

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

Jean-Marc Robbez-Masson¹, Tom Wassenaar¹, Patrick Andrieux¹, Frédéric Baret²

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, de l'occupation du sol et des éventuels modes de conduite associés, de la géométrie des parcelles... renseigneraient assez précisément sur les capacités d'infiltration des sols, et seraient donc de nature à alimenter la partie « infiltration/ruissellement » des modèles hydrologiques, qui sont de plus en plus largement utilisés. L'importance notable d'une connaissance précise du partage infiltration/ruissellement est exacerbée en milieu viticole méditerranéen, où des précipitations habituellement violentes atteignent des surfaces de sol essentiellement dénudées.

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).

Démarche

Description des sites : un apprentissage stratifié

La moitié inférieure de la vallée de la Peyne, affluent du fleuve Hérault, a été retenue pour cette

Les contacts

1. INRA-ENSA.M,
UMR Sol et environnement, 2 place Pierre
Viala, 34060
Montpellier Cedex 02
2. INRA,
UR Bioclimatologie,
Site Agroparc, 84 914
Avignon Cedex 09

étude : cette surface de quelque 6 000 ha, située dans la plaine côtière du département de l'Hérault à environ 60 km à l'ouest de Montpellier (coordonnées du centre 43°29'N, 3°20'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 relativement représentative des conditions de milieu (géologie, géomorphologie, climat et sols), des contraintes socio-économiques et des pratiques culturales de la zone viticole languedocienne française. C'est la région à renseigner *in fine* par une base de données parcellaire.

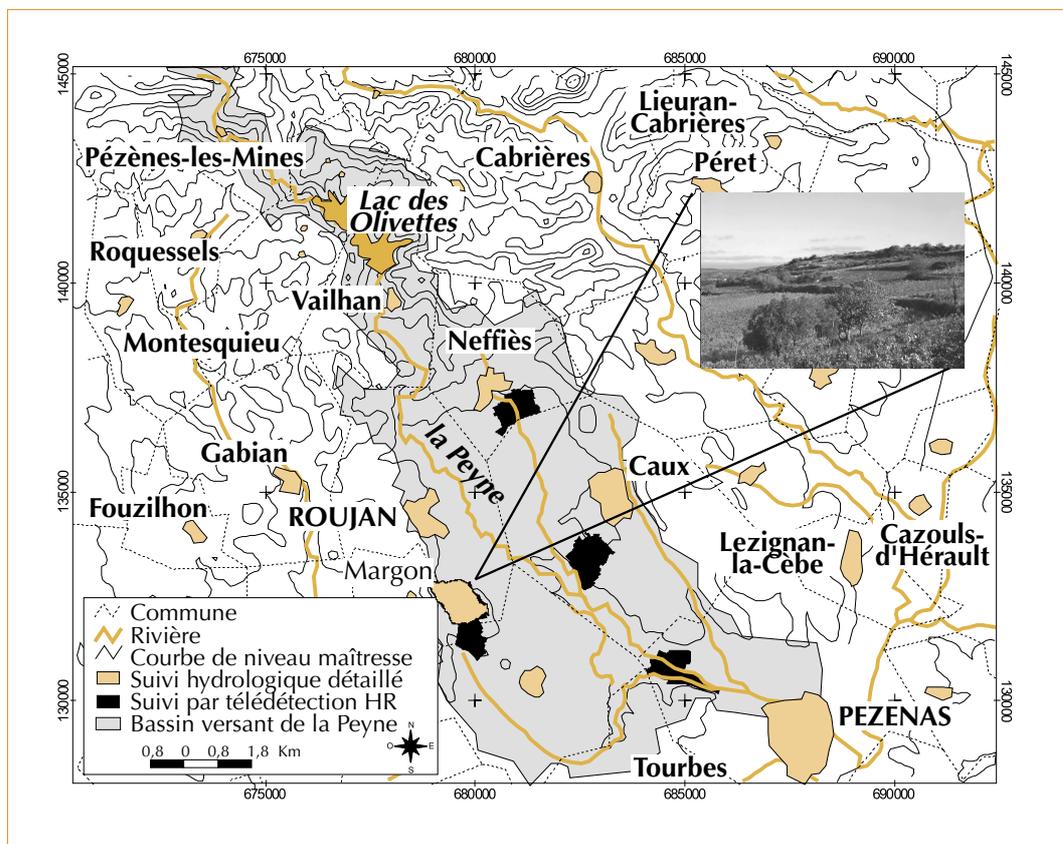
À l'intérieur de la basse vallée de la Peyne, quatre sites d'environ 1 km² chacun ont été retenus de manière à rendre compte de la diversité des organisations spatiales de sols, des logiques de commercialisation du vin et de la position le long du bassin versant. L'ensemble totalise 465 parcelles – soit quatre blocs de parcelles contiguës – 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 trois 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 1). 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 petit à petit mise au point la liste des paramètres relatifs aux états de surface pertinents en termes d'hydrologie et leur nomenclature.

