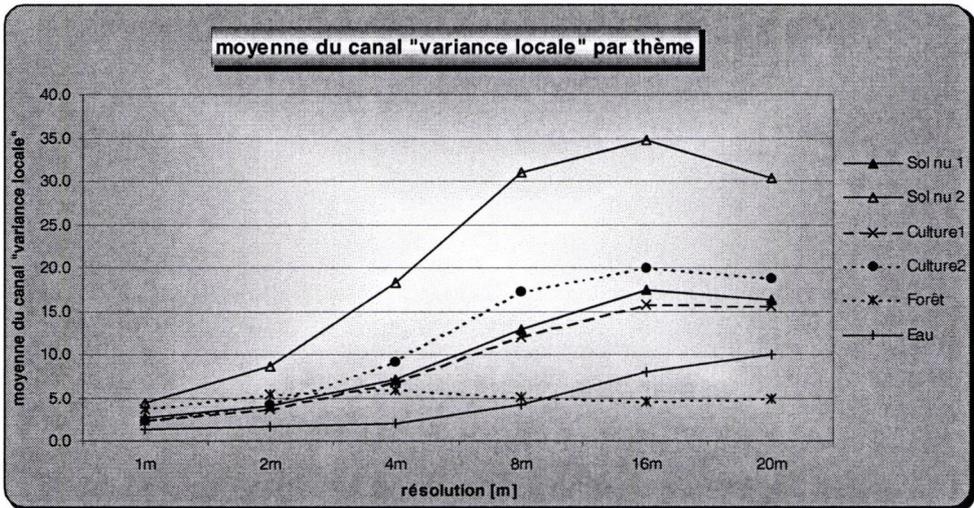


Figure 4 : Changements de la moyenne du canal "variance locale" par thème en fonction de la résolution pour le site de Branszczyk

Pour tous les thèmes, on observe une progression de la variabilité intra-parcellaire, qui atteint un maximum pour une résolution spatiale de 16 m. Au-delà, cette variabilité diminue. Elle est sensiblement plus forte pour le thème « sol nu 1 ». Dans le cas de Lamasquère (figure 5), les thèmes présentés manifestent une progression régulière de la valeur de la variabilité intra-parcellaire, sans qu'il ne soit possible de mettre en évidence de palier.

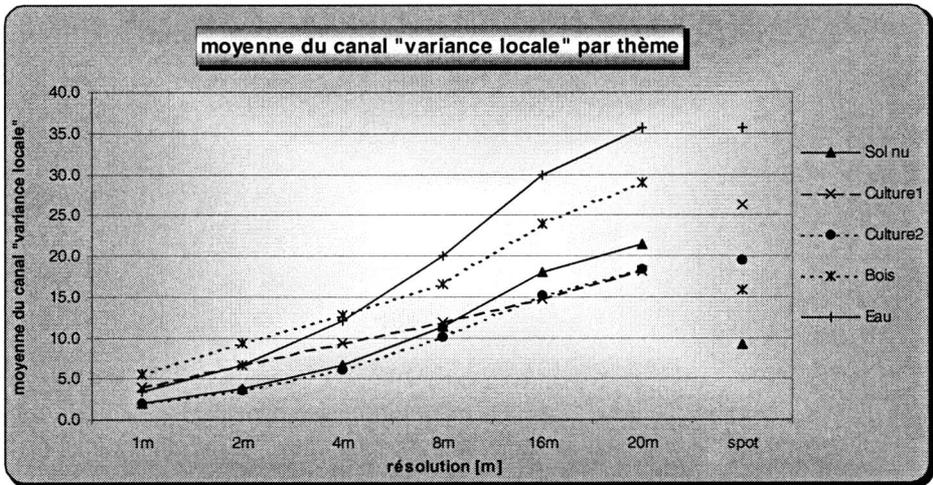


Figure 5 : Changements de la moyenne du canal "variance locale" par thème en fonction de la résolution pour le site de Lamasquère

3 Discussion

Ces premiers résultats soulignent déjà l'influence conjointe de l'organisation du paysage et de la résolution. Mais en terme de résolution, ce que l'on peut déjà souligner c'est la synergie qui existe entre résolution spatiale et spectrale.

3.1 Incidences de la résolution spectrale

Le défaut majeur des photographies aériennes numériques (couleurs naturelles) est de ne disposer en fait que d'une mesure sur l'ensemble du spectre visible. La décomposition par l'opération de numérisation apporte des différences qui relèvent, le plus souvent, de l'artefact. Nous avons amélioré cette situation en utilisant un néo-canal « écart type ». Les données satellitales (SPOT XS) ont une résolution spatiale fixée à 20 m, mais elles fournissent 3 canaux (dont un dans le proche infrarouge), dont les valeurs sont sensiblement plus décorréliées.

Même si dans le cas du site de Lamasquère la précision moyenne cartographique pour l'image satellitale (SPOT XS, 4 canaux, 20 m) est quasiment égale (figure 1) à celle de la photographie aérienne à 20 m (PA, 4 canaux, 20 m), ce n'est pas vrai pour les taux moyens de précision cartographique calculés pour différents thèmes (figures 2 et 3). Pour les classes : « culture 2 » « bois » et « eau », les résultats de la classification de l'image SPOT ont été bien supérieurs à ceux des photographies aériennes à 20 m de résolution. On peut donc constater l'existence d'un phénomène de compensation des limitations imposées par la résolution spatiale, par les mesures de luminance (V, R et PIR). Pour le thème « sol nu » les résultats obtenus à partir de l'image SPOT ont été comparables à ceux des photographies aériennes à 20 m, par contre pour le thème « culture 1 » ils ont été bien inférieurs. Cette compensation n'est donc pas systématique.

Sur le site de Branszczyk, cet apport de la résolution spectrale est nettement moins significatif. La taille des objets, souvent voisine de la valeur de résolution spatiale, induit une forte proportion de mixels qui dégradent les processus de reconnaissance automatique sur l'image SPOT.

3.2 Efficacité de la classification et taille des objets

Sur la base de l'analyse de la variance locale, le site de Branszczyk présente des objets géographiques (en dehors de la forêt) dont la taille peut être correctement perçue avec une résolution spatiale comprise entre 1 et 4 m. Cela a pour conséquences :

Une image classée qui est très semblable à la photographie aérienne (figures 6 et 10-11) ;

Une précision cartographique moyenne au moins égale à 85 % (figure 1) ;

Une précision cartographique par thème supérieure à 60 % (figure 2).

Au-delà d'une résolution spatiale de 4 m, on observe une dégradation rapide de ces critères, et donc forcément dans le cas des images Spot.

Dans le cas de Lamasquère, la taille des objets est, dans la majorité des cas, au-delà du seuil de perception que permet le pixel. Il n'est pas possible de mettre en évidence de valeur maximale dans l'évolution de la variance locale en fonction de la résolution. Il y a là aussi au moins trois conséquences :

L'image classée apparaît nettement moins efficace pour décrire correctement le paysage (figures 7 et 14-16) ;

La précision cartographique moyenne n'est jamais supérieure à 80 % (figure 1) ;

La précision cartographique de certains thèmes n'atteint pas 55 % (figure 3).

Dans ce travail, nous mettons bien en évidence l'opposition entre la capacité de l'œil et du cerveau humain (photo aérienne - couleurs naturelles) à comprendre un paysage, quelle que soit l'hétérogénéité de son organisation, et la dépendance des outils de traitement automatique à l'hétérogénéité des paysages. On peut ajouter que dans le premier cas, plus la résolution spatiale s'améliore et plus l'analyse est facilitée.

3.3 Hétérogénéité des paysages et résolution

La notion de paysage que nous avons envisagée ici peut être définie comme une combinaison d'objets géographiques dont la nature, la taille, la forme et l'agencement donnent une spécificité à un territoire (perception de l'organisation du territoire, principalement influencée par la structure agraire).

Les indices de forme sont de bons outils pour apprécier quantitativement les différences entre deux organisations territoriales. C'est le cas des sites que nous avons étudiés : ils sont agricoles tous les deux, mais l'organisation du parcellaire, dans sa taille et dans ses formes, est totalement différente (tableau 1).

Ces paysages sont le lieu d'expression d'hétérogénéités : - hétérogénéité inter-parcellaire qui dépend essentiellement de l'occupation du sol, - hétérogénéité intra-parcellaire qui relève d'éléments physiques (lithologie et pédologie des sols, teneur en eau de surface, développement différent des cultures présentes, etc.).

La télédétection, satellitale ou aérienne, permet d'accéder à cette description des paysages, par le biais de la photointerprétation et des traitements automatiques (classification). Elle fournit alors des cartes d'occupation du sol. Mais la prise en compte des hétérogénéités (intra- et inter-parcellaire) est faite par le biais de la résolution spatiale et spectrale des capteurs. Dès lors, une perception correcte (précision géographique et thématique) d'un paysage dépend fortement de ce couple : résolution spatiale et spectrale.

Pour pouvoir confronter les images satellitales existantes avec les nouvelles images THRS il faudrait disposer des données comparables au niveau spectral, on voudrait donc continuer les recherches sur les images provenant des premiers satellites THRS, comme IKONOS, ou sur des images numériques en mode multispectrale, provenant de mission ARAT.

Remerciements

Ces travaux sont conduits dans le cadre d'une thèse en cotutelle entre l'Ecole Polytechnique de Varsovie, l'Université Paul Sabatier et l'Ecole Supérieure d'Agriculture Purpan. Nous remercions la société Spot Image pour avoir mis des données à notre disposition.

Références bibliographiques

- Aplin P., Atkinson P.M., Curran P.J., 1997. Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade. *International Journal of Remote Sensing*, n° 18(18), pp. 3873-3881.
- Atkinson P. M., Curran P.J., 1997. Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, n° 63(12), pp. 1345-1351.
- Cousins S., Arnberg W., 1998. Criteria for vegetation interpretation and their relationship to digital classifications at different resolutions. *Proceedings of 27th International Symposium of Remote Sensing*. Norway, Tromsø, 8-12 June, pp. 436-440
- Cushnie J. L., 1987. The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land-cover types on classification accuracies. *International Journal of Remote Sensing*, n° 8, pp. 15-29.
- Dikshit O., Roy, D. P., 1996. An empirical investigation of image resampling effects upon the spectral and textural supervised classification of high spatial resolution multispectral image. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, n° 62(9), pp. 1085-1092.
- Forman R.T.T., Godron M., 1986. *Landscape ecology*. Willey & Sons, New York, 619 p.
- Girard C. M., 1995. Changements d'échelle et occupation du sol en télédétection. *Bulletin de la S.F.P.T.*, n° 140, pp. 10-11.
- Girard C. M., Girard M. C. & Gilliot J. M., 1995. Qualité des méthodes d'interprétation : application à la caractérisation et à la cartographie d'unités de paysage, *Bulletin de la S.F.P.T.*, n° 137, pp. 62-66.
- Laquinta J., Fouilloux A., 1998. Influence of the heterogeneity and topography of vegetated land surfaces for remote sensing applications. *International Journal of Remote Sensing*, n° 19(9), pp. 1711-1723.
- Markham B. L., Townshend J. R. G., 1981. Land cover classification accuracy as a function of sensor spatial resolution. *Proceedings of 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, pp. 1075-1090.
- Pilich E., 1996. *Réalisation d'une spatiocarte pour le plan d'aménagement d'une commune rurale en Pologne*. Mémoire DESS, GDTA, Toulouse, 27 p. + ann..
- Puech C., 1993. *Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants*. Thèse de doctorat, Université Grenoble I, 213 p. + ann..

- Puech C., Doumerc F., Lieutaud A., 1995. Identification des objets selon l'échelle : apport des outils de SIG. *Bulletin de la S.F.P.T.*, n° 140, pp. 18-19.
- Robbez-Masson J.M., 1994, *Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages*. Thèse de doctorat ENSA.M, Montpellier, 161 p. + ann..
- Tan C. H., Shih S. F., 1998. Spatial resolution of remotely sensed data for land use/cover in South Florida. *Proceedings of First International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*. USA, Orlando, Florida, vol. II, pp. 75-81.
- Woodcock C., Strahler A., 1987. The Factor of Scale in Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, n° 21, pp. 311-332.

Correction atmosphérique d'images aériennes pour le calcul de réflectances au sol

Using atmospheric correction to obtain reflectances from airborne images

M. Launay⁽¹⁾, M. Guéris⁽¹⁾, G. Dedieu⁽²⁾.

⁽¹⁾ INRA Laboratoire d'Agronomie, rue Fernand Christ, 02007 Laon Cedex

Tél : 03 23 23 64 70 Fax : 03 23 79 36 15

Mel : launay@laon.inra.fr mog@laon.inra.fr

⁽²⁾ CESBIO, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 4

Tél : 05 61 55 85 01 Fax : 05 61 55 85 00

Mel : gerard.dedieu@cesbio.cesbio.cnes.fr

Résumé :

Les rayonnements électromagnétiques émis par les couverts végétaux et captés par les radiomètres aéroportés, sont pollués par des rayonnements parasites issus de phénomènes d'absorption et de diffusion atmosphériques. Parmi ces rayonnements parasites, une partie provient par diffusion de l'environnement du couvert visé. L'ensemble de ces perturbations atmosphériques doit être éliminé pour accéder aux valeurs absolues de réflectance des couverts végétaux. Cette communication présente un modèle de correction atmosphérique pour le calcul de la réflectance d'un couvert dans le domaine optique à partir d'images aériennes. Le modèle, conçu dans sa version initiale pour la correction d'images basse résolution, a été adapté à la haute résolution : nous avons retiré une simplification du modèle afin de prendre en compte la réflectance propre de l'environnement du couvert. La comparaison des réflectances simulées avec celles mesurées au sol sur une douzaine de cibles a permis de démontrer l'intérêt de cette modification. L'erreur relative moyenne d'estimation a été réduite de moitié dans le visible, et d'un dixième dans le proche infra-rouge. L'utilisation du modèle a été illustrée par la correction de trois images aériennes acquises sur un même site à différentes dates, dont nous avons extrait des courbes d'évolution de réflectances de cultures de betteraves.

Abstract :

Electromagnetic radiations transmitted by the canopy and intercepted by airborne radiometers are polluted by perturbations caused by absorption and scattering in the atmosphere. One of these perturbations is due to scatter coming from the surroundings of the target. All of those disturbances have to be eliminated to obtain absolute values of canopy reflectance. We here present an atmospheric correction model for computation of canopy reflectances in optical waves from airborne images. This low resolution model has been adapted for high resolution : we removed a simplification so as to take the environmental proper reflectance into account. We demonstrate the importance of this modification by comparing simulated reflectances to ground measured reflectances on a dozen of targets. The relative root mean squared error is reduced by one half in the visible and reduced by one tenth in the near infra-red. To illustrate its use, we apply the model to three airborne images recorded on the same location at various dates, and plot the reflectance evolution in time for sugar beet crops.

Introduction

La recherche agronomique développe des méthodes de diagnostic et d'explication de la variabilité inter ou intra-parcellaire de l'état des cultures (Delecolle R. et al., 1992). Ces méthodes s'appuient sur l'acquisition de données multi-temporelles de télédétection à très haute résolution dans le domaine optique. Celles-ci fournissent indirectement des valeurs de réflectances de couverts végétaux à différentes dates du cycle cultural. L'évolution des réflectances au cours du temps est utilisée comme indicateur de l'évolution de variables biophysiques caractérisant l'état du couvert. Cependant, l'analyse et la comparaison des réflectances d'une date à l'autre n'est envisageable qu'après correction des effets atmosphériques qui perturbent le signal de manière variable entre dates. En effet, le rayonnement mesuré est contaminé par son interaction avec l'atmosphère lors de sa double traversée, du soleil vers la cible, et de la cible vers le capteur. Cette perturbation s'explique par deux processus étroitement liés à la composition de l'atmosphère : l'absorption et la diffusion des photons par les molécules et les aérosols. Les photons absorbés contribuent à échauffer l'atmosphère qui ré-émet cette énergie à des longueurs d'onde beaucoup plus grandes, dans l'infra-rouge. Les photons diffusés sont ré-émis à la même longueur d'onde, mais dans une direction différente. Le capteur reçoit donc un rayonnement direct provenant de la cible visée, et des rayonnements diffus provenant de l'atmosphère et de l'environnement de la cible (voir Figure 1).

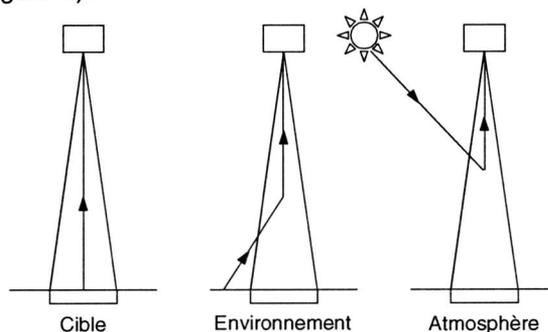


Figure 1 : Contributions au signal mesuré par le capteur (d'après Guyot G., 1989)

L'ensemble de ces rayonnements a été en partie absorbé au cours du trajet de la cible au capteur. La part du signal utile est celle provenant de la cible. Elle dépend des propriétés optiques de la cible et de l'éclairement dont celle-ci a bénéficié. De la même façon, cet éclairement correspond à un rayonnement provenant directement du soleil, et à des rayonnements diffus provenant de l'atmosphère et de l'environnement de la cible (voir Figure 2) (Tanré D., 1990).

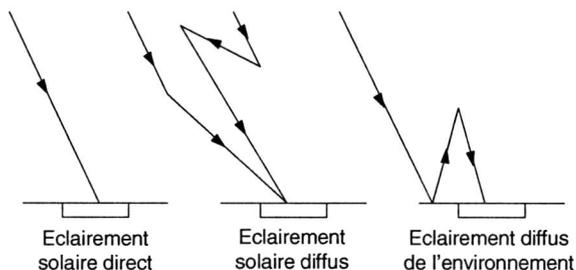


Figure 2 : Contributions à l'éclairage de la cible (d'après Guyot G., 1989)

Le signal mesuré par le capteur s'écrit sous la forme d'un bilan :

$$\rho^*(\lambda) = t_g \{ \rho_a(\lambda) + A\rho_c(\lambda) + B\rho_e(\lambda) \} \quad (1)$$

où $\rho^*(\lambda)$ est la réflectance bidirectionnelle mesurée, $\rho_a(\lambda)$ est la réflectance atmosphérique, $\rho_c(\lambda)$ est la réflectance de la cible et $\rho_e(\lambda)$ celle de son environnement. L'ensemble des signaux est pondéré par le facteur de transmission gazeuse t_g représentant l'absorption moléculaire.

La réflectance de l'environnement est en général considérée égale à celle de la cible lorsqu'on travaille avec des résolutions de l'ordre du km (Rahman H. et Dedieu G., 1994). En revanche, dans le cas d'images à très haute résolution, la différence de réflectance entre la cible et son environnement est a priori non négligeable.

Nous allons montrer l'intérêt d'un modèle simplifié de correction atmosphérique, pour le calcul de réflectances de surface à partir d'images à haute résolution. Après avoir brièvement décrit le modèle que nous avons modifié afin qu'il prenne en compte les effets d'environnement, nous l'appliquerons à des images aériennes acquises en juin 95 sur un bassin sucrier du nord de la France. Nous analyserons les performances du modèle en comparant les réflectances simulées à celles mesurées sur plusieurs cibles par un radiomètre au sol. Enfin, nous l'utiliserons pour tracer l'évolution des réflectances de différentes cultures au printemps.

1 Matériels et méthodes

1.1 Le modèle SMAC

Le modèle de correction atmosphérique SMAC (Simplified Method for Atmospheric Correction) (Rahman H. et Dedieu G., 1994) simule une réflectance bidirectionnelle au sommet de l'atmosphère à partir d'une réflectance bidirectionnelle à la surface terrestre. Il s'appuie sur l'équation du modèle de transfert radiatif (1) (Tanré D., 1990), et considère dans sa version initiale, qu'il n'y a pas d'effets d'environnement :

$$\rho^* = t_g \left\{ \rho_a + T(\theta_s)T(\theta_v) \frac{\rho_c}{1 - \rho_{cs}} \right\} \quad (2)$$

où $T(\theta_s) = [e^{-\tau/\mu_s} + td_s]$ et $T(\theta_v) = [e^{-\tau/\mu_v} + td_v]$ sont respectivement les transmissions atmosphériques totales au cours du trajet descendant (du soleil à la cible) et du trajet ascendant (de la cible au capteur),
 td_s et td_v sont les facteurs de transmission diffus sur les trajets descendant et ascendant,
 τ est l'épaisseur optique totale de l'atmosphère,
 $\mu_s = \cos(\theta_s)$ où θ_s est l'angle zénithal d'éclairement et $\mu_v = \cos(\theta_v)$ où θ_v est l'angle zénithal de visée (voir Figure 3),
 s est l'albedo sphérique de l'atmosphère.

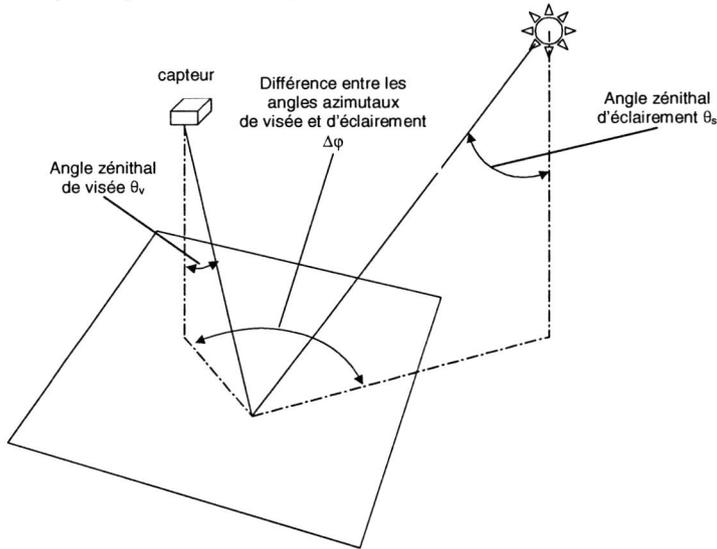


Figure 3 : Représentation schématique des angles décrivant la géométrie d'éclairement et de visée de la scène (d'après Lillesand T.M. et Kiefer R.W.,)

SMAC fait l'hypothèse que cette équation, spectrale par définition, est toujours valide pour des bandes spectrales suffisamment étroites (Rahman H. et Dedieu G., 1994). Il traite séparément les phénomènes de diffusion et d'absorption, le facteur de transmission gazeuse étant multiplicatif d'une série de termes décrivant la diffusion. La diffusion moléculaire et la diffusion par les aérosols sont également séparées (Atzberger, 1998). SMAC est un modèle à un seul niveau, ignorant les variations verticales des propriétés optiques de l'atmosphère (Atzberger, 1998). La transmission gazeuse n'est prise en compte que sur les trajets directs du rayonnement, du soleil vers la cible et de la cible vers le capteur (Tanré et al., 1990). Pour le calcul du facteur de transmission gazeuse, le modèle a besoin d'être renseigné sur la composition de l'atmosphère en vapeur d'eau et en ozone. Il comprend des valeurs par défaut de teneurs en oxygène, dioxyde de carbone et méthane. L'absorption par le monoxyde de carbone est négligée. Enfin, SMAC suppose la surface visée lambertienne.

Chacun des termes de l'équation (2) décrit un processus particulier d'interaction entre le rayonnement électromagnétique et l'atmosphère, et est lui-même défini dans SMAC par une ou plusieurs équations semi-empiriques (Rahman H. et Dedieu G., 1994). Les coefficients de ces équations sont obtenus par ajustement, en mode direct, aux résultats fournis par un modèle plus complexe choisi comme référence, 5S (Tanré D. et al., 1990). Alors que le code 5S calcule chaque terme par pas de 5nm puis intègre ρ^* sur l'ensemble de la bande spectrale, SMAC considère directement la valeur moyenne de chaque terme sur la bande spectrale et calcule ensuite ρ^* . Les coefficients ajustés des équations ont une valeur moyenne par bande spectrale du capteur considéré (Berthelot B. et al., 1997). SMAC est plusieurs centaines de fois plus rapide que le code 5S, et s'inverse aisément (Atzberger C., 1998).

Le modèle comprend deux types de paramètres: quatre paramètres caractérisant la géométrie de visée et la géométrie d'éclairement, et trois paramètres caractérisant l'atmosphère moyenne au-dessus de la cible au moment de la mesure. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 1.

Paramètre	Signification	Unité dans SMAC
θ_s	Angle zénithal d'éclairement	radian
φ_s	Angle azimutal d'éclairement	radian
θ_v	Angle zénithal de visée	radian
φ_v	Angle azimutal de visée	radian
uH_2O	Contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau	$g.cm^{-2}$
uO_3	Contenu de l'atmosphère en ozone	cm.atm
τ_{550}	Epaisseur optique des aérosols à 550 nm	$m^2.m^{-2}$

Tableau 1 : Liste des paramètres du modèle SMAC

Nous avons utilisé une version de SMAC étendue au cas de données provenant d'un capteur aéroporté, prenant en compte l'altitude de l'avion (Berthelot B., communication personnelle).

Nous l'avons complété de manière à obtenir des valeurs de réflectances de surfaces à partir de comptes numériques extraits d'images à haute résolution (Launay M., et al., en préparation).

Nous avons ajouté une première équation au modèle, correspondant à un étalonnage indépendant des corrections atmosphériques, pour le calcul de la réflectance à l'altitude du capteur à partir du compte numérique de l'image :

$$\rho^* = CN \times \frac{\pi}{S_k \times E_k u(t) \times \mu_s} \quad (3)$$

CN est le compte numérique lu sur l'image dont la valeur est codée en bits, S_k est le coefficient de sensibilité du capteur, fourni par l'opérateur,

E_k est l'éclairement solaire équivalent,

$u(t)$ est le coefficient de correction de la distance Terre-Soleil moyenne, fonction de la date en jours juliens (Henry P. et al., 1996).

Puis nous avons réintroduit la réflectance de l'environnement dans l'équation (2) et exprimé la réflectance de la cible en fonction des comptes numériques :

$$\rho_c = \frac{(1 - \rho_e \cdot s)(\rho^*(CN) - t_g \cdot \rho_a)}{e^{-\tau/\mu_v} \cdot t_g \cdot T(\theta_s)} - \frac{t_d(\theta_v)}{e^{-\tau/\mu_v}} \cdot \rho_e \quad (4)$$

ρ_e est la réflectance de surface de l'environnement de la cible ; ρ_e est obtenu à partir du compte numérique de l'environnement de la cible, en utilisant SMAC une première fois en sens inverse (dans le sens de l'équation (4)) et en considérant que $\rho_e = \rho_c$.

$\rho^*(CN)$ est la réflectance de la cible à l'altitude du capteur, calculée à partir du compte numérique selon l'équation (3).

1.2 Les données

Trois images ont été acquises par un radiomètre Pushbroom (bandes spectrales : 510-600 nm ; 610-720 nm ; 760-950 nm) aéroporté à 6000 m d'altitude, les 9, 20 et 28 juin 1995 au-dessus d'un bassin sucrier du nord de la France. Leur résolution est de 3,28 m.

Sept cibles de 15 m sur 15 m ont été choisies sur sept parcelles agricoles de cultures différentes dans le bassin sucrier. Des mesures de réflectances au sol ont été réalisées avec un radiomètre Cimel sur les sept cibles le 20 juin et sur six d'entre elles le 28 juin, en même temps que les vols avions.

L'indice foliaire a également été mesuré sur onze parcelles de betteraves les 9, 14, 20 et 28 juin.

Le paramètre épaisseur optique des aérosols à 550 nm a été calculé à partir de mesures de l'épaisseur optique totale de l'atmosphère par un photomètre solaire (Cimel) les jours de vol (Faizoun C.A. et al., 1994).

2 Résultats

2.1 Performances du modèle SMAC

Nous avons comparé les mesures réalisées au sol sur 13 cibles avec un radiomètre Cimel, aux réflectances extraites d'images aériennes acquises sur les mêmes cibles aux mêmes dates, et corrigées par SMAC. La figure 4 présente les résultats obtenus après correction sans prise en compte de l'environnement, puis avec prise en compte de l'environnement.

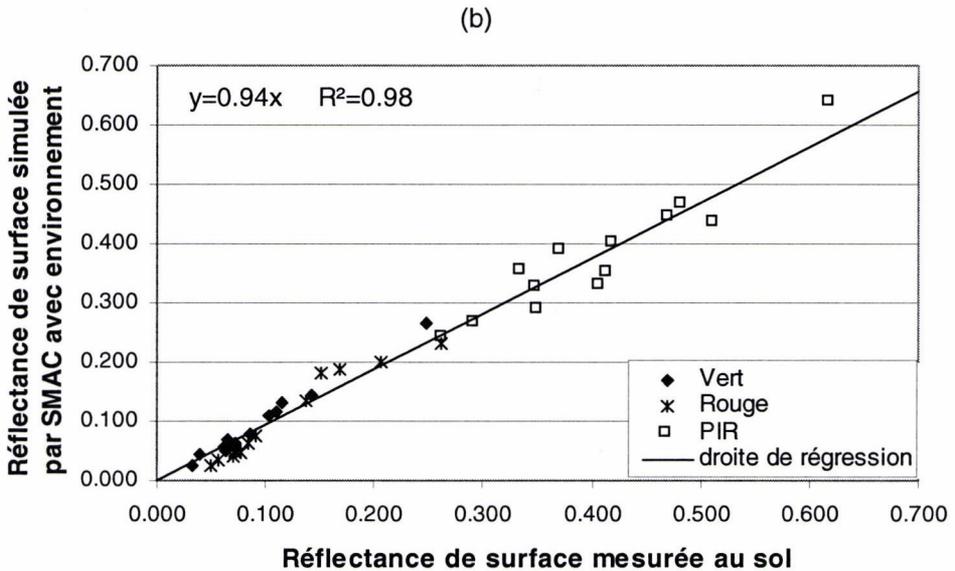
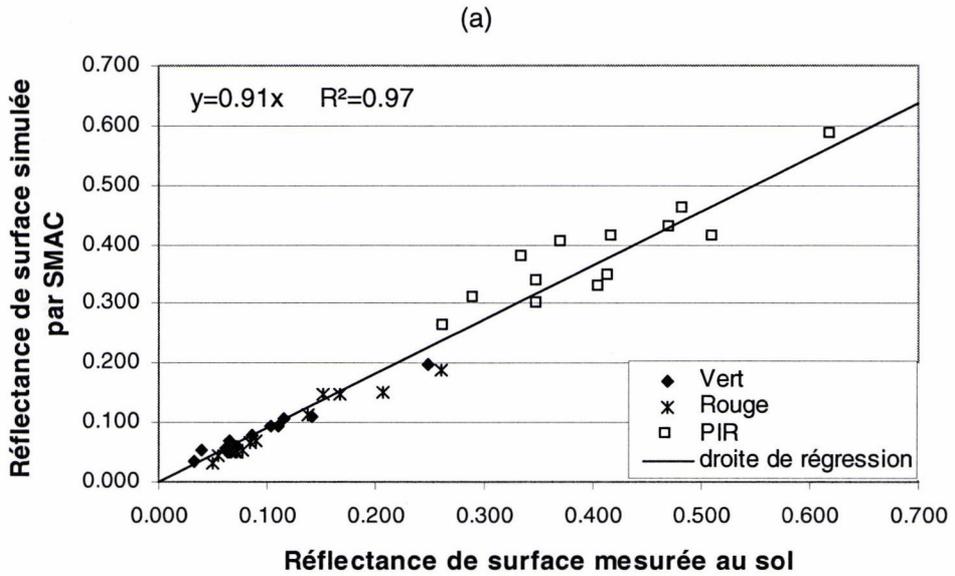


Figure 4: Réflectance corrigée par SMAC en fonction de la réflectance mesurée au sol sur 13 cibles –a- réflectance corrigée sans prise en compte de l'effet d'environnement –b- réflectance corrigée avec prise en compte de l'effet d'environnement.

La correction atmosphérique de SMAC nous fournit des valeurs de réflectances comparables à celles qui ont été mesurées au sol (Figures 4a et 4b). La prise en compte de l'environnement (Figure 4b) améliore les résultats de la correction

comme le montre la droite de régression entre les réflectances corrigées et les réflectances observées ($R^2 = 0.98$). La pente de la régression est la plus proche de celle de la 1^{ère} bissectrice ($y = 0.94x$) dans le cas où les effets d'environnement ont été corrigés.

L'erreur entre les réflectances mesurées et les réflectances non corrigées (à l'altitude du capteur) ou corrigées par SMAC (à la surface) a été calculée sous forme d'erreur relative moyenne d'estimation (ou *rmse*) (voir tableau2):

$$rmse = \frac{1}{\rho_{mesurée}} \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum (\rho_{mesurée} - \rho_{corrigée})^2 \right)} \quad (5)$$

Moyenne RRMSE (%)		Vert	Canal Rouge	PIR	
Réflectance à l'altitude du capteur	Toutes cultures	0.098 26.2%	0.091 30.9%	0.315 24.8%	
Réflectance corrigée par SMAC à la surface	Toutes cultures	Sans environnement	0.082 19.9%	0.089 27.4%	0.381 11.9%
		Avec environnement	0.093 10.4%	0.101 20.2%	0.379 10.6%
	Avec prise en compte de l'environnement	Cultures d'hiver	0.090 10.0%	0.119 16.2%	0.323 12.0%
		Cultures de printemps	0.096 10.7%	0.080 25.2%	0.443 9.4%
Réflectance mesurée au sol	Toutes cultures	0.093	0.115	0.407	

Tableau 2 : Erreurs relatives moyennes d'estimation (RRMSE) entre réflectances calculées à l'altitude du capteur ou corrigées par SMAC à la surface, et réflectances mesurées au sol.

La réflectance à l'altitude du capteur est en moyenne inférieure à la réflectance réelle ou corrigée, les phénomènes d'absorption gazeuse n'étant pas pris en considération dans son calcul. La réflectance dans le proche infra-rouge est sous-estimée d'environ 10 points. L'erreur est naturellement moins forte pour les réflectances corrigées par SMAC, et les précisions relatives sont d'autant meilleures que le niveau de réflectance est élevé, ce qui tient à la définition même de l'erreur (équation (5)). La prise en compte de l'environnement réduit considérablement l'erreur dans le visible, ce qui est cohérent avec le fait que les phénomènes de diffusion par les aérosols sont les plus importants dans ce domaine. De manière générale, l'erreur est la plus forte dans le canal rouge, ce que l'on peut expliquer par la différence d'angle zénithal de visée entre la mesure au sol (nadir) et la mesure par le capteur aéroporté (0-27°). En effet, lorsqu'on s'éloigne de la verticale, la contribution du sol nu dans le signal diminue, et celle du couvert végétal et des ombres (dans le visible) augmente (Guyot G., 1989). Or, dans le canal rouge, la réflectance du sol est en général nettement plus forte que celle d'un couvert végétal. Les réflectances mesurées au nadir sont donc majoritairement plus fortes que les réflectances simulées par SMAC. Ceci est particulièrement vérifié dans le cas de cultures semées au printemps, qui n'ont pas encore totalement recouvert le sol au mois de juin.

2.2 Evolution temporelle des réflectances de plusieurs cultures

Nous avons entièrement traité les trois images acquises en juin 95 sur le même site, à l'aide du modèle SMAC et en prenant en compte les effets d'environnement. Pour le calcul de la réflectance de l'environnement de chaque pixel, nous avons extrait le compte numérique moyen sur un disque de 300 m de rayon autour de ce pixel. A partir des images traitées, nous avons échantillonné une dizaine de valeurs de pixels sur des champs de betteraves. Les valeurs moyennes de ces réflectances et l'intervalle de confiance autour de ces moyennes (pour une erreur de 1^{ère} espèce de 5%) sont présentés sur la Figure 5 pour chaque date d'acquisition d'image. En parallèle est tracée la courbe d'évolution moyenne de l'indice foliaire mesuré sur onze parcelles du même bassin.

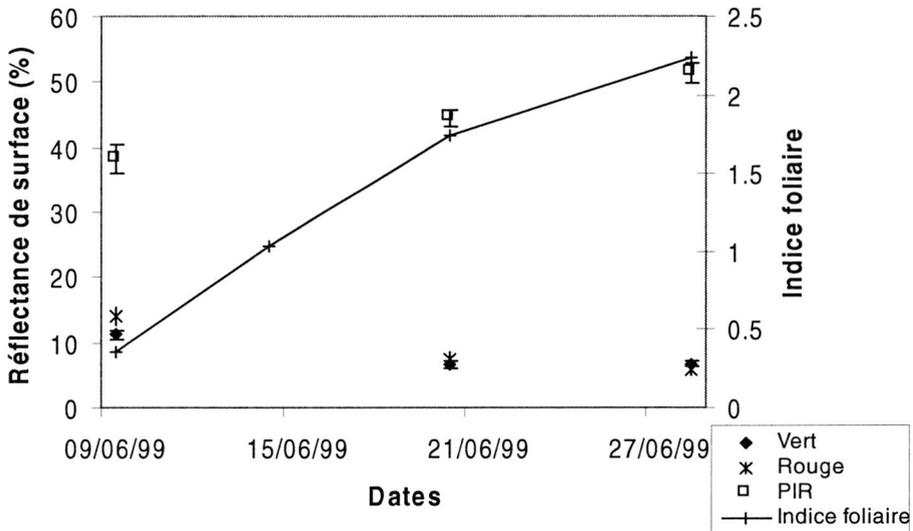


Figure 5 : Valeurs moyennes des réflectances et intervalles de confiance de ces moyennes ($\alpha = 5\%$) dans les trois canaux du Pushbroom pour 10 cibles betteraves, et courbe d'évolution de l'indice foliaire de la betterave.

La réflectance moyenne de la betterave ne cesse de diminuer dans le visible entre début et fin juin, ce qui correspond au recouvrement progressif du sol par les plantes en pleine croissance. On assiste donc à la baisse de la contribution du sol dans le signal d'une part, et à l'augmentation de l'activité photosynthétique absorbant les rayonnements d'autre part. Pendant cette même période, la réflectance des betteraves dans le proche infra-rouge augmente avec l'indice foliaire des plantes. L'intervalle de confiance assez large autour des réflectances moyennes dans le proche infra-rouge indique une forte variabilité de la réflectance correspondant à une évolution rapide du peuplement végétal.

