



HAL
open science

Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale

Tom Wassenaar

► **To cite this version:**

Tom Wassenaar. Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale. Sciences du Vivant [q-bio]. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 2001. Français. NNT: . tel-02830969

HAL Id: tel-02830969

<https://hal.inrae.fr/tel-02830969>

Submitted on 7 Jun 2020

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.

THÈSE

présentée à l'École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT en SCIENCE DU SOL

École Doctorale : Biologie des Systèmes Intégrés – Agronomie – Environnement

Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale

par

Tom WASSENAAR

soutenue le 14 mars 2001 devant le jury composé de :

M.	J.C.	Rémy	ENSA Montpellier	Président
M.	F.	Baret	INRA Avignon	Directeur de thèse
Mme.	A.V.	Auzet	CNRS/CEREG Strasbourg	Rapporteur
M.	B.	Seguin	INRA Avignon	Rapporteur
M.	P.	Andrieux	INRA Montpellier	Examineur
Mme.	C.	King	BRGM Orléans	Examineur
M.	C.	Puech	CEMAGREF Montpellier	Examineur
M.	J.M.	Robbez-Masson	ENSA Montpellier	Examineur

Un peu d'histoire

Avant toute chose, je vous propose...disons...un peu de culture générale. Bien que connus pour certains, ces éléments se révéleront - j'espère - pour de nombreux autres lecteurs utiles ou tout simplement intéressants. Il s'agit de vous fournir un cadre le plus large possible, dans lequel s'insère cette thèse, à travers une description du milieu et de son histoire culturelle. Un des aspects le plus intéressant de l'exercice auquel est soumis le doctorant est de devoir approfondir des sujets très spécialisés tout en se forçant de prendre de temps en temps du recul. Cette action de décoller le nez du guidon pour se replacer dans un contexte m'a parfois coûté, je l'avoue, un effort considérable. Pour vous, cher lecteur, cet effort sera sans doute pas moindre si je ne fais pas de mon mieux pour vous éclairer le chemin. Bien sûr vous trouverez dans ce document une description de la problématique constituant le cadre direct de l'étude, mais dans quel contexte général se situe cette problématique à son tour ? Voici les premiers niveaux d'un *downscaling* thématique et historique, basé principalement sur les œuvres de Johnson (1989) et Macaire (1998).

L'origine de la viticulture

Les deux mots clés de départ sont la viticulture et la Méditerranée, fortement liés entre eux depuis l'origine de l'histoire de l'homme dans cette région. L'histoire du vin accompagne pas à pas celle de l'humanité dans ses conquêtes et ses progrès comme dans ses périodes de décadence : en effet le vin est une valeur culturelle et un phénomène de civilisation. Cette destinée exceptionnelle s'explique par (1) l'extrême variété du goût du vin suivant les plants, le terroir, le climat ; (2) le don de vieillir et de se modifier ; (3) le fait que pendant près de 2000 ans ce fut l'antiseptique universel et unique en médecine comme en chirurgie, et qu'il est demeuré indispensable sur le plan médical jusqu'au dernières années du XIX^{ème} siècle ; (4) sa fonction sociale, reconnue dès les temps les plus anciens – il se marie admirablement avec la nourriture et de tous les stupéfiants doux, c'est celui dont l'organisme accepte le mieux la prise répétitive – et (5) le fait que ce fut une marchandise idéale pour le commerce : de ce fait et grâce à sa valeur marchande, le vin a facilité le contact entre des cultures éloignées. En ce sens il est juste de dire que le vin a contribué au progrès de la civilisation.

Il y a eu du raisin, et des hommes pour le cueillir, depuis plus de 2 millions d'années. Les plus anciens pépins de vigne cultivée, *vitis vinifera sativa*, connus à ce jour proviennent de Géorgie : datés par la méthode du carbone 14, ils remontent à une période de 7 000 à 5 000 ans avant J.-C. Ceci correspond à l'époque à laquelle les sociétés humaines d'Europe et du Proche-Orient ont abandonné leur style de vie pastoral pour se sédentariser et pratiquer l'agriculture aussi bien que la chasse. La vigne est autochtone dans la région méditerranéenne. Dès l'époque secondaire (150 millions d'années), apparaissent les *Cissus*, ancêtres de la vigne. Au tertiaire (50 millions d'années), on trouve déjà des espèces plus évoluées du genre *Vitis*, prédécesseurs directs de la vigne actuelle, dans des gisements pléistocènes de Castelnau-le-Lez, près de Montpellier.

Les Égyptiens furent les premiers à décrire en détail l'art de la vigne et du vin. Leurs descriptions, remontant au III^{ème} ou V^{ème} millénaire avant notre ère, montrent des vendanges qui ne nous paraissent pas plus éloignées que celles de l'Europe médiévale et à cette époque le processus de vinification était déjà entièrement maîtrisé. Ils plantaient les vignobles dans le delta du Nil, dans des limons fertiles, où la vigne était conduite sur de hautes pergolas.

“Les peuples méditerranéens commencèrent à sortir de la barbarie quand ils apprirent à cultiver l'olivier et la vigne” nous dit l'historien grec Thucydide, à la fin du V^{ème} siècle avant J.-C. Ces produits enrichirent l'alimentation primitive faite de céréales et de viande. Leur culture s'accommodait de sols

rocaillieux ou trop pauvres et pouvait s'associer aux champs de céréales sans en réduire la récolte. En Grèce, à l'époque de la grande civilisation ($\pm 2\ 000 - 500$ ans avant J.-C.), les vignes grimpaient aux arbres ou poussaient à même le sol. À partir du VIII^{ème} siècle avant J.-C., les colons grecs en Italie, conduisaient les vignes sur des échelas. Ces colons semblent les premiers à avoir pratiqué la monoculture de la vigne.

La colonisation grecque du Midi de la France date de la même époque. Phocée avait été fondée par les Grecs en Lydie, sur la côte d'Asie mineure. Fuyant l'invasion des Perses, les Phocéens créèrent Massilia et se fixèrent en Corse. Vers 500 avant J.-C., Massilia produisait son vin et ses amphores pour l'exporter.

En Italie, la vigne existait à l'état sauvage depuis les temps historiques. À l'époque d'Auguste, entre 27 av. J.-C. et 14 après J.-C., l'industrie vinicole s'était implantée dans toute l'Italie. Lucius Columelle publie son traité d'agriculture vers 65 après J.-C. Il recommande l'échalassage des vignobles avec des souches espacées de deux pas et attachées par des liens d'osier à des piquets de châtaignier de la hauteur d'un homme. Pourtant l'éventail des modes de conduites dans le vignoble romain était très large ; il allait de la vigne développée à même le sol, les sarments superposés au fur et à mesure de leur pousse pour les protéger des rongeurs, à sa conduite sur des arbres élevés (*arbusta*), comme on le fait encore en Italie centrale et méridionale. On pratiquait aussi la taille en gobelet, le palissage en treille et le palissage en pergola. En regard des techniques employées dans le vignoble moderne, seul manquait le fil de fer. Un des avantages de l'*arbusta* pourrait être l'assèchement de sols trop humides par les racines des arbres. Les Romains étaient persuadés de l'importance du drainage. Ils savaient que les terrains en pente étaient préférables aux terrains plats et connaissaient les avantages d'un sol caillouteux.

En 92, l'édit de Domitien ordonna l'arrachage de la moitié des vignes des provinces extérieures de l'Empire (afin de protéger le vin d'Italie et d'assurer l'approvisionnement en blé), mais la viticulture gauloise continuait de se développer et de nouvelles régions vinicoles furent créées.

Le développement de la viticulture dans le midi de la France

A l'époque de la "Provincia Romana", ou "Narbonnaise", les vignobles se trouvaient sur les coteaux calcaires et les plaines étaient toujours dédiées aux céréales et aux pâturages. En effet le vignoble se développa surtout autour des ports, le long des fleuves et arriva jusqu'aux Cévennes. Taillé en gobelet, il ressemblait comme un frère au vignoble actuel. Les romains pensaient alors que Gaillac marquait la limite de la culture de la vigne. Dans le Bordelais, les premières vignes ont été plantées qu'à la fin du premier siècle.

Ensuite Charlemagne a été à l'origine des vignobles rhénanien et bourguignon. On manquait alors de main d'œuvre pour défricher de grandes plantations, car il n'y avait plus d'esclaves comme sous les romains. La plupart de ces grands travaux sont attribués aux moines, mais en France la plus grande partie des terres appartenait aux nobles, donnant lieu au système du "complant".

Au Moyen Âge, la plantation d'un vignoble s'effectuait lorsque cela était possible, avec de simples boutures à talon : on plaçait des boutures d'un an, auxquelles on avait conservé à la base une petite partie de bois plus ancien, dans des sillons profonds. Le climat sec du sud imposait une faible densité, peut-être seulement de 5 000 pieds/ha. Il était plus économique de planter la bouture en plein terre, mais toutes ne prenaient pas et il fallait combler les vides l'année suivante. On pratiquait également le marcottage en enterrant un rameau encore adhérent à la souche mère que l'on séparait ensuite. Le provignage découlait du même procédé ; sans séparation des marcottes, on l'utilisait pour augmenter la densité d'un vignoble, ce qui aboutissait à la formation d'un redoutable enchevêtrement de racines et de sarments. On cultivait plusieurs cépages (souvent 5 ou 6) afin de limiter les dégâts au cas où la

récolte de l'un ou l'autre aurait été compromise. Peu de vigneron s'astreignaient à passer plusieurs fois dans le vignoble pour récolter chaque cépage à pleine maturité.

À cette époque, les cisterciens, qui ont fortement influencé la qualité du bourgogne, ont inventé la notion de "climat", correspondant pour une parcelle de vigne au sol, la situation et l'exposition qui confèrent année après année au vin qu'elle produit des caractères typiques. Le problème d'érosion était connu et constituait un souci pour les cisterciens. Ils répandirent sur la parcelle la terre qui s'était accumulée en bas de pente.

Il était encore absolument vital pour le vin que les délais de livraisons soient courts, car il était très périssable, et le vin du midi n'y parvenait pas car il se trouvait à l'écart des grands marchés de l'époque. Au XVII^{ème} siècle le Languedoc trouva des canaux de distribution comme la vallée du Rhône jusqu'à Lyon et, au-delà, la Suisse ; Livourne et le grand marché toscan ; Gênes et celui de Piémont ; et même l'Allemagne et la Russie. Le Languedoc avait peu de vins de qualité, si ce n'étaient les Muscats de Frontignan, Lunel et Mireval, la blanquette de Limoux et le vin rouge de Saint George d'Orques, la fierté de Montpellier.

Au début du XVIII^{ème} siècle on planta beaucoup de vignobles, ce qui a fait apparaître en 1725 une loi d'interdiction de plantation sans permission expresse du roi. On craignait un manque de blé et de pâturages, et en même temps on voulait protéger les anciens vignobles (comme les Romains au début de l'ère !). Pourtant en Languedoc les autorités encouragèrent la plantation puisque c'était le seul moyen d'augmenter la part de l'impôt. La plupart des vins du Languedoc étaient alors blancs, issus de cépages neutres comme la clairette et le picpoul. Leur succès provoqua l'invasion des terres à blé par la vigne. A cette époque la région pratiquait encore la polyculture : fruits, légumes et céréales.

Mais la grande affaire du Languedoc était la production de l'eau-de-vie : de transport facile elle avait pour débouché le marché insatiable des armées et de la marine. C'est l'énorme demande d'eau-de-vie engendrée par les campagnes de Bonaparte qui poussa la bourgeoisie à s'intéresser à la "viticulture" et à industrialiser la production. Plus de 26 000 ha de nouveaux vignobles furent créés de 1791 à 1808. Après ces guerres la demande de vin s'accrut de nouveau ; pourtant en 1821, les deux tiers des vins de Languedoc prenaient encore le chemin de l'alambic. A la fin du XVIII^{ème} siècle la viticulture était confrontée tout à la fois à des phénomènes de surproduction, d'écroulement de la qualité et à une incompétence généralisée.

A la même époque les meilleurs domaines du Bordelais et de Bourgogne avaient atteint un bon niveau de compétence technique, fondée sur l'expérience transmise de génération en génération pendant des siècles. Puis, pour ces régions, le XIX^{ème} siècle a été l'âge d'or. Une grande impulsion fut donnée au Languedoc par le chemin de fer qui atteint le Midi dans la deuxième moitié de ce siècle. Mais plus important encore avait été la prospérité d'après-guerre de cette région. La surface du vignoble de l'Hérault doubla entre 1825 et 1850, pour faire face à une demande populaire croissante de vin rouge. La consommation augmenta d'environ 10 litres par habitant pendant chaque décennie entre 1848 et 1870. La région bénéficia aussi de la disparition des vignobles du Nord, remplacés par des céréales et betteraves. L'atmosphère de la région, à cette époque, rappelait celle d'une ruée vers l'or. Les vapeurs embarquaient à Sète des dizaines de milliers de barriques pour toutes sortes de destinations allant de la Russie à l'Amérique, mais les vins du Midi servaient surtout à étancher la soif des colons d'Algérie.

Inexorablement, le vignoble descendit des collines pour envahir la plaine côtière fertile. Entre 1850 et 1875, la France ajouta plus de 200 000 ha à son vignoble déjà très vaste, dont 130 000 ha pour le seul Languedoc. Les céréales, les oliviers, les légumes, toutes les autres cultures furent chassés par la vigne.

Puis arrivèrent les problèmes

Cette deuxième moitié du XIX^{ème} siècle est le début de la plus grande crise viticole en Europe. L'avènement de la marine à vapeur fut responsable de l'arrivée d'importantes maladies : l'oïdium, que l'on réussit à maîtriser en une décennie seulement ; le phylloxéra, dont on n'a pas fini d'entendre parler ; le mildiou. À eux trois, ils dévastèrent presque tous les vignobles et modifièrent fondamentalement et définitivement les méthodes de culture de la vigne. Le phylloxéra fut découvert à Montpellier par Bazille et Planchon. Ensuite, quantités d'idées saugrenues furent soumises pour combattre le puceron et protéger la vigne. On détermina qu'on pouvait noyer le phylloxéra et que le puceron était incapable de se déplacer dans le sable. Ces deux solutions étaient une invite à planter la vigne le long de la côte du Languedoc. Les méthodes culturales avaient changé du tout au tout. Jusque-là, on taillait, désherbait, replantait occasionnellement et vendangeait. Maintenant il fallait repasser sans cesse dans le vignoble.

Les deux premières décennies du XX^{ème} siècle furent les pires de toutes. Les vignes récemment greffées étaient attaquées par le mildiou ; les fréquentes pulvérisations étaient très coûteuses et l'oïdium revenait en force. Dans le même temps, l'abus des engrais entraînait une augmentation de la quantité au détriment de la qualité, les vins étant dilués. Chaque région, chaque pays, avait réagi dans un même esprit au moment de la crise phylloxérique. L'Algérie, autrefois un important marché pour les vins français, exploitait maintenant d'immenses vignobles ; en Italie méridionale et en Sicile, les champs de blé et les oliveraies avaient cédé la place à la vigne ; l'Espagne avait multiplié la surface de tous ses vignobles ; la Hongrie avait reconquis ses grandes plaines sableuses en les recouvrant de vigne. Inévitablement les prix s'écroulaient. Dans le Languedoc au plus fort de l'invasion phylloxérique, dans les années 1880, le prix de l'hectolitre de vin était de 30 francs. En 1900 il n'était plus que de 10 francs alors qu'il revenait à 15 francs au producteur.

Le choc fut terrible dans le Midi. A l'issue d'importantes émeutes, un projet de loi fut voté qui instaurait un contrôle du volume de la production et des stocks. Pour la première fois une définition légale du vin fut donnée. Entre 1931 et 1936, ceci était suivi d'une série de décrets qui notamment interdisaient de planter de nouvelles vignes. Un de ces décrets créa, en 1935, le Comité national des appellations d'origine : c'est le début de la création des A.O.C. permettant de donner à chaque cru une définition législative et précise du terroir, mais aussi des pratiques culturales, la taille, le rendement maximum, les méthodes de vinification, etc.

Le bilan de ce demi-siècle de pénurie est difficile à établir. En France 30% des vignes détruites ne furent jamais remplacées. En revanche, les vignobles du Languedoc s'étendirent plus que de raison. En 1875, ils comptaient pour 17 % de la surface viticole totale ; en 1980 ils représentaient 27 %. Cette augmentation s'est surtout faite sur des terres riches qui, comme on le dit dans la région, "font pisser la vigne". La descente des vignobles de coteau dans la plaine peut se mesurer à l'accroissement des rendements, multipliés par trois entre 1800 et 1900 et encore par trois au cours du XX^{ème} siècle.

La gelée de 1956 a initié une première tendance vers l'amélioration de l'encépagement. Mais les années 1950, c'est aussi la généralisation de la mécanisation : notons la disparition des chevaux au profit des tracteurs et des comportes et pastières au profit des bennes à vendanges ; le regroupement des variétés lors de la plantation et une vendange cépage par cépage ; puis l'arrivée de la machine à vendanger, remplaçant une équipe de 30 à 40 personnes par un chauffeur et deux "suiveurs" et imposant des changements en encépagement (cépages à peau résistante) et en mode de conduite (palissage, de préférence haut et en longues rangées). C'est également l'époque où le désherbage chimique devient une pratique commune.

Ici nous sommes arrivés à la situation qui constitue le contexte direct de la présente étude et je vous invite donc à entamer la lecture de la thèse proprement dite.

Remerciements

Un instant encore je dois vous faire patienter, car il est important de rappeler ceux sans qui ce travail n'aurait pas pu aboutir, voire même pas pu être entamé. Ces "ceux" sont des organismes qui ont fourni les moyens nécessaires, et des personnes qui ont mis à disposition leur temps, leur inventivité et surtout leurs connaissances.

Merci à l'unité *Sol et Environnement* de l'INRA ENSA.M et son responsable Jean-Claude Rémy pour l'accueil, et à la DGXII de l'Union Européenne pour avoir osé financer ce projet "à haut risque".

De toutes les personnes qui ont fourni le cadre scientifique, il faut tout d'abord rappeler les initiateurs et "surveillants" du projet, Jean-Marc Robbez-Masson et Patrick Andrieux. Puis Frédéric Baret, pour avoir bien voulu en être le "responsable scientifique" ; les (autres) membres du comité de pilotage, Georges de Noni, Christian Puech, Marc Voltz et Joël Chadoeuf, pour les efforts qu'ils ont fait pour comprendre et éclaircir mes idées confuses ; et les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer le fruit de ce travail.

De nombreuses personnes de l'équipe SHAM de l'unité *Sol et Environnement* (désolé de ne pas pouvoir citer chacun ici) m'ont permis de disposer d'informations acquises au sol pendant que je survolais la zone sous l'œil bienveillant du très fiable pilote Régis Godart (société Hélisud, 34 Lagamas). Merci à Jean Asseline, de l'IRD, pour ses conseils ainsi que le matériel mis à ma disposition pour ces exercices aériens, et aussi à "l'artisan" de l'unité *Sol et Environnement*, José Richard, pour ces nombreux coups de mains. Et n'oublions pas l'équipe du Génie Rural de l'ENSA.M pour l'utilisation du scanner.

Ensuite, tout au long de l'étude j'ai ponctuellement dû rechercher l'aide d'une équipe multidisciplinaire et multinationale d'experts dont les principaux méritent d'être mentionnés : Jon G. Campbell, Joël Chadoeuf, Jean-Michel Boursiquot, Dave Martindale, Michel Verbrughe, Mark Chopping, Steven de Jong, Craig Markwardt, Damien Barache.

Enfin, en dehors du cadre professionnel, il y a eu de très nombreuses personnes qui ensemble ont constitué l'entourage me permettant de maintenir la forme et la motivation exigées pour mener le projet à son terme. Famille, copains, collègues ; un simple "merci" ne suffit guère pour régler mes comptes...

Et Co, mi amor, plus qu'autre chose cette thèse signifiera pour moi toujours notre début.

Tables des matières

<i>UN PEU D'HISTOIRE</i>	III
<i>REMERCIEMENTS</i>	VII
<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i>	1
PARTIE I HYDROLOGIE ET CARACTÉRISATION DES ÉTATS DE SURFACE DANS LE VIGNOBLE MÉDITERRANÉEN	3
I CADRE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE	5
1.1 Problématique hydrologique en milieu cultivé	5
1.2 Spécificité du vignoble méditerranéen	6
1.2.1 Un sol depuis longtemps cultivé sous vigne.....	6
1.2.2 La démarche qualité.....	7
1.2.3 Conclusion.....	8
1.3 Modélisation hydrologique en milieu viticole méditerranéen français	9
1.3.1 Le programme ALLEGRO-Roujan.....	9
1.3.2 L'approche de modélisation.....	9
1.3.2.1 modélisation conceptuelle globale.....	10
1.3.2.2 modélisation distribuée à base physique.....	10
1.3.2.3 modélisation physico-conceptuelle spatialisée.....	11
1.3.2.4 l'approche retenue.....	11
1.3.3 Conclusion.....	11
1.4 État de surface du sol en milieu cultivé	12
1.4.1 L'état de surface - composante du milieu essentielle à la modélisation.....	12
1.4.2 Une définition de l'état de surface.....	13
1.4.3 L'état de surface - lien entre modélisation hydrologique et télédétection ?.....	14
1.4.3.1 origine et historique de la télédétection pour la modélisation hydrologique.....	14
1.4.3.2 état de l'art actuel.....	16
1.4.3.3 problèmes et besoins.....	16
1.4.3.4 télédétection des vignes.....	18
1.4.4 Conclusion.....	18
1.5 L'objectif posé	19
2 LES ÉTATS DE SURFACE EN MILIEU VITICOLE MÉDITERRANÉEN : CARACTÉRISATION ET RÉPONSE RADIOMÉTRIQUE	21
2.1 Les composantes de l'état de surface pour les sols de vignoble	22
2.1.1 Signification hydrodynamique des paramètres.....	24
2.1.2 Variabilité spatiale à l'intérieur de la parcelle.....	26
2.1.3 Relations spatiales entre les différentes composantes de l'état de surface.....	27
2.1.4 Relations temporelles.....	28
2.1.5 Conclusions et identification de paramètres clés.....	30
2.2 Réponse radiométrique théorique des états de surface	33
2.2.1 Bref rappel des bases physiques de la télédétection.....	33

2.2.2	Comportement radiométrique des paramètres	34
2.2.3	Relations spectrales entre les paramètres.....	38
2.2.4	Conclusion.....	39
2.3	L'état de l'art de l'observation des composantes de l'état de surface	40
2.3.1	Domaine des micro-ondes	40
2.3.2	Domaine émissif.....	41
2.3.3	Domaine réflectif.....	41
2.3.4	Résumé des outils disponibles	43
2.4	Conclusions - le type d'information télédétectée requis	46
2.5	Démarche - les grandes étapes de la recherche.....	47
PARTIE II	L'EXPÉRIMENTATION	51
3	L'EXPÉRIMENTATION SUR LA VALLÉE DE LA PEYNE.....	53
3.1	Milieu d'étude	53
3.1.1	Milieu physique	53
3.1.1.1	Principales entités géologiques	54
3.1.1.2	Principaux types de sol	54
3.1.2	Milieu culturel : aspects des vignobles et de la viticulture	56
3.1.2.1	Les vignes méditerranéennes et leur mode de conduite.....	56
3.1.2.2	Les exploitants viticoles et les objectifs de production.....	57
3.1.2.3	L'itinéraire technique – l'entretien du sol	57
3.1.2.4	L'itinéraire technique – l'entretien de la culture	60
3.1.3	Sites sélectionnés.....	61
3.2	Matériel et données.....	62
3.2.1	Prises de vue.....	62
3.2.1.1	le dispositif de prise de vue.....	62
3.2.1.2	les différentes prises de vue	64
3.2.2	Données non télédétectées.....	65
3.2.3	Étapes du prétraitement	65
3.2.3.1	calage géométrique	66
3.2.3.2	calage radiométrique et prise en compte des conditions de vue et d'éclairage.....	67
3.2.4	Les outils de travail.....	69
3.3	Conclusions	71
PARTIE III	EXTRACTION DE LA FRACTION DE SOL ÉCLAIRÉE DANS LES VIGNOBLES	73
4	RECONNAISSANCE DES PARCELLES DE VIGNE.....	75
4.1	Introduction	76
4.2	Image processing strategy.....	77
4.2.1	Requirements to be fulfilled by the method.....	77
4.2.2	Selected approach.....	77
4.3	Model description	78
4.3.1	Field data extraction	78
4.3.2	FFT	79

4.4	Results and discussion	81
4.4.1	Influence of field contrast and dimensions on vineyard detection.....	82
4.4.2	Training mode.....	83
4.4.3	Spacing	84
4.4.4	Orientation.....	85
4.5	Conclusion	85
4.6	Validation étendue du modèle	86
5	<i>EXTRACTION DE LA SURFACE DU SOL ÉCLAIRÉE DANS LA PARCELLE</i>	89
5.1	Introduction	90
5.2	Proposed image processing strategy	90
5.2.1	Requirements to be fulfilled by the method.....	90
5.2.2	Selection of spectral input	91
5.2.3	Selection of segmentation approach	92
5.2.4	Method description	93
5.3	Accuracy assessment and discussion	97
5.4	Conclusion	99
5.5	L'application aux prises de vue réalisées hors saison végétative	100
PARTIE IV	ANALYSE DES ÉTATS DE SURFACE	103
6	<i>CLASSIFICATION SPECTRALE BIDIRECTIONNELLE DES ÉTATS DE SURFACE ; L'ÉCHELLE DU PIXEL DANS L'INTERRANG</i>	105
6.1	La radiométrie bidirectionnelle des états de surface	105
6.1.1	Introduction	105
6.1.2	Matériel et méthodes	107
6.1.2.1	les mesures.....	107
6.1.2.2	description du comportement réflectif bidirectionnel	107
6.1.3	Les mesures goniométriques.....	108
6.1.4	Les surfaces à comportement réflectif bidirectionnel distinct	112
6.1.4.1	les classes hydrologiques	112
6.1.4.2	les classes hydro-spectrales.....	114
6.1.5	Conclusions	115
6.2	Classification des pixels dans l'interrang éclairé	116
6.2.1	Méthodes	116
6.2.1.1	hypothèses du modèle de classification	118
6.2.2	Séparabilité des classes à travers le temps et l'image.....	119
6.2.3	Exemples de classification d'images et analyse de sensibilité aux erreurs	120
6.2.3.1	erreurs de correction spectrale	122
6.2.3.2	erreurs géométriques.....	123
6.2.3.3	situations non conformes aux hypothèses du modèle spectral	127
6.2.4	Conclusions	129
7	<i>DESCRIPTION DES ÉTATS DE SURFACE DE LA PARCELLE ; SYNTHÈSE DES INFORMATIONS ÉLÉMENTAIRES</i>	131
7.1	Introduction	131

7.2	Distribution spatiale des paramètres à la surface de la parcelle	132
7.2.1	Rappel des connaissances	132
7.2.1.1	situations initiales et finales	132
7.2.1.2	situations intermédiaires	133
7.2.1.3	populations de pixels attendues.....	133
7.2.2	Compléments apportés par des observations de terrain	134
7.2.2.1	protocole d'observation et méthode d'analyse	134
7.2.2.2	indications de taille et de voisinage	136
7.2.2.3	prise en compte de l'effet du changement d'échelle	140
7.3	Modèle de reconnaissance de discontinuités à l'échelle de l'interrang	142
7.3.1	Introduction	142
7.3.2	Choix de l'approche	142
7.3.3	Organisation et hypothèses du modèle	144
7.3.3.1	Identification de pratiques culturales discontinues	145
7.3.3.2	Prise en compte des interrang d'exception	147
7.3.4	Résultats et discussion	149
7.3.5	Conclusions sur la reconnaissance de pratiques "discontinues"	151
7.4	Modèle de reconnaissance du faciès et de fortes discontinuités dans la parcelle	152
7.4.1	Introduction	152
7.4.2	Organisation et hypothèses du modèle	153
7.4.3	Résultats et discussion	157
7.4.3.1	Reconnaissance du faciès.....	157
7.4.3.2	Quantification des couverts herbeux et des débris végétaux ; un début.....	159
7.4.3.3	Quel potentiel pour le contexte temporel ?	161
7.4.4	Conclusions sur la reconnaissance du faciès et de l'enherbement.....	162
7.5	Conclusions	163
PARTIE V CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		165
8	CONCLUSIONS GÉNÉRALES - LA CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE ..	167
9	PERSPECTIVES	171
9.1	Améliorations proposées	171
9.1.1	Aspects techniques	171
9.1.2	La connaissance sur les états de surface	172
9.1.3	L'étude temporelle pour compléter le "système"	173
9.2	L'intégration dans la modélisation.....	173
9.3	Valorisation par transposition.....	173
9.4	Les évolutions futures.....	174
BIBLIOGRAPHIE		175
LISTE DES FIGURES		189
LISTE DES TABLEAUX		193
ANNEXES.....		195

Introduction générale

Présente en région méditerranéenne française depuis l'Antiquité, la culture de la vigne s'est étendue à la quasi-totalité du paysage. Cette domination, vieille de quelques siècles, s'accompagne depuis la fin du 19^{ème} siècle d'une intensification des pratiques culturales. La pression sur l'environnement se fait toujours plus forte, notamment depuis quelques décennies avec la généralisation de la mécanisation et l'utilisation de produits phytosanitaires. La durabilité de ce système agraire est largement remise en cause, tant sur les plans physique que biologique et chimique. Les modifications imposées notamment au comportement de l'eau, agent et ressource de grande importance, sont indéniables.

Les informations obtenues depuis plusieurs années sur des bassins-versants expérimentaux notamment en milieu méditerranéen viticole, montrent l'importance primordiale des états de surface des sols et de la structure du parcellaire sur les flux d'eau et de polluants.

Dans le but d'appréhender les phénomènes de crues et de pollutions agricoles, ainsi que d'aider à la bonne gestion de la ressource en eau disponible pour les cultures, un modèle hydrologique distribué est construit à l'UMR Sol et Environnement d l'INRA ENSA.M. Les états de surface du sol et la structure du parcellaire constituent une entrée primordiale pour ce modèle et il est indispensable de reconnaître et décrire ces caractéristiques à l'échelle d'un ou de plusieurs bassins-versants.

La modélisation exige d'avoir à sa disposition des méthodes assistées, légères mais fiables, d'acquisition de ces informations. Malheureusement l'inventaire par prospection directe de terrain de ces paramètres est extrêmement lourd.

L'objectivité, la répétitivité, et la couverture géographique, font de la télédétection un outil de prédilection. Malheureusement, les alternatives proposées par les récentes avancées de la télédétection satellitale (qui autoriseraient une large couverture géographique et une répétitivité) ne sont pas mobilisables dans ce contexte du fait (1) de leur insuffisante résolution spatiale : en effet la culture de la vigne induit des effets complexes sur la radiométrie du sol que l'on cherche à percevoir (masquage direct et ombre portée) ; (2) de leur lourdeur de mise en œuvre, ne permettant pas des interventions extrêmement précises dans le temps.

Ainsi l'objectif du présent travail est la mise au point d'un dispositif et de méthodes d'analyse originaux qui tiennent compte d'une part des particularités du milieu concerné, et d'autres part des exigences de la modélisation. Il s'agit d'explorer le potentiel de la télédétection, tout en préservant l'objectif pragmatique d'obtenir un outil le plus finalisé possible.

Le présent document est organisé en cinq parties.

- I. *La première partie* présente la problématique de l'étude. Nous rappelons la problématique thématique, et la prise de conscience progressive des acteurs vis-à-vis de cette situation. Ensuite nous dressons l'état de l'art de l'intégration de la télédétection dans la modélisation hydrologique, pour aboutir à une définition détaillée de nos objectifs. La démarche choisie pour atteindre au mieux ces objectifs est définie après avoir décrit les caractéristiques des états de surface et l'état de l'art de leur estimation par télédétection.
- II. *La seconde partie* décrit le milieu viticole méditerranéen et ses spécificités qui interviennent dans la télédétection de la surface du sol. Ceci nous amène à définir le dispositif jugé comme étant le mieux adapté aux exigences formulées.

- III. et IV. *Les troisième et quatrième parties* constituent le cœur de notre travail, où nous analysons le potentiel de reconnaissance du dispositif défini précédemment. Les chapitres de la partie trois peuvent être considérés comme une illustration du potentiel de l'imagerie à très haute résolution spatiale et des développements méthodologiques associés. Ces étapes, préliminaires à la reconnaissance des états de surface (partie IV), constituent par elles-mêmes un intérêt pour la modélisation hydrologique. Dans la partie quatre nous nous intéressons à l'interprétation de la radiométrie de la surface éclairée des parcelles de vignes, fournie par la partie trois, pour aboutir à une description des états de surface de la parcelle.
- V. *En conclusion*, nous revenons sur l'intérêt des méthodes développées pour la modélisation hydrologique distribuée, ainsi que leur limites. On terminera par la description de l'apport attendu des améliorations du dispositif, des évolutions techniques possibles dans un proche avenir, et de l'analyse temporelle, qui n'a malheureusement pas trouvé dans la présente étude toute la place qu'elle mériterait.

PARTIE I

HYDROLOGIE ET CARACTÉRISATION DES ÉTATS DE SURFACE DANS LE VIGNOBLE MÉDITERRANÉEN

<i>1</i>	<i>CADRE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE</i>	5
1.1	Problématique hydrologique en milieu cultivé.....	5
1.2	Spécificité du vignoble méditerranéen	6
1.3	Modélisation hydrologique en milieu viticole méditerranéen français.....	9
1.4	État de surface du sol en milieu cultivé	12
1.5	L'objectif posé.....	19
<i>2</i>	<i>LES ÉTATS DE SURFACE EN MILIEU VITICOLE MÉDITERRANÉEN : CARACTÉRISATION ET RÉPONSE RADIOMÉTRIQUE</i>	21
2.1	Les composantes de l'état de surface pour les sols de vignoble.....	22
2.2	Réponse radiométrique théorique des états de surface	33
2.3	L'état de l'art de l'observation des composantes de l'état de surface.....	40
2.4	Conclusions - le type d'information télédéteectée requis	46
2.5	Démarche - les grandes étapes de la recherche.....	47

1 Cadre général de l'étude

La situation actuelle des sols viticoles méditerranéens français résulte de l'interaction entre les caractéristiques du milieu et de sa longue exploitation par l'homme. Depuis quelques décennies, l'intensité renforcée de cette exploitation provoque de sérieux problèmes hydrologiques tels que de fortes crues, des inondations et des phénomènes d'érosion. La prise de conscience de cette situation et les études scientifiques dont elle est à l'origine constituent le fondement de cette étude.

La mise en culture du sol modifie le comportement de l'eau, ce qui peut entraîner divers problèmes au niveau du sol et de l'environnement. Le paragraphe 1.1 illustre ce point et donne quelques exemples récents qui témoignent de la préoccupation que ces problèmes continuent de susciter. Nous nous intéressons par la suite plus particulièrement aux problèmes liés à l'exploitation viticole du sol méditerranéen (1.2.1) et à la prise de conscience de ces problèmes qui a eu lieu en France depuis une quinzaine d'années (1.2.2). Afin de comprendre le fonctionnement hydrologique, et par là de pouvoir évaluer et prédire l'impact des diverses pratiques culturales sur les transferts d'eau et de solutés, la modélisation hydrologique de ce milieu s'impose. Dans le paragraphe 1.3 nous présentons les travaux de suivi et de modélisation hydrologique, réalisés par l'UMR Sol et Environnement de l'INRA-ENSA.M auxquels l'étude présentée a pour but de contribuer. L'état de la surface du sol est un facteur clé pour le devenir de la pluie et donc également pour la modélisation hydrologique. Dans le paragraphe 1.4 une définition de ce facteur est donnée et l'historique et l'état de l'art de son observation par télédétection sont décrits. Ceci nous conduit enfin à la définition des objectifs de cette thèse (1.5).

1.1 Problématique hydrologique en milieu cultivé

Dans des conditions climatologiques stables, la végétation d'un écosystème naturel est plus ou moins en équilibre avec son environnement : elle exploite les ressources essentielles à toute forme de vie que sont l'eau et le sol, tout en permettant leur persistance (bien que le sol ne cesse d'évoluer). Dans un système agricole, cette végétation est remplacée par une culture dont la récolte signifie un appauvrissement accéléré du substrat. Si l'on veut que cette exploitation soit durable il faut, comme les études scientifiques ne cessent de le montrer (Hatton & Nulson, 1999 ; Passioura, 1999), "mimer" en quelque sorte le fonctionnement d'un système naturel. Les moyens traditionnels comme l'irrigation (pour garantir la ressource en eau) et l'apport d'engrais (pour garantir la fertilité du sol) peuvent servir à compenser l'appauvrissement, mais ces mesures s'avèrent souvent insuffisantes. Une mauvaise gestion de l'équilibre entraîne des phénomènes de dégradation comme l'érosion, l'instabilité hydrologique et la salinité secondaire souvent associée, des déséquilibres chimiques comme une acidité excessive (Passioura, 1999), mais aussi des risques d'inondation, de pollution ou bien des problèmes de sécheresse.

L'ensemble de ces problèmes est en grande partie lié au comportement de l'eau qui, par son rôle d'agent ou de ressource, entraîne l'altération du sol ou de l'environnement. Les processus impliqués font l'objet d'études (e.g. Barth, 1999 ; Mantel & Van Engelen, 1999 ; Romero-Diaz *et al.*, 1999 ; Williams *et al.*, 1999 ; Ramos *et al.*, 2000), passant souvent par la voie de la modélisation hydrologique (Garen *et al.*, 1999 ; Greiner, 1999), pour dans certains cas aboutir à des conseils de gestion (Karlen *et al.*, 1999 ; Prosser & Abernethy, 1999 ; Kotb *et al.*, 2000). Par ailleurs, des programmes d'inventaire comme le *GLASOD (Global Assessment of Human Induced Soil Degradation)*, Bridges & Oldeman, 1999), et de suivi comme le *ASEAN-US watershed programme*

(Douglas, 1999) ou encore le programme *MSEA* (*Management Systems Evaluation Area*) aux États-Unis, témoignent d'une prise de conscience actuelle concernant l'enjeu d'une bonne gestion des ressources naturelles.

1.2 Spécificité du vignoble méditerranéen

Plusieurs aspects font que les problèmes hydrologiques en milieu rural méditerranéen sont spécifiques de ce milieu. Mis à part le climat, l'importance des cultures pérennes à couvert discontinu telles que l'arboriculture et la viticulture sont à la source de cette spécificité. La surface cultivée en vigne, après une période d'arrachage (100.000 ha en 10 ans), fait encore de la région Languedoc-Roussillon un véritable "Vine Belt", au même titre que les grandes régions de production de céréales (Wheat Belt) et de maïs (Corn Belt) aux États-Unis. Cette quasi-monoculture (plus de 300 milliers d'hectares DRAF, 1998), font du Languedoc-Roussillon ce qu'on appelle le plus grand vignoble du monde. L'état actuel de ce milieu est le résultat, d'une part de la présence depuis très longtemps, et parfois peut-être même trop longtemps (Goma-Fortin & Argillier, 1999) de la culture de la vigne, et d'autre part de sa "révolution" (Rousset, 1997) récente, notamment sur le plan de la qualité.

1.2.1 Un sol depuis longtemps cultivé sous vigne

Les problèmes caractéristiques de la culture de la vigne sont en partie comparables à ceux existant dans toute région agricole soumise à une production intensive. Il s'agit notamment d'une dégradation (physique et chimique) des sols provoquée par l'érosion. On connaît l'existence de ces problèmes depuis longtemps dans des régions comme le plateau du loess en Chine ou le Corn Belt aux États-Unis. Il en est de même pour l'agriculture intensive du Nord-Ouest de l'Europe. Bien des programmes de recherche ont été réalisés et à ce jour les facteurs déterminants de l'érosion semblent identifiés. A part la pente et l'intensité de la pluie, l'importance des caractéristiques du sol et la protection assurée par une couverture végétale a été démontrée. A travers ces derniers facteurs l'influence de l'action de l'homme est très clairement mise en évidence.

Plusieurs particularités du milieu viticole méditerranéen aggravent sa situation en comparaison aux autres zones cultivées. D'abord il y a l'impact du climat. La pluviométrie de la région est très variable en quantité d'une année à l'autre, dans l'espace et en distribution dans l'année. Son intensité peut être très forte, au point de provoquer des inondations catastrophiques (citons à titre d'exemple celles de Nîmes en 1988, Vaison-la-Romaine en 1992 ou encore celle du département de l'Aude en novembre 1999).

On ne peut pas exclure que différents facteurs liés à la culture de la vigne contribuent à l'intensité des crues, portant ainsi une part de responsabilité dans ces catastrophes. La nature pérenne et spatialement discontinue de cette culture est un premier point à noter : l'établissement du vignoble conditionne, pour quelques décennies, le comportement de la parcelle (Heinzle, 1995 ; van Dijck, 2000). La pérennité interdit tout repos du sol et toute alternance avec d'autres cultures. Ceci a pour effet de maintenir le sol directement exposé à la pluie pendant une longue période (en général de novembre à avril), sauf si un enherbement spontané, favorisé ou toléré par le viticulteur, vient le recouvrir. L'espacement important des rangs/pieds de vigne, nécessaire pour un bon éclaircissement et une bonne aération des ceps (Goma-Fortin *et al.*, 1997 ; Boursiquot, 1999), conduit à l'installation d'une couverture végétale qui même en pleine saison végétative, n'excède guère les 50% de surface couverte et qui est maintenue autour de ce niveau par rognage/effeuillage.

Cette pérennité devient d'autant plus importante quand on considère la présence historique du vignoble dans la région. On imagine aisément que les quelques milliers (!) d'années de viticulture (Macaire,

1998) ont laissé des traces dans les sols. C'est notamment le cas depuis quelque deux cents ans que le vignoble s'est répandu sur toute la région ; descendue des contreforts montagneux, la vigne a envahi la plaine côtière pour répondre aux besoins de la population locale (la pression démographique ne cesse d'ailleurs d'augmenter) et ceux du marché (une forte demande de vin de table et d'assemblage). Cette production de qualité courante n'a pas incité le vigneron à se soucier de l'état du sol de son vignoble, comme c'était le cas par exemple en Bourgogne depuis des siècles (Johnson, 1989).

De plus, au début du XIX^{ème} siècle, les pratiques culturales se sont fortement modifiées. D'abord la fréquence des passages sur la parcelle a augmenté dans le cadre de la lutte contre les maladies venues d'Amérique. Puis la nature de ces passages s'est modifiée par la mécanisation, qui exerce une lourde charge sur le substrat. Depuis la crise phylloxérique, la traction animale fut introduite, puis dans les années cinquante le tracteur a permis à deux hommes d'exploiter 10 ha et dans les années 70 "le rêve" de la récolte intégrale mécanisée est devenu réalité (Heinzle, 1995). Ces changements ont provoqué une restructuration du milieu. Les modes de conduite ont été modifiés, notamment l'espacement des rangs, et la structure des exploitations, du parcellaire et du paysage ont été influencées : c'est la cause de la disparition de la polyculture, de la suppression des obstacles, du nivellement, de l'allongement des rangs et de l'uniformisation de l'orientation des rangées de vigne. Récemment Ramos *et al.* (2000) ont décrit les effets néfastes de certains de ces changements pour un milieu très comparable (sols viticoles sur sédiments miocènes dans le Pénédès, Espagne).

Enfin, l'utilisation de produits phytosanitaires s'est généralisée dans les années soixante. Pour diminuer les coûts de chantier, le désherbage chimique intégral était alors très en vogue (Chantelot, 1999). Cette évolution a, par l'abandon du labour de surface, évidemment fortement modifié le comportement hydrique du sol et sa capacité de recharge saisonnière en eau. De plus elle a engendré un risque de pollution du milieu, dont l'ampleur ne fait que depuis peu de temps l'objet d'études détaillées (Frot, 1998 ; Louchart, 1999). Aussi la vie biologique du sol se retrouve-t-elle fortement défavorisée, provoquant des modifications physiques et chimiques dans le sol.

Depuis une vingtaine d'années, une nette prise de conscience apparaît quant aux risques engendrés par ces modifications sur la croissance de la vigne. En 1984 déjà, Champagnol (1984) appelait le vigneron à labourer son sol pour augmenter la recharge de la réserve utile en eau lors de fortes pluies et donc pour lutter contre la sécheresse. Plus récemment, des problèmes de dégradation par érosion de vignobles ont été constatés à maintes reprises, comme le ravinement des sols sur schistes du Saint Chinianais (Goma-Fortin & Argillier, 1994). Les auteurs attribuent ces phénomènes à l'utilisation de désherbants de pré-levée, supprimant une masse considérable de racines d'adventices jusqu'ici bénéfiques - par ameublissement et aération - à la structure du sol. Ils mentionnent aussi l'effet du passage répété d'engins de plus en plus lourds, réduisant progressivement la porosité par tassement de terre. Il y a seulement cinq ans encore, Heinzle (1995) constatait que "dans certains secteurs, ce phénomène devient un véritable fléau et impose la réalisation d'aménagements importants pour tenter d'en juguler les effets."

1.2.2 La démarche qualité

La prise de conscience des risques de dégradation décrits ci-dessus est une des forces mouvantes derrière la "révolution" viticole (Rousset, 1997), ou ce que l'on appelle communément la *démarche qualité* (Goma-Fortin *et al.*, 1998) : par rapport à la situation d'il y a 15 ans, l'objectif de production dans la région s'est très fortement réorienté de la quantité vers la qualité. Comme toujours dans l'histoire du vin, ceci vient surtout en réponse à la demande du marché. Ce changement de la demande s'accompagne de mesures de subvention émises par l'Union Européenne pour éviter la surproduction. La prime à l'arrachage définitif (PAD), initiée en 1985 et abandonnée depuis quelques années, a entraîné un déroulement rapide de cette réorientation : entre 1985 et 1995 un quart du vignoble

languedocien a disparu (100.000 sur 400.000 ha) et la production régionale de vin s'est réduite d'un tiers (Rousset, 1997). 70% des arrachages primés concernent des cépages intimement liés à la production de vin de table de masse et d'eau de vie. Le vignoble restant a été fortement restructuré : de 1980 à 1994 autour de 40.000 ha du vignoble ont été replantés en cépages de qualité comme la syrah, le grenache, le merlot et des nouveaux cépages comme le chardonnay et le sauvignon.

En dehors de l'adaptation de l'encépagement au terroir, la démarche de qualité présente de multiples autres facettes (Goma-Fortin *et al.*, 1998) :

- ⇒ optimisation des modes de conduite ;
- ⇒ mise en œuvre d'itinéraires techniques respectueux de l'environnement ;
- ⇒ systématisation du suivi de la maturation et développement des sélections parcelaires ;
- ⇒ équipements technologiques des sites de vinification, d'élevage et de conditionnement ;
- ⇒ communication positive sur le vin, sa culture, ses paysages, sa valeur nutritionnelle.

Il s'agit donc bien d'une production de qualité, qui s'accompagne d'un souci de durabilité. On constate une remise en cause du désherbage chimique intégral, d'où un retour au travail du sol superficiel sur l'interrang avec maintien du désherbage chimique sur le rang (Chantelot, 1999). De nombreux conseils sont fournis aux viticulteurs pour les aider à limiter les dégâts : augmenter les apports de matière organique pour protéger et raviver le sol ; diminuer les vitesses de biodégradation, soit en diminuant l'exposition du sol à la pluie, soit en diminuant le travail du sol (Chenu, 1999) ; maintenir enherbés les chemins, fossés et tournières et conserver les herbes apparaissant en fin de vendange (Argillier, 1999), et l'enherbement par semis (engazonnement) (Goma-Fortin *et al.*, 1998).

En dépit de ces conseils, les interventions dans les domaines autres que l'encépagement semblent s'introduire très lentement dans la pratique. Pour l'instant l'effort réalisé en engazonnement est très réduit. C'est seulement dans les plaines alluviales humides que cet enherbement semé devient un peu plus courant, en étant souvent employé un rang sur deux (Boursiquot, 1999). A ce jour on estime qu'environ 40% des vignobles subissent un désherbage chimique intégral sans labour (Boursiquot, 1999), même si celui-ci est le plus souvent limité aux parcelles soit en forte pente, soit très étroites, soit très petites. Pourtant des signaux positifs existent : des initiatives ont été entreprises pour mettre au point des modes de production alternatifs à l'agriculture conventionnelle avec pour objectif le respect de l'environnement et une production de raisins sains, tout en restant économiquement viables. Des référentiels techniques sont en cours d'élaboration concernant la production intégrée, l'agriculture raisonnée et l'agriculture durable (Sentenec *et al.*, 1999). Aussi le Languedoc-Roussillon est-il leader européen pour les surfaces de vignes biologiques, avec 2500 ha en 1998. Une poignée de vigneron reprend même la production de vins doux liquoreux par vendanges tardives, la grande spécialité du Languedoc-Roussillon au XIV^{ème} siècle (Simon, 1999). Le témoignage le plus convainquant de la réussite de la démarche qualité est le fait qu'en cinq ans, les exportations de vin ont fait plus que doubler. Elles atteignent désormais 12,5% de l'exportation totale française (Midi-Libre, 2000).

1.2.3 Conclusion

Une prise de conscience au niveau des instances publiques du besoin d'amender l'exploitation agricole du milieu au profit de la durabilité semble avoir remédié à une tendance destructive. Néanmoins le vigneron, motivé de participer à la démarche qualité pour ranimer la vitalité de son exploitation, paraît pour l'instant donner la priorité aux mesures à effet rapide comme l'encépagement au détriment de réformes favorisant l'exploitation durable. Il est souhaitable de mieux pouvoir mettre en évidence l'effet des différentes pratiques culturelles, afin de convaincre l'ensemble des acteurs de l'intérêt des réformes proposées.

1.3 Modélisation hydrologique en milieu viticole méditerranéen français

Ce travail s'inscrit dans le cadre plus général du programme ALLEGRO-Roujan (Voltz *et al.*, 1994 ; Voltz *et al.*, 1996) ; §1.3.1) concernant l'étude du fonctionnement hydrologique du milieu viticole méditerranéen et celle de l'influence des pratiques culturales sur ce fonctionnement par le biais de la modélisation hydrologique. Le paragraphe 1.3.2 fournit la justification du développement d'un nouveau modèle hydrologique pour le milieu concerné et décrit ses principales caractéristiques, dont certaines influencent la démarche suivie dans cette thèse.

1.3.1 Le programme ALLEGRO-Roujan

Les organismes professionnels mettent en œuvre une approche de conseil auprès des viticulteurs qui va au-delà du simple conseil reposant sur des bases plus ou moins empiriques. Les problèmes de dégradation étant loin d'être résolus, envisage de développer des travaux de recherche selon 2 axes : 1) développement et validation d'outils de diagnostic à la parcelle de l'état du sol et 2) étude de l'impact des pratiques culturales sur le sol (Chantelot, 1999).

L'UMR Sol et Environnement de l'INRA-ENSA.M coordonne depuis 1991 un programme pluridisciplinaire d'étude du fonctionnement hydrologique du milieu viticole. Cette compréhension est primordiale pour pouvoir analyser les conséquences que représentent d'éventuels changements dans les pratiques culturales ou dans l'occupation du sol. Ce travail est également essentiel pour que les actions de développement et de conseils mises en œuvre par les organismes professionnels et techniques (e.g. la Chambre d'Agriculture de l'Hérault et l'Institut Technique de la Vigne). Le programme ALLEGRO (AnaLyses Locales Et intéGrées de la RessOurce en eau) s'inscrit dans le cadre de deux objectifs :

- ⇒ l'identification et la quantification de la répartition spatio-temporelle des flux dans le système cultivé viticole méditerranéen en fonction de sa variabilité pédoclimatique ;
- ⇒ l'analyse de la contamination des sols et des eaux par pollution diffuse des produits phytosanitaires de la vigne.

Les échelles spatiales concernées, dans le cadre d'objectifs de gestion, d'aménagement et de protection des ressources en eau et en sol en zone cultivée, sont principalement celles de la parcelle agronomique et celle du bassin versant élémentaire (Andrieux *et al.*, 1993). Ce dernier peut être considéré comme une échelle de diagnostic en termes de qualité et de quantité d'eau, car c'est une unité d'espace où se forme la ressource en eau et où s'intègrent les variabilités du milieu et des processus.

La basse et moyenne vallée d'un affluent de l'Hérault - la Peyne - a été sélectionnée comme secteur d'étude. A l'heure actuelle beaucoup d'informations ont été acquises sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin élémentaire situé dans cette vallée et représentatif des sols de la moyenne vallée de l'Hérault, le bassin versant de Roujan. La modélisation du fonctionnement de ce bassin élémentaire, actuellement en cours (Moussa *et al.*, 2001), est fondée sur cette connaissance des phénomènes déterminant le devenir de l'eau.

1.3.2 L'approche de modélisation

Il existe plusieurs types de modélisation hydrologique variant en complexité et conçus dans des buts différents. Quel est donc celui adapté aux objectifs décrits ci-dessus ?

1.3.2.1 modélisation conceptuelle globale

Les modèles empiriques/conceptuels globaux constituent des modèles peu complexes. Ils permettent de prédire les flux en sortie d'un bassin versant en fonction de la pluviométrie (flux en entrée). Dans ce cas l'effet des grandeurs variables dans le temps et dans l'espace est paramétrisé de façon globale. Ceci a deux inconvénients majeurs : ces modèles ne nous permettent pas d'apprécier l'importance relative des différents phénomènes à l'intérieur du bassin, et donc dans le milieu étudié ; de plus leur emploi répété suppose une stationnarité du milieu, ce qui dans notre cas est pertinemment faux ; on s'intéresse justement à l'évolution du milieu soumis aux changements.

Déjà en 1941, Hirsch et Brater (1941) ont constaté que les débits sont générés dans la plupart des cas par plusieurs processus simultanés ou successifs. Les combinaisons sont très variables dans le temps et dans l'espace, et dépendent dans chaque cas de plusieurs facteurs contrôlant à la fois la présence/absence de chaque processus et son intensité. **La modélisation du fonctionnement du système a donc besoin d'informations précises, localisées dans le temps dans l'espace !**

1.3.2.2 modélisation distribuée à base physique

Ces constatations et exigences sont à la base de la *modélisation distribuée à bases physiques*, un type de modèle opposé au modèle conceptuel global en termes de complexité. Ces modèles distribués et mécanistes sont basés sur la reconnaissance de la variabilité spatiale et temporelle de l'interaction entre les processus. Plusieurs groupes de facteurs contrôlant la variabilité spatio-temporelle des processus peuvent être identifiés (Ambroise, 1991) :

- ⇒ les conditions aux limites : échanges avec l'atmosphère ;
- ⇒ les conditions initiales : l'état hydrique du sol ;
- ⇒ les propriétés hydriques et hydrodynamiques des sols et de la végétation ;
- ⇒ les caractéristiques géométriques : topographie et morphométrie.

L'ensemble de ces facteurs permet de découper l'espace en "**zones contributives variables**" (Hewlett & Hibbert, 1976), *i.e.* les zones d'extension variable où est actif chaque type d'écoulement, chaque type de processus. Le ruissellement Hortonien par exemple n'est généralement actif que sur une partie souvent très limitée d'un bassin. Selon la localisation de cette zone, l'eau ruisselée pourra alors soit effectivement contribuer au débit de crue, soit au contraire s'infiltrer plus en aval. En zones humides un effet piston peut provoquer un ruissellement sur surface saturée ; ailleurs on trouve de l'exfiltration, provenant de l'écoulement souterrain, etc.

Chaque approche de modélisation distribuée à bases physiques est une tentative pour décrire la dépendance spatiale de la réponse d'un bassin à un événement de pluie. Ces modèles font appel à des variables d'état, reliées entre elles en tout point par des relations d'état, des relations dynamiques et des relations de conservation. Ces relations font intervenir des paramètres mesurables en principe et caractérisant les propriétés physiques du milieu. Ce sont donc des modèles mécanistes, locaux, à bases physiques et à paramètres mesurables.

Il en résulte que les modèles physiques distribués (e.g. SHE, API, CREAMS, NWSFS, STORM, STANFORD, SSARR et NWSRFS) sont très complexes. Ils nécessitent beaucoup de données en entrée (Ambroise, 1991), d'autant plus que les zones contributives variables sont de nature évolutive. Par conséquent ces modèles ont été peu utilisés (van de Griend & Engman, 1985) et les quelques exemples d'utilisation disponibles sont souvent décevants (Viné, 1997) : notre connaissance encore trop ponctuelle des processus hydrologiques (Engman & Gurney, 1991) nous contraint à utiliser des connaissances acquises localement pour décrire le fonctionnement de bassins de quelques-uns à plusieurs km². Or, les modèles se prêtent peu aux changements d'échelle, parce que les processus changent (Puech, 1993 ; Viné, 1997).

1.3.2.3 modélisation physico-conceptuelle spatialisée

Pour diminuer la complexité des modèles décrits précédemment, et ainsi améliorer leur potentiel d'utilisation, un nouveau type de modélisation est en plein développement depuis une quinzaine d'années (e.g. TOPMODEL). On préserve à la fois l'aspect "fonctionnel", mais en simplifiant les modèles en retenant uniquement les variables et paramètres pertinents, et l'aspect "spatialisé", en découpant l'espace en unités de fonctionnement relativement homogènes. De tels modèles sont déterministes dans leur représentation (simplifiée) des processus en jeu, mais stochastiques dans leur paramétrisation et leur application (Ambroise, 1991). C'est pour cela qu'on parle de *modèles physico-conceptuels spatialisés* (appelés par la suite *modèles spatialisés*).

1.3.2.4 L'approche retenue

Le modèle MYDHAS en voie de développement à l'INRA-ENSA.M (Moussa *et al.*, 2001) appartient à ce dernier type, retenu pour les qualités évoquées ci-dessus. Le développement d'un nouveau modèle a été considéré nécessaire, d'une part à cause de problèmes et de limites à l'application (Ambroise, 1991) dans les modèles existants, et d'autre part à cause des spécificités du milieu viticole méditerranéen : l'espace découpé en parcelles de taille variable soumises à différentes pratiques culturales, influençant leur comportement hydrologique, et la présence d'un réseau de fossés très dense (Le Forner *et al.*, 1999).

Malgré ce nouvel effort de modélisation, un certain nombre de simplifications est encore nécessaire. Les approximations spatiales sont moins fortes que celles de TOPMODEL (découpage systématique régulier), mais restent loin d'être négligeables. On s'appuie toujours sur un découpage de l'espace en éléments supposés homogènes. Mais ce découpage se fait à partir de critères fonctionnels, dans la mesure où on suppose que le fonctionnement hydrologique de la parcelle est homogène. Le maillage en profondeur est fonction des conditions de surface de la parcelle.

1.3.3 Conclusion

Un programme de recherche pluridisciplinaire s'intéresse depuis une dizaine d'années au fonctionnement hydrologique d'un bassin versant viticole en région méditerranéenne. Dans ce cadre, un modèle spatialisé, permettant de simuler le comportement hydrologique du milieu d'étude est en cours de mise au point. Conçu spécialement pour ce milieu, certaines particularités le distinguent d'autres modèles de la même "famille". Tout comme ses confrères, il a besoin d'informations précises, localisées en temps et espace. Une particularité importante à noter dans le contexte du présent travail est que ce modèle s'appuie encore plus fortement que d'autres sur les conditions de surface : des informations sont requises pour chaque parcelle et celles concernant la surface déterminent le maillage en profondeur.

Il est donc primordial pour un bon fonctionnement du modèle développé, de pouvoir disposer d'une information fiable et objective sur les conditions de surface de chaque parcelle. L'acquisition de ces informations par observation visuelle sur le terrain compromet l'objectivité et limite l'étendue de la zone sur laquelle le modèle puisse être appliqué. La recherche d'un moyen d'acquisition plus adapté aux besoins, constitue la justification la plus importante de cette étude. Ceci est d'autant plus nécessaire vu que le modèle, une fois mis au point, aura besoin d'être employé de façon répétitive : dans un premier temps afin de mieux cerner le fonctionnement hydrologique et l'impact des pratiques culturales et dans un deuxième temps pour réaliser des prédictions, ce qui constitue un outil d'aide à la décision. Le moyen recherché d'acquisition des informations doit permettre ce suivi temporel, *i.e.* être caractérisé par une grande flexibilité de mise en œuvre, permettant de fournir les informations à la résolution temporelle exigée par l'hydrologue ou le décideur.

1.4 État de surface du sol en milieu cultivé

Quelles sont donc ces conditions de surface et pourquoi ont-elles un rôle si central dans la modélisation ? Il s'agit d'un ensemble de facteurs qui en France sont communément regroupés sous le terme d'*état de surface*. Son rôle dans l'hydrologie est commenté dans le paragraphe 1.4.1, en général et plus particulièrement pour le milieu méditerranéen viticole. On ne décrira pas ici les caractéristiques des états de surface dans ce milieu : c'est l'objet de notre étude, décrit en détail dans le chapitre suivant. On constatera par contre que le terme *état de surface* est un concept relativement flou, ce qui nous amène à proposer une définition générale (§ 1.4.2). Ensuite on s'intéressera à sa description spatialisée, *i.e.* sa reconnaissance par télédétection (§ 1.4.3).

1.4.1 L'état de surface - composante du milieu essentielle à la modélisation

Il y a plusieurs facteurs qui expliquent le rôle important de l'*état de surface* dans les modèles spatialisés. Parmi les différentes propriétés qui déterminent le comportement hydrologique du sol, c'est celle qui est le plus facilement accessible : il est bien sur très difficile d'avoir une idée précise de la variabilité des propriétés hydriques à l'intérieur du sol, en trois dimensions. Mais on a également de bonnes raisons de supposer que l'*état de surface* est la propriété la plus déterminante, car des phénomènes de profondeur qui sont susceptibles de modifier le comportement de l'eau, comme des couches de très faible perméabilité ainsi que la nappe, se trouvent dans notre milieu rarement près de la surface. Le point de loin le plus important est que les conditions de surface (les propriétés hydrodynamiques de la surface du sol et les propriétés d'interception de la végétation) conditionnent en grande partie la variabilité spatio-temporelle des flux. Les autres groupes de facteurs (§ 1.3.2), abstraction faite des conditions aux limites, sont soit stationnaires en temps et espace, soit fortement liés aux conditions de surface.

Bien que les *états de surface* n'aient pas toujours été considérés de manière explicite dans la modélisation, nous savons que ce facteur est essentiel à la réponse d'un bassin à une pluie : voir (Ambroise, 1991 ; Papy & Douyer, 1991 ; Grébillon, 1994) pour quelques exemples récents. Dans différents milieux (cultivé et naturel) et climats (tempéré et subtropical), la mesure de l'infiltrabilité de l'*état de surface* a montré son rôle primordial dans la genèse des écoulements (Boiffin & Sebillotte, 1976 ; Boiffin *et al.*, 1988 ; Papy & Boiffin, 1988 ; Dunne *et al.*, 1991 ; Valentin & Bresson, 1992 ; Lelong *et al.*, 1993). En zone de grandes cultures en climat tempéré, Boiffin *et al.* (1988) concluent que la probabilité d'érosion dépend étroitement du degré de développement des croûtes de battance, de la rugosité de surface, et de la présence d'empreintes de roues à la surface du sol. De la même façon Casenave & Valentin (1992) ont démontré une très forte décroissance de l'infiltration sur les sols encroûtés de la surface en zone sahélienne. Un système de classification des croûtes (Valentin & Bresson, 1992) fournit même une prédiction de l'infiltrabilité (Casenave & Valentin, 1992).