La viticulture méditerranéenne : une structure spatiale originale

Le milieu viticole est caractérisé par une grande hétérogénéité de structures spatiales, autant à l'échelle de la parcelle qu'à l'échelle intra-parcel-



► Figure 1 – Zone d'étude (photo © INRA).

laire (blocs de rangées, motifs de plantation...). La taille des parcelles varie entre environ 0,05 et 3 ha, les plus petites couvrant la plupart de la surface : de ce fait, une seule commune compte souvent plusieurs milliers de parcelles de vigne ! 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 des ceps de vigne, dont quatre sont courants dans la région méditerranéenne. Du point de vue du fonctionnement hydrologique de la parcelle, 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 régulière avec un espacement de 1,5 × 1,5 m ou légèrement rectangulaire, *i.e.* 1,4 × 1,6 m (Argillier, 1989 ; Goma-Fortin *et al.*, 1997). Ceci constitue le mode de conduite classique dans notre région. 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 2,5 m en fonction de la disponibilité de l'eau et la hauteur des rangs. L'orientation des rangs est elle-même 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.

Ces modes de conduite déterminent des densités de plantation (donc de couverture) et des orientations assez contrastées du travail du sol ; de ce fait les rangs – quand ils existent – contribuent à canaliser et orienter le ruissellement, alors que la densité de plantation est censée participer à la protection du sol, comme cela a été

montré sur le bassin versant expérimental de Roujan. Le mode de conduite constitue donc un indicateur pertinent pour le fonctionnement hydrologique des parcelles. Comme les structures spatiales générées par les motifs de plantation sont relativement visibles du ciel, nous nous sommes donné comme objectif dans la présente étude, de les reconnaître à partir d'images issues de télédétection. Enfin, la volonté d'aboutir à terme à des méthodes d'inventaire couvrant de vastes surfaces nous a amenés à privilégier une méthode de détection la plus automatisée possible.

Acquisition des données

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 dans la région, soit la période de mars à juin (deux à trois passages par an). Dans le présent article à finalité essentiellement méthodologique, nous avons uniquement utilisé les images (et données de validation) acquises le 29/05/1998 sur les quatre sites.

LA RÉOLUTION 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 × 0,25 m a été ici considérée comme optimale pour des prises de vue en période de végétation.

À cette résolution spatiale, le domaine du visible apparaît approprié pour reconnaître les rangs et les interrangs. Par ailleurs les capteurs nova-

teurs couramment utilisés actuellement 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 donc ici un moyen judicieux et efficace d'atteindre nos objectifs.

MATÉRIEL

Les prises de vue ont été réalisées sous forme de photographies aériennes à partir d'un hélicoptère Hughes 300 à une altitude avoisinant 1 100 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 2 700 dpi, soit une taille de pixel au sol de 0,20 à 0,25 m. Puis les images ont été radiométriquement corrigées (c'est-à-dire que l'on a transformé les comptes numériques de couleurs issues des images scannées brutes, en valeurs de réflectance) par la méthode de la ligne empirique (Lillesand et Kiefer, 1994). Enfin elles ont été géométriquement corrigées et mosaïquées, constituant en définitive des orthoimages numériques. La chaîne de traitement a été réalisée à l'aide du logiciel IDL/ENVI (Research Systems International, Boulder Colorado).