Conclusion

Nous avons testé un modèle simple de correction atmosphérique pour le calcul de réflectances de surfaces à partir d'images aériennes. La correction apportée par le modèle sur nos données est comprise entre un demi-point (dans le canal vert) et dix points de réflectance (dans le proche infra-rouge). Nous avons obtenu des erreurs moyennes relatives d'estimation de l'ordre de 10% dans le vert et le proche infra-rouge, et de l'ordre de 20% dans le rouge. Nous avons mis en évidence l'importance de la prise en compte de l'environnement dans le cas de cibles de petite taille. Grâce à la mise en œuvre du modèle sur des données multi-temporelles, nous avons pu suivre l'évolution de réflectances de cultures de betteraves dans trois canaux optiques et les mettre en relation avec la croissance de l'indice foliaire. Cependant, la prise en compte de l'environnement pourrait être améliorée par l'utilisation d'une fonction de structure qui donne aux pixels d'environnement un poids dans le signal relatif à leur distance à la cible (Tanré D. et al., 1981). La différence entre les angles zénithaux d'éclairement et de visée a limité la comparaison des données corrigées aux données mesurées, et entraîné un écart plus important dans le rouge. L'utilisation d'un modèle décrivant la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (Cabot F. et Dedieu G., 1997) permettrait de normaliser les données simulées par SMAC, et de les comparer plus facilement aux réflectances mesurées.

Références bibliographiques

- Atzberger C., 1998 - *Estimates of winter wheat production through remote sensing and crop modelling*, Berlin, VWF Verlag für Wissenschaft und Forschung GmbH, 261 p.
- Berthelot B., Adam S., Dedieu G., Maisongrande P., 1997- *A global dataset of surface reflectances and vegetation indices derived from AVHRR/GVI time series for 1989-1990: The Land Surface Reflectances (LASUR) data, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Rotterdam, Gérard Guyot & Thierry Phulpin Editors, p. 685-690.
- Cabot F., Dedieu G., 1997 - Surface albedo from space : Coupling bidirectional models and remotely sensed measurements, *Journal of Geophysical Research*, 102, D16, p. 19 645-19 663.
- Delécolle R., Maas S.J., Guérif M., Baret F., 1992.- Remote sensing and crop production models : present trends, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 47, 1992, p. 145-161.
- Faizoun C.A., Podaire A., Dedieu G., 1994 - Monitoring of sahelian aerosol and atmospheric water vapour content characteristics from sun photometer measurements, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 11, p. 1291-1303.
- Guyot G., 1989 - *Signatures spectrales des surfaces naturelles*, Caen, Paradigme, 178 p.
- Henry P., Dinguirard M., Meygret A, 1996 - *Synthèse sur l'étalonnage absolu des données SPOT, Note CNES référence : S-NT-OB1-580-CN ed 3, Feb 9, 95 ; revue le 20 septembre 1996*, 22 p.

- Launay M., Guéris M., Dedieu G., à paraître.- Utilisation d'un modèle de correction atmosphérique (SMAC) pour le calcul des réflectances au sol à partir de données SPOT, *Photo-Interprétation*.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., 1987.- *Remote sensing and image interpretation, second edition.*, New York , John Wiley and Sons, 721 p.
- Rahman H., Dedieu G., 1994 - SMAC : a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *International journal of remote sensing*, 15, 1994, p. 123-143.
- Tanré D., 1990.- *Simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire, Télédétection spatiale: aspects physiques et modélisation*, Toulouse, Cepadues-Editions, p. 531-547.
- Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., 1981. – Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance, *Applied Optics*, 20, 1981, p. 3676-3684.
- Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., 1990 - Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code, *International journal of remote sensing*, 11, 1990, p. 659-668.

Segmentation d'image en milieu urbain fondée sur la caractérisation des motifs spatiaux

Application à la ville d'Oran (Algérie)

*Image segmentation in urban zone using characterisation
of spatial patterns*
Application to the city of Oran (Algerly)

Foltete Jean-Christophe, Flitti Mehdi

THEMA – UPRESA 6049 CNRS
UFR Sciences du Langage de l'Homme et de la Société
30, rue Mégevand, 25 030 BESANCON Cedex
Tél. : 03 81 66 54 02 Mel : jean-christophe.foltete@univ-fcomte.fr

Résumé :

Comme alternative semi-automatique à la segmentation manuelle d'images multispectrales à haute résolution, nous proposons l'enchaînement de deux classifications : une première concernant les seules valeurs radiométriques, une seconde fondée sur les motifs de l'image classée précédente. Sur la base de zones de références, ces motifs sont caractérisés par des matrices de cooccurrences. Les pixels sont ensuite classés en fonction de leur voisinage, le diamètre des fenêtres étant défini pour minimiser la distance de Manhattan avec le thème de référence le plus proche du point de vue statistique. La segmentation obtenue s'avère satisfaisante, en comparaison des images issues des méthodes plus classiques. Enfin, les thèmes sont décrits par leur matrice de cooccurrences respective, c'est-à-dire en terme de motif spatial.

Abstract :

We propose two successive classifications for the segmentation of a high resolution multispectral image : in a first time, we can make a "radiometric" classification ; in a second time, the spatial patterns of the precedent result are segmented. Cooccurrence matrices computed on reference zone define these patterns. Then the pixels are classified, to minimize Manhattan distance between cooccurrence matrix of their neighbourhood and then nearly reference. If we compare the result with images build by classical method, this approach is satisfactory. The classes are described as spatial pattern, by their cooccurrence matrix.

1 Difficulté de la classification d'image en milieu urbain

La délimitation des types de bâti urbain à l'intérieur d'une ville nécessite l'utilisation d'images à haute résolution spatiale : les images issues des canaux panchromatiques de Spot (10 m) ou IRS (5 m), si elles n'atteignent pas la précision de photographies aériennes numérisées, constituent les principales sources satellitaires adaptées à la segmentation intra-urbaine. A une telle résolution, le milieu urbain peut être qualifié d'hétérogène, de par l'alternance entre rues (faibles réflectances, effets d'ombres) et îlots bâtis (fortes réflectances), ou encore la présence de places, parking et espaces verts. Cette hétérogénéité ne facilite pas la démarche de segmentation. Face l'interprétation visuelle, approche la plus répandue en raison de la capacité de notre système sensoriel à différencier des motifs spatiaux, la classification supervisée « classique » se trouve fortement pénalisée. D'une part, les thèmes associant des éléments hétérogènes ne sont pas identifiables par la seule radiométrie ; en conséquence, les modèles de reconnaissance ne sont pas fiables. D'autre part, les cartes résultantes prennent des formes de mosaïque, ce qui ne correspond pas au but poursuivi.

Ces problèmes propres au milieu urbain appréhendé à haute résolution conduisent à envisager des alternatives à la traditionnelle classification pixel par pixel, dans un cadre semi-automatique. Parmi les solutions possibles, existe-t-il une option qui reste simple à utiliser, afin d'entrer en concurrence avec l'interprétation visuelle ?

- La première méthode qui reste d'une relative simplicité technique consiste à ajouter un ou plusieurs indices texturaux pour améliorer la reconnaissance strictement spectrale. Des études ont d'ores et déjà montré son intérêt, ne serait-ce qu'en observant les améliorations des taux de bon classement des pixels (S. Fernandez *et al.*, 1987 ; R. W. Connors *et al.*, 1984). Étant donnée la multiplicité des paramètres de texture possibles (autocovariance, cooccurrences, isosegments...) (J. P. Cocquerez, S. Philipp, 1995), cette démarche implique une lourde phase de sélection pour être adaptée aux motifs d'une image de haute résolution. En outre, elle présente un inconvénient notable, en dissociant fortement la caractérisation du contexte spatial des pixels de leur affectation aux classes d'objets. Ainsi le choix d'une certaine taille de voisinage peut-il être appuyé par des tests simples (variographie, minimisation du taux de mauvais classement), mais il définit de façon rigide le cadre spatial du calcul de texture, sans adaptation possible à différents contextes. De plus, pour appréhender correctement les agencements spatiaux, la nécessité d'appliquer des fenêtres de voisinage de forte taille (diamètre supérieur à 50 pixels en résolution de 5 x 5 mètres par exemple) aboutit à une cartographie aux formes très arrondies, alors que les limites entre types de quartiers sont souvent anguleuses et rectilignes.

- Une seconde option visant à surmonter les problèmes d'une trop forte mosaïque d'éléments consiste à détecter les contours de l'image, pour délimiter des zones (ou segments) qui sont ensuite qualifiées en terme de composition. Une telle démarche, qui se décline en de nombreuses variantes (par exemple B. Colette, 1990 ; B. Colette *et al.*, 1991), requiert toutefois un enchaînement de traitements, dont la technicité est souvent hors de portée des utilisateurs

thématiciens ; son adaptation à la segmentation intra-urbaine est en outre discutable, puisque les objets à identifier se caractérisent non seulement par des textures, mais aussi par des structures spécifiques.

L'ensemble des critiques formulées ici montre toute la difficulté de lier une demande croissante de cartographie de grande précision et les efforts techniques exigés par la haute résolution. Dans la mesure où le traitement d'image de télédétection est devenu un maillon indispensable dans la construction des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), il est important de poser la question de la segmentation à partir des techniques les plus simples.

2 Pour une segmentation d'image en classes radiométriques

2.1 Principe général

Pour améliorer le processus de segmentation d'une image multispectrale, l'idée est de lier intimement la caractérisation des textures et structures de l'image à la phase d'affectation aux classes. Pour cela, il est plus facile de raisonner sur un seul plan image, c'est pourquoi nous procédons à deux étapes distinctes (figure 1).

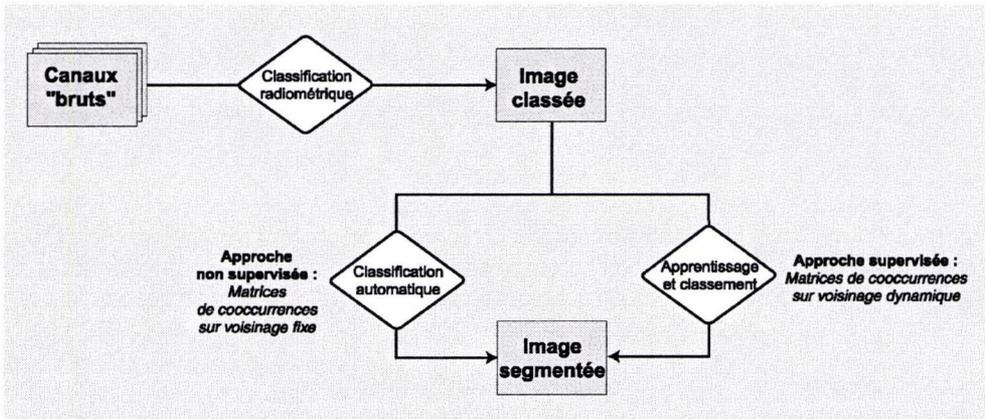


Figure 1 : Chaîne de traitement pour une segmentation d'image à haute résolution

Le passage des canaux « bruts » à l'image classée correspond à une classification (supervisée ou non) strictement radiométrique. Le résultat, aux classes dispersées mais organisées dans l'espace, est caractérisé localement par des matrices de cooccurrences, à partir desquelles l'opérateur peut faire le choix entre les options supervisées (c'est l'approche que nous retenons ici) ou non supervisée.

- dans un premier temps, les pixels sont classés selon leurs seules valeurs radiométriques, avec une éventuelle décorrélation préalable par ACP. À partir d'une image composée de 3 canaux (Spot XS+P ou IRS Liss+P), on aboutit à une image classée, qui peut prendre l'apparence d'une mosaïque. Nous nous plaçons alors dans le contexte d'une image unique découpée en classes : canal panchromatique, photographie aérienne, image des pentes, etc.

- dans un second temps, l'image classée est segmentée sur la base des motifs formés par les classes radiométriques. Cette étape implique la mise en œuvre de fenêtres coulissantes (définition d'un certain voisinage) et de paramètres à calculer dans ces fenêtres.

Dans son principe, ce type d'enchaînement n'est pas nouveau : T. Fung et K. C. Chan (1994) ont ainsi caractérisé la composition spatiale de sites en fonction d'une première classification radiométrique, avant de procéder à une réelle segmentation. Toutefois, ces auteurs ont caractérisé la composition en calculant des histogrammes le long de transects, ce qui ne permet pas d'accéder à la mesure d'une véritable organisation spatiale. Nous avons donc préféré des indicateurs fondés sur l'agencement spatial des pixels. Selon plusieurs comparatifs entre attributs de texture, la supériorité du pouvoir descriptif des paramètres de cooccurrences est bien établie (R. W. Conners, C. A. Harlow, 1980 ; C. Jacquelin, 1995), ce qui justifie notre choix. Pour le calcul des cooccurrences, la définition préalable de classes nominales est très avantageuse par rapport aux images en niveaux de gris :

- le faible nombre de classes (qui reste cependant au choix de l'opérateur) permet d'éviter la simplification en paramètres synthétiques des matrices, tels qu'ils sont préconisés par R. M. Haralick *et al.* (1973). En effet, définir 5 classes radiométriques conduit à envisager 15 types de contacts possibles (demi-matrice des cooccurrences), alors que 256 niveaux de gris en impliquent plus de 32 000... Dans le premier cas, il est tout à fait possible de cartographier les fréquences de contacts entre certaines classes.

- les cooccurrences entre classes identifiées sont elles-mêmes porteuses d'une information intéressante pour le thématique, plutôt qu'un simple résultat intermédiaire qui n'est pas examiné. Les classes de second niveau, fondées sur ces cooccurrences, peuvent être décrites par une matrice des contacts, c'est-à-dire en terme d'agencement spatial.

Pour réaliser la première classification, celle des réponses spectrales, nous avons choisi l'agrégation autour des centres mobiles ; naturellement, il est possible de substituer à cette méthode une classification supervisée ou autre. L'intérêt de la démarche se situe plutôt dans l'étape de segmentation, précisée par la suite.

2.2 Une méthode supervisée proche du logiciel Clapas

Partant d'une image classée, nous pouvons envisager plusieurs modes de calculs des cooccurrences et plusieurs stratégies de segmentation. Celle qui nous semble à la fois simple d'accès et d'une grande souplesse est la méthode proposée par J. M. Robbez-Masson (1994) pour la conception du logiciel « Clapas ». Il s'agit d'une

classification supervisée, où la taille du voisinage qui sert à caractériser le contexte d'un pixel à classer est définie pour minimiser la distance statistique avec la classe de référence la plus proche. Ce filtrage dynamique permet une adaptation des calculs de texture aux différents contextes de l'image, ce qui est un avantage indéniable par rapport non seulement aux filtrages uniformes, mais aussi aux filtrages adaptatifs non liés aux classes définies par un opérateur ; il évite en outre le choix toujours délicat d'une taille de voisinage, l'opérateur n'ayant qu'à fixer les tailles de fenêtre minimale et maximale.

J. M. Robbez-Masson (1994) propose également deux méthodes itératives de segmentation, qui sont éventuellement conciliables. Dans la première (« méthode pas à pas »), l'opérateur définit au départ un nombre réduit de zones de références, observe ensuite la distribution spatiale des distances statistiques de classement à travers laquelle il identifie une nouvelle référence... jusqu'à obtenir une image des distances relativement uniforme. Dans la seconde (« méthode convergente »), on repère au départ l'ensemble des références ; après une itération de classement, les paramètres calculés sur les zones de références sont remplacés par ceux de l'ensemble des pixels affectés aux classes respectives. Après quelques itérations, le processus se stabilise nécessairement.

La méthode que nous avons retenue diffère quelque peu de ces propositions. La très grande diversité des milieux urbains analysés explique d'abord la difficulté d'appliquer strictement la méthode pas à pas : il s'est avéré utile d'assouplir les incréments des références en ajoutant par exemple plusieurs classes par étape, avec des réajustements possibles. La méthode convergente, qui sort du cadre réellement supervisé puisqu'elle est presque indépendante des zones choisies au départ, n'a pas été utilisée ici.

L'accent est plutôt mis sur la recherche du meilleur paramétrage en ne considérant (après stabilisation du choix des références) que les zones de référence. En principe, on a de forte chance d'affecter les pixels d'une zone de référence à la classe qu'elle représente ; néanmoins, la prise en compte de 16 thèmes, qui ne sont pas forcément les plus différents selon le critère de la distance mathématique utilisée, montre que la correspondance n'est pas parfaite. C'est en examinant la matrice des confusions et les taux de bon classement, comme en classification supervisée habituelle, que nous jouons sur certains paramètres : distance de cooccurrence, distance de classement, modalités de voisinage, etc.

3 Application à la segmentation de la ville d'Oran

3.1 Les données utilisées et la spécificité du terrain d'application

Nous disposons d'une image du satellite *Indian Remote Sensing* (IRS) de juillet 1997, en mode multispectral fusionné avec le canal panchromatique pour obtenir une résolution de 6 x 6 mètres. Dans l'application présentée, nous considérons déjà résolu le problème de l'extraction de la surface urbaine, en travaillant sur la

ville délimitée de façon manuelle. Il est certain que cette phase constitue en elle-même un premier traitement qu'il serait intéressant d'automatiser, comme le proposent A. Lorette *et al.* (1998).



Figure 2 : Composition colorée de l'agglomération oranaise (image IRS Liss+P)

Oran est une importante ville algérienne, peuplée de 750 000 habitants. Située sur le littoral méditerranéen, l'agglomération bénéficie d'un climat semi-aride ; limitée à l'ouest par le djebel Murdjadjo, elle s'étend surtout vers l'est et secondairement vers le sud, dans une vaste région endoréïque. À partir du centre historique vers le ravin « Ras el aïn », Oran a connu un développement important depuis le début du siècle, en une série de couronnes successives délimitées par des boulevards périphériques et bien visibles sur la figure 2. La ségrégation spatiale imposée par les colons puis la décolonisation ont contribué à une évolution morphologique parfois chaotique, comme en témoignent les nombreuses zones laissées en sols nus à l'intérieur de la ville. Les extensions récentes comptent à la fois des zones pavillonnaires, de vastes ensembles collectifs et un habitat spontané qui échappe à la planification urbaine.

3.2 Traitements réalisés et résultats obtenus

Une classification par agrégation autour des centres mobiles appliquée aux 3 canaux permet de créer 8 classes radiométriques (figure 3). Ces classes correspondent aux « matériaux élémentaires » de la segmentation à réaliser, dont quelques unes représentent déjà une composition mixte. Dans certaines zones, les termes choisis pour désigner ces classes sont inappropriés, notamment à l'intérieur des parcs urbains où sont souvent confondus ombres et bois ; de même, les voies de communication d'une largeur supérieure au pixel ne sont pas toutes représentées par la classe « rues », selon les contextes ou les types de matériaux utilisés. Ces problèmes sont ceux de toute classification en un faible nombre de groupes.

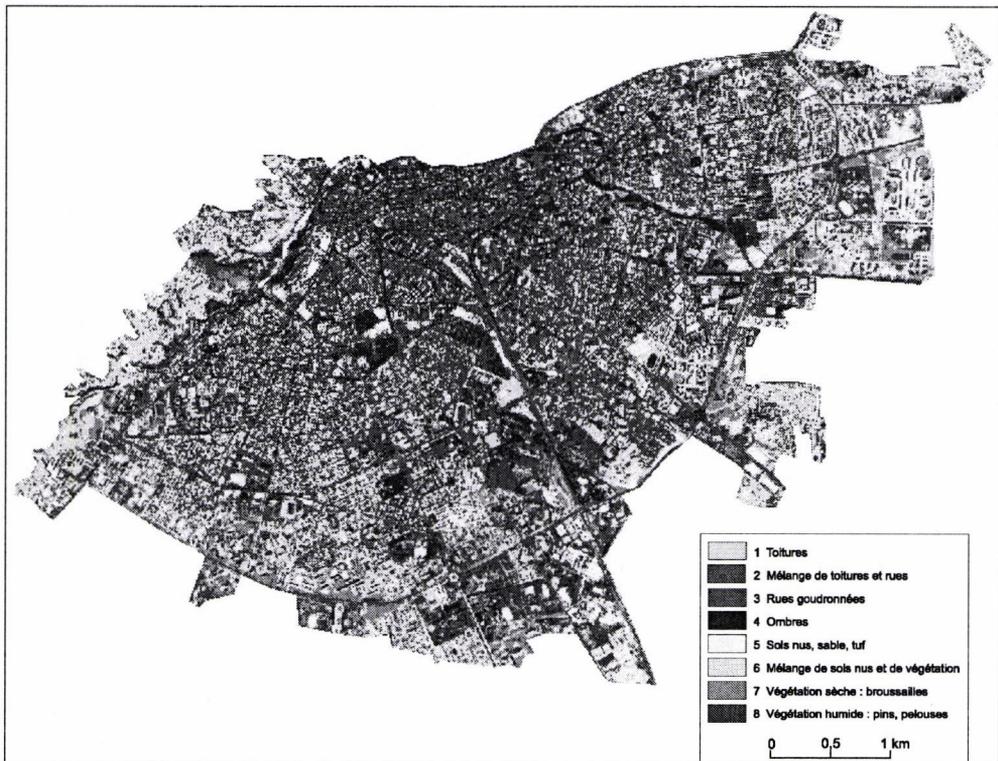


Figure 3 : Classification radiométrique de la ville d'Oran

Parallèlement, nous repérons une dizaine de types de quartiers ou autres éléments inclus dans l'espace urbain. Un premier classement est ensuite lancé, avec les caractéristiques suivantes :

- fenêtre de forme circulaire de diamètre variable entre 9 et 201 pixels.
- cooccurrences omnidirectionnelles, avec une distance de 1 pixel.
- classement des matrices des cooccurrences par la distance Manhattan.

Plusieurs itérations de classement permettent d'ajouter de nouvelles références, jusqu'à stabiliser la distribution des distances.

Quelques tests sont lancés pour observer la stabilité du classement, en faisant varier certains paramètres. Les options précédentes occasionnent une reconnaissance de 16 thèmes avec plus de 97 % de réussite sur les zones de référence. Dans le cadre d'un voisinage circulaire, aucune autre option, notamment la prise en compte d'une distance de cooccurrence plus élevée, ne permet ici d'obtenir un meilleur résultat. Le remplacement des matrices de cooccurrences par les histogrammes de composition, indicateurs a priori moins performants, se traduit par une baisse de la reconnaissance en deçà de 92 %.

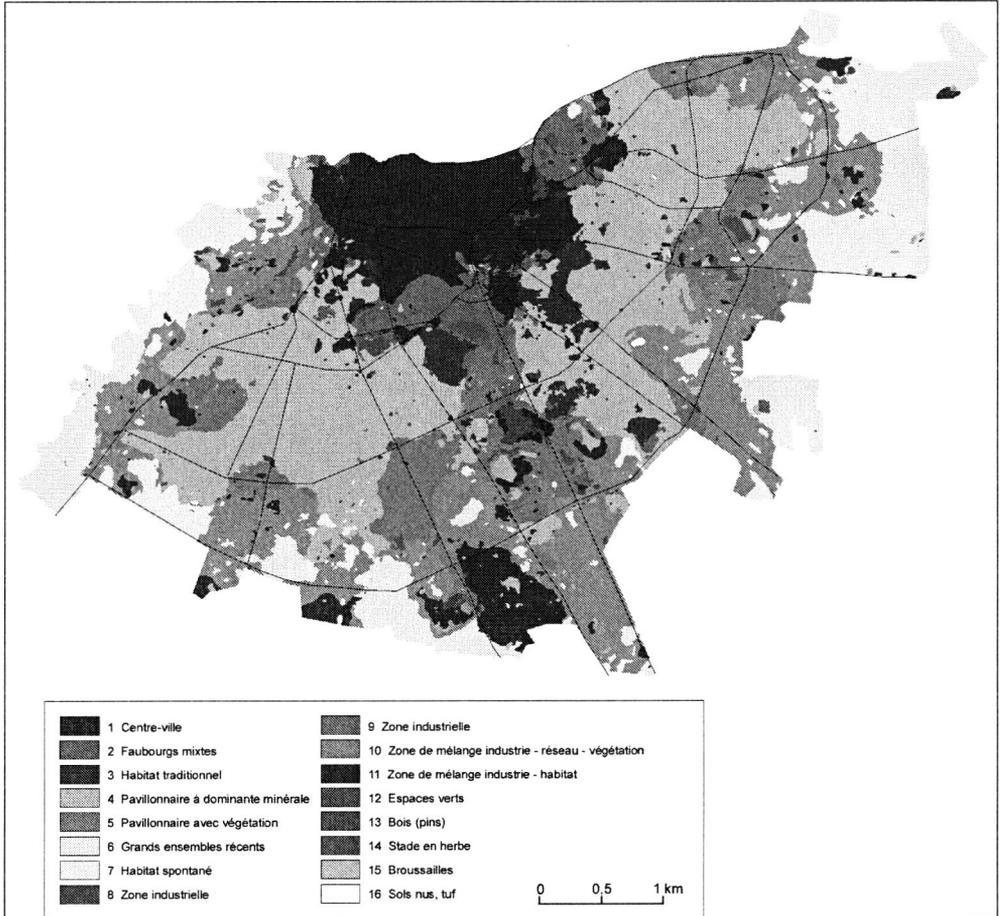


Figure 4 : Image segmentée de la ville d'Oran (les tracés en noir représentent les principales voies de communication).

D'après la figure 4, le résultat est révélateur des grands types de quartiers à l'intérieur de la ville d'Oran : du centre-ville aux grands ensembles, passant par des faubourgs très hétéroclites (habitations, espaces verts, industries) et diverses nuances dans l'habitat pavillonnaire, nous percevons immédiatement l'organisation globale de la ville. Les voies de communication superposées manuellement suggèrent la relation entre les axes d'extension privilégiés et les zones périphériques industrielles (classe 10).

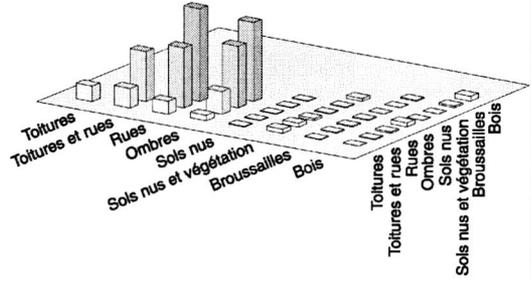
Naturellement, des problèmes subsistent, à la fois du point de vue cartographique et par rapport aux éléments réels. Des plages de faible surface s'insèrent, sans correspondre à des objets particuliers (comme les stades en herbe ou en sable ou les petits espaces verts) ; il faudrait alors définir une contrainte de surface minimale pour certains thèmes. Certaines confusions sont très visibles, par exemple en périphérie de la zone industrielle au sud-est du centre, classée en thème « centre-ville »... L'habitat qualifié de traditionnel où la trame des ruelles étroites est particulière, forme par endroits des plages réduites dont la définition, au vu de la composition colorée, est contestable. Enfin du point de vue géométrique, l'ensemble est trop marqué par des limites rondes, conséquence du voisinage de taille importante (diamètre minimum de 11 pixels) ; l'abaissement de ce seuil affine le trait mais engendre en contrepartie davantage de confusions, puisque le faible nombre de pixels rend très sensible la notion de fréquence.

3.3 Les thèmes décrits comme des motifs spatiaux

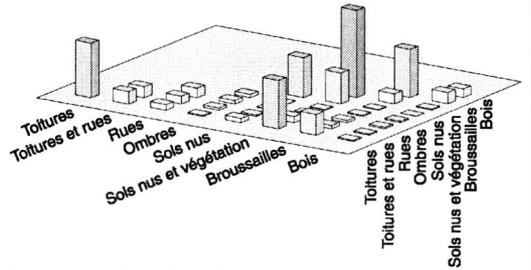
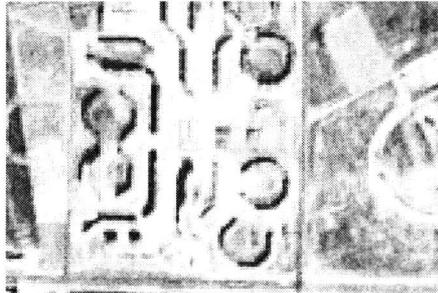
Les classes obtenues au terme de la segmentation peuvent être décrites par leur composition, mais il semble plus avantageux de rester dans le cadre des cooccurrences qui ont permis de les différencier. Bien que ces matrices de fréquences des contacts ne traduisent qu'un aspect partiel des structures spatiales, elles permettent de caractériser très simplement les principaux motifs.

Sans revenir sur les 16 thèmes définis précédemment, la figure 5 illustre le lien entre les valeurs de ces matrices et l'impact visuel des structures correspondantes :

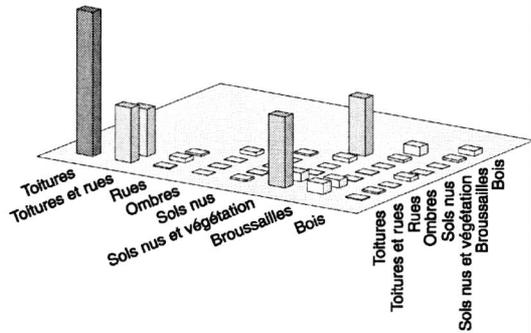
- Le thème 1 (centre-ville), qui comporte peu d'éléments végétaux si ce n'est quelques parc urbains (classés en « bois »), concentre surtout des rues et des ombres et peu de toitures. Cette disposition est significative du développement vertical des constructions.
- Le thème 6 (grands ensembles récents) montre la coexistence de toitures, sols nus et végétation (landes et broussailles). Le sol qui entoure ces habitations collectives porte encore la marque des travaux effectués, ce qui accentue le contraste des formes géométriques.
- Le thème 7 (habitat spontané) montre une texture particulière, due à multiplication des habitations de fortune, où les surfaces de toitures l'emportent largement sur les rues, de faible largeur et pour la plupart non revêtues.



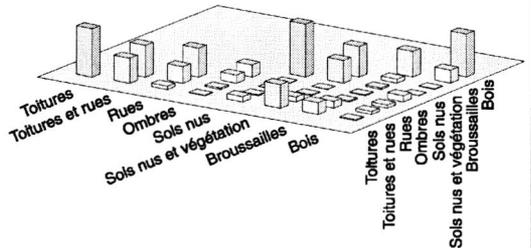
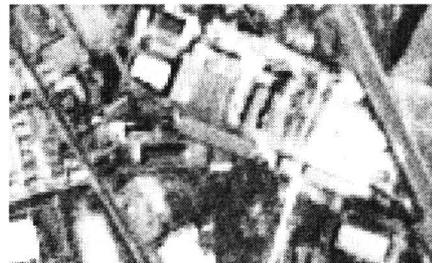
Thème 1 : centre-ville



Thème 6 : grands ensembles récents



Thème 7 : habitat spontané



Thème 10 : zone de mélange industries – réseaux - végétation

Figure 5 : Exemples de matrices de cooccurrences associées à des thèmes

Ces extraits d'images sont tirés du canal panchromatique. Pour des raisons graphiques, nous les avons parfois étendus par rapport aux zones qui ont servies réellement de référence.

À l'inverse du centre-ville, le développement des constructions est ici davantage spatial. Il s'agit ici de la zone dominant le centre-ville au delà du ravin Ras el aïn, à l'ouest ; on trouve un habitat similaire mais dans un contexte topographique moins mouvementé aux marges sud-est de l'agglomération, en bordure de cultures irriguées.

- La diversité des éléments présents dans le thème 10 (zone de mélange industries – réseaux - végétation) explique la relative homogénéité des cooccurrences ; ces éléments sont eux-mêmes plutôt compacts, d'où une diagonale bien visible sur la matrice. Ce type de thème est délicat à identifier, parce que très spécifique localement, c'est pourquoi il est souvent utile de l'associer à plusieurs zones de références sans mixer leurs paramètres.

Les autres thèmes pourraient être décrits de la même façon. Dans le cas d'éléments particuliers ponctuels (zone uniforme en sol nu par exemple), les cooccurrences n'apportent pas d'information supplémentaire par rapport aux histogrammes, et une ou deux cellule de la matrice sont non nulles.

Conclusion

L'expérience que nous avons menée ici a souligné l'intérêt d'une simplification préalable en classes radiométriques et du classement en fonction des matrices de cooccurrences, sur des voisinages de taille dynamique. Par rapport à une méthode plus classique (comme l'ajout de paramètres de Haralick aux canaux et le classement par la distance de Mahalanobis ou la règle de Bayes), le résultat cartographique est nettement plus convaincant. De plus, l'outil est très simple à utiliser puisque le nombre d'opérations est relativement faible pour aboutir à une première cartographie.

Toutefois, certaines imperfections présentes nous incitent à affiner davantage la méthode. Suggérons ici quelques pistes éventuelles :

- l'approche supervisée de la première classification (radiométrie), pour une meilleure définition des éléments de base.
- l'adaptation des bornes de voisinage (minimale et maximale) en fonction des classes, puisque certains objets sont toujours de petite taille (les stade en herbe par exemple), d'autres toujours de grande taille (grands ensembles récents).
- l'association de plusieurs zones pour une même référence, en distinguant leur paramètres respectifs plutôt que de calculer des valeurs moyennes : classe « zones industrielles et commerciales », déclinée en « surfaces réfléchissantes » (toits, parkings) et en « surfaces absorbantes ».
- l'adaptation non seulement des tailles, mais aussi des formes de voisinage, selon le même principe, c'est-à-dire en sélectionnant celle qui minimise

la distance à une référence. De nombreuses formes sont paramétrables, le temps de calcul demeurant une limite encore contraignante.

Références bibliographiques

- Cocquerez J. P., Philipp S. (coordinateurs), 1995, *Analyse d'images : filtrage et segmentation*, Masson, Paris.
- Collette B., 1990, Segmentation d'image par propagation sur les érodés ultimes. Application à l'imagerie satellitaire, *Bulletin de la Société Belge de Photogrammétrie, Télédétection et Cartographie*, vol. 179-190, p. 21-33.
- Collette B., Donnay J. P., Nadasdi I., 1991, Essai de discrimination du tissu urbain par segmentation d'image, *Mappemonde*, n° 4, p. 31-35.
- Connors R. W., Harlow C. A., 1980, A Theoretical Comparison of Texture Algorithms, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2, p. 204-222.
- Connors R. W., Trivedi M. M., Harlow C. A., 1984, Segmentation of a high resolution urban scene using texture operators, *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 25, p. 273-310.
- Fernandez S. *et al.*, 1987, Evaluation of automatic texture analysis for increased crop identification accuracy with Spot data, In : *Spot 1 : utilisation des images, bilan, résultat*, CNES, Cepadues, p. 261-265.
- Fung T., Chan K. C., 1994, Spatial Composition of Spectral Classes : A Structural Approach for Image Analysis of Heterogeneous land-Use and land-Cover Types, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2, p.173-180.
- Haralick R. M., Shanmagan K., Dinstein I., 1973, Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-3, n° 6, p. 610-621.
- Jacquelin C., 1996, *Segmentation de textures par algorithmes génétiques*, Thèse de doctorat, Université Paris V.
- Lorette A., Descombes X., Zerubia J., 1998, *Extraction de zones urbaines fondée sur une analyse de la texture par modélisation markovienne*, rapport INRIA n° 3423.
- Robbez-Masson J. M., 1994, Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale ; application à la cartographie des pédopaysages, Thèse de doctorat, ENSA-Montpellier.

Définition et identification d'objets sur une image à haute résolution spatiale

Application à la différenciation de types de châtaigneraies.

*Object definition and extraction from
high spatial resolution image
Application to differentiating chestnut tree types.*

Muriel Bonin

CNRS UMR-ESPACE - CIRAD TERA
Campus International de Baillarguet
BP 5035, 34 032 MONTPELLIER Cedex 1
Tél : 04-67-59-38-48 Fax : 04-67-59-38-27 Mel : muriel.bonin@cirad.fr

Résumé :

Les données spatiales à haute résolution, ainsi que les capacités de traitement sont et seront de plus en plus accessibles aux différents utilisateurs. Face à cette abondance d'informations, nous proposons de concentrer les efforts sur l'identification d'objets pertinents, à la fois aux niveaux thématique et méthodologique. L'objectif est d'automatiser l'extraction d'objets chargés de sens thématiques. Cette démarche a été testée pour la distinction de types de vergers et de taillis de châtaigniers sur une photographie aérienne en infrarouge couleur de l'IFN⁴. Une typologie de châtaigneraie regroupant cinq classes est construite dans l'objectif de relier formes et pratiques agricoles. Les objets se distinguent, non seulement par leur couleur, mais aussi par l'arrangement spatial de leurs constituants (les houppiers de châtaigniers). Nous avons retenu le module CLAPAS⁵ : le processus de classification tient compte du voisinage des points ce qui permet de différencier les types de même couleur mais de texture différente. Les classes de référence sont choisies sur l'image à l'aide de connaissances de terrain (classification assistée). L'analyse montre que, malgré des confusions entre types dans certaines zones, les sorties générées par la procédure correspondent bien aux relevés de terrain.

Summary :

High resolution spatial data are bound to be more and more reachable for all users. Facing so many data, we propose to define pertinent object, both on thematic and methodological levels. The aim is to automate the extraction of objects that are suitable for research and management. This process is used to distinguish classes of chestnut tree orchards and copses with infrared aerial photos of IFN. A chestnut tree classification is elaborated so as to associate shapes with agricultural practices. Not only do objects differ in colour but also in component (chestnut tree crowns) spatial distribution. CLAPAS is selected : the classification integrates points proximity which allows to distinguish classes with the same colour but differing in texture. Reference classes are chosen on the image thanks to vegetation observation (assisted classification). The analysis shows that, in spite of confusions, output fit with sites checking.