Dans la plupart des études, l'*état de surface* est vu comme un ensemble d'indicateurs visuels en étroite relation avec les tous premiers centimètres du sol. La classification des croûtes proposée par Valentin & Bresson (1992) en est un des principaux exemples. Ces auteurs sous-entendent ce qui est explicité par Boiffin *et al.* (1988) : "*Ces propriétés* (de surface, conditionnant les débits de ruissellement) *sont sous la dépendance des caractéristiques hydriques et structurales des couches superficielles du sol*". Ce rôle prépondérant de la couche superficielle du sol est accepté de façon générale dans la littérature, même si l'épaisseur de cette couche varie selon les études de 20 cm (Thébé, 1987) aux tous premiers millimètres (Monnier *et al.*, 1986) en passant par les 'premiers centimètres' (Collinet & Valentin, 1979 ; Fohrer *et al.*, 1999).

Des études par simulation de pluie dans le milieu méditerranéen viticole (Andrieux *et al.*, 1996 ; Gaddas, 1997 ; Léonard & Andrieux, 1998 ; Ramos *et al.*, 2000) ont confirmé la validité de ce concept de détermination du partage infiltration/ruissellement par les *états de surface* dans la région d'étude. En se limitant aux surfaces non-labourées et donc encroûtées en permanence, Léonard & Andrieux (1998) ont démontré que (1) l'histoire culturelle de la parcelle provoque des comportements hydrodynamiques différents entre parcelles, même si parfois leurs surfaces sont semblables à un instant donné ; que (2) ceci engendre une variabilité spatiale de l'infiltrabilité qui est beaucoup plus faible à l'intérieur de la parcelle qu'entre parcelles ; que (3) la couche superficielle qu'il importe à prendre en compte dans ce milieu a une épaisseur d'une dizaine de centimètres. Cette couche d'environ dix centimètres d'épaisseur, fait l'objet de ce que l'on a dénommé *Organisation Structurale Superficielle* (OSS). Gaddas (1997) et Hatier (2000) ont généralisé ce travail pour le même milieu d'étude, en utilisant la même approche pour un nombre important de parcelles labourées et non labourées. Ils ont mis en évidence l'influence prépondérante de l'OSS et ont pu établir des typologies d'*états de surface* qui sont en relation avec l'OSS et représentent différentes classes d'infiltrabilité. Gaddas (1997) démontre que les simulations de pluie représentent fidèlement le comportement du sol à d'autres échelles (la parcelle).

Ces observations montrent que dans le milieu concerné la parcelle s'impose comme unité hydrologique élémentaire dans la modélisation : il est essentiel de prendre en compte les fortes discontinuités entre parcelles, *i.e.* de respecter leurs limites. Cette imposition ainsi que l'importance hydrologique démontrée de l'*état de surface* expliquent l'approche choisie de modélisation spatialisée (§ 1.3.2.4). Ces mêmes constatations ont conduit à attribuer pour une date donnée à chaque parcelle l'*état de surface* dominant. Ces observations ont été récoltées depuis quelques années sur la zone d'étude pour construire une base de données dont on a vu précédemment l'importance.

1.4.2 Une définition de l'état de surface

Si jusque là le terme *état de surface* a été écrit en italique, c'est parce qu'il s'agit d'un concept relativement flou. Dans la littérature ce terme, très fréquemment employé, n'est jamais accompagné d'une définition rigoureuse. Parfois on semble sous-entendre qu'il comprend tout aspect d'intérêt hydrodynamique présent à la surface du sol en question (Lelong *et al.*, 1993 ; Blanchard *et al.*, 1999). Parfois on explicite clairement qu'on ne considère qu'un seul aspect dans cet ensemble, mais qui par la suite est appelé *état de surface* : Company-Remond (1997) se limite au sol nu ; Dewez & Dautrebande (1992) à l'humidité de la partie superficielle du sol ; Boiffin & Sébillotte (1976) et Boiffin *et al.* (1988) se limitent au sol nu de parcelles agricoles après récolte. D'autres ne donnent même aucune indication de ce qu'ils pourraient sous-entendre par *état de surface* (Ambroise, 1991 ; Papy & Douyer, 1991 ; Viné, 1997). On note aussi des mélanges de variables et phénomènes de différentes échelles : Lelong *et al.* (1993) définissent l'*état de surface* en milieu naturel comme la combinaison des variables de *recouvrement de la végétation* (ou de la litière forestière), de *pierrosité*, de *rugosité de surface* **et de la pente**. Par contre en sol de culture limono-argileux il le définit comme la combinaison des variables de *tailles des mottes*, de *rugosité*, de *densité apparente*, et de *teneur en eau*.

Vu son rôle central, une définition plus rigoureuse de l'*état de surface* s'impose. On se propose ici de définir l'État de la Surface du Sol de parcelles agricoles (ci-après "état de surface") de la façon suivante :

L'ensemble des variables que l'on peut observer à l'œil nu à la surface du sol minéral et qui interviennent dans le partage infiltration/ruissellement. Ces variables doivent correspondre aux objets physiques ou à leur organisation (bidimensionnelle) à la surface du sol. Ces objets peuvent

- soit faire partie ou être originaires du sol minéral sous-jacent à cette surface ;
- soit être étrangers à ce substrat et sa surface.

Dans ce dernier cas il s'agit d'objets organiques introduits de manière naturelle ou anthropique, qui se manifestent dans l'état de surface soit en reposant sur la surface du sol (ex. feuilles, sarments) soit en la traversant (ex. herbe). L'échelle d'observation n'est pas plus petite que la parcelle et ne pas plus grande que la taille des objets observés (ex. mottes, cailloux, feuilles).

Cette définition exclut entre autres la pente, la matière organique comme composant du sol sous-jacent, la densité apparente, l'humidité du sol si elle ne s'exprime pas dans la fine pellicule qu'est la surface du sol en contact avec l'atmosphère et donc si elle n'est pas visible à l'œil.

Une telle description fournit ainsi à un endroit donné une information sur :

- comment la pluie va atteindre la surface du sol minéral ;
- la difficulté qu'elle va rencontrer à dépasser cette barrière constituée par la surface du sol minéral.

Le devenir de l'eau directement sous la surface est déterminé par l'Organisation Structurale Superficielle (OSS), qui comprend l'ensemble des composants physico-chimiques de la première dizaine de centimètres du sol et leur organisation structurale.

Pour le cas spécifique du milieu viticole on propose d'étendre la définition de l'état de surface en incluant le couvert végétal de la vigne, bien que n'étant pas en contact direct avec le sol, et le cavaillon, bien que celui-ci soit plus une forme qu'un objet : le couvert de la vigne intervient en effet dans le comportement hydrologique de la surface par l'interception d'une partie de la pluie et la modification de l'intensité et de l'énergie cinétique de la pluie atteignant la surface ; le cavaillon modifie quant à lui l'écoulement de l'eau et favorise l'infiltration là où il constitue un obstacle.

1.4.3 L'état de surface - lien entre modélisation hydrologique et télédétection ?

1.4.3.1 origine et historique de la télédétection pour la modélisation hydrologique

La relation entre télédétection et modélisation hydrologique date quasiment du début de la télédétection satellitale et des possibilités d'analyse numérique d'images, car c'est à cette même époque, au cours des années 70, que Hewlett & Hibbert (1976) ont défini leur concept de *zones contributives variables*. On a remarqué (§ 1.3.2) que si les modèles distribués à base physique ont été peu utilisés, c'est à cause de la variabilité temporelle et spatiale des aires contributives. La télédétection paraissait un outil prometteur pour deux raisons. D'une part pour l'information spatiale fournie, et d'autre part pour les relations existant entre le spectre électromagnétique et des variables *directement* associés aux zones contributives variables (van de Griend & Engman, 1985). On semblait ignorer qu'il n'existe pas de liaison directe entre les valeurs électromagnétiques télédéteectées et un descripteur hydrologique (Schulz, 1987).

A la fin des années 70 et au début des années 80 beaucoup de tentatives ont essayé de délimiter des zones contributives à l'aide de la télédétection, en cherchant des relations empiriques entre la radiométrie et les descripteurs hydrologiques comme les différences en couvert végétal, les changements de température et les variations en humidité du sol. Ces relations n'étaient guère transposables à d'autres régions. Au début des années 80, la télédétection (Landsat), en discriminant entre différents types d'occupation du sol (zones urbaines, forêt), a fourni des informations pour des modèles hydrologiques à échelle grossière comme le Curve-Number Runoff Model de l'U.S. Soil Conservation Service (Bales & Betson, 1981 ; Rallison & Miller, 1981), STORM (Storage Treatment and Overflow Runoff Model ; U.S. Army Corps of Engineers, (1976)) et HEC-1 (Rango *et al.*, 1983).

En 1981, Peck *et al.* (1981a) ont tenté d'évaluer les modèles existants à ce moment-là aux États-Unis (API, CREAMS, NWSFS, STORM, STANFORD, SSARR et NWSRFS, comme décrit ailleurs ; Peck *et al.*, (1981b)) en termes d'applicabilité des techniques de la télédétection pour fournir des paramètres d'entrée. Ils constataient un grand écart entre les configurations existantes des modèles et les configurations nécessaires, en raison de deux problèmes principaux :

- les modèles étaient basés sur des concepts physiques, mais ceux-ci n'étaient pas indicatifs des processus physiques réels, qu'ils représentaient seulement de façon très grossière ;
- on observe concrètement une grande divergence dans l'intégration en temps et espace dans le modèle, et lors des mesures par télédétection.

Peck *et al.* (1982) concluaient que :

- les modèles hydrologiques dans leur configuration à ce moment-là n'avaient pas de potentiel significatif pour l'utilisation des données de la télédétection ;
- ce potentiel pourrait devenir significatif grâce à des modifications ultérieures mineures.

Riches des expériences nommées ci-dessus, van de Griend et Engman (1985) concluent que le domaine réflectif n'est pas un outil très prometteur pour les modèles distribués, à bases physiques et conçus pour des échelles plus fines, car une grande subjectivité existe dans les relations. Plusieurs raisons à cela sont données :

- la complexité des relations du domaine réflectif avec entre autre l'humidité, la texture pour les sols nus ;
- la profondeur limitée de pénétration ;
- les relations indirectes de la réflectance avec l'humidité du sol en fonctions des types et conditions de végétation.

Ils concluent à juste titre que les techniques de télédétection pour la détection des zones contributives devraient être basées sur des principes physiques. Par contre, sinon peut-être à tort, au moins de façon trop rapide, ils mettent de côté le domaine réflectif, probablement à cause de l'empirisme qui caractérise l'historique de son utilisation. Ils proposent de s'intéresser plutôt au domaine thermique et à celui des micro-ondes (radar) ; une piste que Schmutge *et al.* (1978), Koolen *et al.* (1979) et Ulaby *et al.* (1982b) ont commencé à défricher quelques années auparavant.

En science du sol, la complexité de la relation entre la radiométrie dans le domaine réflectif et les propriétés physico-chimiques du sol minéral, comme constaté par van de Griend et Engman (1985), constitue un axe de recherche depuis les années 70 (Condit, 1970 ; Mathews *et al.*, 1973 ; Stoner & Baumgardner, 1981 ; Zavarzina *et al.*, 1996). On s'intéressait alors notamment à la partie visible du spectre (la couleur) en espérant trouver des liens avec l'espace de couleur Munsell, couramment employé dans la communication pédologique. Parmi les facteurs déterminant la réflectance bidirectionnelle, certains intéressent l'hydrologie car ils déterminent en grande partie le comportement hydrodynamique du sol (teneur en eau, texture, matière organique, rugosité). D'autres, par contre, sont du point de vue hydrologique plutôt perturbateurs (taux de calcaire, oxydes de fer).

Le fait que l'on ait continué à s'intéresser au domaine réflectif dans le domaine de la télédétection appliquée à l'hydrologie s'explique par :

- ⇒ l'espoir de pouvoir corriger sur le terrain l'effet des facteurs perturbateurs à l'aide des relations obtenues en laboratoire. Ces relations sembleraient transposables sur le terrain (King & Lefebvre-d'Hellencourt, 1982 ; Escadafal, 1994) ;
- ⇒ l'idée qu'on pourra partiellement démêler l'influence des différents facteurs par une analyse temporelle en distinguant des groupes de facteurs stables et évolutifs (Girard, 1983) ;
- ⇒ la grande et croissante disponibilité des données, par télédétection aéroportée ou spatiale, dans ce domaine spectral et l'amélioration continue de sa qualité (résolution spectrale et spatiale).

1.4.3.2 état de l'art actuel

Courault (1989) a été un des premiers auteurs à se servir de ces connaissances acquises et de démontrer la possibilité d'extraire une information d'intérêt hydrologique, sur des bases physiques, à partir de l'information télédéetectée dans le domaine réflectif par satellite. Même s'il est de validité limitée (l'approche suppose des conditions d'humidité et d'éclairement bien déterminées et un milieu constitué de très grandes parcelles où, à la surface du sol labouré, seules les propriétés physico-chimiques du sol minéral et la rugosité varient), ce travail marque le *retour* en quelque sorte du domaine réflectif dans la télédétection appliquée à l'hydrologie.

Ce *retour* a constitué, en parallèle avec des travaux basés sur le domaine spectral des micro-ondes, un des deux importants axes de recherche en télédétection satellitale/aéroportée au cours de la dernière décennie (Blanchard *et al.*, 1999) : un grand nombre de travaux ont été réalisés dans le but d'élargir les possibilités de caractérisation des états de surface. En ce qui concerne le domaine réflectif il s'agit malheureusement pour une grande partie d'*indicateurs de risque* établis sur des bases entièrement empiriques et donc peu transposables (Lee *et al.*, 1988 ; Coleman *et al.*, 1993 ; de Jong, 1994 ; Escadafal *et al.*, 1995 ; Arrouays *et al.*, 1996 ; Cialella *et al.*, 1997 ; Mathieu *et al.*, 1997 ; Zhangshi & Lee, 1997). D'autres approches ont des bases plus physiques et fournissent une information qui est, soit d'intérêt direct pour la modélisation comme la présence de résidus de cultures (Bonn, 1998 ; Bannari *et al.*, 1999), le taux de recouvrement par la végétation (de Jong *et al.*, 1999) ou de croûtes de cyanobactéries (Karnieli *et al.*, 1999), soit d'intérêt indirect comme l'occupation du sol (Bober *et al.*, 1996 ; Blanchard *et al.*, 1999). Seul Hill (Hill, 1993 ; Hill *et al.*, 1994 ; Hill *et al.*, 1995), par une approche de démixage de données hyperspectrales, arrive à fournir une information sur l'état de plusieurs variables à la fois.

Malgré le potentiel du domaine des micro-ondes pour l'analyse de la rugosité de la surface (confirmé par (Dobson & Ulaby, 1986 ; Benallegue, 1993)), la grande majorité des travaux porte toujours sur la reconnaissance de zones humides, soit par détection active (Brun *et al.*, 1990 ; Dubois *et al.*, 1995 ; Boisvert *et al.*, 1997), soit passive (Schmugge *et al.*, 1991 ; Hollenbeck *et al.*, 1996 ; Cahill *et al.*, 1999). Certains d'entre eux sont toujours de nature empirique (Cognard *et al.*, 1995 ; Blumberg & Freilikher, 1999).

Le deuxième axe de recherche (Blanchard *et al.*, 1999) concerne l'utilisation de ces informations dans des modèles hydrologiques. Plusieurs études apportent des nuances aux propos de Peck *et al.* (1982) et relèvent de nouveaux problèmes, tout en confirmant le potentiel de la télédétection pour la modélisation hydrologique (Pilesjö, 1992 ; Puech, 1993 ; Viné, 1997). Pourtant, il n'existe encore que très peu d'exemples d'une réelle intégration de données télédéetectées dans la modélisation (Zhangshi & Lee, 1997 ; de Jong *et al.*, 1999).

1.4.3.3 problèmes et besoins

Un premier frein au couplage de la télédétection et de la modélisation hydrologique ressort clairement des travaux cités ci-dessus : le hiatus entre la sémantique de l'information fournie par télédétection et celle requise par les modèles reste important. Ceci semble pouvoir s'expliquer par :

- ⇒ une demande trop peu explicite de la part de la modélisation hydrologique, liée à la connaissance souvent faible du rôle hydrologique des états de surface (Viné, 1997) ;
- ⇒ une démarche de la part de la télédétection qui est trop orientée vers l'évaluation des capacités de reconnaissance d'un capteur ou d'un domaine électromagnétique donné, que vers une réponse aux besoins thématiques.

C'est notamment ce dernier aspect qui limite l'utilité des travaux réalisés en télédétection. L'objectif primaire n'étant pas de répondre aux besoins sémantiques (sans parler des exigences spatio-temporelles) d'un modèle donné, les études se concentrent toutes sur la reconnaissance d'un seul aspect de l'état de surface. Et que ce soit la rugosité, l'humidité, le taux de matière organique, le couvert végétal, les résidus de cultures ou autre, une information spatialisée sur une seule de ces variables ne correspond pas aux exigences du modèle. De plus, les travaux tentent fortement soit de simplifier le milieu étudié pour que le facteur auquel on s'intéresse soit le seul variant significativement dans la zone d'étude, soit d'ignorer l'influence des autres facteurs même s'ils dégradent la qualité des résultats. Il est évident que ceci est à l'origine des problèmes de validation (Bonn, 1998).

Les travaux fournissant des *indicateurs de risque* laissent entrevoir une tendance où les études par télédétection s'approprient le domaine de l'hydrologie de surface en se passant de la modélisation (Mathieu *et al.*, 1997). Pour pouvoir évaluer un *risque d'érosion*, la nécessité de la prise en compte des autres facteurs du milieu (climat, sol, nappe) reste néanmoins évident. La télédétection devra donc se satisfaire d'un humble rôle de fournisseur d'information, soit au modèle hydrologique, soit au système d'information géographique. Ici le défi à relever est la mise au point de méthodes **transposables**, permettant l'extraction d'une information quantitative sur un **ensemble de variables à fournir au modèle** hydrologique.

Une fois ces informations obtenues, on est confronté à un deuxième frein au couplage de la télédétection et de la modélisation hydrologique : l'inadéquation entre les échelles d'espace ou de temps maîtrisées par les modèles et les paramètres accessibles par voie satellitale (Blanchard *et al.*, 1999). Puech (1993) a constaté des écarts entre les prévisions du modèle et les observations, qu'il explique par le problème de changement de niveau d'organisation, rencontré lors du passage du local au global. Il paraît donc très important d'accorder les échelles, notamment spatiales, des modèles et leurs données d'entrée. Puech (1993 ; 1995) propose soit de désagréger l'un d'eux vers le niveau de l'autre soit, et mieux, de rapprocher modèle et donnée du niveau au sein duquel les facteurs conditionnels prépondérants des écoulements seraient intégrés (Beven & Fisher, 1996). Viné (1997) a suivi cette voie avec un relatif succès. D'une façon moins sophistiquée, mais efficace, de Jong *et al.* (1999) ont surmonté ces difficultés en prenant un modèle grossier fonctionnant à une échelle régionale (SEMED). Tout dépend donc de l'objectif de modélisation. De nombreuses études en hydrologie ont montré que même dans des unités considérées comme homogènes, une variabilité résiduelle souvent importante persiste même à l'échelle locale (Vauclin, 1983 ; Gascuel-Oudou & Mérot, 1986 ; Binley *et al.*, 1989). Ainsi il sera effectivement souhaitable que la télédétection constitue une aide à la décision du niveau spatial d'analyse.

Une partie de l'explication à la rareté de cette intégration de données télédéteectée dans la modélisation se trouve sûrement dans les problèmes constatés auparavant. L'habitude en télédétection de s'intéresser avant tout au potentiel du capteur, a pour effet qu'on se laisse imposer les limitations spatio-temporelles des données. Ceci rejoint une évolution très récente en télédétection. Grâce à l'apparition de nouveaux capteurs fournissant des données à des échelles de plus en plus fines (à ce jour l'imagerie satellitale panchromatique est partout commercialement disponible à une résolution spatiale de 1 m²), la question de la *résolution optimale* est à l'ordre du jour (Atkinson & Curran, 1997 ; Curran, 1999).

1.4.3.4 télédétection des vignes

La télédétection de la vigne a-t-elle emboîté le pas aux évolutions constatées en milieu cultivé en général ? Il apparaît que la télédétection de l'état de la surface du sol sous vigne n'a jusqu'à il y a peu d'années, jamais fait l'objet d'étude. De nos jours les travaux sont toujours extrêmement rares. Ceci est sans doute lié aux caractéristiques principales de cultures comme la vigne, mais aussi par exemple de l'olivier : la présence pérenne et le recouvrement spatialement discontinu et variable suivant la période

du cycle végétal. Vu la résolution spatiale de l'information télédéteectée qui est généralement peu appropriée, ces aspects rendent l'interprétation du signal radiométrique très difficile.

Néanmoins, des études agronomiques qui tentent de se servir de la télédétection pour le suivi de la vigueur de la culture ont été réalisées dès les débuts de la télédétection (Wildman, 1979). A cette époque on espérait même pouvoir prédire la récolte par télédétection (Minden & Philipson, 1982). Le comportement spectral du cep de vigne a ensuite été caractérisé (Naert, 1985 ; Bacha, 1990) et les différences avec le signal de la surface du sol ont été abordées (Sentex, 1984). Il est étonnant de devoir constater que d'une part, l'intérêt agronomique constitue jusqu'à ce jour une justification suffisante pour mener des études de suivi basées uniquement sur la réponse spectrale et qui n'ont guère évolué depuis vingt ans (Johnson *et al.*, 1998 ; Montero *et al.*, 1999 ; Carothers, 2000), et que d'autre part la discontinuité spatiale n'empêche pas les auteurs d'ignorer l'influence du sol dans cette réponse spectrale.

Avant de s'intéresser au signal de la vigne et à la surface du sol sous-jacent, il faudra d'abord délimiter la surface cultivée en vigne. Quelques tentatives ont été réalisées à ce niveau. Les essais empiriques entièrement *boîte noire* (Trolier *et al.*, 1989 ; Bugden *et al.*, 1999) montrent des résultats et un intérêt d'application très médiocre. Une nouvelle impulsion pour combler cette lacune est venue de la part de l'Union Européenne. Dans le cadre des déclarations pour la prime d'arrachage (§ 1.2.2) et l'introduction de la politique commune en agriculture introduite en 1993, l'Union Européenne souhaite disposer d'un cadastre viticole et a fait appel pour cela à la communauté scientifique en télédétection (Kay *et al.*, 1997). Très récemment des résultats intéressants en sont sortis (Ranchin *et al.*, 2001). Même si elle n'est pas entièrement satisfaisante, l'approche spatiale choisie constitue une amélioration considérable par rapport aux essais précédents.

En ce qui concerne l'étude de l'état de surface sous vigne, seulement deux auteurs s'y sont intéressés. Hill (1993) et Hill *et al.* (1994) obtient des résultats reproductibles, mais approximatifs. Il a pourtant le mérite de tenter de fournir une information sur l'état de plusieurs variables d'intérêt hydrologique : couverture de la vigne et un état du sol *développé* ou fortement érodé (près de la roche mère). Company-Remond *et al.* (Company *et al.*, 1994 ; Company *et al.*, 1995 ; Company *et al.*, 1995 ; Company-Remond, 1997 ; Remond *et al.*, 1999) se concentrent "classiquement" (§ 1.4.3.3) sur la détection d'une seule variable. Mais ils ont l'originalité 1) d'employer le radar (SAR) pour la reconnaissance de la rugosité et non pas de l'humidité, et 2) de s'intéresser, et sur des bases physiques, à la surface du sol sous la vigne. Ils arrivent à distinguer entre les surfaces labourées, les surfaces non-labourées (désherbées chimiquement), et même les surfaces *mixtes*, mais seulement sous un nombre important de conditions et de simplifications.

Un autre inconvénient, commun aux deux approches décrites, est qu'elles ne permettent pas la reconnaissance du vignoble en soi, la phase nécessairement précédant son analyse.

1.4.4 Conclusion

Ce paragraphe nous fournit un bilan des besoins et acquis. On a constaté que la modélisation spatialisée nécessite une description de l'état de surface par parcelle, enrichie d'un suivi dans le temps (§ 1.3.3) permettant de renseigner les parcelles avec l'historique de la pratique culturale à laquelle elles ont été soumises.

Au niveau de la télédétection comme outil pour fournir ces informations, des avancées ont été obtenues dans la détection des caractéristiques de l'état de surface. Néanmoins un important hiatus persiste entre les besoins et les informations fournies. Notamment il n'y a que peu de travaux en télédétection capables de fournir des variables physiques et presque aucun capable de fournir plusieurs

variables à la fois. Un autre point essentiel est que les exigences de résolutions spatiale et temporelle ne sont pas satisfaites par l'information fournie.

De l'ensemble des travaux sur la culture pérenne et discontinue qu'est la vigne, ressort si possible encore plus fortement le besoin d'une information à la résolution spatiale adaptée, ce qui notamment dans le cas de l'utilisation du radar n'était pas le cas et ce qui constitue un des plus grands freins à l'application des méthodes développées.

1.5 L'objectif posé

L'étude engagée ici s'inscrit dans le prolongement des dernières évolutions en télédétection de l'état de surface et ses premières applications en milieu viticole. Elle relève le défi cité dans le paragraphe 1.4.3.3 en se posant l'objectif de mettre au point une méthode **transposable** et légère, permettant l'extraction, à l'aide *d'une seule information télédéteectée*, d'une information sur l'état de **l'ensemble des variables** de l'état de surface *sous vigne* qui pourront constituer des **paramètres d'entrée du modèle hydrologique** en cours de développement.

Plutôt que de se baser sur une information télédéteectée standard du marché aux spécifications figées, on suivra une démarche permettant une grande liberté d'acquisition dans le temps et l'espace et où l'information acquise sera en correspondance avec les fréquences spatiales recherchées comme le conseille Curran (1999). Dans ce sens, Clevers (1988) constatait déjà qu'une haute résolution spatiale et temporelle sont des conditions strictes dans le suivi de parcelles agricoles. Lacaze *et al.* (1996) constate le besoin d'un suivi régional très détaillé des conditions du sol méditerranéen. Le protocole d'acquisition de l'information doit remplir ces exigences spatio-temporelles, tout en restant léger. C'est-à-dire que les moyens mis en œuvre devront rester largement inférieurs à ceux résultant d'une approche par observations au sol.

Nos procédures d'analyse auront pour but d'extraire de l'imagerie trois types d'information à trois échelles différentes :

- ⇒ une information sur l'occupation du sol, permettant de reconnaître la surface cultivée en vigne ;
- ⇒ à l'intérieur d'un vignoble, la reconnaissance du rang de vigne ;
- ⇒ une interprétation permettant de relier le signal de la surface du sol à l'état de surface de la parcelle.

Ces informations constituent trois étapes qui devront se suivre obligatoirement pour arriver à nos fins, mais en même temps chacune est censée fournir une ou plusieurs entrées à la modélisation. La dernière étape concerne l'évaluation du potentiel de l'information employée pour la reconnaissance des états de surface ce qui comprend les éventuelles améliorations qui pourront être attendues d'une combinaison avec d'autres types d'informations télédéteectées. Nous considérons important d'aboutir à la mise au point de procédures finalisées, fournissant des variables directement utilisables dans la modélisation en renseignant par ailleurs une banque de données spatio-temporelle, afin de mieux comprendre l'organisation de ce milieu dynamique.

2 Les états de surface en milieu viticole méditerranéen : caractérisation et réponse radiométrique

La reconnaissance des caractéristiques de l'état de surface nous permet d'accéder à une estimation de l'infiltrabilité du sol à un moment donné et dans la zone géographique pour laquelle les relations avec l'OSS ont été établies. Pour le bassin versant de Roujan (sous-bassin versant de la vallée de la Peyne), Gaddas (1997) a pu établir une première typologie des états de surface et des OSS (figure 2.1). Par simulation de pluie, une infiltrabilité (infiltration en régime permanent) a été obtenue pour chacune de ces OSS (figure 2.2). Même si la validité de cette typologie pour l'ensemble de la vallée de la Peyne n'a pas encore été confirmée, les caractéristiques du milieu physique (§ 3.1) montrent que ce sont partout les mêmes variables qui constituent, par leur combinaison, leur présence ou absence, et leur intensité relative, les différents états de surface.

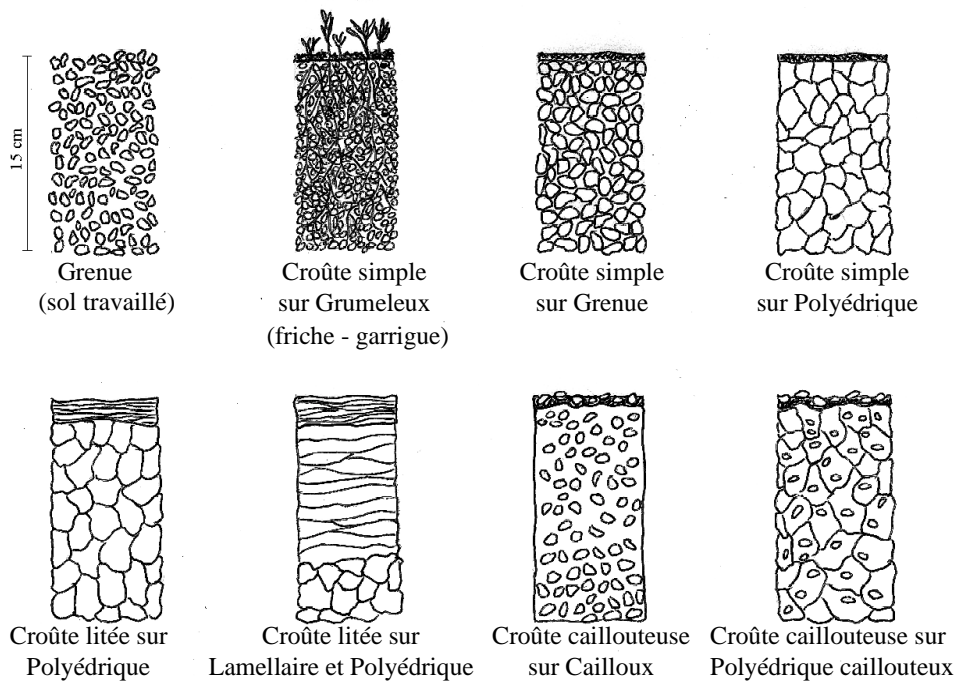


Figure 2.1 Les différentes organisations structurales superficielles (d'après Gaddas, 1997)

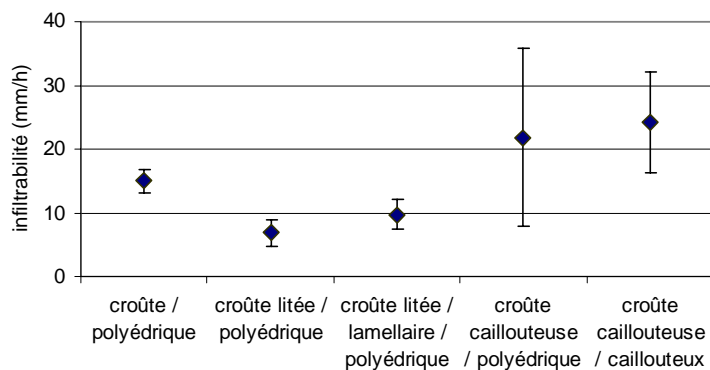


Figure 2.2 Infiltrabilité des OSS (d'après Gaddas, 1997). Les barres d'erreur indiquent l'écart-type. n = 5.

Ces variables seront décrites dans le paragraphe 2.1. La description est complétée par une indication de leur importance hydrodynamique et leurs interrelations spatiales et temporelles. On en déduira un ordre préférentiel de détection. Ensuite, bien que les relations spatiales aient été abordées, on évaluera la *télédétabilité* (précédée d'un rappel des principes physiques) de chacun d'entre eux indépendamment, comme le veut la tradition en télédétection (§ 1.4.3.3), d'un point de vue théorique (§ 2.2). La description de l'état de l'art de la télédétection des différentes variables (§ 2.3) permet d'évaluer si leurs caractéristiques spectrales sont susceptibles de donner accès à leur détection dans un contexte plus ou moins opérationnel à l'aide des outils disponibles. L'ensemble des connaissances, caractéristiques, relations et priorités décrites, confronté aux outils disponibles et aux exigences imposées par les objectifs de l'étude (§ 1.5), nous permettra de désigner le type de données télédéteectées qui semble le plus adapté à nos besoins (§ 2.4). Le chapitre se termine par la description de la démarche suivie dans le présent travail (§ 2.5), *i.e.* comment nous comptons utiliser les données acquises afin d'atteindre nos objectifs.

2.1 Les composantes de l'état de surface pour les sols de vignoble

Dans le premier chapitre on a constaté que la définition de l'état de surface diffère suivant les auteurs et dépend surtout fortement du milieu concerné. Pour chaque milieu étudié il semble possible de définir un nombre limité de variables qui à elles seules déterminent la quasi-totalité des états de surface présents et leur variabilité. Selon notre définition de l'état de surface (§ 1.4.2) on distingue un ensemble de caractéristiques du sol minéral et un ensemble de caractéristiques externes au sol. Dans le cas du vignoble méditerranéen, les études réalisées dans le cadre du programme ALLEGRO (§ 1.3.1 et § 1.4.1) ont montré que le premier groupe comprend les variables suivantes :

- ⇒ le faciès (lié au travail du sol) ;
- ⇒ la présence de cailloux ;
- ⇒ la rugosité ;
- ⇒ l'humidité de la surface ;
- ⇒ la texture minérale à la surface et la porosité biologique ;

et que les variables de l'état de surface externes au sol sont :

- ⇒ l'enherbement ;
- ⇒ la couverture de la vigne ;
- ⇒ la présence de sarments et de feuilles mortes sur le sol.

Une définition adéquate de ces caractéristiques constitue la pierre angulaire d'une observation sans ambiguïté que l'on puisse répéter dans le temps et dans l'espace. Ceci est valide tant pour les observations de terrain, que pour les observations par analyse d'image. Nous proposons d'adopter les définitions suivantes :

Faciès : structure de la surface du sol minéral déterminée par le (type de) travail du sol et la dégradation par la pluie. Boiffin et Bresson (1987) a défini trois grandes classes de faciès de sols cultivés avec un comportement hydrologique distinct : F0, F1 et F2. Juste après un labour (par houe rotative, dents ou charrue) cette structure est considérée ouverte (F0, faciès fragmentaire initial). En passant par un faciès fragmentaire altéré (F1), les événements de pluie dégradent ces structures jusqu'à un état final (F2, faciès continu). Pour les sols de la vallée de La Peyne, dont la texture de la matrice à la surface varie de limono-sableux à argilo-limoneux, ce stade final est toujours une structure 'fermée' (F2), c.-à-d. encroûtée et sans porosité visible à l'œil nu.

Cailloux : la taille des éléments concernés varie du gravier au bloc (spécification granulométrique dans Baize & Girard, 1995). Le taux de cailloux est exprimé en fraction de recouvrement de la surface du sol (en classes de 10%), soit par des cailloux posés sur la surface du sol, soit par des cailloux partiellement incorporés ('noyés') dans le sol.

Rugosité : on considère ici la rugosité de la surface du sol minéral, y compris celle induite par les cailloux reposant dessus. En milieu cultivé la rugosité est souvent décomposée en une composante aléatoire, induite par les mottes de terre, et une composante périodique liée à la pratique culturale (Champion & Faivre, 1996 ; Company-Remond, 1997). Du fait que ces deux composantes concernent différentes échelles, l'état de la rugosité peut varier avec le niveau d'observation. Dans le cas de la *rugosité aléatoire* (l'échelle de l'agrégat) il s'agit d'une rugosité qui peut être très évolutive. La *rugosité périodique* concerne à la fois le niveau de l'interrang (sillons, empreintes de roues (van Dijck, 2000) et le niveau de la parcelle (relief dû au cavaillon). La rugosité à ce dernier niveau peut être considérée comme quasi-stable au cours du temps. Par contre, la rugosité périodique d'interrang est évolutive et influence la rugosité aléatoire.

Sur le terrain, le niveau de rugosité est noté en trois classes ordinales (*pas d'obstacles à l'écoulement ; modelé faible ; modelé très marqué*) et concerne surtout la composante périodique. Nous ne disposons pas de mesures quantitatives de cette variable, comme on peut les obtenir au sol à l'aide d'outils comme le rugosimètre (Courault, 1989).

Humidité : l'humidité de la pellicule de surface ne peut pas être exprimée comme un pourcentage, car la surface n'est pas un volume. L'état d'humectation de la surface est noté en trois classes : sec, humide (saturé) ou frais (intermédiaire entre les deux états précédents). Un état d'humidité plus humide que sec renseigne sur l'état d'humidité de l'OSS. Par contre l'état sec sans informations contextuelles ne fournit aucune information sur l'humidité en profondeur.

Texture et porosité : ces caractéristiques renseignent sur la capacité d'encroûtement de la surface. Plutôt qu'à une détermination précise de la granulométrie, on s'intéresse à une distinction entre surfaces sableuses et surfaces à texture fine (limono-sableuse ou plus fine). Sous le terme de *texture de surface* on comprend aussi une éventuelle présence importante de matière organique, incorporée dans cette surface sous forme d'humus. Nous proposons donc une typologie de quatre classes : surfaces à texture sableuse ou fine, humique ou non humique.

La porosité à la surface est, soit liée à la présence d'herbes (notée par ailleurs), soit due à l'activité de surface de la méso-/macrofaune, soit due à un effet de rétraction de la phase argileuse du sol. La fissuration liée à la présence de smectites, et le cas d'une forte activité biologique de surface (vers de terre), peuvent avoir une influence notable sur le comportement hydrodynamique du milieu. Si une telle porosité est visible à la surface, par des fissures ou des excréments, elle est notée par une typologie binaire (présent ou absent). La pellicule de surface étant supprimée par le labour, ce concept de porosité de surface est incompatible avec le faciès F0. Dans ce cas la porosité de surface n'est donc pas considérée.

Enherbement : le pourcentage de la surface couverte (en classes de 10%) par différents types d'herbes dont la taille varie de 5 à 20 cm de hauteur (Léonard & Andrieux, 1998). À l'intérieur d'une parcelle on peut généralement identifier une ou deux espèces dominantes, mais entre parcelles ou pour une parcelle au cours de l'année, l'espèce dominante varie fortement. Ces herbes peuvent être chlorophylliennes ou sénescentes.

Couverture de la vigne : le pourcentage de la surface du sol couverte (en classes de 10%) par la vigne en feuille. Cette variable intervient donc dans l'état de surface uniquement d'avril à octobre et atteint son niveau maximum en juillet/août.

Feuilles et Sarments : la présence de feuilles mortes et/ou sarments taillés sur la surface du sol. La morphologie des sarments à deux conséquences : 1) il est difficile d'estimer un taux de couverture pour cette variable, et 2) leur influence sur le comportement hydrodynamique de la surface est *a priori* peu significative. Néanmoins, dans le cas d'une concentration spatiale due à un transport par ruissellement de surface, leur présence affecte directement l'infiltration et fournit une indication sur la présence de dépôts de sédiments.

Les feuilles mortes recouvrent le sol de façon importante seulement pendant une courte période, mais localement elles peuvent persister durant toute l'année. Le terme "feuille morte" concerne les feuilles en décomposition juste après la chute jusqu'à celles manifestant une fragmentation avancée (mais non humifiées).

2.1.1 Signification hydrodynamique des variables

En définissant l'état de surface, les différentes variables fournissent une indication sur l'OSS (et son état d'humectation), et à travers cela sur le partage infiltration/ruissellement de la pluie (§ 1.4.1). Concernant le débit et la direction de l'écoulement de l'eau par contre, d'autres caractéristiques qui ne font pas partie de l'état de surface au sens strict interviennent également : pour pouvoir modéliser les transferts d'eau et de matières en suspension à l'échelle de la parcelle il est par exemple important de disposer d'une information sur la pente de la surface. Les observations de terrain ont aussi démontré l'importance de la rugosité à l'échelle du cavaillon dans la détermination du mode d'écoulement ; même si ce niveau de rugosité intervient peu dans la détermination de l'infiltration, sa prise en compte demeure importante.

Partage infiltration/ruissellement	Débit et direction de l'écoulement
Travail/non-travail (faciès)	Mode de conduite et écartement
Cailloux (posés/noyés)	Pente, convexité
Rugosité (mottes, sillons, roues)	Travail/non-travail (faciès)
Humidité de la partie superficielle du sol	Rugosité (cavaillon)
Texture et porosité	Sarments (barrages potentiels)
Enherbement	
Couverture de la vigne	
Sarment et feuilles mortes	

Tableau 2.1 Les variables de surface qui interviennent dans le comportement hydrodynamique de la parcelle viticole.

L'ensemble des caractéristiques de surface qui interviennent dans le comportement hydrique de la parcelle viticole est indiqué dans le tableau 2.1 . Les caractéristiques comprises dans la partie gauche sont les éléments de l'état de surface, liés à l'OSS. Les caractéristiques additionnelles nécessaires pour une compréhension plus complète du comportement hydrique de la parcelle sont rassemblées dans la partie droite du tableau 2.1 .

Chaque variable de l'état de surface contribue de façon spécifique au comportement hydrodynamique de la surface du sol et à sa variabilité par (1) son action spécifique sur l'eau à la surface, (2) son lien plus ou moins étroit avec l'OSS, (3) son lien plus ou moins étroit avec les pratiques culturales, et (4) la variation de son état rencontrée dans le milieu d'étude. On constate un manque d'études mettant en évidence ce rôle spécifique de chaque variable. Certaines connaissances peuvent néanmoins être formalisées, et doivent l'être pour contribuer à l'*explicitation de la demande* ayant initié le présent travail. Le paragraphe 1.4.3.3 nous a montré l'importance de cette explicitation. Dans la mesure du possible ces connaissances sont précisées ci-dessous par variable, pour chacun des quatre points mentionnés :

Faciès	<ol style="list-style-type: none"> 1 un faciès fermé, continu constitue une barrière tandis que le faciès ouvert permet d'infiltrer les précipitations à la couche superficielle du sol minéral sous-jacent. Le faciès intermédiaire freine l'infiltration par sa pellicule fermée de surface, mais il la favorise indirectement par sa rugosité ; 2 très étroitement lié à l'OSS. Les états F0 et F1 constituent une description tant de l'état de surface que de l'OSS. Le faciès continu (F2) recouvre des croûtes de différentes épaisseurs et natures ; 3 très étroitement lié au travail du sol ; 4 chaque état est fréquemment rencontré.
Cailloux	<ol style="list-style-type: none"> 1 freinent la dégradation de la porosité de surface du sol sous-jacent, et favorisent également l'infiltration en freinant l'écoulement ; 2 étroitement lié à l'OSS dans la mesure où de forts taux de cailloux (70%, (Poesen <i>et al.</i>, 1990) représentent un groupe d'OSS (Gaddas, 1997 ; Hatier, 2000) ; 3 le seul lien avec les pratiques culturales est une faible présence apparente après labour ; 4 des taux de recouvrement de 0 à 100% sont rencontrés.
Rugosité	<ol style="list-style-type: none"> 1 la rugosité aléatoire représente une capacité de rétention et favorise donc l'infiltration. La rugosité périodique modifie la direction de l'écoulement et peut constituer une capacité de rétention là où son orientation est perpendiculaire à la pente ; 2 faiblement liée à l'OSS. La rugosité aléatoire est liée à l'OSS dans la mesure où une forte rugosité exclut certains types de croûtes ; 3 effet de la pratique culturale variable en fonction du type de labour et des caractéristiques externes (humidité, texture, structure pédogénétique, etc.) ; 4 varie de très rugueux à l'absence totale de rugosité.
Humidité	<ol style="list-style-type: none"> 1 peut favoriser l'infiltration en neutralisant une éventuelle hydrophobie de la surface, mais si elle représente une forte humidité à travers toute la couche superficielle du sol, occupant une partie importante de la porosité, cela peut freiner l'infiltration ; 2 pas liée à l'OSS ; 3 pas liée aux pratiques culturales (absence d'irrigation) ; 4 varie de sec à saturé.
Texture et porosité	<ol style="list-style-type: none"> 1 les pores conduisent l'eau à travers la surface. Une texture fine a donc un potentiel d'infiltration inférieur à celui d'une texture plus grossière ; 2 étroitement lié à l'OSS dans la mesure où les textures plus grossières que limono-sableuse excluent un nombre important d'OSS. Il en est de même pour une forte macro-porosité de surface ; 3 la <i>texture</i> est une propriété invariable du sol. La seule influence du labour sur la <i>porosité</i> de la pellicule de surface est une faible présence de pores d'origine racinaires après labour, les autres types de pore se rétablissent sur fermeture de la surface. Par contre, une longue histoire de désherbage chimique dégrade la vie biologique du sol et par là la macroporosité de surface ; 4 en dehors de certains types de sol à texture grossière mais faiblement représentés dans notre milieu, la variation de ces variables est très faible.
Enherbement	<ol style="list-style-type: none"> 1 favorise l'infiltration de façon directe (conduction de l'eau le long des tiges qui traversent la surface) et indirecte (en freinant l'écoulement et en prélevant de l'eau en profondeur ce qui modifie le gradient de potentiel hydrique) ; 2 seulement lié à l'OSS si l'enracinement est important, mais un fort taux de recouvrement (plus de 50%) induit un changement significatif dans le comportement hydrodynamique de l'OSS sous-jacent (Hatier, 2000) ; 3 fortement lié aux pratiques culturales : le travail du sol supprime l'enherbement, et la colonisation de l'espace par les adventices est souvent contrôlée ; 4 varie rapidement dans le temps et l'espace de 0 à 100%.
Couverture de la vigne	<ol style="list-style-type: none"> 1 intercepte une partie de la précipitation et protège la surface sous-jacente de l'impact dégradant de la pluie en réduisant son énergie cinétique ; 2 pas directement liée à l'OSS ; 3 fortement liée aux pratiques culturales : les choix de cépages, de mode de conduite et son contrôle par rognage/effeuillage contrôlent cette couverture végétale ; 4 varie de 0 à environ 60% en fonction des pratiques culturales et le stade végétatif.
Feuilles et sarments	<ol style="list-style-type: none"> 1 protègent la surface sous-jacente de l'impact dégradant de la pluie en réduisant son énergie cinétique, peuvent représenter une certaine capacité de rétention. En concentrations ils freinent l'écoulement ; 2 seulement liés à l'OSS si leur recouvrement et durée de présence ont permis une incorporation dans le sol. Un fort taux de recouvrement (plus de 50%) induit un changement significatif dans le

- comportement hydrodynamique de l'OSS sous-jacent (Hatier, 2000) ;
- 3 fortement liés aux pratiques culturales. Feuilles et sarments sont, soit exportés de la parcelle, soit incorporés dans le sol par labour, soit abandonnés à la surface ;
 - 4 varie rapidement en temps et espace de 0 à 100%.
-

En ce qui concerne l'influence directe, il semble que celle du faciès, de la rugosité et de la couverture de la vigne soient les plus significatives. Le faciès, les cailloux et la texture sont les plus étroitement liés à l'OSS, mais l'information fournie par la texture est vraisemblablement peu significative car elle ne varie guère à travers le milieu d'étude. Le faciès et toutes les variables concernant les éléments organiques externes au sol sont étroitement liés aux pratiques culturales. Le taux de cailloux est moins fortement lié aux pratiques culturales, comme l'est aussi le cas de la rugosité et de l'humidité. Ceci diminue leur intérêt pour le suivi de l'évolution de l'OSS comme déterminé par la pratique culturale.

2.1.2 Variabilité spatiale à l'intérieur de la parcelle

La littérature nous a montré que l'OSS de la parcelle viticole peut globalement être considérée comme uniforme, du fait de son histoire culturale (§ 1.4.1). Sur cette base, la parcelle est considérée comme "unité hydrologique", l'unité spatiale élémentaire prise en compte par la modélisation distribuée. Nous avons quand même constaté une variabilité à l'intérieur de ces "unités spatiales", comme la littérature citée au paragraphe ci-dessus l'avait déjà indiqué.

Afin de tester son influence, il est tout de même intéressant de prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques décrivant l'état de surface de la parcelle : il existe dans ce milieu, fortement variable à tout point de vue, des cas où ce concept d'"unité" hydrologique peut être remis en question. Sans contester le rôle prépondérant de la pratique culturale en général, il faut en même temps constater que cette pratique n'entraîne pas toujours une homogénéisation de la parcelle. On citera quelques exemples de situations influençant à coup sûr l'observation par télédétection, et dont on peut attendre une influence notable sur le comportement hydrodynamique de la parcelle :

- ⇒ le labour du sol lorsqu'il n'est pas effectué sur l'ensemble des interrangs ;
- ⇒ la distribution des sarments qui est également étroitement liée à la pratique culturale. Suite à la taille d'hiver on rencontre les sarments à la surface du sol selon deux motifs spatiaux s'ils n'ont pas été ramassés : soit dispersés dans l'interrang, soit concentrés en amas au milieu d'un interrang sur deux ;
- ⇒ la litière (sarments et feuilles mortes) qui peut être redistribuée en petits paquets à l'intérieur de la parcelle sous l'influence du vent ou du ruissellement ;
- ⇒ En ce qui concerne l'enherbement, sa distribution spatiale est uniforme pour les parcelles qui :
 - ont récemment été labourées, car l'herbe est absente ;
 - sont désherbées chimiquement toute l'année, car l'herbe est absente ;
 - n'ont été ni labourées ni désherbées depuis près d'un an ou plus, car la couverture d'herbe est homogène et quasiment généralisée.

Dans les nombreux autres cas la distribution de l'enherbement peut être supposée comme étant fonction d'un processus de colonisation d'espace comparable à celle d'une végétation naturelle pionnière, c'est à dire l'interaction complexe entre la disponibilité de nutriments (l'eau), des phénomènes de concurrence et la présence de niches favorables à la germination. Ceci provoque une grande variété de motifs spatiaux, dont certains peuvent provoquer des situations très contrastées à l'intérieur d'une parcelle.

D'autres caractéristiques de l'état de surface ne dépendent guère de l'historique cultural et peuvent donc potentiellement varier à l'intérieur de la parcelle. On sait par expérience que dans la zone d'étude,

ceci concerne notamment le taux de cailloux à la surface et, dans une moindre mesure, l'humidité de surface.

2.1.3 Relations spatiales entre les différentes composantes de l'état de surface

L'interaction entre la pratique culturale et la pluviométrie détermine en grande partie l'état et la distribution spatiale des éléments de l'état de surface. Mais on peut aussi identifier des relations physiques entre ces mêmes éléments. Ces relations sont importantes à prendre en compte pour deux raisons : 1) elles permettent d'avoir une idée du nombre de situations types que l'on pourra rencontrer à la surface et 2) elles facilitent l'observation et le suivi des états de surface.

Le tableau 2.2 résume ce réseau de relations. On retrouve dans ce *modèle expert* les variables de l'état de surface et les variables intervenant dans l'écoulement de l'eau. Ces dernières sont incluses car elles peuvent également influencer, de façon indirecte, certaines variables de l'état de surface et/ou leur motif spatial. Les relations indiquées entre les différentes variables de l'état de surface sont directes, mais leur enchaînement met en évidence des répercussions indirectes (ex. *labour du sol* → *enfouissement de l'herbe* → *maintien de la porosité superficielle défavorisé*, mais aussi *labour du sol* → *rugosité* → *création de niches favorables à la germination de l'herbe*). Ces relations sont commentées ci-dessous.

Variable dépendante	Variable indépendante										
	Travail/non-travail (faciès)	Cailloux	Rugosité	Humidité superficielle	Texture et porosité	Enherbement	Couverture de la vigne	Sarments et feuilles mortes	Mode de conduite	Pente, convexité	Rugosité (cavillon)
Travail/non-travail (faciès)	×					↔		↔			
Cailloux (posés/noyés)	↔	×				↔		↔		↔	↔
Rugosité (mottes, sillon, emp. de roues)	↔	↔	×			↔		↔			
Humidité de la partie superficielle du sol	↔	↔		×		↔		↔		↔	
Texture et porosité					×	↔					
Enherbement	↔		↔			×		↔		↔	↔
Couverture de la vigne							×				
Sarments et feuilles mortes	↔					↔		×		↔	↔

Tableau 2.2 Relations spatiales entre variables de surface. ← : relation causale, hiérarchique ; ↔ : relation par exclusion mutuelle ou occultation.

⇒ Le **travail du sol** apparaît comme une variable prépondérante avec une grande influence sur plusieurs variables de l'état de surface :

- les *cailloux* présents à la surface du sol sont mélangés avec la matrice du sol et "perdent leur place" dans l'état de surface au sens strict. L'absence de labour permet un enrichissement relatif de cailloux apparents à la surface ;
- pour les textures de surface typiques de notre milieu, et mis à part les cailloux et les éventuelles empreintes de roues, la rugosité aléatoire est entièrement déterminée par le (type de) labour et la quantité de pluie reçue depuis le dernier labour ;
- dans le cas commun d'un sol caractérisé par une surface sèche recouvrant un profil (superficiel) plus humide, le labour expose cette humidité à l'air. Ceci rend la surface du sol fugitivement plus humide ;
- l'enfouissement de l'herbe exclut la présence d'un taux important d'enherbement sur un sol récemment travaillé (faciès FO dans l'interrang) ;

- si des sarments sont présents à la surface, ils sont broyés et incorporés dans le sol ;
- ⇒ la présence de **cailloux** à la surface induit une certaine *rugosité*, mais en même temps un taux important de cailloux diminue l'augmentation de la rugosité (périodique) liée au passage de machines. Par leur présence, les cailloux cachent une partie de la surface du sol sous-jacente et s'opposent donc aux échanges d'humidité avec l'atmosphère. Par ailleurs, on constate bien souvent une humidité plus importante sous les cailloux ;
- ⇒ une importante **rugosité** peut contenir des dépressions qui constituent des micro-niches, favorables à la germination d'*herbes* ;
- ⇒ l'**enherbement** agit sur :
 - la *porosité* de la surface, induite par les tiges qui la traversent ;
 - l'*humidité* superficielle, par sa transpiration et en limitant l'évaporation à la surface du sol ;
 - le *faciès*, les *cailloux*, la *rugosité* et les *sarments/feuilles mortes* en les couvrant et donc en les occultant ;
- ⇒ les **sarments/feuilles mortes** agissent sur :
 - l'*humidité superficielle* : une concentration de feuilles mortes limite l'évaporation à la surface ;
 - l'*enherbement* en créant un substrat nutritif ;
 - le *faciès*, les *cailloux* et la *rugosité* en les couvrant ;
 - le *faciès* et la *texture/porosité* de façon indirecte (et seulement si présent en concentrations de taille importante) en favorisant un dépôt de sédiments sur une partie de la surface amont et connexe.

Parmi les autres variables de surface intervenant dans l'écoulement de l'eau, deux ont une influence potentielle sur certains éléments de l'état de surface :

- ⇒ la **pente**, peut induire une diversification à l'intérieur de la parcelle. Pour les *cailloux* ceci peut être lié, soit à un transport de sédiment (érosion en haut et sédimentation en bas, comme pour *sarments/feuilles mortes*), soit à des variations pédologiques. En modifiant les conditions de drainage et de ruissellement, la pente influence l'*humidité de surface* et la croissance d'*herbes* ;
- ⇒ le **cavaillon**, présente une zone propice à un enrichissement en *cailloux* (relatif par érosion ou absolu par l'homme) et en *herbe* (s'il n'est pas désherbé). Indirectement il influence la distribution spatiale des *sarments et feuilles mortes* transportés par le ruissellement ou le vent.

Ces relations démontrent la complexité du système. La compréhension de cette complexité est utile car elle permet d'obtenir une indication sur l'état de certaines variables, même si l'on ne parvient pas à l'observer directement. De la même façon on peut procéder à l'identification de *variables clés*, en fonction de leur nombre de relations causales et de leur position hiérarchique, qui mériteront beaucoup d'attention au cours de l'analyse. Cependant, pour cela il est également nécessaire de considérer l'évolution des variables au cours du temps et les relations temporelles entre elles.

2.1.4 Relations temporelles

L'évolution temporelle des états de surface est déterminée par la pluviométrie, les pratiques culturales et le cycle végétatif annuel. Cette évolution est mal connue et par définition imprévisible à cause de la grande hétérogénéité tant spatiale que temporelle de la pluviométrie et des pratiques culturales. C'est bien pour cela qu'elle fait ici l'objet d'étude. Néanmoins quelques constatations peuvent, et doivent, déjà être faites. Il s'agit d'un ordre de dépendance des variables de chacun des facteurs déterminant l'évolution. La figure 2.3 montre, à travers deux exemples hypothétiques, l'impact de la pluviométrie,

des pratiques culturales et du cycle végétatif annuel sur les variables évolutives. Cette synthèse permet d'apprécier l'évolution continue, au niveau de la parcelle, de l'état de surface.

Les caractéristiques dont les variations temporelles dépendent uniquement des conditions météorologiques sont à caractère cyclique et plus ou moins prévisibles à l'aide d'une connaissance de ces conditions. C'est le cas de l'humidité superficielle dont l'évolution par cycle, fonction des conditions météorologiques et des conditions de drainage, est caractérisée par de courts pics (quelques jours) suivis de longues périodes stables (figure 2.3).

Cette dépendance des conditions météorologiques compte aussi pour la *couverture végétale*, mais de façon moins marquée. La couverture de la vigne dépend aussi de l'encépagement et des pratiques culturales (notamment rognage/effeuillage). L'évolution est cyclique : une augmentation graduelle de mars/avril à juin/juillet avec une stabilité de juillet à septembre, une diminution rapide en octobre, et une absence de couverture de novembre en mars.

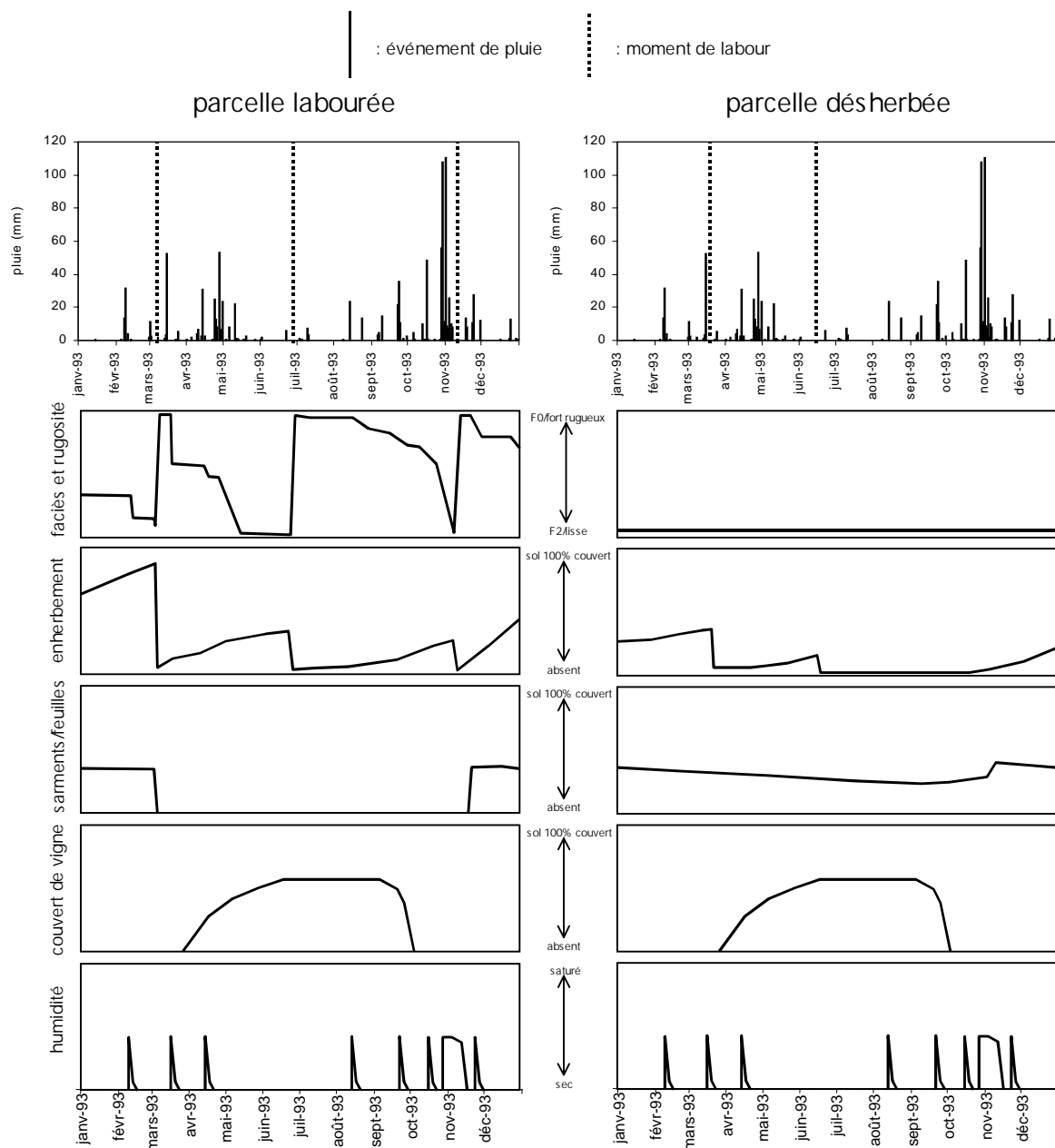


Figure 2.3 Un exemple schématique de l'évolution des différents paramètres évolutifs de l'état de surface au cours de l'année (exemple basé sur la pluviométrie de l'année 1993) pour une parcelle labourée (à gauche) et une parcelle dés herbée chimiquement (à droite).

L'évolution du *faciès* et de la *rugosité aléatoire* (vu leur forte relation spatiale et temporelle ils seront considérés ensemble par la suite) dépendent de l'action couplée du labour et de la pluviométrie. Sans labour leur état reste stable, sinon le rythme cyclique est dicté par la fréquence des labours et son évolution sous l'effet de la pluviométrie. Il en résulte que leur état à un moment donné reste imprévisible.

Il en est de même pour les autres caractéristiques évolutives, l'*enherbement* et les *sarments/feuilles mortes*. Ils sont en grande partie déterminés par la pratique culturale. Leur évolution est très différente selon qu'il s'agit d'une parcelle labourée ou désherbée :

- ⇒ sur les parcelles désherbées, l'évolution de l'enherbement dépend de la fréquence de l'application des herbicides. Il en résulte qu'à tout moment de l'année la parcelle peut être entièrement recouverte d'herbes, entièrement dépourvue d'herbes et à tout stade intermédiaire avec des herbes sèches et/ou chlorophylliennes. Sa situation peut évoluer ou rester stable. Les sarments et feuilles sont soit présents en permanence, soit enlevés juste après la taille ;
- ⇒ sur les parcelles labourées, l'enherbement se trouve quasiment en permanence à un stade plus ou moins avancé de colonisation de l'espace. Ce stade est fonction du temps écoulé depuis le dernier labour et d'autres variables qui elles-mêmes aussi sont fonction du labour et du temps écoulé depuis (tableau 2.2). Les sarments et feuilles mortes sont seulement présents à la surface de l'interrang entre le moment de leur arrivée (taille/chute) et le prochain labour.

2.1.5 Conclusions et identification de variables clés

Les variables qui composent les états de surface dans le milieu méditerranéen viticole ont été définies et leur rôle dans la détermination du devenir de l'eau a été décrit dans la mesure des connaissances disponibles. On s'est intéressé à la façon dont elles se manifestent dans l'espace, et aux relations, tant spatiales que temporelles, qui existent entre elles. Bien que le nombre de variables soit assez limité, l'organisation et l'évolution des états de surface qui en résultent sont très complexes : les dynamiques sont très variées et les relations qui décrivent ce système sont nombreuses.

Fort des connaissances décrites, on peut néanmoins établir un ordre de priorité dans la reconnaissance et le suivi des différentes variables de l'état de surface. L'ordre de priorité décroissante proposé est le suivant :

1. faciès/rugosité aléatoire
2. enherbement
3. cailloux
4. sarments/feuilles mortes
5. couverture de la vigne
6. texture/porosité de surface
7. humidité superficielle

Cet ordre est fonction des relations reliant les caractéristiques à l'OSS, de leur relations avec les pratiques culturales, de leurs inter-relations (spatiales et temporelles) et de leur variabilité (spatiale et temporelle). L'ordre est indicatif. Les deux premières variables se distinguent cependant fortement des autres, à la fois par leur rôle déterminant dans l'hydrodynamique, leur forte présence à la surface du sol, leur influence sur la distribution spatiale d'autres variables et leur dynamique complexe au cours de l'année.