VÉRITÉ TERRAIN ET DONNÉES SIG

Les prises de vue ont été accompagnées d'observations au sol réalisées aux mêmes dates. 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 et sont disponibles pour toutes les parcelles. De plus et sur 20 parcelles réparties au hasard, l'orientation des rangs et leur écartement ont été mesurés précisément (resp. avec une boussole de géomètre sensible au degré et un mètre gradué en cm). Enfin des mesures réalisées au radiomètre CIMEL sur une quinzaine de points bien identifiés sur le terrain, complètent ce dispositif en permettant de calibrer les photographies aériennes en termes de réflectance. D'autres couches géographiques disponibles sous forme numérique sont une base de données topographique (issue de la BD-Topo© IGN), un Modèle numérique de terrain (MNT) donnant les altitudes aux nœuds d'une grille régulière au pas de 10 m, le cadastre et des cartes pédologiques et géologiques.

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

Une approche par parcelle

Dans la finalité d'établir par modélisation le comportement hydrologique à l'échelle d'un bassin versant de quelques milliers d'hectares, il est nécessaire de constituer une base de données formée d'entités spatiales explicites, entités auxquelles seront rattachés les paramètres d'entrée de la modélisation. Chaque entité doit remplir deux conditions :

1. Elle doit représenter une surface dont le comportement hydrologique est plus ou moins homogène. Or il se trouve que les itinéraires techniques varient beaucoup entre les parcelles, et qu'au contraire ils induisent un motif spatial de plantation et une pratique culturale relativement plus homogènes à l'intérieur de la parcelle. Comme ces deux facteurs conditionnent en grande partie le comportement hydrologique, celui-ci se retrouve également homogénéisé à l'intérieur d'une parcelle culturale ;
2. Le suivi de la zone d'étude au cours du temps exige que l'unité spatiale et son identifiant soient pérennes. Ceci ne serait pas le cas si l'on attachait l'information à chaque pixel de l'image, vu l'erreur induite par le géoréférencement (+/- un pixel ici), ni d'une segmentation parcellaire qui serait obtenue à partir de chaque image individuelle.

Par ailleurs et sur cette zone, si les parcelles cadastrales sont quelquefois regroupées en parcelles culturales (quelques pour cents des parcelles), le contraire est beaucoup 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. Par ailleurs les limites des parcelles étant presque toujours physiquement visibles sur le terrain (et connues des agriculteurs eux-mêmes), les étapes de validation s'en trouveront facilitées. 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).

Quelle stratégie d'analyse ?

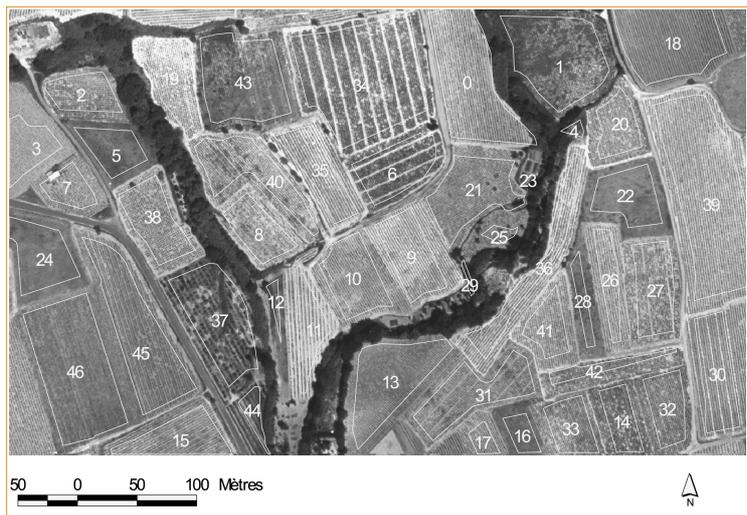
Les parties d'images correspondant à l'intérieur de la parcelle se caractérisent par un comportement spectral qui est fonction de l'occupation du sol. Pour une occupation autre que vigne ou verger, ce signal est plus ou moins homogène spatialement. Pour une vigne, la surface peut être caractérisée autant par un signal spatialement homogène que par un très hétérogène, et sa radiométrie peut varier très considérablement de parcelle en parcelle (figure 2). Le seul facteur constant parmi les vignobles, et qui permette de les différencier d'autres types d'occupation du sol, est la superposition à ce premier signal d'un motif régulier et répétitif (on parle de motif « stationnaire ») induit par la vigne elle-même.