⁴ IFN = Inventaire Forestier National

⁵ CLAPAS (CLAssement de PAysages et Segmentation) peut être téléchargé gratuitement à l'adresse Web suivante : <http://sol.ensam.inra.fr>

Introduction

Les données spatiales à haute résolution, ainsi que les capacités de traitement sont et seront de plus en plus accessibles aux différents utilisateurs. Face à cette abondance de données, les thématiques (agronomes, urbanistes, aménageurs, gestionnaires de l'espace...) sont enthousiastes vis à vis des potentialités mais effrayés face à un domaine technique complexe. Les informaticiens recherchent des méthodes de traitement permettant d'extraire le maximum d'information. Les deux mondes ne se rencontrent pas toujours. Pour que les avancées techniques soient réellement pertinentes vis à vis des questions des chercheurs et des gestionnaires, nous proposons de concentrer les efforts sur une réflexion commune, à l'amont des traitements sur l'image, sur la définition des objets recherchés. Les critères retenus doivent pouvoir à la fois répondre aux problématiques des thématiques et être implémentés par les spécialistes du traitement d'image.

1 La définition d'objets

1.1 L'association de connaissances thématiques et de compétences en traitement d'images

Nous appliquons cette idée dans notre domaine situé à l'interface de la géographie et de l'agronomie. Dans cette perspective, un préalable au traitement des images à haute résolution est indispensable. Il s'agit :

- De repérer des « indices visuels du fonctionnement de l'activité agricole » (Deffontaines, J.P., 1987). Plus généralement, l'objectif est d'identifier des critères visuels de l'inscription spatiale des fonctionnements socio-économiques. Les critères doivent aussi pouvoir être intégrés dans un programme de traitement informatique.
- De mettre en évidence les structures et dynamiques spatiales liées au fonctionnement des systèmes agricoles.

Ce principe de l'association d'une expertise en modélisation spatiale et de compétences en matière de traitement d'images a été déjà été appliqué :

- Dans le domaine urbain. C.Weber analyse les changements urbains de la ville de Kavala en Grèce (Weber, C., 1998). A partir des modifications de l'occupation du sol identifiée sur des images SPOT à différentes dates, elle décrit les formes spatiales associées à l'évolution urbaine. Cette analyse structurelle, couplée à modèle de potentiel⁶ a permis d'identifier des zones d'extension urbaine potentielle.

⁶ Ce modèle admet plusieurs postulats : « l'existence d'interactions entre lieux qualifiés par leur masse et leur position, une probabilité d'interaction similaire entre paire de lieux et une fonction inverse de la distance qui les sépare » (WEBER, 1998).

- En milieu rural et agricole. Une reconnaissance de « paysages modèles » sur images satellites a été testée en Lorraine en exploitant la complémentarité des compétences d'agronomes et d'informaticiens (MANGELINK, L. *et al*, 1995). Des modèles de répartition des occupations du sol ont été établis en fonction du système de production, des caractéristiques morphologiques du terrain et des caractéristiques de l'habitat. Le passage d'une « expertise visuelle et qualitative vers un programme informatique » a nécessité : d'identifier les objets à reconnaître sur l'image, pouvoir les associer aux modèles de fonctionnement de l'activité agricole et déterminer des indices à calculer sur l'image. La répartition des villages avec leurs auréoles d'occupation du sol a ainsi pu être simulée.

Cette démarche de couplage de connaissances de thématiciens et de compétences en traitement d'image a été adoptée pour notre application : l'identification de types de châtaigneraie sur photographies aériennes de l'IFN.

Une typologie des surfaces en châtaigniers distingue des classes qui ont une signification thématique et auxquelles des critères instrumentables peuvent être associés (voir tableau 1).

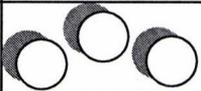
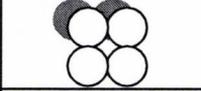
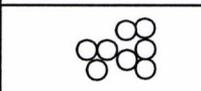
Types	Caractéristique des couverts végétaux	Entretien	Représentation
1	- Houppiers volumineux - Arbres espacés - Sol enherbé, non embroussaillé	Verger entretenu	
2	- Houppiers volumineux - Arbres espacés - Sol couvert de genêt, de broussaille.	Verger abandonné	
3	- Houppiers volumineux - Arbres serrés - Sol non visible	Verger entretenu (ou abandonné?)	
4	- Houppiers volumineux espacés, et houppiers de petite taille, serrés - couverture du sol non visible.	Verger d'abandon ancien	
5	- Houppiers serrés, de petite taille - Sol non visible.	Taillis	

Tableau 1 : Typologie de châtaigniers

Ces classes sont aussi susceptibles d'intéresser les gestionnaires dans une perspective d'aménagement. L'espace castanéicole ardéchois, objet de cette étude, est en effet en cours de restructuration. Différentes actions de revalorisation

de la filière et de son insertion dans le territoire sont en cours : AOC⁷, PNR⁸, labellisation de paysages, création de produits nouveaux...
Les différents types correspondent à des travaux de remise en valeur différents et permettent donc un zonage des interventions.

Dans un verger exploité pour la production fruitière, certains travaux d'entretien sont nécessaires. Les feuilles sont brûlées, les rejets de souches, les plants issus de semis naturels, la végétation buissonnante sont coupés. L'entretien peut être réalisé mécaniquement par l'exploitant ou par l'intermédiaire du pâturage. Le sol est généralement enherbé (Type 1).

Quand le verger est abandonné, il est envahi par les genêts, la bruyère, les ronces, les églantiers... (Type 2). Le Type 2 pourrait aussi correspondre à une châtaigneraie avec un sous-bois de myrtille, comme il en existe en Cévennes. Ce ne serait donc pas un verger abandonné.

Lorsque les rejets de souche et les semis naturels se développent, on aboutit au Type 3. Les types 2 et 3 correspondent à des états d'abandon, mais pour des états initiaux différents. L'interprétation écologique suivante peut être avancée : après abandon d'un verger où les châtaigniers étaient espacés (probablement associé à une culture intercalaire), le genêt, qui est une espèce héliophile s'implante, ce qui aboutit au type 2. En revanche quand les arbres sont serrés, le sous-bois est trop ombragé pour l'installation du genêt, les semis naturels de châtaignes et les rejets de souche dominant alors.

Les vergers qui paraissent avoir des arbres serrés sur les photos aériennes (Type 4) correspondent soit à des vergers ayant réellement une densité de plantation élevée, soit à des vergers situés sur un terrain en pente. Le sol n'étant pas visible, son degré d'entretien risque de porter à confusion. Puisque les semis naturels et les rejets de souche ne sont pas visibles, on peut penser qu'il s'agit d'un verger entretenu. Mais cela peut ne pas être le cas.

Le taillis (Type 5) correspond rarement à une exploitation pour le bois de châtaignier. En général, il s'agit d'un ancien verger qui a été coupé pour une vente à l'industrie du tanin. Suite à la suppression des troncs principaux, des rejets de souche et des semis naturels se sont développés et donnent un aspect caractéristique que l'on peut observer sur les photos aériennes. Ce type de châtaigneraie est assez fréquent en Cévennes. En effet au début du XX^e, de nombreuses usines d'extraction du tanin se sont implantées. Elles étaient alimentées par les coupes des châtaigniers dont la production fruitière n'était plus rentable, atteints par des maladies, ou qui souffraient d'un déficit de main-d'œuvre, en liaison avec l'exode rural.

Ces types peuvent donc être reliés aux pratiques agricoles. Trois critères permettent de distinguer les types : la couleur, la texture et la symétrie. La symétrie correspond à l'ombre du feuillage qui n'est présente que pour les châtaigniers à houppiers volumineux et espacés.

⁷ AOC = Appellation d'Origine Contrôlée

⁸ PNR = Parc Naturel Régional

2 Données, outils et méthodes mobilisées

2.1 La photographie aérienne et la préparation de l'image de travail

La photographie aérienne est issue de l'IFN. La prise de vue verticale date du 20 juillet 1991 à 9h15 avec un avion à une altitude de 5015 m. La résolution de la photographie est d'environ 30 cm. L'émulsion infrarouge couleur est sensible à des longueurs d'onde de 500 à 900 nm (visible et très proche infrarouge). Les tirages photographiques ont été numérisés à 400 dpi. La résolution du document numérique est d'environ 1m. Dans IDRISI, trois images correspondent aux trois canaux (500-600 nm ; 600-700 nm ; 700-900 nm). La fonction SUBSET d'IDRISI a permis d'extraire une même fenêtre pour les trois images. Une zone a été sélectionnée pour tester la classification de châtaigniers : les différents types de châtaigneraie sont réunis, les autres feuillus ne sont présents que de manière dispersée mais ne sont pas dominants sur de vastes surfaces. Le problème de la différenciation des divers types de feuillus relève d'une autre logique de traitement. Les fenêtres d'étude ont une taille de 1555 m × 715 m, soit environ 110 ha. Les informations complémentaires contenues dans les trois canaux (donc dans trois images) ont été réunies grâce à PCA. PCA est une fonction d'IDRISI qui effectue une Analyse en Composantes Principales d'une série d'images et en produit de nouvelles (correspondant aux composantes principales). Nous avons retenus uniquement la composante 1 qui explique 82 % de la variance totale. L'image de départ est représentée par l'image 1.



Image 1 : image de départ

100 m



La fonction CLAPAS du SIG IDRISI (Robbez-Masson, J.M., 1994) a été utilisée pour distinguer les types de châtaigneraie (Bonin, M., 1997). Le programme repose sur une procédure interactive et itérative de classement (rangement d'individus dans des classes prédéfinies) - classification (établissement de classes au sein d'une population d'individus).

Chaque point de l'image initiale est défini par son voisinage. Le voisinage d'un point est caractérisé par un vecteur de composition. Si p est le nombre de catégories de l'image, le point M à classer est défini par le vecteur de composition $X_M = (d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_p)$, où d_i est la fréquence relative de la catégorie i dans le voisinage de M .

Le vecteur de composition d'un point est comparé à celui des classes de références. Le point est rattaché à l'une des références. Le calcul d'une distance de classement permet d'estimer le degré de rattachement du point à la classe de référence. Si k est le nombre de paysages de référence, chaque paysage j ($j \in [1, \dots, k]$) est défini par un vecteur : $M_j = (m_{1j}, m_{2j}, \dots, m_{ij}, \dots, m_{pj})$. m_{ij} est la fréquence relative de la catégorie i dans le paysage j . Affecter le point M au paysage j consiste à minimiser la distance $d(X_M, M_j)$. Plusieurs distances mathématiques peuvent être utilisées : la distance de Manhattan est la somme des valeurs absolues des différences entre chaque classe des deux histogramme à comparer. Celle de Kolmogorov correspond à la plus grande de ces valeurs absolues. L'utilisateur peut fixer une taille de fenêtre de voisinage ou choisir l'option de CLAPAS qui détermine automatiquement la taille de voisinage qui minimise la distance de classement.

L'itération de cette procédure pour tous les points de l'image, par glissement de la fenêtre d'observation permet d'obtenir :

- une carte de classement.
- une carte de distance de classement.
- une carte de taille de voisinage.

Le choix des références peut être réalisé :

- de manière déterministe par des connaissances préalables sur l'objet ou la zone étudiée : c'est la démarche d'expert.
- de manière statistique, sans hypothèses préalables.

3 Utilisation d'une procédure de classement sur base texturale : résultats et analyse

Nous avons utilisé une classification assistée. Les cinq classes de références ont été sélectionnées à l'aide de connaissance de terrain et numérisées manuellement à l'écran. L'objectif étant d'optimiser la qualité du classement, nous avons sélectionné l'option qui calcule la taille de fenêtre optimale au sein d'une gamme de taille donnée. La gamme choisie doit être un compromis entre une taille suffisante pour optimiser les classements, mais pas trop élevée afin de minimiser les temps de calcul. Nous avons retenu les tailles 3 et 31 pixels de côté comme limites. Ces fenêtres correspondent respectivement à 63 m² et 3730 m² sur le terrain. Ainsi, la procédure permet de décrire la texture d'objets de taille comprise entre 8 m (de l'ordre de grandeur d'un houppier d'arbre adulte avec son ombre) et

plus de 80 m (un groupe d'arbres). La taille de fenêtre moyenne calculée par CLAPAS est de 24 pixels de côté, soit environ 4030 m² (63 m × 63 m). Avec ces paramètres, CLAPAS nous fournit donc la carte de classement (image 2), la carte de distance de classement (image 3) et la carte de taille de voisinage (image 4).

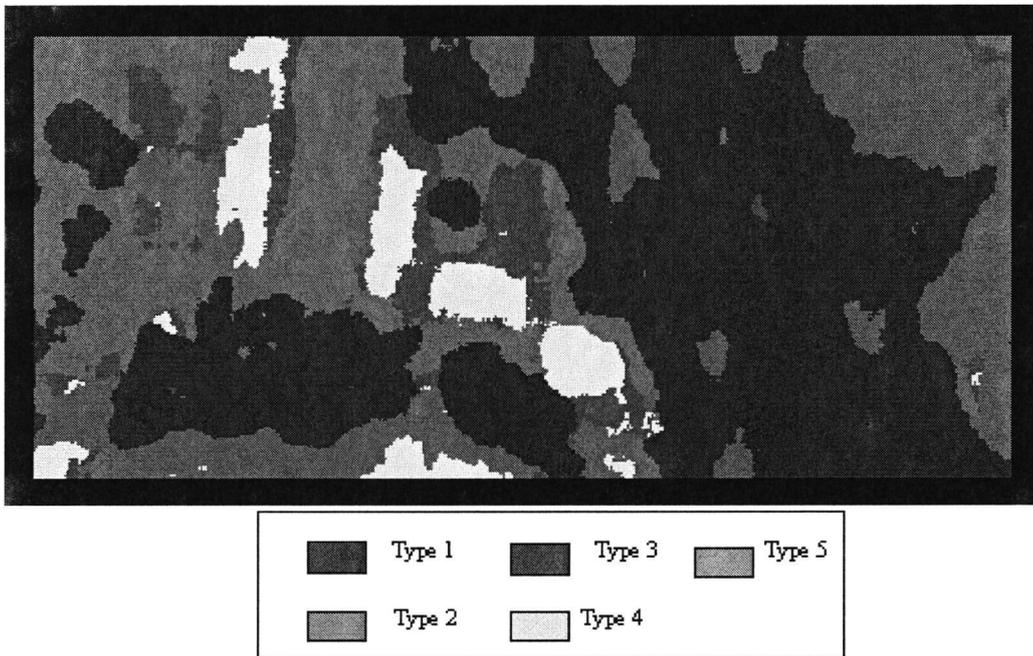


Image 2 : Classement par CLAPAS

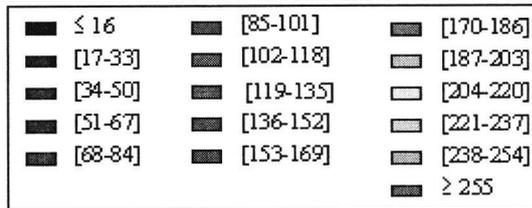
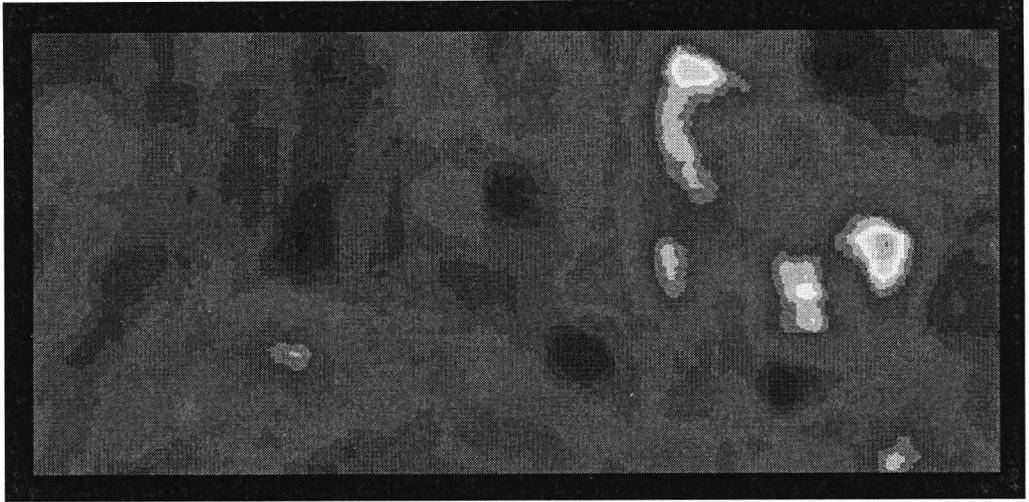


Image 3 : Distances de classement

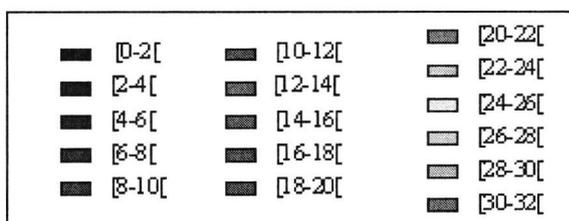
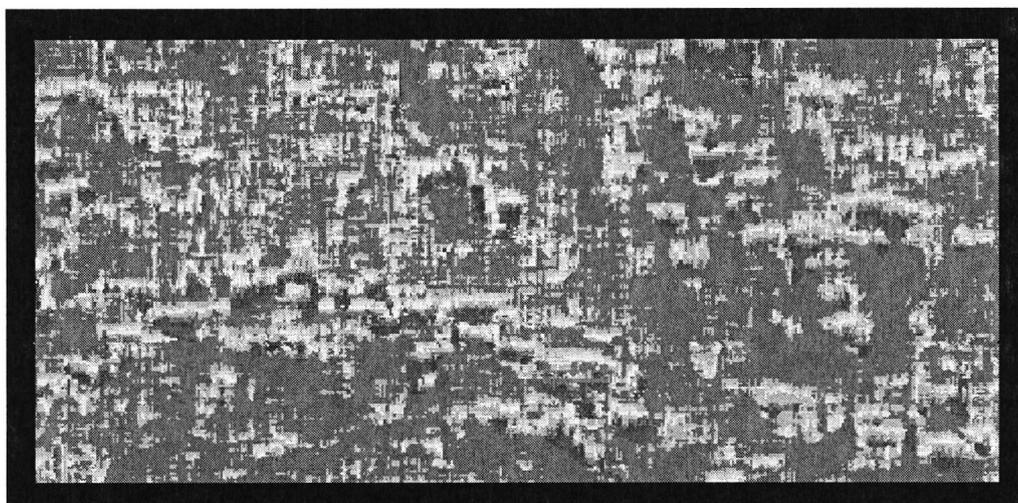


Image 4 : Carte de taille de fenêtre

La carte de distance de classement est utilisée pour identifier les zones « mal classées », c'est à dire dont la distance de classement est supérieure à un seuil donné. Le seuil est déterminé empiriquement en utilisant les classes de référence. Ces zones sont classées dans la catégorie « Autre » et insérées dans l'image de classement. On obtient ainsi une image finale de résultats (image 5).

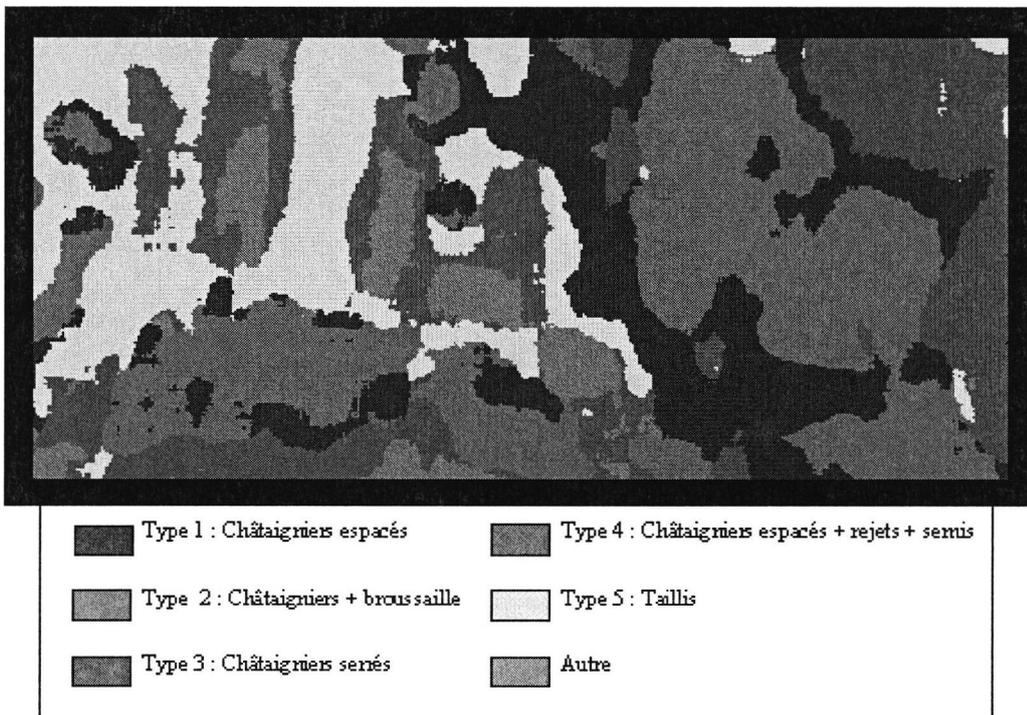


Image 5 : Carte finale de résultat.

La validation des résultats n'a pas été suffisamment affinée et quantifiée. La superposition du cadastre à la photo et à la carte de résultat devrait permettre une intégration des valeurs classées à la parcelle et une comparaison chiffrée entre vérité-terrain et classement. Nous ne présentons ici qu'une analyse qualitative.

Après comparaison, l'analyse montre que les sorties générées par la procédure correspondent bien aux relevés de terrain. Des confusions sont cependant à noter.

- Les châtaigneraies entretenues situées dans une zone à l'ombre sont classées dans le type 2 (Châtaigniers espacés, embroussaillé). En effet, les zones à l'ombre ont une teinte sombre, de même que les genêts. Ceci peut donc être une source d'erreur.
- Le test ne permet pas de différencier les espèces d'arbres. Voici les confusions que nous avons pu remarquer :
 - o La végétation arbusive le long des cours d'eau (verne, noisetier, saule, frêne...) est classée dans les taillis de châtaigniers.
 - o Les sapins sont soit dans le type 2 (châtaigniers espacés, embroussaillé) soit dans le type 4 (verger abandonné avec rejets de souche et semis naturels).
 - o Un verger de pommier est classé en verger de châtaigniers (Type 1).

Conclusion

La procédure nous fournit donc des résultats encourageants. Des risques de confusion ont été mis en évidence et pourraient être évités. Le problème des ombres pourrait être résolu par l'utilisation de prises de vues à des heures différentes (variation de l'emplacement de l'ombre) par exemple.

Des photos prises à des dates judicieusement choisies permettraient de différencier les feuillus. A l'automne, les dates de virage de couleur et de chute des feuilles sont différentes selon les feuillus. De même, au printemps, l'éclosion des bourgeons et l'établissement de l'activité photosynthétique ne sont pas synchrones pour toutes les espèces. D'autres connaissances peuvent également être utiles : l'étagement de la végétation avec l'altitude exclut certaines espèces à une altitude donnée.

La méthode, qui reste au stade expérimental, pourrait-elle être appliquée sur un plus vaste périmètre ? Une des limites majeures de notre procédure était le temps de traitement⁹. Elargir le périmètre multiplierait les temps de calcul.

Pour être réellement intégrés dans un outil de gestion de l'espace, ces résultats devraient être associés à d'autres données (par exemple dans un SIG) : pente, accessibilité, proximité du centre d'une exploitation agricole, disponibilité foncière des parcelles...

Références bibliographiques

- Bonin M., 1997. *Identification de prés et de châtaigneraies sur photographie aérienne à l'aide de CLAPAS : vers un outil d'aide à la gestion et au développement local*. Rapport de stage, Montpellier, ENSA.M/INRA/GIP RECLUS, 83p.
- Deffontaines J.P., 1987. Lecture agronomique de paysage. *Mappemonde*, n°4, p.34-37.
- Mangelinc, L., 1998. *Représentation et classification de structures spatiales. Application à la reconnaissance de paysages agricoles*. Thèse/Informatique, Nancy, Université Henri Poincaré, 177p.
- Mangelinck L. et al., 1996. Reconnaissance de paysages modèles sur images satellitaires. *Etude des phénomènes spatiaux en agriculture*, La Rochelle, 6-8 décembre, Paris, INRA Editions, Les colloques, n°78, p.33-45.
- Robbez-Masson J.M., 1994. *Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale*. Thèse/Sciences Agronomiques, ENSA.M, Montpellier, 154p.
- Weber C., 1998. La croissance urbaine de KAVALA, évolution et perspectives. *Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n°151, p.29-37.

⁹ 10 heures pour une classification. Les marges de progrès sont grandes vu le matériel que nous utilisons.



Segmentation d'image haute résolution par processus Markov objet

High resolution image segmentation using Markov Object Processes

Xavier Descombes¹, Sébastien Drot^{1,2}, Mikael Imberty¹, Hervé Le Men², Josiane Zerubia¹

¹ Ariana, projet commun CNRS/INRIA/UNSA
INRIA, 2004 route des Lucioles, BP93
06902, Sophia Antipolis cedex

Tel. 04 92 38 78 57, Fax. 04 92 38 76 43, mel. Prenom.Nom@inria.fr

² Institut Géographique National
2/4 avenue Pasteur

94165 Saint-Mandé cedex

Tel. 01 43 98 83 15, mel. Prenom.Nom@ign.fr

Résumé : *Partant du constat de la nécessité de prendre en compte des propriétés géométriques pour la segmentation d'image haute résolution, nous décrivons dans cet article une approche bayésienne fondée sur les processus Markov objet. De premiers résultats sur des images de synthèse montrent la faisabilité de cette approche et motivent de futures recherches*

Abstract: *After having remarked that geometric constraints are necessary for high resolution image segmentation, we describe, in this paper, a Bayesian approach based on Markov Object Process. Some preliminary results on synthetic data show the relevance of this approach and motivate future research.*

1 Introduction :

Les techniques probabilistes utilisées pour la segmentation d'images ou la classification sont le plus souvent fondées sur une approche pixélique. Elles sont réputées pour leur robustesse au bruit grâce notamment à la prise en compte des statistiques du bruit et d'informations *a priori* sur les structures recherchées. Néanmoins, le pouvoir régularisateur de ces modèles limite la taille des objets segmentés surtout en cas de bruit corrélé. Une autre limitation réside dans l'absence de prise en compte de la géométrie des objets recherchés. Ces méthodes se sont donc avérées pertinentes principalement sur des données basse ou moyenne résolution (Landsat, SPOT4,...).

Avec des données plus résolues (centimétriques), l'information géométrique devient un atout considérable. Si la notion de texture est souvent suffisante pour extraire l'information à de plus basses résolutions, la notion d'objet devient prépondérante pour extraire toute l'information à haute résolution. Les approches pixéliques semblent donc inadaptées dans ce cadre. Néanmoins, la variabilité des différents objets ainsi que le bruit inhérent à tout capteur rendent séduisantes les approches probabilistes. Pour conserver les atouts des approches bayésiennes tout en tenant compte de propriétés géométriques simples des objets, nous étudions actuellement les modèles de type processus Markov objet.

Les processus Markov objet font un lien entre les modèles stochastiques fondés sur une analyse des interactions entre variables aléatoires (champs de Markov, processus ponctuels gibbsiens) et les modèles géométriques déformables. Définis par une famille

d'objets aléatoires dont des réalisations sont centrées sur les points d'un processus ponctuel, ils peuvent également être vus comme une généralisation des champs de Markov sur graphes ou encore des graphes aléatoires.

Dans cet article nous relatons nos premières expériences avec des processus fondés sur des polygones simples (triangles, rectangles,...) en vue de la segmentation d'images haute résolution. Le formalisme des processus Markov objet ainsi que les outils nécessaires à leur simulation sont présentés dans le paragraphe 2. Nous décrivons ensuite deux processus particuliers développés en vue de la segmentation dans le paragraphe 3. Puis nous montrons de premiers résultats obtenus sur des images synthétiques pour conclure dans le paragraphe 4.

2 Prérequis :

Ce paragraphe introduit le vocabulaire et les définitions utilisés par la suite. Ces notations sont essentiellement reprises de l'article [2], puisque celui-ci s'intéresse au problème très similaire de la reconnaissance d'objets.

2.1 Notations

On s'intéresse dans cet article à la simulation de distributions d'objets dans un espace donné T , appelé *espace image*. Dans le cadre qui nous intéresse, cet espace est une image numérique, donc une grille finie de pixels. On suppose que les objets sont représentables par un nombre fini de paramètres, qui indiquent par exemple la taille et la position des objets. On note U l'espace de ces paramètres, appelé *espace objet*. Dans le cas continu, on suppose que U est un borélien, muni de la tribu borélienne \mathcal{A} et de la mesure de Lebesgue λ . On suppose de plus que $0 < \lambda(U) < +\infty$. Dans le cas discret, U est un ensemble fini de points, que l'on munit de la tribu $\mathcal{A} = \mathcal{P}(U)$ et de la mesure de comptage λ .

Une configuration d'objets x est alors un ensemble non ordonné d'objets :

$$x = \{u_1, \dots, u_n\}, u_i \in U$$

Le support d'un objet (ou silhouette) est noté $R(u)$. Si on note Ω_n l'ensemble des configurations de n objets, l'espace total des configurations est $\Omega = \bigcup_{i=0}^{+\infty} \Omega_n$. On peut munir cet espace d'une σ -algèbre \mathcal{B} et d'une mesure μ . Les définitions sont données dans [1], et nous les rappelons ici brièvement.

Notons $\omega_n : U^n \rightarrow \Omega_n$ la projection de n -uplets ordonnés dans les configurations à n objets, et \mathcal{A}_n la tribu produit sur U^n . Alors on définit \mathcal{B} comme étant la tribu engendrée par $\omega_0(\mathcal{A}_0)$, $\omega_1(\mathcal{A}_1)$, $\omega_2(\mathcal{A}_2)$, ... et la mesure μ par :

$$\mu(B) = e^{-\lambda(U)} \left\{ 1[\emptyset \in B] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n(B)}{n!} \right\} \quad (1)$$

$$\text{où} \quad \mu_n(B) = \int \dots \int 1[u_1, \dots, u_n \in B] \lambda(du_1) \dots \lambda(du_n) \quad (2)$$

pour $B \in \mathcal{B}$. La mesure μ est en réalité la distribution d'un processus ponctuel de Poisson sur U de mesure d'intensité λ , ce qui signifie que l'espérance du nombre de points d'un tel processus est $\lambda(U)$.

2.2 Processus Markov Objet

Un processus ponctuel X est une application mesurable définie sur un certain espace de probabilité et à valeurs dans (Ω, \mathcal{B}) . On note par la suite f la densité de ce processus par rapport à la mesure μ . Les processus objets, appelés également processus ponctuels marqués, sont définis sur $U = T \times M$ où M est l'espace des marques attachées aux objets, c'est-à-dire des paramètres autres que les coordonnées spatiales.

Les densités des processus objet couramment utilisés sont de la forme :

$$f(x) \propto \alpha(n(x)) g(x) \quad (3)$$

où $n(x)$ est le nombre d'objets dans la configuration x , $\alpha(\cdot)$ et $g(\cdot)$ deux fonctions mesurables positives. Dans le cas d'un processus de Poisson, $\alpha(n) = \beta^n$ et $g(x) = 1$. La fonction $\alpha(\cdot)$ représente donc schématiquement l'intensité du processus, i.e. le nombre moyens d'objets de x , et $g(\cdot)$ modélise les interactions entre objets.

On considère les processus objet pour lesquels la fonction g s'écrit sous la forme :

$$g(x) = \prod_{\{u,v\} \subset x} \phi(u,v) \quad (4)$$

où $\phi : \Omega_2 \rightarrow [0, \infty)$. On suppose de plus que la densité f est héréditaire, i.e. :

$$f(x) > 0 \Rightarrow f(y) > 0 \quad \forall y \subseteq x \quad (5)$$

ce qui revient à dire ici que $\alpha(n(x)) > 0 \Rightarrow \alpha(n(y)) > 0$. Dans ce type de processus, les interactions n'existent qu'entre paires d'objets. Si Φ est une fonction positive telle que $\Phi(u,v) = 1$ si $u \not\sim v$, autrement dit, si la densité f dépend d'une fonction d'interaction Φ qui agit sur les ensembles d'objets voisins alors nous obtenons une définition très similaire à celle des champs de Markov dans le cas discret.

2.3 Simulation de Processus Markov Objet

La difficulté des simulations de processus objet vient de ce que l'on ne connaît pas en général la constante de normalisation de la densité du processus. Comme l'espace des objets est très grand, l'estimation de cette constante n'est pas envisageable.

Les méthodes les plus fréquemment employées pour obtenir des réalisations de tels processus sont alors de type Monte Carlo, où l'on simule une chaîne de Markov convergente vers la distribution recherchée - ces méthodes sont dites MCMC, de "*Markov Chain Monte Carlo*" en anglais. On recherche donc des chaînes telles que pour tout état initial, la distribution de la chaîne approche au bout d'un "certain" temps la distribution π (de densité f par rapport à la loi de référence μ) :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \| P^t(x, A) - \pi(A) \| = 0 \quad \forall A \in \mathcal{B}$$

où $P^t(x, A) = P(X_t \in A \mid X_0 = x)$.

L'algorithme de Metropolis-Hasting (MH) consiste à proposer à chaque étape des transitions de l'état courant x_t vers un état y a priori quelconque. Les "mouvements" autorisés ne sont donc pas nécessairement une naissance ou une mort, et le choix de l'état de destination y ne dépend pas forcément de la densité f à simuler. La transition proposée de x_t à y est ensuite acceptée avec une certaine probabilité α . Ce taux d'acceptation α fait intervenir généralement la densité f , ce qui assure la convergence de l'algorithme vers la bonne loi. Dans notre cas, le nombre de variables aléatoires (ici les objets) est lui-même aléatoire. Nous utilisons donc un algorithme permettant des mouvements entre espaces de dimension différente, et connu sous le nom de "Reversible Jump" MCMC (RJMCMC).

Plus précisément, l'algorithme utilise une densité de transition auxiliaire $q(x, \cdot)$ que l'on suppose calculable explicitement et simulable facilement. L'algorithme se décrit alors de la façon suivante :

1. étant donnée la configuration x_t à l'étape t , on simule une configuration y selon la densité $q(x_t, \cdot)$
2. on calcule alors le taux

$$r = \frac{\pi(dy) q(y, dx_t)}{\pi(dx_t) q(x_t, dy)} \quad (6)$$

3. avec la probabilité $\alpha = \min(1, r)$ on pose $x_{t+1} = y$ et avec la probabilité $1 - \alpha$ on pose $x_{t+1} = x_t$.

La densité de transition auxiliaire $q(\cdot, \cdot)$ est a priori quelconque, mais il faut lui imposer quelques restrictions pour assurer la convergence de l'algorithme vers la densité f . Dans tous les cas, la loi f est invariante pour la chaîne de Markov produite par l'algorithme - voir par exemple [4]. Pour qu'il y ait ergodicité, il faut vérifier l'apériodicité et la f -irréductibilité. L'apériodicité est vraie si $P(x, x) > 0$ pour tout x , c'est-à-dire si à chaque étape l'événement $x_{t+1} = x_t$ se produit avec une probabilité non nulle. Cette condition est vérifiée assez facilement dans la plupart des cas.

Dans le cas discret, l'irréductibilité signifie que tout état de probabilité non nulle peut être atteint en un nombre fini de transitions avec une probabilité non nulle. Il est donc important de vérifier que les mouvements autorisés permettent d'atteindre toutes les configurations possibles.

Si l'espace U est discret, l'irréductibilité suffit pour assurer la convergence de l'algorithme pour toute condition initiale. Dans le cas continu, il faut vérifier en plus la récurrence au sens de Harris. Des conditions assez faibles pour que cette propriété soit vraie sont données dans [5].

D'autre part, une remarque importante sur la densité $q(\cdot, \cdot)$ est que pour toute transition possible d'un état x vers l'état y , la transition inverse de y vers x doit être possible. En effet, dans le cas contraire le rapport $q(y, x)/q(x, y)$ est nul, donc le mouvement de x à y sera toujours rejeté.

3 Applications à la segmentation

3.1 Cadre bayésien

Une approche classique pour l'extraction d'informations ou la restauration d'images est l'approche bayésienne. On dispose ainsi d'une image observée y qui est la "déformation" d'une image idéale x que l'on souhaite récupérer. On suppose également que l'image x a été générée selon une *distribution a priori* de densité $p(x)$ et que la déformation de l'image suit une loi de probabilité de densité $f(y|x)$. La méthode bayésienne consiste à maximiser la probabilité a posteriori :

$$p(x|y) = \frac{f(y|x)p(x)}{p(y)} \propto f(y|x)p(x) \tag{7}$$

Dans le cas du Maximum A Posteriori (MAP), on cherche à estimer la solution :

$$\bar{x} = \arg \max_x f(y|x)p(x) \tag{8}$$

Le MAP est obtenu par l'algorithme du *recuit simulé*. Cette méthode consiste à simuler successivement les lois

$$f_T(x) \propto (f(y|x)p(x))^{\frac{1}{T}} \tag{9}$$

où $T > 0$ est un réel appelé *température*. Lorsque T tend vers 0, la loi $f_T(x)$ tend vers une distribution uniforme sur l'ensemble des solutions maximales \bar{x} (donc un Dirac en la solution maximale si celle-ci est unique). L'algorithme de recuit-simulé effectue plusieurs simulations des lois $f_T(x)$ en faisant baisser progressivement la température vers 0. Si la décroissance de la température est "suffisamment" lente, l'algorithme converge vers le MAP.

3.2 Modèle fondé sur des rectangles

Pour ce premier modèle, les objets sont des rectangles paramétrés par les coordonnées de leur coin inférieur gauche, leur longueur et leur largeur. Les longueurs des côtés sont comprises entre une valeur minimale et une valeur maximale. On cherche une distribution sur ces rectangles qui modélise un pavage aléatoire de l'image. Cette distribution doit donc favoriser les rapprochements entre rectangles et pénaliser les chevauchements. Nous définissons une fonction d'interaction g sur $U \times U$ telle que :

$$p(x) \propto \beta^{n(x)} \prod_{\{u_i, u_j\} \subset x} g(u_i, u_j) \tag{10}$$

La fonction $g(u, v)$ comporte deux parties :

1. Une partie répulsive : lorsque $|R(u) \cap R(v)| \neq 0$,

$$g(u, v) = \exp \left(-\gamma_1 \frac{|R(u) \cap R(v)|}{\min(|R(u)|, |R(v)|)} \right) \tag{11}$$

où $\gamma_1 > 0$ et où $|\cdot|$ désigne la mesure de Lebesgue.