Sachant maintenant quels variables on souhaite observer et avec quelle priorité, il reste à préciser dans quelle grandeur (physique ou relative) et avec quelle précision on souhaite pouvoir décrire leur état

dans la parcelle. On peut considérer les précisions suivantes comme les conditions minimales pour obtenir une description satisfaisant les besoins futurs de la modélisation hydrologique :

- ⇒ **faciès/rugosité** : trois classes : F0 (rugosité fonction du type de labour), F1 (faible rugosité aléatoire) et F2 (la rugosité aléatoire n'est plus visible) ;
- ⇒ **enherbement** : deux classes de recouvrement de la surface de la parcelle (de 0 à 50% et de 50 à 100%, avec la détermination du seuil de 50% à environ 10% près), complétées par une information sur sa distribution spatiale ;
- ⇒ **cailloux** : trois classes de recouvrement de la surface de la parcelle (0 30%, 30 à 70%, 70 à 100%, à environ 10% près), complétées par une information sur sa distribution spatiale ;
- ⇒ **sarments/feuilles mortes** : présence/absence de concentrations ;
- ⇒ **couverture de la vigne** : trois classes de recouvrement de la surface de la parcelle (absent, 30%, 60%, à environ 15% près) ;
- ⇒ **texture/porosité de surface** : présence/absence de zones soit à texture plus grossière que limono-sableux, soit à forte bioturbation, soit à forts taux d'humus ;
- ⇒ **humidité superficielle** : présence/absence de zones plus humide que sèches.

Cette énumération nous montre par ailleurs que les variables peuvent être observées de deux façons : soit (1) on estime la fraction de l'espace occupée par un certain état de la variable qui nous intéresse (ex. partie de la surface recouverte par un fort enherbement), soit (2) on évalue l'état de la variable sur une étendue d'intégration où l'on s'attend à une faible variation de cet état (ex. faciès, considéré constant à travers la parcelle ou au moins dans l'interrang). Dans le premier cas on se doit de préciser la taille minimale des objets pris en compte (ex. la surface sous un brin d'herbe isolé, est-elle "fortement enherbée" ?), et dans le deuxième cas il faudra formaliser les étendues d'intégration.

Il en résulte un ensemble d'échelles spatiales, considérées comme étant plus ou moins appropriées pour l'observation des différentes variables (figure 2.4) : un rang de vigne (ou un cep en cas de gobelet) est souvent moins large qu'un mètre carré, et des taches fortement enherbées mais d'une taille

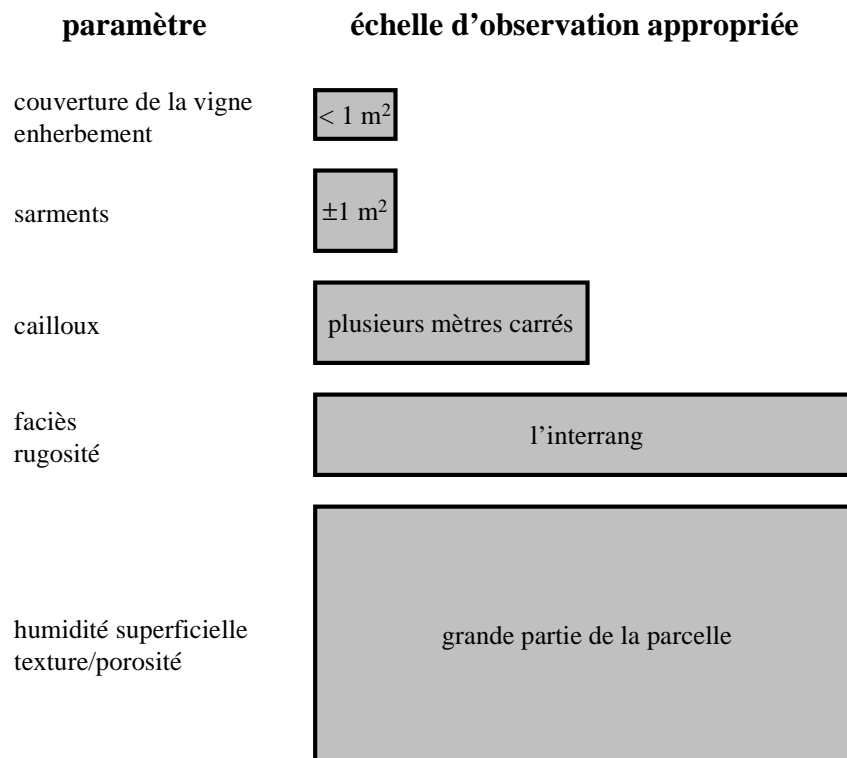


Figure 2.4 Représentation schématique des niveaux de résolution d'observation.

de moins d'un mètre carré peuvent quand même représenter un état de surface très distinct et - si nombreuses - important à prendre en compte au niveau de la parcelle. Ce premier niveau de résolution est en quelque sorte la résolution élémentaire d'observation des états de surface. Les amas de sarments et feuilles mortes sont censés avoir une taille d'environ un mètre carré, tandis que les zones à fort taux de cailloux comptent au moins plusieurs mètres carrés. Le faciès et la rugosité (aléatoire et périodique) issus des pratiques culturales sont constants au niveau de l'interrang. Des variations en texture (liées au substrat) et en humidité (liées à la topographie) concernent au moins une partie considérable de la parcelle.

Les variables faciès, rugosité, texture/porosité et humidité superficielle seront estimées dans une logique d'évaluation d'état (2, ci-dessus). La couverture de la vigne, les sarments/feuilles mortes, les cailloux et l'enherbement seront estimés en termes de *fraction de l'espace* (1, ci-dessus).

2.2 Réponse radiométrique théorique des états de surface

Après avoir décortiqué l'objet d'étude d'un point de vue thématique, il nous faut définir la méthodologie nécessaire à son observation. Pour ce faire nous allons tout d'abord dresser un bilan des connaissances sur la façon dont les variables de l'état de surface se manifestent dans le spectre électromagnétique et les relations qui existent entre leurs comportements radiométriques. C'est l'objet de ce paragraphe. Puisque ce domaine d'information ne relève pas de la pédologie, le paragraphe débute par une brève introduction au domaine de la télédétection.

2.2.1 Bref rappel des bases physiques de la télédétection

L'information étudiée en télédétection est l'énergie reçue par un capteur, résultant de l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la surface de la terre (figure 2.5). Dans le domaine solaire (0.4-2.5 μm), pour une longueur d'onde λ donnée, cette énergie est donc constituée du rayonnement réfléchi E_R (formule 2.1 avec E_I , E_A , et E_T resp. énergie incidente, absorbée et transmise) par l'atmosphère et la surface de la terre. On définit le *facteur de réflectance* R (ou *réflectance*) de l'objet observé par le rapport de l'énergie réfléchie, à l'énergie incidente (Courault, 1989 ; Girard & Girard, 1989) (formule 2.2). Cette proportion varie avec les objets, mais aussi avec la longueur d'onde et les directions d'incidence et de visée. Dans la partie visible du spectre électromagnétique, ceci se traduit par l'effet visuel que l'on appelle *couleur* (Lillesand & Kiefer, 1994). Une partie de l'énergie absorbée est de nouveau émise par l'objet dans d'autres domaines du spectre. Cette émissivité peut aussi faire l'objet d'étude par télédétection.

$$E_{R,\lambda} = E_{I,\lambda} - (E_{A,\lambda} + E_{T,\lambda}) \quad (2.1)$$

$$R_\lambda = \frac{\bar{E}_{R,\lambda}}{E_{I,\lambda}} \quad (2.2)$$

Dans la figure 2.5 ci-dessous la luminance perçue par le capteur est en relation avec la réflectance de la surface (opaque, car la transmission n'est pas considérée) de la façon suivante (Lillesand & Kiefer, 1994) :

$$L_{tot,\lambda} = \frac{R_\lambda E_\lambda T_\lambda}{\pi} + L_{p,\lambda} \quad (2.3)$$

où $L_{tot,\lambda}$ est la luminance totale reçue par le capteur (J), E l'énergie incidente sur l'objet, T est la transmission de l'atmosphère et $L_{p,\lambda}$ la luminance provenant de l'atmosphère.

L'énergie électromagnétique est un vecteur directionnel (figure 2.5). Il en résulte que la géométrie de la réflectance doit également être considérée. Ce facteur est principalement fonction de la rugosité de la surface. On doit distinguer les surfaces *spéculaires* des surfaces *lambertiennes*. Une surface spéculaire réfléchit une proportion importante l'énergie émise (par la source) dans la direction opposée par rapport à l'axe orthogonal au plan de la surface. Une surface lambertienne (ou *diffuse*) réfléchit l'énergie émise dans toutes les directions avec la même valeur (Girard & Girard, 1989). Les réflexions diffuses contiennent de l'information sur la *couleur* de la surface réfléchissante, les réflexions spéculaires n'en contiennent pas. C'est pour cela qu'en télédétection on s'intéresse plus à mesurer les

propriétés de réflectance diffuse de l'objet. Néanmoins les objets à réflectance parfaitement diffuse sont rares. La plupart des objets naturels ont une composante de réflexion spéculaire, que l'on peut éviter de mesurer au laboratoire (Billmeyer & Saltzman, 1981). Ce comportement bidirectionnel complique l'interprétation du signal, mais il peut dans certains cas également constituer une source d'information importante en permettant de distinguer différents objets au comportement bidirectionnel distinct.

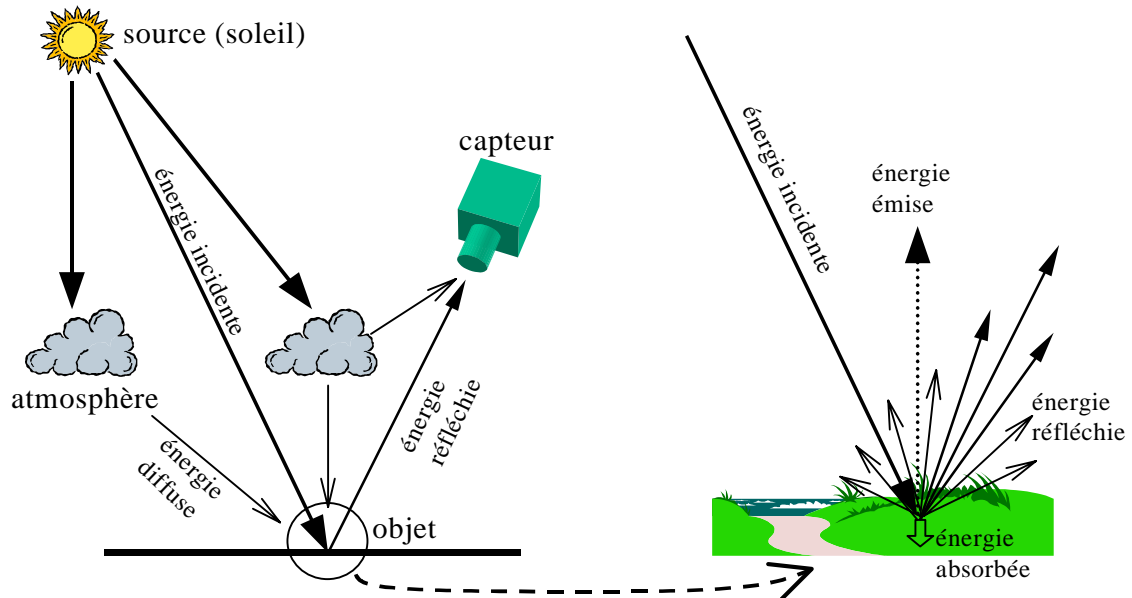


Figure 2.5 Les flux d'énergie dans un système de télédétection. À gauche : la voie "source-objet-capteur" ; à droite : les voies de l'énergie incidente.

La notion d'échelle d'observation, ou résolution spatiale, *i.e.* la surface d'intégration joue un rôle primordial en télédétection et il en est de même pour le présent travail. La possibilité de reconnaître une réflectance observée comme étant la réflectance caractéristique d'un objet dépend de la compatibilité de la surface d'intégration avec la taille de l'objet concerné. De plus il est possible que le comportement bidirectionnel varie avec la résolution spatiale : d'une part à cause d'un mélange d'objets à comportement bidirectionnel différent, mais aussi à cause de la composition interne d'un objet. Il peut se trouver qu'un objet presque lambertien soit constitué d'éléments ou facettes (infiniment) plus petits mais de comportement spéculaires.

2.2.2 Comportement radiométrique des variables

Nous dressons ici un bref état de l'art de la télédétection des variables liées aux états de surface en milieu viticole. Dans un premier temps les variables de l'état de surface sont considérées individuellement. Certaines de ces variables, comme les cailloux par exemple, ont reçu jusqu'à présent peu d'attention en matière de télédétection. D'autres, spécifiques du milieu considéré, comme les sarments par exemple, n'ont pas été étudiés mais peuvent être associés à un groupe d'objets qui lui a déjà fait l'objet d'études (la matière organique ou les résidus de culture dans le cas des sarments). Ainsi on peut, pour chaque variable, exprimer des attentes plus ou moins précises sur leur comportement. Nous allons brièvement passer en revue les propriétés radiométriques associées à chaque caractéristique d'intérêt.

1. faciès/rugosité

Le faciès et la rugosité étant liés à des aspects morphologiques de la matrice du sol minéral, il nous faut d'abord rappeler quelques généralités sur la réflectance de cette matrice. Celle-ci est caractérisée par les aspects suivants (Girard & Girard, 1989 ; Escadafal, 1994) :

- ⇒ une variabilité importante en luminosité (fonction de différentes composantes dont le taux de matière organique du sol, son état d'humectation, le taux de calcaire, *etc.*) ;
- ⇒ la courbe de réflectance dans le spectre électromagnétique augmente graduellement de l'ultraviolet jusque dans le moyen infrarouge (MIR : 1.3 à 3 μ m, figure 2.6). La forme est convexe ou sigmoïdale ;
- ⇒ dans le moyen infrarouge les spectres dépendent des phénomènes d'absorption liés à la minéralogie du sol et à son humidité.

Les variations directionnelles de la réflectance à la surface de cette matrice peuvent être importantes. Des modèles permettent de décrire ce comportement bidirectionnel ("bi-" car aussi fonction de l'angle de l'énergie incidente ; (Pinty *et al.*, 1989 ; Jacquemoud *et al.*, 1992 ; Baret & Jacquemoud, 1994). Par approche inverse, les auteurs observent que les variations spectrales de la réflectance résultent

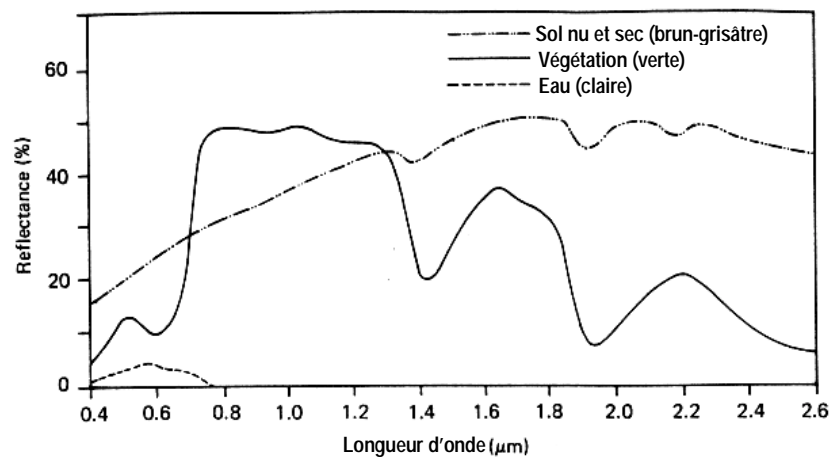


Figure 2.6 Exemples de courbes de réflectance (d'après Lillesand & Kiefer, 1994)

principalement des variations de l'albédo de simple diffusion, l'influence de la rugosité et de la géométrie vue-éclairage étant très faible.

Au travers de la rugosité le faciès n'influencera donc que très peu la forme de la courbe de réflectance. Ceci a aussi été constaté par d'autres auteurs (de Jong, 1992 ; Escadafal, 1994). Cette propriété du sol est d'ailleurs couramment utilisée en télédétection pour établir la "droite du sol" (Girard & Girard, 1989 ; Escadafal, 1994 ; Bonn, 1998), qui décrit la relation entre la réflectance dans le rouge et l'infrarouge. Sur cette droite on retrouve les surfaces labourées en dessous des surfaces non-labourées (Mathieu *et al.*, 1997). Vu la croissance graduelle du spectre de réflectance (figure 2.6), les réflectances absolues des surfaces labourées et non-labourées se distinguent mieux dans le moyen infrarouge (MIR) (Everitt *et al.*, 1991), en dehors des fortes bandes d'absorption de l'eau.

Les variations de faciès se traduisent par des différences en intensité de la réflectance, issues de différences en albédo et du pourcentage d'ombre. Le potentiel de cette information pour la reconnaissance du faciès a été démontré par différents auteurs (Courault, 1989 ; de Jong, 1992 ; Clegg *et al.*, 1999). Cette information étant strictement liée aux propriétés bidirectionnelles des différentes surfaces, elle sera sensible aux variations en angle de vue et/ou en angle d'incidence de la lumière. Une meilleure compréhension du phénomène physique est fournie par Cierniewski & Verbrugge (1997) :

Le comportement bidirectionnel de la surface du sol minéral dépend de la rugosité à différentes échelles. Ils distinguent deux classes d'échelle : (1) une *micro échelle*, où il n'est pas question d'ombre portée et (2) des échelles plus larges où l'ombre portée constitue une partie de la surface observée. Dans le premier cas, le critère de rugosité permettant de distinguer des surfaces spéculaires d'autres pouvant être considérées comme diffusantes et lambertiennes, dépend de la longueur d'onde et de

l'angle d'incidence des rayons solaires. Pour la partie du spectre du visible au proche infrarouge et des angles d'incidence de 10° à 70° , la variation critique en hauteur à la surface varie selon la formule de Rayleigh de $0.05\mu\text{m}$ à $0.47\mu\text{m}$. On peut en déduire que les surfaces de sol à comportement spéculaires sont rares. On comprend également pourquoi des auteurs se sont intéressés à l'intérêt des micro-ondes ($\pm 0.001\text{m}$ à 1.0m) pour distinguer un faciès ouvert de d'un faciès fermé (§ 2.3).

2. l'enherbement et les feuilles mortes

Le terme enherbement comprend un grand nombre de végétaux différents. Son comportement spectral dépend fortement de sa morphologie (influence les aspects directionnels), de son état chlorophyllien/sénescent (variations spectrales), de son contenu en eau (intensité de la réflectance, en particulier dans le MIR) et de l'échelle à laquelle on l'observe (influence de l'ombre et d'autres objets mélangés).

Dans le cas d'une végétation chlorophyllienne (figure 2.6), le spectre de réflectance montre un maximum "local" dans le vert (absorption par la chlorophylle à 0.45 et $0.67\mu\text{m}$), une augmentation très forte dans le proche infrarouge (PIR), puis une diminution graduelle de la réflectance dans l'infrarouge avec intercalation de bandes d'absorption d'eau marquées à 1.4 , 1.9 et $2.7\mu\text{m}$. Les zones enherbées dans les vignes contiennent généralement un taux important d'herbes sénescentes et d'ombre, ce qui rend leur réflectance dans le visible et le proche infrarouge relativement basse par rapport aux autres objets rencontrés. Selon quelques études (Bonn, 1998) et (Bannari *et al.*, 1999) le rapport entre la réflectance dans le moyen infrarouge et le proche infrarouge pourrait aider à extraire le signal correspondant aux résidus de cultures et à la végétation sénescente. Nagler *et al.* (2000) proposent un indice basé sur un phénomène d'absorption par la cellulose autour de $2.1\mu\text{m}$. Les feuilles mortes se comportent de manière similaire à de l'herbe sénescente et des résidus de cultures, si ce n'est qu'elles se dégradent plus vite ce qui les rend plus sombres.

3. les cailloux

Le comportement spectral réflectif d'un ensemble de cailloux à la surface et lavé par la pluie, est identique à celui décrit pour le sol minéral. Si l'on suppose que les cailloux à la surface représentent la roche mère dont la matrice du sol est dérivée par altération, le comportement spectral d'un ensemble de ces cailloux diffère du sol uniquement par l'influence spectrale de la différence en minéralogie due à l'altération. Cette différence est seulement détectable si le sol contient des minéraux pédogénétiques ayant une forte spécificité, comme c'est le cas pour les minéraux ferrugineux issus de rubéfaction. La présence de matière organique ou d'une certaine teneur en eau peut entraîner une baisse d'intensité de la réflectance de la surface du sol par rapport aux cailloux. Si la surface du sol minéral est dépourvue de matière organique ceci peut être un indice intéressant, bien que l'ombre entre les cailloux puisse toutefois réduire cette différence.

La variation de la réponse spectrale des cailloux individualisés dépendra donc de la nature de la roche dont ils sont issus. Si cette roche est caractérisée par une minéralogie homogène à l'échelle de la taille des cailloux (plusieurs centimètres) leur réponse spectrale est la même que celle décrite ci-dessus pour un ensemble de cailloux. Mais souvent la roche est caractérisée par une variation plus ou moins forte à cette échelle (cailloutis de terrasses, stratification dans une roche sédimentaire, segmentation minéralogiques dans des roches métamorphiques), ce qui se répercute dans la réponse spectrale des cailloux individuels.

Le comportement bidirectionnel de la réflectance d'un ensemble de cailloux est complexe. La rugosité perçue dépend du rapport entre la taille des cailloux, leur position (posés/noyés) et la densité de la distribution à la surface et l'échelle d'observation. De plus on s'attend à une composante de simple diffusion (qui ensemble avec une composant de diffusion multiple compose la réflectance (Pinty *et al.*, 1989 ; Jacquemoud *et al.*, 1992) relativement importante vu la morphologie généralement lisse et arrondie des galets. L'angle d'incidence et d'observation joueront donc un rôle important.

Les cailloux présentent des caractéristiques de rayonnement thermique spécifiques et différentes de la matrice du sol. Leur capacité thermique spécifique est très élevée. Cette propriété entraîne un nivellement de l'amplitude du cycle quotidien d'émission par rapport au cycle de la matrice du sol à la surface. Cette propriété est bien connue en viticulture et représente un aspect important de la qualité viticole de la parcelle (Goma-Fortin & Argillier, 1999).

4. les sarments

Ces objets sont des matériaux végétaux non-chlorophylliens. En absence de phénomènes d'absorption liés à la chlorophylle, leur réflectance à l'état vivant augmente graduellement avec la longueur d'onde dans la partie visible du spectre comme pour les sols. Toutefois, l'intensité est nettement inférieure du fait de l'absorption par le carbone organique (jusqu'à 1.4 μ m ; Lillesand & Kiefer, 1994). Les sarments (morts) sur le sol montrent toujours une légère croissance de réflectance dans le PIR (en fonction de leur état de dégradation), mais cette croissance est nettement inférieure à celle d'une végétation vivace chlorophyllienne. L'intensité de la réflectance générale décroît au fur et à mesure que les sarments se décomposent.

La variation directionnel sera marqué pour les sarments posés sur le sol où leur faible densité permet d'entrevoir une portion importante de sol nu. Dans le cas d'un recouvrement total, indépendamment du stade de dégradation, la variation directionnelle sera plus faible.

5. couverture de la vigne

Ce sont les feuilles vertes, en période végétative, qui interceptent la pluie et le rayonnement. Leur comportement spectral est évidemment comparable à celui de toute autre végétation chlorophyllienne (voir ci-dessus 2. enherbement). A l'échelle d'un cep la description de son comportement est moins évidente. Des modèles analytiques décrivent les variations spectrales de la réflectance à cette échelle comme une fonction des caractéristiques du houppier, de la feuille et du fond pédologique (Baret & Jacquemoud, 1994). Ces caractéristiques sont structurales et optiques. Dans l'exemple cité, les caractéristiques structurales sont : LAI (*Leaf Area Index*, i.e. surface couverte de feuilles par unité de surface de sol), la distribution de l'angle foliaire, la taille et la concentration de feuilles, la morphologie de la surface de la feuille, la structure mésophyllienne de la feuille, la concentration et la distribution spatiale de constituants biochimiques de la feuille. Les caractéristiques optiques sont les indices de réfraction des constituants biochimiques et leurs coefficients d'absorption.

Sans entrer dans ces détails on peut distinguer entre une végétation chlorophyllienne et son environnement non-chlorophyllien par des rapports entre les réflectances dans différentes bandes spectrales, c'est à dire au moyen d'indices de végétation comme le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, Lillesand & Kiefer, 1994). Naert (1985) montre l'intérêt d'autres rapports pour la description du signal de la vigne. Le rapport entre proche infrarouge et vert semble permettre la distinction entre différents cépages.

6. texture/porosité

On se situe dans le même cadre que celui de la rugosité, car il s'agit surtout d'aspects morphologiques de la surface de la matrice du sol. Ces caractéristiques influencent donc le comportement bidirectionnel et la réflectance générale (par un effet d'ombre portée à des échelles variant de la motte au grain de sable), et non pas la forme de la courbe de réflectance. Pourtant dans le cas où de fortes différences en texture sont liées à des changements d'aspects de la minéralogie du sol dont on sait depuis Stoner & Baumgardner (1981) et King & Lefebvre d'Hellencourt (1982) qu'ils influencent la forme de la courbe. Ce sont ces relations-là qui sont à l'origine des (faibles) corrélations entre texture et réponse spectrale comme l'ont trouvé De Jong (1992) et Coleman *et al.* (1993).

7. l'humidité superficielle

Si la surface du sol est à l'état humide, cette information permet de supposer que le sol sous-jacent est lui aussi humide (§ 2.1), au moins dans les 10 premiers centimètres. L'eau ayant un indice de réfraction très différent de celui de l'air (figure 2.6), sa présence entraîne une baisse générale de la réponse spectrale du sol.

L'humidité de l'OSS (donc sous la pellicule de surface) ne peut s'exprimer qu'à travers une information spectrale active ou passive capable de traverser une certaine profondeur de sol, c. à d. dans le domaine des micro-ondes. Ce sont les propriétés diélectriques du sol qui influencent l'interaction d'une onde électromagnétique plane avec le sol. Ces propriétés diélectriques du sol dépendent de l'état énergétique de l'eau dans le sol, l'eau étant le constituant de plus forte permittivité : elles dépendent donc de la texture du sol et de sa teneur en eau (Benallegue, 1993) et la proportion et l'état énergétique de l'humidité déterminant la réflectance.

2.2.3 Relations spectrales entre les variables

Les descriptions précédentes montrent que beaucoup de variables ont des comportements liés à leur contexte sémantique. Ces contextes étant souvent similaires (propriétés du sol minéral par ex.), on peut s'attendre à un certain nombre de relations spectrales entre les différentes variables. Toutefois, d'autres types de relations spectrales ont été identifiées pour notre milieu d'étude :

⇒ *Interaction spectrale unilatérale*

L'état d'une variable donnée de l'état de surface influence la réponse perçue pour une autre variable. L'exemple le plus important est l'influence de la vigne en saison végétative (avril à octobre) sur les autres variables à travers l'ombre portée : la réflectance de tout élément de la surface situé dans l'ombre n'est qu'une fraction de la réflectance du même élément situé au soleil, car les seules sources de lumière incidentes sont le rayonnement diffus et la lumière réfléchie. En climat méditerranéen (ciel clair) ces sources sont très faibles et ont donc une influence marginale sur la réflectance (de la partie visible du spectre) du sol situé au soleil.

⇒ *Relation spectrale indirecte*

Il s'agit de différentes variables de l'état de surface dont la réponse spectrale est influencée par l'état d'une autre variable qui elle-même ne fait pas partie de l'état de surface au sens strict. Même si par exemple le type de sol ne constitue pas en soi un objet d'étude, on retrouve son influence spectrale (et celle de la roche-mère dont il est issu) dans les caractéristiques dont le comportement spectral spécifique est en partie fonction de variables liées au sol minéral. C'est le cas de la texture du sol et des cailloux (par la minéralogie), de la surface du sol minéral labourée ou non labourée (par la texture et la minéralogie). L'influence du substrat sur la variation spectrale liée aux variables d'intérêt doit être déconvoluée de la variation induite par les différents états physiques qui nous intéressent.

⇒ *Relation spectrale directe*

Différentes variables de l'état de surface peuvent avoir des effets comparables sur la réponse de la surface dans une partie du spectre. L'humidité, le faciès et la rugosité agissent par exemple tous sur la distribution de la rétrodiffusion des micro-ondes.

⇒ *Ressemblance spectrale*

Il y a également des cas où des états de différentes variables sont caractérisés par un comportement spectral qui ne varie pas significativement entre eux. Il semble par exemple possible que la réponse d'un enherbement plus ou moins sénescent ressemble, à une certaine échelle d'observation, à la

réponse de sarments récemment taillés. De même pour une surface labourée et une surface non-labourée à faible couverture de sarments.

2.2.4 Conclusion

Les principales propriétés spectrales des différentes variables ont été décrites. Il semble que la variabilité spectrale associée à une variable d'intérêt donnée puisse être considérable sans être nécessairement spécifique. L'herbe chlorophyllienne et l'herbe sèche par exemple diffèrent spectralement bien qu'elles aient la même signification hydrodynamique. Par contre le sol minéral à faciès F0 et à faciès F1 sont fondamentalement différents du point de vue hydrologique tandis que spectralement ils diffèrent seulement en intensité. Il semble ne pas y avoir de figures spectrales caractéristiques dans quelque partie que ce soit du spectre électromagnétique, permettant l'identification sans aucune ambiguïté et de façon robuste d'une des variables. Comme l'intensité semble présenter un pouvoir de distinction plus fort que celui d'indices spectraux très spécifique, l'intérêt d'une information spectrale très riche et très fine semble faible, bien qu'un minimum soit requis.

Nous avons montré que le comportement spectral des variables de l'état de surface liés au sol minéral est fortement déterminé par la composition minéralogique de la surface. Les *relations spectrales indirectes* entre ces variables sont donc fortes. Les différents états de ces caractéristiques physiques s'expriment par des variations en luminosité et comportement bidirectionnel. Pour évaluer ces états à l'aide de telles informations, il importe de connaître la variabilité pédologique du milieu et son influence sur la réponse radiométrique.

Le comportement spectral des variables externes au sol (*i.e.* herbe, sarments, *etc.*) permet leur distinction par rapport à ceux propres au sol minéral, mais non pas la mise au point d'indices spectraux permettant leur identification et quantification. La question de l'échelle d'observation s'avère primordiale. Il semble possible de reconnaître les états qui nous intéressent du point de vue hydrologique (plus de 50% d'herbe ou de sarments), mais les faibles taux de recouvrement peuvent compliquer la reconnaissance de l'état de la surface du sol minéral, même dans le cas d'une information spectrale très riche.

2.3 État de l'art de l'observation des composantes de l'état de surface

Il serait imprudent de choisir la démarche de notre étude uniquement en fonction de nos objectifs, et des constatations et attentes exprimées ci-dessus, sans tenir compte de l'état de l'art de la télédétection des composantes des états de surface. Il s'agit ici d'un complément à la revue générale du paragraphe 1.4.3.2, où l'on tente de confronter les techniques disponibles et les résultats qu'elles ont fourni à nos exigences.

2.3.1 Domaine des micro-ondes

Depuis les années quatre-vingts, de nombreuses études ont concerné les capteurs radiométriques actifs (Ulaby *et al.*, 1982a ; Ulaby *et al.*, 1982b ; Dobson & Ulaby, 1986 ; Company *et al.*, 1995 ; Dubois *et al.*, 1995) et passifs (Schmugge *et al.*, 1991 ; Hollenbeck *et al.*, 1996) pour le suivi de l'humidité du sol, la rugosité de surface et le couvert végétal. Généralement ces études sont confrontées à deux problèmes :

- ⇒ l'information fournie par les capteurs actuels, aéroportés ou satellitaires, connaît une résolution spatiale assez grossière, variant pour les capteurs aéroportés de 200m (radar passif ; (Hollenbeck *et al.*, 1996)) à 12.5m (Breton, 1997), qui n'est souvent pas en accord avec l'objet étudié ;
- ⇒ le fait que différents facteurs agissent ensemble sur la (rétro-)diffusion, tandis que l'on cherche à évaluer l'état d'un seul de ces facteurs.

On peut espérer que grâce à une évolution technique on pourra disposer dans le futur d'une plus haute résolution spatiale. Par contre le deuxième problème, *i.e.* l'influence simultanée sur le signal de différents facteurs, restera un problème inhérent au signal. La rétrodiffusion radar dépend de la rugosité de surface, de l'angle d'incidence local et de la constante diélectrique complexe (Ulaby *et al.*, 1982a). Des modèles mathématiques (Jackson & Schmugge, 1991 ; Boisvert *et al.*, 1997) permettent de prendre en compte l'effet des facteurs perturbants (2 des 3 mentionnés selon l'objectif). Mais ces modèles simplifient fortement la réalité et demandent une connaissance précise des sites d'étude (Hollenbeck *et al.*, 1996). Dans notre cas, le problème devient encore plus complexe, car aux résolutions disponibles, chacun de ces facteurs recouvre plusieurs des caractéristiques qui nous intéressent. La "rugosité de surface" comprend ici le travail du sol, la couverture de la vigne, l'enherbement, les cailloux, le cavaillon. L'angle d'incidence local est déterminé par la pente et le cavaillon. La constante diélectrique est déterminée par la couverture de la vigne, l'enherbement, les cailloux, la croûte et l'humidité de l'OSS.

Les modèles mathématiques sont peu utilisés et la démarche générale consiste à étudier un des facteurs en s'assurant que les autres varient peu sur la zone étudiée. Selon par exemple Wall *et al.* (1991), la rétrodiffusion radar peut être considérée comme une mesure de la rugosité à l'échelle proche de la longueur d'onde du radar (en moyenne sur l'unité de résolution) si le relief est modéré et si les propriétés électromagnétiques sont similaires à travers la zone d'étude.

Par cette démarche, c'est à dire en comparant des parcelles qui ne diffèrent que pour une caractéristique, Breton (1997) montre que dans le cas de la vigne méditerranéenne toutes les caractéristiques mentionnées ci-dessus ont effectivement une influence significative sur le signal rétrodiffusé (SAR aéroporté à résolution de 12.5m). Company-Remond (Company *et al.*, 1994 ; Company *et al.*, 1995 ; Company *et al.*, 1995 ; Company-Remond, 1997 ; Remond *et al.*, 1999) a évalué le potentiel du radar, aéroporté et satellitaire, pour la mesure de la rugosité du sol des vignobles

méditerranéens. Il paraissait nécessaire de poser des hypothèses relativement fortes concernant d'autres variables, comme une géométrie constante des rangs de vigne et une humidité de l'OSS constante dans l'espace (10%). Même dans ce cas les résultats restent limités par des problèmes de speckle, une résolution spatiale inadaptée du capteur, l'influence de la croissance de la végétation au cours de l'année, la difficulté de choix d'un filtrage approprié pour obtenir des contrastes suffisants, etc. Company-Remond arrive à distinguer les parcelles labourées des non-labourées dans des conditions simplifiant la complexité de la réalité : les sites étudiés doivent être homogènes, grands (> 9000m²), sans relief et secs. La date d'acquisition des données est prise proche de celle des travaux culturaux. L'influence de la végétation est négligée (Company *et al.*, 1995).

Il ressort de ces résultats que le radar ne peut avoir pour le moment qu'un rôle de complémentarité par rapport aux autres domaines spectraux : si nous connaissons les autres variables par ailleurs, le radar pourrait, à une résolution spatiale adaptée, nous fournir une indication du taux d'humidité ou de la rugosité (aléatoire et périodique).

2.3.2 Domaine thermique

On a vu qu'il y a deux variables qui probablement se distinguent des autres au niveau de leur cycle thermique quotidien, les **cailloux** et l'**humidité superficielle**. La différence en émissivité entre une surface caillouteuse et une surface de sol nu sans cailloux par rapport à la sensibilité des scanners thermiques et à la variation due à l'humidité (dont le taux ne varie peut-être pas beaucoup, mais qui influence fortement le signal ; Lillesand & Kiefer, 1994) n'est malheureusement pas bien connue. Le plus grand écart lié à la température sera probablement observé la nuit/tôt le matin en été. En plus de la sensibilité du signal aux conditions atmosphériques qui pose un problème pour une étude multi-temporelle, la difficulté d'obtenir des prises de vue la nuit avec une haute précision de positionnement géographique pose des contraintes logistiques qui sont difficile à satisfaire.

Récemment l'utilité de l'infrarouge thermique pour la détection de l'humidité du sol a été mise en évidence (Quattrochi & Luvall, 1999). Mais selon ces auteurs son utilisation actuelle est effectivement limitée à cause des difficultés d'utilisation et de disponibilité.

2.3.3 Domaine solaire

C'est le domaine des ondes électromagnétiques plus courtes. Les objets n'émettent que très peu d'énergie dans ce domaine et toute l'énergie rayonnée provient donc de la fraction réfléchi (ou transmise) de l'énergie incidente sur l'objet. Nous obtenons donc principalement de l'information sur la surface de l'objet, ce qui est en accord avec nos objectifs de caractérisation des états de surface.

La variété de capteurs opérant dans ce domaine est grande, chaque capteur étant conçu pour satisfaire les exigences de certains domaines spécifiques d'application. Leurs caractéristiques explorent soit un seul type d'information (bidirectionnel, spatial, spectral, temporel) au détriment des autres, soit plusieurs mais de façon moins performante.

Pour la reconnaissance du **faciès** et de la **rugosité aléatoire**, on peut imaginer différentes démarches dans ce domaine spectral. Wall *et al.* (1991) décrivent plusieurs méthodes courantes (laser, photographie stéréo rapprochée) pour obtenir une mesure quantitative de la rugosité aléatoire. Mais ce sont des méthodes très rapprochées nécessitant une résolution très fine. Elles s'appliquent donc difficilement à notre champ d'étude.

Nous nous intéressons plus à une distinction fiable entre deux ou trois classes très différentes et indicatives du travail du sol, qu'à une détermination précise et quantifiée de la rugosité. Le potentiel de la luminosité (de ce domaine spectral ou d'un sous-ensemble) pour une telle distinction a été démontré

par quelques auteurs (Courault, 1989 ; de Jong, 1992 ; Clegg *et al.*, 1999). Mathieu *et al.* (1997) sont les seuls à s'être servis dans un contexte opérationnel de l'intensité pour la reconnaissance du faciès, quoique de façon empirique. L'intensité est soumise à de fortes variations directionnelles. Sans une connaissance précise sur l'état de certaines autres caractéristiques, les différences en comportement directionnel entre les différents faciès ne peuvent pas être exploitées d'une façon analytique, moins encore que pour les micro-ondes.

L'influence de l'échelle spatiale d'observation, suite aux travaux de Cierniewski & Verbrugge (1997), § 2.2.2) est très important à prendre en compte si l'on souhaite étudier et exploiter l'information directionnelle : on ne peut pas parler des propriétés directionnelles d'un objet sans mentionner l'échelle d'observation concernée. Les éléments de base qui composent sa surface et leur orientation déterminent ce comportement. Il nous faut donc nous intéresser à ces composants élémentaires. En ce qui concerne la surface sèche du sol minéral, les propos de Cierniewski & Verbrugge concernant le seuil à *micro échelle* peuvent seulement être valides dans la condition d'une faible présence de composantes élémentaires non-spéculaires que sont certains oxydes pédogénétiques amorphes (allophane), la matière organique (humus) et les complexes formés entre oxydes, matières organique et argiles. Si l'on suppose cette condition satisfaite, la surface du sol est donc composée de minéraux argileux, d'oxydes cristallins et de grains de silice. On peut considérer ces éléments minéraux comme étant composés de facettes spéculaires. On propose dans ce cas de rajouter une échelle entre les deux

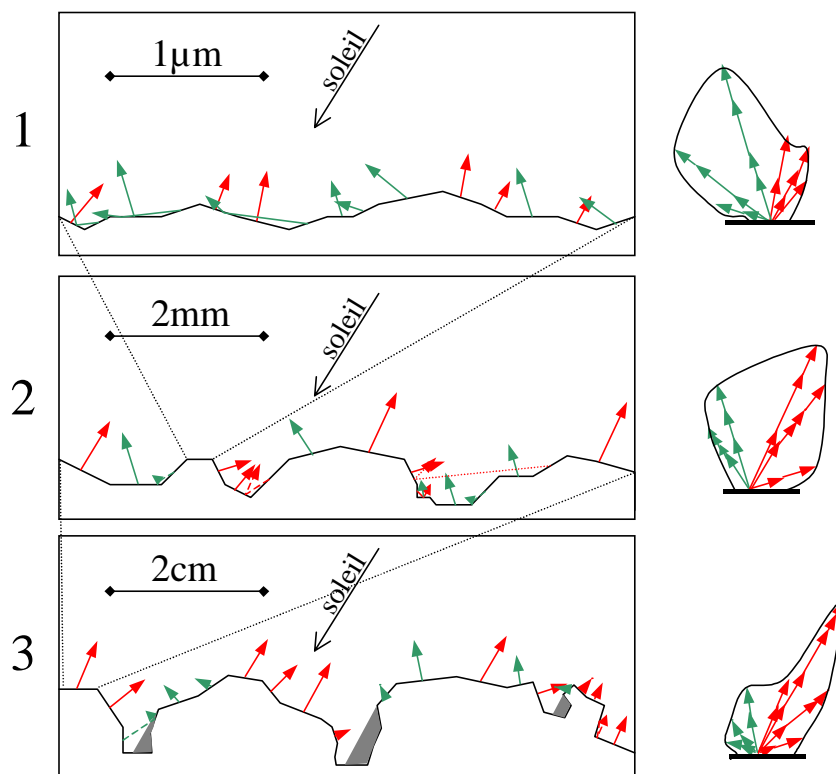


Figure 2.7 Schéma de réflectance bidirectionnelle dans le plan du soleil à 3 échelles. Les flèches rouges indiquent la rétrodiffusion et les vertes la diffusion en avant. A droite est indiqué le résultat bidirectionnel si l'on intègre sur la surface dessinée à gauche (indiqué par flèches cumulées). La taille de chaque flèche est proportionnelle à la taille du segment plan qu'elle représente. À l'échelle 1 les flèches représentent la totalité de la réflectance du segment spéculaire. Aux échelles 2 et 3 les flèches indiquent la direction dominante de la réflectance comme on peut le voir dans le diagramme de droite à l'échelle précédente. Ici le reste du rayonnement réfléchi est considéré également distribué sur tous les angles.

mentionnées par Cierniewski & Verbrugge (fig. 2.7), celle de la face des mottes, allant de quelques millimètres au centimètre. À cette échelle le comportement bidirectionnel peut être spéculaire ou diffusif, mais également très bien rétrodiffusif sans faire appel au phénomène d'ombres portées. L'intérêt de cette modification est qu'en théorie ceci augmente le caractère rétrodiffusif à l'échelle des mottes et réduit donc la possibilité de rencontrer une surface spéculaire au cas d'une croûte sédimentaire (orientation plane des éléments de base) au fort taux d'argile.

La pierrosité n'a pour l'instant pas fait l'objet d'une étude par télédétection. **Les cailloux** sont "visibles" à la surface lorsqu'ils sont lavés, ce qui est généralement le cas des cailloux à la surface d'un sol non-labouré. Il ne s'agit pas de les identifier individuellement, mais d'établir un taux plus ou moins précis par unité de surface. Il faut donc s'intéresser aux différences spectrales et bidirectionnelles entre les surfaces sans et avec cailloux. Toutefois, la différence de propriétés bidirectionnelles avec celles d'une surface labourée est mal connue.

Le domaine réflectif se prête par excellence à la reconnaissance des végétaux. Depuis longtemps cette information est employée, par télédétection aéroportée ou spatiale, tant pour la description et la délimitation de végétaux chlorophylliens que pour la végétation sénescente. Les variables **couverture de la vigne, enherbement** et **sarments** devraient donc être accessibles par cette voie.

Si des variables comme texture et humidité superficielle paraissent difficilement détectables dans le domaine réflectif, un espoir persiste de pouvoir y accéder indirectement par des *relations spectrales indirectes* (§ 2.2.3). L'apparition de capteurs hyperspectraux constitue une nouvelle impulsion dans ce sens (Hill *et al.*, 1994 ; Skidmore *et al.*, 1997 ; Palacios-Orueta *et al.*, 1998 ; Palacios-Orueta & Ustin, 1998). En fournissant une information fiable dans le moyen infrarouge, des capteurs comme AVIRIS permettent une meilleure identification de la minéralogie du sol et de la chimie de la canopée végétale (Curran, 1994).

2.3.4 Résumé des outils disponibles

Un certain nombre de capteurs pour l'observation de la terre opérant actuellement ou prochainement dans les différents domaines spectraux sont énumérés ci-dessous (tableau 2.3) avec leurs propriétés principales, d'une part pour résumer les informations des paragraphes précédents, mais aussi pour illustrer le grand choix, notamment dans le domaine réflectif, auquel nous, les utilisateurs, sommes confrontés.

Pour chaque domaine spectral on voit que l'augmentation de la résolution pour un axe d'information résulte en une dégradation de la résolution dans les autres. Schématiquement c'est cet "axe prioritaire", et les restrictions que cela implique au niveau des autres, qui délimite les domaines thématiques d'application. Pour les capteurs spatiaux, l'équilibre entre résolution spatiale et spectrale est en très grande partie déterminé par la distance entre le capteur et la terre et son champ de vision instantané (CVI) qui est une caractéristique fixe du capteur. Cette constatation n'est pas valide en ce qui concerne les capteurs aéroportés, où l'altitude de vol et la largeur du champ de vision sont indépendantes et modifiables. En conséquence la résolution spatiale et spectrale sont moins fortement liées entre elles.

Si l'on souhaite observer une même zone plusieurs fois dans les mêmes conditions (même angle de vue), on peut remarquer que la résolution temporelle que l'on peut obtenir au niveau du satellite est limitée. Mis à part les capteurs montés sur NOAA-AVHRR, on ne semblait jusqu'aux toutes dernières années pas reconnaître la résolution temporelle comme primordiale dans la conception des systèmes d'observation de la terre. Une partie des capteurs spatiaux est programmable, en particulier grâce au dépointage comme pour le capteur SPOT/HRV, mais le "temps de réaction" à partir du moment où on passe une commande est pour le moment de quelques jours.

L'information bidirectionnelle est en grande partie ignorée et elle semble le rester pour l'instant. La seule exception est POLDER, dont la résolution spatiale de la version satellitale est faible. A part ce capteur spécifique, Barnsley et Hobson (1996) constatent qu'à l'heure actuelle plusieurs capteurs à résolution spatiale grossière sont capables de fournir une information multi-angulaire, grâce à un grand angle de balayage et un temps de revisite rapide.

Récemment, des progrès énormes ont été réalisés au niveau de la résolution spatiale et spectrale. Mais il est exceptionnel qu'une haute résolution spatiale soit associée à une haute résolution spectrale.

Capteur	Origine/Année	Propriété			
		Spectrale	Spatiale	Temporelle	Bidirectionnelle
domaine des micro-ondes					
satellitale					
ERS-1/2 AMI	ESA 1995	1	26	35	-
Radarsat SAR	Canada 1995	1	9-100	24	-
NOAA-15 AMSU	EU 1998	13	15.000-40.000	1	+
Envisat-1 ASAR	ESA 2000	1	30-150	35	-
LightSAR	EU 2000	4	3-100	?	?
ALOS VSAR	Japon 2004	1	10	46	+
aéroporté					
E-SAR	DLR	1	3	*	+
PBMR	NASA	1	*	*	2 (8°, 24°)
ERASME	ONERA/CETP	2	10	*	+
domaine émissif					
satellitale					
ERS-2 AATSR	ESA 1995	3	500	35	-
NOAA-15 HIRS3	EU 1998	20	17.400	1	+
NOAA-15 AVHRR3	EU 1998	3	1000	1	+
IRS-1D WiFS	Inde 1997	2	188	5	-
EOS AM/PM1 MODIS	EU 2000	16	1000	2	+
aéroporté					
PRT-5		1	*	*	*
DAIS	DLR 1997	2	±6 à 3000m d'alt.	*	-
MIVIS	Daedalus Enter. Inc.	10	<10	*	-
domaine réflectif					
satellitale					
ERS-2 AATSR	ESA 1995	4	500	35	-
NOAA-15 AVHRR3	EU 1998	3	500	1	plusieurs
IRS-1D LISS-III	Inde 1997	3	23	24 (5)	+
IRS-1D Pan	Inde 1997	1	5,8	24 (5)	+
ADEOS POLDER	France 1996	9	6.000	4	14 par passage
Landsat-7 Multi	EU 1999	6	30	16	-
Landsat-7 Pan	EU 1999	1	15	16	-
EOS AM/PM1 MODIS	EU 2000	20	250	2	+
Envisat-1 MERIS	ESA 2000	15	300	35 (3)	+
SPOT-5 HRV multi	France 2001	4	10-20	26 (2,5)	+
SPOT-5 HRV pan	France 2001	1	5	26 (2,5)	+
SPOT-5 VMI	France 2001	4	1150	26 (2,5)	+
EO-1 Hyperion	EU 2000	220	30	16	-
MTI	EU 2000	15	5	?	-
Orbview-4 hyper	Orbimage 2000	200	8	?	-
Orbview-4 multi	Orbimage 2000	4	4	?	-
Orbview-4 pan	Orbimage 2000	1	1	?	-
EROS-A1	WIS Ltd. 1999	1	1,5	2	-
Quickbird multi	EarthWatch 2000	4	3,2	5 (1)	+
Quickbird pan	EarthWatch 2000	1	0,82	5 (1)	+
Ikonos-2 multi	Space Im. 2000	4	4	? (3)	+
Ikonos-2 pan	Space Im. 2000	1	1	? (3)	+
aéroporté					
CASI	EU	19-288	?	*	-
DAIS	DLR 1997	76	± 6 à 3000m d'alt.	*	-
AVIRIS	EU	224	± 20 à 20000m d'alt.	*	-
POLDER	France	9	?	*	*
HRSC-A stéréo	DLR	3	0,25 à 6000m d'alt.	*	-
app. photographique	-	3	*	*	*
caméscope	-	3	*	*	*

Tableau 2.3 Extrait de l'offre actuelle de différents types d'information télédéetectée. La propriété spectrale est notée en nombre de bandes dans le domaine concerné, la propriété spatiale en taille de l'élément de résolution (mètres), la propriété temporelle en temps de revisite (jours) et la propriété bidirectionnelle en nombre d'angles proposés. ? = propriété inconnue ; - = orientation fixe ; * = propriété selon besoin de l'utilisateur. Si un deuxième temps de revisite est indiqué entre parenthèses, ceci indique le temps de revisite le plus rapide possible, mais sous un angle de vue différent. Acronymes du champ "origine" : ESA=European Space Agency ; EU : États Unis ; DLR : Deutsches Luft und Raumfahrt Zentrum (agence spatiale allemande) ; NASA : National Aeronautics and Space Agency (agence spatiale américaine).

2.4 Conclusions - le type d'information télédétectée requis

Il est important de rappeler que l'étude ne vise pas à mettre au point une méthodologie permettant d'analyser au mieux chacune des variables en mettant en œuvre l'ensemble de la technologie de pointe actuellement disponible (ou même pas encore disponible) en télédétection. Une telle démarche impliquerait la mise en œuvre de plusieurs capteurs adaptés aux "besoins" de chaque variable. L'objectif de l'étude est de développer une application plus ou moins légère qui permette de reconnaître les états de surface, *i.e.* des ensembles de caractéristiques, sur une zone relativement étendue, de façon rapide, de manière répétitive et sans biais. Cet objectif nous impose de privilégier l'un des domaines spectraux. Au vu du grand nombre de variables dont on souhaiterait obtenir une information, leurs propriétés spectrales et le potentiel de détection des différents domaines comme démontré dans la littérature, nous avons choisi d'exploiter le domaine solaire.

Dans le choix du capteur et du vecteur, certaines autres considérations entrent en jeu. On doit d'abord hiérarchiser l'intérêt que l'on porte aux différentes variables de l'état de surface (§ 2.1.5). Ensuite on doit définir la résolution spatiale requise pour permettre la détection des variables les plus importantes. Le grand avantage technique des capteurs aéroportés opérant dans le domaine solaire est que l'on peut, plus que dans les autres domaines, librement choisir l'échelle et la résolution d'observation. Au besoin, on peut avoir accès à des résolutions spatiales très élevées (Wall *et al.*, 1991). Il faudra tenir compte d'une caractéristique affectant de manière importante le domaine spectral, déjà évoquée : l'ombre portée. Ce phénomène est à certaines échelles considéré comme un facteur perturbateur, mais à d'autres échelles il pourra fournir une information importante. Selon la figure 2.4 la résolution devra être d'au moins 0.5 m^2 et vu la taille des mottes d'un sol labouré et leur ombre, la résolution ne devra pas être inférieure à 0.02 m^2 .

Ce besoin exclut l'utilisation d'une information fournie par les capteurs spatiaux actuels, et même celle fournie par les capteurs hyperspectraux aéroportés comme CASI, DAIS ou AVIRIS. Par ailleurs tous ces capteurs ne remplissent pas les exigences de légèreté de mise en œuvre. Le seul groupe d'outils qui remplit toutes nos exigences est celui des systèmes LARS (*Light Aerial Remote Sensing*). Ces systèmes consistent en un capteur photographique ou vidéo aéroporté par un vecteur à moyenne ou basse altitude. Nègre & Grépin (1997) passent en revue un grand nombre de vecteurs utilisés et montrent l'intérêt de systèmes LARS pour le développement local agricole. Pour un suivi d'un champ spatial tel que la vallée de La Peyne, ces auteurs conseillent comme vecteurs des ULM, des petits avions, ou des hélicoptères. Dans notre cas l'hélicoptère a été choisi. Ce choix était imposé d'une part pour des contraintes logistiques, d'autre part pour la précision de positionnement et la faible et réglable vitesse de passage qui présentent des avantages pour les prises de vue de sous-ensembles de la zone, les sites d'études. Par rapport aux vecteurs plus légers comme entre autres l'ULM, l'hélicoptère présente en outre l'avantage d'une bonne stabilité ainsi qu'une faible sensibilité au vent, *i.e.* une grande liberté de mise en œuvre.

Il ne nous reste donc plus qu'à choisir le capteur le plus adapté à nos objectifs. Comme nous savons que la plupart de nos variables se distinguent plus par leur brillance général et leur distribution dans l'espace que par leur spectre de réflectance, nous privilégions la résolution spatiale par rapport à la résolution spectrale. Le capteur retenu est l'appareil photographique reflex à émulsion argentique. La vidéo est également de plus en plus appliquée dans ce genre d'études (Everitt *et al.*, 1991 ; Mausel *et al.*, 1992). Ce capteur présente pourtant deux problèmes majeurs : 1) la résolution du film vidéo est nettement inférieure à celle du film photographique et 2) le réglage automatique pose un problème d'étalonnage. On attend pourtant dans les années à venir la sortie de caméras vidéos et de caméras numériques fournissant une résolution photographique à faible coût.

Ce choix limite obligatoirement notre domaine de sensibilité spectrale au visible et proche infrarouge (300 à 900 nm). La perte de l'information dans le moyen infrarouge n'est pour autant pas ressentie comme importante, car elle fournit une information sur la variabilité à l'intérieur de la délimitation de nos objets (ex. lithologie du sol et composition chimique de la végétation) qui donc dépasse le niveau de détail correspondant à nos objectifs.

En choisissant une haute résolution spatiale, nous pourrions observer les objets à des échelles pertinentes et avoir accès aux analyses de texture et de morphologie mathématique pouvant fournir les informations recherchées. De nos jours cette voie est de plus en plus empruntée et est considérée comme ayant un grand potentiel (Ryherd & Woodcock, 1996 ; Bonn, 1998). Elle jouera un rôle prépondérant dans cette étude.

2.5 Démarche - les grandes étapes de la recherche

Quelle est donc la démarche à suivre afin de dévoiler le potentiel de l'information du domaine réflectif à très haute résolution spatiale, de manière à remplir au mieux les exigences diverses définies par nos objectifs ?

La réponse à cette question relève d'une part des connaissances sur les états de surface décrites précédemment et des caractéristiques du milieu viticole, et d'autre part de l'état de l'art des techniques de télédétection et de traitement d'image. La description de la démarche donne l'esquisse de cette réponse, qui sera développé au cours de cette thèse.

Selon les objectifs de l'étude, l'information télédéteectée à très haute résolution spatiale utilisée dans le cadre de ce travail doit nous permettre de :

1. **renseigner le parcellaire existant** ;
2. à l'échelle de la **surface étendue** d'un bassin versant de quelques milliers d'hectares ;
3. dont la majorité de la surface est **cultivée en vigne** ;
4. et dont la composition physique (climat, pédologie/géologie et morphologie) permet de supposer que **les concepts de comportement hydrologique** comme établis sur le site de Roujan y **sont valides** (Andrieux *et al.*, 1993 ; Gaddas, 1997 ; Léonard & Andrieux, 1998 ; Louchart, 1999) ;
5. de façon **répétitive et rapide** ;
6. sur l'état des **variables de l'état de la surface** du sol **dans l'ordre préférentiel** défini (§ 2.1.5).

On procédera d'abord à la délimitation d'une région correspondant aux exigences formulées ci-dessus. Dans la plaine côtière viticole on s'intéressera à un bassin versant de quelques milliers d'hectares qui fait l'objet d'un suivi hydrologique et d'une future modélisation hydrologique (Moussa *et al.*, 2000). À l'intérieur de cette zone, l'information télédéteectée sera acquise sur un sous-ensemble de sites de taille et en nombre suffisants pour couvrir la variabilité du milieu physique et culturel. Un certain nombre de prises de vues est effectué sur ces sites, afin de suivre l'évolution du milieu et évaluer la robustesse des méthodes développées dans cette étude.

Le pré-requis fondamental de l'approche de télédétection choisie est que la localisation des parcelles est connue, et numériquement disponible, grâce au cadastre. Pour analyser l'occupation d'une parcelle et son état de surface on se servira de l'ensemble de l'information contenue à l'intérieur des limites connues. On pose donc l'hypothèse, que toute l'information à l'intérieur des limites d'une parcelle concerne uniquement la culture, soit le sol soumis à la pratique culturale, d'une seule parcelle agricole. Il s'agit donc d'une approche *par parcelle* conduite non pas dans un but de segmentation (Kettig & Landgrebe, 1976 ; Jansen & Molenaar, 1995 ; Curran, 1999), mais dans le but de stratifier (Mason *et*

al., 1988). Smith *et al.* (1997) ont confirmé le potentiel d'une telle approche en utilisant de simples statistiques. Cette approche permet également l'utilisation du contexte spatial à l'intérieur de la parcelle comme proposée par Hinton (1996) et Wilkinson (1996).

Au regard de l'état de l'art (§ 1.4.3.2), notre objectif de reconnaissance d'un ensemble de variables paraît ambitieux. L'approche originale suivie doit nous permettre d'évaluer le potentiel de l'information choisie. Il s'agit d'une approche *itérative* : on réutilisera à plusieurs reprises les mêmes données pour en extraire différentes informations. Ainsi progressivement nous simplifierons par élimination notre milieu et nous réduirons le nombre d'objets que nous pouvons y rencontrer et distinguer.

À partir de l'information brute mesurée, on peut reconnaître trois étapes majeures dans la chaîne de traitements (figure 2.8) :

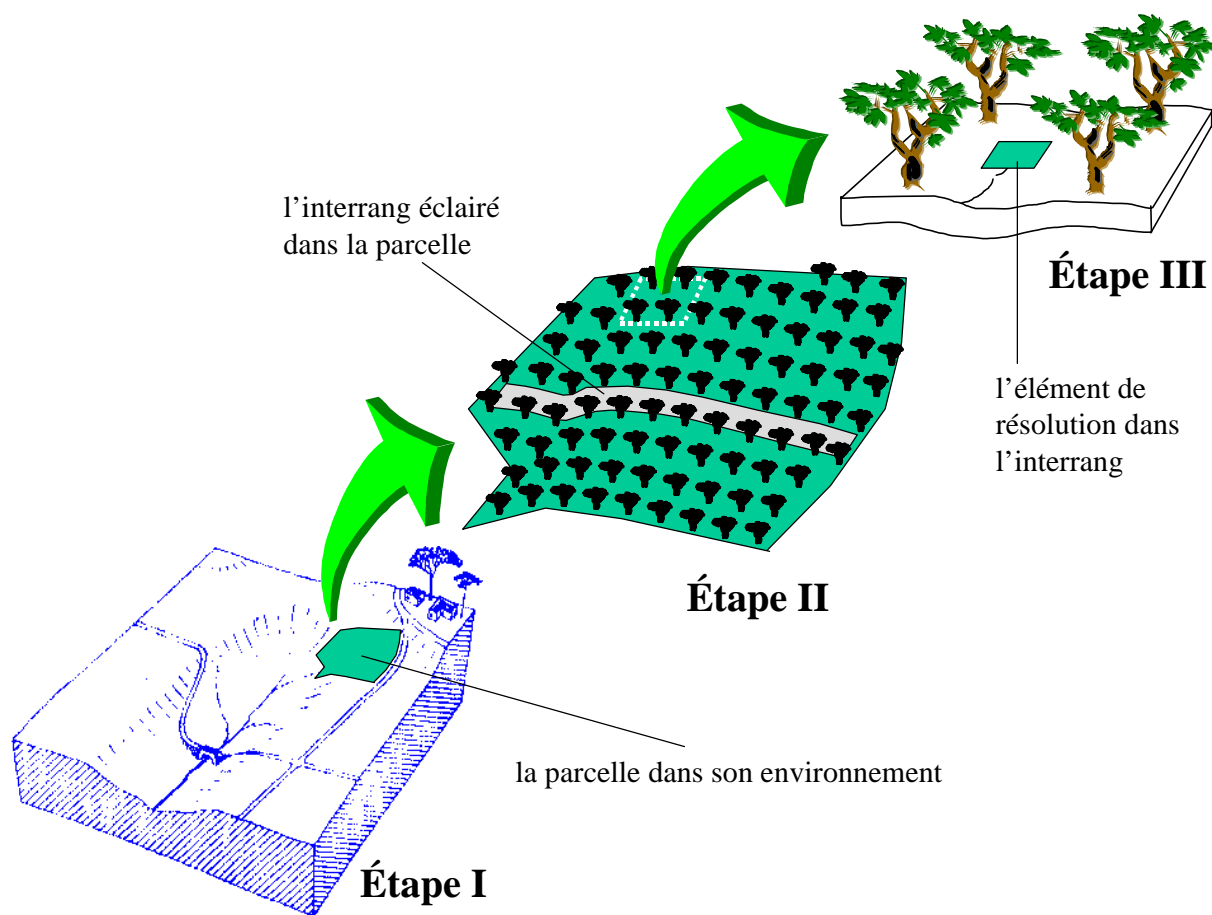


Figure 2.8 Étapes de la démarche générale d'analyse

1. Étape I

Tout d'abord, on s'intéresse à l'analyse de l'occupation du sol, c'est à dire que l'on cherche à identifier les parcelles cultivées en vigne. L'analyse *par parcelle* des images fournit une description unique de chaque parcelle permettant sa classification.

Les parcelles non cultivées en vigne ne sont pas prises en compte dans cette étude. Leur occupation du sol peut généralement être identifiée par des approches conventionnelles. L'objectif principal de cette étape est donc d'identifier les parcelles auxquelles on doit s'intéresser par la suite ; les parcelles cultivées en vigne. Un objectif secondaire est de fournir une description des aspects de la structure de leur plantation ayant un intérêt hydrologique.