Il nous faut donc un opérateur sensible essentiellement à des tels motifs spatiaux 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 elle a donc été retenue pour cette analyse (encadré, p. 50). Cette transformation est appliquée au canal rouge, c'est-à-dire la partie de l'information du spectre visible dont on dispose, où la culture de la vigne et la surface du sol présentent le plus fort contraste.

Sur ce fragment d'une mosaïque d'image, sur laquelle on a superposé les « cœurs de parcelles » issus du cadastre numérique, 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 intraparcélaire est également visible (arbres dans les parcelles, larges taches d'herbe...).

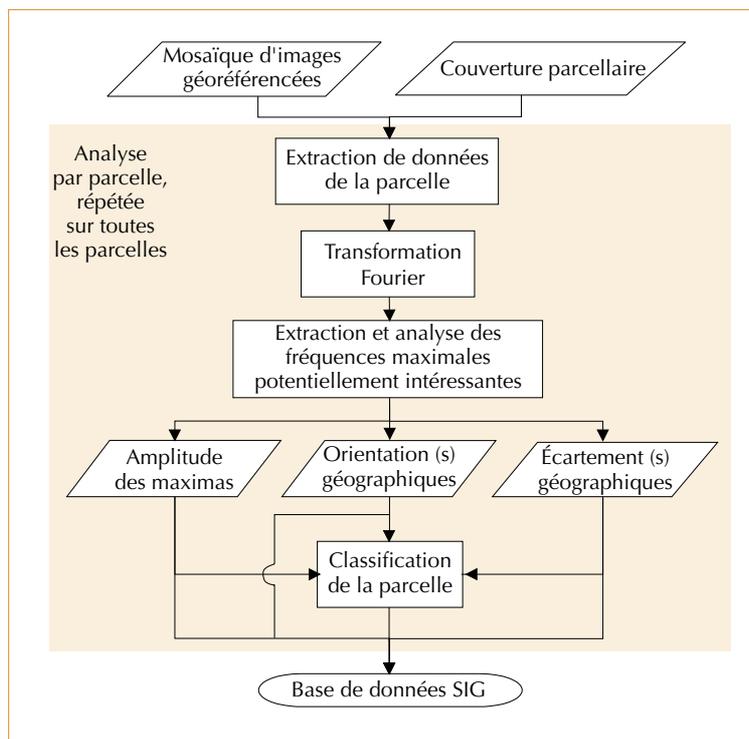
Une brève description du modèle

La figure 3 résume l'ensemble de la démarche, qui s'accomplit parcelle par parcelle après que l'orthoimage aérienne et le cadastre ont été superposés. On extrait une image par parcelle, contenant les valeurs de gris issues des cœurs de parcelles (tout ce qui est suffisamment à l'intérieur des limites des parcelles, dans notre cas à



▲ Figure 2 – Le vignoble vu du ciel en mai 1998 : un exemple. Les contours et les numéros identifient des « cœurs de parcelle » (photo © INRA).

4 m à l'intérieur, pour éviter de traiter l'information issue des murets de clôture, des fourrières, etc.). L'étape d'extraction et d'analyse des fréquences maximales potentiellement intéressantes constitue la phase essentielle (son fonctionnement est illustré plus en détail dans la figure 4, p. 50). Elle conduit à déterminer trois indices qui



▲ Figure 3 – Organigramme de la procédure.

Encadré

La transformation de Fourier – Principe et utilisation pratique

C'est pour élucider les phénomènes de propagation de la chaleur que le mathématicien français Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) inventa une théorie basée sur l'hypothèse selon laquelle toute fonction périodique f peut, sous certaines conditions, être représentée par une série éventuellement infinie de fonctions trigonométriques. Des extensions ultérieures de ce travail fondateur ont permis d'imaginer comment décomposer des fonctions discrètes et non forcément périodiques, en une série de fonctions plus simples (harmoniques) dont la superposition reconstitue la fonction initiale f . Dans ce contexte, l'algorithme de transformée rapide de Fourier TFR (*Fast Fourier Transform*, ou *FFT*) permet de calculer les paramètres (amplitude, fréquence et phase) associés à ces harmoniques.