2. Une partie attractive : lorsque $|R(u) \cap R(v)| = 0$,

$$g(u,v) = 1 + \gamma_3 l(u,v) \exp(-\gamma_2 d(u,v)) \quad (12)$$

où $\gamma_2 > 0$, $\gamma_3 > 0$, $d(u,v)$ est une distance entre les objets u et v , $l(u,v)$ la longueur des côtés en regard (voir figure 1).

Cette fonction est maximale lorsque les deux rectangles ont un côté en commun.

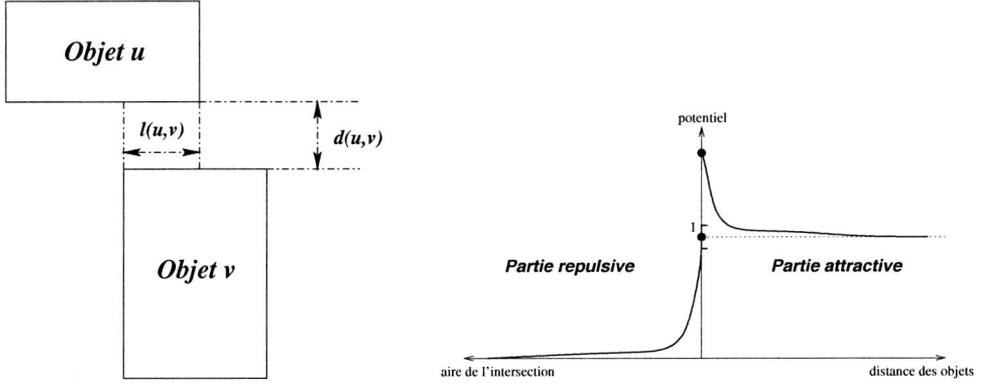


FIG. 1 – Distances utilisées entre les rectangles (en haut) et représentation schématique du potentiel (en bas).

Pour éviter une sursegmentation, on ajoute un terme favorisant les gros rectangles dans le modèle. Ce terme doit être une fonction croissante h de l'aire d'un rectangle, qui doit de plus vérifier $h(a_1 + a_2) > h(a_1)h(a_2)$, afin que la réunion de 2 rectangles soit "meilleure" que ces 2 rectangles séparés. On peut par exemple prendre pour h une exponentielle quadratique. Le modèle a priori devient alors :

$$p(x) \propto \beta^{n(x)} \prod_{u_i \in x} \exp(\delta v^2(u_i)) \prod_{\{u_i, u_j\} \subset x} g(u_i, u_j) \quad (13)$$

où $v(u)$ désigne l'aire de u et où $\delta > 0$.

3.3 Modèle fondé sur des triangles

Dans le second modèle, les objets sont des triangles équilatéraux de deux orientations possibles. Ils sont paramétrés par les coordonnées de leur centre, leur taille et leur orientation. Leur taille est comprise entre une taille maximale et une taille minimale. Comme dans le modèle à base de rectangles, on cherche à déterminer une distribution favorisant les rapprochements entre triangles et pénalisant les chevauchements.

La fonction d'interaction g comporte deux parties:

1. une partie répulsive lorsque $|R(u_i) \cap R(u_j)| \neq 0$

- $g_1(u_i, u_j) = 0$ si $\frac{|R(u_i) \cap R(u_j)|}{\min(|R(u_i)|, |R(u_j)|)} > 0.1$
- $g_1(u_i, u_j) = 1$ si $\frac{|R(u_i) \cap R(u_j)|}{\min(|R(u_i)|, |R(u_j)|)} \leq 0.1$

2. une partie attractive lorsque $|R(u_i) \cap R(u_j)| = 0$

- $g_2(u_i, u_j) = \exp \left[-\gamma_2 \exp(\sqrt{d_F(u_i, u_j)}) \right]$

d_F étant une distance entre les faces en regard de deux triangles (voir figure 2).

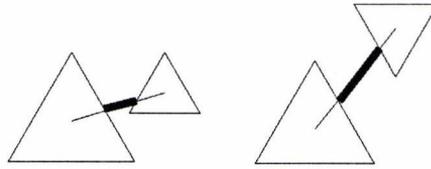


FIG. 2 - Définition de d_F

L'interaction est la plus favorable lorsque les deux triangles ont un côté commun. Le modèle permet d'obtenir des structures voisines de la partition du plan laissant peu de zones non couvertes tout en limitant la surface des chevauchements.

3.4 Attache aux données

Le terme d'attache aux données correspond à la loi $p(y|x)$, qui modélise le passage de la configuration idéale x à l'image réelle observée y .

Une façon de représenter l'attache aux données est de définir une fonction q sur U et d'écrire :

$$p(y|x) \propto \prod_{u_i \in x} q(u_i) \quad (14)$$

On souhaite que $q(u)$ soit maximal lorsque le support $R(u)$ de l'objet dans l'image est une zone homogène. Nous considérons donc simplement un test d'homogénéité d'une zone de l'image, sans émettre d'hypothèse sur la nature des distributions des pixels de l'image. Les objets sont décomposés en plusieurs sous parties. Entre chacune de ces sous régions nous effectuons un test statistique (t-test ou test de Kolmogorov-Smirnoff) pour comparer les distributions. La fonction q est alors définie par la valeur minimale des tests entre les différentes régions.

3.5 Algorithme de recuit

Pour résoudre l'équation 8, nous allons simuler la loi

$$f_T(x) \propto \left(\beta^{n(x)} \prod_{u_i \in x} q(u_i) \prod_{\{u_i, u_j\} \subset x} g(u_i, u_j) \right)^{\frac{1}{T}} \quad (15)$$

en abaissant progressivement la température T vers 0.

Pour effectuer les simulations, nous choisissons un algorithme de type RJMCMC, en considérant la possibilité de mouvements autres que des ajouts et suppressions d'objets à chaque étape. L'intérêt de ces mouvements est d'accélérer la convergence

des simulations, mais également d'améliorer la fiabilité du recuit-simulé en limitant les risques que les simulations ne se bloquent dans des "puits" de la distribution dont on cherche l'optimum.

Pour chaque modification autorisée, nous devons définir la modification contraire, sinon le mouvement sera toujours rejeté. Nous donnons maintenant la liste des mouvements que nous avons utilisés dans le cadre du modèle à base de rectangles.

1. **Ajout d'un objet** (probabilité P_a) : puisque le but est de segmenter l'image, on souhaite que les objets recouvrent entièrement cette image. Afin d'accélérer le recouvrement, les naissances ne sont plus tirées de manière aléatoire, mais de telle sorte que les rectangles dont le centre est un point non encore recouvert soient privilégiés.
2. **Suppression d'un objet** (probabilité P_s)
3. **Déplacement d'un objet** (probabilité P_m) : ce mouvement consiste à choisir une direction de déplacement (verticale ou horizontale) puis à déplacer l'objet d'une certaine distance, choisie de manière aléatoire. Le but de ce mouvement étant surtout d'ajuster le placement des objets sur les limites de zones et favoriser les regroupements d'objets.
4. **Dilatation d'un objet** (probabilité P_d) : Comme le précédent, ce mouvement permet d'accélérer les regroupements d'objets en colmatant d'éventuels interstices entre les rectangles.
5. **Déplacement d'une frontière commune (pour les rectangles)** (probabilité P_f) : si le potentiel g est trop attractif, deux objets collés risquent de ne plus pouvoir être déplacés au cours de l'algorithme de simulation, notamment à basse température. Il est donc intéressant d'autoriser le déplacement d'un bord commun à plusieurs objets, afin de rectifier d'éventuelles imprécisions sur le placement des objets.

3.6 Résultats et commentaires

Les résultats obtenus avec les deux modèles sont montrés sur les figures 3 et 4. Le bruit est un bruit gaussien d'écart type respectivement 10 et 30, ce qui correspond à des rapport signal à bruit de respectivement 14.7dB et 1.6dB. Les résultats sont très prometteurs. On peut remarquer quelques trous mais le pavage est néanmoins relativement complet. En outre, les objets ne recouvrent pas deux zones différentes. Par ailleurs, la qualité des résultats n'est pas dégradée lorsque le bruit est important. Il est également à noter que, dans cette approche, il n'est pas nécessaire de connaître le nombre de classes et les paramètres qui leur sont associées.

La suite de ce travail va consister à appliquer cette modélisation sur des images réelles. Pour ce faire, il pourra être intéressant de considérer des objets plus complexes. Pour finir, nous investiguerons les méthodes d'estimation des paramètres.

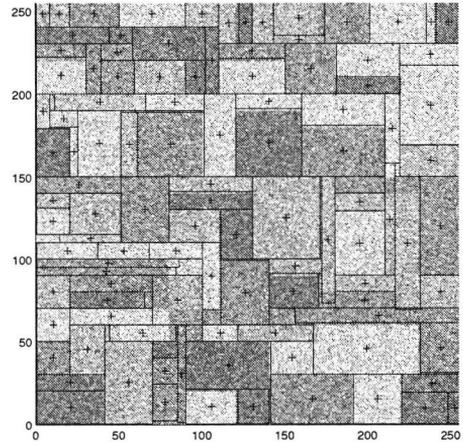
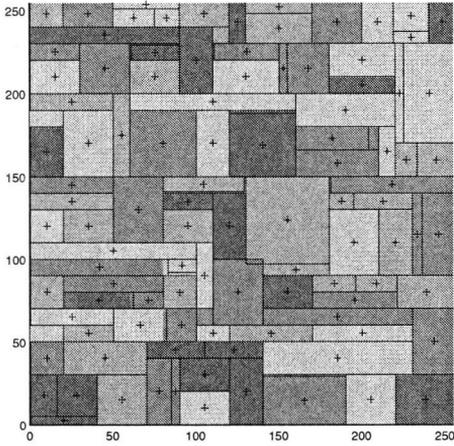


FIG. 3 – Résultats du recuit simulé sur deux images tests, avec le modèle corrigé. L'image de droite est plus bruitée. Pour obtenir ces résultats, nous avons fait tourner le recuit-simulé 30 minutes pour la figure de gauche et 1 heure pour celle de droite, sur une station UltraSparc 1 à 167MHz.

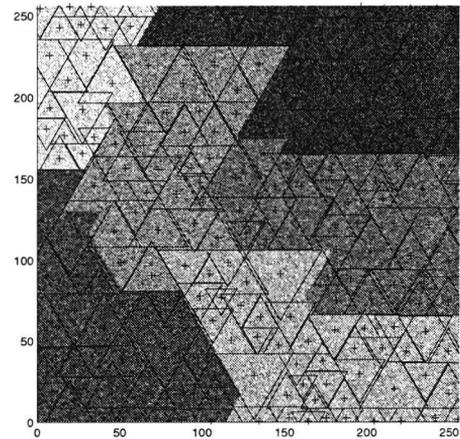
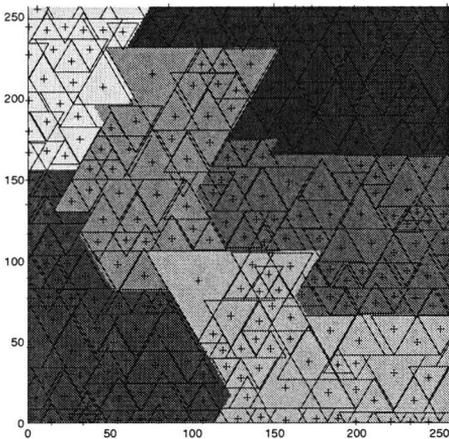


FIG. 4 – Résultats de la segmentation du modèle à base de triangles équilatéraux: un terme favorisant les grands objets a été ajouté. L'image de gauche est l'image non bruitée, celle de droite contient un bruit gaussien d'écart type 30dB.

4 Conclusion

Les caractéristiques des images haute résolution nous conduisent à réactualiser les méthodes de segmentation utilisées classiquement en imagerie satellitaire. En premier lieu, l'information géométrique devient importante pour les résolution sous métrique. En outre, le bruit des données n'est plus uniquement dû au bruit de capteur. Par exemple, une voiture sur une route ou un troupeau dans un champ seront considérés comme du bruit dans l'objectif d'une segmentation. Par ailleurs, il semble souhaitable de conserver le formalisme bayésien qui a démontré sa robustesse pour la résolution de nombreux problèmes inverses.

Nous avons développé une approche bayésienne, fondée sur les processus Markov objet, qui permet de satisfaire aux contraintes énoncée ci-dessus. Les premiers résultats, obtenus sur des images de synthèse, montrent la pertinence de l'approche et sa robustesse au bruit.

Références

- [1] Baddeley, A.J. and Møller, J. (1989). Nearest-neighbour Markov point processes and random sets, *International Statistic Review* **57**, 90-121.
- [2] van Lieshout, M.N.M. (1993) Stochastic annealing for nearest-neighbour point processes with application to object recognition, CWI Report BS-R9306.
- [3] Press W., Flannery B., Teukolsky S., Vetterling W. (1988), Numerical Recipes in C, Cambridge University Press.
- [4] Robert, C. Méthodes de Monte Carlo par chaînes de Markov, *Economica*.
- [5] Tierney, L. (1994) Markov Chains for exploring posterior distributions (with discussion). *Annals of Statistics*, **22**, 1701-1762.

Classification forestière automatisée à partir de photos aériennes numérisées: Le projet CLAPA

Automated Classification of Forest with Aerial Photographs: The CLAPA Project

Vincent Barbezat*, Jacques Jacot** et José-Luis Lamas**

* Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Antenne romande, CH-1015 Lausanne. Vincent.Barbezat@epfl.ch

** Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de production microtechnique, CH-1015 Lausanne.
Jacques.Jacot@epfl.ch Jose-Luis.Lamas@epfl.ch

Résumé: Grâce à une approche appliquée en production microtechnique, un logiciel fonctionnant sur une plate-forme de type PC ou Macintosh a été développé pour des besoins forestiers. Il permet de reconnaître arbres, groupes d'arbres et forêt dense sur des photos aériennes numérisées de différents types (noir-blanc, couleurs, infrarouge) et échelles. Il en calcule la surface et la position grâce à l'association d'un modèle numérique d'altitude. Les applications sont nombreuses: calcul de taux de boisement, repérage des limites forestières, appréciation de la stabilité en forêt de montagne, étude diachronique de la dynamique forestière.

Mots-clés: télédétection, photos aériennes, taux de boisement, dynamique forestière, monitoring forestier.

Abstract: Software has been developed which meets the needs of foresters, and runs on a PC or Macintosh computer. The approach adopted is one generally used in microengineering production. The software enables trees, groups of trees and dense forest to be recognised on different types of digitized aerial photographs (black-and-white, colour, or infrared) and using photographs at different scales. The program calculates areas and locations through a link with a digital terrain model. There are numerous possible applications: calculating the percentage forest cover, identifying the edges of the forest, estimating the stability of mountain forest, and doing diachronic studies of forest dynamics.

Keywords: remote sensing, aerial photographs, percentage of forest cover, forest dynamics, forest monitoring.

1 Contexte

L'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (FNP), situé dans la partie germanophone de la Suisse, a ouvert en 1990 une antenne pour la Romandie francophone au sein de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL): l'Antenne romande du FNP (AR-FNP). Celle-ci se caractérise par des activités de recherche et de vulgarisation dans les domaines de l'aménagement forestier et du paysage, de l'écologie forestière et de la mise en valeur des produits forestiers. Ces activités sont menées en synergie avec le FNP bien sûr, mais aussi avec des partenaires de l'EPFL et des universités romandes qui disposent des compétences et des infrastructures nécessaires.

En contact permanent avec les praticiens forestiers, l'AR-FNP identifie leurs besoins de recherche et les soumet à ses partenaires scientifiques les plus à même d'y répondre. Le projet CLAPA, dont il est question ici, illustre parfaitement cette logique.

1.1 Besoins des praticiens

En Suisse, tous les forestiers ont recours aux photos aériennes dans le cadre de leurs divers travaux de planification, de gestion ou de contrôle. Complémentaires aux travaux de terrain, les photos 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, etc. Chaque unité territoriale possède sa propre collection ou peut aisément se la procurer auprès de son service cantonal ou de l'Office fédéral de la topographie (OFT).

Ces travaux d'interprétation de photos aériennes passent par l'oeil et l'appréciation de l'opérateur, qui transcrit manuellement l'information sur plan ou sur carte, notamment s'il souhaite comparer entre elles des séries diachroniques. Même si avec l'essor de l'informatique, il devient courant de numériser ces données et de les gérer au sein d'un système d'information géographique (SIG), elles n'en restent pas moins issues d'un travail au stéréoscope ou à l'écran, lent et pénible pour la vue, fastidieux et surtout coûteux.

L'intérêt des photos aériennes est reconnu par tous, mais le temps et les coûts de traitement en limitent l'utilisation. Les praticiens forestiers nous ont assuré de leur désir de plus et mieux en tirer profit; ils souhaitent un outil informatique capable d'extraire le plus automatiquement possible l'information dont ils ont besoin: 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. Autant que possible, ces données doivent pouvoir être extraites sur place, c'est-à-dire au niveau de l'unité territoriale, à partir des photos aériennes numérisées préalablement, avec les moyens informatiques du bord, PC ou Macintosh.

1.2 Données à disposition

Le projet CLAPA vise l'analyse automatisée de photos aériennes préalablement digitalisées, tout en tirant parti au mieux des données couramment à disposition des praticiens forestiers et du paysage. La démarche s'apparente à celle pratiquée dans la production industrielle: une fois les besoins des clients clairement identifiés, il s'agit d'y répondre aux coûts les plus bas, en utilisant autant que possible des composantes existantes et bon marché.

1.2.1 Photos aériennes

Depuis plusieurs décennies, les photos les plus courantes en Suisse, accessibles à tout un chacun, sont les photos noir-blanc de l'OFT. La première couverture complète du pays par les photos de l'OFT se prêtant à une interprétation stéréoscopique remonte au début des années cinquante (échelle d'env. 1:25'000). Depuis, les prises de vues sont effectuées à raison d'un sixième de la superficie nationale chaque année. Prises d'abord dans un but de mise à jour des cartes nationales, elles représentent la plus actuelle mais aussi la plus riche source d'information spatio-temporelle à disposition. Actuellement à une échelle d'env. 1:33'000, ces photos offrent dans les conditions optimales une résolution au sol d'env. 25 cm. De type noir-blanc, dans le domaine spectral compris entre 400 et 700 nm, elles sont prises dans la plupart des cas avec un objectif de 153 mm. Le format de 23 cm X 23 cm couvre une région de 55 à 60 km². Le grand intérêt de ces photos, outre leur excellente qualité et leur disponibilité, est qu'elles permettent de par leur périodicité une analyse de l'évolution forestière et de la dynamique du paysage dans le temps et l'espace de n'importe quelle portion du territoire. Aux informations qu'elles fournissent viennent se greffer toutes celles provenant d'autres types de photos aériennes, effectuées en fonction de besoins particuliers et dont les premières remontent aux années vingt.

A ces photos noir-blanc viennent bien sûr s'ajouter toutes les photos infrarouges et couleur réalisées en fonction de mandats particuliers des cantons ou de la Confédération.

1.2.2 Modèle numérique d'altitude (MNA)

La Suisse a la chance de disposer du "DHM25" (Digitale Höhen Modell – Modèle Numérique d'Altitude) de l'OFT, basé sur une maille de 25 m. Il a été obtenu par interpolation des courbes de niveau digitalisées de la carte nationale au 1:25'000 (équidistance 10m). Dans les zones, nombreuses en Suisse, à brusque changement de pente, des mesures spécifiques sont menées pour améliorer la fiabilité des données. La précision du modèle varie en fonction de la zone considérée; en plaine, l'écart-type est de l'ordre de 2 à 4 m, il peut s'élever encore jusqu'à quelques dizaines de mètres dans les abrupts rocheux des Alpes.

1.2.3 Particularités de la propriété forestière en Suisse

D'une surface totale de moins de 42'000 km², la Suisse se compose de 38% de surface agricole, 22% de rochers et glaciers, 4% de lacs et rivières, 6% d'agglomérations et 30% de forêts, soit environ 1,2 millions d'hectares (OFEFP, 1995). Les boisés sont à raison de 73% en main publique (communes, cantons, Confédération). La surface moyenne de la forêt privée (250'000 propriétaires) est de 1,2 ha alors que celle de l'entreprise forestière publique s'élève à 310 ha.

Ainsi apparaissent certaines particularités de la propriété forestière helvétique, où la gestion porte sur de petites surfaces auxquelles est appliquée une sylviculture fine, proche de la nature. Les innombrables points d'amer naturels ou construits, une très forte densité de bornes et de points officiels de mensuration relevés dans un cadastre en voie de numérisation facilitent tous types de repérage.

1.3 Conditions posées à l'outil à développer

Les besoins des praticiens, les données de base à disposition et le contexte décrits ci-dessus ont conditionné un premier cahier des charges du développement d'un logiciel de classification automatisée de photos aériennes numérisées (Tab.1), baptisé du nom de CLAPA (Bodmer, 1993).

Logiciel	Données	Résultats
<ul style="list-style-type: none">• Plate-forme PC ou Mac• Maniement simple, convivialité• Temps de traitement court• Interactivité pour affinement de la détection	<ul style="list-style-type: none">• Tout type de photo aérienne• Numérisation des photos par scanner courant du marché• MNA	<ul style="list-style-type: none">• Identification et géoréférence des limites forestières (lisières internes et externes), des arbres isolés et en groupe, mesures de surfaces et hauteurs• Image traitée• Formats courants d'exportation

Tableau 1 : Conditions de base posées à l'outil à développer.

De plus, une simplicité d'emploi correspondant aux principes courants de convivialité offerts par les logiciels les plus usités est visée. L'acquisition des données en est fortement influencée puisqu'il s'agit de manier et traiter des fichiers de taille "raisonnable".

Le degré de précision à atteindre par le logiciel doit par ailleurs être adapté aux particularités des besoins des utilisateurs. Destiné principalement à des professionnels de la forêt et du paysage et non à des géomètres ou des aménagistes du territoire construit, le logiciel peut se permettre de gagner en temps de travail ce qu'il perd en exactitude, pour autant qu'il indique de quel ordre est celle-ci. Par exemple, la détection de trouées comme zone de déclenchement possible d'avalanches en forêt à fonction de protection prioritaire ne requiert pas la même précision que la détermination d'un taux de boisement en pâturage boisé. Pour ce dernier, le niveau de l'are est considéré comme extrêmement précis, voire inutile, et le niveau de l'hectare comme encore très précis. Ce n'est pas le cas lorsqu'il s'agit de traiter de stabilité en forêt de montagne; une avalanche peut en effet se décrocher dans des vides naturels ou artificiels mesurant plus de 30 m sur la ligne de pente et plus de 50 m ou deux longueurs d'arbre sur la ligne de niveau (Meyer-Grass, 1985).

2 CLAPA: une idée qui fait son chemin

Lors d'un colloque sur la reconnaissance d'objets organisé par le Département de microtechnique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, des contacts avec son Institut de production microtechnique (IPM) (à l'époque IMT) ont mis en évidence des intérêts communs à résoudre les problèmes esquissés ci-dessus. L'extraction d'éléments d'images en se référant à une modélisation schématique constitue une partie des activités de l'IPM dans le domaine de la vision. Plus précisément, un groupe de l'IPM travaille sur le repérage de position "basé modèle".

Une première mise en pratique s'est faite dans le cadre d'un travail de semestre (Kreiss, 1995). Au vu des résultats prometteurs, la recherche s'est prolongée par un travail de diplôme (Kreiss, 1996) d'une durée de quatre mois, débouchant sur un prototype de logiciel. Durant deux mois ensuite, des travaux d'amélioration et d'aménagement particuliers ont permis de le rendre opérationnel et d'explorer différents champs d'application (Barbezat *et al.*, 1996).

Actuellement, les développements se poursuivent sous la forme du doctorat, à l'IPM et à l'AR-FNP.

2.1 Nécessité d'un SIG

Les interactions permanentes avec les praticiens forestiers et du paysage d'horizons différents ont conduit à la définition d'étapes de travail pour une classification automatisée (Fig. 1), mettant en évidence le côté fondamental de l'association d'un SIG. Cet outil est devenu en effet incontournable en foresterie.

Les capacités de l'AR dans ce domaine, appuyées par les spécialistes du Département de génie rural de l'EPFL (Chaire des systèmes d'information à référence spatiale, Laboratoire de photogrammétrie), sont mises à profit. Le fonctionnement optimal de CLAPA dépend en partie des informations fournies par les bases de données externes.

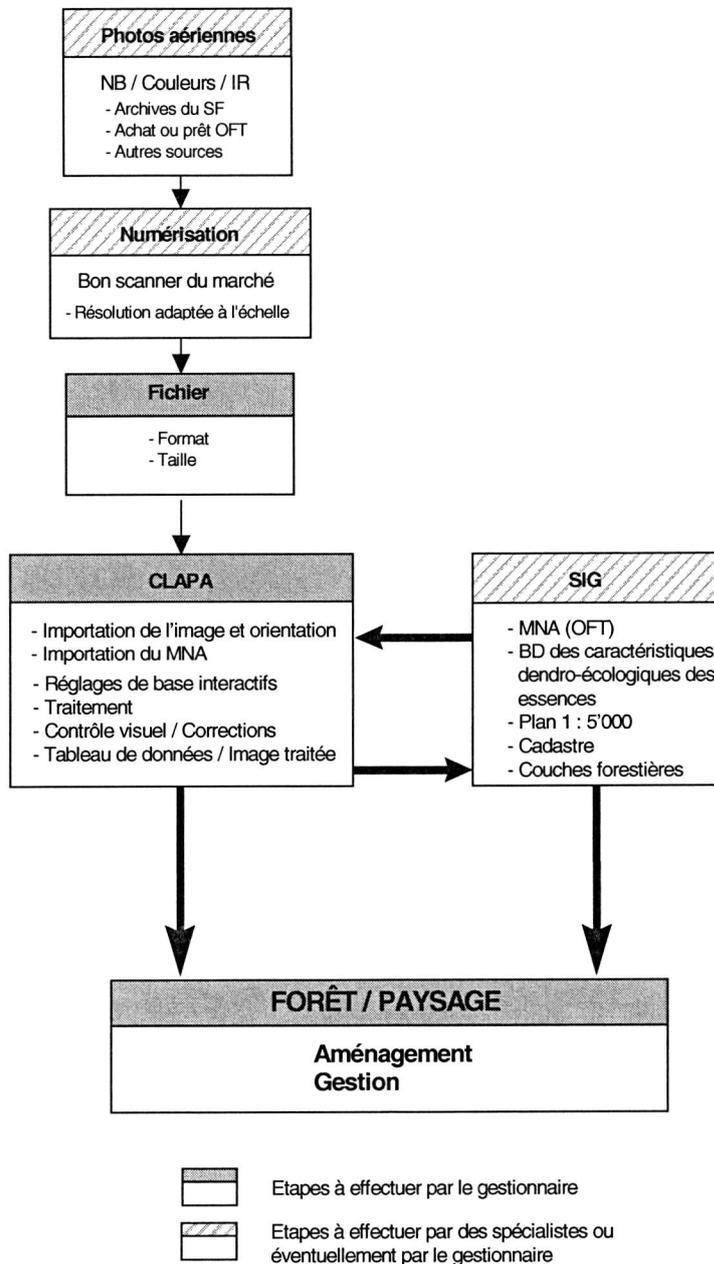


Figure 1 : Etapes d'une classification automatisée selon le projet CLAPA.

2.2 Fonctionnement du logiciel CLAPA

Avant toute utilisation du logiciel, un certain nombre de travaux préliminaires sont indispensables. Ils nécessitent un scanner et l'utilisation d'un logiciel associé

2.2.1 Numérisation de la photo

La photographie doit être numérisée avec une résolution telle qu'un pixel corresponde à un carré sur le terrain de 40 à 80 cm de côté. Cette résolution dépendante de l'échelle, en Suisse au plus 1:35'000, est accessible aux bons scanners à plat (1200-2400 dpi) actuels. Une plus haute résolution n'apporte pas d'amélioration significative de la précision des résultats.

2.2.2 Introduction des données de base

Le programme exige en outre de l'opérateur les informations suivantes:

- les coordonnées de points de l'image dans le repère des coordonnées géographiques nationales suisses,
- la date et l'heure de la photo,
- l'altitude de la prise de vue,
- la distance focale de l'objectif utilisé et l'échelle moyenne de la photo.

2.2.3 Association d'un MNA

Le système CLAPA travaille sur la base de photographies aériennes prises à une altitude stabilisée en fonction de l'altitude du terrain local, afin de garantir une échelle constante à peu près identique. Dans les régions à fortes pentes, très courantes en Suisse, cette hauteur par rapport au sol est par conséquent variable. La projection centrale faite par la caméra pour obtenir la photo sur un plan entraîne une différence de la taille des objets réels en fonction de leur distance à l'avion.

Les cartographes résolvent très bien ce problème en créant les orthophotographies. Ce type de corrections nécessite des moyens informatiques lourds, un temps de repérage des images stéréoscopiques et de calcul assez long. CLAPA recherche une précision de mesure des surfaces forestières de l'ordre de 2 à 3% de la surface totale, sans utiliser des moyens informatiques lourds. Il est possible de renoncer à la stéréophotographie, pour autant qu'il soit tenu compte des données d'altitude de prise de vue qui figurent sur la photo et du MNA de l'OFT. Ces données permettraient de calculer la surface couverte par chaque pixels de l'image.

La résolution du MNA est réduite en altitude tout en garantissant une erreur relative de 1% dans les calculs de distance. D'un point de vue pratique, cette méthode donne de très bons résultats dans la gamme de précision qui nous

intéresse, même pour des zones de forêt dans de fortes pentes. De plus, cette approche est très rapide du point de vue temps de calcul et ne nécessite pas de grandes capacités de mémoire.

2.2.4 Traitement de l'image numérisée

En se référant au niveau de gris de la prairie, les arbres isolés sont identifiés grâce à la présence de leur ombre. La forme et la surface de l'ombre permettent de discriminer les objets sur l'image pour ne conserver que les conifères isolés (fig. 2 et 3). Divers traitements permettent de définir le diamètre de la couronne afin d'en déduire la projection orthogonale. En fonction de la date et de l'heure de la photo et du MNA, il est possible au logiciel de calculer la hauteur de l'arbre à partir de la longueur de son ombre.

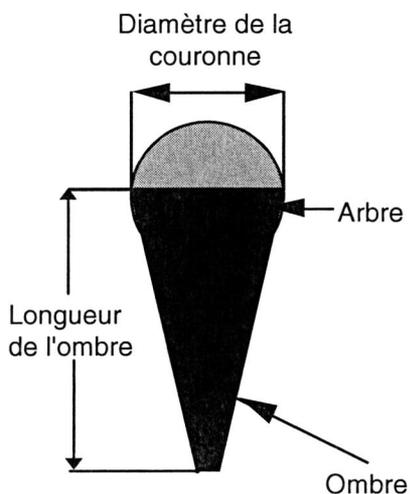


Figure 2: Représentation schématique d'un épicéa isolé avec son ombre. □

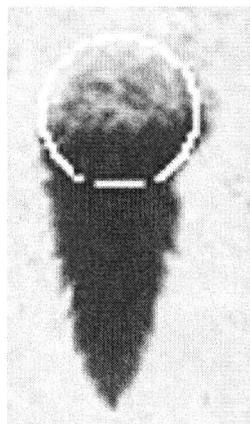


Figure 3: Résultat du programme.

Pour les groupes d'arbres et la forêt dense, l'ombre n'est pas utilisée de la même manière. Dans un premier temps, on détecte les contours des arbres. L'effet du bruit est ensuite diminué, puis les contours de la forêt dense sont obtenus en bouchant les espaces entre les arbres. Les trouées importantes et les clairières sont conservées.

La partie droite de la figure 4 représente pour une zone le résultat du traitement de base. 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 (Lässig *et al.*, 1992). Les dimensions maximales ainsi que la fourchette dans laquelle évolue le coefficient entre 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. Pour une portion d'image plus grande, les figures 5 et 6 montrent comment les groupes d'arbres ont été représentés. Par groupes d'arbres, il est entendu ici au moins deux arbres dont les ombres se touchent.

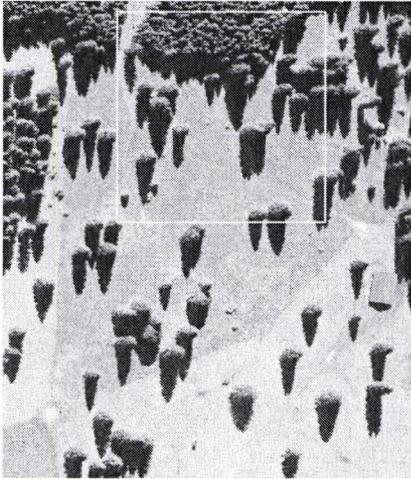


Figure 4: Image originale et extrait d'une zone après traitement de base.
(Photo de l'OFT avec autorisation de reproduction du 16.7.1993).

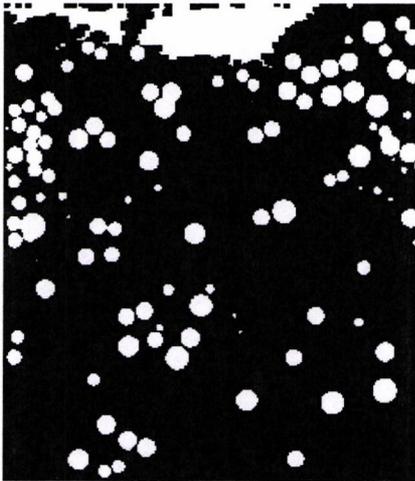


Figure 5: Image binaire de la zone élargie; le modèle de projection orthogonale remplace les particules.

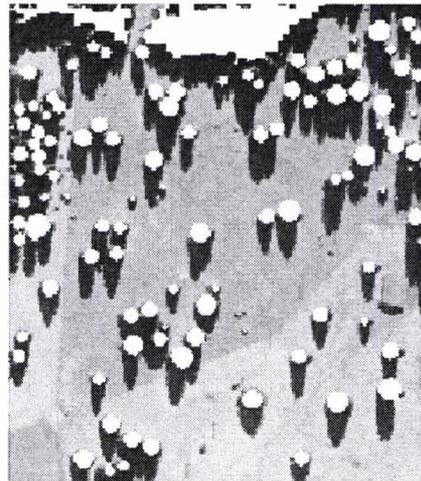


Figure 6: Image binaire superposée à l'originale.

Il arrive que le système place deux arbres au lieu de trois, mais il s'avère que l'approximation de la surface boisée obtenue reste bonne. Même à partir de mesures précises de terrain, le calcul de la projection orthogonale de la couronne d'un arbre reste toujours une approximation qui dépend de la méthode utilisée.

2.3 Etudes de cas

Les différents tests du logiciel ont porté principalement sur des surfaces d'une à deux dizaines d'hectares, dans des conditions forestières, mais aussi géographiques et géomorphologiques différentes.

Le test le plus important a été réalisé sur une étendue de 400 ha: le pâturage boisé du Communal de la Sagne, dans le canton de Neuchâtel.

Pour donner un ordre de grandeur du temps de calcul de CLAPA, une image de 5×10^6 pixels (80 ha) peut-être traitée en moins de 30 secondes par un PC de type Pentium II – 333 Mhz. Cette analyse fournit la surface totale, la surface boisée, le taux de boisement, la position des arbres isolés et leur hauteur. Pour certaines régions de l'image, les possibilités de réglage interactif du logiciel ont été mises à profit. Il en a résulté des variations importantes au niveau de la finesse d'interprétation de la mosaïque forestière (fig. 7). Pour le praticien, cela correspond parfaitement à des choix initiaux qu'il faut fixer clairement: 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? Cela pose également la question d'une définition objective de la notion de forêt, différente s'il s'agit d'une question de police forestière ou de gestion écosystémique.

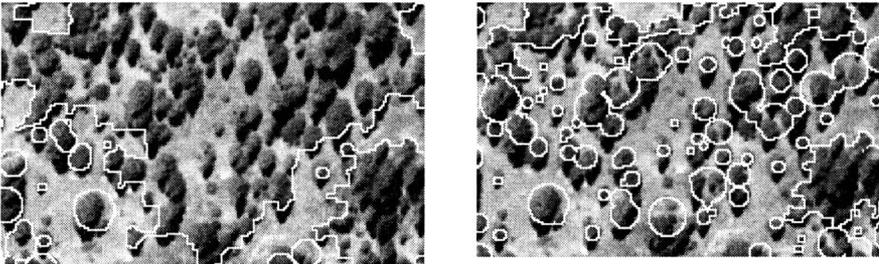


Figure 7: Influence des réglages du logiciel sur la finesse de traitement, à l'exemple d'une même portion d'image. (Photo Swissair, reproduction autorisée par le Service cantonal neuchâtelois des forêts).

3 Perspectives

Certains problèmes endogènes et exogènes au logiciel doivent encore trouver des solutions, il faut mentionner:

- La précision et la fiabilité des résultats, en particulier dans l'optique d'une utilité renforcée en forêt de montagne.
- La réduction de la taille des fichiers par un maniement de fichiers sous forme compressée ou par l'utilisation d'autres formats.
- L'influence des caractéristiques propres à chaque image, entre autres la dynamique des diapositives OFT en vue d'une utilisation forestière (forêt moins sombre, plus nuancée).
- La possibilité, grâce à un module ad hoc, de projeter des plans de toute échelle sur la photo en utilisant le centre de projection. Inversement, les distances et coordonnées de tous points de la photo doivent pouvoir être mesurées avec indication du degré de précision.
- La définition de la nature forestière et de la limite forêt - non forêt.
- Les interactions avec des SIG sont à affiner encore, en tenant compte aussi de leur utilisation au niveau de l'unité de gestion et des bases des données qui y sont rattachées.