L'échelle spatiale concernée dans cette étape est celle de la parcelle dans le paysage. Mais on s'intéresse à l'analyse du motif spatial dans la parcelle, ce qui exige une résolution spatiale nettement inférieure à la taille de l'élément de base de ce motif (Woodcock & Strahler, 1987), le cep de vigne.

Un modèle de reconnaissance de parcelles en vigne est ajusté sur un des sites d'étude (§ 3.1.3) et validé sur des observations réalisées à deux dates différentes ou plus sur l'ensemble des sites.

2. Étape II

Une méthode robuste est ensuite développée pour extraire de l'ensemble de la parcelle, composée des trois objets pied de vigne, ombre portée et sol éclairé (figure 2.9), la partie correspondant à la surface du sol éclairée. La démarche que nous avons adoptée repose sur une approche spatiale et est basée sur une connaissance d'expert à priori de la taille et de l'espacement des objets. On s'attend à ce que ces critères spatiaux soient plus robustes et discriminants que des critères basés sur la radiométrie absolue.

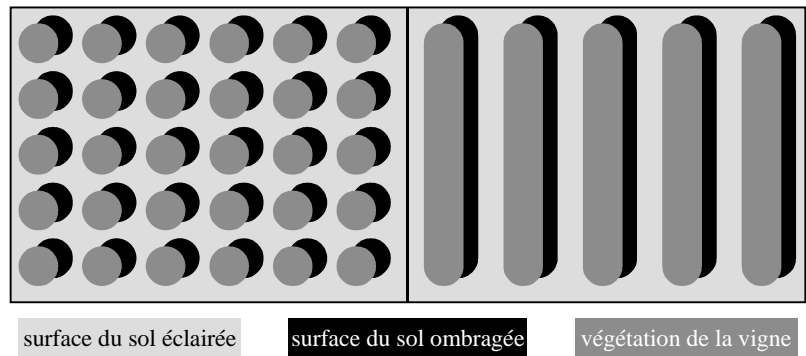


Figure 2.9 Schéma d'une vue orthogonale d'une parcelle de vigne en gobelet (gauche) et palissée (droite), mettant en évidence les trois objets constituant l'image de la parcelle : le pied de vigne et sa végétation, la surface du sol ombragée, et la surface du sol éclairée. L'azimut du soleil est situé au sud-ouest.

L'objectif principal de cette deuxième étape est de fournir les entrées nécessaires à la caractérisation des états de surface décrite dans la troisième partie : extraire la partie de la parcelle éclairée et non couverte par la vigne, de façon entièrement indépendante de l'état de surface pour ensuite pouvoir s'intéresser à la radiométrie de cette surface. Nous supposons que les états de surface du sol éclairé d'une parcelle sont représentatif de l'ensemble des états de surface rencontrés dans les parties ombragées et éclairées de la parcelle donnée. L'objectif secondaire est de pouvoir estimer le recouvrement de la surface par la végétation de la vigne, ce qui constitue une des variables recherchées de l'état de surface.

L'échelle spatiale est celle du cep ou rang de vignes dans la parcelle. Les exigences au niveau de la résolution spatiale sont les mêmes que pour l'étape 1.

La méthode de segmentation est validée par comparaison à une segmentation par digitalisation manuelle à l'écran, à l'aide d'images à une résolution spatiale de quelques centimètres représentant un ensemble de situations différentes.

3. Étape III

L'analyse de l'état de surface de la parcelle est enfin réalisée par le biais de trois sous-étapes : d'abord on classe spectralement chaque pixel en comparant sa radiométrie à des gammes radiométriques bidirectionnelles préétablies pour les différents types de surface. On redescend ensuite l'échelle spatiale pour retourner au niveau initial : on s'intéresse à l'échelle intermédiaire entre le pixel et la parcelle caractéristique de l'interrang, pour reconnaître la présence d'interrangs non-soumis à la pratique culturale générale de la parcelle ; on intègre finalement les informations obtenues, par le biais d'un modèle intégrant une connaissance experte sur la distribution de ces types de surfaces, et obtenir ainsi une synthèse au niveau de la parcelle.

Différents objets de l'état de surface sont d'une taille souvent trop petite pour pouvoir être détectés directement à des résolutions spatiales "raisonnables", i.e. plus qu'une dizaine de centimètres. On

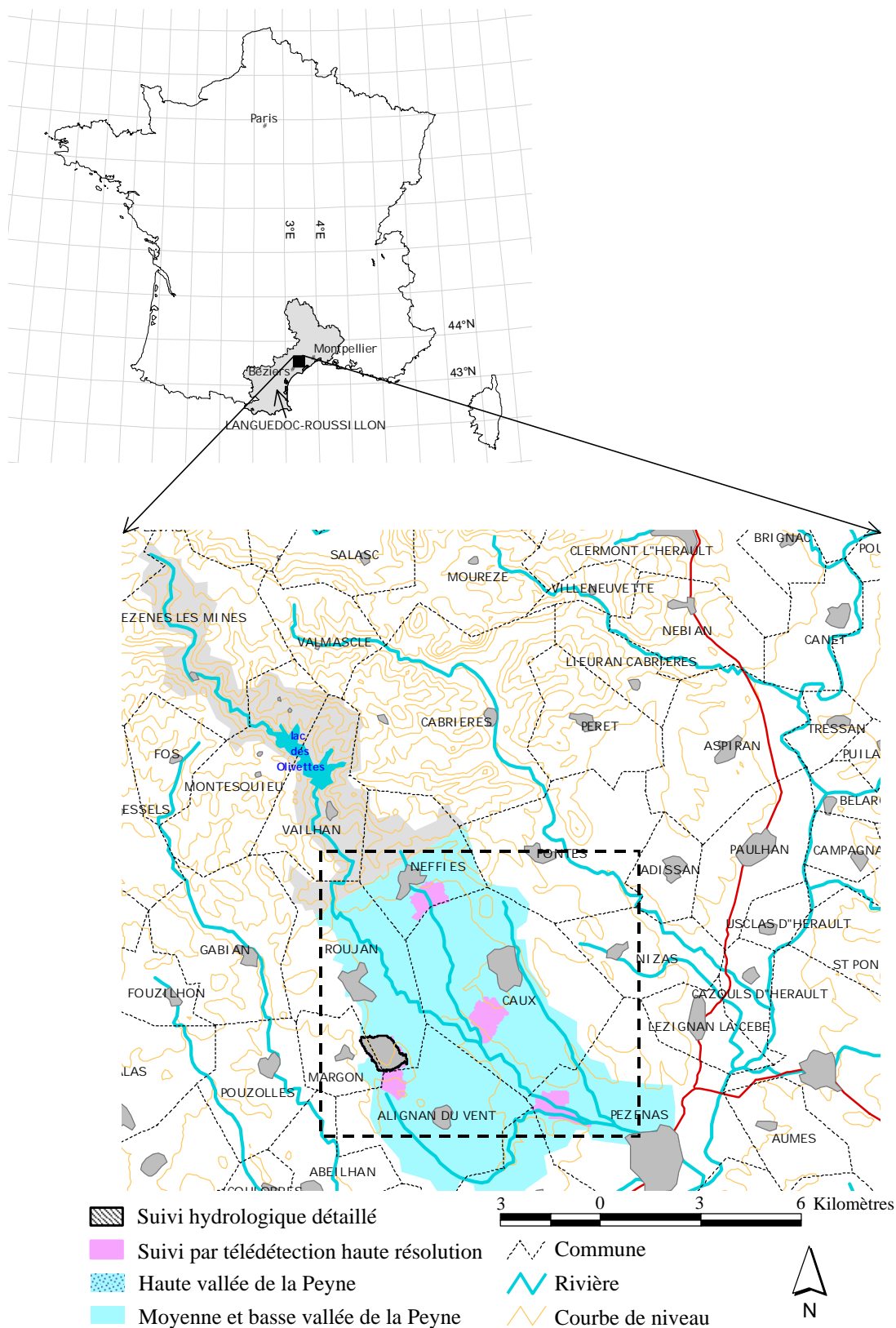
s'intéresse donc dans cette étape donc à l'échelle la plus détaillée, imposé par la taille du pixel, pour remonter ensuite au niveau de la parcelle.

La sensibilité de la première sous-étape est analysée par rapport aux différentes sources d'erreur. La deuxième sous-étape est calibrée sur trois parcelles exemples et validée sur l'ensemble des observations présenté dans ce travail. La synthèse au niveau de la parcelle est basé sur un modèle expert, mais quelques réglages sont effectués par ajustement sur une prise de vue d'un site, puis validée par application à d'autres prises de vues et sites.

PARTIE II

L'EXPÉRIMENTATION

3	<i>L'EXPÉRIMENTATION SUR LA VALLÉE DE LA PEYNE</i>	53
3.1	Milieu d'étude	53
3.2	Matériel et données.....	62
3.3	Conclusions	71



Sources : IGN - BD Topo 1994 Conseil Général de l'Hérault SIG 34

Figure 3.1 Localisation de la zone et des sites d'étude. Le cadre en pointillés délimite la zone présentée en annexe 1.

3 L'expérimentation sur la vallée de La Peyne

De l'objectif de l'étude découlent certaines exigences en termes de fréquence d'acquisition de l'information télédéteectée, ainsi que de localisation et taille de la zone d'étude. Ces exigences et les choix faits pour les satisfaire sont commentés dans les paragraphes suivants (§ 3.1 et 3.2). On verra également que la démarche impose des conditions au niveau du prétraitement des données brutes et de la disponibilité de métadonnées sur la prise de vue, lesquelles seront également décrites dans la paragraphe 3.2.

3.1 Milieu d'étude

La zone d'étude est celle retenue et étudiée depuis 1991 dans le cadre du programme ALLEGRO (§ 1.3.1). Il s'agit de la vallée de la Peyne, un affluent de l'Hérault (fig. 3.1). Le milieu physique de cette zone est représentatif de la Moyenne et Basse vallée de l'Hérault. Du point de vue cultural, la zone est représentative de la plaine côtière viticole du Languedoc Roussillon, tant par rapport aux parcelles et leur cultures que par rapport aux différentes pratiques culturelles qui y sont observées.

3.1.1 Milieu physique

La vallée de la Peyne est composée de deux paysages très contrastés. Le Nord-Ouest de la vallée (fig. 3.1) est un milieu très accidenté, non cultivé et couvert de maquis. Cette partie est écartée de notre étude qui s'intéresse au milieu cultivé. Si par la suite on s'adresse donc à la *vallée de la Peyne*, il s'agit de la moyenne et basse vallée ($\pm 70 \text{ km}^2$), c'est à dire *grosso modo* du village de Neffiès à la ville de Pézenas (fig. 3.1 et annexe 1A), un parcours long de 12 km et large d'environ 7 km. Dans cette zone, l'activité fluviale de la Peyne a produit un relief peu accidenté. Le dénivelé avoisine 100m, l'altitude variant de 130 à 20m.

La vallée se situe dans la plaine côtière du Languedoc. Les entités géomorphologiques qu'on y rencontre représentent bien les caractéristiques de cette plaine : des pentes quasi nulles sur les épandages d'alluvions étagées en terrasses successives, de longs glacis entrecoupés de talus et de versants localisés. La partie la plus pentue des versants est généralement de l'ordre de 10 à 15° et n'excède pas 20°, en dehors des talus. Le plus souvent elle n'est pas cultivée en vigne, mais là où c'est le cas, la faible pente ne constitue pas de problème majeur pour sa télédétection.

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen, sub-humide, à saison sèche prolongée (Andrieux *et al.*, 1993). Les saisons sont contrastées. À cette latitude (43°30'N), la durée du jour varie de 14.5 heures au solstice d'été à 8.0 heures au solstice d'hiver avec un angle zénithal à midi solaire variant de 20° à 66°. Les hivers et notamment les automnes peuvent être très pluvieux. Les étés sont chauds et secs avec des averses de forte intensité. Les précipitations, majoritairement sous forme de violents orages, y atteignent 700 mm par an (Kessler & Chambraud, 1986), mais la variabilité inter-annuelle est très forte. L'évapotranspiration potentiel y est grande, en moyenne 1000 mm par an, résultant de la température moyenne élevée, de la forte irradiation, mais aussi d'un vent souvent fort. La température maximale mensuelle (moyenne de températures maximales journalières) est comprise entre environ 10°C pour le mois de janvier et de 30°C pour le mois de juillet. Il résulte de ces caractéristiques que le ciel est très souvent bien dégagé et la surface du sol rarement et brièvement à l'état humide.

3.1.1.1 Principales entités géologiques

La géologie détermine en grande partie la pédogénèse et la distribution des sols, et donc également la distribution des propriétés de la fraction minéralogique de la surface du sol. C'est pourquoi il est nécessaire de présenter brièvement les principales formations géologiques et leur historique. Cette description est basée sur la notice de la carte géologique (BRGM, 1977).

Le substratum le plus ancien affleurant dans la vallée date du milieu du Tertiaire (Miocène). La plaine côtière est à cette époque sous l'influence d'une transgression datée de l'Helvétien (environ 10 millions d'années). Ces sédiments d'origine marine ou lacustre forment un substratum épais, diversifié, constitué de marnes et de dépôts plus sableux. On y trouve intercalés des bancs de calcaires coquilliers. La fin de cette période de transgression est marquée par des faciès de calcaires durs et des molasses à dragées de quartz. Au Pliocène, la plaine est affectée par des influences continentales : dans la vallée de la Peyne, les dépôts caillouteux à galets de cette époque affleurent principalement sur les plateaux en bordure de la vallée. Ensuite, le Quaternaire est dominé par l'influence fluviale qui a façonné la morphologie actuelle. Les rivières principales, l'Hérault et la Peyne, ont creusé leurs lits dans le substratum puis déposé des alluvions plus ou moins caillouteuses. Dans la vallée de l'Hérault il existe plusieurs niveaux de terrasses parmi lesquelles les géologues reconnaissent trois niveaux principaux : (1) les terrasses villafranchiennes, (2) les terrasses du Pléistocène moyen et (3) les alluvions récentes. Seul les deux derniers niveaux sont représentés dans la vallée de la Peyne. En outre, une activité volcanique a traversé la région pendant le Quaternaire et a provoqué des épandages basaltiques. Ces coulées de basalte sont également présentes sur la bordure nord-est de la moyenne vallée de la Peyne.

En résumant, on constate donc que la vallée de la Peyne est composée de quatre grands types de substrats ayant des âges, origines et compositions très distincts : les sédiments marneux du Miocène, les plateaux à dépôts caillouteux du Pliocène, les terrasses alluviales du Pléistocène moyen, et les alluvions récentes.

3.1.1.2 Principaux types de sol

L'annexe 1C montre l'extrait de la carte des sols au 1/100.000 (Bonfils, 1993) concernant la vallée de la Peyne. Comme il s'agit de l'objet dont les propriétés de surface font (en partie) l'objet de cette étude, il importe de s'étendre un peu plus sur ce sujet. D'abord il faut se rendre compte de l'importance de la longue présence de l'homme dans la région. Les sols, tous cultivés actuellement sinon dans le passé, n'ont sous cette pression pas pu développer une fine différenciation d'horizons de surface plus ou moins humiques, ni former des couches ectorganiques. Même d'éventuels horizons éluviaux sont difficiles à identifier, car les sols ont été généralement, si leur profondeur le permet, défoncés et homogénéisés sur une profondeur de près de 0.50m (figure 3.2) !

⇒ *Les sols développés sur 'molasse' de l'Helvétien-Miocène*

Les affleurements du substratum Miocène occupent plus de la moitié de la vallée. Le terme *molasse*, utilisé ici, recouvre en fait des roches mères différentes et responsables de la différenciation des unités typologiques de sols. Les unités les plus répandues et occupées par la vigne dans la plaine côtière, le sont également dans la vallée. Il s'agit de sols développés sur des faciès

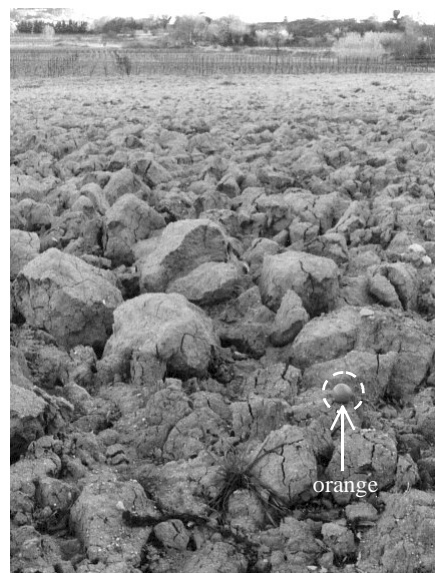


Figure 3.2 Sol "défoncé" avant plantation de vigne (après la pluie dans une plaine marneuse).

molassiques sableux (unités 61a, 64 et 65(a), Bonfils, 1993). Ces sols bruns calcaires présentent une texture équilibrée (limono-sablo-argileuse à limono-argilo-sableuse) et une faible charge en éléments grossiers. La profondeur est le facteur distinguant les trois types de sol (moins de 0.50m pour l'unité 61a, entre 0.50 et 1.00m pour l'unité 64 et plus de 1.00m pour l'unité 65).

Cette dernière remarque nous montre que la composition minéralogique à la surface de ces sols n'est pas forcément très différente suivant les types de sol molassique. On constate la même chose en regardant les deux sous-types de l'unité 65 présents dans la vallée : ils se distinguent par la profondeur de leur nappe, sans avoir de différence d'origine pédogénétique en surface.

La couleur de l'horizon de surface se situe sur la planche 10 YR de la charte Munsell. Sa clarté est moyenne (intensité proche de 5).

⇒ *Les sols sur matériaux pliocènes*

Différentes unités typologiques ont été reconnues dans la plaine côtière (dont une présente dans la vallée de la Peyne, unité 72). Les différences entre ces unités sont principalement liées à la texture du sol (variant de limono-sablo-argileux à limono-argilo-sableux) et à la présence d'un encroûtement. En général, ces sols sont calciques ou calcaires, graveleux et de couleur rougeâtre. Cette couleur, due à une richesse relative en oxydes de fer (Fe_2O_3) d'origine pédogénétique, est issue d'une rubéfaction qui a suivi leur dépôt sous des conditions climatologiques subtropicales. Des surfaces actuelles, ces unités, situés en hauteur, sont les seules à déjà avoir été au contact de l'atmosphère à cette époque là, même si les molasses les précèdent géologiquement. Parmi elles, les propriétés de surface varient probablement peu, mais à l'intérieur de chaque unité la pierrosité de surface peut varier sur de courtes distances. Ceci est fonction d'affleurements de bancs plus caillouteux que d'autres, et aussi de remaniements de surface récents (enrichissement relatif ou accumulation absolue).

La couleur du sol se situe typiquement sur la planche Munsell 7,5 YR. L'horizon de surface est moyennement sombre (intensité proche de 4).

⇒ *Les sols sur les terrasses du Pléistocène moyen*

Dans l'espace, ces unités se retrouvent entre les terrasses alluviales récentes et les formations miocènes. Les sols y sont très fortement influencés par des processus de colluvionnement, issus des niveaux miocènes voisins. Ces sols bruns sont profonds, et en absence de colluvionnement ils sont caillouteux dès la surface (sauf l'unité 80a), de texture sablo-limoneuse et peu acides (unité 80). Les colluvions par contre sont composées de matériaux limoneux, limoneux-argileux ou argilo-limoneux, calcaires et pauvres en éléments grossiers. La couleur de l'horizon de surface, toujours d'une clarté moyenne, varie de 5 à 10 YR.

⇒ *Les sols de la plaine alluviale Holocène*

Les sols (unité 82) sont récents et donc peu évolués. Ils sont profonds, calcaires, généralement bruns ou brun-jaunâtre (horizon de surface 10 YR 5/4) et peu chargés en éléments grossiers. Leur texture, fonction de la distance à la rivière, varie d'argilo-limoneux (unité 82b) à limono-sableux (unité 82a).

⇒ *Les sols sur basalte*

Ces sont des brunisols (unité 51) ou des brunisols andiques (unité 52), formés sur les coulées de basalte ou sur les débris volcaniques des plateaux basaltiques. Il s'agit de sols moyennement profonds (0.40-0.60m), pierreux et caillouteux, limono-sablo-argileux. Les sols sont d'une rougeur de 5 YR, voire 2.5 YR. L'horizon de surface (hors vigne) est relativement sombre (intensité de 2 à 3).

Pour résumer, on constate que les différentes unités géologiques donnent toutes des sols à fort taux de limon et donc susceptibles à l'encroûtement. Dans le chapitre 2 nous avons vu l'importance

hydrologique de ce phénomène. Cette texture fine favorise la stabilité de la structure pédogénétique du sol et donc également la pérennité de la rugosité après labour, bien que cette dernière aspect dépend également du type de labour. La variation de texture entre les unités de sol est assez faible, hormis les sols sableux de l'unité 82a. Ceci justifie le faible intérêt accordé à cette variable (§ 2.1.5). La couleur des unités de sol varie de rougeâtre (rubéfié) à brun-jaunâtre (brunifié). La gamme de variation des couleurs des horizons de surface sous vigne est de 5 à 10 YR avec une intensité de 4 à 5. On constate donc plus de variation en tonalité (*hue*), provoquée par des différences en absorption dans le vert, que de variation en intensité (*value*). Nous verrons que cet aspect influence à différents niveaux la démarche et les résultats de l'étude. La pierrosité varie fortement entre types de sols, mais aussi à de courtes distances à l'intérieur des unités. Elle ne peut donc pas être déduite du type de sol et sa détection s'impose. Les autres facteurs caractéristiques de différents types de sols sont leur profondeur et leur relation avec la nappe phréatique. Ces facteurs n'entraînent pas de différenciation dans le signal télédécté.

3.1.2 Milieu cultural : aspects des vignobles et de la viticulture

Autour de 70% de la surface de la vallée est cultivée en vigne. Pour les trente pour-cent restants, la majorité a soit été abandonnée (garrigue sur lithosols en coteaux), soit délaissée temporairement (jachère enherbée). On trouve aussi des cultures comme le blé dur, le colza et l'asperge.

3.1.2.1 Les vignes méditerranéennes et leur mode de conduite

La première chose qui nous frappe si nous survolons la plaine côtière est la nature morcelée du milieu viticole. Les parcelles agricoles y sont généralement petites (variant de 0.05 à 3 ha) et de forme irrégulière (de compacte à très allongée). En se rapprochant du sol on s'aperçoit d'une autre caractéristique du milieu viticole méditerranéen : la grande variété des modes de conduites et des couvertures végétales résultantes. A ces deux niveaux donc, notre milieu n'est pas comparable à d'autres grandes régions viticoles comme le bordelais ou le val de Loire.

Champagnol (1984) distingue neuf types principaux de modes de conduite, dont quatre sont communs en région méditerranéenne. Du point de vue hydrologique, on peut regrouper trois modes de conduite parmi ces quatre (cylindre, cône inversé et hémisphère) sous le dénominateur *gobelet*. Il s'agit d'un motif de ceps individuels sans tuteur distribués sur une grille régulière. C'est le mode de conduite traditionnel en Méditerranée, les ceps y sont espacés dans les deux sens perpendiculaires d'une distance autour de 1.5 mètres. L'autre groupe de modes de conduite actuellement très commun est dénommé *palissé*. Il s'agit de ceps plantés en rangs droits et dont les pampres sont conduits le long d'au moins deux fils de fer dans le sens du rang, produisant ainsi un couvert végétal continu dans le sens du rang. L'écartement entre ces rangs est généralement de 2-2.5 mètres. Actuellement les parcelles en gobelet sont encore relativement nombreuses (autour de 40%) dans la région. Seuls les cépages comme le mourvèdre et la grenache en situation de pente sont encore plantés en gobelet (Boursiquot, 1999). Pas plus de 20 à 30% des parcelles seraient encore vendangées à la main, *i.e.* même les parcelles en gobelet sont parfois vendangées à la machine.

Après ces généralités il faut revenir à la variabilité qui caractérise la région. D'abord on constate la présence de nombreux modes de conduites "intermédiaires". Les ceps de parcelles en gobelet peuvent être plantés de façon à faciliter le passage des engins et notamment afin de permettre la récolte mécanique, dans ces cas les ceps sont plus rapprochés dans un sens et plus écartés dans l'autre. Ainsi le motif spatial se rapproche d'une parcelle palissée. De la même façon on trouve d'anciennes parcelles en gobelet actuellement palissées par l'introduction de la conduite sur fils sans pour autant avoir adapté le motif de plantation des vignes palissées. La géométrie du motif de plantation est également influencée par la combinaison sol-microclimat-cépage. Pour le Midi de la France les recommandations

de densité de plantation varient en fonction de ces facteurs entre 3.500 et 7.000 souches par hectare (Champagnol, 1984).

Peu intéressants du point de vue hydrologique, d'autres paramètres interviennent cependant dans l'aspect du couvert végétal de la vigne et à travers cela dans notre étude. En fonction des objectifs de production la végétation peut être plus ou moins bien entretenue et donc être plus ou moins régulière. Aussi peut-il y avoir des ceps manquants ou moins vigoureux augmentant cette irrégularité. Il y a également le "sous-type" de mode de conduite qui intervient, souvent en fonction du cépage. Dans les parcelles en gobelet on rencontre les cépages à port dressé, taillés plus ou moins courts, mais aussi de "nouveaux" cépages (syrah, cabernet, merlot, chardonnay) à port naturel retombant avec souvent une taille longue préconisée. Le contour de la projection au sol du couvert de ce dernier est souvent plus irrégulière. Dans les parcelles palissées - seul le *palissage plan* (Champagnol, 1984) est pratiqué - les ceps sont conduits en royat double, guyot ou guyot double (Goma-Fortin *et al.*, 1998) et la hauteur du palissage varie de 1.20 à 1.80 mètres (Boursiquot, 1999). Ceci a des conséquences au niveau de la morphologie du couvert et de la taille de l'ombre portée. En dernier lieu on remarque qu'en Méditerranée, beaucoup plus qu'ailleurs, on laisse la vigne exprimer sa vigueur - optimale sous ce climat - car un rognage trop sévère ne fait que stimuler la croissance et risque de trop exposer les grappes au soleil (risque de brûlures, (Boursiquot, 1999). Encore une fois, l'irrégularité du couvert s'en retrouve augmentée.

3.1.2.2 *Les exploitants viticoles et les objectifs de production*

Parmi les cinq communes principales de la vallée (Pézenas, Roujan, Alignan du Vent, Neffiès et Caux, figure 3.1 et annexe 1A) on compte quatre caves coopératives (celles de Pézenas et de Caux ayant fusionné). Chaque coopérative a sa propre politique et ses objectifs ce qui s'exprime sur le terrain. Les viticulteurs appartenant à la coopérative de Pézenas/Caux ont le plus de terroirs classés en AOC (Appellation d'Origine Contrôlée). On y exploite de plus en plus cette possibilité de production haut de gamme (Argillier, 1991) par des efforts d'encépagement et de choix de modes de conduites adaptés (réduction de production). Ailleurs on produit généralement du vin de pays ce qui peut localement faire diminuer l'intensité du soin consacré à la vigne. Il semble que la cave d'Alignan soit plus dynamique que les deux autres (Tondu, 1998), ce qui se traduit sur le terrain par un soin plus intensif, régulier et homogène des parcelles. Le palissage y est préconisé. La coopérative de Neffiès au contraire favorise le gobelet et la vendange manuelle.

Sur la plaine alluviale et les terrasses du Pléistocène de la vallée on rencontre plusieurs domaines particuliers. Ici les parcelles sont généralement de taille beaucoup plus grande que la moyenne et le gobelet y est absent.

3.1.2.3 *L'itinéraire technique – l'entretien du sol*

Si nous reprenons notre vol au dessus de la plaine côtière, on est frappé par une troisième particularité. Après l'aspect morcelé du milieu et la grande variété des modes de conduites, c'est la variation des pratiques culturales formant un patchwork aux apparences quasi-aléatoires qui saute à l'œil, car elle se traduit par un très grand nombre d'états de surface contrastés que l'on peut rencontrer à courte distance dans le temps et dans l'espace. Vu qu'il s'agit ici de l'objet même de cette étude il faut détailler au mieux cette variabilité et les grandes lignes que l'on peut quand même y discerner.

Chaque viticulteur choisit son propre itinéraire technique, bien sûr en fonction des caractéristiques de la parcelle, de son sol et de la météorologie, du cépage, mais aussi en fonction de la main d'œuvre disponible, du matériel dont il peut disposer et de sa propre conviction. Il en résulte plusieurs points concernant le travail du sol et la fertilisation.

⇒ *le travail du sol*

Pratiquement toute implantation d'une nouvelle parcelle de vigne, ou nouvel encépagement après arrachage, est précédée par un défoncement au *ripper* (à 1 dent, figure 3.3), notamment dans des substrats *a priori* peu favorables à la vigne (Argillier, 1991). Après implantation, autour de 40% des parcelles (moins en pourcentage de surface) ne subissent aucun labour, mais sont plus ou moins intensivement désherbées chimiquement. Il s'agit surtout des petites parcelles et celles en forte pente. Sur ces parcelles, les cailloux, lorsqu'ils sont présents, sont très visibles car jamais enfouis et enrichis par départ des particules fines. Toutes les grandes et moyennes parcelles sont labourées (Boursiquot, 1999). Les méthodes d'entretien du sol ont fortement évolué dans les années quatre-vingts (Heinzle, 1995). Ainsi les labours traditionnels : buttage, débottage et décavaillonnage sont abandonnés par beaucoup de viticulteurs au profit de façons superficielles et de l'utilisation des herbicides chimiques. Ces deux techniques peuvent d'ailleurs être, soit combinées dans le temps, soit associées dans l'espace. Dans les vignes à écartement supérieur à 1.50 mètres, le désherbage chimique est souvent localisé sous le rang, le centre de l'interligne étant entretenu par façons superficielles ou faisant l'objet plus rarement d'un enherbement permanent ou temporaire. On note deux désavantages des façons aratoires classiques par rapport aux herbicides chimiques : la lenteur et la difficulté de travail de la ligne des souches. De plus, l'absence de façons aratoires augmente la portance des sols et rend plus commodes les interventions phytosanitaires urgentes et la récolte mécanique.



Figure 3.3 Arrachage et défoncement du sol au *ripper* (plateau Pliocène, Caux).

Pour le labour on emploie surtout des dents (Boursiquot, 1999). Là où il n'y a pas de cailloux l'utilisation du rotovator est un peu plus fréquente. La distinction entre les deux est importante car ce dernier pulvérise en grande partie les mottes de terre. La rugosité s'en retrouve donc fortement réduite. D'autres outils comme la charrue (labour plus profond) et la houe rotative (autour des pieds) ne sont guère utilisés dans le midi de la France (Vernet, 1998).

Certains interrangs peuvent être écartés du labour, souvent afin de permettre le passage des engins. Le nombre d'interrangs travaillés entre deux interrangs non travaillés dépend souvent de l'appareil de traitement (fumigation contre des maladies). On note d'ailleurs que le passage des engins dans des parcelles ayant subi un labour a un fort effet sur l'aspect du sol.

Il n'existe pas de calendrier de périodes précises, mais généralement les parcelles sont labourées trois fois dans l'année : en automne, au printemps (après le risque de gelée) et en début d'été. Aucun labour

est donc effectué de mi-juillet à mi-octobre, et de décembre à février. La date précise est souvent fonction de la pluie et en automne on donne la priorité à la taille (Boursiquot, 1999). Louchart *et al.* (1997) constatent, après enquête, que ces recommandations ne sont pas toujours très strictement suivies. Il en résulte un fort étalement des labours au cours de l'année (tableau 3.1).

L'engazonnement de vignes, absent dans la vallée de la Peyne, est pour l'instant quasiment inexistant dans la région, à l'exception de quelques exemples dans les grandes plaines humides. Il n'y est souvent employé qu'un rang sur deux (Goma-Fortin *et al.*, 1998). Par contre l'enherbement naturel des vignes en septembre, octobre et novembre, préconisé par la Chambre d'Agriculture (Argillier, 1999), semble de plus en plus pratiqué.

⇒ *la fertilisation*

On trouve localement des fertilisations organiques (fumure, compost), mais la fertilisation est surtout minérale. Souvent on utilise une dent injecteur pour introduire la matière à une profondeur de 15-20 cm dans le sol au milieu du rang (Boursiquot, 1999). Si l'écartement est important, il est préférable d'en introduire de chaque côté de l'interrang (c'est pourtant peu employé). La fertilisation se fait pendant le repos végétatif, surtout en fin d'hiver.

L'irrigation est officiellement interdite en France pour les appellations. Même dans les zones à vin de pays ou vin de table, l'irrigation n'est guère pratiquée. On l'a rencontré sur quelques parcelles de domaines particuliers dans la vallée de la Peyne.

	Oct	Nov.	Déc.	Jan	Fév	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aou.	Sep.
T E V	arrachage-plantation											
		taille										
		palissage-piquetage-remplacement de ceps							ébourgeonnage			
									pré-taille			
T E S	labour - décompactage - travail du rang											
				broyage des sarments								
						désherbage chimique						
F					fumure							
P C								soufrage - sulfatage				
								autres traitements phytosanitaires				
V											vendanges	
	Oct	Nov.	Déc.	Jan	Fév	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aou.	Sep.

Tableau 3.1 Calendrier culturel typique de la vigne sur le bassin versant de Roujan (d'après Louchart *et al.*, 1997). TEV : le travail et l'entretien de la vigne ; TES : le travail et l'entretien du sol ; F : la fertilisation ; PC : la protection de la vigne ; V : les vendanges.

3.1.2.4 L'itinéraire technique – l'entretien de la culture

On traite ici brièvement d'un certain nombre d'aspects de la pratique culturale concernant les ceps, susceptibles d'intervenir également sur l'état de surface des sols. Il s'agit notamment d'interventions mécaniques. Cette petite énumération illustre la complexité actuelle des pratiques culturales en viticulture.

⇒ *les opérations en vert*

Les cépages palissés à port retombant sont *relevés* au moment de la floraison, ce qui se traduit par une diminution du couvert végétal. Le rognage, justifié physiologiquement et nécessaire pour assurer le passage des matériels, est mécanisé depuis longtemps. La pratique de ces rognages est très irrégulière. Relevage, palissage et effeuillage font l'objet de tentatives de mécanisation mais restent encore manuels.

⇒ *les traitements phytosanitaires*

La mécanisation des traitements pour protéger la vigne contre différentes maladies a fait l'objet de nombreuses innovations. Les passages d'engins dans la parcelle pour ces traitements sont nombreux au cours de la saison végétative.

⇒ *la récolte*

En France, la technique de la récolte intégrale mécanisée s'est imposée rapidement depuis 1970, avec pour justification essentielle la réduction des coûts de production. Le travail est réalisé par un secouage latéral des ceps. Sa qualité est fonction du cépage, de la préparation de la parcelle et des réglages adoptés par l'opérateur. Toutefois, le facteur cépage demeure le plus important, l'aptitude des différents cépages à fournir une vendange de qualité avec le secouage latéral est très variable.

⇒ *la taille*

Les pré-tailleuses sont utilisées depuis les années soixante dans les vignes en gobelet pour assurer une approche plus rapide de la souche (Heinzle, 1995). Plus récemment de tels systèmes sont utilisés dans les vignes palissées. La gestion des bois de taille s'est également mécanisée avec le broyage. A part les aspects de mécanisation, le moment auquel intervient la taille est également important dans le cadre de notre étude car les sarments taillés deviennent partie intégrante de l'état de surface. En fonction du cépage et du microclimat (risque de gel) ce moment varie de novembre à mars.

En dernier lieu il est important pour tout suivi de la vigne par télédétection, de mentionner quelques informations concernant la chute des feuilles en automne, qui vont influencer la radiométrie de la vigne :

- l'emploi de la machine à vendanger accélère la chute des feuilles et provoque donc un décalage avec les vignes vendangées à la main ;
- le traitement contre le mildiou après vendange pour favoriser l'accumulation de réserves dans la plante a pour effet que les feuilles restent vertes à peu près un mois de plus que les autres qui sont toutes attaquées par le mildiou ;
- différentes maladies peuvent provoquer un rougissement en automne (p. ex. flavescence dorée) ;
- chaque cépage se décolore à sa façon. L'Alicante-Bouschet a par exemple un jus coloré et donne aussi des feuilles rouges. Les cépages à raisin blanc jaunissent et ceux à raisin noirs donnent un teint rougeâtre ;
- la première gelée d'automne fait tomber les feuilles, généralement 8 à 10 jours après, sauf s'il y a eu beaucoup de vent et de pluie.

Il résulte de ces observations qu'entre le début du mois d'octobre et la fin du mois de novembre, la radiométrie du couvert végétal de la vigne, ainsi que son recouvrement, varient fortement de parcelle en parcelle.

3.1.3 Sites sélectionnés

Il serait intéressant de pouvoir appliquer l'observation par télédétection réalisée dans le cadre de ce travail à toute la zone d'étude. Comme expliqué ci-dessous, ceci n'a cependant pas été notre priorité vis à vis de nos objectifs et pose également des problèmes d'ordre logistique :

- ⇒ l'obligation d'acquérir une vérité terrain au sol, limite la taille de la zone qui puisse raisonnablement être couverte : la vallée de la Peyne compte environ 70 km², ce qui est trop si l'on considère que la taille des parcelles (0.05 à 3 ha) donne une densité de parcellaire de bien plus de 100 parcelles/km², *i.e.* la zone observable par une personne par jour ;
- ⇒ il semblait préférable de limiter l'énergie consacrée à l'acquisition et au prétraitement des données et à leur perfectionnement (en vue de les rendre réellement opérationnels), au profit du temps disponible pour l'analyse du potentiel de l'information acquise ;
- ⇒ il est considéré préférable de disposer de plusieurs prises de vue au cours du temps, au lieu d'une couverture complète de toute la zone. Ceci était souhaitable du point de vue thématique (mise en évidence des changements) et technique (validation des méthodes mises au point) ;

Pour notre étude nous avons donc choisi de ne pas suivre l'ensemble de la vallée par télédétection, mais au contraire de se servir de quelques sous-ensembles de parcelles. En "résumant" en quelque sorte la variabilité dans la vallée par quelques sites bien choisis, on obtenait la possibilité d'acquérir et traiter plusieurs prises de vue au cours du temps.

Quatre sites d'une superficie avoisinant 1 km² chacun ont été choisis (annexes 1A et 1D). Nous les avons considérés représentatifs de la plaine côtière, et couvrant la plupart de la variabilité dans la vallée de la Peyne aux niveaux pédologique, géologique, morphologique, cultural et administratif. Ces quatre sites sont :

1. **Roujan/Alignan** (213 parcelles, 1.4km²), dénommé ensuite *Roujan-Al.* : ce site comprend le bassin versant de Roujan dont la dépression est constituée par des sols marneux sur molasse (unité 65), qui couvrent les plaines de la moyenne vallée de la Peyne. Ses versants en terrasses sont constitués de sols peu profonds sur molasse à calcaire gréseux dur. Les dépôts du Pliocène recouvrent les bordures du bassin. Ce bassin est le site sur lequel la typologie des états de surface a été établie. Il sera le premier site test de la modélisation hydrologique distribuée en cours de réalisation à l'UMR Sol et Environnement ENSA.M-INRA. La télédétection de ses états de surface, élément intégrée de cette modélisation, s'impose donc. Une extension du site sur la commune d'Alignan-du-Vent a été décidée afin que les dépôts caillouteux du Pliocène soient mieux représentés. En même temps ceci nous permet d'inclure d'autres pratiques culturales et des conduites de vignes du fait de l'adhésion des viticulteurs à la cave d'Alignan (plus à jour au niveau technique et cultural, voir § 3.1.2.2) ;
2. **Sud de Neffiès** (113 parcelles, 0.7 km²), dénommé ensuite *Neffiès* : la totalité de ce site est située sur des sols calcaires sur marnes (unité 65), déjà présents dans le site précédent, et constituant l'unité principale de la vallée. On peut également s'attendre à une influence par colluvionnement provenant des collines toutes proches. Du point de vue administratif, la zone se distingue car elle est classée en AOC, avec des parcelles appartenant à de petits viticulteurs particuliers et à des adhérents de la cave coopérative de Neffiès. Du point de vue cultural on y trouve plus de vignes de qualité et on rencontre plus fréquemment la conduite en gobelet ;

3. **Caux/Peyne** (97 parcelles, 0.9km²), dénommé ensuite *Caux* : ce site est constitué d'un plateau Pliocène complexe, d'une pente colluviale et d'une ancienne terrasse de la Peyne. Le plateau est retenu car appartenant aux viticulteurs de la cave coopérative de Caux-Pézenas, pour ses sols calciques, rougeâtres et caillouteux, et pour leur complexité, ce qui permet également la comparaison avec la même unité de l'autre côté de la vallée (Alignan-du-Vent). La pente est incluse pour l'évaluation de la robustesse des méthodes de reconnaissance d'états de surface en pente. La terrasse a quant à elle été choisie pour ses sols bruns alluviaux et la présence de domaines particuliers.
4. **Pézenas** (31 parcelles, 0.8km²) : situé dans la plaine alluviale ce site est composé de sols alluviaux peu évolués. Les aspects particuliers justifiant son choix sont la présence de grandes parcelles et leur appartenance à des domaines particuliers.

3.2 Matériel et données

Ce paragraphe comprend la description de l'ensemble du dispositif expérimental tel qu'il a été mis au point pour cette étude, à partir du choix du support photographique et des conditions de prise de vue, jusqu'au calage des données numériques. L'évaluation des résultats obtenus par les méthodes d'analyse, développées au cours de cette étude, montrera l'influence de nos choix, pris en fonction de ce que nous espérons obtenir. Le choix d'une autre approche fournissant le même type d'information que le dispositif décrit ne remettrait nullement en cause la validité de ces méthodes. Notre travail est à ce niveau ouvert à toute proposition d'alternatives, pourvu qu'elle remplisse l'impératif de légèreté.

3.2.1 Prises de vue

3.2.1.1 le dispositif de prise de vue

⇒ *capteur et vecteur*

Dans le paragraphe 2.4 nous avons commenté notre choix de vecteur (l'hélicoptère) et de capteur (photographies sur pellicule à émulsion argentique). Dans cette phase exploratoire nous n'avons pas fait appel à des sous-traitants disposant d'un dispositif professionnel de prises de vue aérienne. Ce choix est également motivé par la recherche d'un maximum de légèreté : le fait de tout faire nous-mêmes permet (1) une bonne maîtrise des conditions de prise de vue et de sa localisation, (2) une grande flexibilité et rapidité de réalisation de prises de vue et (3) une réduction des coûts.

Les prises de vue ont été réalisées à l'aide d'un appareil photographique reflex standard (24×36mm), le Canon EOS 500, suspendu en dehors du vecteur à un cadre tenu à la main (figure 3.4). Ce cadre métallique est équipé d'un niveau à bulle et des déclencheurs, permettant des prises de vue orthogonales par déclenchement à distance. Le boîtier photographique est équipé d'une optique de distance focale $f = 35\text{mm}$ (diamètre de 58mm).



Figure 3.4 Le dispositif des prises de vue sur pellicule argentique.

Il est important d'éviter l'influence des vibrations provenant du vecteur (même si elles sont en grande partie absorbées par l'opérateur et le cadre) et du vent. Ceci exige un temps de pose relativement rapide, aux dépens de la profondeur de champ. Nous avons choisi d'effectuer les prises de vue avec un temps de pose de 1/250s. Les conditions ensoleillées au moment de la prise de vue permettent dans ce cas, pour la sensibilité du support photographique retenu, des ouvertures de diaphragme allant de 6.7 à 11 (choisies en temps réel à l'aide d'un posemètre). En acceptant un diamètre de confusion de 1/100e de millimètre, qui est cohérent avec la résolution de numérisation qui sera utilisée ultérieurement, l'optique utilisée (focale 35mm) à ces ouvertures autorise une distance hyperfocale variant de 11 à 18m, au-delà de laquelle tout objet sera net si la mise au point est faite à l'infini. Nos photos prises à une altitude bien supérieure avec ces réglages, devraient donc de ce point de vue avoir les propriétés de netteté requises. Les déformations inhérentes à l'optique utilisée ont été vérifiées en photographiant une grille carrée. Elles sont négligeables.

Le vecteur retenu est un hélicoptère biplace, type Hughes 300, tripale ayant une bonne stabilité. En supprimant la porte droite, l'opérateur guide le pilote visuellement selon un plan de vol préétabli. L'altitude de la prise de vue constitue un compromis entre le champ géographique à couvrir et la résolution spatiale attendue du fait du pouvoir de résolution du support photographique et du scanner. Nous avons choisi d'effectuer toutes les prises de vue autour d'une altitude de 1100m, afin d'obtenir une résolution spatiale d'autour de 0.25m. Le champ géographique à cette altitude et résolution, couvert par une seule photographie est approximativement 700 par 1000m. Théoriquement, ceci permet de couvrir chaque site entièrement par 2 ou 3 clichés, ce qui présente une charge acceptable de travail de prétraitement. Il s'est trouvé que deux heures suffisent largement pour l'aller-retour à la vallée de la Peyne et la prise de vue des quatre sites. À un coût de 2500 F de l'heure, ceci revient à quelques 5000 F par prise de vue.

⇒ *le support photographique*

Les caractéristiques de la seule pellicule fausse couleur (vert, rouge, proche infrarouge) disponible sur la marché pour notre type de capteur (KODAK Ektachrome EIR) se sont avérées inadaptées aux besoins d'une étude scientifique, rendant cette pellicule inexploitable pour nous : il s'agit d'une pellicule avec un contraste très élevé, ce qui dans notre cas provoquait structurellement la saturation d'une partie de nos clichés où les valeurs numériques deviennent donc non interprétables. Ce contraste élevé avait également pour effet de rendre le choix d'un réglage adapté très délicat. Nous avons donc opté pour la pellicule FUJICHROME PROVIA 100 PROFESSIONNEL RDP II, qui est un film lumière du jour de sensibilité nominale 100 ISO. La figure 3.5 montre les caractéristiques sensitométriques de ce film. A droite on voit que les trois couches de l'émulsion sont sensibles à des portions du spectre électromagnétique de différentes largeurs. Pour les couches du rouge et du vert cet

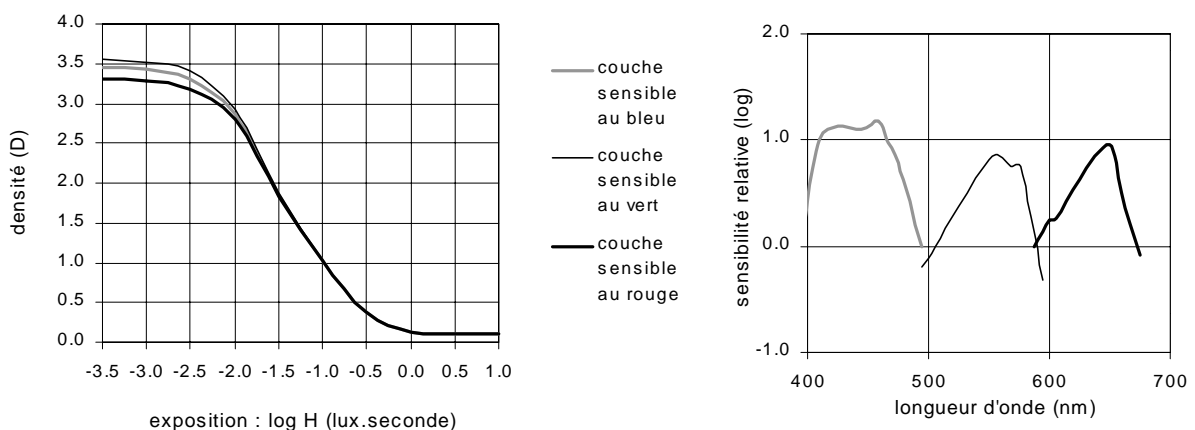


Figure 3.5 Caractéristiques de l'émulsion utilisée. Gauche : courbes caractéristiques ; droite : courbes de sensibilité spectrale (la sensibilité égale l'inverse de l'exposition exprimée en ergs/cm²). D'après la documentation technique FUJI.

intervalle est d'environ 30nm. Dans le diagramme $D\text{-log}H$, H est la pose ou l'illumination, c'est l'énergie incidente sur un point de la pellicule, directement liée à la réflectance de l'objet projeté en ce point. D est la densité, c.-à-d. le logarithme de l'opacité du film. Ces courbes fournissent les caractéristiques de réponse d'une pellicule. On peut en extraire la gamme de densités qu'un film peut fournir, le contraste d'un film, la vitesse ou la sensibilité d'un film, la latitude de pose et la résolution radiométrique (Lillesand & Kiefer, 1994). Notons ici surtout la bifurcation de la courbe aux énergies incidentes basses, qui avantage le rouge. Les courbes de sensibilité spectrale montrent une différence significative entre la sensibilité dans le bleu, par rapport au vert et au rouge du film. Cette spécificité de chaque couche doit être prise en compte par un calage radiométrique par couche. Comparé à d'autres pellicules, notamment la pellicule fausse couleur, le contraste du film – la pente de la section droite de la courbe caractéristique – n'est pas très élevé. Ceci évite une saturation dans une situation de fort contraste telle que la notre (caractérisée par de fortes variations en intensité entre des surfaces brillantes au soleil et des surfaces sombres à l'ombre). Il devient cependant important de numériser ces informations avec un maximum de contraste, afin de ne pas perdre des informations contenues dans les faibles variations de la réponse à l'exposition du support argentique.

⇒ *la numérisation des données*

Les photographies ont été numérisées sur un scanner de diapositives Nikon LS-1000, sans correction de gamma et avec une résolution de 2700dpi, ce qui s'approche du pouvoir de résolution de la pellicule. L'information contenue dans les trois couches de l'émulsion argentique est codée par cette procédure en trois 'canaux' numériques à 8 bits chacun. 8 bits, *i.e.* 256 valeurs, n'est pas excessif pour exprimer toute la variation radiométrique dans une bande donnée pour tout un cliché, et risque de compromettre la détection de variations subtiles. Pour remédier à cela nous avons adopté une procédure de réglage du contraste de numérisation, afin de maximiser le contraste dans la gamme de radiométries qui nous intéressent : pour chaque prise de vue et chaque réglage de l'appareil (diaphragme), nous appliquons une transformation linéaire des données analogiques vers les données numériques en fonction du contraste dans les images. La pente de cette droite est établie à l'aide des surfaces du sol les plus brillantes, repérées à l'œil, sans s'intéresser à d'autres surfaces comme par exemple des toitures. D'autres objets peuvent ainsi se retrouver saturés (ex. voiture blanche).

3.2.1.2 les différentes prises de vue

Prise de vue	Date	Heure locale de passage et nombre de photographies sélectionnées par site			
		Roujan-Al.	Neffiès	Caux	Pézenas
1	29-05-1998	13h20 - 8	13h10 - 5	13h35 - 7	13h45 - 6
2	29-06-1998	13h30 - 4	-	-	13h40 - 4
3	01-02-1999	12h40 - 5	12h30 - 2	12h50 - 3	13h00 - 4
4	26-05-1999	13h30 - 6	13h45 - 2	13h20 - 3	13h10 - 4

Tableau 3.2 Les prises de vue.

On a effectué des prises de vue à quatre dates (tableau 3.2) dans des conditions météorologiques choisies, comme le permet la légèreté du dispositif : une atmosphère peu humide sous un ciel dégagé. Aux dates indiquées les photographies ont été prises dans une fourchette de temps d'au maximum une heure avant jusqu'au maximum une heure après le midi solaire, ceci afin de minimiser la surface de l'ombre portée. À cause du changement rapide de l'angle azimutal du soleil à cette heure (voir chapitre 6), il s'est avéré important de noter par site l'heure précise de passage. Après développement des pellicules, la zone géographique couverte par chaque cliché est numérisée approximativement à la main et enregistrée dans une base de données géographique. Cela permet ensuite de choisir par site un

nombre minimal de photographies, de telle manière qu'elles couvrent au mieux le site et qu'elles aient été prises avec des réglages identiques (tableau 3.2).

Seules les données appartenant aux trois premières prises de vue ont pu être exploitées dans le cadre de l'étude présentée. Ceci a été considéré comme étant suffisant pour permettre de valider la robustesse des méthodes développées, mais ne permet pas de détecter des changements inter-annuels. Sur ces trois prises de vue, les deux premières se situent en période végétative et la dernière en période hivernale, sans feuilles.

3.2.2 Données non télédéteectées

Les données télédéteectées ne constituent pas la seule entrée à l'étude. Différentes données existantes sont également intégrées et nous avons aussi acquis des informations sur le terrain. Ces données ont servi dans l'étude, soit au prétraitement, soit dans des étapes d'analyse.

⇒ *données exogènes*

Trois ensembles de données numériques étaient disponibles et ont servi dans ce travail :

- pour le géoréférencement, des points de calage, ou *Ground Control Points* (GCP), ont été sélectionnés à l'aide de la base de données topographiques (BD-Topo) de l'IGN. Composée d'un ensemble de couches thématiques (routes, cours d'eau, occupation du sol, etc.), cette base de données a une précision planimétrique attendue de 1 à 2m (IGN, 1997) qui a été validée par ailleurs sur notre terrain ;
- afin d'analyser la partie de l'image correspondant à une parcelle on s'est servi du cadastre (§ 2.5) numérique, qui était disponible parce que numérisé au sein de l'UMR Sol et Environnement. Sa précision est dans notre cas du même ordre de grandeur que celui de la BD-Topo (cadastre dit "régulier"), et calé sur elle. Notons que la DGI (Direction Générale des Impôts) numérise cette année 2000 les planches de tout l'état français, qui sont censées être dans quelques années disponibles et consultables par Internet (SPDG, 1999).
- à l'aide des courbes de niveau contenues dans la base de données topographiques, un modèle numérique d'altitudes (MNA) avec un résolution planimétrique de 10m et une résolution verticale de 1m a été calculé. De ce MNA on a dérivé une cartographie de pentes et de leurs orientations.

⇒ *vérité terrain*

Simultanément aux campagnes de prises de vue, les états de surface ont été observés au sol par une équipe de personnes de l'UMR Sol et Environnement de l'INRA Montpellier (décalage temporel de maximum 1 jour). Le formulaire utilisé à cette fin est reproduit en annexe 2A. Notez qu'on profite du passage sur le terrain pour noter l'état d'autres paramètres d'intérêt hydrologique, que ceux appartenant à l'état de surface tel que défini ici.

Ces informations ont été saisies dans une base de données et rattachées via une clé au cadastre numérique. Cette base de données géographique cadastrale sert de vérité terrain dans l'évaluation des méthodes développées au sein de notre étude.

3.2.3 Étapes du prétraitement

Afin de rendre les données télédéteectées exploitables il faut qu'elles soient géoréférencées, et que leurs valeurs absolues puissent être interprétées (*i.e.* aient une signification physique). Ceci est effectué en deux étapes, communes à toute étude par télédétection : une phase de correction radiométrique, transformant les valeurs brutes enregistrées en une réflectance bidirectionnelle perçue, fonction de la

surface, et une phase de calage géométrique, affectant un jeu de coordonnées géographiques à chaque pixel de l'image. Ces deux phases de prétraitement comprennent quelques particularités, propres à l'approche originale choisie dans notre travail, que l'on discutera ici.

3.2.3.1 calage géométrique

⇒ *la taille de l'élément de résolution*

Préalablement au calage géométrique il faut considérer la question de la résolution géométrique. On cherche à tirer parti au maximum de l'information portée par l'émulsion, tout en cherchant à éviter une interpolation des données brutes. En conséquence la taille de la cellule échantillonnée doit être supérieure ou égale à la taille réelle de l'élément de résolution dans les données brutes. Par le compromis entre (1) la hauteur de vol, (2) le champ géographique couvert et (3) la résolution maximale de numérisation, les données brutes ont une résolution qui correspond à une taille réelle comprise entre 0.20 et 0.25m. Ceci est compatible avec la résolution souhaitée (§ 2.4), mais est-ce que les conditions de prises de vue (vibrations, atmosphère, etc.) permettent une numérisation si fine ? Afin de tester cela, on utilise traditionnellement en photogrammétrie des *cibles test*, posées par terre dans la zone d'étude au moment de la prise de vue. Ces cibles test sont composées de bandes noires et blanches de différents tailles. Dans notre cas ces tailles étaient 1.00 – 0.75 – 0.50 – 0.25 mètres (figure 3.6), et elles ont été utilisées dans la dernière prise de vue. La figure 3.7 montre le résultat de la prise de vue pour le canal vert. Malheureusement l'orientation des cibles n'est pas dans le sens de la matrice. L'échantillonnage carré ne favorise pas la détection de cibles d'une taille égale à l'élément de résolution. De plus la forte saturation du blanc, due au réglage de la prise de vue et la numérisation (§ 3.2.1.1), font apparaître les bandes blanches plus larges que les noires. On estime que le choix pour une taille de l'élément de résolution géoréférencé de 0.25m est justifié, car (1) on trouve dans les conditions données des pixels noirs 'purs' dans les bandes de 0.50m et on discerne vaguement l'alternance clair-sombre pour les bandes de 0.25m. L'influence de l'atmosphère est significative pour le canal bleu (ondes courtes plus sensibles à la diffusion), car l'alternance mentionnée y est invisible.

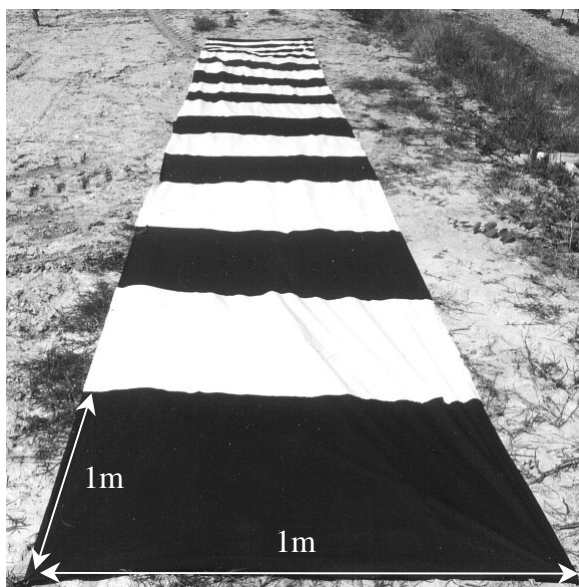


Figure 3.6 Une des deux cibles test.

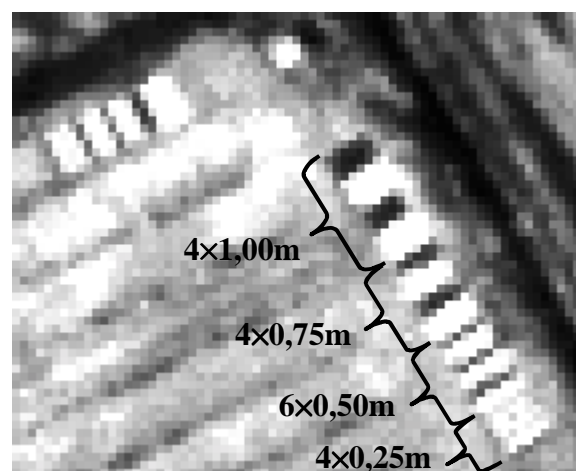


Figure 3.7 Extrait du canal vert de l'image numérique brute (agrandie 4 fois) présentant les cibles test.

⇒ *le géoréférencement*

Chaque image sélectionnée est ensuite corrigée géométriquement pour acquérir des coordonnées géographiques. Une trentaine de GCP ont été sélectionnés par image à l'aide de la base de données topographiques. Quelques procédures ont été développées pour faciliter la sélection de ces points et leur réutilisation dans des images avec une zone commune (Padovan, 2000). Comme la majorité des données cartographiques du sud de la France, la projection cartographique utilisée est le Lambert III (projection conique). Notre dispositif ne permet pas pour l'instant de réaliser de véritables orthorectifications. La méthode de correction retenue passe par une triangulation et la méthode de rééchantillonnage est celle du plus proche voisin, car il importe d'éviter une interpolation dans les données brutes.

⇒ *le mosaïquage*

Les images géoréférencées sont mosaïquées afin de produire une seule image couvrant l'ensemble d'un site donné. Des lignes de coupes sont définies sur les images par numérisation manuelle à l'écran. Les routes ou bords de parcelle guident cette ligne de coupe, car nous préférons que l'information d'une parcelle à une date donnée provienne d'une seule image. Dans un souci de limiter le nombre de clichés composant la mosaïque, nous avons néanmoins parfois accepté de composer l'image d'une – grande – parcelle à l'aide de plus d'un cliché.

3.2.3.2 *calage radiométrique et prise en compte des conditions de vue et d'éclairage*

Pour la correction radiométrique des données brutes on a le choix entre deux approches : (1) se servir d'un modèle de correction atmosphérique (Hill & Sturm, 1991 ; Farrand *et al.*, 1994 ; Leiss *et al.*, 1995 ; Launay *et al.*, 1999) pour transformer la luminance perçue en radiation provenant de la surface de la terre, ou bien (2) établir une droite empirique par canal (Clevers & van Stokkum, 1992 ; Farrand *et al.*, 1994 ; Hill *et al.*, 1994 ; de Jong *et al.*, 1998) à l'aide de mesures radiométriques de terrain (appelées par la suite *Points de contrôle radiométriques*, PCR).

La deuxième option a été retenue, car l'influence de l'atmosphère et sa variation avec l'angle de vue sont considérées faibles dans notre cas vu que la transparence de l'air est plus ou moins maîtrisée par le dispositif et de fait de la faible hauteur de vol. De plus on ne disposait pas des informations météorologiques nécessaires à un bon fonctionnement de modèles de correction.

Un autre aspect qui a gêné l'utilisation de modèles de correction, mais qui intervient également dans l'approche retenue de la correction par droite empirique, est le fait que les valeurs numériques brutes obtenues par le scanner n'ont pas pu être transformées en valeurs de luminance : en effet les caractéristiques de réponse de l'émulsion de la pellicule sont plus ou moins connues, mais celles du CDD (*Charged Coupled Device*, cellule photosensible) du scanner n'ont pas pu être obtenues. Plusieurs tentatives de déduction empirique se sont révélées infructueuses. De plus on ne dispose pas de quantifications exactes des caractéristiques de l'appareil photographique, dont Clevers (1988) montre l'importance pour calculer la luminance, comme l'exposition (temps de pose, diaphragme) et la *transmittance* du système optique. Enfin on ne dispose pas non plus d'une connaissance précise des courbes caractéristiques, qui varient quelque peu de pellicule en pellicule, et qui sont mesurables par des procédures comme décrites par Clevers & van Stokkum (1992).

On s'est donc retrouvé obligé d'établir directement une relation entre les valeurs numériques et la réflectance pour chaque prise de vue. On utilise pour cela une droite empirique. La pratique commune consiste à établir une droite à l'aide de seulement deux points (un sombre et un clair), car le rapport théorique entre la réflectance et la luminance perçue est linéaire. On contourne le problème de la non disponibilité de la luminance en prenant un ensemble relativement important de PCR, étalés sur toute la gamme d'intensités rencontrées, ce qui permet de vérifier la linéarité du rapport pour ensuite

déterminer une droite de régression. Cette pratique de se servir non pas de deux mais d'un ensemble de PCR couvrant une gamme important d'intensités a déjà été conseillée par Farrand *et al.* (1994).

⇒ la prise en compte de la géométrie dans la correction radiométrique

Il est bien connu qu'à part l'atmosphère il y a aussi des aspects géométriques qui influencent la radiométrie perçue d'un objet au sol (Lillesand & Kiefer, 1994). Il s'agit ici d'un côté de facteurs liés au capteur, et de l'autre côté de facteurs liés à la scène (localisation de l'objet, angles azimutaux et zénithaux de vue et d'éclairage).