Une image bidimensionnelle peut être considérée comme une fonction f donnant la répartition de l'intensité au point d'abscisse x et d'ordonnée y : $f(x,y)$. Par définition, la transformée de Fourier de cette image est donnée par la formule :

$$F(u,v) = \iint f(x,y) e^{-2j\pi(ux+vy)} dx dy$$

où les deux variables u et v représentent les fréquences spatiales de l'image selon les directions Ox et Oy respectivement (u et v s'expriment en radians par unité de longueur, il y a donc une relation simple entre la taille des motifs spatiaux répétitifs détectés sur l'image, et ces valeurs).

Nous voyons d'après l'expression ci-dessus que $F(u,v)$ est en général un nombre complexe (amplitude et phase). On choisit traditionnellement de représenter son amplitude, sous forme d'un spectre en deux dimensions (le spectre de la phase est rarement utilisé).

Le diagramme obtenu (*power amplitude spectrum*) ressemble à une image présentant une symétrie centrale, et dont la lecture peut concrètement se réduire à quelques principes :

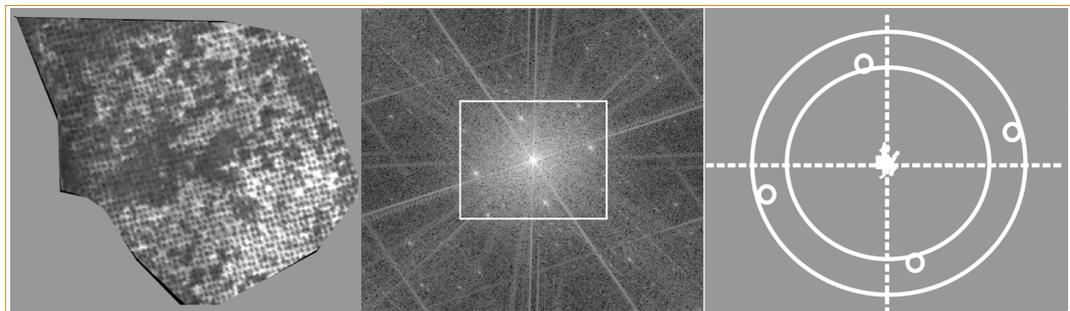
- le spectre a des dimensions proportionnelles à l'image d'origine ;
- le centre du spectre représente les intensités moyennes de l'image d'origine ;
- les valeurs fortes sur le spectre représentent des discontinuités, des lignes de force ou des motifs répétitifs de l'image d'origine : s'il y a dans l'image d'origine des lignes de force, alors le spectre résultant présentera également des lignes ou des séries de points alignés passant par le centre du spectre et perpendiculaires aux lignes de force de l'image d'origine ;
- s'il y a des alignements de points, alors l'écartement entre les points est d'autant plus important que les motifs répétitifs sont petits sur l'image d'origine ;
- les bordures de l'image originelle génèrent des effets indésirables qu'il est parfois difficile d'éliminer.

En plus de ces quelques conseils, il n'est pas inutile d'essayer les transformées de Fourier sur des images simples parfaitement connues, et de s'entraîner ainsi à l'interprétation des résultats obtenus !

permettent de définir l'occupation du sol, le mode de conduite, l'écartement et l'orientation, et d'alimenter la base de données géographique pour chacune des parcelles.

Examinons maintenant comment se fait l'extraction et l'analyse des fréquences potentiellement intéressantes (figure 4) : l'imagerie à gauche montre l'information brute extraite d'une parcelle

(l'extérieur de la parcelle est représenté ici en gris). L'imagerie du milieu contient la transformée rapide de Fourier (FFT) de cette information (les valeurs fortes de fréquences sont en blanc). La partie droite montre la zone centrale du spectre Fourier après l'extraction des fréquences significatives par seuillage (les fréquences les plus fortes de l'imagerie du milieu ont été mises en blanc, le reste en gris).



▲ Figure 4 – Extraction et utilisation du spectre de Fourier sur la parcelle n° 1 (cf. figure 2) (photo © INRA).