Ce dernier point soulève la question de bases de données externes sur les caractéristiques morphologiques des essences et de la forêt, nécessaires aux aspects de reconnaissance d'objets du logiciel. La pertinence de l'information contenues dans ces bases de données pourrait encore augmenter la puissance de CLAPA. Une différenciation résineux - feuillus est visée prioritairement. Les caractéristiques écologiques liées à l'altitude, l'exposition et à la répartition des espèces permettront de formuler des critères d'exclusion forts et de gagner en temps de travail du logiciel. L'association de bases statistiques telles que GEOSTAT (OFS, 1985) peuvent s'avérer aussi de grande utilité.

Le domaine d'utilisation privilégié du logiciel CLAPA est bien sûr la forêt, et son utilisateur cible, le gestionnaire forestier. Les capacités de CLAPA sont cependant à tester dans d'autres secteurs du paysage, et le cas échéant, à développer. Ce logiciel est un excellent collecteur et compilateur d'informations contenues sous forme diffuse dans l'image. Il se révèle être un outil de quantification objective de l'évolution de certains paramètres de couverture du sol, telle qu'elle peut être observée à partir de séries diachroniques de photos aériennes. Ceci devrait permettre d'en élargir notablement l'usage, par exemple dans le cadre de la gestion durable des écosystèmes.

Le projet CLAPA ne pourra être mené à bien dans les meilleures conditions qu'avec le concours de spécialistes de tous bords. C'est un de ses côtés captivants. Par la voie de cette communication, nous espérons susciter l'intérêt de divers chercheurs, débouchant, nous le souhaitons vivement, sur toutes sortes de collaborations et de synergies.

BIBLIOGRAPHIE

- Barbezat, V.; Kreiss, P.; Sulzmann, A.; Jacot, J., 1996: Automated Recognition of Forest Patterns using Aerial Photographs. *Optics in Agriculture, Forestry, and Biological Processing II*. Proceedings SPIE. Bellingham (Washington), SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2907: 30-41.
- Barbezat, V.; Jacot, J., 1999: The CLAPA project: automated classification of forest with aerial photographs. - In: Hill, D.A.; Leckie, D.G. (eds) *International Forum: Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. Victoria, British Columbia, Canada, February 10-12, 1998. Victoria, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre. 345-356.
- Bodmer, H. C.; Barbezat, V., 1994: Ein UFO in den Alpen oder die Waldgrenze, das unbekannte forstliche Objekt. *Bündnerwald*, 1/94. p. 33-34.
- Bodmer, H.-C., 1993: *Classification automatisée de photos aériennes*. Avant-projet AR-FNP, 44 pp.
- Gallandat, J.-D.; Gillet, F.; Havlicek, E.; Perrenoud, A., 1995: *Patubois, Typologie et systématique phyto-écologique des pâturages boisés du Jura suisse*. Laboratoire d'écologie végétale, Université de Neuchâtel. Rapport (3 volumes, 4 annexes, 1 CD-ROM). Vol. I, 466 p.
- Kreiss, P., 1995: *Détermination des limites des régions boisées*. Travail de semestre, Département de microtechnique, Institut de microtechnique, EPF Lausanne, 26 pp.
- Kreiss, P., 1996: *Détermination des limites des régions boisées*. Travail de diplôme. Département de microtechnique, Institut de microtechnique, EPF Lausanne, 44 pp.
- 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.
- Meyer-Grass, M., 1985: *Avalanches en forêt: peuplements menacés, mesures*. Inst. féd. ENA, Davos, notice no 1.
- OFEFP, 1995: *La forêt et le bois en Suisse*. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne
- OFS, 1985: *Statistique de la superficie, Banque de données GEOSTAT*. Office fédéral de la statistique, Berne.
- Troxler, J., 1992: *Effets de la couverture boisée sur la productivité et la qualité de l'herbe des pâturages*. Projet de recherche. Station fédérale de recherches agronomiques de Changins, CH-1260 Nyon.

Modèles déformables en traitement d'image : Notions et exemple d'application

Deformable models in image processing : notions and example of application

Anne-Gaelle Manh, Gilles Rabatel

CEMAGREF - UR GEMO

Domaine de Lavalette

361 rue JF Breton, BP 5095

34033 Montpellier cedex 5

Tel : 04.67.04.63.58 / Fax : 04.67.63.57.95

Mel : anne-gaelle.manh@cemagref.fr gilles.rabatel@cemagref.fr*

Résumé :

L'approche classique en analyse d'image comprend généralement une étape de segmentation bas-niveau permettant de réduire la quantité d'information à traiter, suivie d'une étape d'analyse des objets ainsi segmentés. Dans un tel schéma, la qualité de la segmentation initiale est donc essentielle. Or cette dernière repose uniquement sur des critères locaux (niveau ou couleur des pixels, discontinuités, etc.), à l'exclusion de toute information plus globale.

Les modèles déformables prennent le contre-pied de ce schéma, en permettant dès la phase de segmentation l'introduction de connaissances *a priori* sur la forme globale recherchée. Ces connaissances sont incluses dans le modèle, qui est alors « ajusté » dans l'image pour obtenir une segmentation optimale.

Les principes généraux de mise en œuvre de ce principe seront évoqués, et illustrés par la présentation de travaux en cours à l'UR GEMO. Dans ces travaux, relatifs à la reconnaissance variétale d'adventices par vision numérique de terrain, un modèle déformable paramétrique est utilisé pour la segmentation des feuilles : il permet notamment de traiter efficacement les situations de recouvrement partiel des feuilles entre elles.

Abstract :

The usual approach in image processing generally includes a low-level segmentation step, which allows to reduce the amount of information, followed by an analysis step of the segmented objects. In such a scheme, the quality of the segmentation step is essential. But it only depends on local criteria (pixels intensity or color, discontinuities, etc.), excluding more global information.

Deformable models provide a promising approach as they introduce in the first step of segmentation prior knowledge on the global shape. This knowledge is included in the model, which is adjusted in the image to best fit the data.

General principles will be developed and illustrated by actual works at Cemagref - UR GEMO. Those works are related to weed species recognition by in field images. In this case,

a parametric deformable model is used for leaves segmentation : in particular, this model is appropriate to efficiently deal with partially overlapping leaves situations.

Introduction

Une des problématiques les plus courantes en traitement d'images est la reconnaissance de formes, dans le but de localiser, caractériser ou simplement détecter la présence de divers éléments dans la scène visualisée.

D'un point de vue général, reconnaître une forme revient à identifier, à travers les données fournies par un capteur, la nature de l'objet à l'origine de ces données. Il s'agit donc d'un problème inverse, qui soulève des difficultés de deux ordres :

- Une même classe d'objets, dont la définition est souvent abstraite, peut avoir des « instanciations » diverses dans le monde réel. Le problème est alors de déterminer des invariants pertinents pour caractériser cette classe.
- Le capteur, par nature, fournit une représentation réduite de l'univers qu'il perçoit. Il est donc susceptible, dans certains cas, de donner une même représentation de phénomènes d'origines différentes.

En traitement d'image, l'approche la plus classique consiste à traiter ces deux aspects séparément, selon deux étapes successives :

- La première étape est la **segmentation**, opération consistant à réaliser une partition de l'image en un nombre réduit de régions distinctes. S'agissant de vision, ces régions correspondront généralement à des états de surface particuliers, se distinguant les uns des autres par leurs caractéristiques de luminance, de couleur, de texture, d'homogénéité, etc. C'est donc à cette étape qu'est prise en compte la « traduction » par le capteur d'image de la scène qu'il perçoit.
- La deuxième étape est l'**analyse de forme** proprement dite. Basée sur les résultats de l'étape précédente, elle consiste à analyser la géométrie des régions segmentées, de façon à retrouver les classes d'objets qu'elles représentent. La procédure consiste généralement à évaluer des vecteurs descripteurs (surface, périmètre, moments d'inertie...) servant d'entrée à une procédure de classification.

Dans une telle approche, la qualité de la segmentation initiale est essentielle. Cela suppose d'une part, que la nature de la surface visualisée puisse être déduite sans ambiguïté à partir des attributs locaux des pixels qui lui correspondent dans l'image, d'autre part qu'une région segmentée corresponde à un objet unique et vu en totalité, faute de quoi le calcul de descripteurs n'a plus de sens.

Or aucune de ces deux conditions ne peut être assurée de façon formelle lorsqu'il s'agit d'images issues d'un système de vision, excepté dans le cas de scènes très simples, et généralement adaptées à cet effet. Les attributs locaux tels que la luminance ou la couleur, par exemple, dépendent autant des propriétés de

réflectance des surfaces que de l'éclairage auquel elles sont soumises. De même, une image étant la projection 2D d'un environnement 3D, on aura *a priori* des phénomènes de recouvrement et d'obstruction partielle des objets observés.

Ces difficultés, particulièrement importantes dans le cas de scènes naturelles en éclairage non contrôlé, sont liées au principe même de réduction d'information du processus de vision. Or dans de nombreux cas, on dispose par ailleurs d'une certaine connaissance *a priori* que l'on a sur la forme globale des objets que l'on recherche. Une réponse possible est donc d'introduire, *dès la phase de segmentation*, cette connaissance pour lever les ambiguïtés lors de la classification locale des pixels.

C'est le principe même de l'approche par modèle, qui consiste à guider la recherche dans l'image en se donnant un modèle de forme *a priori*, que l'on va chercher à ajuster sur les données perçues. Dans le cas général, ces modèles seront « déformables », afin de s'adapter à la variabilité géométrique de la classe d'objets qu'ils représentent.

Dans cet article, nous présentons les principes généraux de mise en œuvre des modèles déformables, ainsi qu'un exemple de leur application dans le cadre de nos travaux concernant la détection des mauvaises herbes par vision numérique de terrain.

1 Notions sur les modèles déformables

1.1 Principe de base

Qu'il s'agisse de modèles rigides (géométrie fixe) ou déformables, leur utilisation pour reconnaître une forme va consister à rechercher s'il existe des ajustements dans l'image (en terme de position, orientation, et éventuellement déformation du modèle) pour lesquels les attributs des pixels correspondants sont globalement plausibles. Pour un modèle définissant un contour, par exemple, il faudra qu'une majorité des pixels situés sur ce contour correspondent effectivement à une transition de niveau de gris ou de couleur, situation qui peut être quantifiée par un *indice de qualité, ou énergie* de l'ajustement (somme des normes de gradient de niveau de gris le long du contour, par exemple).

Dans ce contexte, les formes recherchées seront celles pour lesquelles l'ajustement du modèle a un indice de qualité maximum (elles seront alors directement décrites par le modèle), et le problème revient à la recherche des extrema locaux d'une fonction. Toutefois, dans le cas général, une recherche systématique de ces extrema n'est pas envisageable. On est donc contraint de procéder par des méthodes d'optimisation locales itératives, qui dans le cas présent relèveront toutes de la méthode de descente de gradient, à quelques variantes près.

Il s'ensuit quelques principes généraux énumérés ci-dessous :

- La mise en œuvre de ces modèles requiert systématiquement une phase d'initialisation, dans laquelle le modèle est placé à proximité de la région d'image candidate. Cette phase d'initialisation, basée sur la recherche de régions d'intérêt dans l'image, devra être étudiée au cas par cas pour chaque application.
- S'agissant de minimiser une énergie dépendant de paramètres de nature spatiale (position, orientation, déformation), cette énergie est assimilable à un potentiel, et le gradient à une force. L'opération d'ajustement peut donc être considérée, par analogie mécanique, à l'action itérative de forces élémentaires appliquées par l'image sur le modèle (Par extension, d'autres types de forces, non issues d'un potentiel, pourront également être introduites dans certaines applications).
- Selon le cas, la connaissance *a priori*, c'est-à-dire les contraintes que l'on s'impose sur la forme cherchée, pourront être intégrées dans la définition du modèle lui-même, ou dans l'énergie d'ajustement que l'on cherche à optimiser. Dans ce dernier cas, on parlera d'énergie « interne » (cf. plus bas « contours actifs »).
- Enfin, notons que la procédure d'ajustement local itératif rend également l'approche par modèle particulièrement attractive pour les applications de suivi dynamique de cible dans une image, lorsque la position de la cible varie peu d'une image à l'autre.

1.2 Etat de l'art

Un état de l'art exhaustif a été publié sur les différents types de modèles déformables ([Jain, 1998]). A l'origine, les premières recherches concernaient des modèles rigides sur lesquels étaient appliquées des transformations simples (rotation, translation). Par la suite, les modèles déformables ont été conçus pour prendre en compte la variabilité de forme des objets.

Il existe deux types principaux de modèles déformables : les modèles dits à forme libre, autrement appelés contours actifs ou *snakes*, et les modèles paramétriques.

1.2.1 Contours actifs

Les contours actifs ont été introduit par [Kass, 1988] et constituent la base de la théorie des contours déformables : ils utilisent une représentation des contours basée sur une chaîne de points, soumise à des contraintes de régularisation lui permettant d'avoir une structure plus ou moins rigide.

L'indice de qualité est donc défini ici comme une fonction d'énergie contenant à la fois un terme E_{image} relatif aux propriétés de l'image ainsi qu'un terme $E_{interieure}$ relatif aux contraintes internes du système :

$$E_{totale} = \int_0^1 (E_{interieure}(v(s)) + \lambda E_{image}(v(s))) ds \quad (1)$$

avec s l'indice de parcours de la courbe normalisé entre 0 et 1
 $v(s)$: le contour de la courbe
 $E_{\text{intérieure}}$: Energie interne du modèle.
 E_{image} : Energie potentielle de l'image.
 λ : coefficient de pondération.

Plus précisément, le terme **Eintérieure** va correspondre à une énergie prenant en compte la courbure et la longueur du contour, qui va ainsi limiter le degré de déformation de la chaîne de points.

Quant au terme **Eimage**, il dépend de la structure à mettre en évidence. Ainsi, par exemple, si l'on souhaite que le modèle soit attiré par les points de contours de l'objet, Eimage sera une fonction du gradient de l'image. Si l'objet est délimité par des lignes sombres, Eimage sera une fonction de l'intensité. Il en est de même si l'on veut attirer le modèle par rapport à la texture ou à la couleur de l'objet ([Zhu, 1996]), ou encore à ses propriétés de région ([Ronfard, 1994]).

Le minimum de cette énergie correspond en théorie à l'équilibre entre régularité de la solution et adéquation avec les données, pondéré par le paramètre λ .

1.2.2 Modèles paramétriques

Les modèles paramétriques, quant à eux, sont capables de coder par un nombre fini de paramètres une forme d'objet et ses variations, lesquelles sont spécifiées par les valeurs admissibles des paramètres. Dans ces conditions, l'adjonction de contraintes internes dans l'énergie n'est en général pas nécessaire, ces contraintes étant directement imposées par le modèle lui-même.

Par ailleurs, l'optimisation de l'indice d'ajustement se fera dans l'espace des paramètres du modèle, et non plus dans l'espace de l'image.

De par leur conception, ces modèles se sont avérés très adaptés dans les domaines où la structure des objets est complexe, comme l'imagerie médicale [Bardinet, 1995], ou la reconnaissance de visage [Yuille, 1992]. Ils sont utilisés aussi bien pour la reconnaissance d'objet que pour le suivi (application au suivi de véhicules) [Dubuisson-Jolly, 1996] ou la stéréovision [Bascle, 1994].

2 Exemple d'application

2.1 Objectifs

Les travaux présentés ici entrent dans le cadre du développement du désherbage localisé. En effet ce concept, basé sur la connaissance de la répartition spatiale des diverses variétés de mauvaises herbes (qui n'est généralement pas

homogène), et de leur nuisibilité (évaluée à partir de modèles agronomiques de croissance et de compétition), permettrait de réduire considérablement la quantité d'herbicide utilisée, pour une efficacité équivalente. Pour cela, des outils de vision numérique performants doivent être développés, capables de détecter, reconnaître et caractériser diverses espèces d'adventices.

Deux approches de contrôle des mauvaises herbes sont possibles :

- L'approche temps réel, où la localisation et le traitement des mauvaises herbes sont effectués durant la même opération, notamment par électrocution ([Roger, 1997]). Le travail est effectué ici en conditions extérieures, mais il existe encore des problèmes de segmentation (chevauchement des feuilles des plantes, présence de résidus au sol...), qui réduisent la robustesse du système.
- L'approche par cartographie, où l'on collecte d'abord les informations spatiales et qualitatives sur les mauvaises herbes, avant d'élaborer la stratégie de désherbage.

Dans cette dernière approche, deux types d'images ont été utilisés : les images satellitaires et de terrain. Les images satellitaires permettent la localisation et la possibilité d'identification globale des populations de mauvaises herbes par l'étude du spectre de la parcelle dans le proche IR [Brown, 1994]. Concernant l'utilisation d'images de terrain, plusieurs études ont montré la possibilité de classer statistiquement les espèces suivant leurs propriétés de couleur [Woebbecke et al, 1995], de texture [Shearer & Holmes, 1990] ou de forme [Guyer, 1986]. Mais ces études sont réalisées en conditions de laboratoire, afin d'éviter les problèmes de segmentation.

Notre étude rentre dans la seconde approche, où l'on cherche à développer un outil de caractérisation automatique du couvert végétal. Nous proposons une méthode de segmentation des feuilles de mauvaises herbes plus robuste, basée sur l'utilisation de modèles paramétriques déformables, à partir d'images de terrain en conditions extérieures.

2.2 Recherche d'un modèle paramétrique

Dans notre étude, il nous est paru intéressant d'étudier un modèle de feuille, élément de base, qui nous permettrait par la suite d'identifier chaque espèce suivant la forme de la feuille, puis de la caractériser en assemblant les feuilles.

Le modèle choisi est constitué d'un squelette paramétrable analytiquement (par exemple par un polynôme du second degré) sur lequel se greffe, symétriquement par rapport à l'axe, une enveloppe elle-même paramétrable (voir figure 1).

La paramétrisation du modèle s'exprime sous la forme :

$$\begin{pmatrix} x(i) \\ y(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s(i) \\ y_s(i) \end{pmatrix} + f_E(i) \begin{pmatrix} p_{x_N}(i) \\ p_{y_N}(i) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Avec i l'indice de parcours du modèle
 (x, y) les coordonnées des points de contour du modèle
 (x_s, y_s) : le point du squelette
 f_E : la fonction de l'abscisse du squelette constituant l'enveloppe
 (x_n, y_n) : le vecteur normal au squelette en (x_s, y_s)

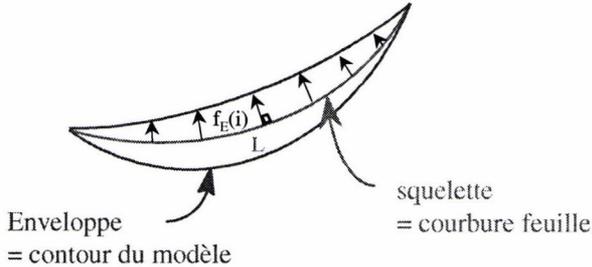


Figure 6 : Schéma du modèle de feuille utilisé

Ce modèle a l'avantage d'être assez flexible au niveau de la structure car on peut changer la fonction analytique du squelette ou de l'enveloppe (via f_E) afin de s'adapter au mieux à la courbure de la feuille ainsi qu'aux différentes formes de feuilles de mauvaises herbes.

2.3 Définition des forces dues à l'image

Afin de faire évoluer le modèle sur l'image, nous avons choisi d'utiliser l'information couleur, bien adaptée à la segmentation de végétation.

2.3.1 Caractérisation par la couleur

Dans une première étape, la couleur de la plante doit être caractérisée. Pour cela, des pixels de la plante sont prélevés dans l'image, et la moyenne et la covariance sont calculées dans l'espace RVB. On assimile ensuite la classe des pixels appartenant à la plante à une forme gaussienne. Le seuil d'appartenance à cette classe correspond à la limite entre les pixels verts (appartenant à la plante) et non-verts (le reste de l'image), comme le montre le schéma de la figure 2.

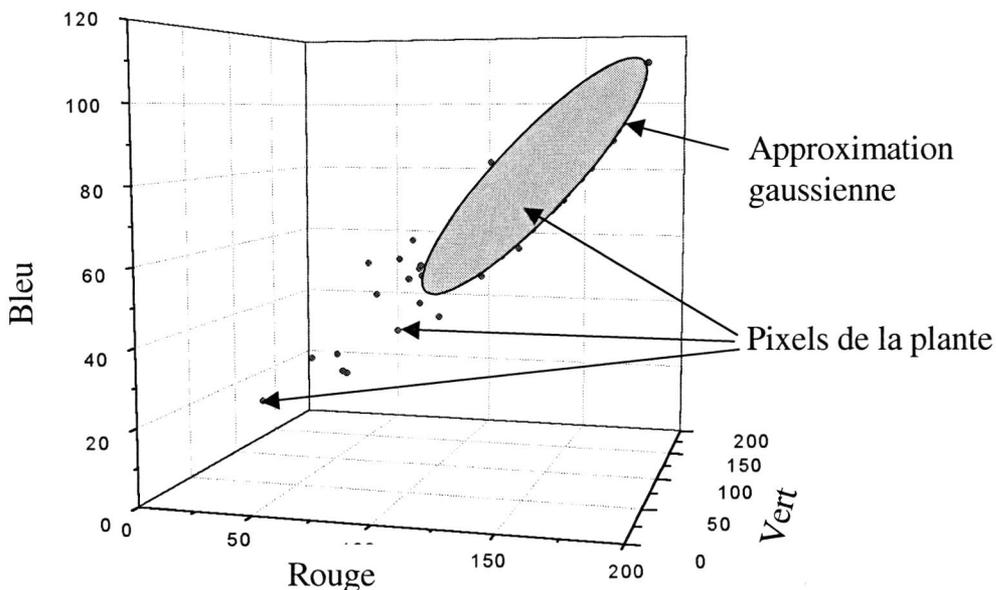


Figure 7: Représentation de la classe de couleur plante et approximation dans l'espace RVB

Pour chaque pixel x d'une image, on calcule la distance d dite de Mahalanobis, pour une classe de matrice de covariance C_i et de moyenne μ :

$$d^2 = (x - \mu)^T C_i^{-1} (x - \mu) \quad (3)$$

entre la valeur du pixel courant et la moyenne à la classe.

Après classification de chaque pixel de l'image suivant sa distance de Mahalanobis, on obtient une image de "distance à la classe verte" (voir figure 3) qui permet de distinguer les plantes vertes du reste de l'image, et qui va nous servir de base pour la définition de nos forces de déplacement.

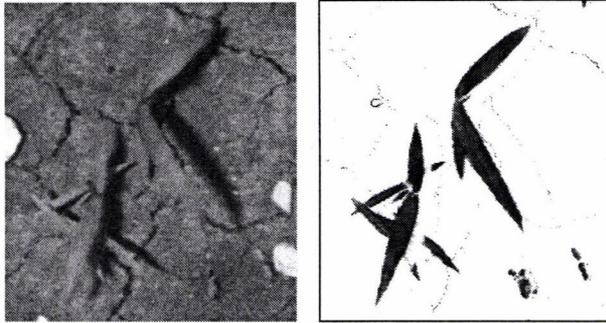


Figure 8 : a. Image de départ

b. Image de distance à la classe verte

2.3.2 Elaboration des forces extérieures

Les forces extérieures sont appliquées tout le long du contour du modèle.

Ces forces sont (voir schéma de la figure 4) :

- normales au contour et dans l'axe du squelette aux deux extrémités du modèle,
- d'intensité algébrique ($d-s$)

(d : distance à la classe verte ; s : seuil d'appartenance à la classe)

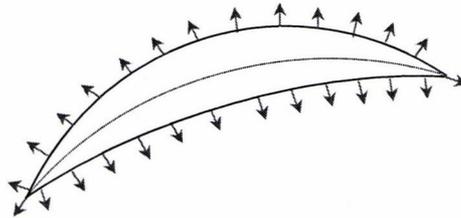


Figure 9 : Représentation des vecteurs de forces appliqués au modèle

Il en résulte que le modèle s'étend là où il est placé sur des pixels verts et se rétracte dans le cas contraire, tendant ainsi à se positionner sur la frontière.

2.4 Evolution du modèle sur l'image

Les forces appliquées sur le modèle vont soumettre le modèle à des déplacements qui vont l'obliger, à chaque itération, à adapter ses paramètres de façon à correspondre au mieux aux déplacements souhaités. Plutôt que traduire directement ces forces par une modification des paramètres, nous avons choisi de les traduire ici en déplacements élémentaires sur l'image. Ceci nous permet de procéder à une identification par la méthode de Newton, plus rapide à converger vers la solution.

Le vecteur de paramètres est donc soumis à la correction :

$$\begin{bmatrix} \dots \\ dp_i \\ \dots \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dots & \frac{\partial \dots}{\partial x_j} & \dots \\ \dots & \frac{\partial \dots}{\partial p_i} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dots \\ x_j \\ \dots \end{bmatrix}$$

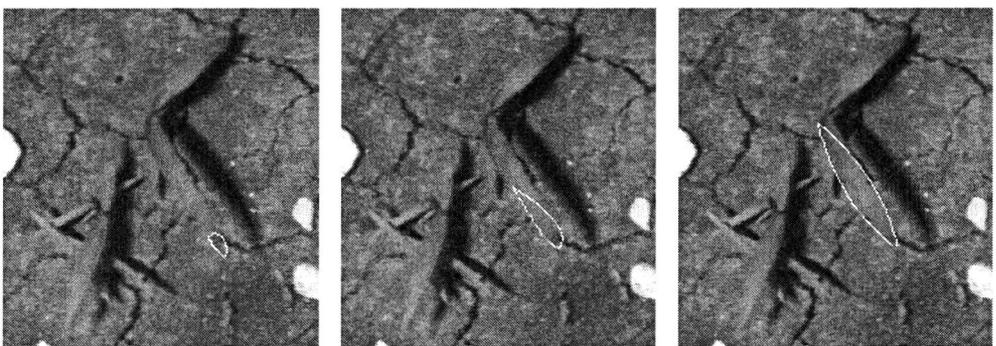
Hk^{-1}

4)

où dp est le vecteur de correction à appliquer sur le vecteur de paramètres p
 x est le vecteur des déplacements appliqués sur l'ensemble des points du modèle

2.5 Résultats expérimentaux

Cette méthode nécessite une étape d'initialisation. Nous avons choisi de prendre les extrémités des feuilles pour le positionnement initial manuel du modèle. Les résultats de la figure 5 sont montrés pour une feuille particulière lors de différentes étapes intermédiaires .



a. Position initiale b. Après 20 itérations c. Après 90 itérations

Figure 10 : Evolution du modèle (étapes intermédiaires)

La figure 6 montre les résultats obtenus après avoir initialisé le modèle à chaque extrémité de feuille. Des recherches sont actuellement en cours pour initialiser de manière automatique les points de départ du modèle.

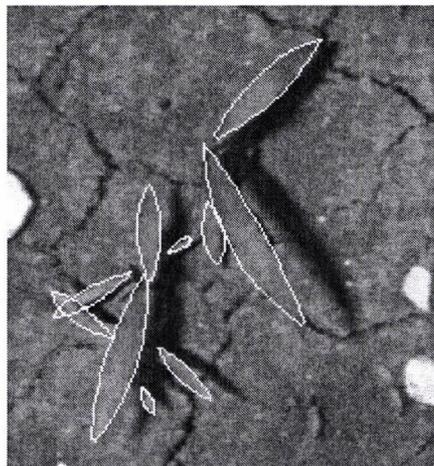


Figure 11 : Résultats sur toutes les feuilles de l'image

Ces premiers résultats montrent qu'il est possible de localiser de façon correcte les feuilles sur l'image, y compris celles qui se chevauchent, répondant ainsi à une des difficultés essentielles qui a motivé cette approche.

3 Conclusions et perspectives

Comme nous avons pu le constater, les modèles déformables montrent tout leur intérêt dans la reconnaissance de formes. Ils permettent de prendre en compte une connaissance *a priori* sur la forme recherchée, guidant ainsi la localisation de la forme dans l'image.

D'autre part, la structuration du modèle procure une certaine robustesse dans la segmentation, notamment par rapport au bruit et aux occlusions possibles des objets.

En revanche, on retiendra que ces modèles sont contraints par la nécessité d'une initialisation correcte dans l'image pour faire converger le modèle vers sa solution, sans se bloquer dans des minima locaux. Ils demandent également une modélisation correcte, suffisamment représentative de la forme étudiée.

Références bibliographiques

- Bardinet E., 1995. Modèles déformables contraints : applications à l'imagerie cardiaque. Université PARIS-IX Dauphine. UFR Mathématiques de la décision. Thèse de Mathématiques appliquées à l'ingénierie, 173 p.
- Bascle B., 1994. Contributions et applications des modèles déformables en vision par ordinateur. INRIA, Université de Nice Sophia-Antipolis. 188 p. Thèse de Sciences.
- Brown R., Steckler J.-P. et al., 1994. Remote sensing for identification of weeds in no-till corn. *Transactions of the ASAE* **37**(1): 297-302.
- Dubuisson Jolly M., Lakshmanan S. et al., 1996. Vehicle segmentation and classification using deformable templates. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **18**(3): 293-308.
- Guyer DE., Miles GE. et al., 1986. Machine vision and image processing for plant identification. *Transactions of the ASAE* **29**(6): 1500-1507.
- Jain A., Zhong Z. et al., 1998. Deformable template models : a review. *Signal Processing* **71**(2): 109-129.
- Kass M., Witkin A. et al., 1988. Snakes : Active contour models. *International Journal of Computer Vision*: 321-331.
- Roger J.M., Molto N et al., 1997. Design of a Robotized, non-chemical weed controller. *Bio-Robotics*, Valence, Espagne. 229-235.
- Ronfard R., 1994. Region-based strategies for active contour models. *International Journal of Computer Vision* **13**(2): 229-251.
- Shearer S.A., Holmes R.G., 1990. Plant identification using color co-occurrence matrices. *Transactions of the ASAE* **33**(6): 2037-2044.
- Woebbecke D.M., Meyer G.E. et al., 1995. Color indices for weed identification under various soil, residue and lighting conditions. *Transactions of the ASAE* **38**(1): 259-269.
- Yuille A., Hallinan P. et al., 1992. Feature extraction from faces using deformable templates. *International Journal of Computer Vision* **8**(2): 99-111.
- Zhu S., Yuille A., 1996. Region Competition : Unifying snakes, region growing, and Bayes/MDL for multiband image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **18**(9): 884-900.

Reconnaissance par télédétection rapprochée des vignes et analyse de leur structure spatiale à l'aide d'une analyse fréquentielle intra-parcellaire.

Application au suivi des effets des pratiques culturales.

Vineyard identification and description of spatial crop structure by close remote sensing using per-field frequency analysis.

Application to the monitoring of the effect of agricultural practices.

Jean-Marc Robbez-Masson*, Tom Wassenaar*, Patrick Andrieux*, Frédéric Baret**

* UMR Science du Sol INRA-ENSA.M,
2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier cedex 02.
Tel. 04 99 61 25 22. Fax. 04 67 63 26 14.
Mél robbez@ensam.inra.fr Web <http://sol.ensam.inra.fr>

** INRA, UR Bioclimatologie,
Site Agroparc, 84 914 Avignon cedex 09

Résumé :

Les états de surface des sols et la structure du parcellaire jouent un rôle primordial sur les flux d'eau et de polluants sous vignes en milieu méditerranéen. Caractériser et reconnaître ces paramètres à l'échelle d'un ou de plusieurs bassins-versants est indispensable à la compréhension des phénomènes de crues et de pollutions agricoles, à la bonne gestion de la ressource en eau disponible pour les cultures ainsi qu'à la prédiction de risques environnementaux. Une démarche d'acquisition et d'utilisation de données issues de télédétection aéroportée à haute résolution spatiale a été mise au point dans cette étude pour automatiser le renseignement du parcellaire viticole sur de vastes zones - la finalité étant de pouvoir alimenter des modèles hydrologiques distribués fonctionnant sur une base parcellaire.

Dans ce contexte, des mosaïques d'ortho-images prises par hélicoptère dans les domaines du visible ont été traitées par analyse de spectres de Fourier. On en déduit par une procédure automatique l'occupation du sol, le mode de conduite (palissé/gobelet) et la géométrie des rangs (écartement, orientation, couvert végétal). Les résultats, précis et reproductibles, enrichissent une base de données parcellaire. La méthodologie développée semble (i) portable à d'autres types de cultures discontinues et d'autres milieux, et (ii) encourageante dans la perspective de caractériser d'autres paramètres d'intérêt hydrologique (type de désherbage de l'interrang, taux de couverture par la vigne et par l'herbe, pierrosité ...).

Abstract :

Under mediterranean viticultural conditions, rainfall and pollutant runoff are to a large extent determined by soil surface features and field structure. Recognising these surface variables at the scale of one or more catchments is mandatory for the comprehension of flooding events, agricultural pollution, and water resource management. The approach adopted by this study is to update vineyard information over large areas on the basis of airborne remote sensing, providing high resolution data. At the end this should provide field data to spatially distributed hydrological models.

Within this context, colour image mosaics have been analysed on the basis of a per-field Fourier transform. An automatic analysis provides land cover, training mode (wire-trained/goblet) and geometry of vine rows (spacing, orientation and cover). The accurate and reproducible data enrich the field database. The method seems (i) transposable to other regions and other discontinuous crops, and (ii) an encouraging perspective for the study of other hydrologically interesting parameters (agricultural practises, weed cover ...).

1 Position du problème

Les résultats scientifiques obtenus depuis plusieurs années sur des bassins-versants expérimentaux montrent l'importance des états de surface des sols et de la structure du parcellaire sur les flux d'eau et de polluants en milieu méditerranéen viticole (Dunne *et al.* 1991; Valentin et Bresson 1992; Leonard et Andrieux 1998). Caractériser et reconnaître ces paramètres à l'échelle d'un ou de plusieurs bassins-versants est indispensable à la compréhension des phénomènes de crues et de pollutions agricoles, à la bonne gestion de la ressource en eau disponible pour les cultures ainsi qu'à la prédiction de risques environnementaux. Les études montrent que des relevés rapides, spatialement exhaustifs et diachroniques des états de surface des sols, renseigneraient assez précisément sur les capacités d'infiltration, et seraient de nature à nourrir les modèles hydrologiques distribués, développés par ailleurs.

Cependant l'acquisition de ces paramètres sur le terrain est lourde et peu fiable du fait (i) du très grand nombre de parcelles à couvrir (plusieurs dizaines par km²), (ii) du biais engendré dans les estimations par le temps mis à parcourir les parcelles (l'observateur n'est pas unique, il produit des estimations variables dans le temps, l'état des parcelles varie avec le temps), (iii) de la difficulté d'obtenir, par une vision de terrain tangentielle et partielle, des estimateurs fiables de ces paramètres. Automatiser le renseignement de l'espace viticole par ces paramètres sur de vastes zones est donc un enjeu considérable.

Dans ce contexte, les outils de télédétection semblent des moyens d'inventaire et de suivi privilégiés du fait de leur large couverture géographique, du caractère instantané de la mesure, de l'aspect numérique de l'information, de la répétitivité et de l'objectivité de la mesure, de l'absence de biais (Courault 1989; Escadafal 1994; Escadafal *et al.* 1995a; Escadafal *et al.* 1995b).

La présente étude se donne pour objectif d'automatiser le renseignement de bases de données géographiques par utilisation de données issues de télédétection. Dans cet exposé on se limitera à des paramètres ayant trait à l'occupation du sol et à sa géométrie (type de motif : continu, bandes, damiers ... ; orientation et taille des motifs).

2 Démarche

2.1 Description des sites : un apprentissage stratifié

La moitié inférieure de la vallée de la Peyne, affluent du fleuve Hérault, a été retenue pour cette étude : cette surface de quelque 6000 ha, située dans la plaine côtière du département de l'Hérault à environ 60 km à l'ouest de Montpellier (43°37'N, 3°51'E), est essentiellement agricole et dominée par la culture de la vigne (70% de la surface totale) sur des parcelles de petite taille (0.4 ha en moyenne). Elle peut être considérée comme représentative des conditions de milieu (géologie, géomorphologie, climat et sols), des contraintes socio-économiques et des pratiques culturelles de la zone viticole méditerranéenne française. C'est la région à renseigner *in fine* par une base de données parcellaire.

A l'intérieur de la basse vallée de la Peyne, 4 secteurs sont suivis quant à leurs états de surface depuis 3 ans. L'un de ceux-ci (bassin-versant expérimental de Roujan) est équipé d'un lourd dispositif de suivi hydrologique.

À l'intérieur de cette zone, quatre sites d'environ 1 km² ont été retenus de manière à rendre compte de la diversité des organisations spatiales de sols, des logiques de commercialisation du vin et de la position le long du bassin-versant. L'ensemble totalise 465 parcelles sur lesquelles on dispose à la fois d'un cadastre numérique et d'observations de terrain relatives aux états de surface des sols, à l'occupation du sol et au mode de conduite, plusieurs fois par an et ce depuis 3 ans. Sur ces quatre sites ont été conduites des acquisitions exhaustives de photographies aériennes par nos soins aux mêmes époques. C'est sur ces sites qu'est mise au point la méthodologie de ce travail (figure 12). Le site situé sur la commune de Neffiès servira ici à illustrer les résultats obtenus par la méthode présentée.

Enfin, l'un de ces quatre sites - le bassin-versant expérimental de Roujan - a été lourdement équipé par l'UMR INRA-Agro.M de Science du Sol de Montpellier, pour un suivi hydrologique en continu (Voltz *et al.*, 1998), et ce depuis 1991 ; c'est sur ce site qu'a été mise au point la liste des paramètres relatifs aux états de surface pertinents en termes d'hydrologie et leur nomenclature (figure 12, photo).