La perturbation provenant du capteur est désigné par le terme *exposure fall-off*, une baisse de luminosité perçue à cause d'effets de transmittance différentielle et de vignettage. On a pu démontrer que dans notre cas le *fall-off* est négligeable.

L'influence des facteurs géométriques liés à la scène peut être forte, notamment dans l'imagerie obtenue par capteurs aéroportés vu l'ouverture souvent importante de l'optique. Il est étonnant de constater que ces effets ne sont encore que très rarement pris en compte. En ce qui concerne la correction radiométrique, un seul exemple a été rencontré où l'on tente de prendre en compte, ou plutôt de contourner, ce problème (King, 1991). Partout ailleurs on établit des droites empiriques en supposant des perspectives de vue similaires pour tous les pixels (Farrand *et al.*, 1994). La courte distance focale de l'optique que nous avons utilisé ($f = 35\text{mm}$) entraîne une importante variation en angles de vue dans un cliché. Nous ne pouvons donc pas supposer des perspectives de vue similaires pour tous les pixels, ce qui nous oblige à prendre en compte l'aspect bidirectionnel de la réflectance des PCR. Sur 14 différents types de surface horizontale d'intensité variable, le comportement bidirectionnel de la réflectance a été mesuré sur le terrain. Par inversion contre un modèle de BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), dans notre cas celui de Rahman *et al.* (1993-1 ; 1993-2) (voir chapitre 6), leur réflectance peut être prédite pour toute configuration géométrique. Près de 40 PCR ont été sélectionnés pour l'ensemble des sites, chacun correspondant à un des 14 types. La courbe de correction est obtenue en comparant la valeur numérique observée dans un pixel à la valeur de réflectance prédite pour le pixel donné connaissant ses paramètres bidirectionnels obtenus par inversion du modèle et sa géométrie de vue (figure 3.8). La géométrie de vue est quant à elle obtenue par les procédures décrites ci-dessous. La figure 3.8 montre que la prise en compte de la géométrie de vue (diagramme de gauche) entraîne une légère amélioration dans la coefficient de corrélation par bande spectrale (les observations se trouvent quelque peu plus près de la droite) par rapport à la situation sans prise en compte de la géométrie de vue (diagramme de droite). Plus important à noter est l'observation que le coefficient de régression diffère assez fortement entre les deux situations, *i.e.* la non prise en compte de la géométrie de vue entraînerait une erreur d'estimation notable, d'autant plus importante que l'intensité est élevée.

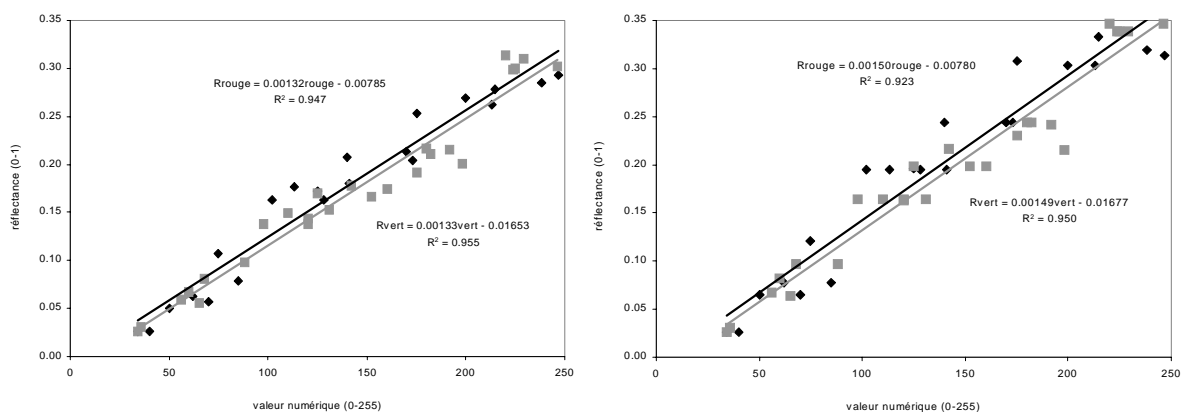


Figure 3.8 Droite empirique de correction radiométrique correspondant à la prise de vue n°1. Gauche : avec prise en compte de la BRDF ; droite : sans prise en compte de la BRDF.

⇒ *les angles de vue et d'éclairage*

L'angle azimutal et zénithal du soleil peuvent être calculés à l'aide de la date, de l'heure, de la latitude et de la longitude. L'étendue angulaire d'une mosaïque d'images est de l'ordre de quelques minutes d'angle, ce qui est négligeable pour nous. Ces angles sont donc considérés constants à travers l'image.

À l'aide de la distance focale il n'est guère difficile d'obtenir l'angle zénithal sous lequel chaque pixel de l'image brute numérisée a été vu. Cette information est obtenue par une procédure automatique sur l'image brute et constitue une nouvelle image aux mêmes dimensions (figure 3.9). Tout comme l'image brute, cette image est géoréférencée. Après géoréférencement, la différence entre l'angle azimutal de vue et d'éclairage est calculée par une autre procédure automatisée. Les deux informations additionnelles sont ensuite mosaïquées comme décrit pour les images brutes géoréférencées. Elles constituent ensemble avec l'angle zénithal du soleil, un vecteur d'informations complémentaires par rapport à la réflectance (figure 3.9). Elles serviront dans différentes étapes de l'étude.

3.2.4 les outils de travail

⇒ *sur le terrain*

L'observation de l'état de surface sur le terrain est purement visuelle et ne fait intervenir aucun matériel. Toute valeur quantitative est une estimation. Quant aux mesures radiométriques qui ont été réalisées dans différents objectifs, elles sont prises avec un radiomètre CIMEL, composé d'une tête d'éclairage (angle d'ouverture 180° , vers le haut) et d'une tête de luminance (angle d'ouverture 12° , vers le bas). Ce radiomètre comprend trois bandes spectrales : vert (0.50-0.59 μm), rouge (0.61-0.68 μm) et proche infrarouge (0.79-0.89 μm , information annexe). Bien que ces bandes verte et rouge aient une sensibilité spectralement plus large que les pics de sensibilité de l'émulsion photographique, on considère leur réponse néanmoins comparable. Cette différence n'a probablement pas d'effet très significatif, et reste de toute façon sans conséquence car l'interprétation quantitative du signal est également basée sur des mesures CIMEL (voir chapitre 6).

Pour les mesures bidirectionnelles, ce radiomètre a été monté sur un cadre métallique (calé dans le plan horizontal !), permettant des inclinaisons zénithales jusqu'à 60° (figure 3.10). Dans ce cas la tête d'éclairage du radiomètre était fixée sur un pied à côté.

Les quelques autres matériels utilisés pour des manipulations spécifiques seront décrits au moment de la présentation de ces manipulations.

⇒ *au laboratoire*

La quasi-totalité du travail (prétraitement, tests et mise au point de procédures d'analyse, inversion de modèle) a été réalisée à l'aide du logiciel ENVI[®] (Research Systems Inc., Boulder, Colorado) et du langage de programmation matriciel IDL[®] sous lequel ENVI fonctionne. Toutes les procédures développées au cours de cette étude sont écrites en IDL et incorporées dans ENVI. Le seul autre outil informatique d'importance dans notre travail est le logiciel SIG Arcview[®] (ESRI, Redlands, California), qui a servi à gérer, combiner et représenter les résultats des analyses par parcelle.

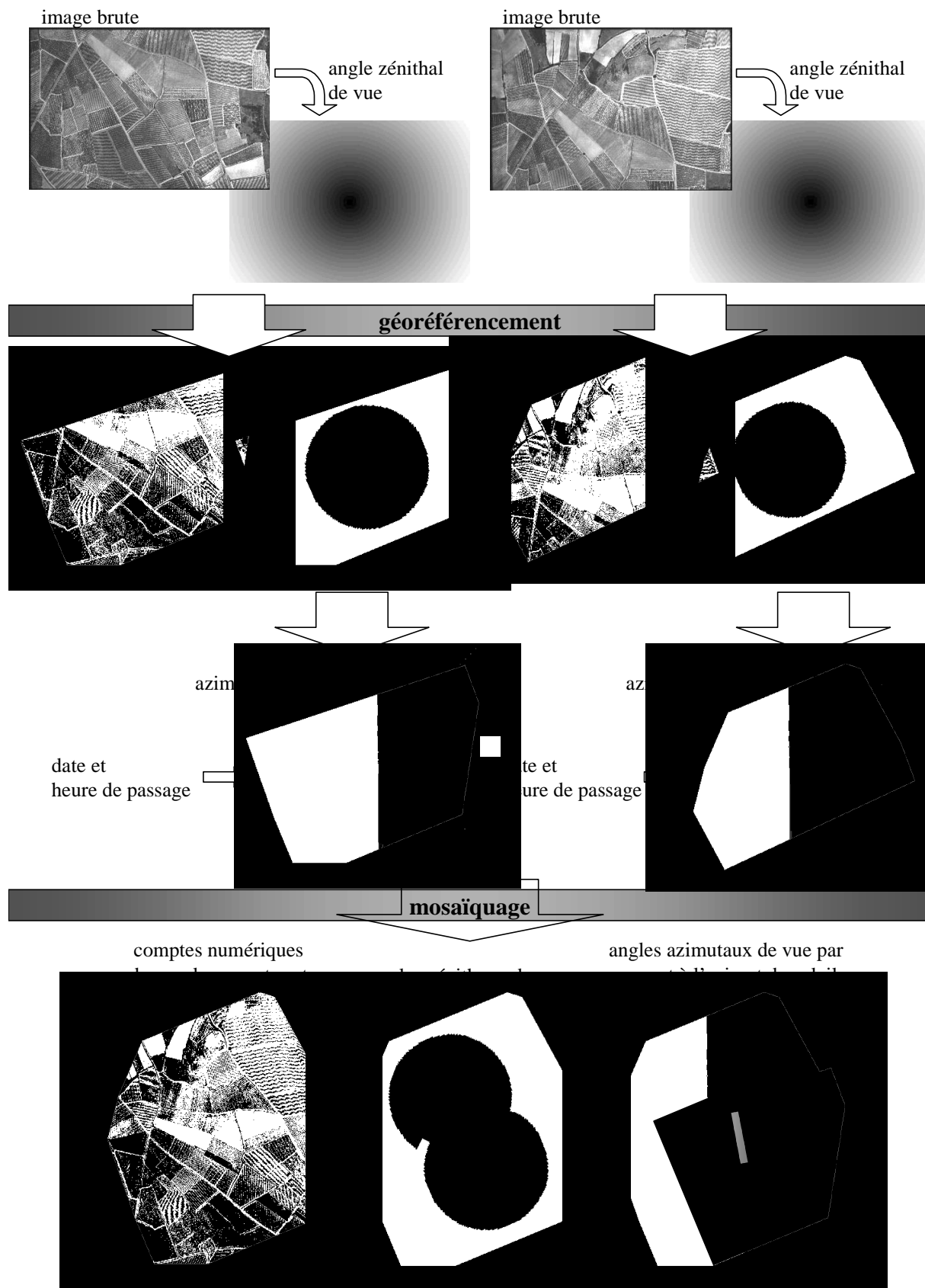


Figure 3.9 Illustration du prétraitement géométrique et des données qui en résultent. Hormis les tâches classiques de sélection de GCPs et de numérisation de la ligne de coupe, toutes les étapes ont été automatisées.



Figure 3.10 Le dispositif de mesures goniométriques. Le support, ici en position verticale, peut être incliné jusqu'à 60°. Les mesures sont effectuées dans le plan du soleil et perpendiculairement au plan du soleil.

3.3 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons décrit le milieu physique et cultural étudié, ce qui nous a permis de sélectionner quatre ensembles de parcelles représentant la variation au sein de ces milieux et qui seront les sites étudiés dans la suite de ce travail. Le dispositif par lequel ces sites sont observés vient d'être décrit et il est démontré qu'il fournit le type de données dont nous attendons qu'il permettra d'obtenir la reconnaissance des variables qui nous intéressent (§ 2.4).

Ce dispositif fait également preuve d'une grande légèreté, ce qui est en accord avec l'importante exigence de flexibilité imposée par notre objectif (§ 1.5 et § 2.5) : il permet une acquisition rapide et répétitive, bien que seules quatre prises de vue aient été réalisées dans le cadre de cette étude exploratoire. Les procédures originales de prétraitement développées devraient *a priori* permettre d'éviter que cette légèreté ait un effet négatif sur la qualité et l'utilité des données fournies. Ces originalités concernent deux aspects principaux : (1) la production d'informations sur la configuration géométrique de vue et d'éclairage, sortes de métadonnées attachées à chaque pixel et décrivant la condition dans laquelle son information a été acquise, ainsi que (2) la prise en compte de la variation bidirectionnelle de la réflectance des points de contrôle radiométriques qui sont à la base de toute correction radiométrique par droite empirique.

Le seul inconvénient de notre dispositif est que la zone géographique couverte par cliché reste relativement restreinte, car cela implique une charge de travail de prétraitement importante au niveau de la correction géométrique et du mosaïquage. Ceci n'a pas d'implications scientifiques pour l'étude

présentée, mais handicape l'opérationnalité de l'approche mise au point. On étudie actuellement la possibilité d'améliorer le dispositif afin de rendre ce prétraitement géométrique plus léger.

Mis à part la correction radiométrique, la sélection de GCPs pour le géoréférencement, et le mosaïquage, qui restent des étapes manuelles, toutes les procédures de prétraitement et d'analyse – à partir des données brutes numérisées jusqu'aux résultats finaux – ont été automatisées.

Connaissant nos objectifs, le milieu, les données que nous y avons acquies et leur caractéristiques, nous pouvons à ce stade entrer dans le vif du sujet, *i.e.* analyser ces données en suivant la démarche décrite dans le paragraphe 2.5. Les chapitres suivants représentent les différentes étapes décrites dans ce paragraphe : dans la partie III, *Extraction de la fraction de sol éclairée dans les vignobles*, les chapitres 4 et 5 décrivent respectivement comment nous avons franchi les étapes I et II. Dans la partie IV, *L'analyse de l'état de surface*, les chapitres 6 et 7 concernent l'étape III.

PARTIE III

EXTRACTION DE LA FRACTION DE SOL ÉCLAIRÉE DANS LES VIGNOBLES

4	<i>RECONNAISSANCE DES PARCELLES DE VIGNE</i>	75
4.1	Introduction	76
4.2	Image processing strategy.....	77
4.3	Model description.....	78
4.4	Results and discussion	81
4.5	Conclusion	85
4.6	Validation étendue du modèle	86
5	<i>EXTRACTION DE LA SURFACE DU SOL ÉCLAIRÉE DANS LA PARCELLE</i>	89
5.1	Introduction	90
5.2	Proposed image processing strategy.....	90
5.3	Validation and discussion	97
5.4	Conclusion	99
5.5	L'application aux prises de vue réalisées hors saison végétative.....	100

4 Reconnaissance des parcelles de vigne

Ce chapitre concerne la première étape de l'étude comme cela avait été annoncé dans la description de la démarche (§ 2.5) et illustré par la figure 2.8 : on cherche à distinguer les parcelles en vigne des parcelles en friche ou à culture continue. Le sujet présenté a fait l'objet d'une publication dont sont présentés ci-dessous titre, auteurs et résumé. Cette publication a été acceptée sous condition de quelques modifications en novembre 2000 par *International Journal of Remote Sensing*. La version finale, soumise en janvier 2001, constitue le corps de ce chapitre, où elle est présentée sous sa forme originale, en langue anglaise. Des aspects déjà discutés dans les chapitres précédents, comme l'état de l'art, les sites d'étude et le matériel employé, ont cependant été supprimés et remplacés par une introduction reliant ce travail à l'ensemble de la thèse. A la fin un complément (§ 4.6) a été rajouté, montrant la validation du modèle sur des jeux de données qui n'étaient pas encore disponibles au moment de la première soumission de l'article.

Vineyard identification and description of spatial crop structure by per-field frequency analysis.

T. Wassenaar¹, J.M. Robbez-Masson¹, P. Andrieux¹, F. Baret²

¹UMR Sol et Environnement, INRA - ENSA, F-34060 Montpellier cedex 2, France

²INRA Bioclimatologie, site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9, France

Abstract

Modelling and predicting the hydrological processes associated to discontinuous, perennial crop growing areas, like the French vine-cultivated Mediterranean region, requires detailed quantitative information on spatial crop structure. A method is developed to provide such information by spatial frequency analysis on very high spatial resolution data. A simple crop geometry model, based on general knowledge and field observations, is applied to the Fourier power spectrum of aerial colour imagery obtained over the La Peyne valley (Hérault, France). This method applied on a per-field basis, using a digital land register map, allows to identify vineyards and characterise their crop spacing, orientation and training mode.

Results show good performances of this procedure under all conditions encountered, *i.e.* very variable soil surface optical properties and spatial structure. Main vineyard training modes, goblet and wire-trained, as well as orchards and continuous crop/fallow fields are well classified. Only non-standard, intermediate vine training modes were not always correctly recognised. Additionally, the frequency analysis provided may be useful to environmental studies. The geometrical accuracy of image warping and minimal field size and width required by the method are discussed.

4.1 Introduction

A la fin du premier chapitre (§ 1.4.3.4) nous avons vu que très peu d'études en télédétection se sont intéressées à la culture de la vigne, et il en est d'ailleurs de même pour les autres cultures pérennes et à couvert discontinu comme l'olivier. En ce qui concerne la reconnaissance de la surface cultivée en vigne, une seule étude s'y est intéressée par une approche quelque peu mécaniste en tirant profit de la spécificité de la structure spatiale de cette culture (Ranchin *et al.*, 2001). L'approche d'analyse suivie par multi-résolution (ondelettes) est intéressante, mais elle a comme désavantage majeur de fournir des résultats très peu satisfaisants pour les vignes conduites en gobelet. Un autre désavantage est que le critère de reconnaissance de la vigne (seuillage empirique sur l'histogramme des coefficients d'ondelette pour détecter des fortes différences entre les résolutions de 1m^2 et celle de 2m^2) est imparfait et peu robuste : la périodicité spatiale de la vigne peut, en fonction de l'échantillonnage, être déjà difficile à détecter à une résolution de 1m^2 ; la différence entre les résolutions peut également être forte pour des cultures autres que la vigne et ce critère n'est pas insensible aux différences d'états de surface entre parcelles. De plus ce critère n'est qu'une étape dans un ensemble relativement complexe comprenant plusieurs phases empiriques et assistées, ce qui compromet sa robustesse et sa légèreté.

Les deux autres tentatives de détection de la vigne étaient basées sur des approches plus empiriques. Trolier *et al.* (1989) arrivent à reconnaître les vignes de l'état de New York par photo-interprétation sur une image Landsat TM à la mi-juillet, ce qui pour nous est une approche incompatible avec nos objectifs : elle n'est pas reproductible ni mécaniste, elle manque d'objectivité, l'acquisition n'est pas assez flexible et légère et la faible résolution spatiale fait que ces données n'ont pas d'intérêt pour la suite de l'étude. Enfin et par une classification statistique, Bugden *et al.* (1999) arrivent à reconnaître une partie des vignes cultivées en gobelet sur des images radar (Radarsat), mais pas celles qui sont palissées.

Nous proposons ici une méthode relativement simple qui vise à reconnaître toutes les parcelles cultivées en vigne, indépendamment de la taille et de la forme de la parcelle, du mode de conduite et des états de surface sous-jacents et de leur éventuelle variabilité à travers la parcelle. En se basant sur la périodicité caractéristique de la culture de la vigne et la localisation connue de chaque parcelle, cette méthode est transposable et est en plus capable de fournir une description quantitative de la structure spatiale d'une parcelle donnée. Ce dernier aspect intéresse l'hydrologue et plus particulièrement le programme ALLEGRO-Roujan, car l'orientation de la structure indique l'orientation de la rugosité périodique et l'écartement des rangs est un possible indicateur de la quantité de produits phytosanitaires appliquée.

Les critères d'écartement des rangs et des ceps, les éléments de base de la structure spatiale, utilisés dans le modèle de reconnaissance, proviennent de la connaissance préalable du vignoble du Languedoc-Roussillon comme décrite dans le chapitre 3 (§ 3.1.2.1) : pour les modes de conduite en gobelet (cylindre, cône inversé et hémisphère), les ceps sont distribués sur une grille régulière avec un espacement carré 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). Les rangs des vignes palissées sont écartés d'une distance régulière, variant suivant les parcelles de 2.0m à 2.5m environ.

Dans les paragraphes suivants nous décrirons la méthode d'analyse d'image mise au point. Nous montrons comment les connaissances préalables de la culture de la vigne – intégrées dans une analyse fréquentielle – permettent de reconnaître les parcelles de vigne et leur mode de conduite.

4.2 Image processing strategy

4.2.1 Requirements to be fulfilled by the method

The objective of the study is to characterise the spatial pattern of fields, which provides a way to discriminate vineyards from other crops. The technique is therefore based on the assumption that the training mode and its geometrical features are nearly constant within a field. Observations show that this assumption is generally well verified. To be able to identify the spatial features, the images offering the highest contrast between soil and vegetation have to be selected. The image processing approach will require:

1. for each field a unique or homogeneous result should be provided, allowing for classification as well as measuring of the spatial structure;
2. contrast invariance is required for a robust method, *i.e.* providing result independent of the underlying soil surface condition between and within fields, time of observation and geometrical position of the field in the image;
3. the feature extractor will have to be rotation invariant, but capable to capture the directional information;
4. scale has to be preserved, to be able to discriminate different structures on the basis of their known geometry, as well as to transform resulting pixel based parameters into distance;
5. shift invariance is required for the result not to be dependent upon the position of the structure with respect to the operator.

4.2.2 Selected approach

The red channel (from about 630 to 650nm for the film used) provides the best contrast between vine and soil surface (low reflectance of vegetation and high for mineral soil). Even if the soil surface is covered by grasses or residues of vine shoots, the surface signal remains higher due to a large portion of shadow contained in vine vegetation pixels.

A wide variety of mathematical approaches exist to analyse local spatial patterns: morphology analysis, edge analysis and frequency analysis. The first two groups are however of limited use, because they impose identification of the object (vine) before analysing its shape and spacing. Vine segmentation is difficult because of the variation in reflectance and spatial structure of the substrate. It is found that methods allowing for such a segmentation in vineyards provide erroneous results elsewhere, thereby prohibiting for their use as input in vineyard identification analysis. Moreover it is difficult to find texture descriptors that comply with the contrast invariance requirement. Further, the approach would have to be empirically tuned, and still problems would occur if for example lines in the image representing the vine rows are broken due to missing (groups of) plants in not well managed vineyards.

Image texture analysis by its spatial frequency distribution, offers a wide choice of texture descriptors. Haralick *et al.* (1973) et Haralick (1979) introduced the grey-level spatial dependency (co-occurrence) matrix. In practice, this method (and other general purpose algorithms) is neither straightforward to apply nor interpret, e.g., the data must be quantized to very few grey levels (Campbell & Murtagh, 1998). The method could be of interest for distinction between continuous and discontinuous crops, but information on the crop pattern's orientation would have to be provided as input. A more serious problem is the lack of rotation-invariance.

Structural approaches (Haralick, 1979) like steerable filters (Freeman & Adelson, 1991) or filter banks (for example image pyramids, see; Heeger & Bergen, 1995 ; Karasaridis & Simoncelli, 1996) allow to separate grid (goblet) and line (wire-trained) patterns. These approaches however do not comply with the rotation invariance requirement and where scale invariant they do not allow for a quantitative measurement of spacing and orientation. Moreover distinction of the two main patterns cannot be based on our actual knowledge, but has to be derived from a similarity measure (Rubner & Tomasi, 1998).

Back to the statistical approaches, Maurer (1974) already obtained encouraging results classifying crops from low-altitude colour photography on the basis of a one-dimensional Fourier series applied to the direction orthogonal to the rows. Thereafter it was found that directional textures tend to have peaks in the two-dimensional power spectrum as a function of angle. Since two decades however, its role as a feature extractor in remote sensing is taken over by wavelet analysis (Meyer, 1992 ; Laine & Fan, 1993 ; Mallat, 1998 ; Starck *et al.*, 1998), mainly because wavelets are localised in frequency as well as space, whereas Fourier analysis is not local in space (Starck *et al.*, 1998). On the contrary, Fourier analysis is unique, whereas wavelet analysis is not: there are many possible sets of wavelets which one can choose. But more important is that our knowledge-based criteria cannot be used in a wavelet based feature extractor.

Periodic phenomena are better handled with the Fourier transform (Graps, 1995), but Fourier analysis is based on global information which is not adequate for the study of compact or local patterns. This is why Gabor (1946) introduced a local Fourier analysis, taking into account a sliding Gaussian window. This idea has recently been elaborated for use in industrial computer vision (Campbell & Murtagh, 1998).

At the same time per-field analysis is more and more used in remote sensing studies (Mason *et al.*, 1988 ; Smith *et al.*, 1997) because of the development of GIS (Hinton, 1996 ; Wilkinson, 1996). The combination of local Fourier transform and per-field analysis appears to provide a pertinent solution to our problem. The Fourier power spectrum of each field has to be exploited using the knowledge based analysis to characterise each field's planting pattern, spacing and orientation.

4.3 Model description

The model is schematically represented by a flow chart (figure 4.1). The parameter settings used by the model are commented below for each step of the procedure.

4.3.1 Field data extraction

Vector polygons representing the field limits need to be buffered for two reasons. First, field borders are not planted and so do not contain useful information. Where drainage ditches and machine tracks are present, the border may be up to three or four meters wide. Between field roads are represented by a line in the vector layer and so their representation in the image is included within the field borders. Second, the accuracy of the georeferencing has been evaluated to be about three meters on average with a considerable variation. To be sure not to include information from neighbouring fields, minimise the border information, while maintaining enough information for the smaller fields, a buffering of 7.5m was applied.

As the spatial context of the data needs to be preserved, the extracted pixels of a field are stored in a temporary matrix that constitutes an envelop of the field. The edge effect due to the non field pixels

around the extracted image sample may in some cases induce false frequency peaks, causing homogeneous fields to be labelled as vineyard. This is avoided by setting these portions of the envelop to the mean grey level value of the extracted sample.

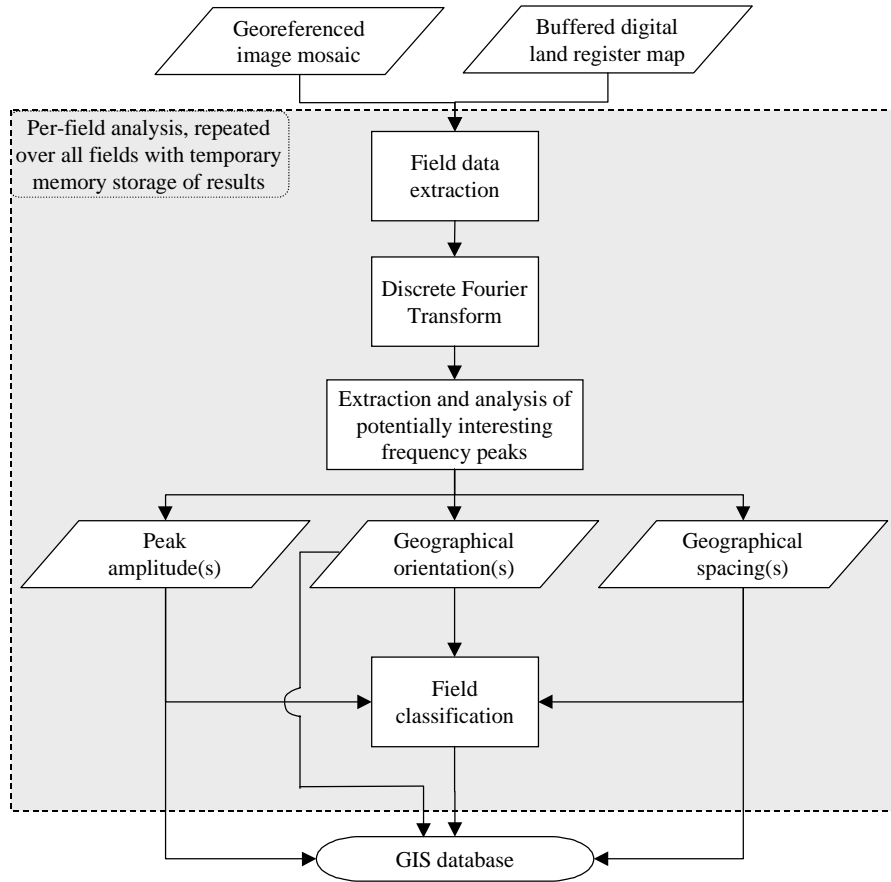


Figure 4.1 Flow chart showing the different procedure steps.

4.3.2 FFT

This matrix is then submitted to a discrete Fourier Transform, the Fast Fourier Transform (FFT) (Niblack, 1986 ; Campbell & Murtagh, 1998). The resulting power amplitude spectrum is defined by equation 4.1.

$$A(u, v) = \left\| \frac{1}{MN} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{c=0}^{M-1} f(r, c) \cdot \exp \left[-j2\pi \cdot \left(\frac{ur}{N} + \frac{vc}{M} \right) \right] \right\| \quad (4.1)$$

$u=0, \dots, N-1$, and $v=0, \dots, M-1$, are, respectively, the rowwise, and the columnwise frequency indices of an N row \times M column image. This array is ordered in a traditional manner with the central element 0 containing the zero frequency component, F_0 . Pixels away from the centre represent increasing spatial frequency components of the image. In each dimension the position of these components is proportional to the size of the dimension. As this size can be expressed as a metric distance (number of pixels / pixel size = meters), frequencies and their orientation can be expressed in geographical space. Inversely we can determine annular rings or ellipses (for rectangular field envelops) as frequency filters whose width and eccentricity correspond to the frequency zones in which we expect to find the amplitude peaks corresponding to the objects of interest. This is schematically illustrated by figure 4.2

for a rectangular envelop matrix. The spacing criteria used for classification are summarised in figure 4.3. They express a combination of standard knowledge and observations, because in reality transitional situations occur like when the vines of an originally goblet vineyard have been put on training wires for mechanical harvesting.

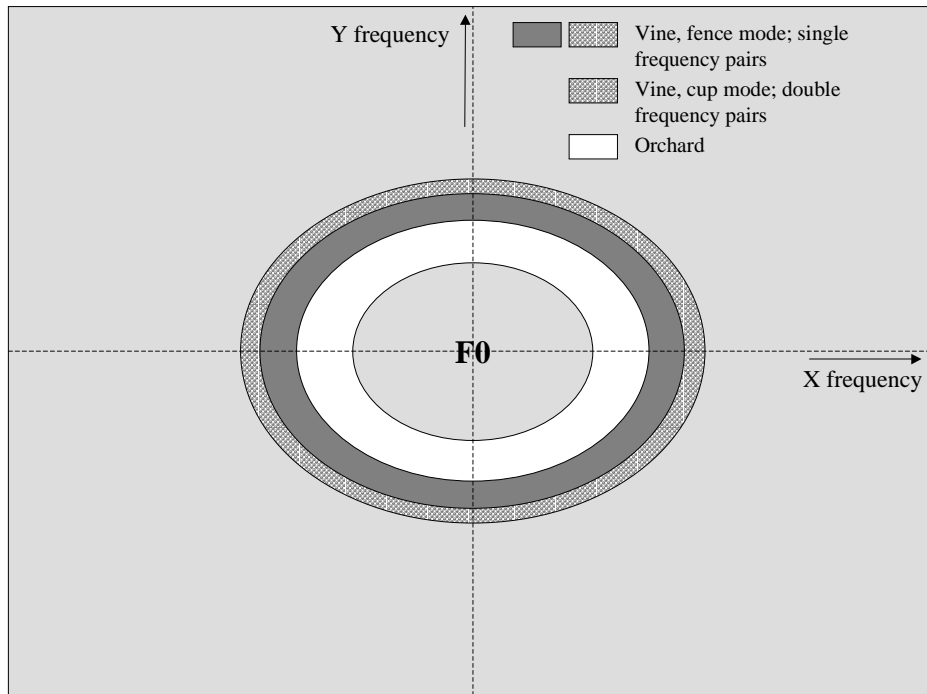


Figure 4.2 Circularly constant frequency sections within which the peaks of the corresponding classes need to be located.

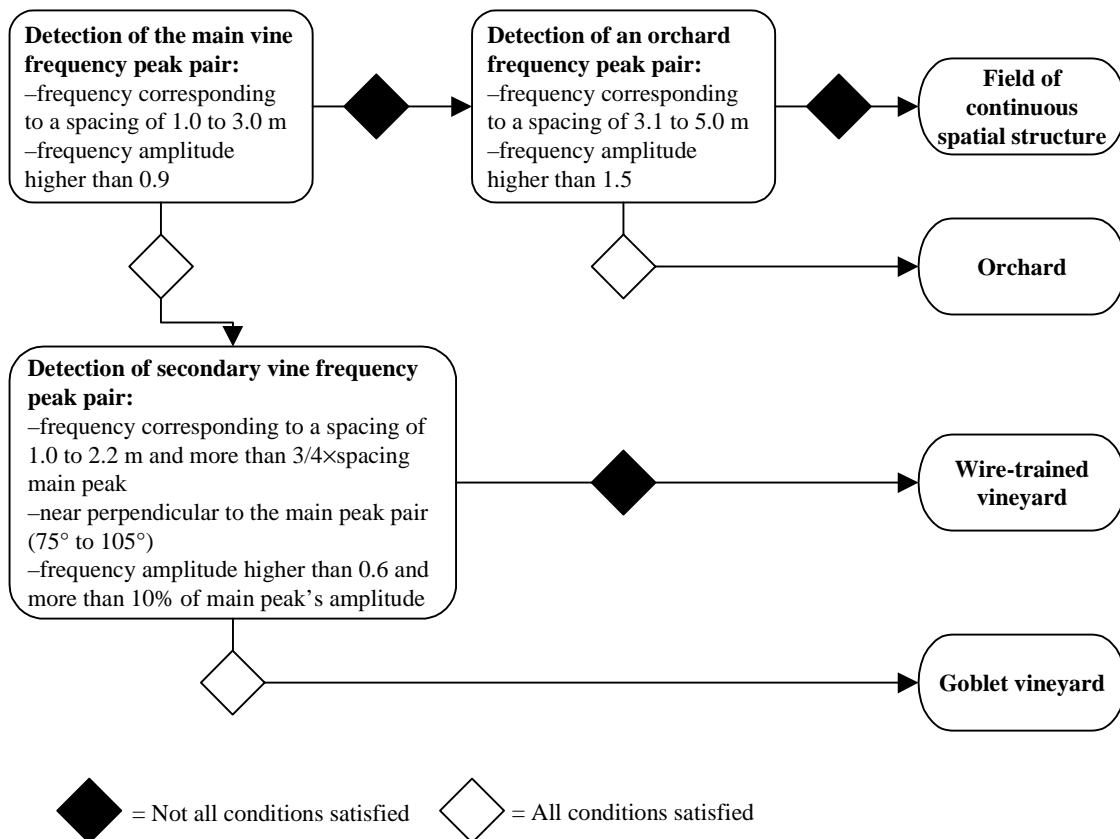


Figure 4.3 Classification criteria of the model.

Conversely to the spacing criteria, the frequency amplitude criteria presented in figure 4.3 are not physically based. They have been obtained by calibration over a large range of fields, observed in the image under a range of viewing conditions. All 127 fields were used that could be extracted from an image mosaic of which a part is represented in the next chapter. The values found correspond to thresholds where the basis is a typical amplitude decay away from the centre of the Fourier power spectrum of a bounded variation image (Meyer, 1992).

Orientation and spacing of the crop structure are computed from the retained frequency peaks. Together with the frequency peaks' amplitudes and the classification result, these parameters are stored into the database of the vector layer.

4.4 Results and discussion

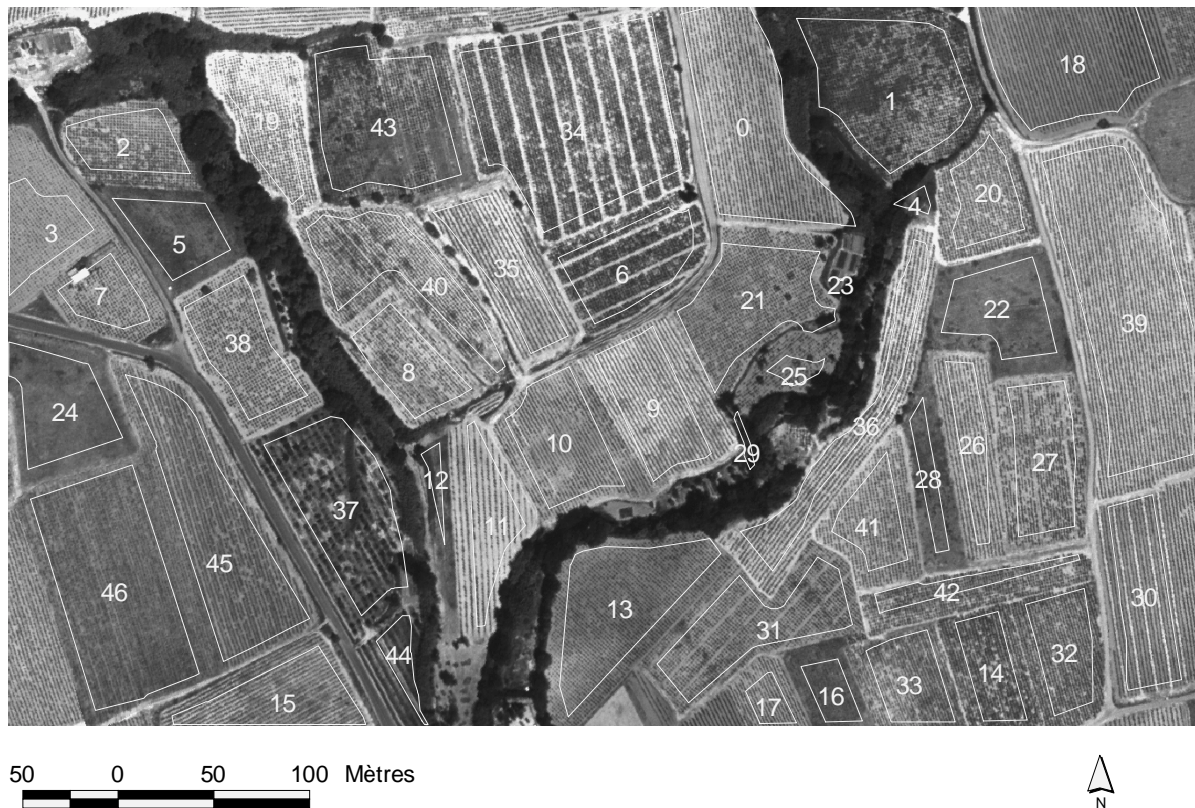


Figure 4.4 Extract of an image mosaic covering an area situated in the La Peyne valley. The images were taken at the end of may 1998.

An interesting test scene was extracted from the image mosaic (figure 4.4). It does not represent an average 'normal' situation, but shows the complexity of the vineyard environment by a number of 'unconventional', extremely varied field patterns, thereby testifying for the need of a robust method. Table 4.1 shows that all vineyards and homogeneous fields were correctly classified. Figure 4.5 illustrates how the procedure works on field 1, which is a non weeded goblet field with grass growing in discontinuous patches and in-between a strongly contrasted crusted soil surface. We observe that our method is not disturbed by this heterogeneity (figure 4.5).

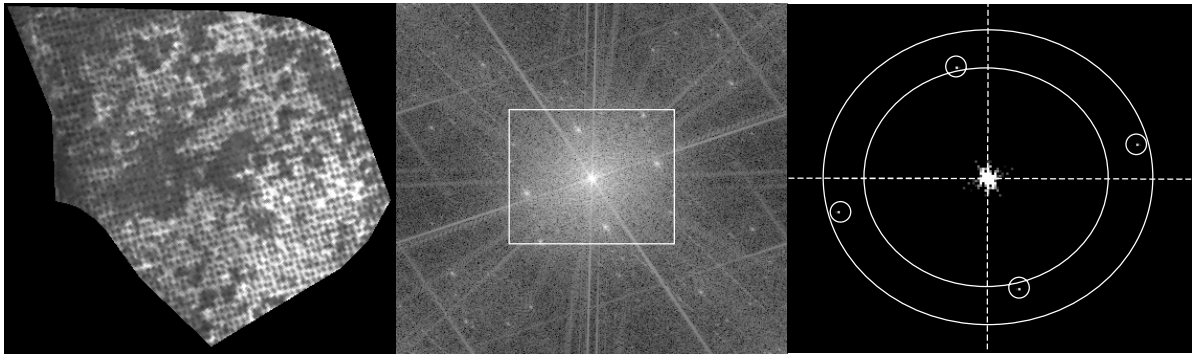


Figure 4.5 Illustration of the procedure on field 1 (figure 3). Left shows the image information extracted and temporarily stored in a square matrix; the centre shows the Fourier transform of this image; right shows the frequencies remaining after thresholding (only the part contained within the white rectangle of the centre image is represented, because outside no frequencies remained). Both pixel pairs, visible within the small white circles, are located within the vine frequency zone. The pairs are, once transformed into geographical space, near perpendicular. These observations lead to classification as goblet mode. From their position with respect to the centre spacing and orientation are computed.

4.4.1 Influence of field contrast and dimensions on vineyard detection

Although robust with respect to the within-field variations encountered, the FFT based method is known to be sensitive with respect to contrast and with respect to the quantity of information provided, *i.e.* size, shape and orientation of the extracted field segment. Figure 4.6 shows the principal vine frequency peak's amplitude, and its evolution upon rotation, of two vineyards: a standard 2m spacing wire-trained ploughed (moderate contrast) vineyard, corresponding to the diagram on the left, and a goblet vineyard with the lowest contrast encountered throughout the study area. In fact this last field is an abandoned vineyard, *i.e.* composed by little vigorous vines and a high grass cover completely occulting the soil. For comparison purposes the vine rows were north-south oriented and the fields given the same average dimensions, 100m long and 50m wide. When the contrast of the standard ploughed vineyard was diminished by 50%, the amplitude of the vine frequency peak was also reduced by 50%. Nevertheless it can be seen from the original amplitude that even the amplitude resulting from this considerable lowering of an already rather low contrast still remains high above the threshold amplitude distinguishing for the given frequency range between vine and other crops. Even the low amplitude determined on the abandoned vineyard allows for its accurate recognition. Although the method does not comply with the contrast invariance requirement, the Fourier Transform (FT) is so sensitive to the periodic phenomena that a contrast normalisation between fields does not seem to be required.

Other aspects that influence the frequency amplitude are size (especially width, *i.e.* size in the direction of the frequency) and orientation, that together determine the amount of frequency information available within the field's envelop. Theoretically this may provoke two types of error: a homogeneous field detected as vineyard, or non recognition of vine. Figure 4.6 illustrates the chance that a vineyard will not be recognised as such due to a lack of frequency information. It is clearly shown that a slight rotation, *i.e.* inclusion of zero frequency data, induces a strong amplitude decrease of the vine frequency peak. But upon further rotation this decrease is far less. Although smaller, a square field (50×50m) results in a somewhat higher amplitude. Narrower fields, *i.e.* less 'waves' to determine the frequency, result in lower amplitudes. Nevertheless, even when very narrow (three rows wide) and diagonally orientated (45°), ploughed vineyards are properly classified. Only the worst case, *i.e.* a very narrow, very low contrast, near diagonally oriented vineyard, leads to an error. A

confidence threshold is put at a width of four rows, because on narrower fields the estimation of orientation and spacing proved less precise. Assuming a two metre spacing this corresponds to a width of about 30 pixels.

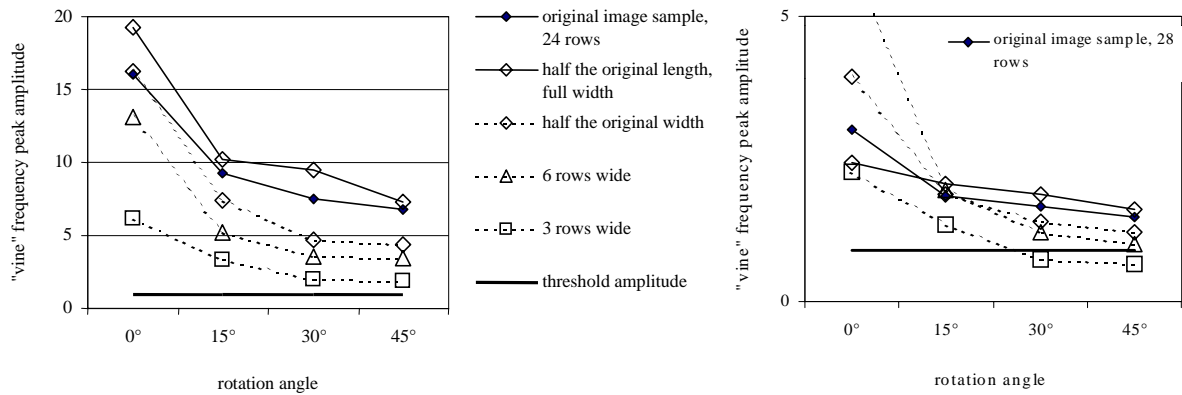


Figure 4.6 Evolution of the vine frequency peak's amplitude in the FT power spectrum as a function of (1) orientation, simulated by rotation, and (2) shape, simulated by resampling the original vine field. The data represented by the diagram on the left have been obtained on a 100m long and 50m wide wire-trained ploughed vine field. The diagram on the right corresponds to an abandoned, *i.e.* very low contrast, vineyard of equal dimensions.

To evaluate the risk of an erroneous vineyard detection, some tests were realised on square samples of different sizes extracted from fallow fields, because square fields provide highest amplitudes. It appeared that for squares of 50×50 pixels and less, the typical vine frequency 'ring' overlaps the high amplitude zone around the zero frequency that is typical of the FT, in a way that false frequency peaks are detected. To avoid both types of error, buffered fields smaller than about 60×60 pixels (225m²) and/or narrower than 30 pixels (about 8m) should be discarded. This is why fields no. 4, 12, 25, 29 and 42 (figure 4.4) have been left out from table 4.1. Throughout the La Peyne watershed about 7% of all buffered fields appear to be either too small or too narrow. Their original field sizes represent only 1.5% of the total surface and only 40% of these neglected fields are vineyards.

These tests demonstrated that the quality (image contrast) and quantity of the frequency information do, as known, influence the amplitude of the frequency peak in the FT power spectrum. But they also show that extreme conditions are required to provoke a classification error. Only about 1.5% of the area throughout the study region do not fulfil the criteria that guarantee a robust detection.

4.4.2 Training mode

Results show (table 4.1 and figure 4.4) that the number of erroneous training mode classifications is small (5 out of 41). Moreover, these classification errors (no. 10, 11, 14, 27, 33) provide a very interesting information. All are cases which departed from our taxonomy. Fields no. 10 and 11 are actually in goblet mode, because they are self supporting (no metal wires), but their planting pattern is very unorthodox, with a strong line structure. Fields no. 14 and 33 do have a typical goblet geometry, but the amplitude of the perpendicular (to the main direction) peak is too weak for the field to be recognised as goblet-trained. This is due to the unique, preferential ploughing direction leading to the occurrence of a small ridge with grasses between plants similarly to wire-trained fields. Finally, field no. 27 is erroneously classified as goblet, because the extensively managed field has a high number of gaps, *e.g.* the spatially discrete character of the crop has been recognised, but lines are too discontinuous for the field to be recognised as goblet mode.

The lesson to be learned is that the amplitude of the frequency peaks and the difference between the amplitudes of the perpendicular peak pairs provide an important information on the degree of 'getting into line' of intermediate cases, which is hidden by the simple field observations. This has been verified by additional field observations that confirm the model's indication for 18 out of 20 goblet fields.

Apart from these remarks the method works well on an important variety of situations: fallow fields, orchards with a partially grass covered soil surface, dark and bright vineyards due to soil surface type, or to view angle variation in the image mosaic, vineyards with a discontinuous soil surface signal, and even on fields where the spatial structure is split up in blocks (no. 6, 30, 31, 34).

4.4.3 Spacing

We showed previously that the training mode does not always comply with the generally advised and traditionally used spacing described in paragraph 3.1.2.1. This is why it is important to determine spacing independent from the training mode. However, ten of the eleven wire-trained fields indeed have a row spacing between 2.0 and 2.5m (no. 46 being a goblet field put on wire fences), and all 17 goblet fields have a traditional near square spacing.

The method, *i.e.* the FT, allows for a very accurate estimation. This can be seen from the example in figure 4.5: the pixel corresponding to the frequency peak is unambiguously identified, so the estimation error is less or equal to the pixel size. This within-pixel variation is more important at low frequencies, where pixels contain a higher range of frequencies. This variation is less than 2% in the vineyard frequency sector and grows up to 5% in the orchard frequency sector. This theory is confirmed by precise on-screen measurements on a set of 20 randomly chosen goblet and wire-trained vineyards. These measurements, realised in the two planting directions over the whole field, were considered to be more precise than field measurements. They resulted in an absolute average difference of 1.6 cm, *i.e.* about 1%, with respect to the model's results on these fields.

polygon number	strongest			perpendicular			class	
	amplitude	orientation (°)	spacing (m)	amplitude	orientation (°)	spacing (m)	model result	field observation
0	5.9	-10	2.0	-	-	-	wire	wire
1	1.8	-13	1.5	1.8	75	1.7	goblet	goblet
2	4.8	-87	1.6	3.6	0	1.6	goblet	goblet
3	2.2	-36	1.7	1.1	53	1.7	goblet	goblet
5	-	-	-	-	-	-	continuous	fallow
6	2.3	64	2.5	1.5	-25	1.5	wire	wire
7	3.3	-28	1.7	2.7	55	1.6	goblet	goblet
8	3.6	-41	1.6	0.8	50	1.5	goblet	goblet
9	8.1	-28	2.1	-	-	-	wire	wire
10	6.2	-28	1.9	0.7	59	1.4	wire	goblet
11	7.6	-1	3.1	-	-	-	wire	goblet
13	2.7	-47	1.7	1.1	43	1.6	goblet	goblet
14	2.7	-15	1.7	-	-	-	wire	goblet
15	4.1	61	2.1	0.6	-25	1.2	wire	wire
16	-	-	-	-	-	-	continuous	fallow
17	6.5	-22	1.8	0.7	64	1.6	goblet	goblet
18	4.3	-16	2.0	-	-	-	wire	wire
19	6.3	-10	1.6	4.3	77	1.6	goblet	goblet
20	4.9	-12	1.7	2.4	75	1.7	goblet	goblet
21	2.2	61	1.7	1.8	-29	1.4	goblet	goblet
22	-	-	-	-	-	-	continuous	fallow
23	-	-	-	-	-	-	too small	m.garden
24	-	-	-	-	-	-	continuous	fallow
26	7.8	-10	2.1	-	-	-	wire	wire
27	3.3	-7	1.7	0.7	83	2.0	goblet	wire
30	10.2	-7	2.0	-	-	-	wire	wire
31	2.2	-46	1.7	0.8	42	1.6	goblet	goblet
32	4.4	-15	1.6	1.6	72	1.6	goblet	goblet
33	2.4	-19	1.6	-	-	-	wire	goblet
34	1.9	-12	1.6	0.9	65	1.6	goblet	goblet
35	6.2	-26	2.3	-	-	-	wire	wire
36	1.0	37	2.2	-	-	-	wire	wire
37	2.3	-26	4.2	-	-	-	orchard	orchard
38	2.2	-23	1.6	1.6	60	1.6	goblet	goblet
39	10.2	-8	2.0	-	-	-	wire	wire
40	3.1	-38	1.6	1.0	50	1.6	goblet	goblet
41	4.4	-6	1.8	1.2	80	1.6	goblet	goblet
43	2.6	-12	1.6	1.3	76	1.6	goblet	goblet
44	3.5	-23	4.4	-	-	-	orchard	orchard
45	1.6	-17	2.1	-	-	-	wire	wire
46	1.3	-17	1.6	-	-	-	wire	wire

4.4.4 Orientation

The orientation of rows and grid patterns measured directly on the image mosaic, using a subsample of 20 fields, is in very good agreement with that estimated by our procedure. An average absolute difference of 1.2 degrees was found, which is within the accuracy range of direct measurements. Precise field measurements were made on this selection of fields using a land surveyor's compass. The average absolute difference between model results and field measurements is 1.3 degrees, *i.e.* less than 1% error, with 20 out of 30 measurements having a deviation of 1 degree or less. Although weak, the average absolute difference between the image mosaic and field measurements of 0.7 degrees shows that part of this error may be induced by the warping of the images.

4.5 Conclusion

A method is proposed for automatic identification of vineyards and their training mode on a per-field basis. It also provides a description of the spatial crop structure. The method developed was demonstrated to be very robust, allowing to extract accurately quantitative variables, handling the complex and variable radiometry of the environment considered. Moreover the model can be transposed to other regions characterised by other crops or frequencies by a simple adjustment of criteria. The computational efficiency of the procedure and the fact that results are directly available for use in spatial analysis without creating an intermediate or additional image layer makes this method well suited for operational use. The model could even be incorporated in a GIS, thereby avoiding early 'binding', *i.e.* linking semantically the results of a scene interpretation to geographic features, as proposed by Gahegan and Flack (1996). The output format could be user-defined, thereby putting off the task of choosing a description until the current user task is known.

Apart from a few artefacts, all fields are correctly classified. However, ambiguities occur obviously for training modes intermediate between 'goblet' and 'wire-trained' classes. It can be argued that in this case and in the context of environmental studies the information provided by the method developed is more valuable than the information resulting from field observations. Apart from a 'boolean' classification, the degree of lining as expressed by the classical parameters estimated can be very useful.

Because of the absolute amplitude threshold applied to the FT power spectrum, the method is sensitive to the amount of frequency information supplied as well as to its quality (image contrast). A minimum field size and width have been determined above which all fields should be correctly classified irrespective of their shape, orientation and contrast. Buffered fields that do not satisfy these criteria are very rare and generally correspond to non cultivated fields. Although in our case it proved not to be required, we do recommend a per-field contrast normalisation. Easy to implement, this will surely enhance the robustness of the method when applied to other environments. Lastly, to be able to use the exact quantitative variables as physical parameters, the image warping method needs to be of a comparable high quality.

4.6 Validation étendue du modèle

En complément du modèle d'analyse fréquentielle présenté dans la publication, ce paragraphe présente les résultats de son application aux jeux de données désormais disponibles. Ces résultats constituent une validation complémentaire, mais représentent surtout la transition vers la prochaine étape. Il s'agit de la création de la base de données des parcelles de vigne et de la géométrie de leur motif de plantation, *i.e.* des informations essentielles pour la suite de l'étude. Vu leur importance, ces informations sont incluses dans l'annexe 1E sous forme de cartes.

Le tableau 4.2 présente les résultats obtenus. Le modèle étant développé pour la reconnaissance de vignes à l'état végétatif, il n'a pas été appliqué à la prise de vue d'hiver (no. 3). Pour ces prises de vue hors saison végétative on considère les résultats issus de la dernière prise de vue précédente en saison végétative encore valable. Le nombre total de parcelles couvertes par les mosaïques varie suivant les prises de vue, car lors de la première prise de vue, les sites Pézenas et Rou-Al et lors de la deuxième prise de vue, le site Rou-Al n'ont pas été entièrement couverts.

Site	Caux	Neffiès	Pézenas	Rou-Al	Pézenas	Rou-Al	Total
Prise de vue	1	1	1	1	2	2	
Nombre total de parcelles contenues dans les mosaïques et pas trop petites	89	97	24	165	29	167	571 404
Nombre de parcelles de vigne parmi ces parcelles	68	75	16	108	20	100	387 287
<i>Erreurs dans la reconnaissance de parcelles de vignes :</i>							
Nb. de parcelles de vignes non reconnues par le modèle	2	4	0	1	1	14	22 8
Nb. de parcelles faussement identifiées comme étant en vigne	4	0	1	3	1	2	11 9
Erreur totale par site et prise de vue (% du nombre total de parcelles)	6.7	4.1	4.2	2.4	6.9	9.6	5.8 4.2
<i>Erreurs dans la détermination du mode de conduite :</i>							
Gobelet vu par le modèle comme étant palissé	4	17	0	15	0	20	56 36
Palissé vu par le modèle comme étant gobelet	4	1	0	6	0	1	12 11
Erreur totale par site et prise de vue (% des parcelles en vigne)	11.8	24.0	0.0	19.4	0.0	21.0	17.6 16.4

Tableau 4.2 Performance du modèle comme résultat de son application aux sites d'études pour les prises de vue en saison végétative. Les erreurs dans l'avant-dernière colonne (Rou-Al 2) ne sont pas représentatives de la performance du modèle, car elles sont surestimées suite à un problème technique (flou local dû à des diapositives non planes). C'est pour cela que l'on trouve deux chiffres dans chaque cellule de la colonne "Total" : le premier chiffres prend en compte tous les sites et prises de vue présentés ; le deuxième chiffre (italique) présente le total sans pris en compte de Rou-Al 2.

Notez également que le taux d'erreur obtenu sur Rou -Al 2 n'est pas représentatif pour la performance du modèle, mais ces chiffres sont inclus pour démontrer l'influence d'un problème technique lié au dispositif : la pellicule utilisée sur ce site a fourni des diapositives non planes. Le scanner utilisé

n'étant pas capable de corriger pour de tels problèmes ceci a résulté en des zones floues dans les images numériques. Dans ces parties floues les ceps de vigne ne pouvaient souvent plus être distingués du fond.

La robustesse de la méthode est confirmée. Sans nouvelle calibration, mais simplement en appliquant le modèle tel qu'il est, on obtient de bons résultats : la faible erreur montre que pour environ 95% des parcelles on arrive à reconnaître la présence de la vigne par rapport à d'autres occupations du sol. Et pour plus de $\frac{3}{4}$ des vignes identifiées la détermination de leur mode de conduite est en accord avec celui observé au sol.

Sans que les quelques parcelles qui sont trop petites par rapport à notre critère aient été considérées, on note quand même quelques erreurs de reconnaissance des parcelles de vigne. Parmi les huit parcelles de vigne non reconnues (hormis Rou-Al. 2), deux étaient trop étroites par rapport à l'autre critère de taille, celle d'une largeur d'au moins 8m, non vérifié auparavant. Les six parcelles restantes étaient des parcelles orientées plus ou moins en diagonale par rapport à l'image (SO-NE ou SE-NO) et relativement étroites, avec une fréquence difficile à détecter soit du fait d'un contraste très faible (3), soit du fait d'un très fort taux de 'vides' (groupes de ceps manquants) (3). On conclut de ces résultats qu'il n'est pas nécessaire d'enrichir le modèle avec un module relativement lourd de détermination de la largeur de la parcelle. Par contre la normalisation de contraste, simple à inclure dans le modèle existant, pourrait apporter une amélioration significative.

Parmi les 11 parcelles faussement reconnues comme vignes, il s'agit dans cinq cas d'une occupation du sol homogène mais contenant des traces de roues avec des écartements typiques des vignes. Les autres cas représentent des rares occupations du sol discontinues aux fréquences typiques de la vigne : deux fois une même parcelle de vigne arrachée avec les souches alignées encore présentes au sol et deux fois deux parcelles d'asperges. Ce dernier cas est plus gênant, car il indique que l'on peut trouver une culture dans la région d'étude qui peut avoir un motif spatial comparable à celui d'une vigne palissée. Bien que rare, il faudrait envisager sa prise en compte dans un suivi temporel par des différences du cycle végétatif.

Les erreurs dans la détermination du mode de conduite sont liées à la différence entre la définition du mode de conduite du modèle et celle employée dans les observations au sol (§ 4.4.2). Plus de 80% des cas de 'désaccord' entre les deux types d'observation sont des vignes en gobelet (non conduites sur fil de fer) considérées comme palissée par le modèle, soit car la végétation de la vigne est plus ou moins conduite en ligne, soit et surtout parce qu'il existe un sens préférentiel de labour, provoquant l'apparition d'un cavaillon enherbé.

Les erreurs dans la reconnaissance des parcelles de vigne ont été corrigées manuellement, afin de ne pas priver les prochaines étapes de l'étude d'une partie du jeu de données ou de les induire en erreur en incluant des parcelles non cultivées en vigne. A partir de ce moment on peut s'intéresser à la reconnaissance de la surface du sol entre les rangs de vigne des parcelles retenues, ce qui constitue l'objet du chapitre suivant.

5 Extraction de la surface du sol éclairée dans la parcelle

Après avoir reconnu les parcelles de vigne et leur mode de conduite, l'on souhaiterait s'intéresser à l'interprétation de la radiométrie de la parcelle afin de décrire son état. C'est à ce moment là que l'on est confronté à la difficulté majeure qui caractérise la télédétection de cultures pérennes et à couvert discontinu – ou de leur surface du sol sous-jacente comme c'est le cas ici – *i.e.* la présence de différents objets à l'intérieur de la parcelle, tandis que l'on ne s'intéresse qu'à un seul d'entre eux. Dans le but d'isoler cet objet d'intérêt on doit considérer l'échelle intermédiaire entre la parcelle et le pixel. Ceci correspond à l'étape 2 citée dans la description de la démarche (§ 2.5 et figure 2.8).

La méthode qui a été développée pour franchir cette barrière fait l'objet d'une publication qui est représentée dans ce chapitre de la même manière que la publication du chapitre précédent. Il s'agit dans ce cas d'un manuscrit accepté pour publication en décembre 2000 par le journal *AGRONOMIE*, section *Agriculture and Environment*, dont le titre, les auteurs et le résumé sont réunis ci-dessous. Comme cette méthode est développée pour des vignes à l'état végétatif, un paragraphe a été rajouté à la fin (§ 5.5) pour analyser la validité de son application à des prises de vue réalisées en période de repos de la vigne.

Sunlit soil surface extraction from remotely sensed imagery of perennial, discontinuous crop areas; the case of Mediterranean vineyards.

WASSENAAR¹, Tom, BARET², Frédéric,
ROBBEZ-MASSON¹, Jean-Marc, ANDRIEUX¹, Patrick

¹UMR Sol et Environnement, INRA - ENSA, 34060 Montpellier cedex 2, France

²INRA Bioclimatologie, site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9, France

Abstract

In the Mediterranean vine region, soil surface remote sensing for hydrological modelling is hampered by the presence of the perennial and discontinuous crop. Very high spatial resolution imagery allows to obtain pure soil surface pixels in between vine stocks. To enable the comparison of the resolution element's spectral properties with known bi-directional properties of different types of soil surface, the pure and sunlit soil surface pixels have to be extracted from the imagery.

Multi-scale analysis proofs to provide a robust and satisfactory segmentation method. Conditional per-field adjustment of a multi-scale image mask allows to obtain the information corresponding to the sunlit soil surface, whatever its state or composition. Moreover, the vine vegetation cover can be estimated with an error of at most 10% if the geometric configuration is taken into account.

5.1 Introduction

Si nous savons que nous avons à faire à une surface cultivée en vigne et éclairée par le soleil (voir le chapitre précédent), nous disposons de l'information élémentaire mais essentielle que l'image qui la représente est composée de trois objets (figure 2.9) : de pieds de vigne, de sol éclairé et d'ombre, cette dernière étant fonction de la géométrie de la parcelle, de l'angle de vue et d'éclairement. Nous savons également que la résolution spatiale choisie nous permet d'obtenir dans toutes les conditions des pixels 'purs', *i.e.* entièrement constitués de l'objet qui nous intéresse, la surface du sol éclairée. Nous disposons d'informations qui permettent d'interpréter le signal contenu dans ces pixels, mais comment savoir quels sont ces pixels ?

C'est là le problème auquel ce chapitre propose une solution originale. Originale dans le sens qu'il n'existe pas de méthodes toutes faites répondant à un tel problème, qui soient en même temps capables de tenir compte des particularités du milieu étudié comme décrites dans le chapitre 3 : des parcelles de taille et forme très variable, chacune soumise à une pratique culturale particulière ; différents modes de conduite de la vigne ; une composition de la surface du sol qui est hautement variable entre, mais aussi à l'intérieur des parcelles.