Nous allons maintenant utiliser notre connaissance préalable de la géométrie des motifs de plantation de la vigne, pour délimiter les parties du spectre dont les fréquences sont censées être typiques de la culture de la vigne (entre les deux ellipses). Dans l'exemple de la figure 4, on trouve deux paires de fréquences situées dans cette zone (les quatre points entourées de 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.

Résultats et discussion

L'illustration de la méthode sur la parcelle n° 1 (figure 4) 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 par notre procédure.

Occupation du sol et mode de conduite

Le modèle a été appliqué sur l'ensemble des sites pour la campagne de mai 1998. Sur les quelque 400 parcelles, 95 % environ des parcelles de vigne sont reconnues comme telles, alors que les parcelles faussement identifiées en vigne comptent pour 3 %. La détection de la vigne peut donc être qualifiée de très satisfaisante. Dans ces parcelles de vigne, 10 % des parcelles sont des gobelets faussement qualifiés par le modèle de vignes palissées, et 2 % des parcelles sont des vignes palissées vues par le modèle comme étant des gobelets. Les résultats du modèle en discordance avec les observations de terrain s'observent habituellement dans le cas des parcelles les plus petites (< 0,05 ha) et/ou les plus étroites (moins d'une quinzaine de m).

Ces confusions correspondent souvent à de véritables erreurs – comme ces parcelles de vignes arrachées et présentant toujours des fréquences spatiales typiques de la vigne, ou ces parcelles très envahies par la végétation, ou encore cette

parcelle en cours de dépérissement – 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, 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 de terrain elle-même.

Écartement des rangs

On constate 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 l'écartement de manière indépendante. 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 4 (droite) les pixels correspondant à la fréquence de la vigne sont identifiés 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 avoisinant 2 %. Ceci est confirmé par des mesures manuelles précises à l'écran et sur le terrain, montrant un écart moyen absolu de 1,6 cm, soit 1 % d'erreur sur les écartements.

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 ° 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 ° 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 (biais) de 0,7 ° 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 intégra-

tion, 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.

Une évaluation détaillée du potentiel de cette méthode a été réalisée dans les conditions opératoires de notre zone d'étude (Wassenaar *et al.*, 2001a, sous presse) : 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, certaines cultures maraîchères, 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 spatio-temporelle 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.

Dans le cadre de notre propre démarche, les résultats obtenus nous permettent désormais de mieux identifier les zones de sol éclairé dans l'inter-rang, et ce dans des conditions d'éclairage variables. La détermination ultérieure des états de surface (zones lisses, rugueuses, taches d'herbe...) s'en trouve donc facilitée (Wassenaar *et al.*, 2001b).



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...).

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, p. 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). *6^e Symposium International « Mesures Physiques et Signatures en Télédétection », Val d'Isère, 17-21 janvier 1994*, p. 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, p. 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, p. 254.

COURAULT, D., 1989. Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection, Thèse. *Sols*, 17, p. 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, p. 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), p. 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, p. 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), p. 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, p. 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, p. 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, p. 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, p. 237-260.

HINTON, J.C., 1996. GIS and remote sensing integration for environmental applications. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10, p. 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*, p. 4.

- LAINE, A., FAN, J., 1993. Texture classification by wavelet packet signatures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15, p. 1186-1191.
- LÉONARD, J., ANDRIEUX, P., 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32, p. 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, p. 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*, p. 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, p. 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, p. 1277-1281.
- VALENTIN, C., BRESSON, L.M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55, p. 225-245.
- VOLTZ, M., ANDRIEUX, P., BOUZIGUES, R., LENNARTZ, B., LOUCHART, X., MOUSSA, R., RIBOLZI, 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., 2001a. Vineyard identification and description of spatial crop structure by per-field frequency analysis. *International Journal of Remote Sensing*, sous presse.
- WASSENAAR, T., BARET, F., ROBBEZ-MASSON, J.-M., ANDRIEUX, P., 2001b. Sunlit soil surface extraction from remotely sensed imagery of perennial, discontinuous crop areas; the case of mediterranean vineyards. *Agronomie*, 21, p. 235-245.
- 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*, p. 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, p. 85-101.