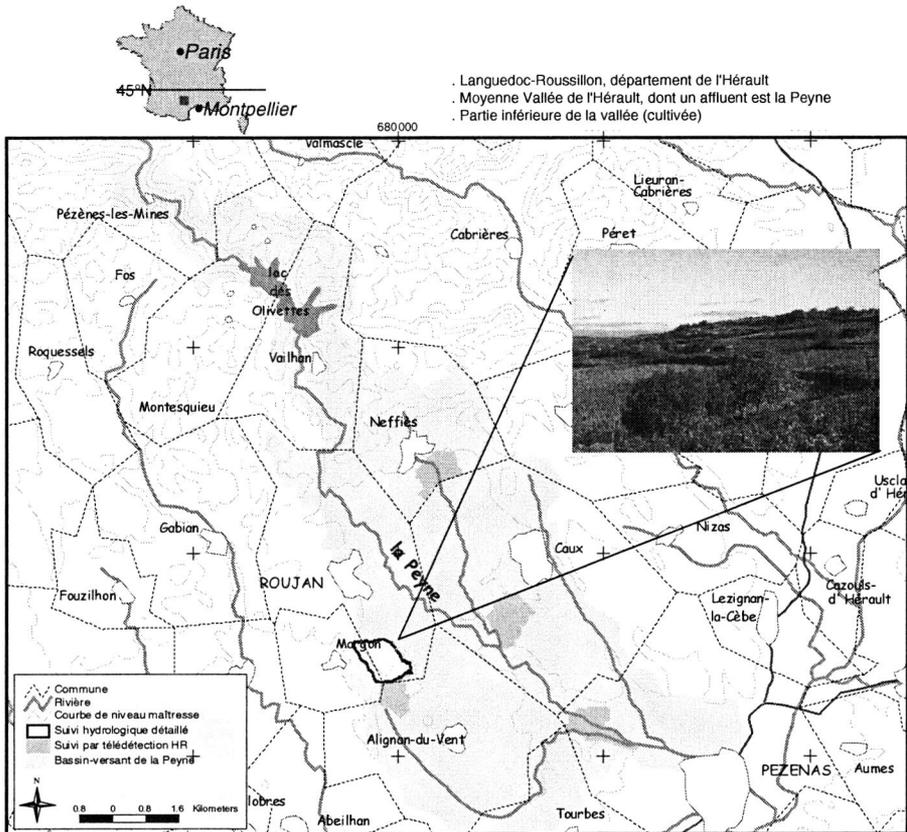


Figure 12 : Zone d'étude.

2.2 La viticulture méditerranéenne : des motifs spatiaux originaux

Le milieu viticole est caractérisé par une grande hétérogénéité de structures spatiales. La taille des parcelles varie entre environ 0,05 et 3 ha, où les petites couvrent la plupart de la surface. Chaque parcelle est caractérisée par sa pratique culturale propre, qui est déterminée par sa localisation, la disponibilité en eau, l'orientation, l'encépagement, la qualité du site, l'objectif de production, la conviction du viticulteur et tout un ensemble de facteurs socio-économiques. On trouve ainsi de forts contrastes entre des parcelles contiguës. Ces pratiques culturales peuvent aussi introduire une hétérogénéité à l'intérieur de la parcelle : des rangs peuvent être regroupés en blocs, certains interrangs peuvent ne pas être traités comme d'autres ...

On trouve autant de variété dans le mode de conduite de la vigne. Champagnol (1984) reconnaît neuf types de géométrie de la vigne, dont quatre sont courants dans la région méditerranéenne. D'un point de vue hydrologique trois d'entre eux (cylindre, cône inversé et hémisphère) peuvent être regroupés sous le vocable 'gobelet', *i.e.* des ceps individuels spatialement distribués sur un motif de grille. Ceci est le mode de conduite classique de la région : une grille régulière avec un espacement de $1,5 \times 1,5\text{m}$ ou légèrement rectangulaire, *i.e.* $1,4 \times 1,6\text{m}$ (Argillier 1989; Goma-Fortin *et al.* 1997). L'autre mode de conduite est appelé 'palissé', c'est-à-dire qu'il est formé de rangs de vignes rectilignes où la végétation est conduite le long de deux ou plusieurs fils horizontaux. Ici l'écartement entre les rangs varie de 2,0 à 2,5m en fonction de la disponibilité de l'eau et la hauteur des rangs. L'orientation est fonction de l'exposition, mais aussi de la morphologie du terrain et de la géométrie de la parcelle. Actuellement un peu plus de la moitié des vignobles méditerranéens est palissée. Cette proportion s'accroît avec la progression de la mécanisation. Pourtant un nombre non négligeable de domaines privés et même de caves coopératives, continue à préférer la conduite en gobelet.

La géométrie de ces modes de conduite est un indicateur pertinent pour le fonctionnement hydrologique des parcelles, comme cela a été montré sur le site-atelier de Roujan. La présente étude vise notamment à les reconnaître par télédétection.

2.3 Acquisition des données

2.3.1 La résolution spatiale et la bande spectrale retenues

Il ressort de la description précédente des vignobles, ainsi que des résultats des études existantes en milieu viticole (Wildman 1979; Minden et Philipson 1982; Trolier *et al.* 1989; Company *et al.* 1994; Hill *et al.* 1994; Company *et al.* 1995; Johnson *et al.* 1998), que le choix de la résolution spatiale de l'information est primordial pour la qualité du résultat. Cette résolution doit être en relation avec la variabilité spatiale du terrain (Curran 1999). Dans notre cas en effet, il importe de pouvoir distinguer entre la vigne et la surface du sol. Comme on connaît l'ordre de grandeur des tailles de motifs recherchés, des méthodes statistiques de recherche comme celles proposées par Atkinson (1997) n'ont pas été considérées. En définitive, pour une localisation précise des ceps (donnant accès à leur écartement) et pour pouvoir distinguer la surface éclairée du sol dans toutes les conditions géométriques d'illumination et de vue, une résolution de $0,25 \times 0,25\text{m}$ a été ici considérée comme optimale.

À cette résolution spatiale, le domaine du visible apparaît approprié pour reconnaître les rangs et les interrangs. Par ailleurs les capteurs novateurs couramment utilisés dans la recherche en télédétection, tels que les imageurs multi-spectraux et le radar, butent actuellement sur ce problème de pouvoir de résolution spatiale [voir les études sur la vigne de Hill *et al.* 1994; Company *et al.* 1995; Company-Remond 1997]. La photographie aérienne à moyenne/basse altitude semble ici un moyen judicieux.

2.3.2 Dates des prises de vues

Les prises de vues ont été planifiées de manière à saisir le maximum de changements des états de surface du sol : les dates couvrent la saison de travail du sol habituelle, soit la période de mars à juin (2 à 3 passages par an).

2.3.3 Matériel

Les prises de vue ont été réalisées sous forme de photographies aériennes à partir d'un hélicoptère Hughes 300 à une altitude avoisinant 1100 m, à l'aide d'un appareil photographique format 24 x 36 mm doté d'un objectif 35 mm et de pellicules diapositives couleur. Les diapositives ont été numérisées sur un scanner approprié (Nikon LS-1000) à 2700 dpi, soit une taille de pixel au sol de 20 à 25 cm. Puis les images ont été radiométriquement corrigées par la méthode de la ligne empirique (Lillesand et Kiefer 1994). Enfin elles ont été géométriquement corrigées et mosaïquées. La chaîne de traitement a été réalisée à l'aide du logiciel IDL/ENVI (Research Systems International, Boulder Colorado).

2.3.4 Vérité terrain et données SIG

Les prises de vue ont été accompagnées d'observations au sol. Ces observations par parcelle, comprenant la culture, le mode de conduite et l'état de surface du sol, ont été enregistrées sous forme d'une base de données géographique. D'autres couches géographiques disponibles sous forme numérique sont une base de données topographique IGN (1:25.000), un MNT au pas de 10m, le cadastre et des cartes pédologiques et géologiques.

3 L'exemple de la reconnaissance des vignes et de leur structure spatiale : une première étape

3.1 Une approche par parcelle

La modélisation hydrologique distribuée exige que les paramètres d'entrée soient rattachés à une entité spatiale explicite. Cette entité doit remplir deux conditions :

- 1 Elle doit représenter une surface dont le comportement hydrologique est plus ou moins homogène. Or l'itinéraire technique choisi varie beaucoup entre les parcelles, mais au contraire induit un motif spatial de plantation et une pratique culturale homogènes à l'intérieur de la parcelle. Comme ces deux facteurs conditionnent en grand partie le comportement hydrologique, celui-là se retrouve également homogénéisé à l'intérieur d'une parcelle culturale;
- 2 Le suivi dans le temps exige que l'unité spatiale et son identifiant soient pérennes. Ceci ne serait pas le cas du pixel individuel, vu l'erreur induite par le géoréférencement (+/- un pixel ici), ni d'une segmentation parcellaire qui serait obtenue sur l'image.

Par ailleurs et sur cette zone, les parcelles cadastrales sont quelquefois regroupées en parcelles culturales (quelques pourcents des parcelles), le contraire étant moins fréquent.

Il résulte de ces critères qu'une couverture cadastrale définie au préalable est un moyen intéressant de constituer cet ensemble d'entités. Chaque parcelle sera ainsi renseignée avec les informations extraites de la partie de l'image contenue dans ses limites. De telles approches "par parcelle" deviennent de plus en plus courantes en télédétection (Mason *et al.* 1988; Smith *et al.* 1997), et ce grâce au développement des systèmes d'information géographiques (Hinton 1996; Wilkinson 1996).

3.2 Quelle stratégie d'analyse ?

Les parties d'images correspondant à l'intérieur de la parcelle se caractérisent par une radiométrie qui est fonction de l'occupation du sol. Pour une occupation autre que la vigne ou qu'un verger, ce signal est plus ou moins spatialement homogène. Pour une vigne, la surface peut être caractérisée par un signal homogène, mais aussi bien très hétérogène, et sa radiométrie peut varier très considérablement de vignoble en vignoble (figure 13). Le seul facteur constant parmi les vignobles est la superposition sur cette surface d'un motif régulier stationnaire induit par la vigne elle-même.

Il nous faut donc un opérateur sensible surtout à des fréquences spatiales stationnaires, de manière à pouvoir les isoler. De plus nous souhaitons pouvoir confronter notre connaissance préalable de la géométrie de ce motif à la structure détectée et en extraire des paramètres de longueur (écartement) et d'orientation. Parmi diverses approches (Freeman et Adelson 1991; Laine et Fan 1993; Graps 1995; Heeger et Bergen 1995; Karasaridis et Simoncelli 1996; Mallat 1998; Starck *et al.* 1998), la transformation Fourier est le seul opérateur correspondant à ces critères et a donc été retenu pour cette analyse. Cette transformation est appliquée au canal rouge, c.-à-d. la partie de l'information spectrale dont on dispose où la culture de la vigne et la surface du sol présentent la meilleure contraste.



Figure 13 : Le vignoble vu du ciel en mai 1998 : un exemple.

Sur ce fragment d'une mosaïque d'image on perçoit bien la grande variabilité des pratiques culturales (mode palissé / mode en gobelet / désherbage chimique un rang sur 4 ou 6 / ...) et des orientations des rangs. La variabilité intraparcellaire est également visible (arbres dans les parcelles, larges taches d'herbe, ...).

3.3 Brève description du modèle

La figure 14 résume l'ensemble de la démarche. L'étape d'extraction et d'analyse des fréquences maximales potentiellement intéressantes constitue la phase essentielle. Son fonctionnement est illustré dans la figure 15. L'imagette à gauche montre l'information brute extraite d'une parcelle et celle du milieu contient la transformée Fourier de cette information. La partie droite montre la zone centrale du spectre Fourier après l'extraction des fréquences significatives par seuillage. Nous utilisons notre connaissance préalable de la géométrie de la vigne pour délimiter les parties du spectre dont les fréquences sont typiques de la culture de la vigne.

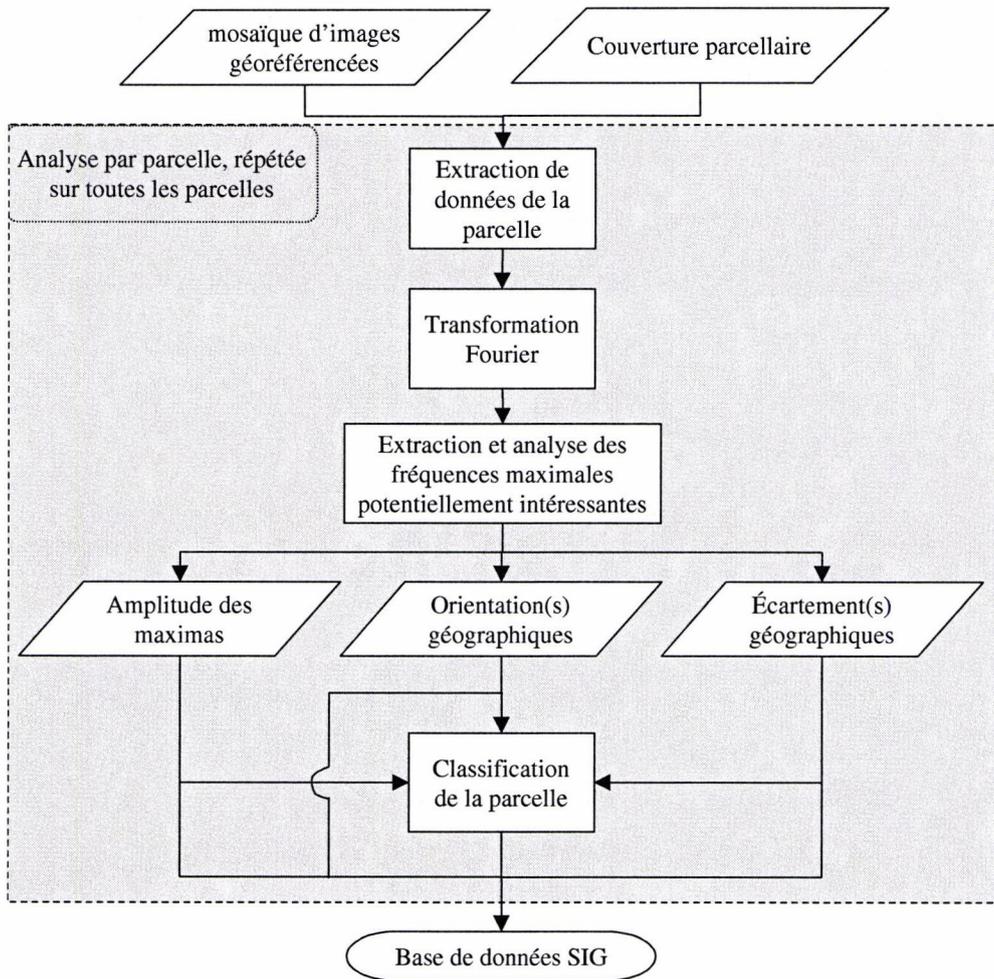


Figure 14 : Organigramme de la procédure.

Dans l'exemple de la figure 15, on trouve 2 paires de fréquence situées dans cette zone (entourées en blanc). Exprimées en longueurs mesurées sur l'orthoimage, ces fréquences sont quasi-perpendiculaires. Ces observations classent la parcelle concernée comme étant en gobelet. À partir de ces fréquences et de leur position dans le spectre, on calcule ensuite l'écartement et l'orientation des rangs.

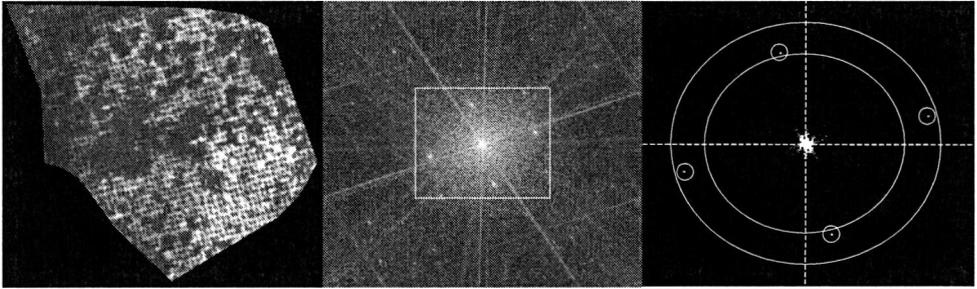


Figure 15 : Extraction et utilisation du spectre Fourier sur la parcelle n° 1 (cf. figure 13).

4 Résultats et discussion

L'illustration de la méthode sur la parcelle n° 1 (figure 15) montre que celle-ci possède effectivement les propriétés décrites précédemment : la parcelle se caractérise par un ensemble de fréquences à différentes échelles superposées : un assombrissement graduel de droite à gauche ; des taches de surface enherbée de grande et petite taille ; le motif répétitif des ceps de vigne ; des variations dans le signal de la vigne et du sol. Dans cet ensemble apparaissant confus, le motif stationnaire correspondant aux rangs de vigne est pourtant identifié sans ambiguïté.

4.1 Occupation du sol et mode de conduite

Le modèle a été appliqué sur l'ensemble de sites pour la campagne de mai 1998. Sur les quelque 400 parcelles, seules 5 % produisent un résultat du modèle en discordance avec les observations de terrain. Ces confusions correspondent à de véritables erreurs - comme ces parcelles de vignes arrachées et présentant toujours des fréquences spatiales typiques de la vigne - mais aussi quelquefois à une "vision" du mode de conduite littéralement différente entre le modèle et le terrain : prenons le cas de parcelles de vigne dont le mode de conduite est en transition entre gobelet et mode palissé ; sur le terrain on se base sur la présence d'un fil de fer conducteur et on classe en mode palissé, là où le modèle se base sur le degré d'alignement et la géométrie spatiale et classe en gobelet. Il n'est pas impossible ici que l'indication fournie par le modèle s'avère d'un plus grand intérêt hydrologique que l'observation du terrain.

4.2 Écartement des rangs

On constate donc que le mode de conduite ne se conforme pas toujours à l'espacement généralement conseillé et traditionnellement utilisé. C'est pourquoi il importe de pouvoir mesurer cette géométrie indépendamment. L'évaluation de la qualité des informations obtenues sur les parcelles traitées montre que la méthode

nous fournit une estimation très précise. Comme le montre la figure 15 (droite) le pixel correspondant à la fréquence de la vigne est identifié sans ambiguïté et l'erreur de l'estimation égale donc la taille du pixel. Dans la zone correspondant à des fréquences dues à la vigne, ceci signifie une variation autour de 2 %. Ceci est confirmé par des mesures manuelles précises à l'écran, montrant un écart moyen absolu de 1,6 cm, soit 1 % d'erreur sur les écartements.

4.3 Orientation des rangs

L'orientation des lignes telle qu'estimée par notre méthode et celle mesurée manuellement à l'écran montrent très peu d'écart (différence moyenne absolue de $1,2^\circ$ sur une vingtaine de parcelles). Des mesures de terrain ont été réalisées sur ces parcelles à l'aide d'une boussole de géomètre. La moyenne des écarts entre résultats du modèle et mesures de terrain est de $1,3^\circ$, soit moins de 1 % d'erreur (20 des 30 mesures montrant même un écart inférieur à 1°). Enfin et même s'il est faible, l'écart moyen de $0,7^\circ$ entre mesures à l'écran et sur le terrain montre qu'une partie de l'erreur est due à l'orthorectification des images.

Conclusion

Les résultats précédents montrent comment une analyse numérique automatique sur des images de télédétection rapprochée permet, par intégration, le renseignement d'une base de données cadastrale disponible dans un Système d'Information Géographique. La démarche permet d'identifier les vignobles et leur mode de conduite, ainsi que de décrire la structure spatiale de la culture. Les perspectives en sont nombreuses.

Une évaluation détaillée du potentiel de cette méthode a été réalisée dans les conditions opératoires de notre zone d'étude (Wassenaar *et al.* 1999, soumis) : Bien que faisant appel à des procédés très classiques, elle se révèle pourtant robuste, très précise et très compétitive par rapport à des démarches bien plus lourdes (ondelettes p.ex.). De plus l'information générée, de nature plus graduelle que les typologies de terrain, pourrait même se révéler plus riche d'un point de vue hydrologique.

La précision du modèle est cependant, vraisemblablement contingente de la qualité de l'acquisition des photographies aériennes, et des prétraitements qu'elles ont subi : la résolution spatiale d'acquisition, la calibration radiométrique, l'orthorectification sont autant de facteurs pouvant affecter la qualité du résultat final, et pour lesquels une analyse de sensibilité poussée doit être conduite. En particulier le maillon faible de la démarche est actuellement, d'un point de vue opérationnel, la lourdeur de l'orthorectification, et toute économie acceptable à ce niveau est à prendre en compte. Enfin il faut être prudent dans le cas des parcelles très petites et très allongées.

Le principe de quantification géométrique exposé ci-dessus pourrait ensuite être étendu à d'autres cultures complantées selon une grille (vergers p.ex.) ou plus généralement sur des alignements répétitifs décelables par télédétection

(boisements jeunes, parcelles forestières éclaircies, marnes et calcaires en alternances, ...). Cela requiert un simple ajustement de critères.

Du point de vue des applications, la rapidité de calcul sur les images et le fait de fournir les résultats directement sous la forme d'une base de données, rendent la méthode adaptée à un usage opérationnel par un lien direct avec un SIG, comme proposé par Gahegan et Flack (1996).

Dans un deuxième temps il est envisagé que cette méthode permette l'étude de la variabilité de paramètres comme la vigueur de la végétation, se traduisant par des manques exprimant la présence de facteurs pédologiques et/ou phytosanitaires susceptibles d'altérer la croissance de la vigne.

Enfin les résultats obtenus nous permettent désormais de mieux identifier les zones de sol éclairé dans l'interrang, et ce dans des conditions radiométriques variables. La détermination ultérieure des états de surface (zones lisses, rugueuses, taches d'herbe, ...) s'en trouvera facilitée.

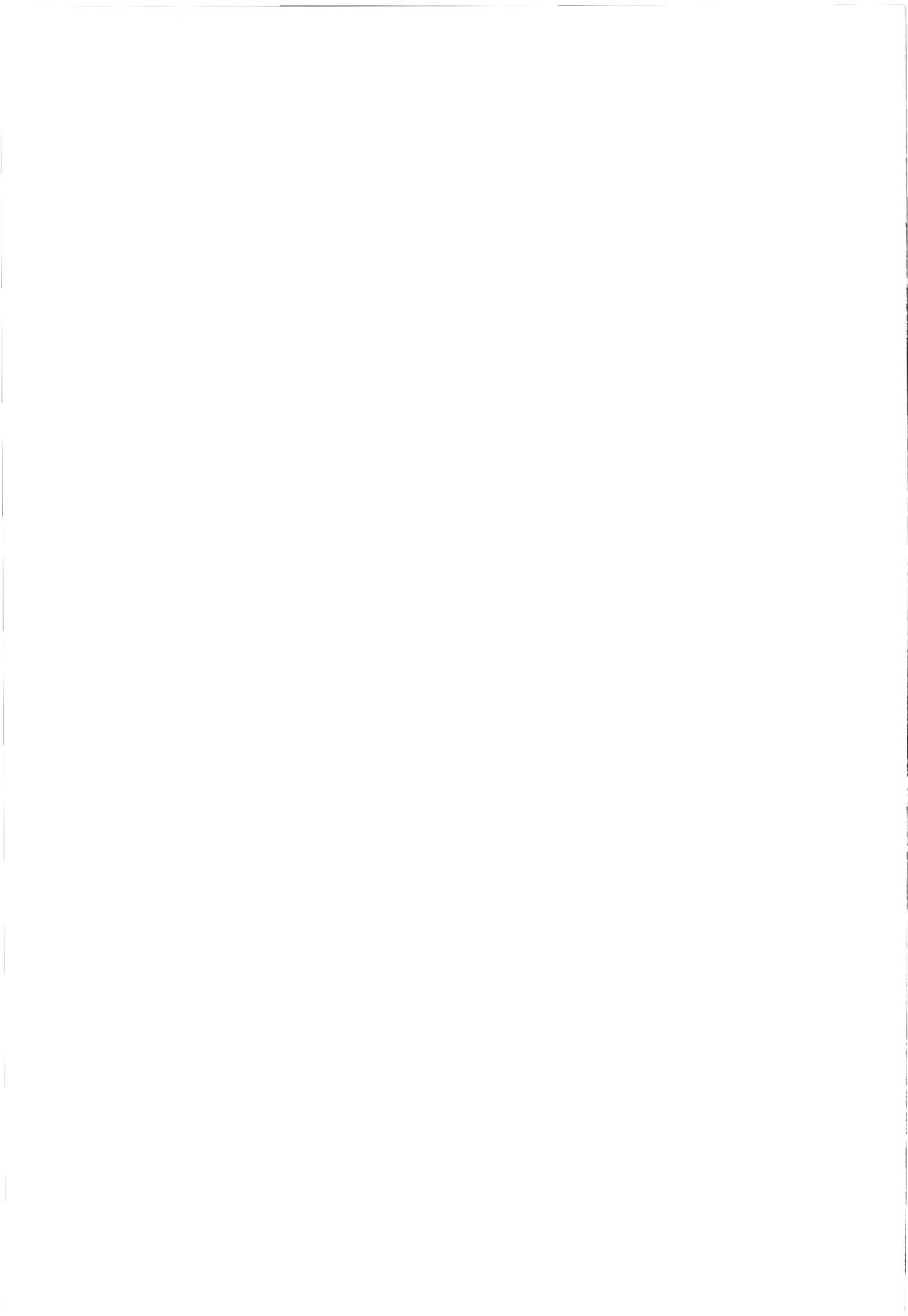
Bibliographie

- Argillier J. P., 1989. Interdépendance des facteurs de la qualité. Montpellier, Chambre d'Agriculture de l'Hérault.
- Atkinson P.M., Curran P.J., 1997. Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **63**, 1345-1351.
- Champagnol F., 1984. *Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. (Montpellier: Dehan).
- Company A., Delpont G., et al., 1994. Potentiel des données radar ERS-1 pour la détection des surfaces contributives au ruissellement dans les vignobles méditerranéens du Roussillon (France). *6eme Symposium International "Mesures Physiques et Signatures en Télédétection", Val d'Isère, 17-21 janvier 1994*, 375-382.
- Company A., King C. et al., 1995. Using microwaves for the assessment of runoff risk over mediterranean soils : an experiment in the Réart catchment basin (Roussillon, France). *International Symposium : "Remote sensing and GIS as tools for monitoring soils in the environment", Ouagadougou, 6-10 février 1995*, 151-167.
- Company-Remond A., 1997. Images SAR : possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (modélisation et expérimentation). Sciences de la terre, laboratoire Géosol. Dijon, Université de Bourgogne. 254.
- Courault D., 1989. Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Thèse. *Sols*, **17**, 239.
- Curran P.J., 1999. Remote Sensing: Using the spatial domain. *Spatial Statistics for Production Ecology, Wageningen, 19/4 - 21/4*, ,
- Dunne T., Zhang W. et al., 1991. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, **27**, 2271-2285.

- Escadafal R., 1994. Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters - examples from arid regions. In *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*. edited by J. Hill and J. Mégier (Brussels: Kluwer Academic Publishers), 71-87.
- Escadafal R., Gouinaud C. et al., 1995a. Le spectroradiomètre de terrain : un outil de la télédétection et de la pédologie. Les sols observés par les satellites. Exemples de modèles et d'applications. *Cahiers-ORSTOM Pédologie*, **28**, 15-29.
- Escadafal R., Pontanier R. et al., 1995b. Propriétés spectrales des surfaces et télédétection de variations spatiales et temporelles de l'infiltrabilité de sols aride (Menzel Habib, Tunisie). *Télédétection des ressources en eau, Tunis, 21-24 septembre 1993*, (Actualité scientifique, réseau télédétection, Journées scientifiques), 263-272.
- Freeman W.T., Adelson E. H., 1991. The design and use of steerable filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **13**, 891-906.
- Gahegan M., Flack J., 1996. A model to support the integration of image understanding techniques within GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**, 483-490.
- Goma-Fortin N., Guerber M. et al., 1997. La conduite du vignoble en Languedoc-Roussillon. Tome 1 : Respecter et disposer le feuillage pour une qualité optimale. Montpellier, Chambres d'Agriculture du Languedoc-Roussillon.
- Graps A., 1995. An introduction to wavelets. *IEEE Computational Science and Engineering*, **2**.
- Heeger D.J., Bergen J.R., 1995. Pyramid-based texture analysis/synthesis. *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Los Angeles, ACM Siggraph*, 229-238.
- Hill J., Mehl W. et al., 1994. Land degradation and soil erosion mapping in a mediterranean ecosystem. In *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*. edited by J. Hill and J. Mégier (Brussels: Kluwer Academic Publishers), 237-260.
- Hinton J.C., 1996. GIS and remote sensing integration for environmental applications. *International Journal of Geographical Information Systems*, **10**, 877-890.
- Johnson L., Lobitz B. et al., 1998. Of pixels and palates: can geospatial technologies help produce a better wine? *1st International Conference on Geospatial Information in Agriculture & Forestry, Lake Buena Vista FL, 1/6 - 3/6*.
- Karasaridis A., Simoncelli E., 1996. A filter design technique for steerable pyramid image transforms. *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Atlanta, Mai 7-10, 4*.
- Laine A., Fan J., 1993. Texture classification by wavelet packet signatures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **15**, 1186-1191.
- Leonard J., Andrieux, P., 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, **32**, 209-223.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., 1994. *Remote sensing and image interpretation*. 3 (New York: John Wiley).
- Mallat S., 1998. *A wavelet tour of signal processing*. (Boston, MA: Academic Press).

- Mason D.C., Corr D.G. et al., 1988. The use of digital map data in the segmentation and classification of remotely-sensed images. *International Journal of Geographical Information Systems*, **2**, 195-215.
- Minden K.A., Philipson W. R., 1982. Grapevine canopy reflectance and yield. *8th International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana, juillet 7-9*, 430-433.
- Smith G.M., Fuller R.M. et al., 1997. Clever mapping: an implementation of a per-parcel classification procedure within an integrated GIS environment. *23rd Annual Conference and Exhibition of the Remote Sensing Society: Observations & Interactions, Reading, 2-4 september*, (Remote Sensing Society), 21-26.
- Starck J.L., Murtagh F. et al., 1998. *Image processing and data analysis, the multiscale approach*. 1 (Cambridge: Cambridge University Press).
- Trolier L.J., Philipson W.R. et al., 1989. Landsat TM analysis of vineyards in New York. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, 1277-1281.
- Valentin C., Bresson L.M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, **55**, 225-245.
- Voltz, M., Andrieux P., Bouzigues R., Lennartz B., Louchart X., Moussa R., Ibolzi O., 1998. Transport of water and matter in a farmed sedimentary soil system in the Mediterranean environment. In *Transactions of the 16th World Congress of Soil Science, Montpellier (France), 20-26 août 1998*, 7 pages. (*texte intégral et poster*).
- Wassenaar T., Robbez-Masson J.M., Andrieux P., Baret F., 1999. Vineyard identification and description of spatial crop structure by per-field frequency analysis. *International Journal of Remote Sensing*, **soumis**,
- Wildman W. E., 1979. Color infrared: a valuable tool in vineyard management. *7th Workshop on Color aerial Photography in Plant Sciences and Related Fields, Davis, California, mai 15-17*, 229-238.
- Wilkinson G.G., 1996. A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. *International Journal of Geographical Information Systems*, **10**, 85-101.

Articles ou résumés des posters



Les potentialités des images à très haute résolution spatiale pour la reconnaissance des composantes urbaines.

The potentiality of Very High Spatial Resolution images to identify urban elements.

Puissant Anne & Weber Christiane

Laboratoire Image et Ville UPRES A-7011 CNRS - ULP Strasbourg,
3, rue de l'Argonne, F-67 000 Strasbourg
Tél. : 03 88 45 65 33 Fax : 03 88 45 33 88,
Mel : anne@lorraine.u-strasbg.fr chris@lorraine.u-strasbg.fr

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans un projet de thèse et pour objectif de montrer que le développement des capteurs dits à Très Haute Résolution Spatiale devrait fournir, au niveau de la géométrie (donc des échelles) et au niveau de la mesure (reconnaissance des éléments), une information précieuse, pour les "utilisateurs finaux", dans les domaines de la planification de la gestion des territoires, des réseaux et des zones de contacts. Plus précisément, l'objectif de cette présentation est d'évaluer les potentialités des images à Très Haute Résolution Spatiale (sur simulations de 5 à 0.83 m) pour l'identification de différents types de tissus urbains.

Abstract :

This work is included in a longer research goals and aims to show that the development of the sensors called to Very High Spatial Resolution should provide, on the level geometry (thus of the scales) and on the level of measurement (recognition of the elements), useful information, for the " end-users ", in the fields of planning, networks and contacts areas. More precisely, the objective of this presentation is to evaluate the potentialities of Very High Spatial Resolution images (simulations from 5 to 0.83 m) for the identification of various types of urban elements.

1 La problématique - les objectifs.

Le développement urbain nécessite, à l'heure actuelle, l'utilisation, de plus en plus efficace, d'informations multisources sur l'espace en transformation.

En effet, le champ de la gestion urbaine est vaste, englobant d'une part la gestion de la ville au quotidien (entretien des réseaux, du patrimoine, procédures de

réglementation et d'urbanisme ...) et d'autre part, la planification qui suppose que l'on ait accès à des données fiables et continuellement mises à jour, ...

Il est donc important de considérer les informations d'origine spatiale, accessibles actuellement ou dans un futur proche, pour l'analyse et la planification du territoire. Répondre aux besoins et aux désirs des "utilisateurs finaux" (politiques, gestionnaires, techniciens ...) revient à préciser les ajustements nécessaires à la définition des capacités des nouveaux capteurs.

Les recherches ont montré que pour la gestion et la surveillance du milieu urbain et périurbain, les échelles du 1/2000^e et du 1/5000^e apparaissent comme les plus intéressantes (Scot Conseil, 1997 ; Puissant A, 1998). Il est aussi apparu que les futures données de SPOT 5 (résolution de 10 m en XS et inférieure à 5 m en P) permettraient d'atteindre des échelles de l'ordre du 1/15 000^e au 1/10 000^e pour cartographier le milieu urbain. Or ces échelles, bien qu'utiles pour certaines applications, ne correspondent pas vraiment aux échelles définies comme les plus intéressantes. Des comparaisons ont été effectuées en faisant appel aux trois niveaux d'interprétation habituellement utilisés lors d'une analyse visuelle : la détection, l'identification et l'analyse (Baudot Y., 1994). Elles ont mis en évidence une inadéquation entre les images satellites actuelles dites à "Haute Résolution" et la demande des utilisateurs (Puissant, 1998).

Nous insistons plus particulièrement sur ***l'identification des tissus urbains à dominante résidentielle***. En effet, l'étude de la morphologie du bâti est un des besoins prioritaires des professionnels de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme. Notre ***objectif principal*** est ***d'évaluer les potentialités d'images simulées à différentes résolutions spatiales*** (images panchromatiques et multispectrales de 5 à 0.83 m).

Il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- 1) Quelle est la meilleure résolution, en terme de pourcentage de surfaces identifiées, pour chaque type de tissu urbain ?
- 2) Quel est le type d'objet le mieux identifié en termes de surfaces par rapport aux surfaces de références (1/4000^e), quel que soit le type de tissus urbains ?
- 3) Avec quelles méthodes les surfaces, des objets "les mieux identifiés" (quel que soit le type de tissus urbains) se rapprochent-on le plus des surfaces de références ?

2 Les hypothèses de travail.

Notre hypothèse de travail peut s'énoncer comme suit :

“ Il existe différents types de tissus urbains identifiables à certaines résolutions ”.

En effet, l'identification des objets urbains demandent une résolution géométrique fine. La capacité à identifier la morphologie du bâti (type de tissus urbains) sur une image varie en fonction de la dimension du pixel et du nombre de pixels par

parcelles, lesquels semblent liés par une fonction hyperbolique (Welch R., 1982). Cela signifie que l'observation d'un tissu urbain sur une image n'est possible que pour un intervalle de résolution particulier.

L'*identification* des tissus urbains, est élaborée par l'image-interprétation. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons choisi, *a priori*, quatre "échantillons" de différents types de tissus urbains, définis comme les plus représentatifs mais aussi en nous inspirant de l'étude réalisée sur la ville de Mulhouse (Sertit et URA 902, 1994) susceptible de ressembler à ce qu'on pouvait trouver à Strasbourg, et enfin, en fonction des connaissances acquises sur l'agglomération strasbourgeoise. Dès lors, nous avons sélectionné des échantillons de type :

- ◆ **"Bâti Dense"** : échantillon n°1, choisi dans le quartier Cathédrale - Broglie,
- ◆ **"Pavillonnaire avec la présence de végétation"**: échantillon n°2, choisi dans le Quartier des Quinze,
- ◆ **"Petit collectif"**: échantillon n°3, choisi dans le quartier Esplanade - Citadelle,
- ◆ **"Grands ensembles"**: échantillon n°4, choisi dans le quartier de l'Eplanade.

La taille de l'échantillon est en relation avec la structure des objets à identifier. Les échantillons sont extraits à l'aide de repères visibles aux différentes résolutions (carrefour, bâtiment spécifique, ...). Les objets urbains relatifs au bâti, à la voirie et à la végétation ont été identifiés dans une *maille*, c'est-à-dire, un ensemble d'objets urbains délimité par le réseau routier, élément de base de la structure urbaine. Lorsque le même échantillon ne se retrouve pas à toutes les résolutions, un échantillon de même type (surface de la maille, structure, ...) a été sélectionné.

3 Les images disponibles et la méthodologie.

3.1 Les images disponibles.

Nous disposons de plusieurs types d'images, fournies par le CNES, sur l'agglomération strasbourgeoise datant de novembre 1997 (période à laquelle la couverture végétale est à son minimum et laisse donc mieux transparaître les espaces artificialisés, (EUROSTAT, 1997) :

- des images panchromatiques brutes aux résolutions de 5 m, 4 m, 3.5 m, 3 m, et 2.5 m, générées en "imaginant" un capteur identique, dont les caractéristiques en termes de "FTM" et de "bruit" seraient à des résolutions proches de SPOT 5 à 5 mètres ;
- des images panchromatiques brutes à la résolution de 0.83 m, acquises lors d'une campagne spécifique réalisée à partir d'une caméra matricielle;
- des images pushbrooms d'un vol ARAT à 1.36 m de résolution (corrigées géométriquement et radiométriquement, avant simulations de bruit, avec une visée du capteur au nadir) ;
- des images SPOT à 10 m (P) et 20 m (XS) de résolutions de 1992 (niveau 3B

- de corrections) ;
- des relevés cadastraux de la CUS au 1/4000^e des différents échantillons, pour la validation.