La méthode proposée est issue du domaine du traitement d'image dite 'analyse multi-résolution' ou 'analyse multi-échelle' (Starck *et al.*, 1998). La méthode est entièrement automatisée et repose sur deux étapes, dont la dernière est une approche par parcelle. Trois aspects justifient, voire imposent, une approche par parcelle : (1) la méthode est mise au point pour des surfaces cultivées en vigne ce qui oblige à écarter les surfaces à occupations du sol différentes ; (2) la répartition de l'espace entre les trois composantes principales – la végétation de la vigne, la surface du sol ombragée et la surface du sol éclairée – varie de parcelle en parcelle, mais peut être considérée constante à l'intérieur de chacune ; (3) la méthode permet l'estimation du couvert végétal de la vigne ce qui est une des variables que l'on souhaite connaître par parcelle. Ce dernier aspect n'a pas été réalisé dans cette étude. On s'est limité à décrire la méthode à suivre. Sa réalisation aurait été hors de l'intérêt direct de l'étude et nous ne disposons pour l'instant pas de moyens pour valider les résultats.

Pour la validation des résultats de segmentation obtenus, quelques images ont été acquises à basse altitude (autour de 300m). Elles couvrent un ensemble de parcelles à états de surface et configurations géométriques différentes. Ces images numérisées ont une résolution spatiale avoisinant 5cm, *i.e.* bien plus élevée que celle choisie en entrée pour cette étude.

Pour l'analyse par parcelle on s'est de nouveau servi du parcellaire numériquement disponible en mode vecteur (§ 3.2.2).

5.2 Proposed image processing strategy

5.2.1 Requirements to be fulfilled by the method

The method to be developed to accurately extract the sunlit soil fraction from the images, under all conditions encountered, needs to fulfil a number of requirements:

1. It must be independent of the absolute reflectance values because soil surface pixels can have similar spectral response with respect to vine pixels and because soil surface and vine reflectance vary between and within vineyards (figure 5.1);
2. the procedure to be selected needs to be contrast invariant as shown by figure 5.1;
3. the result's quality should be independent of the plantation structure's orientation. The procedure should therefore be rotation invariant ;
4. the method should be shape invariant to work both on goblet and on wire-trained vineyards;
5. It should be invariant to translation;
6. The method should accurately extract the part of the image corresponding to the sunlit soil surface, irrespective of the relative fractions covered by sunlit and shaded soil and vine. This distribution varies rapidly in time and space as a function of vine development and geometric configuration.

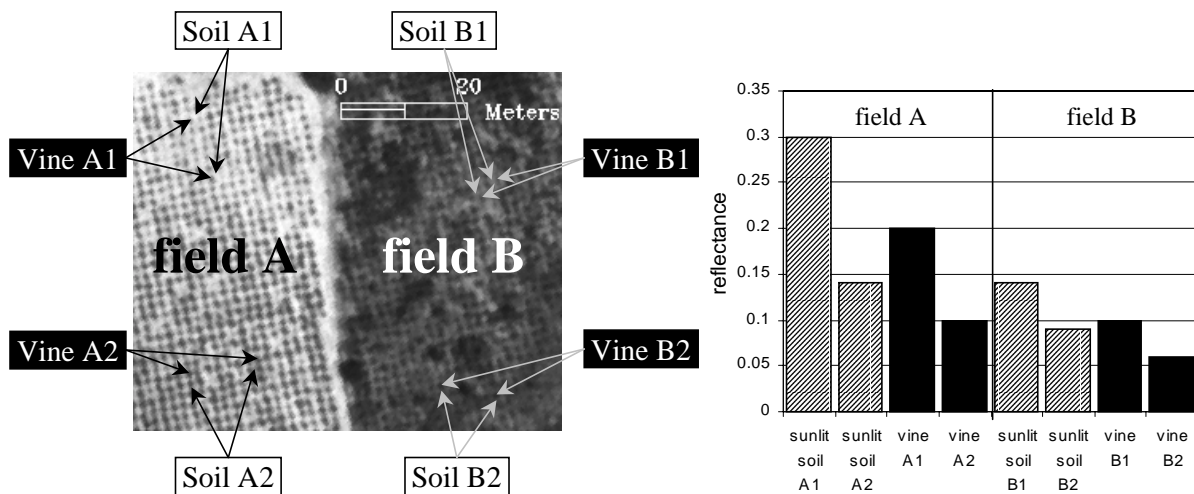


Figure 5.1 Between and within field reflectance variation. The image sample shows the red (650nm) reflectance in May 1998 for a few pixels of two juxtaposed vineyards, the one on the left (A) with mainly bare calcareous soil, and the one on the right (B) covered with weed. Shadowed surfaces have not been considered in this illustration. From the pixel reflectance values (graph on the right) it can be seen that neither a general, nor a field specific threshold allows to distinguish between the objects sunlit soil and vine.

5.2.2 Selection of spectral input

From the three fractions considered (sunlit soil surface, shaded soil surface and vine vegetation), the first has to be isolated. Band ratios like vegetation indices (Lillesand & Kiefer, 1994) are not satisfying because they can be comparable between vine and green grass-covered sunlit soil. Figure 5.2 shows that the reflectance intensity of the red channel provides the best input, irrespective of the spectral information available. With respect to the near infrared reflectance in the standard case as represented by this figure, i.e. a "naked" non-vegetated mineral soil-surface between the vine stocks, we note that shaded side vine reflectance is lower than the sunlit side. In turn the sunlit side reflectance may not be significantly higher than the response of a bright, crusted mineral soil, because of a possible important fraction of shade between leaves within a sunlit vine pixel. Therefore the response of the near infrared channel is considered to be unsuitable as a discriminator, which justifies the regular colour film as stated earlier. The response in the green band is comparable between the shaded vine and shaded soil, and also between the sunlit vine and sunlit soil. Therefore, masking based on the green band would be shifted from the actual sunlit soil, resulting in a contaminated sunlit soil surface portion. The red

reflectance of vine is low, even on the sunlit side, and does not exceed the sunlit soil surface reflectance even where the last one is covered by grasses or crop residues. This information has therefore been selected as input for the method developed.

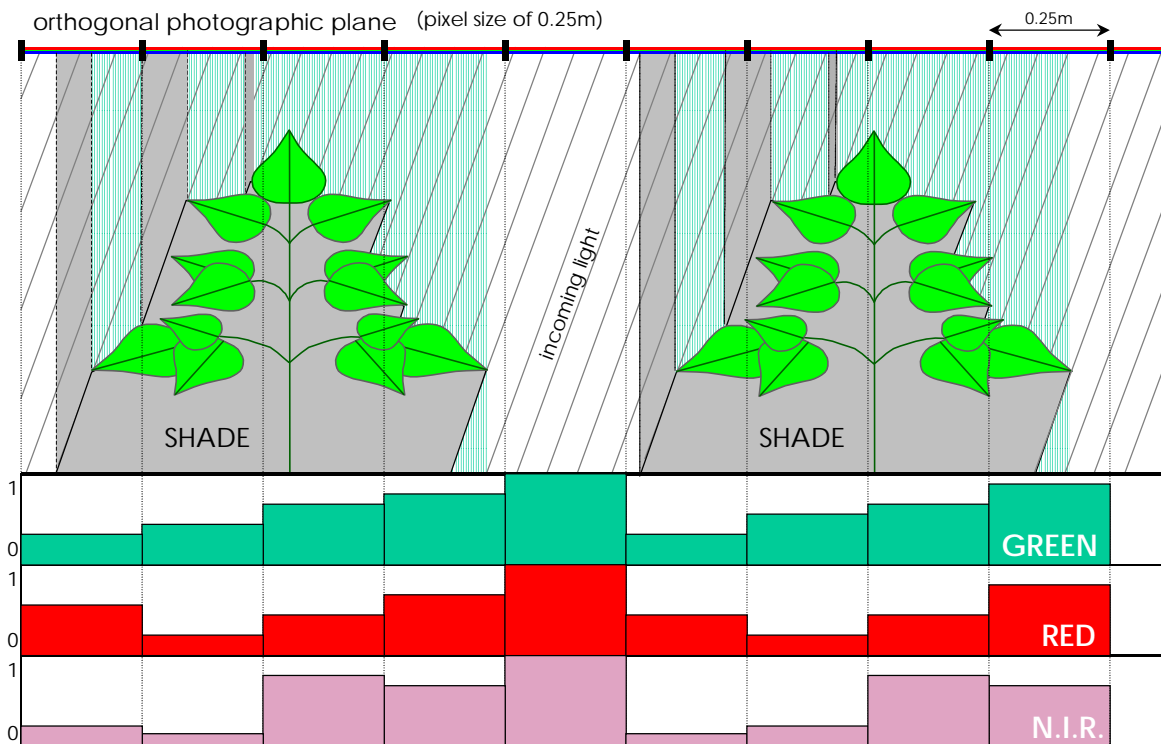


Figure 5.2 Schematic vine and soil contributions to the canopy reflectance under a solar zenith angle around noon in summer in the Mediterranean region (20°). NIR = near infrared.

5.2.3 Selection of segmentation approach

The requirements specified in paragraph 5.2.1 clearly show that traditional spectral thresholding does not provide an adequate solution to the problem. Even results from adaptive thresholding (Horaud & Monga, 1993) techniques are not satisfactory: local histograms do not allow for robust determination of a threshold because of the relatively important transitional zones between the objects; these techniques are not contrast invariant and may mix up vine and grass covered soil. A spatial segmentation operation is required. Two traditional approaches exist (Niblack, 1986 ; Wilkinson, 1996): detection of edges and growing regions from seed points. Edge detection techniques have important drawbacks that are incompatible with our requirements: they are very sensitive to thresholds (Wilkinson, 1996) and often detected boundaries are not closed (Farrokhnia & Jain, 1991). Spectral variations within the sunlit soil surface would surely lead to many false edges. The same applies for region growing techniques, their results depending to a large extent on the seed point selection.

Other categories of textural image segmentation approaches exist like image pyramids and random fields (Ruzon, 1998). Innumerable other (hybrid-)techniques have been developed. One might think that for example local minima detection might help us out, but again a lack of robustness is found. To obtain satisfactory results, an image texture model approach is required, because it allows to incorporate the concept of 'object' (Mason *et al.*, 1988). This excludes the use of statistical texture analysis techniques as proposed by Haralick (1979).

The texture model here is easily obtained by combining figures 2.9 and 5.2. A 'top-down' (Ruzon, 1998) definition can be given, claiming that there is a basic texture element, called a *texel*, and a placement rule. There are only two objects of interest: the sunlit soil surface, and the vine with its shadow. The sunlit soil surface is expected to be always at least slightly brighter than vine and/or shadow pixels. The object 'vine with shadow', of variable but very limited size (size criteria C_{size} of the model: about 2 to 5 pixels wide and undetermined length) and very regular spacing (spacing criteria $C_{spacing}$ of the model: the centres of two identical and adjacent objects are 6 to 10 pixels apart), is superimposed on the soil surface background, having itself an internal variability at different scales. In between these two objects we find an important fringe of mixture pixels smoothing the borders.

Clearly such a model as basis for segmentation would provide erroneous results on fields other than vineyards, but those have been eliminated beforehand (Wassenaar *et al.*, 2000).

The 'vine with shadow' object can best be isolated from its background by a method taking profit of this specific size and spacing, *i.e.* multiresolution analysis. Belonging to the image pyramids category, multiresolution analysis (Mallat, 1989) results from the embedded subsets generated by interpolations at different scales. Our object being coarser than the single pixel resolution, a smoothing is required to make the object stand out (Morel, personal communication; Serra & Soille, 1994). The much coarser resolutions on the contrary, showing the low frequency variations, are not of interest for this problem.

5.2.4 Method description

object identification

A reliable identification of the object now depends on the selected scale and smoothing approach. Over the last decades a lot of interest has been put on obtaining the information at different scales by wavelet transforms. In our case however a multiresolution approach based on the median transform as proposed by Starck *et al.* (1998) is expected to provide better results for a number of reasons:

There are several problems related to the wavelet transform: point objects pollute all scales, a positive structure at a scale is surrounded by negative values complicating the analysis, and there is no ideal wavelet transform algorithm. Among the advantages for object detection provided by the median filter we note: a robust smoothing due to its nonlinearity (*i.e.* the effects of outlier pixel values are mitigated); shapes of structures in the scales being closer to those in the input image than would be the case with a wavelet transform; the results of the median filter are found to be better than those from other morphological tools (Starck *et al.*, 1998). So it creates level sets without smoothing edges and it avoids curvature motion of straight sections (Guichard & Morel, 1999).

The object 'vine and shadow' can now be identified, not by delimiting a given level set at a certain scale, but by looking at the change in level sets upon change of scale. The difference between the scales obtained by smoothing with a 3×3 and a 5×5 median filter (figure 5.3) appears to best delimit our object. The smallest window, needing to be as small a possible regarding the often small width of the object, provides the level sets delimiting the object. The larger window rises the level sets of the object 'vine with shadow' by incorporating edge information in the centre of the object and sunlit soil information near the edge of the object. At the same time level sets of the object 'sunlit soil' are lowered by inclusion of edge information in the centre and vine or shadow information near the edge (figure 5.4 and 5.5). Coarser resolutions (larger smoothing filters) approaches the object spacing and therefore may lead to inclusion of two copies of the counter object, degrading the object in between. Upon further resolution decrease, the two objects will dissolve into each other or, even worse, will be inverted.

In short, a boolean image, indicating the location of the objects, is obtained by the following rule:

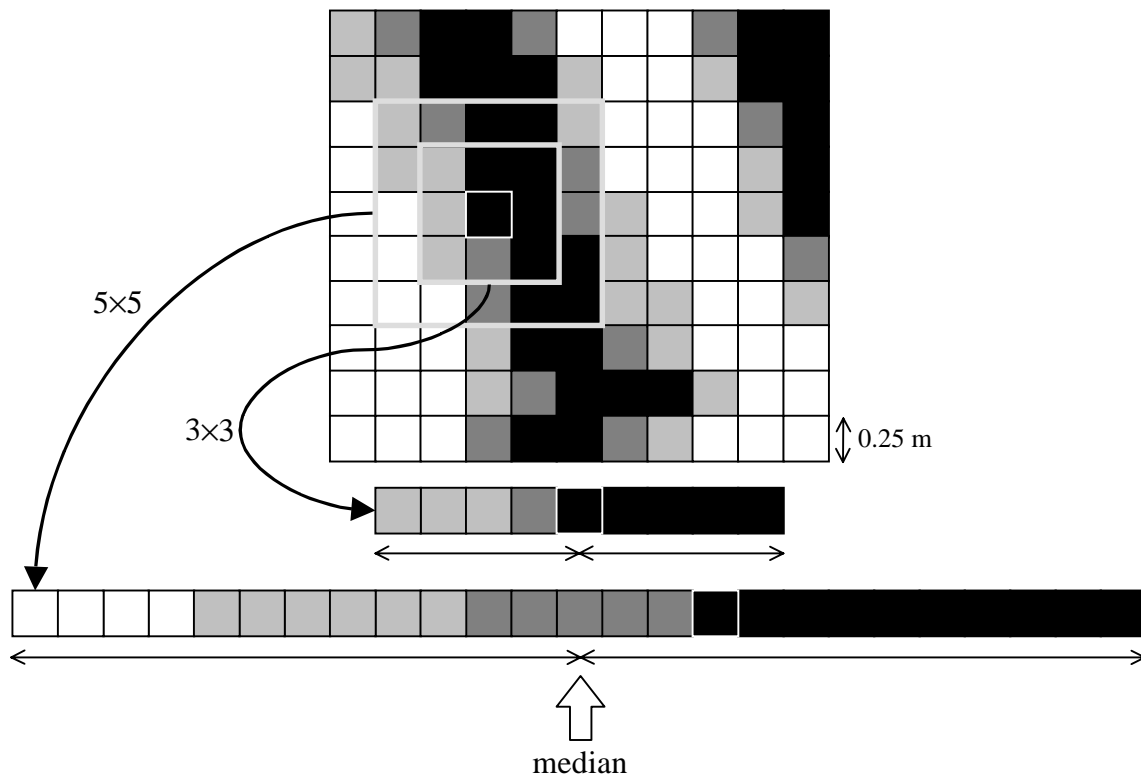


Figure 5.3 Schematic illustration of the result of a 3x3 and 5x5 median filter on a red channel vine pixel (black, the example centre pixel having a white contour). Sunlit soil is represented by white cells and the transitional fringe by light and dark grey cells. The schematic image fragment represents part of a theoretic red channel response on a wire trained vineyard. The bars show the filter pixels in an ordered manner.

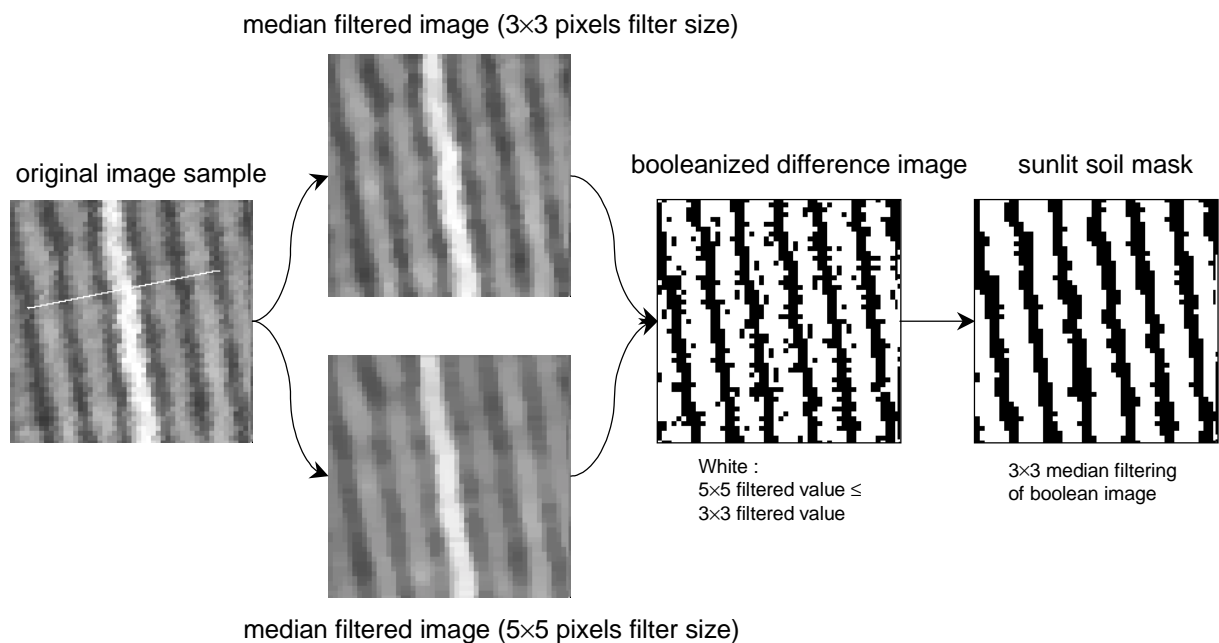


Figure 5.4 Illustration of the sunlit soil recognition method on a ploughed wire-trained vineyard sample (May 1998) containing a non-ploughed inter-row. The white line in the original image sample (red band) presents the location of the cross section of figure 5.5.

'vine and shadow' pixel = where $(5 \times 5 \text{ median filtered image} - 3 \times 3 \text{ median filtered image}) > 0$

Such an image, still containing a few 'islands' of wrong classified pixels within both objects, is cleaned by a 3×3 median filter, eliminating isolated pixels while preserving the object's shape (Starck *et al.*, 1998). Other cleaning techniques like combined opening-closing (Serra & Soille, 1994) are neglected because they affect the objects shape and simply because the pixels size does not allow to define a structuring element small enough to clean without damaging the small objects.

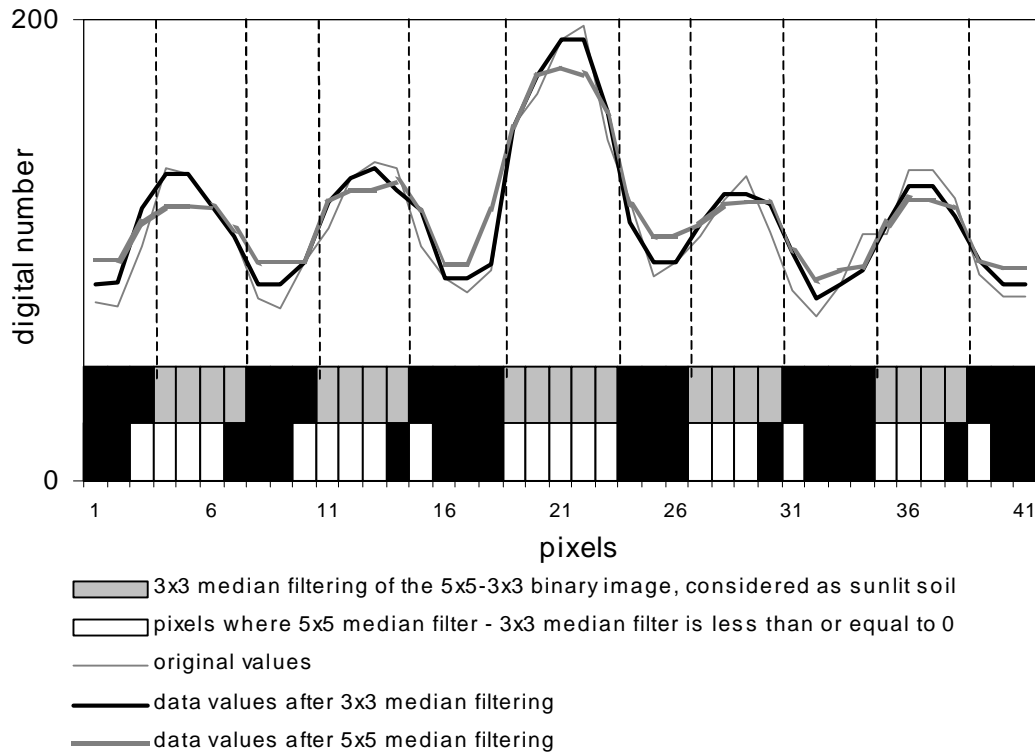


Figure 5.5 Cross section (see figure 5.4) showing the original pixel values (red band) and their change upon two dimensional median filtering (line graphs). The black and white/grey bars correspond resp. to the black and white pixels of the corresponding procedure steps in figure 5.4.

object delimitation

The spacing criteria (C_{spacing}) used by the image texture model are very stable throughout the images. The size criteria (C_{size}) may however be too restrictive with respect to the variety of situations encountered in the image, due to the dependency upon the geometric configuration (slope, row orientation, viewing and sun angles). The now located objects have to be more carefully delimited, as to avoid as much as possible a contamination of the sunlit soil surface signal by vine or shadow. We therefore apply a 'conditional erosion/dilatation': the 'vine with shadow' mask obtained is deliberately eroded (Minkowski subtraction) and dilated (Minkowski addition) (Serra & Soille, 1994), and the situation with the highest radiometric contrast between the underlying pixel populations of the two objects is selected as being the best delimiting mask. If this implies a change, the procedure is repeated in that direction, until the maximum contrast has been found. A few remarks have to be made with respect to this conditional erosion/dilatation:

⇒ Structuring element:

Even the smallest, non-orientation selective, structuring element will lead to a two pixel reduction (one on each side), *i.e.* 0.5m, of the row width upon erosion. This is an important change of the object's width. To somewhat reduce this change step a 'shapeless' structuring element is introduced: its shape adjusts to the shape of the edge and only if its total size (any 7 cells out of the 9 cells of a 3×3 window) does not fit in, the central pixel is eroded. This change in structuring element has no effect at straight or convex edge sections, but avoids erosion at concave sections, *i.e.* where the blobs are thinnest and less 'in need' of an erosion (figure 5.6). The dilation is obtained in the opposite way.

⇒ Contrast change:

Many different statistical descriptors could be applied here, but the simple measure of the change in difference between the median values of the two populations appeared satisfactory. The contrast is expected to be highest when both objects include part of the border pixels, *i.e.* the pixels containing a fraction of sunlit soil and a fraction of shadow and/or vine (figure 5.6). To avoid an increase in the contamination of the sunlit soil surface, the object of interest, an additional condition inhibits dilation of the sunlit soil surface image segments if this results in a significant ($\alpha=0.10$, empirically determined) increase of its internal radiometric variation.

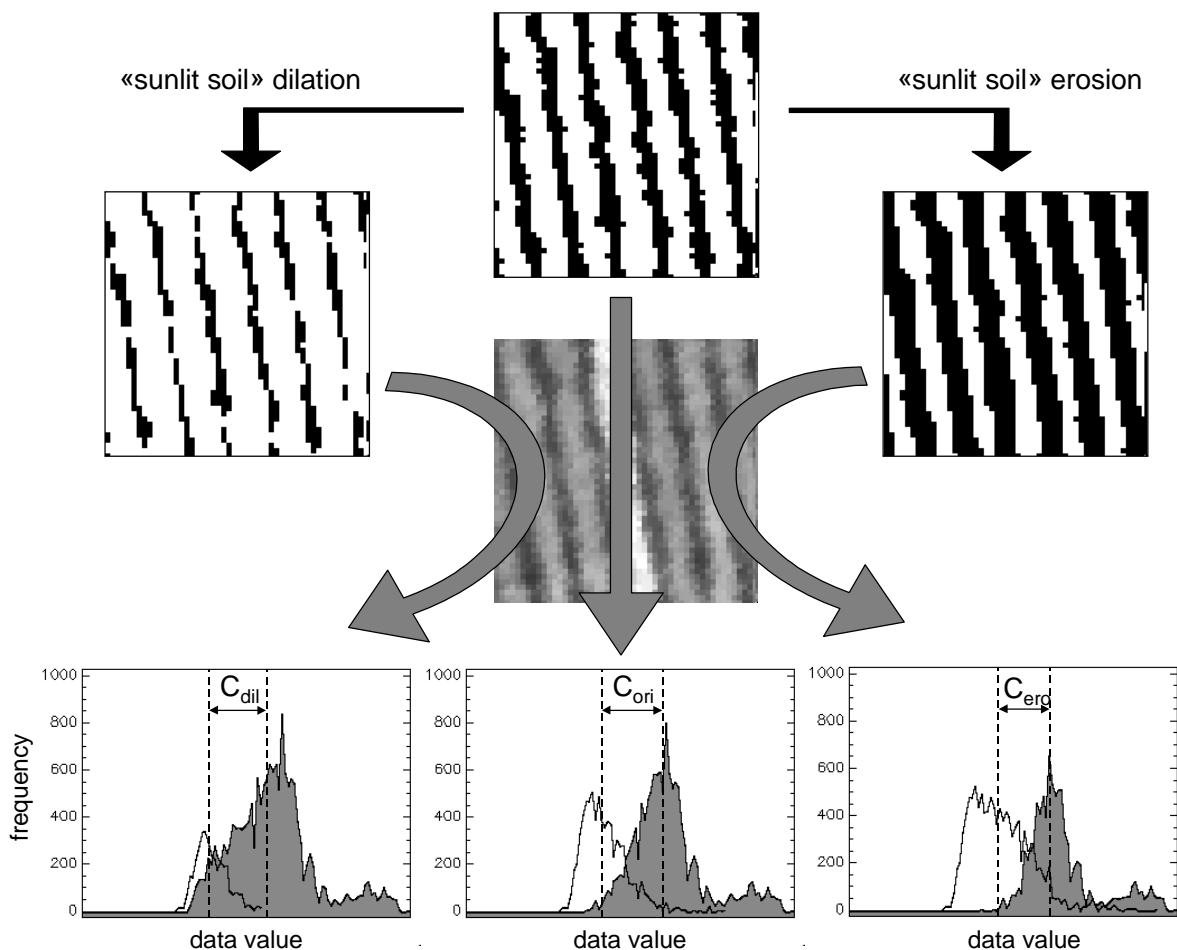


Figure 5.6 Illustration of the object delimitation by conditional erosion/dilation. The grey (resp. white) histograms correspond to the region covered by the white pixels (resp. black). The contrast between the two pixel populations obtained by application of the original (C_{ori}), the dilated (C_{dil}) and the eroded (C_{ero}) mask is indicated. In this example the original mask fits best (highest contrast). The dilated mask case shows a significant increase in variation within the "sunlit soil" pixel region.

5.3 Accuracy assessment and discussion

The visual qualitative inspection of the results obtained on the image mosaics of the four study sites at two dates (May and June 1998) shows very good performances of the method which are independent of vine training mode. The procedure also seems to comply with other robustness criteria, like the independence to absolute radiometric values and their variation as illustrated by the non-ploughed inter-row in figure 5.4.

Precise ground truth vegetation cover information or highly accurate validation data sets are nearly impossible to obtain, thereby limiting the quantitative evaluation of the method. However, an approximation of an accuracy assessment has been obtained in the following way: some low altitude images were acquired during a special accuracy assessment campaign (May 1999) to provide very high resolution images. On these scanned images (figure 5.7), the sunlit soil was manually extracted by on-screen digitalisation. Then the images and their manually produced masks were spatially degraded to a 0.25m resolution. After applying the automatic segmentation method on the 0.25m resolution images, its accuracy is assessed by comparison with the 0.25m resolution degraded manually digitised mask. This assessment results in an approximation, because the manual segmentation is not perfect and its spatial degradation induces additional error. Moreover the spatial resolution of the very high resolution images remained limited (about 6cm pixel size by flying at 250m height), because at too low altitudes the within-field view angle variation is incompatible with the per field mask adjustment (variable 'vine and shadow' size).

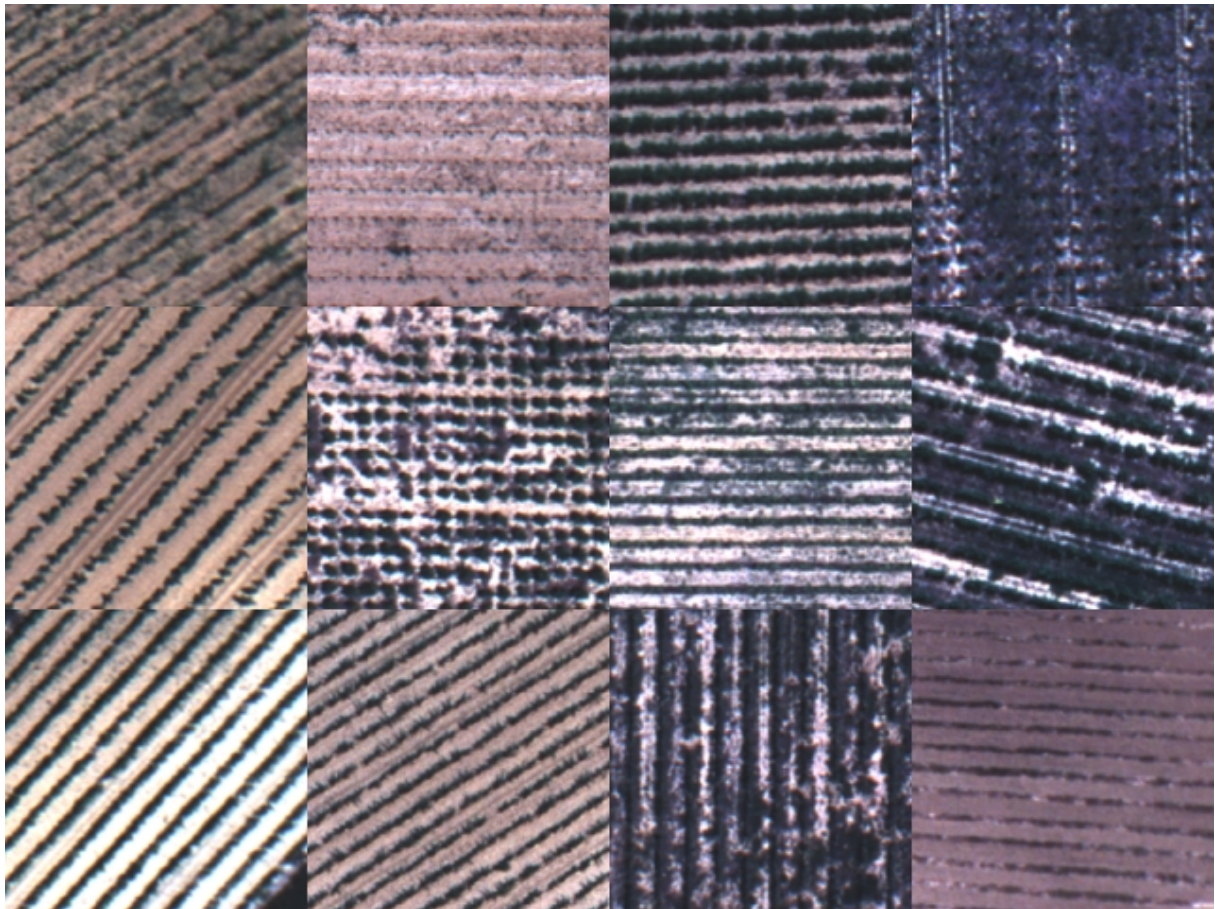


Figure 5.7 Mosaic with small parts of 12 different vine fields. The variation between these samples represents a large part of the between-field variation as found in the images due to varying geometric configuration (viewing, illumination, crop orientation), varying crop size, age and training mode, changes in soil and soil surface state.

Applying the method to the validation set (figure 5.8) allows for a number of important observations. First of all we note that the method is robust with respect to crop orientation and training mode (goblet or wire-trained). If the manually produced masks are considered 'true', we see that the vine and shadow cover estimation error generally remains below 10%, except for some cases where visually relatively little vine and shadow have been identified. Most often (figure 5.8, lower right and upper row second from left), this is related to the security built into the method to avoid an increase of variance within the initial sunlit soil pixel population. As the change upon morphological erosion is relatively important, the gap between the delimitation retained and the ground truth can remain relatively important. In some cases imperfections in the manual digitisation contribute to an increase of the error: in the upper right sample (figure 5.7) several vines that could visually not be identified were detected by the automatic method.

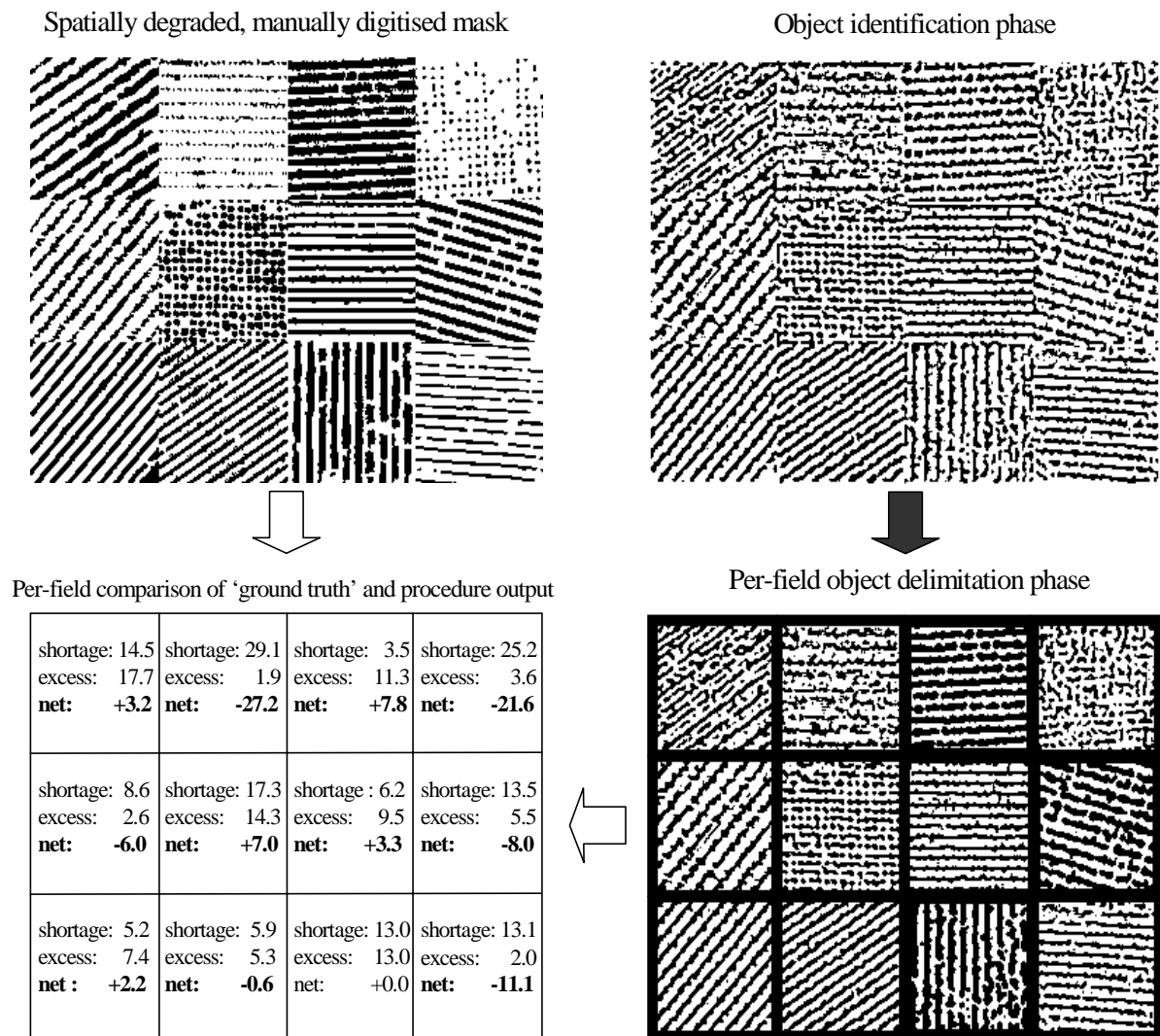


Figure 5.8 The application of the two steps of the procedure (see figures 5.4 and 5.6) on the image of figure 5.7 are shown by the binary images on the right is presented on the right. **The comparison between the final results and the manually produced 'ground truth'** are shown by the table on the lower left side (each cell corresponding to the image sample at the same location in the mosaic): shortage is the percentage of pixels visually identified as sunlit soil and not recognised as such by the procedure, excess is the inverse and net their difference, *i.e.* the accuracy of the vine and shadow cover estimation.

Generally the absolute values of *shortage* and *excess* (figure 5.8) should not be considered as serious errors as long as their values are of the same order and do not exceed 15%. The limited accuracy of the hand-delimited 'ground truth' and the resampling method used for the spatial degradation (cubic

convolution) can lead to a slight shift between the method's results and the reference mask, leading to a rapid increase in *shortage* as well as in *excess*. Only the upper left sample presents a real problem: the relatively wide spacing of the rows combined with dark lines in the middle of the inter-row forces the method to falsely identify vine in the inter-row. Fortunately such cases are very scarce.

5.4 Conclusion

The segmentation of the sunlit soil surface pixels is required for two reasons. The main objective is to obtain a population of pixels that is representative of the sunlit soil surface's reflectance and variation. A secondary objective is the estimation of the field's vine vegetation cover. This would provide one of the input parameters required by the spatially distributed hydrological model (Le Forner *et al.*, 1999).

With respect to this vegetation cover estimation we have noticed an overestimation of the vegetation cover on very young vine fields. This is not related to the impossibility of the method to produce a better delimitation, but is related to the prevalence of its calibration for the main objective. Model parameters can easily be adapted to produce an optimal mask.

Nevertheless it will remain a coarse approximation due to the relatively large cover change upon one step in the iterative erosion process. To improve the estimation of the vegetation cover, research effort should be put on the statistical analysis of the contrast change obtained over the successive erosions/dilations. The best 'vine and shadow' delimitation can very well be situated in-between two versions of the mask and even if the geographic delimitation can not be obtained, its cover may be still quantitatively estimated. Once this estimation obtained, the orthogonal vine vegetation cover can be calculated by taking into account the shadow part. All parameters required for this calculation (geometric configuration of viewing and illumination, crop orientation, slope and aspect) are available except for the plant height that can vary from 1.20m to 1.80m.

The most important and very satisfying result is that the method proposed allows for a rapid and unambiguous identification of the majority of the sunlit soil surface, independent of its radiometry and variation. The radiometry of the pixels labelled "sunlit soil surface" can now be compared to known bi-directional reflectance properties of a variety of soil surface states, *i.e.* a big step towards recognition of the soil surface state under perennial, discontinuous crops.

Depending on the research objective the method can easily be inverted to obtain a pure crop signal by masking the soil 'background'. Shaded soil pixels have then to be eliminated from the 'pure' shade and vine pixel population. The use of vegetation indices may encounter the same difficulties as those mentioned before (§ 5.2.2). Knowing the geometrical configuration (sun, view and slope azimuth and zenith angles, row orientation), a morphological approach could be developed.

5.5 L'application aux prises de vue réalisées hors saison végétative

La méthode présentée permet d'obtenir la partie de l'image d'une parcelle donnée, correspondant à la surface visible du sol éclairée, sachant qu'une partie est occultée par la présence d'un couvert végétal appartenant à la culture de la vigne. La question se pose de savoir si l'on a également besoin d'une telle méthode pendant la période de repos de la vigne, c'est à dire la période où les pieds de vigne n'ont pas de feuilles. Ils sont souvent taillés, mais peuvent aussi pendant un certain temps préserver leurs sarments.

Plusieurs considérations font penser qu'un masquage est effectivement nécessaire. Premièrement la présence des souches influence toujours localement le signal. Bien que non chlorophyllien, le bois manifeste une réflectance plus faible que la plupart des surfaces de sol rencontrées et entraîne donc une baisse d'intensité dans les pixels qui le comprennent. Deuxièmement et de façon plus importante à cette saison où l'inclinaison du soleil est faible, l'ombre influence la radiométrie d'une partie considérable du rang et même de l'interrang en fonction de son orientation (figure 5.9). L'ombre est



Figure 5.9 Une vigne en gobelet, taillée, au mois de février (2000) autour de midi (parcelle E3 706, Caux).

peu couvrante, mais le signal perçu à ces endroits est très significativement plus faible que celui de la surface éclairée autour, et entraînera donc quand même une baisse de l'intensité des pixels concernés. Dernièrement, l'absence du couvert végétal dévoile la composition du cavaillon sous-jacent. Dans bon nombre de cas la composition de surface de ce cavaillon est très distincte de celle de l'interrang. Ce phénomène est important à détecter en soi et son masquage est nécessaire afin de pouvoir s'intéresser à la pratique culturale qui s'exprime essentiellement dans l'interrang. L'application de la méthode présentée ci-dessus permet de satisfaire ces deux besoins.

En ce qui concerne ce dernier aspect, le masquage du cavaillon, la méthode présentée est censée pouvoir fournir une bonne délimitation, de la même façon que pour une vigne jeune ou rognée. La figure 5.10 suggère la validité de cette supposition. Il serait intéressant d'appliquer l'analyse fréquentielle présentée en chapitre 4 sur les images de cette saison afin de mettre en évidence de fortes différences entre l'état de la surface du sol dans l'interrang et celui sur le rang.

En même temps, il est clair que les deux autres aspects décrits – l'ombre du cep et le bois "sombre" – influencent le signal perçu d'une telle façon qu'une interprétation spectrale de tous les pixels comme appartenant à la surface éclairée n'est pas justifiée. Comme les caractéristiques autour desquelles la

méthode de segmentation a été construite – la périodicité, l'écartement typique de la culture et une différence en intensité, entre donc les pixels comprenant le cep et son ombre versus les pixels entièrement composés de la surface du sol éclairée – sont préservées, nous considérons que la méthode décrite dans ce chapitre peut fournir une délimitation acceptable de la surface du sol éclairée tout en préservant la variabilité spatiale à d'autres échelles, qui nous intéresse et qui est une des "raisons d'être" principales de la méthode.

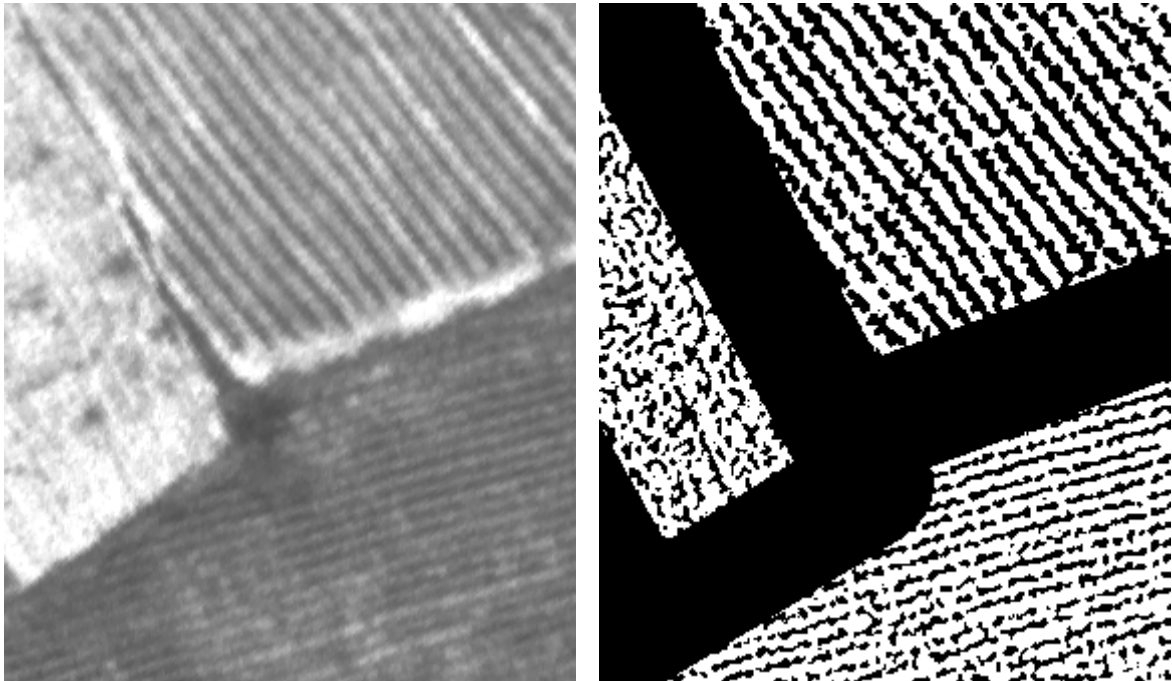


Figure 5.10 Extrait de la prise de vue d'hiver (gauche : Caux3, *i.e.* février 1999), illustrant le fort effet de la présence d'un cavaillon enherbé et sa prise en compte par la méthode de multi-résolution par parcelle (droite). La parcelle claire à gauche correspond à la parcelle E3 706 (figure 5.9).

Du fait de (1) la nécessité de prendre en compte l'effet du cep et de l'ombre, (2) l'ignorance de l'existence de méthodes mieux adaptées à cette fin que la notre, et (3) la bonne prise en compte par cette méthode des cas où la surface de l'interrang et celle du rang sont très contrastées, nous avons employé notre méthode sans modification aux images prises hors saison végétative. Il est évident que le masque résultant ne peut pas servir comme indication du recouvrement du sol. Dans les cas où la différence entre la réponse radiométrique de la surface de l'interrang et celle du rang est faible, le résultat de la méthode est plus un indicateur de la "zone d'influence radiométrique" de la vigne. Sa taille et sa localisation en soi n'ont donc pas un véritable intérêt. La taille de la surface du sol éclairée semble dans certains cas sous-estimée (ex. la parcelle E3 706 dans la figure 5.10). Ceci n'a pour autant pas d'implication pour la représentativité de la population de pixels restants et ne semble donc pas constituer un problème (contrairement à une surestimation ou la non prise en compte de l'ombre !).

Bien que nous ne voyons pas d'alternatives, il faudrait encore valider le fonctionnement de la méthode hors saison végétative de la même façon que celle présentée ci-dessus pour la saison végétative. Ceci est particulièrement important pour deux cas de figure qui risquent le plus de remettre en cause le bon fonctionnement de la méthode : une parcelle de vigne en gobelet sans cavaillon éclairée sous un angle azimutal égal à la diagonal du motif carré de plantation, et une parcelle à fort contraste entre le rang et l'interrang éclairée sous un angle azimutal perpendiculaire à l'orientation des rangs.

PARTIE IV

ANALYSE DES ÉTATS DE SURFACE

6	<i>CLASSIFICATION SPECTRALE BIDIRECTIONNELLE DES ÉTATS DE SURFACE ; L'ÉCHELLE DU PIXEL DANS L'INTERRANG.....</i>	<i>105</i>
6.1	La radiométrie bidirectionnelle des états de surface.....	105
6.2	Classification des pixels dans l'interrang éclairé	116
7	<i>DESCRIPTION DES ÉTATS DE SURFACE DE LA PARCELLE ; SYNTHÈSE DES INFORMATIONS ÉLÉMENTAIRES.....</i>	<i>131</i>
7.1	Introduction	131
7.2	Distribution spatiale des paramètres à la surface de la parcelle.....	132
7.3	Modèle de reconnaissance de discontinuités à l'échelle de l'interrang	142
7.4	Modèle de reconnaissance du faciès et de fortes discontinuités dans la parcelle	152
7.5	Conclusions	163

6 Classification spectrale bidirectionnelle des états de surface ; l'échelle du pixel dans l'interrang

Jusqu'à présent on a soigneusement contourné le problème de l'interprétation du signal radiométrique. Pour les étapes précédentes ceci était tout à fait justifié, car elles visaient justement à s'affranchir de la radiométrie absolue. Tout en nous fournissant des informations thématiques intéressantes, elles nous ont également permis de réduire fortement la gamme d'objets qui pourront être rencontrés dans les segments restants de l'image. Le temps est donc venu d'étudier de plus près la radiométrie des objets, ce que l'on fera pour la partie du spectre du visible au proche infrarouge (§ 6.1). Ensuite on étudiera les possibilités de distinguer ces objets entre eux sur la base de leur radiométrie (§ 6.2). Enfin on décrira la méthode de classification retenue et on analysera sa sensibilité.

Ce chapitre pourrait être considéré comme étant le chapitre clé de l'étude, ce qui n'est cependant que partiellement le cas vu, d'une part, le passage obligatoire par les étapes précédentes et d'autre part, la faible valeur intrinsèque de ses résultats s'ils n'avaient pas fait l'objet de ce que l'on peut appeler une *post-classification* (chapitre 7).

6.1 La radiométrie bidirectionnelle des états de surface

6.1.1 Introduction

Les étapes précédentes, incluant la reconnaissance de parcelles de vigne (chapitre 4) et de la surface du sol éclairée (chapitre 5), nous permettent d'identifier des pixels correspondants à une surface de sol entre des ceps de vigne supposée éclairée directement par le soleil. Celle-ci peut être considérée comme composée d'un ou plusieurs des objets suivants (§ 2.1) : sarments, feuilles mortes, herbes sèches ou chlorophylliennes, cailloux/gravier, mottes de terre et croûtes.

La question à laquelle on doit répondre à ce stade est "À quel point se distinguent les comportements radiométriques bidirectionnels de ces différents objets ?" Ces objets ne se présentent pas forcément à l'état "pur", mais se trouvent sur le terrain dans leurs différents états et combinaisons que l'on peut rencontrer à l'échelle spatiale d'observation choisie.

Des mesures radiométriques de terrain à cette échelle fournissent la réponse à la question. Les comportements ainsi mesurés ont ensuite fait l'objet d'une modélisation. Sous certaines hypothèses nous verrons que ces comportements modélisés nous permettent d'établir des classes spectrales pour différents états de surface.

Dans la littérature en télédétection on tient pour l'instant rarement compte des propriétés bidirectionnelles des objets – les éléments de l'état de surface dans notre cas – sur la réflectance perçue. Nous insistons dans ce chapitre sur l'importance de l'aspect bidirectionnel de la réflectance. Il y a plusieurs explications à cela :

1. premièrement nous rappellerons les principaux résultats de la littérature : nos objets se distinguent surtout par leur intensité, et peu par la forme de leur spectre de réflectance tel qu'il peut être décrit par des indices spectraux. L'intensité dans les différentes parties du spectre réflectif de chaque

objet possède un comportement bidirectionnel spécifique. Ce comportement peut fortement dévier d'un comportement lambertien, *i.e.* un comportement où la réflectance est indépendante des angles de visée et d'incidence. Faute de mieux, l'hypothèse du comportement lambertien reste actuellement la pratique la plus communément admise en télédétection. Sandmeier & Itten (1997), par exemple, tiennent compte en milieu montagneux de l'ombrage des versants et de l'éclairement indirect par les versants voisins en fonction de la position du soleil, mais ils supposent que les surfaces des montagnes ont un comportement lambertien. Les témoignages contredisant cette hypothèse sont cependant nombreux. En ce qui concerne la surface du sol minéral, Courault (1989) et Cierniewski & Verbrugge (1997) constatent que les sols n'ont pas un comportement lambertien et que leur comportement bidirectionnel est fortement influencé par la rugosité de la surface. Selon Rahman *et al.* (1993-1), la variation angulaire du signal a historiquement été la source principale de l'information sur les processus physiques qui ont produit le rayonnement perçu, propos soutenu par une liste de références. Il est donc grand temps de s'y intéresser ;

2. La perturbation liée au comportement bidirectionnel est bien connue en télédétection aérienne. Clevers & van Stokkum (1992) et King (1991) l'ont encore constaté pour respectivement la photographie et la vidéo aéroportée, sans pour autant pouvoir y remédier. Nous pouvons nous attendre à des effets similaires, sinon plus forts encore, vu que la courte distance focale utilisée nous fournit une gamme importante d'angles zénithaux de vue (0° à 35°) ; nous avons pu apprécier visuellement cet effet en regardant les zones couvertes par plusieurs clichés. Le Men & Boldo (2000) proposent une méthode de correction simple de photographies afin de faciliter la photo-interprétation de mosaïques, mais ils reconnaissent que les résultats ne se prêtent pas à des fins d'interprétation (quantitative, *ed.*) ;
3. Peu après ces constatations sur le caractère non lambertien des surfaces, les premiers modèles réellement opérationnels décrivant leur comportement bidirectionnel ont été publiés. Il nous est désormais possible de décrire et ensuite prédire ce comportement par la Fonction de Distribution Bidirectionnelle de la Réflectance (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF). La BRDF est définie comme la fonction décrivant la distribution angulaire de la radiation sortante d'une surface donnée. Elle est une propriété physique fondamentale et intrinsèque de la surface. Il existe actuellement différents types de modèles de BRDF : des modèles à bases physiques, mais peu opérationnels vu le grand nombre de paramètres requis (et ne s'appliquant pas à des surfaces hétérogènes comme les nôtres), des modèles statistiques quelque peu *ad hoc* et des modèles semi-empiriques. Ce dernier groupe nous intéresse plus particulièrement car il s'agit de modèles opérationnels, pouvant être validés et dont les modules représentent au mieux la compréhension physique qualitative des interactions entre le champ de rayonnement et la surface. Une communauté scientifique importante s'intéresse à ces problèmes de modélisation semi-empirique. De nouveaux modèles sont constamment mis au point. Parmi les plus connus on peut citer Jacquemoud *et al.* (1993), Rahman *et al.* (1993-2), Roujean *et al.* (1992) et le modèle *RossThickLiSparse* (Wanner *et al.*, 1995). Parmi les derniers-nés on cite ceux de Despan *et al.* (1999), Mishchenko *et al.* (1999) et Roujean (2000).

Le premier point mérite qu'on y revienne. Les rapports entre les canaux, traditionnellement exprimés par des indices spectraux comme le NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*), sont utilisés pour extraire l'information sur les objets à partir de la variation spectrale de réflectance, et cherchent à minimiser l'effet perturbant de la BRDF. On s'est cependant rendu compte que ces indices ne sont pas insensibles aux effets directionnels (Chopping, 1998 ; Gemmell & McDonald, 2000). Il est donc nécessaire d'étudier de plus près le comportement bidirectionnel de la réflectance, tant pour l'interprétation de l'information contenue dans sa valeur absolue que pour celle contenue dans le rapport entre les canaux.

Dans le paragraphe 2.3.3 on a constaté l'importance de l'échelle d'observation pour l'étude du comportement bidirectionnel. Lors des chapitres précédents nous avons vu et souligné l'importance d'une échelle d'observation adaptée. Il en est de même ici, mais il n'est plus question d'un choix car nous avons atteint le niveau maximal, celui de la résolution élémentaire. Les résultats présentés par la suite sont fortement imprégnés de l'effet de cette contrainte.

6.1.2 Matériel et méthodes

6.1.2.1 les mesures

Distribués de façon stratifié à travers la vallée de la Peyne, 37 ensembles de mesures radiométriques ont été effectués à l'aide d'un dispositif goniométrique (§ 3.2.4). Un radiomètre CIMEL est fixé à une hauteur de 1.75m (fig. 6.1). La surface d'intégration correspondante au sol est un cercle de 0.35m de diamètre. Cette surface est quelque peu supérieure à la surface couverte par nos pixels (0.25×0.25 m), mais aux endroits observés cette différence d'échelle a montré ne pas avoir d'effets significatifs sur la radiométrie. Les mesures ont été effectuées au cours de l'été de l'année 1999, dans une gamme de temps relativement restreinte (de 10h30 à 16h30, temps local). Les endroits observés représentent les différents états de surface que l'on peut rencontrer à travers la vallée de la Peyne durant le cycle annuel (annexe 2B, représentant 29 des 37 sites observés). Leur nombre est supposé suffisant pour couvrir la grande majorité de la variabilité spectrale observable.

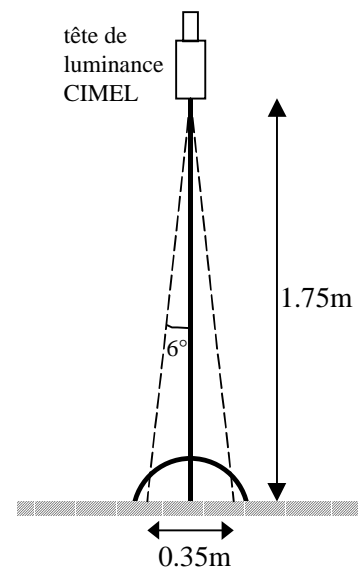


Figure 6.1 Géométrie du dispositif de mesures radiométriques de terrain.

Sur chacun des 37 sites, on a acquis 25 mesures de la réflectance dans les trois bandes spectrales (vert : $0.50-0.59\mu\text{m}$; rouge : $0.61-0.68\mu\text{m}$; proche infrarouge : $0.79-0.89\mu\text{m}$), correspondant à des angles zénithaux variant par pas de 10° de -60° à 60° , dans le plan du soleil et perpendiculairement à ce plan. Il importe que le dispositif soit bien calé afin qu'en position 0° la tête de luminance mesure effectivement au nadir, mais il importe également d'effectuer l'ensemble des mesures dans le moins de temps possible, compte tenu de la rapidité de la variation azimutale du soleil.

6.1.2.2 description du comportement réflectif bidirectionnel

Par inversion d'un modèle de BRDF sur un jeu d'observations angulaires, on estime les valeurs des paramètres définissant la surface étudiée. Ces paramètres nous permettront d'étudier les différences entre les différents types de surfaces et la variation possible pour un même type de surface.

Les différents modèles semi-empiriques de BRDF sont conçus pour des applications et des types de surfaces plus ou moins spécifiques. Celui de Jacquemoud *et al.* (1993) par exemple est un modèle spécial pour les sols nus. Celui de Despan *et al.* (1999) est même spécialement destiné aux surfaces de sol rugueuses. Nous recherchons pour notre application un modèle dont nous pouvons attendre de bons résultats sur l'ensemble de nos surfaces, rugueuses ou non, caillouteuses ou non, enherbées ou non, etc. Privette *et al.* (1997) ont testé une dizaine de modèles semi-empiriques. Ils constatent que la précision du modèle dépend fortement de la gamme d'angles couverts par les données d'entrée à l'inversion. Les modèles ont été testés sur une grande variété de couverts naturels. Dans l'ensemble les modèles de Rahman *et al.* (1993-2) et le *RossThickLiSparse* s'avèrent les meilleurs. Nous avons choisi le modèle de Rahman *et al.* (appelé RPV par la suite), pour sa simplicité : il caractérise les surfaces

par seulement trois paramètres (formule 6.1). Son bon fonctionnement sur différentes surfaces a été confirmé par Kalluri *et al.* (1997).

Le modèle RPV définit la réflectance ρ_s d'une surface éclairée dans une direction (θ_1, ϕ_1) et observée dans la direction (θ_2, ϕ_2) de la façon suivante :

$$\rho(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2) = \rho_0 \frac{\cos^{k-1} \theta_1 \cos^{k-1} \theta_2}{(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^{1-k}} \cdot F(g) [1 + R(G)] \quad (6.1)$$

où θ est l'angle zénithal, ϕ l'angle azimutal, k un paramètre empirique définissant la pente de la réflectance par rapport aux angles d'éclairage et d'illumination, et le paramètre empirique ρ_0 caractérise l'intensité de la réflectance de la surface. Ce dernier paramètre ne doit pas être confondu avec un paramètre physique comme l'albédo de simple diffusion. $F(g)$ est une fonction qui règle les contributions de la rétrodiffusion et de la diffusion avant. $[1+R(G)]$ prend en compte l'augmentation du pic du *hot spot*. Le *hot spot*, ou 'point chaud', est la zone où l'on ne voit pas d'ombre ($\theta_1 = \theta_2$ et $\phi_1 = \phi_2$). $F(g)$ est définie comme

$$F(g) = \frac{1 - \Theta^2}{[1 + \Theta^2 - 2\Theta \cos(\pi - g)]^{1.5}} \quad (6.2)$$

où Θ contrôle la quantité relative de diffusion avant ($0 < \Theta < +1$) et de rétrodiffusion ($-1 < \Theta < 0$). Dans cette fonction "l'angle de phase" g est donné par

$$\cos g = \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (6.3)$$

L'effet de *hot spot* est approximativement pris en compte par la simple fonction

$$1 + R(G) = 1 + \frac{1 - \rho_0}{1 + G} \quad (6.4)$$

où le facteur géométrique G est donné par

$$G = [\tan^2 \theta_1 + \tan^2 \theta_2 - 2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)]^{1/2} \quad (6.5)$$

Les seules inconnues sont donc les paramètres ρ_0 (\approx l'intensité), k (\approx l'anisotropie) et Θ (\approx degré de rétrodiffusion). Les valeurs de ces paramètres peuvent être obtenues par inversion de ce modèle sur le jeu de mesures réalisé sur le terrain. Cette inversion a été réalisée en minimalisant de manière itérative (méthode SIMPLEX) une fonction d'erreur qui se réduit souvent à la somme des carrés des écarts. La figure 6.2 est un exemple des résultats obtenus par cette procédure.

6.1.3 Les mesures goniométriques

Plusieurs leçons peuvent être tirées des mesures radiométriques bidirectionnelles. La figure 6.2 nous montre que même les surfaces planes à l'œil nu et encroûtées ont un comportement rétrodiffusant marqué. Ceci semble confirmer l'hypothèse posée dans le paragraphe 2.3.3, *i.e.* que seules les croûtes

sédimentaires peuvent être plus ou moins spéculaires à l'échelle d'observation donnée. Perpendiculairement au plan du soleil, l'influence de l'angle de vue est négligeable pour cette surface. Le rapport entre les canaux semble relativement constant.

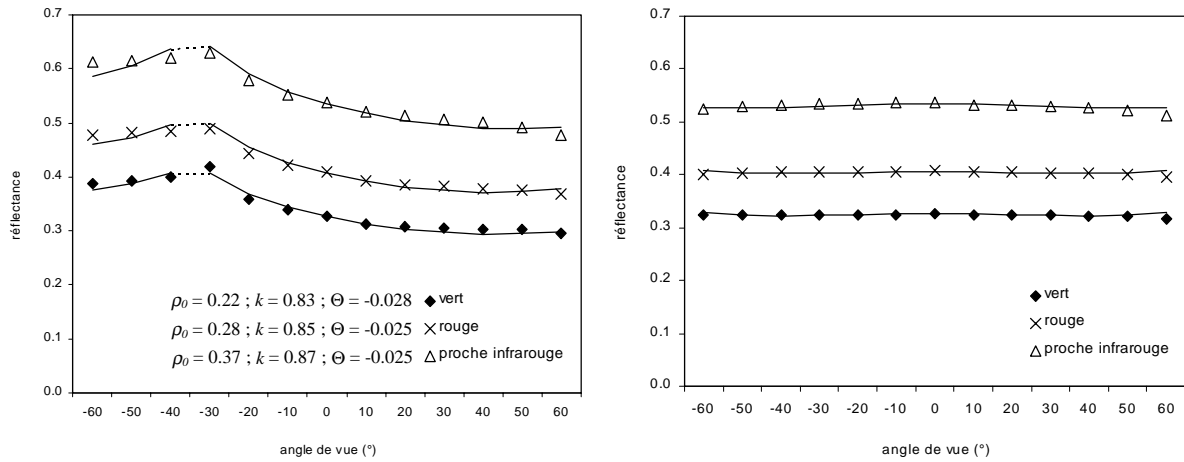


Figure 6.2 Exemple des résultats de l'inversion du modèle BRDF. Les observations proviennent d'une surface encroûtée avec un très faible taux de graviers, mesurées dans le plan du soleil (gauche, angle négatif : rétrodiffusion, *i.e.* soleil "dans le dos") et perpendiculaire à ce plan (droite). Les prédictions du modèle (courbes) s'ajustent bien aux observations ($R^2_{\text{vert}}=0.96$; $R^2_{\text{rouge}}=0.96$; $R^2_{\text{pi}}=0.95$). L'angle zénithal du soleil est de 33° . Le pic du *hot spot* n'est pas représenté, car il ne peut être mesuré (ombre du capteur).

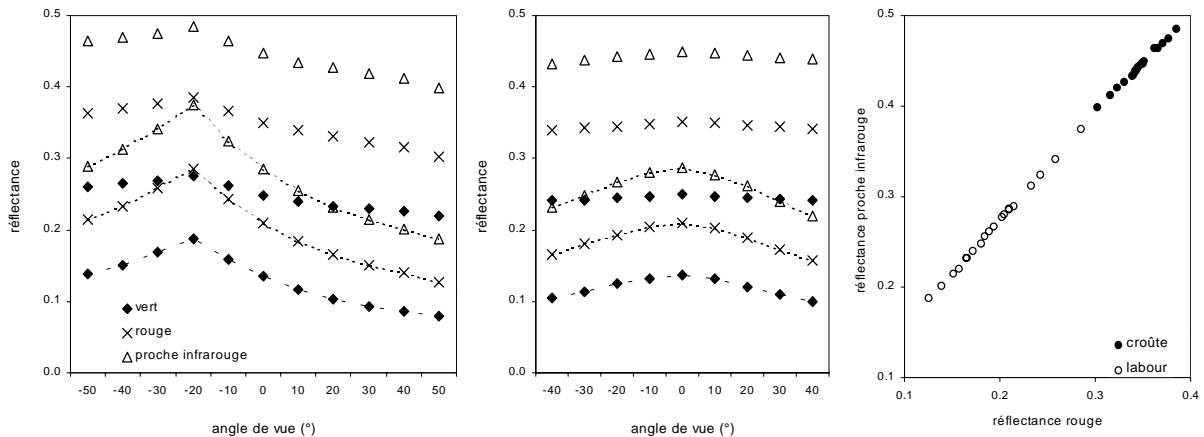


Figure 6.3 Comportement spectral et bidirectionnel d'une surface labourée (symboles reliés par tirets) et encroûtée (symboles seuls) d'un même sol (plateau Pliocène, Roujan), sous un angle zénithal d'éclairage de 20° . Gauche : plan du soleil (positif : contre-jour ; négatif : rétrodiffusion) ; milieu : perpendiculairement au plan du soleil ; droite : rapport entre les canaux spectraux du rouge et proche infrarouge.

La figure 6.3 permet de comparer l'effet du labour du sol en montrant le comportement d'une surface encroûtée (C3, annexe 2B) et d'une surface labourée (L5, annexe 2B) situées à quelques mètres l'une de l'autre. Le sol labouré a un très fort comportement rétrodiffusif, beaucoup plus marqué que celui du sol encroûté. Dans le plan perpendiculaire au soleil l'augmentation de la partie visible de l'ombre induit une diminution en réflectance quand l'angle zénithal de vue augmente. Il est important à noter que la réflectance de chaque canal dans la gamme d'angles zénithaux de 0 à 50° pour la surface labourée reste inférieure à celle de la surface encroûtée. Pour la distinction entre ces deux cas relativement extrêmes sur la base de l'intensité, la prise en compte des conditions de vue ne semble donc pas indispensable. En revanche la figure 6.3 montre clairement que les rapports spectraux ne permettront nullement de distinguer entre les deux types de surface. L'ensemble des observations sur

les deux types de surface nous fournit un rapport linéaire et constant, bien connu comme la *droite de sols* (Jacquemoud *et al.*, 1993 ; Escadafal, 1994 ; Mathieu *et al.*, 1997).

Si l'on introduit dans l'état de surface observé des composants autres que ceux du sol minéral on note une forte variation spectrale. La figure 6.4 le montre pour différentes surfaces comme une surface à fort taux (plus de 60%) d'herbe chlorophyllienne (H3, voir annexe 2B), une surface identique mais à un taux d'herbe plus faible (I3) et une surface à fort taux d'herbe très peu chlorophyllienne (H4). La droite du sol de la figure 6.3 est représentée pour comparaison. On peut supposer qu'en absence des composants organiques les observations seraient projetées sur la partie supérieure de la droite de la figure 6.3, car les surfaces minérales sous-jacentes ne sont pas labourées. L'effet de leur présence réduit fortement la réflectance dans le rouge. La réponse radiométrique dans le proche infrarouge varie en fonction de l'espèce, de la structure et du taux de recouvrement de l'herbe : l'herbe verte réduit très fortement la réponse du canal rouge en maintenant celle du proche infrarouge autour du même niveau (augmentation due à la chlorophylle annulée par diminution due à l'ombre ; H3), mais la moindre diminution en recouvrement entraîne une forte chute dans le proche infrarouge.

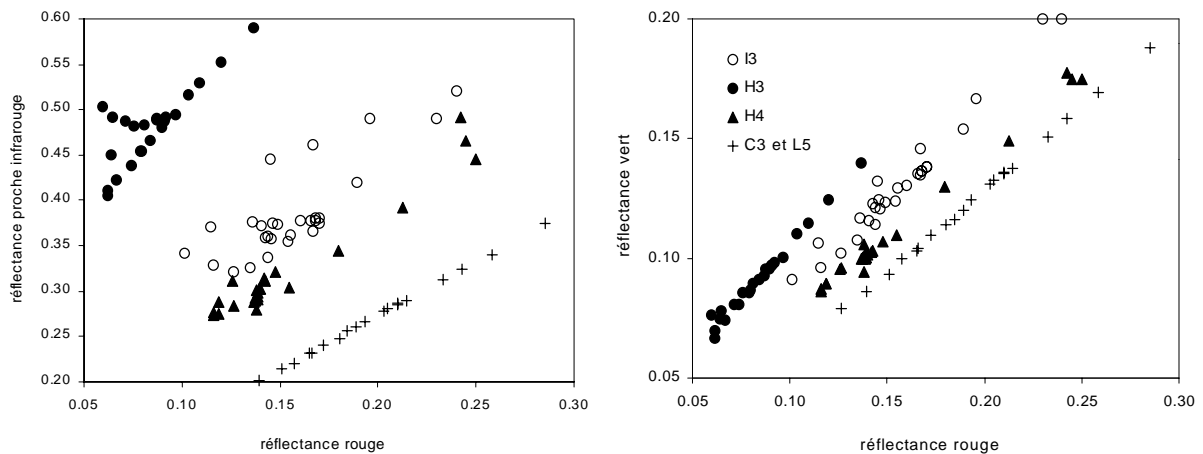


Figure 6.4 Rapports entre les trois canaux spectraux obtenus par mesures goniométriques sur les sites I3, H3 et H4 (annexe 2B). Les "+" correspondent à (une partie de) la droite de la figure 6.3.

Les relations entre le rouge et le proche infrarouge sont beaucoup moins régulières dans ces cas de recouvrement par composants végétaux (diagramme de gauche de la figure 6.4) : le comportement bidirectionnel n'est pas identique entre le proche infrarouge d'un côté et le rouge et le vert de l'autre. Le rapport des canaux rouge et vert nous fournit une relation beaucoup plus régulière (diagramme de droite). De plus les droites ainsi obtenues passent toutes assez près de l'origine. Le rapport des réflectances rouges et vertes permet donc de les caractériser. Ces rapports semblent distincts pour un enherbement chlorophyllien de ceux de la surface du sol minéral, même si le recouvrement est partiel. Un enherbement très peu ou non chlorophyllien à recouvrement incomplet (de la surface d'intégration) semble peu différent d'une surface minérale labourée, tant en rapport spectral qu'en intensité.

L'information fournie par le proche infrarouge ne sera plus considérée par la suite car (1) nos photographies couleur ne la fournissent malheureusement pas ; (2) sa seule utilité serait de permettre le calcul d'un indice spectral comme le NDVI, peu significatif du point de vue hydrologique et par ailleurs influencé par la géométrie de vue et d'éclairement ; (3) des mesures de terrain sur panneau de référence ont mis en évidence une influence considérable de l'éclairement indirect entre les rangs de vigne : en fonction de l'orientation des rangs par rapport au soleil, la réflectance dans le proche infrarouge montre une augmentation relative de 4 à 10%.

Il nous reste deux informations : l'intensité, fonction de la géométrie de vue et d'éclairement, et le rapport entre les canaux rouge et vert, indépendant de la configuration géométrique. Pour l'intensité

nous ne choisissons pas un indice de luminosité ou de brillance comme proposé par Mathieu *et al.* (1997). Nous avons préféré utiliser les paramètres obtenus par inversion du modèle BRDF sur les mesures de réflectance directionnelle d'un des deux canaux. Le canal rouge est considéré comme étant le canal le plus pertinent pour la distinction entre nos objets : les écarts absolus en réflectance entre objets sombres et clairs sont plus significatifs que ceux du vert (courbe spectrale ascendante) et l'effet des composantes végétales moins ambigu et plus significatif (diminution du signal à cause de l'ombre et des propriétés spectrales, chlorophylliennes ou pas). De plus on espère éviter au maximum l'influence d'éventuelles variations dans la composition minéralogique du sol (§ 6.2.3.3). Les sols les plus fersallitiques sont plus rouges à cause de phénomènes d'absorption dans la bande verte du spectre. À côté du canal rouge et d'un indice spectral utilisant les deux, le canal vert serait redondant.

Différents indices spectraux basés sur le rouge et le vert peuvent être trouvés dans la littérature ; ils sont souvent utilisés dans le but de reconnaître les sols les plus rouges (*i.e.* riches en fer). Mathieu *et al.* (1997) en propose plusieurs dont l'indice de rougeur ($\text{rouge}^2/\text{vert}^2$) et l'indice de couleur ($(\text{rouge}-\text{vert})/(\text{rouge}+\text{vert})$). On a retenu le dernier sur une base empirique et pour sa ressemblance avec le NDVI.

Le comportement réflectif bidirectionnel des surfaces observées par le dispositif goniométrique peut maintenant être décrit et prédit par seulement quatre paramètres : les trois paramètres de la BRDF (appelé *triplet* par la suite) pour le canal rouge et l'indice de couleur (figure 6.5). On voit que l'indice de couleur dépasse dans certains cas le seuil de 0, mais reste très majoritairement négatif sans passer en dessous -0.35 . Comme pour l'indice de couleur, les valeurs obtenues pour les paramètres de la BRDF varient dans une gamme relativement continue sans que l'on puisse y distinguer des agglomérations témoignant de la présence de différents types de surface à comportement réflectif bidirectionnel distinct. Le paramètre k reste entre 0.5 et 1.0, ce qui révèle une anisotropie relativement faible ; Θ varie de -0.3 , *i.e.* une forte rétrodiffusion, à autour de 0.0, *i.e.* quasiment lambertien dans le plan du soleil ; ρ_0 varie de très sombre, près de 0.0, à 0.35.

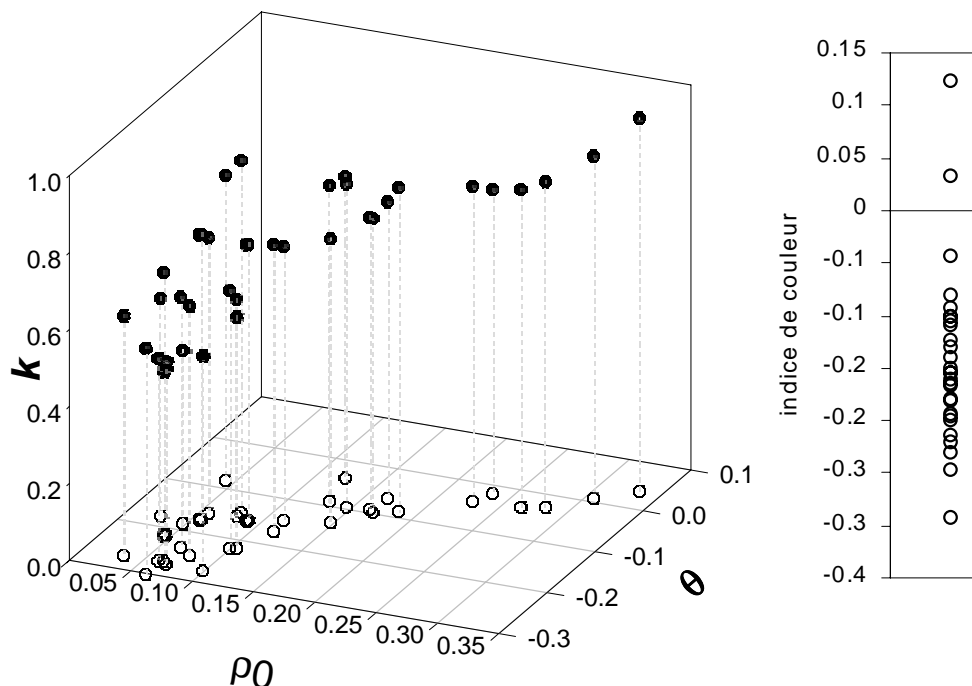


Figure 6.5 Les 4 paramètres décrivant le comportement réflectif bidirectionnel de tous les sites observés ($\rho_0 \approx$ l'intensité, $k \approx$ l'anisotropie, $\Theta \approx$ degré de rétrodiffusion, et l'indice de couleur).

6.1.4 Les surfaces à comportement réfléchissant bidirectionnel distinct

Dans l'image, chaque pixel de la surface du sol éclairée des vignobles devra être affecté *in fine* à une classe, décrivant le plus précisément possible son comportement hydrologique, à l'aide de l'information spectrale et bidirectionnelle. Avant d'aborder la classification proprement dite (§ 6.2), il nous faut (1) définir les états de surface que nous souhaitons distinguer et étudier leur comportement spectral et bidirectionnel pour (2) aboutir à la définition de classes *hydro-spectrales*, *i.e.* des états de surface à comportement distinct, tant au niveau hydrologique qu'au niveau spectral bidirectionnel.

6.1.4.1 les classes hydrologiques

Dans les chapitres 4 et 5 nous nous sommes intéressés à des paramètres intervenant dans l'écoulement (orientation des rangs et de son éventuel cavaillon) ou modifiant le flux d'eau en entrée (couverture végétal de la vigne). Les classes hydrologiques à l'échelle du pixel d'interrang éclairé concernent principalement les propriétés infiltrométriques de la surface. En fonction de la description des états de surface établie en chapitre 2, de leur variabilité dans la zone d'étude et dans le temps et de leur signification hydrologique, on propose les classes suivantes à l'échelle du pixel de mesure :

- surface labourée ;
- surface à faciès intermédiaire ;
- surface encroûtée ;
- surface à fort taux de cailloux ;
- surface à fort enherbement ;
- surface à fort recouvrement de sarments et feuilles mortes.

L'annexe 2B montre la répartition des surfaces observées via le dispositif goniométrique sur ces classes (notez que 8 surfaces sur un total de 37 ne sont pas représentées, dont trois labourées, deux encroûtées et trois partiellement enherbées). Il s'agit des facteurs principaux qui n'excluent pas que d'autres facteurs influencent simultanément et de façon significative le comportement hydrologique (*i.e.* infiltrométrique) de la surface (par exemple un faciès intermédiaire sous un fort enherbement, ou encore un fort taux de cailloux recouvert de sarments). Cette dominance peut être plus ou moins forte, liant ainsi les différentes classes entre elles dans un "espace" continu.

Cette continuité est représentée dans notre jeu d'observations par les sites marqués "combinaison" (annexe 2B). Même si du point de vue hydrologique on peut désigner un facteur comme étant prédominant et permettant sa classification, d'autres facteurs y sont présents, et peuvent avoir une influence sur le comportement spectral et/ou bidirectionnel de la surface. Ceci explique donc également la continuité du point de vue spectral et bidirectionnel, telle qu'elle est constatée dans le paragraphe précédent. Une croûte caillouteuse, comme A6 par exemple, composée de graviers relativement fins entre lesquels on aperçoit de la matière fine en forme de croûte se retrouve dans la figure 6.6 parmi les surfaces encroûtées. Une surface à faciès intermédiaire, mais partiellement couverte d'herbe verte comme I3 voit son indice de couleur fortement augmenter et son ρ_0 diminuer (fig. 6.6).

La figure 6.6 nous permet d'évaluer le comportement réfléchissant de chaque classe hydrologique. Les sols nus croûtés et les sols labourés ont des triplets bien regroupés et séparés, tant en k , qu'en ρ_0 , et en Θ . Ces groupes sont liés entre eux par les faciès intermédiaires et les croûtes caillouteuses. La variabilité au sein de ces deux derniers groupes paraît plus élevée. Ceci est lié à leur définition ; les surfaces labourées et encroûtées représentent une seule situation physique, tandis qu'un faciès intermédiaire varie de F0/F1 à F1/F2 (Boiffin & Bresson, 1987) et le taux de recouvrement par les cailloux (de taille

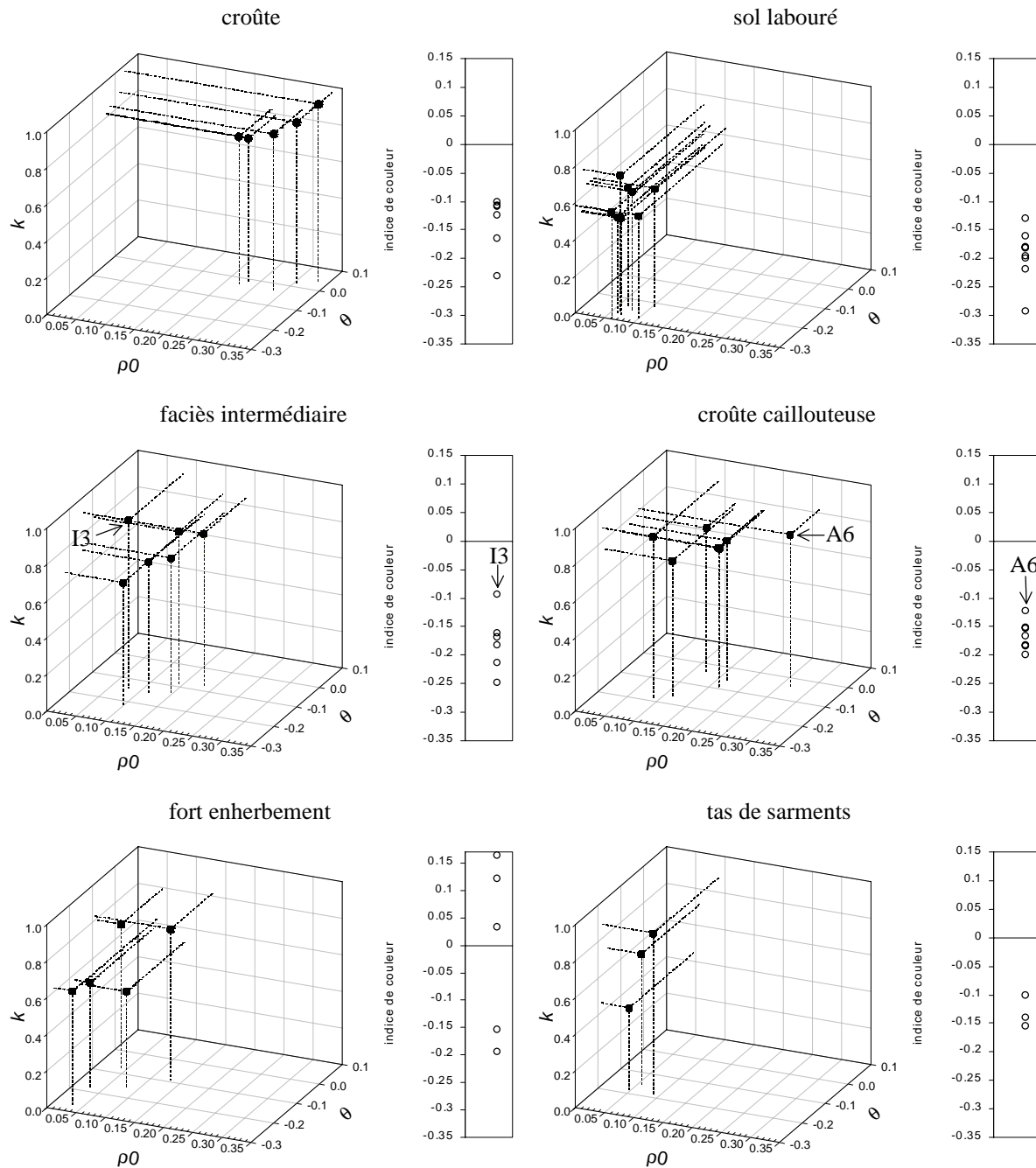


Figure 6.6 Triplets BRDF et indice de couleur des sites observés, regroupés par classe hydrologique.

variable, voir le cas d'A6 mentionné auparavant) d'une croûte caillouteuse varie d'environ 70% à 100%. De plus, dans le cas des combinaisons (annexe 2B), d'autres composants peuvent considérablement modifier le comportement réfléchif, même s'ils sont peu significatifs du point de vue hydrologique. On note dans ce cadre, que les composantes végétales (les débris organiques et l'herbe) font toujours baisser l'intensité dans le rouge, *i.e.* ρ_0 . Ceci peut également se produire sur des surfaces encroûtées : même si ici aucun exemple n'est présenté, il est clair que la variabilité interne de cette classe s'en trouverait augmentée, notamment sur l'axe ρ_0 .

Toutes ces surfaces majoritairement minérales ont un indice de couleur variant de -0.1 à -0.25 , *i.e.* une couleur de brun-jaunâtre à brun. Uniquement dans le cas d'un sol labouré rougeâtre, l'indice descend en dessous de -0.25 . C'est seulement en présence d'herbe verte que l'indice peut dépasser le seuil de -0.1 (voir le cas d'I3 mentionné auparavant).

L'indice de couleur de surfaces enherbées ou couvertes de sarments varie dans la même gamme que celle des surfaces minérales. Dans le cas d'un recouvrement majoritairement chlorophyllien, l'indice de couleur est supérieur à cette gamme et peut très bien être positif. Ces surfaces sont plus ou moins rétrodiffusives et relativement sombre (ρ_0 bas). L'herbe verte est plus sombre que l'herbe sénescente, mais du même ordre que les sarments.

6.1.4.2 les classes hydro-spectrales

Comment créer des classes *hydro-spectrales*, correspondant à des groupes d'états de surface à l'intérieur desquels le comportement tant hydrologique que radiométrique est supposé varier faiblement ?

Un découpage de l'espace continu décrit par les triplets BRDF et l'indice de couleur s'impose. On a choisi de délimiter des zones "homogènes", sans recouvrement dans cet espace autour des individus appartenant à au moins 90% à une des classes hydrologiques. Ceci a deux implications : (1) on accepte d'attribuer certains cas intermédiaires d'une classe à la classe voisine si leur séparation l'impose, car le comportement hydrologique de ces cas intermédiaires est proche de celui de la classe voisine ; (2) de créer une classe combinée là où des classes hydrologiques se recouvrent fortement.

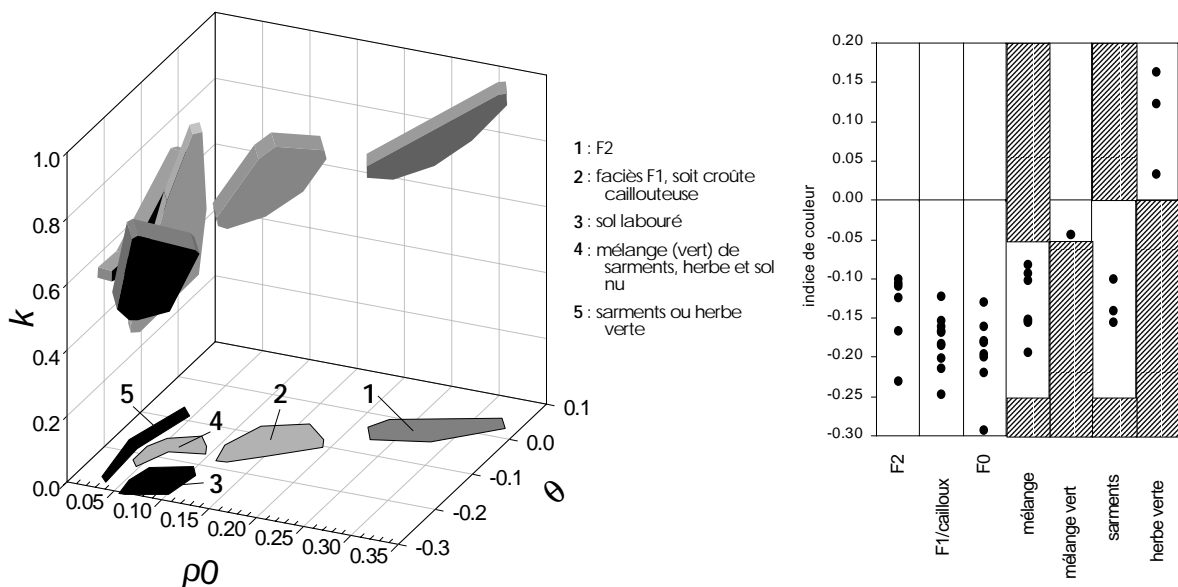


Figure 6.7 Les critères spectraux définissant les classes *hydro-spectrales*. Gauche : les triplets BRDF définissant la réponse du canal rouge. Droite : les classes finales obtenues par seuillage sur indice de couleur (rayures = gamme non autorisée).

La présence de composantes organiques, considérées comme étant peu significatives du point de vue hydrologique, peut significativement modifier le comportement spectral d'une surface. Dans l'espace des triplets BRDF, ces surfaces se situent ainsi en dehors des zones délimitées, mais elles ont une signification hydrologique au sens où elles excluent le labour du sol (où l'on suppose ne pas trouver de composantes organiques à la surface) et une prédominance d'herbes ou sarments. Elles permettent de délimiter une zone supplémentaire dans l'espace des triplets de BRDF, dénommée *mélange*, à l'intérieur de laquelle l'indice de couleur apporte une précision sur la nature du mélange en déterminant une composante chlorophyllienne. Du point de vue hydrologique cette classe correspond à un faciès intermédiaire ou fermé, plus ou moins caillouteux.

La figure 6.7 montre les classes à comportement réflectif distinct ainsi obtenues et leur limites. Bien que le paramètre k paraît peu discriminant, il est représenté car sa valeur absolue est requise par le

modèle BRDF. La signification hydrologique des classes est décrite dans le tableau 6.1. A propos des changements par rapport aux classes hydrologiques présentées précédemment (§ 6.1.4.1), on remarque le regroupement de la classe faciès intermédiaire et la classe croûte caillouteuse. L'herbe sèche a du être incorporée dans la classe *mélange*. Son taux de recouvrement détermine en grande partie sa position à l'intérieur de cette classe à large gamme d'intensité (ρ_0). L'herbe verte à recouvrement quasi général forme une classe de triplets BRDF avec les concentrations de sarments, mais s'en distingue par son indice de couleur. Les seuils appliqués à l'indice spectral ont été établis visuellement. Un seuil inférieur a empiriquement été établi pour la classe *mélange* afin de la distinguer de certains sols labourés rouges (§ 6.2). Son niveau est indicatif et importe peu car l'indice de couleur de la classe *mélange* n'approche jamais ce niveau.

Classe	Description	Exemples
F2	surface plane encroûtée composée entièrement de matière minérale. Les cailloux, lorsqu'ils sont présents, ne dépassent pas la taille de graviers et sont "noyés" (incorporés dans la croûte et ne projetant pas d'ombre) ;	C1 à C4, A6
F1/cailloux	surface composée principalement de matière minérale, soit à faciès intermédiaire, soit à fort taux de cailloux. Une présence sporadique de sarments est possible ;	I1, I2, I4, A1, A2, A3, A4, A7
F0	surface labourée, pouvant avoir subi un début de fermeture du faciès après une faible précipitation ;	L1 à L6
mélange non vert	surface à faciès intermédiaire ou fermé, avec un taux de cailloux variable et en partie couverte par de l'herbe sèche, des sarments, des feuilles mortes ou une combinaison de ces composants. Une partie du sol minéral reste visible, mais n'est pas forcément éclairée ;	H4, H5, A5
mélange vert	idem, mais une partie considérable de la surface (un quart à la moitié) est couverte par de l'herbe verte ;	I3
herbe verte	près des trois quarts ou plus de la surface est couverte par de l'herbe chlorophyllienne ;	H1 à H3
sarments	près de trois quarts ou plus de la surface est couverte par des sarments et/ou feuilles mortes.	S1 à S3

Tableau 6.1 Classes hydro-spectrales d'états de surface à l'échelle du pixel. Les exemples concernent les échantillons présentés en annexe 2B.

6.1.5 Conclusions

Les classes ainsi créées sont entièrement distincts, c.-à-d. que leurs comportements réfléchifs bidirectionnels n'ont pas de recouvrement entre eux, ce qui est confirmé par le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.01$). On s'est servi de la complémentarité des deux types d'information spectrale pour d'une part affiner les classes (ex. sarments et herbe verte) et d'autre part éviter leur sensibilité aux erreurs (ex. non prise en compte de l'indice spectral dans les classes F1/cailloux et F2 pour éviter une éventuelle perturbation liée aux changements minéralogiques).

À l'aide de l'information disponible il paraît donc impossible de reconnaître toutes les classes hydrologiques qui nous intéressent uniquement sur la base de leur réponse radiométrique. L'impossibilité notamment de distinguer entre un faciès intermédiaire et une croûte caillouteuse pourrait s'avérer gênante. Le manque de connaissance sur l'état de la surface sous et entre les composants organiques de pixels *mélange* gênera également la reconnaissance de l'état de la surface de la parcelle, car ce type de pixel est communément rencontré.

La question se pose donc de savoir si une information radiométrique plus riche pouvait remédier à ces problèmes. La nature du problème le fait supposer peu probable : à cette échelle et pour le type de sol et de cailloux donné, les comportements tant bidirectionnel que spectral doivent être similaires sur tout le spectre électromagnétique jusqu'au bandes d'absorption des argiles. Il est possible que ces deux objets se distinguent dans le domaine thermique du spectre à certains moments précis de la journée, mais ce genre d'informations est en conflit avec l'objectif du dispositif mis au point.

Si l'on pouvait disposer de la même information spectrale, mais à une résolution spatiale de quelques centimètres au lieu de 0.25m, les pixels *mélange* pourraient vraisemblablement être en grande partie reclassés en sarment, herbe, croûte, etc. Un suivi temporel pourrait aussi aider à élucider le problème de la distinction entre faciès intermédiaire, et la croûte caillouteuse. Un tel suivi est cependant impossible à l'échelle du pixel, car ceci exige de replacer de façon exacte à plusieurs reprises un pixel dans l'espace. Ce problème pourrait être levé par une agrégation de l'information au niveau de la parcelle.

Toutefois, avant de pouvoir s'intéresser au contexte spatial il nous faut classer nos pixels, connus sous une configuration géométrique donnée. Ceci fait l'objet du paragraphe suivant.

6.2 Classification des pixels dans l'interrang éclairé

Plus reproductible que les démarches de classification radiométrique assistée (ex. maximum de vraisemblance) et non assistée (ex. centres mobiles) classiques en télédétection, et permettant la comparaison de réponses radiométriques perçues dans des conditions différentes, on a adopté une démarche mécaniste de classification des pixels en se servant des classes hydro-spectrales préétablies. On ne s'est pas intéressé à l'utilisation de techniques de démixage spectrales (*spectral mixture analysis*, SMA, (Hill, 1993 ; Farrand *et al.*, 1994 ; Hill *et al.*, 1994 ; Smith *et al.*, 1994), car la radiométrie n'est connue qu'à une seule échelle et peut difficilement être caractérisée pour les objets élémentaires. Quelle est par exemple la couleur d'un caillou ? De plus, la faible richesse de l'information spectrale compromet une telle analyse. Après avoir brièvement commenté la méthode de classification on insistera sur les hypothèses qui décrivent les limites de sa reproductibilité. On verra que la démarche adoptée fournit une classification plus ou moins floue, les pixels pouvant être affectés à une ou plusieurs classes hydro-spectrales à la fois. Une étude de sensibilité montrera la dépendance des performances de la méthode en fonction du dispositif et de la qualité de prétraitement des données.

6.2.1 Méthodes

Par inversion d'un modèle de BRDF sur un jeu d'observations angulaires on estime les valeurs des paramètres définissant la surface. On distingue généralement deux champs d'application de cette information (Chopping, 1998) : (1) correction par BRDF, *i.e.* normalisation de la réflectance pour une géométrie soleil-capteur fixe à travers l'image (Hu *et al.*, 2000), ce qui dans notre cas est impossible car cela suppose la connaissance *a priori* de l'état de surface ; (2) la récupération d'information sur la surface en décrivant sa BRDF grâce à une information télédéteectée multi-angulaire (Lacaze *et al.*,

1999 ; Chopping, 2000 ; Scarth & Phinn, 2000), ce qui est également impossible dans notre cas car nous ne connaissons nos pixels que sous un seul angle.

La démarche originale que nous avons adoptée consiste à exploiter le fait qu'*a priori* la gamme de types de surface que l'on peut rencontrer est limitée et connue. Ayant caractérisé la BRDF de ces types de surfaces, on est en mesure de prédire les réponses de chacun d'eux pour la configuration de chaque pixel. Par comparaison aux réflectances rouge et verte perçues, le pixel peut ensuite être affecté au(x) type(s) de surface dont les réflectances prédites lui correspondent.

Cette classification est quelque peu "floue" – dans le sens de la théorie de possibilité (Bouchon-Meunier, 1993) – *i.e.* comprend une certaine indétermination qui est une conséquence de la légèreté de notre dispositif : comme il ne fournit pas une information suffisamment riche du point de vue bidirectionnel pour pouvoir récupérer un triplet BRDF par pixel, on ne peut affecter le pixel avec sûreté à l'une des classe hydro-spectrales dans toutes les configurations géométriques.

Pour prédire les limites de la gamme radiométrique d'une classe hydro-spectrale pour une géométrie soleil-capteur donnée on se sert de l'ensemble des points observés appartenant à cette classe. Ceci est nécessaire car ce ne sont pas les coordonnées extrêmes dans l'espace des triplets BRDF qui dans toutes les conditions fournissent la réponse radiométrique extrême. Une surface plus sombre par exemple, mais à plus forte rétrodiffusion qu'une autre, peut donner une réponse radiométrique supérieure à celle de l'autre dans la direction du *hot spot*.

La figure 6.8 montre un exemple de prédiction de niveaux radiométriques des classes hydro-spectrales pour une géométrie soleil-capteur donnée. La taille de notre échantillon expérimental de types de surfaces observés par le goniomètre est trop faible pour pouvoir s'exprimer sur la distribution des réponses radiométriques par classe. On suppose une distribution uniforme aux limites nettes par niveau prédit pour chaque classe, *i.e.* une possibilité d'appartenance à la classe de 1 à l'intérieur et de 0 en dehors de la valeur limitante. Par conséquent on ne dispose pas de mesure de qualité sur l'affectation comme le fournissent par exemple les distances mathématiques par rapport à la moyenne dans le cas d'une distribution normale. Signalons que le recouvrement entre les réflectances prédites des classes F0 et mélange peut être considérable. L'indice de couleur, considéré pour les pixels

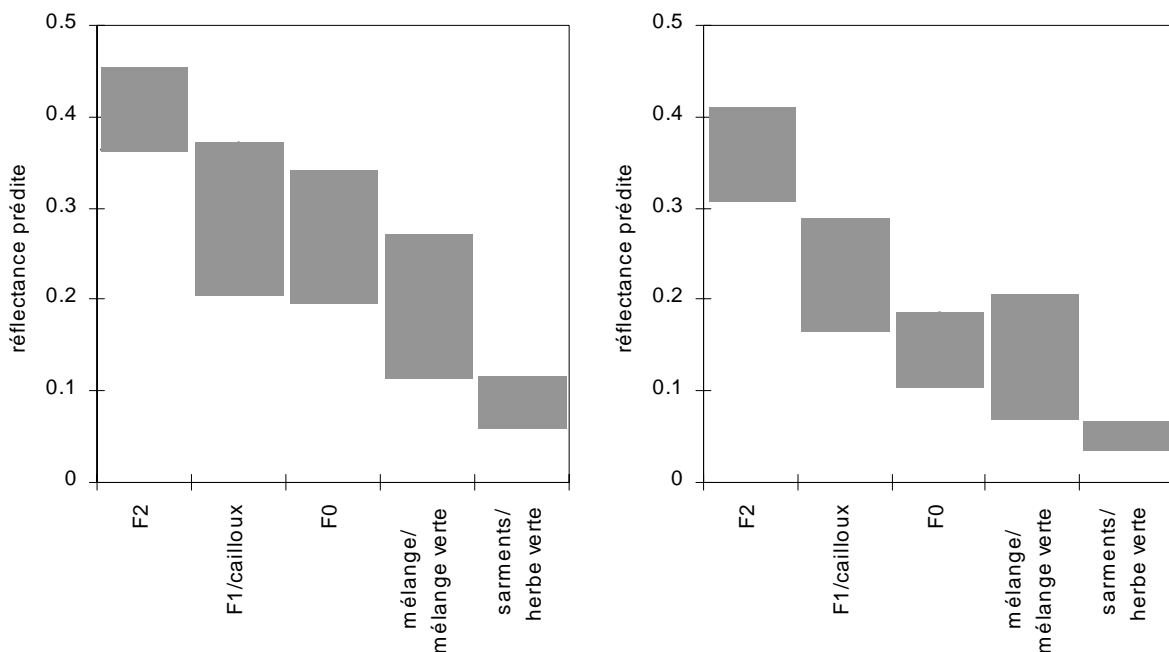


Figure 6.8 Prédiction de gammes radiométriques du canal rouge des classes hydro-spectrales sous un angle zénithal d'éclairage de 32°. Gauche : dans le plan du soleil, angle zénithal de vue de 20° en direction du point chaud. Droite : idem, mais en direction de contre jour.

affectés aux classes mélange/mélange vert et sarments/herbe vert, permet de lever cette ambiguïté s'il dépasse le seuil indiquant la présence de composants organiques chlorophylliens.

Si la réflectance perçue dépasse la limite supérieure de la classe à plus haute réflectance, le pixel est considéré appartenir à un objet "étranger" et est ignoré. Il en est de même pour les pixels à réflectance plus basse que la limite inférieure de la classe à plus basse réflectance. Les pixels dont la réflectance se trouve entre les gammes des classes F1 et F2, souvent bien séparés, sont attribués à la classe F2 car seules les surfaces de sol nu encroûtées à très faible présence de cailloux ou sarments peuvent produire cette réponse spectrale.

En résumant ce modèle de classification des pixels d'une mosaïque d'images sur la base de leur réponse radiométrique, nous constatons que sa mise en œuvre exige les informations suivantes :

- la mosaïque de réflectances du canal rouge de l'interrang éclairé ;
- la mosaïque de réflectances du canal vert de l'interrang éclairé ;
- la mosaïque d'angles zénithaux de vue (ρ_2) ;
- la mosaïque d'écart des angles azimutaux de vue et éclairement ($\phi_1 - \phi_2$) ;
- la pente du terrain ;
- l'orientation de la pente ;
- la date et l'heure (ρ_1)

La date et l'heure permettent de calculer l'angle zénithal du soleil, connaissant la localisation géographique de la zone d'étude. La pente et son orientation servent au calcul des angles zénithaux par rapport à la normale de la surface sous-jacente au pixel.

Au cours de ce paragraphe, on illustrera le fonctionnement de cette procédure et sa sensibilité à l'aide de résultats obtenus sur la mosaïque de la première prise de vue (29 mai 1998) du site de Caux.

6.2.1.1 hypothèses du modèle de classification

Ce modèle de classification est fondé sur un certain nombre d'hypothèses. Il importe de les formaliser afin de pouvoir apprécier sa robustesse, ainsi qu'expliquer sa sensibilité à la production de résultats erronés.

On compare dans un premier temps directement la radiométrie des pixels à la radiométrie mesurée sur le terrain à l'aide du radiomètre CIMEL. Ceci est justifié dans la mesure où le calage radiométrique de l'image est fait sur la base de ces mesures. Les mesures goniométriques qui sont à la base des classes hydro-spectrales ont été effectuées au milieu de l'interrang. On suppose donc l'éclairage indirect du sol par les pieds de vigne négligeable dans tout l'interrang, permettant ainsi d'appliquer les classes sur l'ensemble de l'objet *interrang éclairé*. Un ensemble de 24 mesures sur le panneau de référence en dehors et dans l'interrang soutiennent cette hypothèse pour le canal rouge et vert, mais il n'a pas été question d'une vérification rigoureuse. Toutefois, les faibles propriétés diffusantes des feuilles dans le domaine du visible soutiennent cette hypothèse.

Dans un deuxième temps, on suppose que la qualité du découpage des parcelles de vigne fournit uniquement des pixels correspondant à l'intérieur des parcelles. Les parcelles autres que celles en vigne, la bordure et les zones interparcellaires (chemins, haies, talus, fossés) sont donc censées être éliminées. On supposera aussi ne pas rencontrer dans l'information restante, d'objets étrangers à nos classes thématiques tels que cabanes, personnes ou véhicules, ayant une réponse radiométrique comprise dans une des gammes radiométriques prédites. Ces événements, bien que toujours possibles, doivent être très ponctuels.

Les sites échantillonnés par mesures goniométriques sont censés représenter la majorité de la variation en couleur de la surface du sol minéral liée à sa composition minéralogique. Dans l'ensemble de la zone on suppose ne pas rencontrer des minéralogies de surface produisant une réponse radiométrique différente au point que :

⇒ soit sa réflectance dans le rouge dépasse les limites prédites des classe F2, F1/cailloux et F0

⇒ soit son indice de couleur trop élevé fasse basculer les pixels à mélange non chlorophyllien dans la classe de mélange vert.

Enfin, on rappelle l'hypothèse posée auparavant que la surface observée est partout à l'état sec. Toute baisse de réflectance ne doit donc être due qu'à l'état de surface mais pas à une augmentation de l'humidité.

6.2.2 Séparabilité des classes à travers le temps et l'image

La figure 6.8 fournit une illustration du fait que les classes hydro-spectrales ne produisent pas toujours des prédictions bien distinctes et que leur séparabilité dépend de la géométrie soleil-capteur. En supposant la surface étudiée horizontale, le modèle de classification permet de produire une cartographie théorique de cette séparabilité. L'annexe 2C montre cette cartographie pour une espace géométrique correspondant aux variations d'angles que l'on peut trouver à travers l'année dans les images fournies par le dispositif.

Des calculs de l'angle zénithal du soleil montrent que l'on peut s'attendre à voir apparaître le *hot spot* dans les images prises autour de midi solaire dans la période de l'année allant de mi-avril à fin août. C'est seulement autour de ce point chaud qu'il peut exister un très léger recouvrement entre les classes F2 et F1/cailloux. Partout ailleurs et donc indépendamment du temps, la classe F2 se distingue nettement des autres classes.

La séparabilité des classes F1/cailloux et F0 dépend fortement de la configuration géométrique. Elles se distinguent toujours mieux en contre jour qu'en rétrodiffusion, mais leur degré de recouvrement dépend fortement de la saison. En été la gamme radiométrique de la classe F0 se trouve presque complètement englobée par la classe F1 en direction du point chaud et en contre jour pour 30 à 40 pour-cent. De début octobre jusqu'au début mars ($\rho_l > \pm 49^\circ$) il n'existe dans la plupart de la zone vue en contre jour aucun recouvrement entre les deux gammes.

La gamme de la classe F1/cailloux et celle de la classe mélange se recouvrent toujours quelque peu. Contrairement aux constatations précédentes, ce recouvrement varie très peu dans le temps et dans l'espace. Il reste toujours autour de 20 à 30 % de la classe à la gamme la moins large.

La séparabilité des classes F0 et mélange est inversée par rapport à la tendance entre F0 et F1/cailloux : la gamme de la classe F0 d'une largeur toujours relativement faible, est entièrement englobée par la gamme de la classe mélange en contre jour, indépendamment de la saison. En rétrodiffusion, la gamme de la classe F0 reste toujours pour autour de 50 % recouverte par celle de mélange. Comme la moitié qui la dépasse est dans cette zone recouvert par la gamme de la classe F1 on doit conclure qu'uniquement sur la base de la réponse radiométrique connue sous une seule configuration géométrique, l'on ne peut jamais reconnaître avec sûreté qu'un pixel représente une surface labourée ! Ces surfaces seront donc toujours représentées par un classe "floue", comme F1/cailloux-F0, F1/cailloux-F0-mélange ou F0-mélange.

Les gammes de réflectance dans le rouge de toutes les classes commentées ci-dessus sont toujours entièrement séparées de celles des classes herbe verte et sarments/feuilles mortes

En résumant, on constate que l'on pourra reconnaître les classes F2, mélange vert, herbe verte et sarments dans toutes les configurations géométriques rencontrées sans la moindre ambiguïté, pourvu

que les hypothèses mentionnées ci-dessus soient confirmées. Les classes F1/cailloux et mélange sont relativement bien identifiables en contre jour. La classe F0 se trouve recouverte par, soit la classe F1/cailloux, soit la classe mélange, soit les deux. Il en résulte que la classe F0 peut uniquement être identifiée sans ambiguïté si son indice de couleur exclut l'appartenance aux autres classes.

6.2.3 Exemples de classification d'images et analyse de sensibilité aux erreurs

La méthode décrite dans les paragraphes précédents est illustrée par les exemples de la figure 6.9 ci-dessous. On y rencontre huit situations sur un total de 12 possibilités (les sept classes hydro-spectrales et 5 classes floues). La méthode permet de distinguer des classes à l'aide de variations qui à l'œil semblent très faibles voire invisibles. Cette aide à l'interprétation est contrariée par la fréquence importante de classes floues. En regardant l'ensemble de la mosaïque pour ce site et cette prise de vue (tableau 6.2) on constate que la majorité des pixels est classée floue, soit comme "mélange ou F0" (20%), soit comme "mélange ou F0 ou F1/cailloux" (33%). Les classes de mélange et de F1/cailloux sont celles qui sont le plus souvent identifiées sans ambiguïté. Même s'il peut s'agir d'une majorité de parcelles labourées, le taux de pixels classés F2 (0.1%) est étonnamment faible. Cette tendance est similaire pour les autres sites.

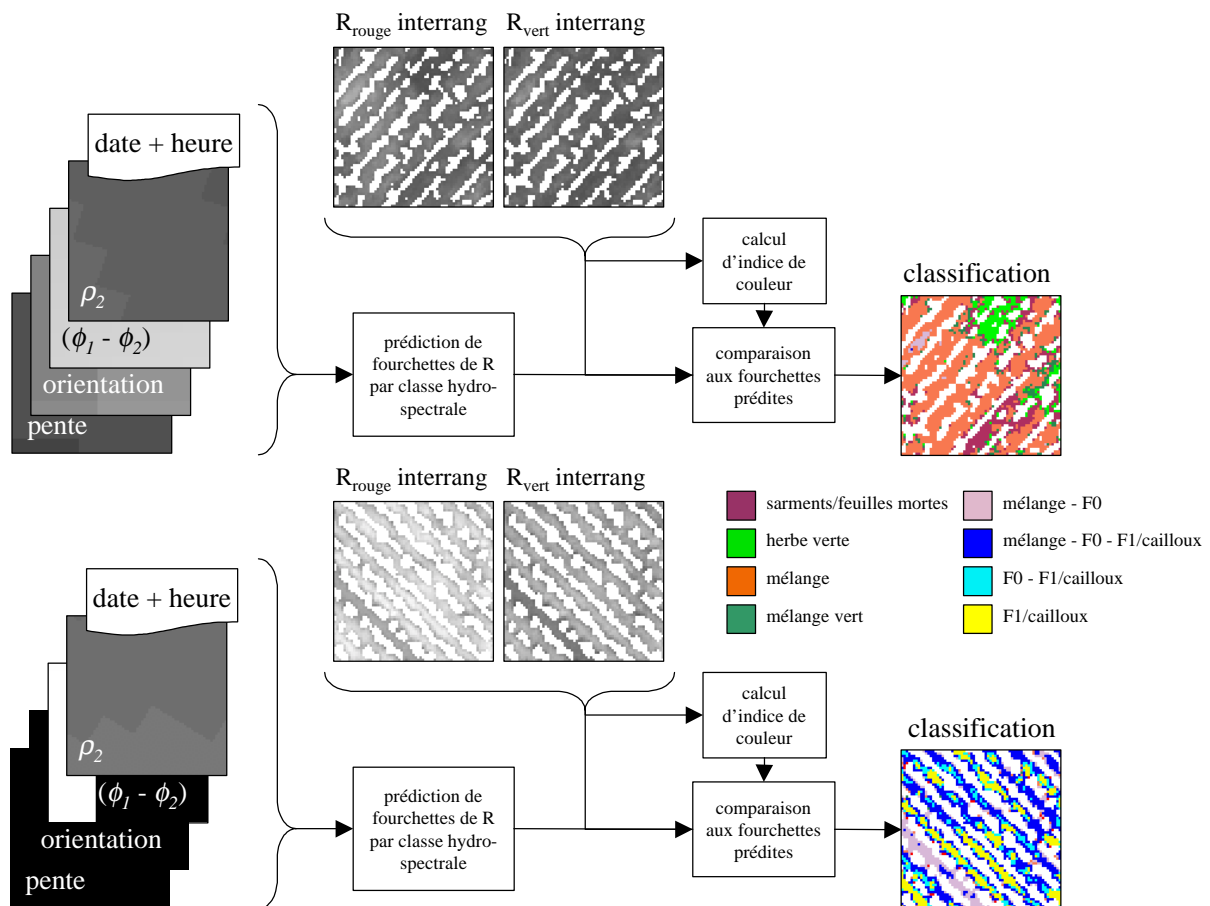


Figure 6.9 Deux exemples de classification extraits d'une mosaïque d'interrangs éclairés de vignobles. Caux, prise de vue n° 1. R = réflectance.

Les tableaux 6.2 et 6.3 illustrent l'effet de l'absence de prise en compte de la pente et de l'angle de vue, pour la variation caractéristique du milieu d'étude et du dispositif (fig. 6.10). La pente ne paraît pas d'une très grande influence sur les résultats (2% de l'ensemble des pixels de l'interrang éclairé changent d'affectation), ce qui est sans doute en grande partie l'effet du faible relief de la zone d'étude

et la présence relativement faible de vignes sur les plus fortes pentes : seulement 33% des pixels de l'interrang éclairé sont censés avoir une pente significative (de 4° à 14°). Lorsque l'angle de vue n'est pas pris en compte (on considère chaque pixel comme étant observé au nadir) l'effet est très fort, sauf pour les pixels dont l'indice de couleur dépasse les seuils imposés aux classes résultant de la BRDF (HV, MV et F0). Pour toutes les autres classes 20 à 50% des pixels changent d'affectation.

classe	S	HV	M	MV	M-F0	F0	M-F0-F1	M-F1	F0-F1	F1	F1-F2	F2	Total
S	97.8	-	1.2	0.9	-	0.1	-	-	-	-	-	-	0.5
HV	-	100.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0
M	-	-	97.4	-	2.6	-	-	-	-	-	-	-	17.1
MV	0.3	-	-	99.7	-	-	-	-	-	-	-	-	4.2
M-F0	-	-	0.6	-	98.4	-	1.0	-	-	-	-	-	20.1
F0	-	-	-	-	-	100.0	-	-	-	-	-	-	3.1
M-F0-F1	-	-	-	-	0.3	-	98.8	-	0.8	-	-	-	32.5
M-F1	-	-	-	-	-	-	3.7	95.7	-	0.6	-	-	0.7
F0-F1	-	-	0.1	-	-	-	1.8	-	93.1	5.0	-	-	7.8
F1	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1	1.9	97.7	-	0.2	11.8
F1-F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.1	78.9	-	0.0
F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.2	-	94.8	0.1

Tableau 6.2 Changement d'affectation du pixel induit par l'absence de prise en compte de la pente (fig. 6.10) pour le site de Caux, prise de vue n° 1. Chaque ligne montre la redistribution de la population de pixels d'une classe dont la fréquence relative est marquée à droite. S = sarments/feuilles mortes ; HV = herbe verte ; M = mélange non-vert ; MV = mélange vert ; F0 = sol labouré ; F1 = faciès intermédiaire/cailloux ; F2 = sol nu encroûté.

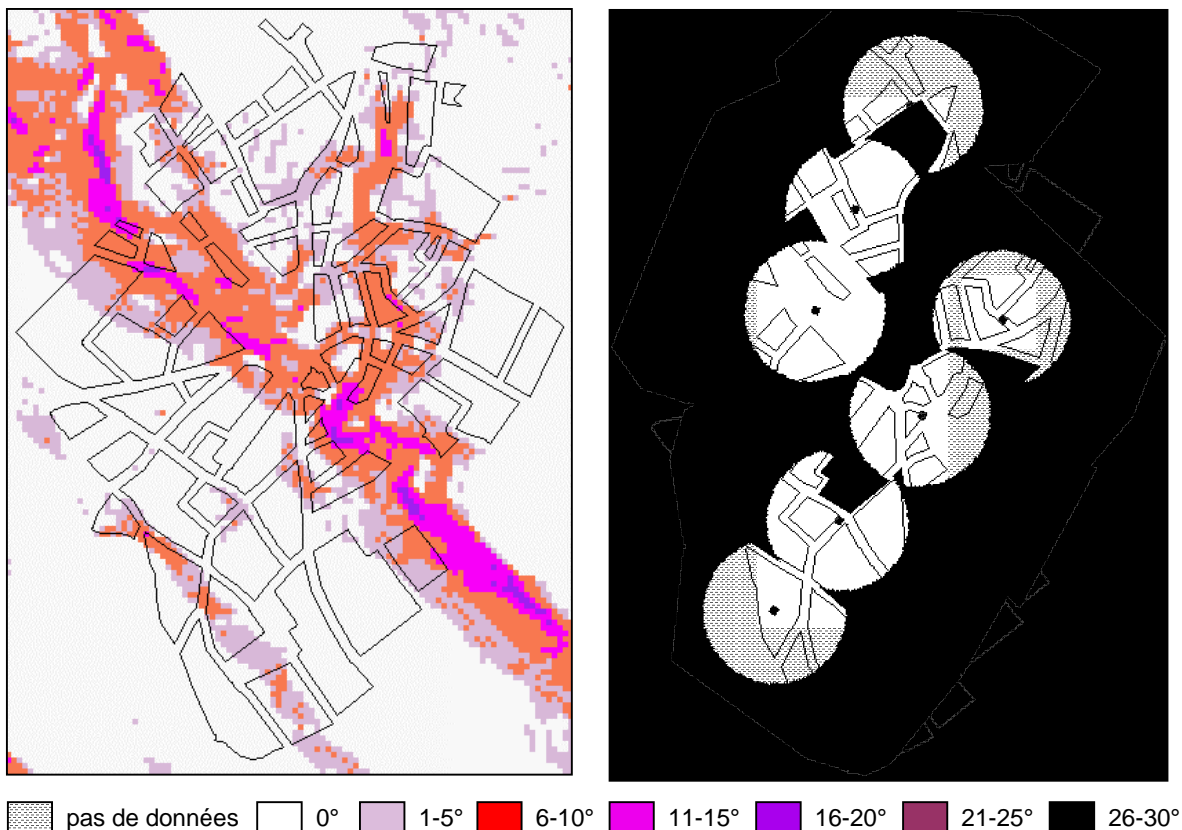


Figure 6.10 Pente (gauche) et angle zénithal de vue (droite, prise de vue n°1) de Caux (annexes 1A et 1D). Les polygones indiquent les parcelles (hors bordure) du site d'étude cultivées en vigne.

classe	S	HV	M	MV	M-F0	F0	M-F0-F1	M-F1	F0-F1	F1	F1-F2	F2
S	81.5	-	7.5	10.9	-	0.1	-	-	-	-	-	-
HV	-	99.9	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-
M	1.4	-	74.4	-	23.7	-	0.6	-	-	-	-	-
MV	4.0	-	-	96.0	-	-	-	-	-	-	-	-
M-F0	-	-	35.3	-	56.3	-	8.4	-	-	-	-	-
F0	2.1	-	-	-	-	97.7	-	-	0.2	-	-	-
M-F0-F1	-	-	-	-	12.7	-	81.4	-	5.7	0.1	-	-
M-F1	-	-	-	-	-	0.3	99.6	-	-	-	-	-
F0-F1	-	-	1.6	0.4	-	0.1	17.0	-	50.3	30.5	-	-
F1	-	-	1.3	0.4	-	0.1	18.2	-	28.4	51.6	-	-
F1-F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	-	-
F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	-	-

Tableau 6.3 Comme tableau 6.2, mais sans prendre en compte l'angle de vue (fig. 6.10).

Avant de s'intéresser à l'explication des tendances constatées et aux possibilités de lever une partie de l'indétermination, on évaluera tout d'abord la qualité de cette classification. Le nombre d'informations en entrée est élevé et toutes peuvent contenir une certaine erreur. Il nous faut évaluer l'impact de chacune de ces erreurs. De plus, la qualité de la procédure de classification dépend de la validité de ses hypothèses fondatrices, ce que l'on tentera également de vérifier par la suite.

6.2.3.1 erreurs de correction spectrale

Les données numérisées ont subi une correction radiométrique du type "ligne empirique" (§ 3.2.3.2). D'une part on sait que cette correction est quelque peu approximative : c'est une conséquence acceptée du dispositif choisi. D'autre part, on constate que les gammes de valeurs de réflectance prédites à l'aide des groupes de triplets BRDF, auxquelles la réflectance des pixels est comparée, sont souvent très proches l'une de l'autre et d'une étendue très limitée. Est-ce que donc le caractère approximatif de la correction se répercute de façon significative dans les résultats de la classification ?

Afin de répondre à cette question on a calculé l'intervalle de confiance à 5% de la régression de figure 3.8 (où la régression de Y en x est supposée linéaire et les différentes valeurs de Y comme suivant une loi normale, indépendantes et de même variance ; Dagnelie, 1975), et nous avons établi de nouvelles droites empiriques correspondant aux limites de cet intervalle des deux côtés de la droite d'origine.

En apportant ces changements à la mosaïque de Caux on constate que les variations de radiométrie induisent un changement d'affectation pour respectivement 39 et 38% des pixels. Ces pixels connaissent deux grands types de changements : 27 et 19 des respectivement 39% et 38% de changement concernent une augmentation du "flou" (tableaux 6.4), soit par un changement d'une classe "pure" vers une classe "floue" (ex. de F1 vers F0-F1), soit d'une classe "floue" vers une classe plus floue (ex. de F0-F1 vers M-F0-F1). Dans ces cas on ne peut parler d'erreur, car les classes "possibles" d'origine le restent après modification de la radiométrie. L'autre part des changements concerne de réels changements d'affectation. Par conséquent le dispositif, et notamment le jeu de points de calage radiométrique, peut induire 10 à 20% d'erreurs dans la classification uniquement du fait d'une erreur radiométrique, ce qui est considérable (mais attendu).

classe	S	HV	M	MV	M-F0	F0	M-F0-F1	M-F1	F0-F1	F1	F1-F2	F2	classe	S	HV	M	MV	M-F0	F0	M-F0-F1	M-F1	F0-F1	F1	F1-F2	F2
S	94.7	5.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	S	48.6	-	25.6	21.7	-	4.1	-	-	-	-	-	-
HV	-	100.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	HV	0.5	87.6	-	11.1	-	-	-	-	0.6	0.1	-	-
M	2.3	0.0	97.6	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	M	-	-	54.9	-	44.7	0.3	-	-	-	-	-	-
MV	11.5	9.7	-	78.8	-	-	-	-	-	-	-	-	MV	-	-	13.2	86.8	-	-	-	-	-	-	-	-
M-F0	-	-	42.3	-	57.7	-	-	-	-	-	-	-	M-F0	-	-	-	-	46.5	0.6	53.0	-	-	-	-	
F0	1.9	-	1.3	-	2.9	92.8	1.1	-	-	-	-	-	F0	-	-	-	-	-	96.0	-	0.4	2.6	0.9	-	
M-F0-F1	-	-	3.7	-	42.9	-	53.4	-	-	-	-	-	M-F0-F1	-	-	-	-	-	0.2	66.0	3.1	21.2	9.5	-	
M-F1	-	-	3.2	-	-	0.3	96.6	-	-	-	-	-	M-F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	-	
F0-F1	-	0.1	6.5	2.5	-	0.4	72.5	-	18.0	-	-	-	F0-F1	-	-	-	-	-	-	-	-	30.2	69.8	-	
F1	-	-	2.6	0.6	-	0.1	24.0	2.5	34.2	35.9	-	-	F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80.6	4.0	
F1-F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	-	F1-F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	
F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	

Tableau 6.4 Changement d'affectation du pixel induit par modification de la radiométrie pour le site de Caux, prise de vue n° 1. Chaque ligne montre la redistribution de la population de pixels d'une classe. Gauche : limite inférieure de l'intervalle de confiance. Droite : limite supérieure de l'intervalle de confiance.

6.2.3.2 erreurs géométriques

Les différents aspects géométriques qui interviennent dans la classification radiométrique sont également susceptibles de produire un certain niveau d'erreur. On étudiera ici les aspects suivants : l'heure, déterminant la position du soleil ; l'angle de la pente et son orientation ; l'orthogonalité de la prise de vue.