3.2 Les méthodes appliquées.

A partir des quatre types d'échantillons définis *a priori*, à différentes résolutions, nous avons appliqué deux types de méthodes :

- une méthode d'extraction manuelle (Image Interprétation Assistée par Ordinateur) ;
- deux méthodes d'extraction automatique (une classification par maximum de vraisemblance et une par morphologie mathématique).

Le tableau 1 résume les traitements effectués par résolution et la figure 1 schématise la méthodologie.

	I.I.A.O	Classification par maximum de vraisemblance	Morphologie mathématique
carte au 1/4000^e	✓		
0.83 m	✓		✓
1.36 m	✓	✓	✓
2.5 m	✓		✓
5 m	✓		✓
10 m	✓		✓
20 m		✓	

Tableau 1 : Traitements appliqués aux images.

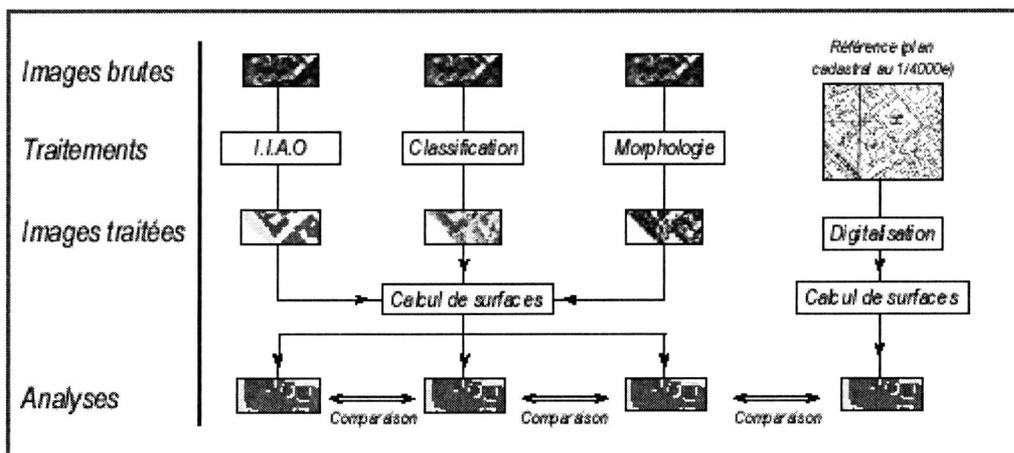


Figure 1 : Organigramme méthodologique.

3.2.1 L'Image Interprétation Assistée par Ordinateur.

Cette méthode est basée sur les principes de la photo-interprétation utilisées initialement sur les photographies aériennes. Elle a été utilisée pour l'identification des éléments des tissus urbains car elle permet d'obtenir le plus d'informations taxinomiques et le plus de précision géométrique (Reginster I, 1997). Les critères d'identification appliqués (teinte, texture, structure, environnement, emprise au sol des surfaces bâties, de la végétation et de la maille viaire et des places de stationnement) ont permis d'affecter un objet urbain à un des thèmes définis (bâti, végétation et voirie).

La méthodologie se déroule en plusieurs étapes :

1. **Un zonage visuel** est effectué dans chaque maille (de chaque échantillon), les contours des zones étant déterminés par la rupture dans la continuité du niveau de gris. Ce zonage est effectué sur des échantillons contrastés, afin d'arriver à une meilleure discrimination. Ensuite l'agencement spatial de ces objets de valeurs numériques voisines souligne des formes, qui permettent de caractériser la **texture** de la maille.
2. L'organisation spatiale des différents éléments texturaux identifiés est analysée. Autrement dit, on étudie la **structure** de la maille.
3. Les objets urbains sont identifiés (en trois catégories : bâti, végétation, ou voirie) en tenant compte des étapes précédentes, et sont décrits par des critères quantitatifs (**calcul de surface** par rapport à la maille).
4. Finalement, tous ces critères conduisent à l'acceptation ou au refus de l'hypothèse, quant à **l'identification du type de bâti**. Parallèlement, une vérification de terrain est effectuée, d'une part, afin de contrôler les objets urbains qui ont été repérés, c'est-à-dire de vérifier l'affectation d'un objet urbain aux thèmes du bâti, de la voirie ou de la végétation, et d'autre part, d'expliquer le pourquoi d'une non-identification d'un élément d'un échantillon.

3.2.2 La classification supervisée.

Nous avons testé les performances d'un algorithme de classification supervisée (maximum de vraisemblance) sur les images multispectrales à 1.36 et à 20 m de résolution.

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que les données ont une distribution de type gaussien. Les paramètres gaussiens (moyenne ou covariance) de chaque classe sont estimés à partir d'un ensemble de données échantillons connus. Le regroupement par classes se fait par le calcul de la fonction prépondérante de décision utilisant les paramètres de classe de type gaussien (Bonn F., 1992).

3.2.3 La morphologie mathématique.

Cette méthode analyse les liens qui existe entre un objet et son environnement immédiat à l'aide d'un élément structurant (forme géométrique simple) que l'expérimenteur choisit et projette à travers l'espace où se déploie l'objet d'étude afin de voir comment cet élément coïncide avec lui. Elle permet ainsi de caractériser les objets par leur taille, leur orientation, leur contour ou leur disposition (Voiron C., 1995).

L'identification des différents types d'organisation du bâti est effectuée à travers une chaîne de transformations morphologiques, basées sur la notion d'ouverture (érosion suivie d'une dilatation) et de fermeture (dilatation suivie d'une érosion).

Nous avons appliqué aux mailles à différentes résolutions une technique classiquement utilisée sur des images à haute résolution afin de faire ressortir les zones bâties. Elle consiste, dans un premier temps, à appliquer un opérateur "chapeau-haut-de-forme vallée et crête" (élément structurant de taille 3).

Le premier consiste à soustraire à l'image originale (P) une fermeture, ce qui permet d'extraire "les vallées" c'est-à-dire les objets de faibles réflectances et les effets d'ombres. Le second consiste à soustraire à l'image originale une ouverture, qui permet d'extraire "les crêtes" c'est-à-dire les objets de fortes réflectances tels que les îlots bâti, ... (Destival I., 1987). Sur chacune des deux images obtenues (vallée et crête), un seuil est choisi (après plusieurs tests) de telle manière que la structure des objets de faible et de forte réflectance ressortent le mieux possible. Le choix d'un seuil est très délicat puisque son caractère optimal ne peut être défini que localement et non sur toute l'image. De plus, ce choix dépend de l'objectif du chercheur.

Dans un deuxième temps, la combinaison des images "vallées" et "crêtes" doit nous fournir une image contrastée (binaire) classée en zones bâties et non-bâties. Ce pourcentage de surfaces est alors analysé. Ce type d'opérateurs a tendance à surestimer les résultats des extractions obtenues.

3.2.4 Calcul des surfaces.

Nous avons calculé des pourcentages de surface à partir des images produites (images numérisées, classées et binarisées) et analysé les contours/limites des objets identifiés.

La photo-interprétation des plans au 1/4000^e sert de référence pour la quantification des éléments bâtis, végétation et voirie.

Les résultats (surfaces et limites) sont d'abord analysés par méthode afin de mettre en évidence l'apport d'une résolution plus fine. Ils sont ensuite analysés en "inter-méthodes" afin de vérifier la pertinence des algorithmes classiques d'extraction d'information par rapport à une extraction manuelle.

4 Analyses des résultats et critiques.

4.1 Quelle est la meilleure résolution en termes de pourcentage de surfaces identifiées pour chaque type de tissu urbain ?

A partir des images traitées, nous avons calculé l'emprise au sol des thèmes bâti, voirie et végétation (en pourcentage, par rapport à la maille étudiée), à différentes résolutions et sur l'image de référence. Les résultats sont présentés à la figure 2.

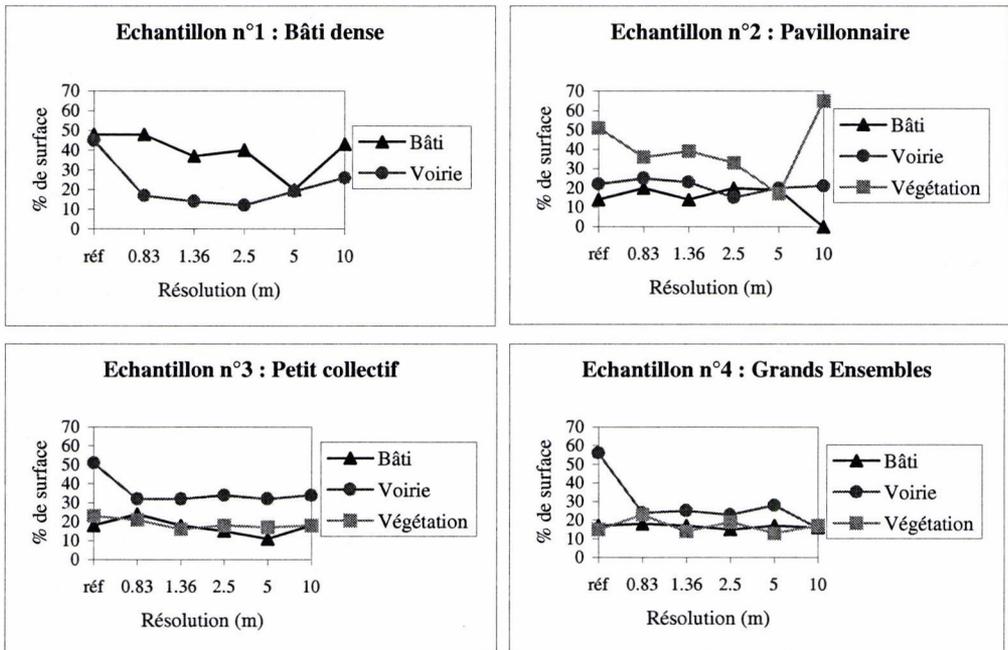


Figure 2 : Evolution des pourcentages de surfaces identifiées à différentes résolutions par la méthode de Image Interprétation Assistée par Ordinateur ("réf" correspond aux surfaces de références calculées sur les relevés cadastraux).

Le pourcentage des surfaces calculées à différentes résolutions reprenant les thèmes du bâti, de la voirie et de la végétation, dans les mailles des quatre échantillons choisis, contiennent des erreurs. Celles ont été mises en évidence grâce à une vérification sur le terrain (par exemple, du bâti avec des toit bas se confond avec la voirie ou les espaces verts, ...)

En tissu urbain de type "**Bâti Dense**" (échantillon n°1), le **bâti** est mieux identifié lorsque la résolution augmente de 5 m à 0.83m. En effet, le pourcentage des surfaces identifiées passent du simple au double. Le pourcentage de surface plus élevé à 10 m est lié au fait que deux types de surfaces homogènes ont été

identifiés. Par rapport à la surface de référence la résolution de **0.83m** est la **meilleure résolution** pour identifier des grands bâtiments en milieu urbain dense. En ce qui concerne **la voirie** une résolution de 5 m permet d'identifier une route large (ici, par exemple d'environ 15 m) du milieu urbain dense, et les résolutions inférieures à 2.5 mètres permettent d'identifier la voirie secondaire de plus en plus précisément. La voirie est largement sous-estimée par rapport à la surface de référence.

En tissu urbain de type "**Pavillonnaire**" (échantillon n°2), l'amélioration de la résolution (à partir de 5 m) ne se traduit pas par des gains significatifs des surfaces des **pavillons**, mais à 10 m ils ne sont pas identifiés car ils sont confondus avec la végétation. L'identification de la surface est plus précise quand la résolution augmente. Par rapport à la surface de référence, la **résolution de 1.36m** est la **meilleure** pour identifier le bâti, les autres surestimant les surfaces. Cela doit être attribué à une confusion entre le bâti et les espaces de stationnement. Pour la **voirie**, elle est identifiée grossièrement à 10 m. A 2.5 m elle est sous-estimée et sa délimitation s'affine à partir de 1.36 m (surtout en ce qui concerne la largeur). Par rapport à la surface de référence, les **résolutions de 1.36m** et de **0.83 m** sont les **meilleures** pour identifier la voirie. En ce qui concerne les **espaces verts**, plus la résolution augmente et plus de nouvelles surfaces sont identifiées (meilleure exhaustivité). De plus, la délimitation des contours des espaces verts se précise. Par rapport à la surface de référence, ils sont sous-estimés à toutes les résolutions, sauf à 10 m où ils sont surestimés car des confusions avec le bâti augmentent leurs surfaces identifiées.

Le tissu urbain de type "**Petit Collectif**" (échantillon n°3) indique qu'en ce qui concerne l'identification du **bâti**, plus la résolution augmente et plus l'identification de la surface est élevée. De nouveau une surface plus grande est identifiée à 10 m en raison de la "grossièreté" des surfaces homogènes. Dès lors, une meilleure résolution permet d'identifier avec une certaine exhaustivité les grands bâtiments linéaires, et cela de plus en plus précisément. Le bâti est sous-estimé jusqu'à 2.5 m et atteint le pourcentage de référence à **1.36 m**. Au-delà, à 0.83 m, il est surestimé (erreur d'interprétation). La tendance est aussi la même, en ce qui concerne l'identification des **espaces verts**. Plus la résolution augmente (à partir de 5 m), plus les contours deviennent précis et de plus en plus différenciés des autres thèmes. Les surfaces sont sous-estimées mais jusqu'à 1.36 et bien estimées à **0.83 m**. Pour la **voirie**, son identification est assez constante à toutes les résolutions (pas de gains de surfaces significatifs) et largement sous-estimées par rapport à la surface de référence.

Dans le tissu urbain de type "**Grands Ensembles**" (échantillon n°4), l'identification du **bâti** est constante quelque soit la résolution (pas de gains significatifs de surfaces). A partir de **5 m**, par rapport aux surfaces de références, le bâti est bien identifié. Pour la **voirie**, les résolutions de 5m permettent d'identifier la voirie principale, peut être un peu trop grossièrement, tandis qu'une résolution inférieure à 2.5 m l'identifie de manière plus précise (bien différenciée des bâtiments). Malgré tout la voirie est largement sous-estimée par rapport à la surface de référence. En

ce qui concerne les **espaces verts**, ils sont identifiés grossièrement à 10 m et de plus en plus précisément aux résolutions supérieures. Les fluctuations sont dues à des erreurs d'interprétation (confusion entre pelouse et espaces artificialisés). A 1.36 m, les surfaces identifiées correspondent aux surfaces de référence.

La figure 3 présente quelques résultats significatifs aux résolutions de 1.36, 5 et 10m.

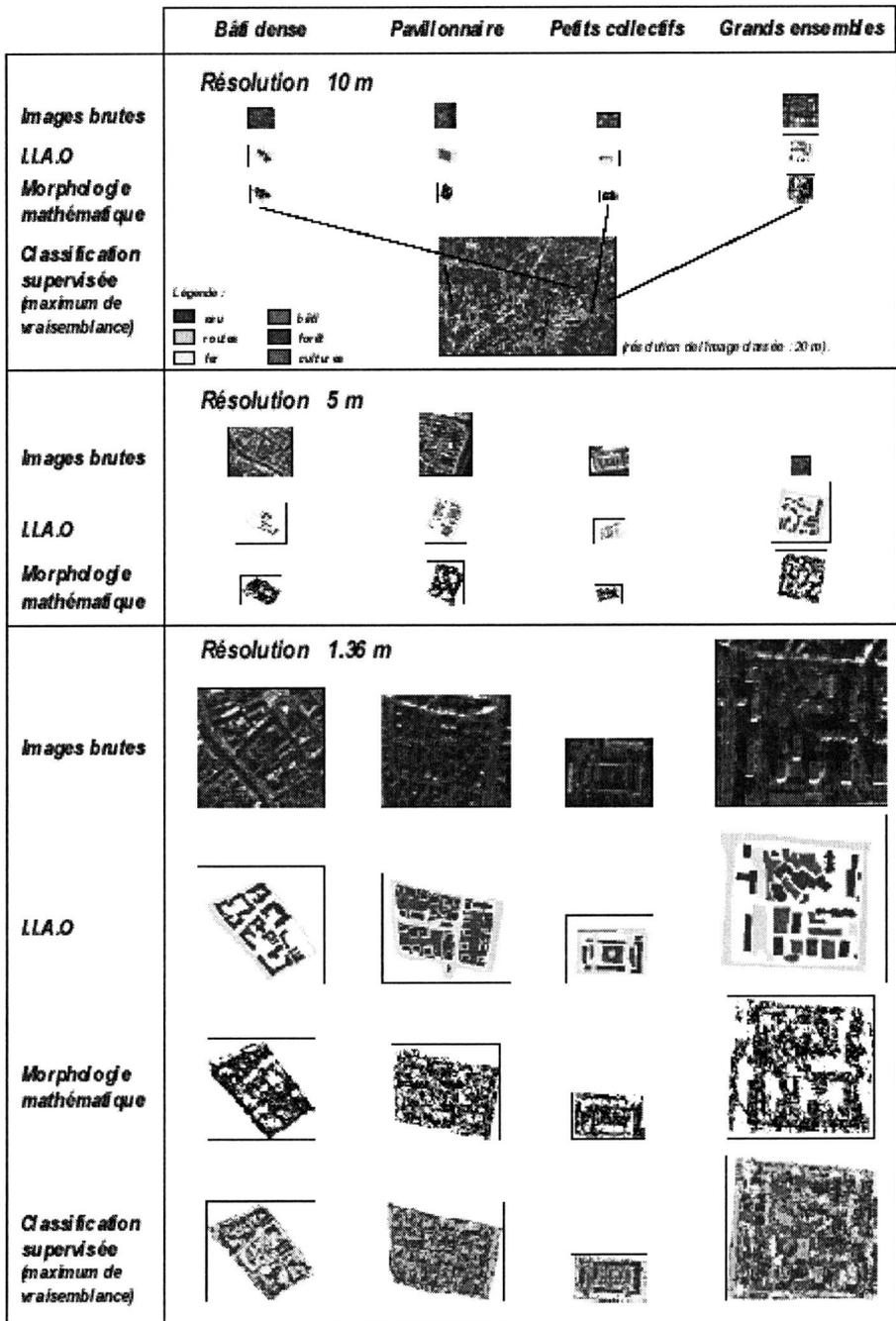


Figure 3 : Traitements effectués aux différentes résolutions.

4.2 Quel est le type d'objet le mieux identifié en termes de surfaces par rapport aux surfaces de références (1/4000^e), quel que soit le type de tissus urbains ?

En se basant sur les graphiques et les analyses ci-dessus, nous pouvons affirmer que l'objet urbain de type "BATI" est le mieux identifié, quel que soit le type de tissu urbain considéré.

En résumé, retenons qu'en terme d'identification :

- *pour un échantillon de "Bâti dense", la résolution de 0.83 m est la meilleure ;*
- *pour un échantillon de "Pavillonnaire", le bâti et la voirie sont les mieux identifiés à 1.36m, tandis que les espaces verts restent sous-estimés ;*
- *pour un échantillon de "Petit Collectif", le bâti est le mieux identifié à 1.36 m, les espaces verts à 0.83 m et la voirie restent sous estimées ;*
- *pour un échantillon de "Grands Ensembles", Le bâti est bien identifié à partir de 5 m et délimité plus précisément à 1.36 m, la végétation est mieux identifiée aussi à 1.36 m et la voirie reste sous-estimée.*

4.3 Avec quelles méthodes les surfaces, des objets "les mieux identifiés" (quel que soit le type de tissus urbains), se rapprochent-on le plus des surfaces de références ?

Puisque l'objet "BATI" est le mieux identifié quel que soit le type de tissu urbain à 1.36 m, nous avons testé et comparé la méthode de IIAO avec deux méthodes d'extraction automatiques, sur les surfaces bâties. La comparaison des méthodes en ce qui concerne l'extraction du bâti est détaillée dans la figure suivante (Figure 4).

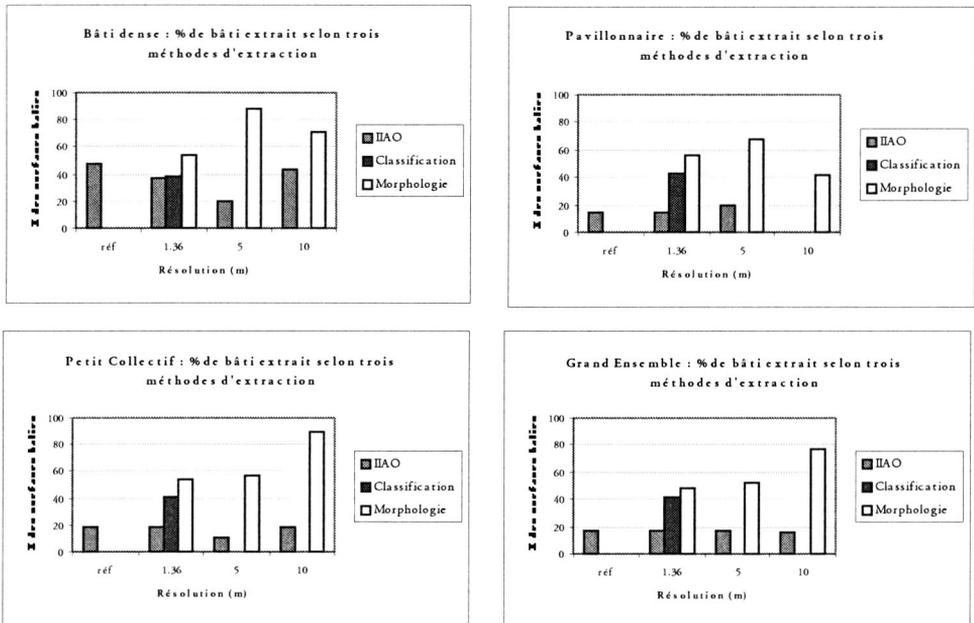


Figure 4: Evolution du pourcentage des surfaces bâties à différentes résolutions.

Pour le "**Bâti Dense**", la classification et la IIAO identifient le même pourcentage de surface bâtie, tandis que la morphologie mathématique surestime la surface bâtie.

Pour tous **les autres échantillons**, la classification surestime la classe de bâti, à cause de la multiplication des détails qui entraînent de nombreuses confusions.

Avec la morphologie mathématique, les surfaces bâties identifiées sont surestimées (du simple au triple par rapport à la surface identifiées par IIAO).

Pour la méthode de la morphologie mathématique, pour les quatre types de bâti, la tendance générale est à la diminution du pourcentage des surfaces bâties lorsque la résolution devient plus fine. Toutefois, on remarque que lors du passage de 10 m à 5 m, le pourcentage des surfaces bâties des tissus "bâti dense et pavillonnaire", augmente.

Pour comprendre ce phénomène, signalons que l'interprétation des mailles binaires est très difficile. Sans leur contexte, il est parfois difficile de reconnaître un quartier et un type de tissu urbain. C'est pourquoi, il est indispensable d'analyser visuellement la totalité de l'image. Dès lors, ce qui concerne les pourcentages de

bâti identifié par la **morphologie mathématique**, il convient de signaler les "phénomènes" suivants :

- A 10 m, cette méthode identifie des zones de bâti plus ou moins denses. L'agencement des zones identifiées ne permet pas de distinguer le type de tissu urbain.
- A 5 m, les zones bâties apparaissent encore sous la forme de zones homogènes. Ces zones sont plus détaillées en "Bâti Dense" et en "Pavillonnaire", ce qui augmente la surface identifiée.
- A 2.5 m, le contour des bâtiments apparaît. En fait ce contour correspond souvent à l'ombre portée des bâtiments ou aux zones moins réfléchissantes longeant les zones plus réfléchissantes. De ce fait la surface identifiée diminue car on retrouve moins de zones homogènes (compactes). A partir de cette résolution, les réseaux sont aussi détectés (routier et ferré).
- A partir de 1.36 à 0.83 m, l'augmentation de la résolution peut être considérée comme une gêne car ces images sont "trop riches" (trop de détails) et multiplient les pixels isolés qui n'ont pas forcément de structure. Malgré tout, si on observe l'image dans sa totalité, les structures restent identifiables.

Il faut être conscient que les surfaces identifiées en bâti à partir de 5 m ne correspondent pas uniquement à du bâti mais comprennent aussi les ombres portées des bâtiments.

En résumé, quel que soit le type de tissu urbain à 1.36m, les zones bâties sont mieux identifiées par IIAO.

Conclusions et perspectives

Avec l'amélioration de la résolution spatiale, un objet urbain **détecté à 10 m et identifié à 5 m**, devient **analysable** à des résolutions métriques. Ceci peut être un avantage pour caractériser les objets à travers la définition de leurs éléments constitutifs mais aussi une gêne car l'apport d'informations détaillées rend plus difficile la formalisation de l'objet. Peut-être faudra-t-il changer les critères de formalisation des objets pour mieux "comprendre et utiliser" les images à Très Haute Résolution Spatiale ?

D'autre part, dans ces images à Très Haute Résolution Spatiale, les **effets d'ombres** portées des bâtiments augmentent. Ceux-ci sont à la fois "**source d'informations**" car elles renseignent sur la hauteur des objets et "**source de perturbations**", puisqu'elles masquent de nombreuses zones du milieu urbain. L'interprétation de ces données à très haute résolution spatiale ne sera pas optimale tant que ce problème ne sera pas résolu.

Les effets d'ombres perturbent également les algorithmes d'extraction automatique puisque de nombreuses confusions apparaissent entre le thème "bâti" et le thème "eau", par exemple.

L'amélioration de la résolution permet néanmoins une meilleure identification des espaces verts interstitiels, du bâti individuel et une meilleure distinction entre les

réseaux routiers et ferrés, par des méthodes de classification. Dans ce cadre, il serait intéressant de tester l'apport des algorithmes de logique floue (approche de Dempster-Shafer, par exemple) ou d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, application COBWEB, par exemple).

Pour la morphologie mathématique, la méthode utilisée ayant tendance à surestimer les surfaces bâties, des opérateurs de rehaussement de contours (filtre Laplacien, ...) devraient être testés

En résumé, l'identification pour chaque type de tissu urbain de la ou des résolutions les "plus adaptées" et les résolutions "suffisantes" est possible (Tableau 2).

Echantillon	Thèmes - objets	Résolution "suffisante" (m)	Résolution "adaptée" (m)
Bâti dense	bâti	1.36	0.83
	voirie	0.83	0.83
	végétation	/	/
Pavillonnaire	bâti	1.36	0.83 ou 1.36
	voirie	2.5	0.83 ou 1.36
	végétation	2.5	0.83 ou 1.36
Petit collectif	bâti	2.5	1.36
	voirie	5	0.83
	végétation	2.5	0.83
Grands ensembles	bâti	5	0.83 ou 1.36
	voirie	2.5	0.83 ou 1.36
	végétation	2.5	0.83 ou 1.36

Tableau 2 : Résolutions spatiales "suffisante" et "adaptée" à l'identification d'un tissu urbain.

Références bibliographiques

- Baudot Y., 1994. Télédétection aérospatiale en analyse géographique de la population des villes dans les pays en développement, *Thèse de doctorat de l'Université Catholique de Louvain*, 350 p.
- Bonn F. et Rochon G., 1992. *Précis de Télédétection : principes et méthodes*, AUPELF, vol. 1, 479 p.
- Destival I., 1987. Recherche automatique des réseaux linéaires sur les images SPOT, *Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n°105, pp. 5-16.
- Eurostat, 1997. Télédétection, aménagement, environnement et statistiques urbaines - Actes du Séminaire - Lille, 24 et 25 juin 1996, Office des publications officielles des Communautés Européennes, Luxembourg, 93 p.
- Puissant A., 1998. Les potentialités de la haute et la très haute résolution spatiale pour l'étude du milieu urbain, *Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 115 p.

- Reginster I., 1997. *Cartographie écologique par télédétection d'agglomérations urbaines : cas de Namur et de Charleroi (Belgique)*, in *Télédétection des milieux urbains et périurbains*, AUPELF-UREF, Montréal, pp. 65-74.
- Sertit et URA 902, 1994. *Intégration de la cartographie des écosystèmes urbains dérivée de l'imagerie SPOT dans le SIG de la ville de Mulhouse*, Rapport d'étude Mire de Mulhouse, Ministère de l'Environnement et de l'Équipement, 90 p.
- Scot Conseil, 1997. User workshops to define the requirements of town/city local governments departments, Final Report, CEO programme, vol. 1 et 2, 130 p.
- Voiron C., 1995, *Morphologie mathématique*, Reclus, Montpellier, 192 p.
- Welch R., 1982. Spatial resolution requirements for urban studies, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 3, n°2, pp. 139-146.



Reconnaissance par télédétection rapprochée des états de surface en milieu viticole méditerranéen.

Application au suivi des effets des pratiques culturales.

Jean-Marc Robbez-Masson(1), Patrick Andrieux(1),
Tom Wassenaar(1), Frédéric Baret(2)

(1) UMR Science du Sol INRA-ENSA.M

2 place Pierre Viala

34060 Montpellier cedex 02

Tel. 04 99 61 27 64 / Fax. 04 67 63 26 14 / Email wassenaar@ensam.inra.fr / Web
<http://sol.ensam.inra.fr>

(2) INRA, UR Bioclimatologie

Site Agroparc

84 914 Avignon cedex 09

Les résultats scientifiques obtenus depuis plusieurs années sur des bassins-versants expérimentaux montrent l'importance primordiale des états de surface des sols et de la structure du parcellaire sur les flux d'eau et de polluants sous vignes en milieu méditerranéen. Caractériser et reconnaître ces paramètres à l'échelle d'un ou de plusieurs bassins-versants est indispensable à la compréhension des phénomènes de crues et de pollutions agricoles, à la bonne gestion de la ressource en eau disponible pour les cultures ainsi qu'à la prédiction de risques environnementaux. Il importe donc de pouvoir disposer de méthodes d'acquisition assistées, *légères mais fiables*, en vue d'alimenter des modèles hydrologiques destinés aussi bien à aborder des problématiques de recherche qu'à développer des outils pour les collectivités dans leurs arbitrages en matière agricole et environnementale.

Le présent travail se donne pour objectif d'automatiser le renseignement du parcellaire viticole sur de vastes zones à partir d'ortho-images prises par hélicoptère dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Dans un premier temps, les paramètres recherchés dans le cas de la vigne sont ceux qui interviennent dans le comportement hydrologique de la parcelle : le mode de conduite (palissé/gobelet), la géométrie des rangs (écartement, orientation, couvert végétal), les états de surface du sol (rugosité, pierrosité, enherbement). Dans un deuxième temps on envisage l'étude de paramètres comme la vigueur de la végétation, exprimant la présence de facteurs pédologiques et/ou agronomiques susceptibles d'altérer la croissance de la vigne.

La prospection par télédétection possède certains avantages : large couverture géographique, aspect numérique de l'information, répétitivité et absence de biais. Dans notre cas, une approche par photographie aérienne a été considérée comme la plus adaptée du fait (1) de sa relative facilité de mise en œuvre permettant des

interventions extrêmement précises dans le temps ; (2) de sa très haute résolution spatiale potentielle.

Trois types d'objets interviennent dans la modélisation engagée pour traiter les images recueillies : le pied de vigne, le rang et la parcelle. Le choix d'une résolution sub-métrique nous permet d'optimiser le contenu d'information sur les objets d'étude, chacun pouvant être décrit par sa radiométrie propre et celle de son contexte spatial. Ainsi et par intégrations successives, on est en mesure d'enrichir une base de données géographique parcellaire. L'état actuel des travaux nous permet de renseigner une telle base de données avec des informations sur la structure spatiale de la culture (le mode de conduite et sa géométrie) et son taux de couverture.

Quelques difficultés persistent, mais il est considéré comme possible de porter la méthodologie développée à d'autres types de cultures discontinues et d'autres milieux.

Ortophotoplan à l'Inventaire Forestier National

Nicolas STACH et Jean-Guy BOUREAU

Inventaire Forestier National
Cellule Évaluation de la Ressource
BP 1001

34970 Maurin

Tél : 04.67.07.80.70 / Fax : 04.67.07.80.91 / Mel : nstach@ifn.fr, jgboureau@ifn.fr

Depuis 1958, la mission de l'inventaire Forestier National (IFN) est de procéder à l'inventaire permanent des ressources forestières nationales, indépendamment de toute question de propriété. Il a pour cela mis au point une méthode reposant sur l'interprétation de photographies aériennes : interprétation ponctuelle d'une grille de points disposés systématiquement sur les photographies, et délimitation sur photographie des types de formation végétale, suivi d'un report sur fond de carte topographique et d'une numérisation des contours. L'IFN fait réaliser pour ses besoins des couvertures aériennes départementales, renouvelées tous les 10 à 12 ans et couvrant l'ensemble du territoire.

Depuis les années 90, l'IFN cherche à améliorer sa méthode en évitant le report à vue des photographies sur la carte topographique. Une des solutions possibles, désormais réalisable du fait des évolutions récentes de la micro-informatique, est de traiter les photographies sous forme numérique. Il s'agit alors de les corriger géométriquement des déformations liées à la vision conique et au relief (orthorectification), puis à les assembler en un orthophotoplan.

L'orthophotoplan, alliant la précision géométrique d'une carte et le contenu sémantique d'une photographie est un excellent support pour la photo-interprétation. Son utilisation, intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG), permet de digitaliser directement dans un référentiel cartographique les contours des formations végétales. Le cas échéant, des couches d'information auxiliaires contenues dans le SIG peuvent être superposées à l'orthophotoplan pour en faciliter l'interprétation. En évitant l'étape de report à vue des contours sur fond cartographique, l'utilisation de l'orthophotoplan doit permettre de diminuer le temps de réalisation de la cartographie de l'IFN, mais surtout d'en améliorer la précision.

Pour ces raisons, mais également du fait de l'intérêt marqué par les différents acteurs de l'aménagement du territoire, de l'agriculture ou de la gestion forestière pour ce produit, l'IFN a engagé cette année la réalisation d'un premier orthophotoplan départemental sur le département de l'Aude.

Ce poster présentera les caractéristiques de la couverture photographique du département, les modalités de réalisation de l'orthophotoplan à l'IFN, les caractéristiques de l'orthophotoplan ainsi créé et enfin l'évolution des méthodes de photo-interprétation et de cartographie qu'il permet.



A tool for monitoring landscape modifications impacted by the development of ski resorts.

Les Arcs, France.

Frédéric Berger, Alain Bédécarrats, Stéphanie Dupont, Nicolle Sardat.

Cemagref

Domaine Universitaire

2 rue de la Papeterie

BP 76

38402 Saint Martin d'Herès

Tel : 04.76.76.27.27 / Fax : 04.76.51.38.03 / Mel : frederic.berger@cemagref.fr,
alain.bedecarrats@cemagref.fr

Une étape nécessaire à l'évaluation des effets de l'implantation des stations de ski sur le patrimoine naturel consiste à identifier, caractériser, localiser et mesurer les changements paysagers (au sens de l'écologie du paysage) induits par leurs infrastructures.

Dans le cadre du projet européen CARTESIAN on a commencé à développer une technique d'évaluation à haut niveau de résolution des changements des paysages sur la station des Arcs dont le domaine couvre environ 3300 hectares dans les Alpes savoyardes.

Des photographies aériennes noir et blanc des Arcs prises en 1970 (début des travaux de la station) et en 1996 (dernière mission photographique de l'IGN) ont été orthorectifiées et mosaïquées avec le logiciel ERDASS IMAGINE.

Elles ont fait l'objet d'une classification semi-automatique qui a permis de distinguer 6 classes depuis les sols nus ou bâtis jusqu'à la forêt dense de résineux. Cette classification a été validée pour 1996 par une confrontation avec le terrain pendant l'été. Les pixels pour lesquels la réponse radiométrique était visiblement due à phénomènes parasites (nuages ou ombres portées) ont été minutieusement soustraits des images.

Une image des transitions paysagères intervenues entre 1970 et 1996 a été construite et analysée.

On a constaté que :

- environ 65 % de la superficie avait changé de statut paysager entre 1970 et 1996.
- 30 % environ de ces changements sont liés directement ou indirectement à la présence de la station,
- * 5% de ces changements se traduisent par la disparition des sols et de la végétation. Il s'agit des surfaces occupées depuis 1970 par des infrastructures.
- * 5 % de ces changements se traduisent par la restauration de la végétation sur des sols dénudés en 1970. Il s'agit du résultat des travaux de réhabilitation entrepris par la station.

- * le restant (entre 15 et 20%) des surfaces est constitué par des zones qui se sont reboisées naturellement. Il s'agit de territoires sur lesquels une activité agricole ne s'exerce plus (anciens alpages ou près de fauches).

Ces résultats montrent que les évolutions paysagères sont révélatrices des profonds changements socio-économiques qui sont intervenus dans les Alpes de Savoie depuis les années 1970. La gestion durable de ce territoire doit s'attacher à retrouver un nouvel équilibre paysager qui allie des mesures fortes de réhabilitation des sites fortement traumatisés par la station à de nouvelles modalités de gestion extensive permettant d'éviter la fermeture des paysages.

Vision Numérique Couleur appliquée à l'évaluation de la Qualité de Carcasses de Dinde.

P. Marty-Mahé (1), G. Raffy (2), P. Loisel (1), D. Brossard (1)

(1) *Cemagref*

Unité de Recherche Technologie des Equipements Agroalimentaires
17, avenue de Cucillé
CS 64427

35044 RENNES Cedex,

Tél : 02 99 28 15 15 / Fax : 02 99 28 15 00 / Mel : Pascale.Marty-Mahe@cemagref.fr

(2) *Edixia*

BP 7259 ZART des Perrières
35 772 VERN-SUR-SEICHE Cedex
Tél : 02 99 62 86 11

En partenariat avec la société de vision EDIXIA et le CIDEF (Comité Interprofessionnel de la Dinde en France), nous avons mené un projet de recherche pour l'évaluation automatique de la qualité des carcasses de dinde sur chaîne d'abattage.

L'objectif de ce projet de recherche est le contrôle de la qualité de carcasses de dinde en abattoir à partir d'un outil de vision industrielle. Grâce à l'information couleur nous cherchons à détecter et identifier les défauts d'aspect visibles sur les carcasses, après la plumaison (hématomes, déchirures, griffures, etc.).

Lors de ce projet, nous avons mis en place un système de vision couleur capable d'apprécier des différences de couleurs relativement fines, afin de détecter ces défauts d'aspect. La conception du poste de prise de vues tient compte des contraintes d'humidité des carcasses, d'uniformité d'éclairage sur un objet complexe en relief, de rendu de couleurs, d'environnement industriel. Par ailleurs, un processus d'étalonnage couleur permettant un passage de RGB vers $L^*a^*b^*$ garantit la stabilité et permet la comparaison des mesures de couleur effectuées sur les images acquises à des instants différents.

Différentes méthodes de segmentation des images couleur en particulier supervisée avec apprentissage ont été développées et comparées objectivement par rapport à une référence visuelle, pour la détection des défauts. L'analyse des histogrammes couleur en coordonnées CIE $L^*a^*b^*$ permet d'exploiter précisément l'information couleur tout en restant en accord avec les contraintes de temps réel liées au projet.



Exemple de détection d'un hématome par calcul de distances colorimétriques à l'enveloppe de l'histogramme multidimensionnel de la peau saine dans l'espace $L^*a^*b^*$

Evaluation de la Qualité des Jambons frais par Vision Numérique Couleur.

P. Marty-Mahé (1), D. Legeard (2), P. Loisel (1), D. Brossard (1)

(1) Cemagref

Unité de Recherche Technologie des Equipements Agroalimentaires
17, avenue de Cucillé
CS 64427

35044 RENNES Cedex,

Tel : 02 99 28 15 15 / Fax : 02 99 28 15 00 / Email Pascale.Marty-Mahe@cemagref.fr

(2) Société ONNO

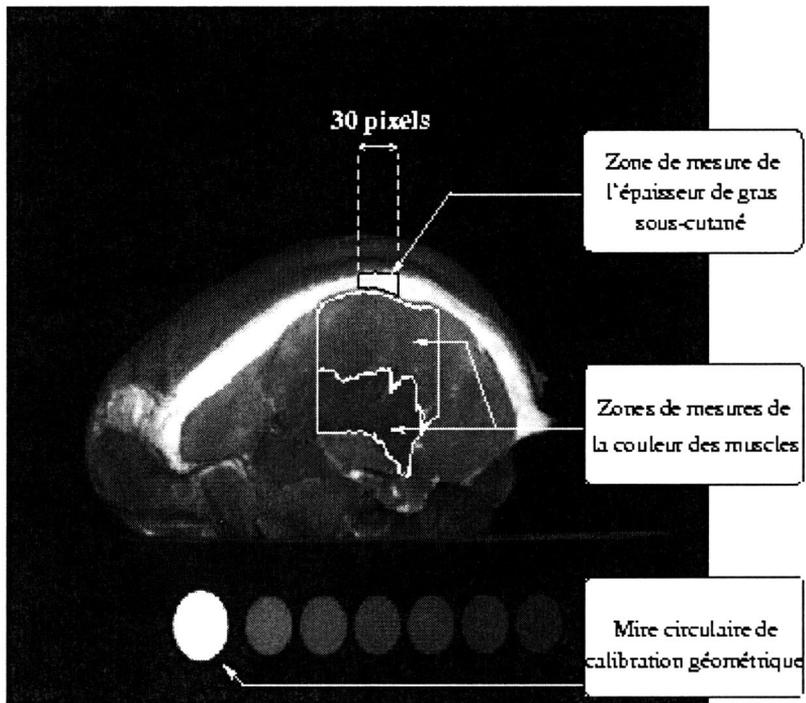
Parc d'activité Tréhonin Le Sourn
56302 Pontivy Cedex

En partenariat avec la société de charcuterie salaisonnerie Onno et la société de vision industrielle EDIXIA, nous avons mené un projet de recherche sur l'évaluation automatique de la qualité de jambons frais. Lors de ce projet de recherche, nous avons élaboré un prototype industriel de vision numérique couleur qui évalue en temps réel la qualité de jambons frais, en mesurant la couleur des muscles et l'épaisseur du gras sous-cutané

Un dispositif de prise de vues permet l'acquisition d'images de couleur de jambons en défilement continu sur une bande convoyeuse. Ce dispositif est soumis aux contraintes liées principalement à la taille et à l'humidité importante du produit.

Des méthodes de traitements d'images permettent la localisation automatique de zones d'intérêt sur les jambons comme le gras et les muscles. Ces méthodes de segmentation s'appliquent sur les images numérisées dans le repère colorimétrique HSI (Teinte, Saturation, Intensité) de notre système d'acquisition d'image.

Elles mettent en oeuvre sur ces trois composantes différentes techniques de seuillage supervisé et automatique, d'analyse en composantes connexes, de lissage et d'analyse de gradient des images. Des méthodes de classification permettent de définir la couleur des muscles du jambon. Des méthodes de traitement de l'information permettant d'exploiter les caractéristiques des zones d'intérêt ainsi localisées, et de les comparer à d'autres mesures instrumentales et sensorielles. La robustesse des méthodes de localisation automatique des zones d'intérêt (gras, muscles) et la méthode d'évaluation de la couleur des muscles a été testée sur des lots importants de jambon de deux types de découpe, française et danoise, sur site industriel.



Localisation automatique par vision numérique des zones d'intérêt pour la mesure de l'épaisseur de gras de couverture et de la couleur des muscles de jambon frais

Un exemple d'utilisation des images à très haute résolution spatiale pour l'aide aux levés de précision cadastrale

NGUYEN Hugo

CIRAD-CP

Maison de la Télédétection

500 rue JF Breton

34093 Montpellier Cedex 5

Tél : 04 67 54 87 34 / Fax : 04 67 54 87 00 / Mel : nguyen@teledetection.fr

1. INTRODUCTION.

Jusqu'à présent, les documents cadastraux ont été établis avec des matériels de géodésie traditionnels comme le théodolite, le tachéomètre comme les RDS, DISTOMAT, des chaînes d'arpenteur ou rubans mètres. Les relevés cadastraux classiques demandent beaucoup de temps et de main-d'œuvre.

Grâce à l'utilisation des GPS différentiels de haute performance qui déterminent des coordonnées géographiques avec des précisions centimétriques, et des photographies aériennes de haute résolution spatiale, pixel de 20 à 50 cm, nous avons pu réduire environ de 5 à 10 fois moins le temps et le coût pour des relevés de précision cadastrale dès que la superficie à cartographier dépasse 2000-5000 hectares.

Un exemple concret : un gouvernement moderne et responsable voulait offrir à ses concitoyens la possibilité de devenir les propriétaires des plantations pérennes de palmier ou d'hévéa qui rapportent un revenu régulier tout le long de l'année. Il a décidé de convertir une grande plantation d'état d'une dizaine de milliers d'hectares en un ensemble des petites plantations privées. Pour ce faire, il demandait au CIRAD d'établir une cartographie de précision de toutes les parcelles plantées afin d'en faciliter l'affectation future.

2. MATERIEL ET METHODOLOGIE.

Dans l'exemple de la grande palmeraie présentée ici, le document de base consistait en 138 films de photographies aériennes à l'échelle 1 : 10 000 ème, prises à l'altitude de 900 mètres avec une caméra ayant une longueur focale de 90mm.

Pour chaque couple de photos, 6 points de repérage identifiables étaient localisés avec des GPS différentiels sur le terrain. Au laboratoire, les films de chaque couple de photos ont été numérisés à la densité de 900 points par pouce (900 dpi). Elles ont été ensuite rectifiées et mosaïquées pour former des ortho-photoplans. Ainsi, chaque point de l'ortho-photoplan représente 28 cm de terrain. L'interprétation des ortho-photoplans couplée avec l'étude stéréoscopique des couples de photos,

l'examen des images SPOT datée du 4 avril 1995 et Landsat TM4 du 18 juin 1988, et le dispositif de 'planting' en triangle équilatéral des palmiers ont permis la délimitation précise des parcelles saines avec des palmiers productifs, et des inclusions composées des sols hydromorphes ou des plages de terrains ravagées par des maladies, insectes ou animaux sauvages.

La commande 'buffer' des logiciels SIG utilisés, a permis de dessiner le tracé réel des pistes de 'desserte' et de 'collecte', malgré les différentes positions des pistes apparues sur les clichés successifs, causées par l'effet conjugué de l'angle de prise de vue de l'avion et l'ombre des hauts palmiers posés sur ces derniers. Par conséquent, on a pu calculer la superficie réelle de ces pistes.

Le contrôle des distances déterminées par les instruments géodésiques classiques (Théodolite et chaîne d'arpenteur) d'une part et par les 'GPS DIFFERENTIEL' d'autre part, montre un écart maximal de 0,2°/00, et confirme la fiabilité du nouvel instrument pour le levé cadastral moderne.

3. CONCLUSION

Un levé cadastral de 7 500 hectares de palmeraies réparties sur 35 km dans la direction Nord-Sud, et 15 km dans la direction Est-Ouest demandant la mobilisation de 16 équipes de topographes pendant 2 ans, a été achevé par deux équipes de GPS différentiel pendant un mois, (le contrôle de précision des GPS par le présent auteur pendant un mois et le temps de la rédaction des cartes pendant six mois non inclus).

Ainsi, nous pensons que les images à 'très haute résolution spatiale', THRS, seront très bénéfiques non seulement pour l'inventaire général des territoires mais aussi comme un document précieux pour la cartographie de précision cadastrale.

Simulation d'Images Satellitales à Très Haute Résolution

F. Gascon (1), J.-P. Gastellu-Etchegorry (1) et M.J. Lefèvre(2)

(1) CESBIO (Centre d'Études Spatiales de la BIOSphère)

18, avenue Édouard Belin

31401 Toulouse - France

Tél: 0561558538 / Fax : 0561558500 / Mel :

gascon@cesbio.cnes.fr

(2) CNES/DSO/OT/QT/VP

Centre National d'Etudes Spatiales

31055 TOULOUSE CEDEX

Tél: 05-61-27-42-83 / Fax: 05-61-27-31-67 / Mel : Marie-Jose.Lefevre@cnes.fr

Introduction

La multitude et la complexité des facteurs (conditions d'observation, cible, capteur, etc.) qui affectent les mesures de télédétection rendent souvent impossible leur analyse avec les modèles de réflectance non imageurs. Ceci est en particulier vrai pour les mesures à très haute résolution spatiale (THRS), car elles ne peuvent être représentées par de simples valeurs moyennes. Nous présentons ici un simulateur d'images spatiales (visible, proche infrarouge et moyen infrarouge) réalisé par couplage de deux modèles de transfert radiatif : DART (Gastellu-Etchegorry et al.1996) pour les paysages terrestres et 6S (Vermote et al. 1997) pour l'atmosphère.

Le modèle DART

Le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) simule le transfert radiatif de milieux 3D naturels (arbres, herbe, rivières, lacs et sol), et depuis peu urbains (bâtiments et routes). Il repose sur la théorie des ordonnées discrètes et du suivi de rayons. Tout paysage est représenté par une matrice 3D de cellules parallélépipédiques. Il simule les principaux mécanismes physiques (hot spot, réflectance spéculaire foliaire, polarisation d'ordre 1, topographie, éclairage atmosphérique anisotrope, etc.) et fournit plusieurs caractéristiques radiométriques : facteur de réflectance bidirectionnel (FRB), albédo, énergie absorbée, etc., et images FRB, i.e. pour toute direction de visée (Fig. 1).

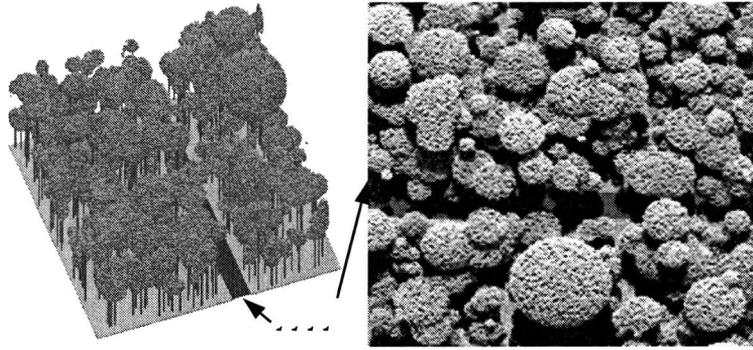


Figure 1 : a) Représentation d'une forêt traversés par une route et b) simulation DART

Le modèle 6S

Le modèle 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) simule les propriétés optiques atmosphériques: épaisseur optique (τ), transmission gazeuse (T_g), réflectance (ρ_A), albedo sphérique (S) et transmittances directe ($\exp(-\tau/\mu)$) et diffuse ($t_d(\theta)$). (Ω_v) et (Ω_s) indiquent les direction de visée et solaire.

Couplage DART+ 6S

La procédure de simulation comprend les quatre étapes décrites ci-dessous :

- 1) Simulations 6S: T_g , ρ_A , S , $t_d(\theta_v)$, $t_d(\theta_s)$, τ et SKYL (fraction d'éclairement diffus), compte tenu des angles zénithaux de visée (θ_v) et d'éclairement (θ_s).
- 2) Simulations DART: images FRB bi-directionnel ($\rho_{dd,c}$), hémisphérique-directionnel ($\rho_{hd,c}$), bi-hémisphérique ($\rho_{hh,c}$) et directionnel-hémisphérique ($\rho_{dh,c}$).
- 3) Simulation de l'image réflectance en haut de l'atmosphère avec l'équation :

$$\rho_{TOA}(\Omega_s, \Omega_v) = T_g \cdot \left\{ \rho_A(\Omega_s, \Omega_v) + [\rho_{dd,c}(\Omega_s, \Omega_v) \cdot \exp(-\frac{\tau}{\mu_v}) + \rho_{hd,c}(\Omega_v) \cdot t_d(\Omega_v)] \cdot \frac{\exp(-\frac{\tau}{\mu_v})}{1 - \rho_{hh,e} \cdot S} \right. \\ \left. + [\rho_{dh,e}(\Omega_s) \cdot \exp(-\frac{\tau}{\mu_s}) + \rho_{hh,e} \cdot t_d(\Omega_s)] \cdot \frac{t_d(\theta_v)}{1 - \rho_{hh,e} \cdot S} \right\}$$

$\mu_v = \cos(\Omega_v)$. $\mu_s = \cos(\Omega_s)$. $\rho_{dh,e}$ et $\rho_{hh,e}$ sont les moyennes spatiales de $\rho_{dh,c}$ et $\rho_{hh,c}$.

4) Simulation de la réponse spectrale du capteur spatial (voir Figure 2).

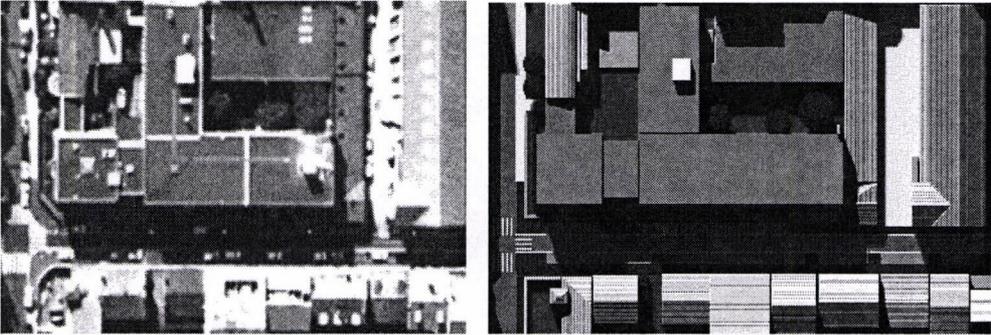


Figure 2: Image aéroportée et simulation DART. Scène urbaine. Filtre panchro: 500-700nm.

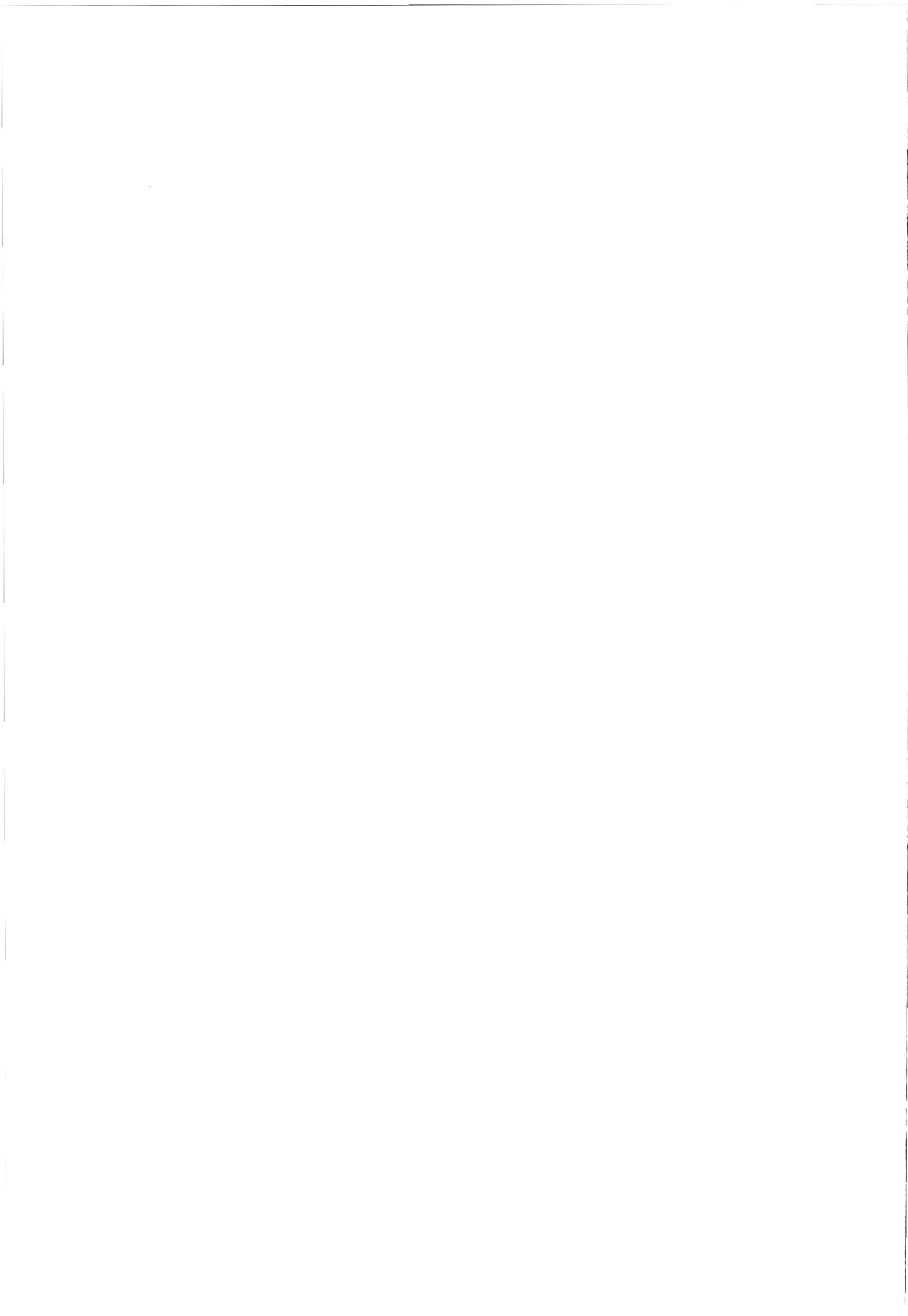
Conclusions et perspectives

Ce simulateur a déjà été utilisé pour étudier :

- la détection des éléments du paysage (routes, bâtiments,...) selon leurs propriétés optiques et géométriques et les conditions d'acquisition (éclairage, visée, etc.).
 - la transformation de l'information lors du changement d'échelle spatiale, à partir du re-échantillonnage de simulations à très haute résolution spatiale.
- Il est prévu de l'étendre à l'infrarouge thermique (IRT) avec le module DART-thermique (Guillevic, 1999), et d'améliorer la prise en compte du capteur (bruit, ...).

Références

- Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V. et Zagolski F., 1996, Modeling radiative transfer in heterogeneous 3D vegetation canopies, *Rem. Sens. Env.*, 58:131-156.
- Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M. and Morcrette J.-J., 1997, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 35, pp. 675-686
- Guillevic P., 1999, *Modélisation des Bilans Radiatif et Énergétique des Couverts Végétaux*, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III



Résumés de communications orales



Le Programme SPOT actuel et futur dans le contexte mondial des programmes d'Observation de la Terre à Haute Résolution

Marie-José Lefèvre-Fonollosa

CNES/DSO/OT/QT/VP

Centre National d'Etudes Spatiales

31055 TOULOUSE CEDEX

Tél: 05-61-27-42-83 / Fax: 05-61-27-31-67 / Mel : Marie-Jose.Lefevre@cnes.fr

Depuis le lancement de son premier satellite en 1986, le programme civil de télédétection SPOT a fourni plus de 6 millions d'images commercialisées sur tous les continents de la planète. A l'aube de l'an 2000 le système SPOT se prépare à faire face à une concurrence importante : les ressources spatiales mondiales d'Observation de la Terre sont de plus en plus nombreuses, variées et performantes

Afin d'affermir et de perfectionner l'offre du programme "SPOT 5" et de sa suite "PLEIADES", le CNES s'est engagé dans une démarche globale d'optimisation du système qui s'appuie notamment sur les principes suivants :

- Une amélioration notable des performances en termes de résolution et de stéréoscopie tout en assurant la continuité du service ;
- Une clarification et une meilleure prise en compte des besoins des utilisateurs ;
- Une étude de différentes composantes instrumentales complémentaires : instruments optiques (Haute Résolution, Champ Large, Multispectral, Hyperspectral) et instruments Radar (Haute résolution et interférométrie) ;
- Une rationalisation et une réduction des coûts des instruments et de leur exploitation.



Images à très haute résolution pour l'observation de la Terre

Christian PUECH

UMR 3S Cemagref-ENGREF

Maison de la Teledetection en Languedoc-Roussillon

500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, FRANCE

Tel : 04 67 54 87 45 / Fax : 04 67 54 87 00 / Mel : christian.puech@teledetection.fr

La très haute résolution change fortement les modes d'observation de la terre. Par rapport aux images à résolution décimétrique, il ne s'agit pas seulement d'une modification numérique de la résolution, mais d'un fort changement dans la façon d'appréhender l'espace géographique. Quelques éléments peuvent illustrer ce changement fondamental :

1) La hauteur des objets devient supérieure à la résolution, et introduit la troisième dimension dans les images, à la fois perturbation (ex : « sursol » dans les MNT), et source d'information : par ex., les ombres, partie fondamentale de la structuration des images, s'individualisent, et renseignent sur les hauteurs des objets.

2) La résolution devient proche de la taille humaine et souvent plus fine que la dimension des objets de notre quotidien. Ceci peut être une opportunité pour caractériser les objets à travers leurs informations internes : éléments constitutifs, textures, motifs ... Inversement, les résolutions fines et la texture peuvent être vues comme une gêne, en particulier pour les classifications pixel à pixel : la résolution est alors considérée comme trop fine, les images trop riches, d'où l'émergence de notions de « dégradation d'image », de « résolution optimale » et la recherche de l'homogénéité locale pour faire disparaître la texture.

Ces thèmes sont illustrés à l'aide d'images de simulations du futur satellite SPOT 5 acquises à des résolutions de 0.8m, 1.6 m, puis dégradées à 5m et 10m. Elles concernent la forêt méditerranéenne dans le massif des Maures et dans la garrigue montpelliéraine.



Etude de la structure d'images a haute résolution à l'aide des semi-variogrammes.

Application aux peuplements feuillus de moyenne montagne

Jean-Guy Boureau (1), Thierry Delorme (2), Michel Deshayes (2)

(1) Inventaire Forestier National

B.P. 1001, Maurin 34971 LATTES Cedex, France.

Tel : 33.4.67.07.80.70 ; Fax : 33.4.67.07.80.91 ; Mel : igboureau@ifn.fr

(2) UMR3S Cemagref - ENGREF

500 rue J F Breton. 34093 Montpellier cedex 5 France.

Tel. : 33.4.67.54.87.51 / Fax : 33.4.67.54.87.00 / Mel :

michel.deshayes@teledetection.fr

Selon l'échelle d'observation, la répartition des arbres dans un peuplement forestier peut apparaître comme totalement aléatoire ou présenter au contraire une certaine structure spatiale. Ces structures peuvent alors être considérées comme une caractéristique majeure d'un objet plus complexe, lequel n'est plus l'arbre ou le groupe d'arbres définissant le pixel, mais un type de formation forestière définit, par exemple, par une classe de densité, un mélange d'essences ou un traitement sylvicole.

Le " grain " de ces structures, dont la dimension peut être mise en évidence par le variogramme, détermine alors la façon dont l'espace est occupé. Mais quelles sont les caractéristiques de ces unités spatiales élémentaires, quels rôles peuvent jouer les facteurs topographiques ou stationnels, quelles relations peut-on établir entre certaines caractéristiques de ces unités élémentaires, la résolution spatiale et les descripteurs de la végétation employés par le forestier ?

Des réponses à ces différentes questions ont pu être apportées par une mise en relation de descripteurs de la végétation forestière mesurés au sol, avec les résultats d'une analyse variographique d'images à haute résolution (1,66 m).

Cette étude, menée en zone de moyenne montagne, a porté sur des peuplements de feuillus naturels plus ou moins intensément gérés. Elle a permis également d'analyser l'influence des facteurs liés à la topographie sur la mise en évidence et la dimension de ces structures.

Les résultats obtenus permettent de mieux appréhender la nature et le rôle des descripteurs de la végétation à l'origine des structures mises en évidence par le variogramme dans ces peuplements feuillus de moyenne montagne et sur l'intérêt de ces structures pour la cartographie forestière.

D'une façon plus générale, des relations peuvent ainsi être établies entre le grain de ces structures, le pouvoir de résolution et la nature des objets à l'origine de telles structures.

Mots-clés : Télédétection, structure spatiale, variables régionalisées, moyenne montagne, peuplements feuillus.

Typologie de peuplements forestiers et traitements de photographies aériennes

Un essai d'approche texturale

Frédéric Berger, Pascale Couprié
Cemagref

Domaine Universitaire
2 rue de la Papeterie
BP 76

38402 Saint Martin d'Herès

Tel : 04.76.76.27.27 / Fax : 04.76.51.38.03 / Email : frederic.berger@cemagref.fr

Les techniques d'analyse d'images sont susceptibles d'optimiser les inventaires de peuplements forestiers. En effet, malgré l'emploi d'une typologie, ceux-ci sont longs et coûteux sur le terrain. Ce projet a pour objectif la reconnaissance des types de peuplements forestiers de la forêt domaniale de la Grande Chartreuse grâce à l'emploi de photographies aériennes. Nous avons travaillé d'une part à partir de l'inventaire typologique de peuplements pour les hêtraies-sapinières-pessières, réalisé par l'ONF, et d'autre part à partir de photographies aériennes Infrarouge couleur. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la caractérisation du couvert forestier par les structures et les textures. Une méthodologie pour discriminer des types de peuplements forestiers présents est proposée puis évaluée. Un certain nombre de problèmes liés à la qualité des données et au traitement de l'information ont été identifiés et des améliorations sont proposées.

Mots clés : forêt, télédétection, inventaire, typologie, structure de peuplements, photographies aériennes.

Reconnaissance de texture en télédétection par estimation multi-échelles de paramètres fractals

Christophe Debain (1), Albert Benassi (2)

(1) Cemagref

24 avenue des Landais
BP 50085

63172 Aubière Cedex 1

Tél : 04 73 44 06 81 / Fax : 04 73 44 06 96 / Mel : christophe.debain@cemagref.fr

(2) LAMP

UNIVERSITE BLAISE PASCAL

34, avenue Carnot - BP 185

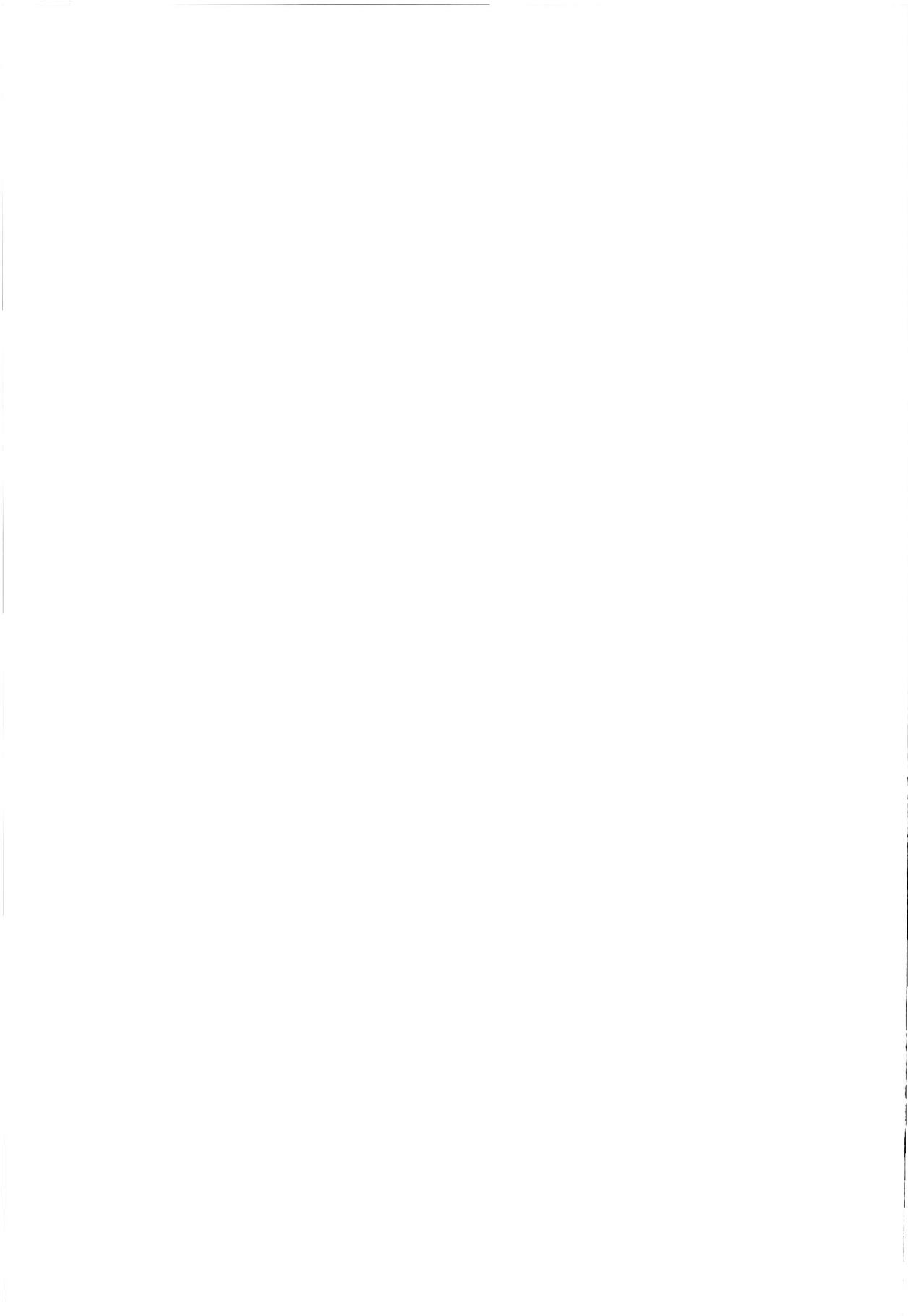
63006 Clermont-Ferrand Cedex / FRANCE

Tél : 04 73 40 73 53 / Fax : 04 73 40 64 31 / Mel : benassi@opgc.univ-bpclermont.fr

Les images fournies par les satellites haute définition permettent d'élargir le champ des techniques de segmentation d'images employées ces dernières années dans le domaine de la télédétection. En particulier l'utilisation d'algorithmes de classification basés sur des paramètres de texture semble maintenant justifiée. C'est pourquoi le Cemagref et le Laboratoire de Météorologie Physique de l'Université de Clermont-Ferrand ont appliquées des techniques de segmentation texturale multi-échelles à des images fournies par l'UMR 3S. Le but est de segmenter les images du futur satellite Spot. Pour le moment, elles sont simulées à partir d'images aériennes haute définition. Les premiers résultats concernent la reconnaissance des trois types de régions suivants : les champs, les forêts, les zones habitées. Les techniques employées sont issues de la géométrie fractale et sont basées sur le calcul de différents estimateurs de paramètres fractals. La classification des régions est basée sur une modélisation par ensembles flous permettant d'estimer le degré d'appartenance aux différentes classes envisagées. Les exemples extraits d'images de la région de Montpellier montrent un fort potentiel de la méthode. Les futurs travaux concerneront la validation des estimateurs sur des banques d'images plus importantes ainsi que l'accroissement de la précision des frontières de régions obtenues.



Synthèse des débats



Synthèse des débats

Plusieurs points importants sont ressortis des débats de fin de journée :

- Un premier constat fait par Guy Flouzat (CESBIO) et Marie-José Lefèvre (CNES), est que, face à la multiplication des capteurs à très haute résolution spatiale, il n'existe toujours pas en France de programme de recherche structuré. Michel Deshayes indique que le PNTS s'intéresse actuellement au domaine du « Global Change », c'est à dire plus à des données et des méthodes de télédétection à basse résolution spatiale et haute répétitivité temporelle.

- Selon Guy Flouzat, plutôt que de repartir de zéro, il faudrait s'appuyer sur les acquis scientifiques et méthodologiques en photo-interprétation traditionnelle accumulés depuis plusieurs dizaines d'années pour les adapter aux spécificités du contexte technologique actuel (données numériques, équipements informatiques...).

- Alain Killmayer (GEOSYS) cite le risque actuel de dépendre des fournisseurs de données de télédétection à très haute résolution qui vont chercher à conserver l'exclusivité de la maîtrise technique des prétraitements géométriques (en ne diffusant pas les paramètres de prise de vue) pour ne commercialiser que des produits à très haute valeur ajoutée. En tant que praticien, il souligne les performances inégalées de la Photo Interprétation Assistée par Ordinateur.

- Xavier Descombes (INRIA) indique qu'il connaît très peu la communauté des utilisateurs, leurs besoins, les outils et méthodes qu'ils maîtrisent déjà. Une structuration de la communauté scientifique pour la télédétection à très haute résolution spatiale lui semble aussi nécessaire.

- Michel Gay (ESAP) pense que l'engouement actuel des forestiers pour la télédétection à très haute résolution s'explique par les similitudes avec la photographie aérienne.

- Selon Laurent Gabet (ISTAR), le problème des prétraitements géométriques se posera de moins en moins au niveau des utilisateurs car tous les fournisseurs ont intégré la nécessité de commercialiser des données déjà géoréférencées (malgré les réserves exprimées par Alain Killmayer et Michel Gay).

- Pierrick Givone (Cemagref) déplore l'absence d'avancée technologique pour la 3D. Les performances des capteurs actuels sont insuffisantes pour la communauté des hydrologues.
- Benoît David (MATE) mentionne la volonté actuelle de constituer un fonds d'orthophotos à 1 m sur la France entière et qui serait diffusé gratuitement.
- Vincent Barbezat (EPFL) rappelle que les développements doivent être pilotés par les thématiciens et non pas par les mathématiciens. A la question de Gilles Rabatel (Cemagref) sur la nécessité ou pas de continuer à faire évoluer le logiciel CLAPA, il répond que de nouvelles améliorations sont souhaitables.
- Marie-José Lefèvre (CNES) et Pierre Maurel (Cemagref) confirment ce point de vue et conseillent de tenir compte des bases de données déjà disponibles dans la mise au point de méthodes et d'outils d'interprétation des images à très haute résolution spatiale.
- En se basant sur l'historique de la télédétection en France et le déclin des demandes en formation purement télédétection, Pierre Maurel souligne le danger de bâtir un programme national de recherche trop spécifique « télédétection » qui pourrait l'isoler une nouvelle fois.
- Une suggestion qui ressort des débats serait de s'appuyer sur les résultats du séminaire pour rédiger une proposition de mise en place d'un dispositif national d'incitation et de soutien à la recherche sur l'utilisation de l'imagerie à très haute résolution spatiale. Plutôt que de créer une structure indépendante, une idée serait d'intégrer ce volet scientifique dans les axes de recherche de la suite du GDR Cassini qui traite plus largement de la géomatique.

Les débats se sont poursuivis le lendemain 15 décembre à l'occasion d'un atelier de réflexion portant sur ce même thème de la télédétection à très haute résolution spatiale et des méthodes de traitement des images produites par ces capteurs.

Guy Flouzat (CESBIO) et Marie-José Lefèvre (CNES) ont également fourni des notes de réflexions supplémentaires dans la semaine qui a suivi le séminaire.

Les principaux points de ces nouvelles réflexions sont repris ci-dessous :

- Les capteurs à haute résolution spatiale (0,6 à 5m) et à très haute résolution spatiale (< 0,6m) vont se multiplier dans les années à venir, mais les besoins des utilisateurs restent à identifier de manière précise. De plus, les méthodes de traitement de ces images restent à mettre au point. Pour cela, il faudrait s'inspirer des acquis de la photo-interprétation, des méthodes développées dans d'autres disciplines (imagerie médicale, vision industrielle, ...) et des avancées récentes en psychophysique et neurobiologie sur les mécanismes de perception et de compréhension des images.

- Ces données doivent être également étudiées du point de vue de leur complémentarité avec des images à basse résolution spatiale, pour généraliser des observations fines mais locales, et des images à haute fréquence temporelle (qui sont en général à basse résolution spatiale) pour améliorer les capacités de surveillance.

- Ces projets nécessitent de mettre en place un dispositif d'incitation et de soutien à la recherche qui pourrait comporter plusieurs volets : (1) L'identification des besoins des utilisateurs en s'appuyant sur une bonne compréhension scientifique des éco-systèmes (2) La diffusion de données vers les laboratoires de recherche, en assurant des prétraitements radiométriques et géométriques de qualité (3) Le développement d'axes fédérateurs de recherche.

- Comme cela a déjà été envisagé lors des débats finaux du séminaire, ce dispositif scientifique pourrait s'insérer comme un des axes de recherche du futur GDR en géomatique qui succèderait au GDR Cassini.