⇒ l'heure

Au début de l'étude, l'heure de passage au-dessus d'un site n'a pas été notée de façon très précise. Cela ne semblait pas avoir d'influence sur la radiométrie car une telle erreur se répercute de la même façon dans la correction radiométrique et dans la prédiction des classes radiométriques (correction et prédiction étant toutes les deux basées sur des BRDFs ayant toutes la même heure en entrée) : l'erreur commise dans la détermination de la position zénithale du soleil a un effet à peu près égale dans les deux cas et reste donc sans fortes conséquences. Dans ces considérations on omet cependant l'influence de l'azimut, lequel (1) varie rapidement autour de midi, et (2) a peu d'influence sur la correction radiométrique – à cause des points de calage horizontaux, planes et dont la réponse radiométrique dépend donc relativement peu de la position du soleil (mis à part autour du *hot spot*) – tandis que pour beaucoup d'états de surface l'influence de l'azimut est grande. Le tableau 6.5 montre l'influence d'un écart d'une heure entre l'heure supposée et l'heure réelle de passage. Une heure avant et une heure après l'heure de passage supposée, signifie dans notre cas resp. un azimut décalé de -33° et $+37^\circ$.

classe	S	HV	M	MV	M-F0	F0	M-F0-F1	M-F1	F0-F1	F1	F1-F2	F2	classe	S	HV	M	MV	M-F0	F0	M-F0-F1	M-F1	F0-F1	F1	F1-F2	F2	
S	81.6	-	7.7	7.2	-	3.6	-	-	-	-	-	-	S	79.9	-	10.5	9.5	-	0.1	-	-	-	-	-	-	
HV	0.5	97.2	-	2.3	-	-	-	-	-	-	-	-	HV	-	98.4	-	1.4	-	-	-	-	0.2	-	-	-	
M	0.8	-	78.4	-	20.4	0.5	-	-	-	-	-	-	M	0.9	-	67.3	-	31.6	0.2	-	-	-	-	-	-	
MV	4.5	-	3.1	92.4	-	-	-	-	-	-	-	-	MV	3.1	-	1.5	95.4	-	-	-	-	-	-	-	-	
M-F0	-	-	14.0	-	79.4	0.3	6.3	-	-	-	-	-	M-F0	-	-	15.6	-	75.5	-	8.9	-	-	-	-	-	
F0	-	-	0.1	-	-	97.6	-	1.3	0.2	0.8	-	-	F0	1.6	-	0.2	-	0.7	96.9	0.1	0.1	0.3	0.1	-		
M-F0-F1	-	-	0.5	-	5.8	0.1	80.6	6.6	4.1	2.4	-	-	M-F0-F1	-	-	-	-	9.0	0.1	85.4	1.0	2.9	1.6	-		
M-F1	-	-	-	-	-	-	0.1	63.9	-	35.9	-	-	M-F1	-	-	-	-	0.4	96.6	3.0	0.0	-	-	-		
F0-F1	-	-	2.1	0.7	-	0.1	11.5	-	54.2	31.4	-	-	F0-F1	-	-	0.4	0.1	-	0.3	13.0	-	50.5	35.7	-		
F1	-	-	0.2	-	-	-	1.0	-	13.3	84.5	-	1.0	F1	-	-	0.3	0.1	-	-	4.2	0.9	9.5	84.2	0.8		
F1-F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.9	-	21.1	F1-F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.1	-
F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	99.6	F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64.3	-

Tableau 6.5 Changement d'affectation du pixel induit par modification de l'heure de passage d'une heure pour le site de Caux, prise de vue n° 1. Chaque ligne montre la redistribution de la population de pixels d'une classe. Gauche : heure de passage une heure plus tôt que le passage réel. Droite : idem, une heure plus tard que le passage réel.

Le taux de changement d'affectation suite à un décalage d'une heure avant et après passage est de resp. 20% et 22%, dont resp. 13% et 11% constituent des erreurs potentielles (voir paragraphe précédent). Les différents types d'erreur ne sont pas distribués dans l'espace de façon homogène comme c'était le cas pour les erreurs dues à la correction radiométrique, mais dépendent de leur position azimutale (baisse ou hausse relative des gammes prédites, dont le niveau varie entre les classes hydro-spectrales).

Nous considérons un décalage d'une heure comme étant l'erreur maximale que nous avons pu commettre. Dans la majorité des cas elle sera plutôt d'environ 20 minutes, ce qui a vraisemblablement toujours un effet significatif.

⇒ *la pente et son orientation*

La résolution spatiale du modèle numérique de terrain (MNT), qui fournit l'information sur la pente et son orientation à un pas de 10 mètres, est *a priori* peu adaptée au niveau de résolution de l'étude. Tout en sachant que cette discordance induit une certaine erreur, nous nous sommes tout de même servis de cette information. Si l'on suppose les courbes de niveau - à l'aide desquelles le MNT a été calculé - exemptées d'erreurs, seules l'absence d'information entre les courbes ainsi que la grossière résolution du MNT induisent une imprécision dans la détermination de la pente et de l'orientation des pixels de nos mosaïques. Cette imprécision est issue (1) du lissage provenant de l'interpolation entre les courbes et de la grande surface d'intégration, effaçant les variations (en pente et orientation) à des pas de moins de 10m (ruptures comme par exemple les talus) tout en biaisant la pente et orientation des surfaces planes autour d'éventuelles ruptures, et (2) des ruptures imaginaires à la bordure des grossiers éléments de résolution du MNT représentant des transitions en réalité graduelles.

Nous estimons la marge dans laquelle l'orientation et la pente réelle peuvent varier par rapport à l'estimation fournie par le MNT d'environ $\pm 20^\circ$ pour l'orientation et de $\pm 25\%$ pour la pente. Remarque que ces modifications influencent uniquement les zones non planes.

Les résultats obtenus sur le site de Caux (prise de vue n°1), montrent une influence très réduite pour ces facteurs d'incertitude. Pour l'ensemble du site le changement de l'orientation de $\pm 20^\circ$ induit un changement d'affectation pour $0.8 + 0.8 \approx 1.5\%$. Pour la pente ces chiffres sont de 0.7 et 0.5%. Rapportée aux seuls pixels situés en pente on voit que l'imprécision de l'orientation induit une erreur de $2.3 + 2.3 = 4.6\%$, et que la pente induit une erreur de $2.0 + 1.6 = 3.6\%$.

⇒ *l'orthogonalité de la prise de vue*

Jusqu'ici les scènes ont été considérées comme des orthophotos, c.-à-d. des images prises dans le plan horizontal avec l'axe du centre de l'image correspondant à la verticale. On est conscient que le dispositif employé ne permet pas une telle précision, car la turbulence de l'air et la manipulation manuelle font varier l'axe de la vue autour du nadir. Les caractéristiques du dispositif de prise de vue (cadre métallique lourd et calibré, niveau à bulle) sont censées permettre une précision de $\pm 3^\circ$, *i.e.* une marge de 6° . On regardera ci-dessous l'effet de cette imprécision sur les résultats du modèle de classification, ainsi que pour des variations plus importantes ($\pm 8^\circ$ et $\pm 14^\circ$), afin d'apprécier l'importance de cet aspect.

Les chiffres de la figure 6.11 ont été obtenus par simulation : pour les deux images de la partie sud de la mosaïque de Caux, les couches d'information fournissant l'angle azimutal et zénithal de vue ont été translatées par rapport aux autres couches dans le plan du soleil sur des distances correspondantes aux déviations angulaires de la verticale (l'abscisse de la figure 6.11) à la hauteur de vol donnée. Les pourcentages de changement d'affectation (l'ordonnée de la figure 6.11), obtenus pour les différentes déviations angulaires doivent être comparés avec une certaine réserve car ils proviennent de populations de taille différente, résultant de la diminution du recouvrement spatial entre l'information translatée et l'information d'origine sur augmentation de la translation. Il semble que la proportion des

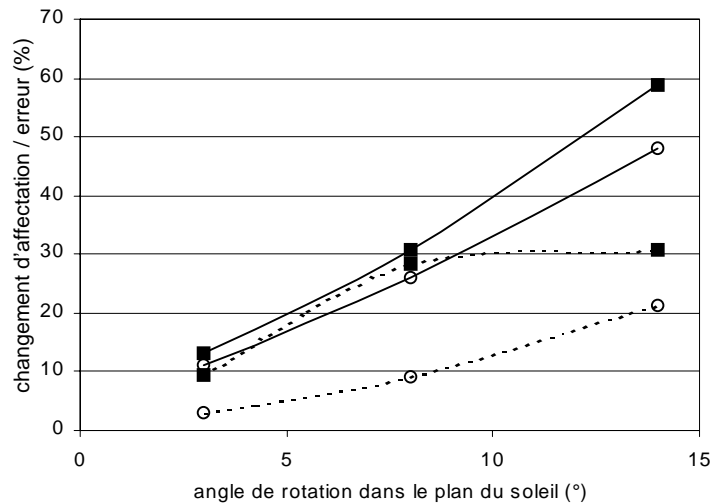


Figure 6.11 Effet d'une rotation simulée du dispositif de prises de vue sur la classification radiométrique. Les symboles noirs et carrés représentent une rotation en direction du *hot spot*, les cercles représentent une rotation en sens inverse, vers le soleil. Les traits noirs relient les niveaux estimés de changements d'affectation des pixels et le pointillés indiquent la partie de ces changements qui représente une réelle erreur d'affectation.

pixels qui changent d'affectation augmente de façon quasi linéaire avec l'angle, et de telle manière que cette fraction comprend déjà plus de 50% des pixels avec une déviation de seulement 15° ! Et l'erreur potentielle y est d'un quart. Dans les directions autres que celle du plan du soleil cet effet est beaucoup moindre. Mais il est clair que le niveau général d'erreur de notre classification s'en trouve encore augmenté de quelques pour-cent.

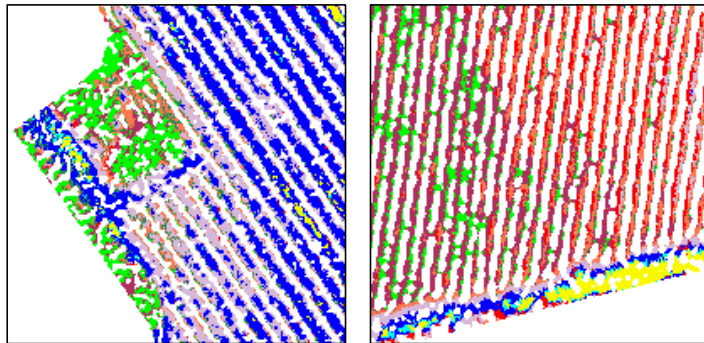
⇒ *synthèse*

Pour résumer l'influence de l'imprécision liée au dispositif on fait le cumulatif des erreurs potentiellement induites par les différents facteurs :

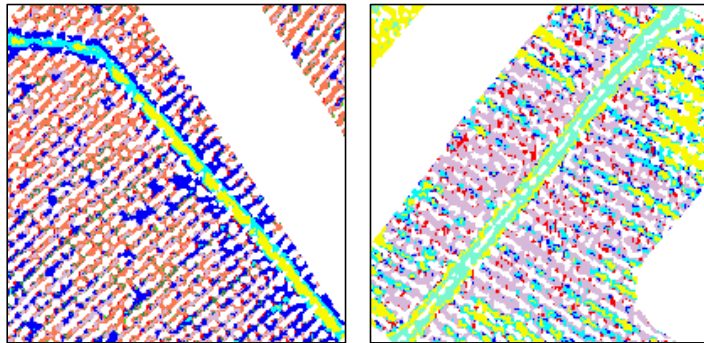
correction spectrale	10 à 20%
l'heure	11 à 13%
la pente et son orientation	1.5%
l'orthogonalité de la prise de vue	2 à 9%
<u>erreur quadratique moyenne (EQM)</u>	<u>15 à 25%</u>

Ce niveau d'erreur est considérable et ne pas sans implications pour la suite de l'étude. Il est clairement mis en évidence que l'erreur la plus importante est celle liée à la correction spectrale. D'autant plus si l'on considère le fait que l'erreur induite par l'imprécision de l'heure de passage est dans la plupart des cas inférieure à celle affichée ici. Si on la supprimerait, ce qui lors de futures prises de vue demande un effort minime, l'EQM n'est plus que 10 à 21%. Dans le pire des cas, *i.e.* là où toutes les erreurs sont maximales et d'un effet cumulatif, le niveau d'erreur estimé est de 25 à 44%. Même si ne pas impossible, ceci peut être considéré comme très exceptionnel et cette situation particulière ne peut être rencontrée que sur une portion limité d'un cliché.

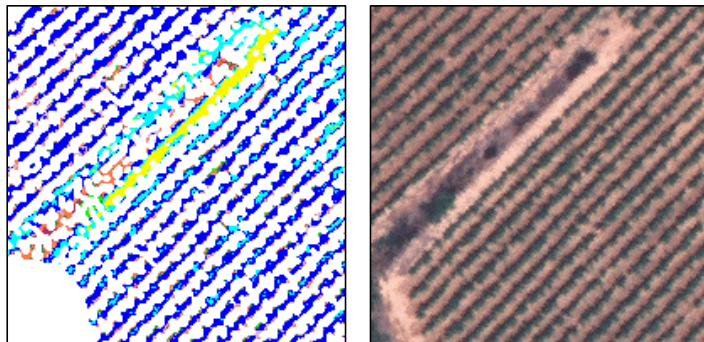
Inclusion de la bordure de la parcelle.
 Problème de découpage provenant de :
 • une erreur dans l'information cadastrale (gauche)
 • l'imprécision locale du géoréférencement (droite)



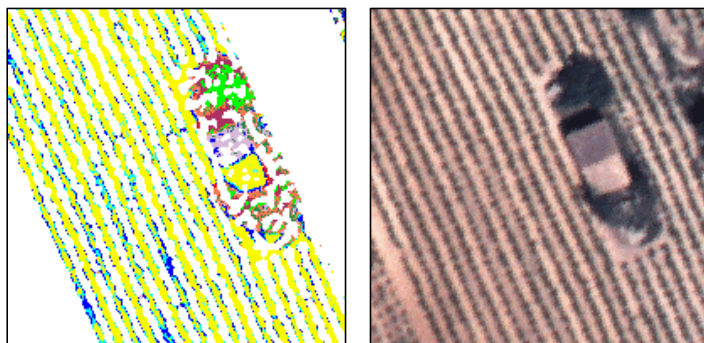
Découpage intra-parcellaire.
 Ignorance de la présence de zones non cultivées subdivisant la parcelle :
 • gauche : chemin non-répertorié dans la base de données géographiques
 • droite : subdivision de la parcelle



Présence de zones non-cultivables.
 Ignorance de ruptures naturelles non-cultivées et leur bordure à l'intérieur de la parcelle.



Inclusion d'objets non-conformes.
 Erreurs de classification introduites par la présence à l'intérieur de la parcelle d'objets ne pas faisant partie de l'état de surface (ici bâtiment agricole et broussailles).



Inclusion d'ombres portées en bordure.
 Erreurs de classification introduites par l'absence d'éclairage direct dans des zones d'ombre projetée par de haut objets en bordure à basses inclinaisons du soleil.

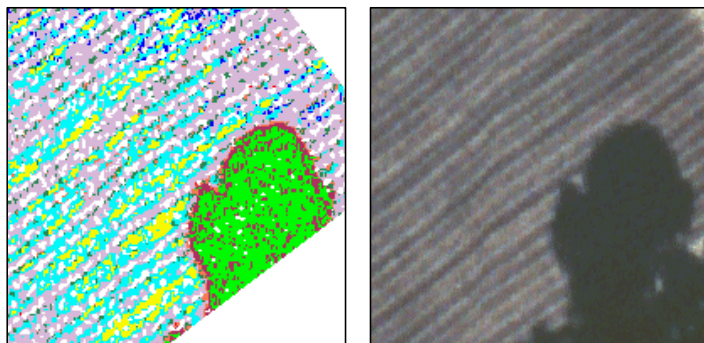


Figure 6.12 Imagettes de 50×50m illustrant différentes situations rencontrées non conformes à l'hypothèse que l'information intra-parcellaire comprend uniquement des surfaces éclairées soumises à la pratique culturale. Voir figure 6.13 pour la légende des classes.

6.2.3.3 situations non conformes aux hypothèses du modèle spectral

La confrontation aux observations de terrain ainsi qu'aux résultats de la classification des hypothèses suivantes :

1. l'éclairement indirect est faible et homogène dans l'ensemble de l'interrang pour les canaux rouge et vert,
2. la pellicule de la surface est à l'état sec,

ne donne pas lieu à une remise en cause de leur validité. En revanche, cette confrontation conteste en certains cas les hypothèses (3.) que l'information d'une parcelle concerne uniquement la surface du sol éclairé de la partie cultivée de la parcelle, et (4.) que les variations de la composition minéralogique du sol ne remettent pas en cause la validité des classes spectrales.

⇒ "contamination" de l'information intra-parcellaire

La figure 6.12 montre différentes situations "non conformes". Parfois la bordure non cultivée de la parcelle est incluse dans le découpage. Ces zones sont composées d'objets représentés par les classes spectrales. Elles ne posent pas de problème de classification en soi, mais gêneront l'interprétation du résultat au niveau de la parcelle (voir chapitre 7). Il s'agit ici soit d'une erreur géométrique (de l'image ou des contours cadastraux), soit d'une discontinuité intra-parcellaire liée à un découpage en plusieurs parcelles agricoles ou à des bordures suivant des ruptures naturelles (figure 6.12).

Plus rare mais réellement gênante du point de vue spectral, est l'inclusion d'objets "non conformes" dont la réponse radiométrique correspond à l'une des classes hydro-spectrales. Des cabanes ou arbres à l'intérieur de la parcelle sont parfois (partiellement) inclus dans une des classes ; des objets en dehors de la parcelle peuvent projeter leur ombre portée à l'intérieur de la zone découpée, aux angles zénithaux élevés du soleil (hiver) (figure 6.12). Le chapitre 7 commentera la fréquence d'apparition de ces cas ainsi que leur impact sur l'étude de la parcelle. Bien que certains de ces objets "non conformes" pourront visuellement être reconnus *a posteriori* sur l'image classée, leur présence n'est pas prise en compte dans la suite de l'étude : sa détection automatisée demandera probablement la mise en œuvre de techniques sophistiquées, ce que leur faible fréquence d'apparition ne justifie pas.

⇒ changements du substrat

Une campagne de mesures radiométriques sur des surfaces de sol nu encroûtées à été effectuée dans la vallée de la Peyne. Un total de 395 sites a été observé dans les différentes unités pédologiques. On n'a pas pu mettre en évidence de différences significatives dans la réponse des canaux rouge et vert pour

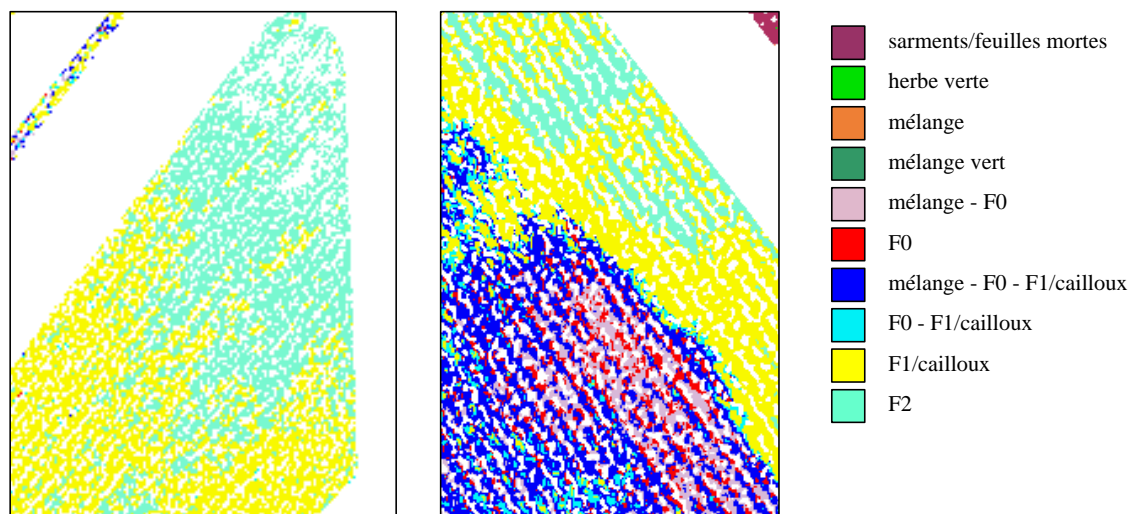


Figure 6.13 Affleurement de la roche mère blanchâtre en bordure du plateau de Caux (février 1999). Gauche : parcelle à faciès intermédiaire (notez les pixels "F2" et les trous dus au dépassement des gammes). Droite : parcelle labourée.

les différentes unités. Une différence significative a été trouvée entre l'indice de couleur des sols calcaires ($\mu = -0.13$) et celui des sols fersiallitiques rougeâtres ($\mu = -0.19$) (test t de Student, $\alpha = 0.01$), mais tous les deux restent dans la gamme définie pour les surfaces minérales (de -0.05 à -0.25 , § 6.1.4.2).

Tout en concluant que l'hypothèse d'uniformité de la couleur de surface est valide pour la plupart de la zone d'étude, il demeure que la classification des images et sa confrontation à la vérité du terrain montre la présence de quelques petites zones "non conformes" (figure 6.13), *i.e.* des zones de pixels sur sol labouré étant classées en F1/cailloux ou bien de zones de pixels sur faciès intermédiaire ou encroûté étant classées "hors catégorie" car leur brillance dépasse le seuil maximal de la classe F2. L'échantillonnage des sols à ces endroits et leur comparaison à un ensemble d'autres surfaces minérales (figure 6.14) confirment que l'effet constaté est provoqué par la composition minéralogique de la surface du sol. Il s'agit de surfaces d'une nature plus brillante qu'ailleurs, du fait d'un plus fort taux de calcaire et l'absence de substances absorbantes (oxydes pédogénétiques, complexes organiques). Ce sont soit des profils décapés où la roche mère affleure, soit des bancs de calcaire. Dans le premier cas il s'agit de zones de taille très limitée et souvent peu cultivées en vigne (coin de parcelle à Pézenas, pente en bordure du plateau à Caux). Le recouvrement de ces petites zones sous vigne, qui n'affectent qu'une partie de certaines parcelles, est estimé à une ou deux pour-cent de la surface cultivé en vigne de la vallée de la Peyne. Les bancs de calcaire cultivés sont rares, mais leur influence peut être assez étendue (interfluve, nord du site de Neffiès ; seul cas rencontré dans la vallée de la Peyne, *i.e.* environ un pour-cent).

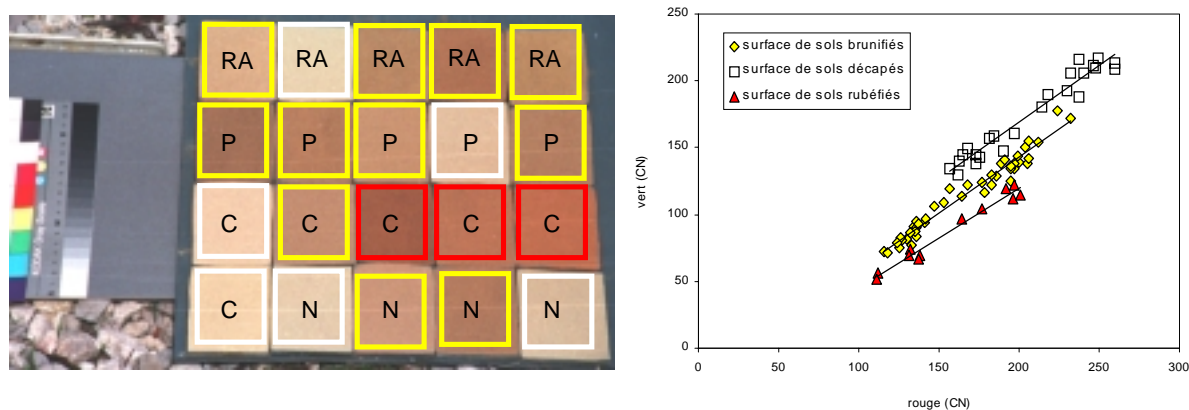


Figure 6.14 Ensemble d'échantillons de matériel minéral de surface, indicatif de la variation en couleur dans la zone d'étude. Les sols échantillonnés sont les profils décapés repérés visuellement sur les mosaïques (cadres blancs) et un ensemble de sites sélectionnés au hasard par site d'étude (RA = Roujan-Alignan ; P = Pézenas ; C = Caux ; N = Neffiès) supposé représentatif du reste de la zone (cadres rouges et jaunes, le rouge indiquant les sols les plus rubéfiés). Le matériel, provenant des tous premiers millimètres du sol, séché à l'air et tamisé à 0.3mm, est photographié en contre jour et vers le point chaud (affiché ici à gauche) en état de poudre égalisée et après formation d'une croûte. Ceci fournit l'ensemble des points représentés dans le diagramme de droite, exprimant le rapport entre les canaux rouge et vert en compte numérique.

La figure 6.14 montre que le rapport entre les canaux rouge et vert de ces sols exceptionnellement clairs (cadres blancs) se distingue de celui des sols communs sur lesquels les classes spectrales sont basées (ici entourés de jaune pour les sols brunifiés de molasse et entourés de rouge pour les sols rubéfiés, voir chapitre 3 pour une description). On note que la luminosité tant dans le rouge que dans le vert se trouve effectivement fortement décalée par rapport aux sols "normaux". Au passage on constate aussi la confirmation de l'hypothèse émise en § 6.1.3, à savoir que la rougeur des sols rubéfiés est surtout due à une diminution du signal dans le vert.

Afin de préserver la légèreté de la méthode on a choisi de ne pas établir de classes spectrales spécifiques aux zones à composition minéralogique exceptionnelle, même si leur indice de couleur possédait le pouvoir de les identifier. De plus leur étendue est relativement restreinte.

Si par contre, nous serions confrontés à une zone où l'hypothèse d'uniformité de la couleur de surface ne peut vraiment pas être acceptée (différentes zones de taille significative et de couleur contrastée), une étape complémentaire se rajouterait à notre approche qui reste par ailleurs inchangée : les données télédéteectées devront dans ce cas être stratifiées à l'aide d'une information pédologique (carte du sol avec regroupement des unités cartographiques en fonction de leur couleur de surface), pour ensuite établir les classes hydro-spectrales de chaque zone.

6.2.4 Conclusions

Ce chapitre nous a permis d'apprécier le pouvoir de distinction entre les différents états de surface à partir de l'information radiométrique fournie par le dispositif. Au niveau d'une résolution spatiale de quelques centaines de centimètres carrés, cette information, pauvre tant du point de vue spectral que bidirectionnel, permet la reconnaissance des surfaces minérales encroûtées, des surfaces à fort recouvrement de sarments/feuilles mortes, et des surfaces couvertes d'herbe chlorophyllienne. La reconnaissance d'autres états de surface dépend en grande partie de leurs conditions géométriques de vue et d'éclairement, car la distinction entre certains types (ex. labour et faciès intermédiaire) se fait mieux en contre-jour, tandis que pour d'autres types (ex. labour et surfaces fermées à recouvrement partiel et varié) on les distingue mieux sur la base de leur rétrodiffusion. Certains types s'avèrent inséparables à partir de l'information radiométrique seule (ex. faciès intermédiaire et croûtes caillouteuses).

Une information plus riche, du point de vue spectral et/ou bidirectionnel, est-elle souhaitable ? Les observations ont confirmé l'attente (chapitre 2) que l'intensité du signal fournirait l'essentiel du pouvoir de distinction. Il en ressort qu'une information spectrale plus riche n'améliorera pas forcément les résultats de façon très significative. Ceci s'explique par la nature physique de la différence entre les types d'état de surface, qui ne s'exprime pas toujours par une différence de couleur, ainsi que par les variations de couleur entre états de surface d'un même type, comme résultant de variations en composition sans intérêt hydrologique. En revanche, ces constatations nous mènent à la conclusion qu'un enrichissement de l'information au niveau bidirectionnel possède le potentiel d'améliorer la distinction des différents états de surface, notamment s'il a lieu dans le plan du soleil. L'obtention d'un tel enrichissement se heurte malheureusement à des problèmes pratiques.

L'originalité de notre approche de classification réside dans le classement des pixels dans des classes radiométriques prédites, à l'aide de triplets BRDF prédéfinis, et qui tiennent donc compte de la configuration soleil-capteur. Cette approche tire profit du fait qu'à un niveau de résolution de 0.25m on travaille désormais à la même échelle que celle à laquelle la vérité terrain est acquise, ce qui rend la connaissance obtenue par cette voie directement transposable aux images de télédétection. Cet aspect semble fournir la robustesse recherchée pour la méthode et la rendre transposable à d'autres milieux : pourvu que l'on connaisse les différents états de surface et leur variabilité organique et minéralogique pour la zone d'étude, les classes hydro-spectrales peuvent être établies une fois pour toutes et leur réponse prédite pour toute condition d'acquisition.

Cette connaissance doit être formalisée par des hypothèses, permettant de définir auparavant les limites de la validité de la méthode. Les conditions d'acquisition de l'information sont soumises à ces limites et au cas par cas il faudrait voir si la liberté d'acquisition de l'information, dans le temps et dans l'espace, ne s'en trouve pas trop compromise par rapport aux objectifs. Dans notre cas par exemple l'hypothèse d'une pellicule de surface sèche s'impose, mais les restrictions qui en résultent sont considérées comme acceptables. Dans ce contexte notons que la vérification de notre hypothèse sur

l'influence non significative des variations minéralogiques de la surface – sur la couleur à la surface – a montré qu'elle doit être rejetée pour des petites zones à affleurement de roche-mère calcaire blanchâtre. Ce rejet nous laisse le choix soit de définir un ensemble de classes hydro-spectrales additionnel, dédié aux états de surface sur ce substrat, soit d'écarter ces zones de l'étude. Un tel choix doit être pris en concertation avec l'hydrologue, car même si ces zones sont très limitées en taille, les parcelles dont elles influencent la synthèse de l'état de surface couvrent, quant à elles, une surface quelque peu plus importante, et ces zones peuvent se situer à des endroits où l'état de surface a une influence relativement élevée sur le comportement hydrologique de la parcelle (ex. position en pente).

L'analyse de sensibilité a montré que la robustesse de l'approche peut se trouver compromise du fait du bruit introduit par des aspects liés à la légèreté du dispositif. Dans un premier temps, il semble important d'apporter à notre dispositif les modifications suivantes : la numérisation des clichés par un densitomètre, permettant l'obtention de la luminance et ouvrant donc la voie à une correction radiométrique non empirique ; la modification du dispositif afin de mieux assurer l'orthogonalité de la vue ; la notation plus précisément de l'heure de passage pour la détermination précise de la position du soleil.

Dans un deuxième temps, il semble intéressant d'étudier la possibilité d'enrichir l'information bidirectionnelle, car cela permettra de lever (en partie) l'indétermination qui caractérise les résultats obtenus. L'idéal serait de disposer de la connaissance d'un ensemble de réflectances pour chaque pixel, obtenues sous différents angles (de vue), d'un nombre suffisant pour fournir un triplet BRDF par pixel, permettant une classification sans ambiguïté. Mais déjà le fait de disposer de deux informations pour chaque pixel, dont une obtenue en contre-jour et l'autre en rétrodiffusion, permettra de baser la distinction entre les deux membres de chaque couple de classes hydro-spectrales sur leur zone de meilleure séparabilité (annexe 2C). Ceci signifierait sans doute une diminution significative de l'indétermination. Mais il faut rappeler que cela pose le même problème que celui du suivi temporel (§ 6.1.5), *i.e.* la nécessité de replacer de façon exacte à plusieurs reprises un pixel dans l'espace. Ceci demande un dispositif très performant du point de vue géométrique. La possibilité et les besoins de la réalisation d'un tel dispositif méritent d'être inventoriés.

Nous avons constaté que la classification spectrale dans sa forme actuelle ne peut éviter que un nombre de pixels souvent important soit classé "flou", *i.e.* affecté à deux ou trois classes hydro-spectrales à la fois. On s'attend à pouvoir lever en partie cette indétermination à l'aide des deux axes d'information restants : l'information temporelle et la prise en compte du contexte spatial. Ce dernier axe fait l'objet du prochain et dernier chapitre, aboutissant à une description de l'état de surface de la parcelle.

7 Description des états de surface de la parcelle ; synthèse des informations élémentaires

7.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est double. Un premier objectif est d'augmenter la précision de la classification des pixels par l'étude de leur contexte spatial : ayant tiré le maximum de l'information spectrale disponible, on constate que cette information à elle seule ne suffit pas à s'exprimer sans ambiguïté sur l'état de surface au niveau du pixel. L'information spatiale est l'une des informations complémentaires qui pourraient être la solution à ce problème.

Le deuxième objectif – tout aussi important – est de réaliser le dernier maillon de l'étude, qui devra permettre d'établir le lien tant recherché entre télédétection et modélisation hydrologique : on redescendra au niveau de l'échelle de la parcelle, considérée comme unité hydrologique élémentaire, pour laquelle on tentera de synthétiser l'information obtenue sous forme de caractéristiques pour les modèles hydrologiques.

Une seule approche est suivie afin de satisfaire les deux objectifs simultanément. Il ne s'agit pas d'une approche empirique basée sur des corrélations entre les états de surface au niveau de la parcelle et une information texturale contenue dans l'image, mais d'une approche mécaniste fondée sur des connaissances d'expert. On y combine deux approches actuellement en vogue en télédétection :

- ⇒ l'utilisation de l'information spatiale (Woodcock & Strahler, 1987 ; Wilkinson, 1996 ; Stein *et al.*, 1998 ; Curran, 1999) ;
- ⇒ la classification par parcelle (Kettig & Landgrebe, 1976 ; Pedley & Curran, 1991 ; Jansen & Molenaar, 1995 ; Hinton, 1996 ; Smith *et al.*, 1997).

Une telle approche permet l'utilisation dans la classification (*i.e.* la synthèse au niveau de la parcelle) de la connaissance sur la distribution intra-parcellaire des objets. Mason *et al.* (1988) décrivent différentes utilisations du parcellaire dans la classification. Nous en utilisons deux à la fois : en effet l'utilisation du parcellaire pour le découpage de l'image à radiométrie classifiée signifie à la fois une stratification avant classification de la parcelle (deuxième objectif : découpage de l'image pour obtenir une synthèse par parcelle) et une post-classification au niveau du pixel (premier objectif : détermination plus précise de la classe hydro-spectrale en fonction du résultat de la synthèse).

La connaissance d'expert disponible concernant le milieu physique et cultural a été décrite dans les chapitres 2 et 3. Les aspects qui concernent l'organisation spatiale sont rappelés dans ce chapitre et ils sont traduits en termes de pixels et d'organisation (§ 7.2). Les lacunes dans la connaissance d'expert sont comblées par un ensemble d'observations de terrain dont les résultats sont présentés et discutés.

La "traduction" de ces connaissances en termes de fréquence, voisinage et taille de groupes de pixels appartenant aux différentes classes hydro-spectrales, aboutit à un modèle permettant d'obtenir une description générale de l'état de surface de chaque parcelle (§ 7.4). La validité de ce modèle sera évaluée par comparaison aux observations de terrain.

Toutefois, avant de pouvoir s'intéresser à l'échelle de la parcelle il nous faut considérer une échelle intermédiaire entre pixel et parcelle, l'interrang (§ 7.3). En effet, des discontinuités peuvent apparaître à ce niveau (chapitre 3) et celles-ci peuvent compromettre la synthèse au niveau de la parcelle.

7.2 Distribution spatiale des variables à la surface de la parcelle

Dans ce paragraphe nous cherchons à répondre à deux questions :

- ⇒ Quelles sont donc ces connaissances d'expert qui vont nous permettre d'identifier l'état de surface au niveau de la parcelle ?
- ⇒ Connaît-on la répartition spatiale des différentes variables de l'état de surface à l'intérieur de la parcelle pour chaque type d'état de surface à cette échelle ?

C'est la précision avec laquelle cette connaissance est disponible qui va déterminer la précision avec laquelle on va pouvoir la formaliser, implanter et donc reconnaître ! Un rappel rapide (§ 7.2.1) des connaissances exprimées au cours du chapitre 2 permet d'identifier les lacunes les plus importantes. Dans le paragraphe suivant (§ 7.2.2) on étudie les résultats d'observations qui ont pour but de combler ces lacunes.

7.2.1 Rappel des connaissances

L'état de surface résulte de l'action combinée sur une période donnée (1) des caractéristiques du milieu physique, (2) des pratiques culturales, (3) des caractéristiques des événements de pluie (intensité, volume, fréquence...). Les caractéristiques du milieu définissent la situation initiale, la pratique culturale la modifie et les facteurs pluie et temps déterminent sa dynamique.

En absence de pratiques culturales entraînant une évolution des états de surface ou un maintien dynamique, on se retrouve dans une situation illustrée par les parcelles en friche ou encore sur des vignes abandonnées : un enherbement presque total, sur un mulch plus ou moins important de débris organiques recouvrant un sol minéral à surface fermée. En absence d'engazonnement les pratiques culturales qui concernent l'interrang ont toujours pour effet de diminuer le recouvrement herbacé, même si cela n'est pas l'objectif initial. Une fois par an les sarments et de feuilles mortes apportent de la matière organique, qui sont soit abandonnés à la surface, et en font donc partie, soit sont enlevés de la surface (par incorporation dans le sol ou exportation de la parcelle). A part cette éventuelle pratique d'abandon à la surface, toute pratique a pour effet de plus ou moins dénuder la surface minérale. Le labour ou le désherbage chimique intégral établissent une situation "initiale" de dégagement total. Ensuite la surface de la parcelle subit une évolution ayant tendance à, soit être cyclique et donc retourner vers l'état d'enherbement total, ou à modifier durablement la surface en la dégradant. À tout moment, de nouvelles pratiques culturales peuvent intervenir et réinitialiser la morphologie de l'état de surface du sol.

7.2.1.1 Situations initiales et finales

Parmi les situations initiales on peut distinguer les surfaces labourées ou encroûtées. Dans les deux cas, l'itinéraire cultural entraîne une homogénéisation de la surface du sol à l'échelle de la parcelle. On s'attend donc à une très forte prépondérance soit des classes hydro-spectrales $F0$, soit des classes *croûte caillouteuse* et/ou $F2$. Si aucune forte pluie ne survient, l'état de surface *labouré* peut être préservé tout en permettant le développement d'un certain enherbement. Cet enherbement occupe de petites niches et ne forme pas de concentrations importantes. L'état de surface est donc censé être uniforme tant du point de vue hydrologique que spectral. Les surfaces à faciès intermédiaire ou encroûté ne sont pas rencontrées dans l'interrang.

La situation initiale après désherbage chimique peut très bien être uniforme vis-à-vis de ses propriétés d'infiltration sans pour autant l'être du point de vue radiométrique. Premièrement la présence de cailloux peut provoquer un changement radiométrique sans qu'il soit significatif du point de vue hydrologique. Cette présence dépend de la nature du substrat et peut donc varier à l'intérieur de la parcelle. De la même façon, des résidus d'herbe sèche, des sarments et des feuilles mortes peuvent s'y rajouter. Les feuilles et l'herbe peuvent aussi bien être distribuées de façon uniforme que discontinue ou concentrée. Les sarments ont une présence diffuse, sauf lorsqu'ils sont présents un interrang sur deux ou entraînés par ruissellement. Dans ces deux derniers cas, on observe généralement des amas de sarments.

Le stade final après enherbement généralisé, décrite ci-dessus, est elle aussi caractérisée par une grande homogénéité sur la parcelle. Des surfaces dégradées, qui soit par un long antécédent de désherbage sur des sols limoneux se traduisent par une surface compactée et fortement encroûtée, ou qui par enrichissement relatif des cailloux après départ de terre fine sur sols caillouteux aboutissant à des croûtes très caillouteuses, peuvent également être considérées comme des situations finales. Leur dynamique évolutive est très faible et elles peuvent être maintenues dans cet état par un "entretien" minimal.

7.2.1.2 Situations intermédiaires

Dans l'évolution d'un état "initial" vers un état "final" plusieurs facteurs de l'état de surface sont modifiés : le faciès et la rugosité, la pierrosité de surface (peu visible et sans forte influence hydrologique dans le cas d'un faciès ouvert de type F0), l'enherbement et éventuellement les sarments et feuilles mortes.

Le faciès évolue au gré de la pluie reçue, de façon quasi uniforme à travers la parcelle. Il en est de même pour la rugosité sauf si une rugosité périodique est introduite par le passage d'engins dans l'interrang. La pierrosité peut augmenter au fur et à mesure que le faciès se referme et peut progressivement introduire une variabilité spatiale, au moins du point de vue radiométrique.

Un faciès intermédiaire n'est encore que faiblement enherbé, mais la colonisation progressive de l'espace peut déjà conduire à la présence de concentrations d'une taille de plusieurs pixels. Du point de vue hydrologique il n'y a plus un seul, mais deux états de surface possibles : le faciès intermédiaire et la surface enherbée. Une fois fermé, le faciès F2 est plus ou moins vite couvert d'herbe en fonction de la présence et l'efficacité des désherbants, et aussi du microclimat. Ce dernier facteur peut entraîner une variabilité intra-parcellaire de l'état de surface. Peuvent s'y rajouter des sarments et feuilles mortes, les premiers le plus souvent dispersés, les derniers souvent rapidement localement concentrés. Plus ou moins significatifs sur le plan hydrologique, ils influencent le signal télédétekté.

7.2.1.3 Populations de pixels attendues

Ces quelques connaissances nous permettent de réaliser une première estimation des fréquences des différentes classes hydro-spectrales par parcelle (tableau 7.1). Comme on peut le constater, notre connaissance de la variabilité spatiale intra-parcellaire des états de surface est encore très imparfaite. Les lacunes les plus importantes concernent les surfaces à faciès fermé mais encore en évolution, car le nombre d'états de surface pouvant être rencontrés à l'intérieur d'une seule parcelle y est le plus grand. Même si l'organisation spatiale des éléments de l'état de surface n'a pas toujours une influence significative sur le comportement hydrologique de la parcelle, sa compréhension est nécessaire pour obtenir une bonne exploitation des informations télédétektées. Les hiatus pour lesquels une réponse semble exigée sont (1) la taille des éléments de la surface de ce type de parcelle et (2) l'existence de lois de voisinage. Ceci constitue l'objet du prochain sous-paragraphe.

type de surface de la parcelle	Fréquence indicative des classes hydro-spectrales à l'échelle du pixel (%)						
	F2	F1 et/ou cailloux	F0	mélange non-vert	mélange vert	herbe verte	sarments/feuilles
labouré	0	0	75 – 100	0 – 25	0 – 25	0 – 5	0
faciès intermédiaire	0	20 – 80	0	10 – 80	0 – 80	0 – 10	0 – 5
surface fermée en évolution	0 – 100	0 – 100	0	0 – 100	0 – 80	0 – 80	0 – 20
enherbée	0	0	0	0 – 20	0 – 20	80 – 100	0
croûte très caillouteuse	0	20 – 100	0	0 – 80	0 – 20	0 – 10	0 – 20

Tableau 7.1 Gammas de fréquences de classes hydro-spectrales considérées possibles pour les principaux types d'état de surface.

7.2.2 Compléments apportés par des observations de terrain

7.2.2.1 protocole d'observation et méthode d'analyse

L'objectif de ces observations est de comprendre comment les variables plus ou moins dynamiques de l'état de surface s'imposent sur la surface du sol au cours de son évolution : quelle est la taille des différents éléments de la surface et comment s'organisent-ils ? Pour fournir une première réponse à cette question, on a mis au point un protocole d'observation de terrain. Bien qu'il s'agisse d'observations à grande échelle, ce protocole n'est pas adapté pour l'étude de la taille et forme de très petits objets (d'ordre centimétrique). Il devrait par contre permettre d'étudier la transition entre les différentes composantes de la surface et d'évaluer l'importance de variations à une échelle qui correspond à l'intérieur des pixels de nos images.

À une même époque (février 2000), sept parcelles à des stades ou types d'évolution différents ont été sélectionnées. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 7.2 à l'aide des notations "classiques" (voir chapitre 3) des états de surface. Les deux premières parcelles (n° 1 et 2) se situent sur le site de Roujan-Alignan, les n° 3 et 4 à Caux, et les n° 5, 6 et 7 à Neffiès (voir images dans l'annexe 2E).

Dans chacune de ces parcelles, 100 séries unidimensionnelles d'observations ponctuelles ont été effectuées (voir le protocole dans l'annexe 2D). La position et l'orientation de chaque série avaient été déterminées auparavant par tirage au sort. Chaque série est composée d'observations ponctuelles tous les 0.05m le long d'une perche graduée de 1.70m, soit 35 observations classées dans les catégories suivantes : agrégat, croûte, cailloux, sarments, débris organique, herbe sèche, herbe verte. Cette échelle d'observation permet d'obtenir une idée aussi bien sur la variabilité interne du pixel (0.25m) que sur le voisinage entre pixels (chaque série d'observations est long de plus de 6 "pixels").

Les données ont été analysées à l'aide une approche non-paramétrique, *i.e.* sans présupposer de forme aux courbes (de variogramme et de probabilité de transition). Par série, par parcelle ou par sélection de séries (sélectionnées sur par exemple l'orientation par rapport au rang), les variogrammes (croisés) et les probabilités de transition ont été calculés entre les différentes "indicatrices" (catégories), à l'instar de Carle & Fogg (1996).

Les données à l'intérieur des séries ont ensuite été réorganisées de façon aléatoire pour constituer la référence. 99 répétitions de ces réorganisations aléatoires, chacune suivie du calcul du variogramme et de la probabilité, nous fournissent des gammes de valeurs permettant de dire, à un niveau d'erreur de

1%, si les observations sont distribuées de façon non aléatoire, par calcul de la bande de confiance et test d'écart à la moyenne (Diggle, 1983).

Les méthodes proposées par Carle & Fogg (1996) nous permettent d'étudier la longueur moyenne des objets et les motifs de juxtaposition. Les auteurs démontrent que la longueur moyenne $\bar{l}_{k,\phi}$ dans la direction ϕ de la catégorie k peut être déduite de la probabilité de transition $t_{k,k}$ par la relation suivante :

$$-\frac{\partial t_{k,k}(h_\phi \rightarrow 0)}{\partial h_\phi} = \frac{1}{\bar{l}_{k,\phi}} \quad (7.1)$$

où h_ϕ est le *lag* (distance ou pas entre deux observations) pour une direction ϕ . C'est donc la valeur de l'abscisse à l'intersection de la projection sur l'axe du *lag* de la pente à l'origine, qui fournit une estimation de $\bar{l}_{k,\phi}$. La détermination de la pente nécessite au moins deux points d'observations, ce qui dans notre cas limite la plus petite longueur moyenne détectable à 0.10m (seuil de détectabilité). L'approche d'observations ponctuelles retenue ne se prête donc pas à l'étude d'objets d'une taille (largeur) généralement inférieur à ce seuil.

En supposant un modèle stationnaire de la surface, $t_{m,k}(h)$ est la probabilité de rencontrer la catégorie m et, à une distance h de lui, la catégorie k . Alors $[1 - t_{m,m}(h)]$ est la probabilité de transition vers toute catégorie $k \neq m$ à $x+h$, étant donné m à x . Les proportions relatives pour les catégories $k \neq m$ sont $p_k/[1-p_m]$. Si l'on suppose $t_{m,k}(h)$ pour $k \neq m$ aléatoire (l'hypothèse nulle), elle dépendra uniquement des proportions relatives des catégories $k \neq m$. Ce modèle de probabilité de transition aléatoire $t_{m,k}^{(r)}(h)$ est

$$t_{m,k}^{(r)}(h) = [1 - t_{m,m}(h)] p_k / [1 - p_m] \quad \text{pour } k \neq m \quad (7.2)$$

Des déviations notables de ce modèle indiquent soit une tendance "affective" (au dessus), soit une tendance à l'exclusion mutuelle (en dessous). Cette mesure est complémentaire par rapport à celle des randomisations : la première est basée sur les fréquences au niveau de la parcelle, tandis que la dernière est basée sur la série de 35 observations. Dans le cas d'une distribution homogène à travers la parcelle, leurs résultats sont semblables. Par contre si la probabilité de transition aléatoire se situe près ou en dehors de la limite fournie par les randomisations à l'intérieur des séries, ceci met en évidence la présence d'une anisotropie spatiale au niveau de la parcelle entre les deux éléments concernés.

Comme retombée annexe de la méthode, les fréquences des classes au niveau de la parcelle permettent d'évaluer la précision des estimations visuelles comme réalisées dans le cadre des observations classiques de l'état de surface, *i.e.* notre vérité terrain (tableau 7.2). On constate que l'erreur commise dans ces estimations visuelles peut être considérable, notamment dans l'estimation du taux de cailloux.

Dans un deuxième temps (§ 7.2.2.3) l'effet des distributions spatiales observées sur les populations de pixels attendues dans l'image, sera brièvement évoqué. A cette fin sont employées de simples lois de transition d'échelle. Elles supposent que l'on peut considérer les séries unidimensionnelles d'observations comme décrites ci-dessous, valides en deux dimensions. C'est à dire que l'on suppose les fréquences observées en une dimension d'une taille L représentatives d'une surface carrée $L \times L$ où L est la taille du pixel (hypothèse de "continuité latérale").

parcelle cadastrale	culture	cailloux	travail du sol	faciès	croûte	enherbement		sarments		érosion	rugosité	humidité
						interrg	rang	cep	sol			
1 : AW 54	VP	0 6%	0	F2	C	30 10%	60 10%	PT	P 6%	R	1	F
2 : WY 5	VP	1 19%	0	F2	C	30 22%	40 23%	NT	P 6%	0	0	F
3 : D2 1132 - 2	VP	1 1%	1d	F1	C	15 9%	0 0%	NT	P 7%	0	1	F
4 : E3 712/713	VG	1 20%	0	F1/F2	C	5 5%		T	0 3%	R	0	F
5 : D 293	VG	1 2%	0	F2	C	30 66%	70 74%	T	P 5%	0	0	sec
6 : D 312	VG	2 39%	0	F2	C	25 21%	55 24%	NT	P 8%	0	0	sec
7 : D 64	VP	1 23%	0	F2	C	20 13%	0 5%	NT	P 10%	0	1	sec

Tableau 7.2 Description de l'état des parcelles observées, comme notée sur le terrain (pour légende voir annexe 2A). Les pourcentages en deuxième ligne sont les fréquences issues du jeu d'observations "statistiques" et servent de comparaison à l'estimation visuelle. Les sarments présents au sol ne proviennent pas d'une taille récente, ce qui aurait faussé les résultats.

7.2.2.2 indications de taille et de voisinage

Analysons tout d'abord les fréquences des différentes classes composant la surface de la parcelle (tableau 7.3). Les fortes différences entre les parcelles semblent en grande partie dues à leur stade d'évolution respectif. Les parcelles observées peuvent être classées selon ce stade d'évolution, déduit du faciès et du taux d'enherbement :

- Jeune (après une ou deux pluies ruisselantes depuis le dernier labour) : parcelle 3 ;
- Intermédiaire (après plusieurs pluies ruisselantes) : parcelle 4 ;
- Avancé (colonisation avancée) : parcelles 1, 2, 6, 7 ;
- Près du stade final (grande partie entièrement couverte d'herbes) : parcelle 5.

Ces parcelles ont également été retenues pour leurs différents taux de couverture en cailloux. Ce facteur est stable mais il augmente la variabilité intra-parcellaire lorsque sa valeur est autre que 0 ou 100%. Les parcelles 2, 4 et 7 ont autour de 20% de cailloux, la 6 autour de 40% et les autres très peu.

Parcelle	Agrégat			Croûte			Cailloux			Sarment			Débris Organique			Herbe Sèche			Herbe Verte		
	P	R	I	P	R	I	P	R	I	P	R	I	P	R	I	P	R	I	P	R	I
1	12	21	10	45	10	52	6	5	7	6	12	5	22	43	17	3	4	3	7	6	7
2	1	1	1	28	13	30	19	18	19	6	8	5	26	37	24	10	19	8	12	4	14
3	5	16	4	71	72	71	1	3	1	7	5	7	7	5	7	0	0	0	8	0	9
4	0	-	-	60	-	-	20	-	-	3	-	-	7	-	-	0	-	-	5	-	-
5	0	0	0	15	9	17	2	3	1	5	6	4	10	8	11	67	73	65	1	1	1
6	0	0	0	21	13	23	39	43	38	8	9	8	10	11	10	15	20	14	7	4	7
7	0	0	0	29	6	32	23	32	22	10	28	8	24	29	24	1	2	1	11	3	12

Tableau 7.3 Fréquence des différentes classes observées par parcelle en général (P), sur le rang (R) et dans l'interrang (I). Comme la parcelle 4 est une vigne en gobelet sans cavaillon la distinction entre rang et interrang ne peut pas être faite (tirets).

Il est intéressant de noter que quatre mois après la chute des feuilles, les débris organiques (feuilles mortes et sarments) constituent l'élément qui, parmi les éléments végétaux, couvre le plus de surface à des stades intermédiaires et avancés. Par ailleurs, la composition de la surface sur le rang (cavaillon) diffère souvent considérablement de celle de l'interrang. Cette différence peut être plus ou moins forte, mais quelques règles générales semblent pouvoir être discernées : on trouve souvent plus d'herbe sèche et de débris organiques sur le rang que dans l'interrang, et toujours plus d'herbe verte dans l'interrang que sur le rang. Ceci est probablement l'effet du désherbage chimique du rang et de l'absence de labour. Parfois ceci provoque également un taux de cailloux plus important par rapport à l'interrang, résultat d'un enrichissement relatif.

La variation en composition entre les parcelles est importante : le taux d'herbe verte varie de 2 à 12%, celui des débris organiques de 7 à 26%, la portion de sol nu croûté de 15 à 71% etc. Est-ce que cela entraîne de fortes variations en taille des éléments respectifs, avec une taille qui augmente sur augmentation du recouvrement ?

⇒ la taille des éléments

La longueur moyenne (formule 7.1) nous permet de fournir une réponse à cette question. Le tableau 7.4 montre la longueur moyenne des différents éléments pour les différentes parcelles. Le rapport avec les taux de recouvrement respectifs (tableau 7.3) est donné par la figure 7.1. Le résultat le plus important est que la taille des éléments est généralement petite, *i.e.* quelques dizaines de centimètres. À des taux de recouvrement inférieurs à 10%, les seuls éléments dont la longueur dépasse souvent le seuil de détectabilité sont l'herbe verte (parcelles 1, 3, 4 et 6) et les débris organiques (parcelles 3 et 4). Par contre, même dans l'interrang celle-ci ne dépasse pas les 0.30m pour les parcelles étudiées. Les sarments ne sont dans aucun cas retrouvés en concentration importante ; la longueur moyenne de l'objet "sarment" est toujours inférieure au seuil de détectabilité.

Parcelle	Agrégat	Croûte	Cailloux	Sarment	Débris Org.	Herbe Sèche	Herbe Verte	Minéral	Org.
1	0.17 <	0.37 0.75	0.13 <	< <	0.23 <	< <	0.13 <	0.60	0.32
2	< *	0.36 0.34	0.27 0.24	< <	0.22 0.22	0.25 <	0.18 0.30	0.45	0.58
3	0.15 0.17	0.95 1.82	< <	< <	0.17 <	< <	0.27 0.18	1.20	0.27
4	* *	0.75 0.88	0.38 0.37	< <	0.18 <	< <	0.15 0.16	1.1	0.26
5	< <	0.25 <	< <	< <	0.18 <	0.82 1.00	< <	0.23	2.20
6	* *	0.27 0.32	0.48 0.50	< <	0.23 0.15	0.23 0.2	0.17 0.18	0.70	0.55
7	* *	0.36 <	0.51 <	< <	0.25 <	< <	0.13 <	0.50	0.43

Tableau 7.4 Longueur moyenne (m) des éléments estimée selon la méthode de Carle & Fogg, 1996. Le chiffre supérieur est l'estimation générale et le chiffre inférieur l'estimation basée sur les observations dans l'interrang réalisées parallèlement au rang. Les éléments Minéral et Org. (organique) présentent la longueur estimée après regroupement resp. des éléments agrégat, croûte et cailloux, et de l'autre côté des éléments sarments, débris organique, herbe sèche et verte. * = non présent ; < = inférieur au seuil de détectabilité.

En dehors des sarments, la longueur moyenne des objets paraît évoluer de la même façon partout et pour tous les éléments (fig. 7.1), et même pour les éléments regroupés en *éléments minéraux* (agrégat, croûte, cailloux) et *éléments organiques* (sarments, débris, herbe) ! Donc de la même manière qu'une

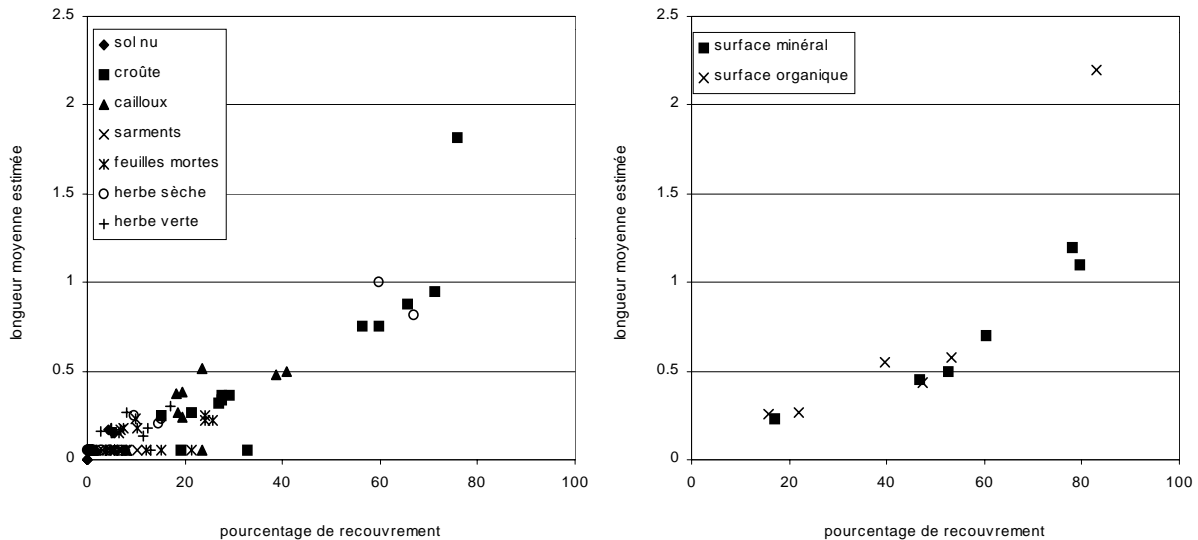


Figure 7.1 Évolution de la longueur moyenne (m) en fonction du recouvrement de la surface (%) par l'élément concerné.

surface continue de sol encroûté peut être entrecoupée par la présence d'un sarment, les touffes d'herbe sèche et verte sont entrecoupées par des petites taches de sol nu. Ceci a pour effet que dans presque tous les cas, la taille d'un élément pur reste limitée : jusqu'à une dominance spatiale de $\frac{3}{4}$ de la surface totale, la longueur moyenne de n'importe quel élément est de seulement un mètre maximum. À des dominance plus fortes elle accroît rapidement. Le fait que ceci reste valide pour les regroupements en éléments minéraux et organiques montre que ce sont surtout les éléments minéraux qui limitent la longueur des éléments organiques et *vice versa*. Il n'y a donc pas de préférence évidente de voisinage entre croûte et cailloux, ni entre herbe et feuilles mortes.

Au vu des différents stades d'évolution des parcelles étudiées, il semblerait donc que jusqu'à un stade d'évolution très avancé, les éléments sont d'une taille petite, organisés entre eux de façon apparemment aléatoire. Dans l'interrang la taille moyenne peut rester inférieure au seuil de détection jusqu'à un recouvrement voisin de 30%.

⇒ *organisation spatiale et voisinage*

L'étude de la probabilité de transition et de la semivariance semble confirmer ces observations (figure 7.2 et annexe 2F, les semivariogrammes ne sont pas représentés ici pour cause de redondance). Si les différentes catégories d'éléments peuvent plus ou moins s'associer, ou au contraire s'exclure, à courtes distances (10 ou 20 centimètres, voir aussi la figure 7.3), la relation spatiale se perd rapidement dans le "nuage aléatoire" lorsque la distance augmente. Souvent il semble même être question d'un motif d'alternance : les diagrammes de l'autotransition (sur la diagonale, figure 7.2) montrent une agrégation significative à courte distance, qui en traversant le nuage aléatoire se transforme en une répulsion significative à partir d'une distance qui est généralement de l'ordre de 0.40 à 0.60m (exemple "A" dans la figure 7.2). Les données reclassées en *minéral* et *organique* donnent des résultats généralement semblables. Ceci confirme l'explication proposée ci-dessus, à savoir que ce sont les éléments d'un groupe qui limitent la taille des éléments de l'autre. La figure 7.3 montre pour la parcelle n° 6 que ces groupes s'excluent à courte distance, mais qu'ils se convoient de façon significative au-delà de cette distance.

L'anisotropie des parcelles 5 et 6, choisies entre autres pour leurs motifs d'enherbement non homogènes, est démontrée par l'écart entre randomisations et transition aléatoire. Concernant la transition de croûte, cailloux et sarments vers herbe sèche pour la parcelle 5 (annexe 2F) et 6 (exemple "C" dans la figure 7.2), on voit que les randomisations tombent en dessous de la probabilité de

ensemble de diagrammes de probabilité de transition (parcelle n°6)

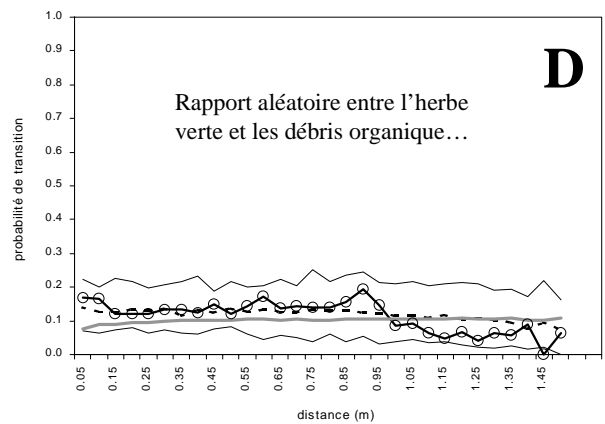
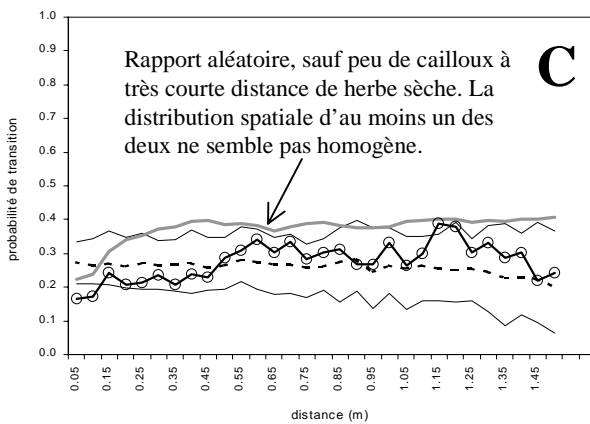
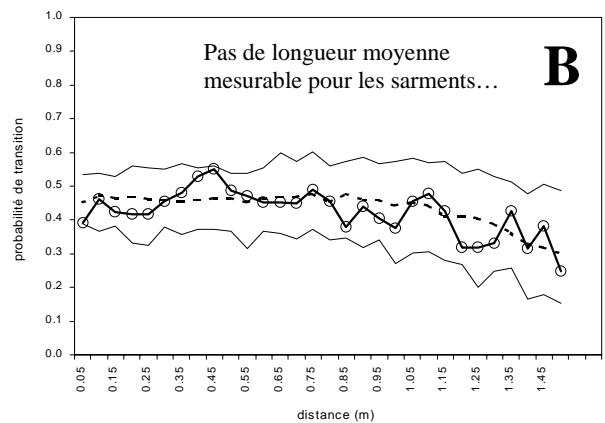
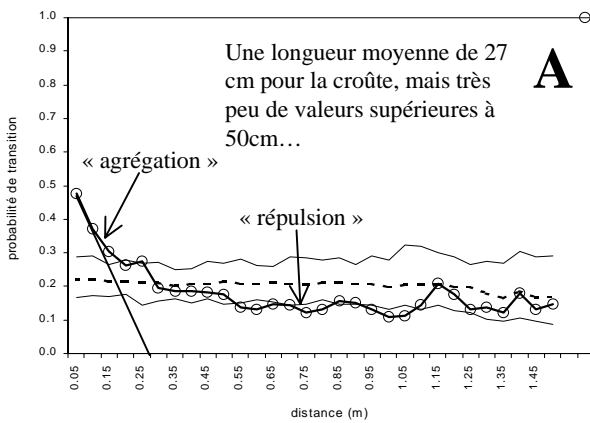
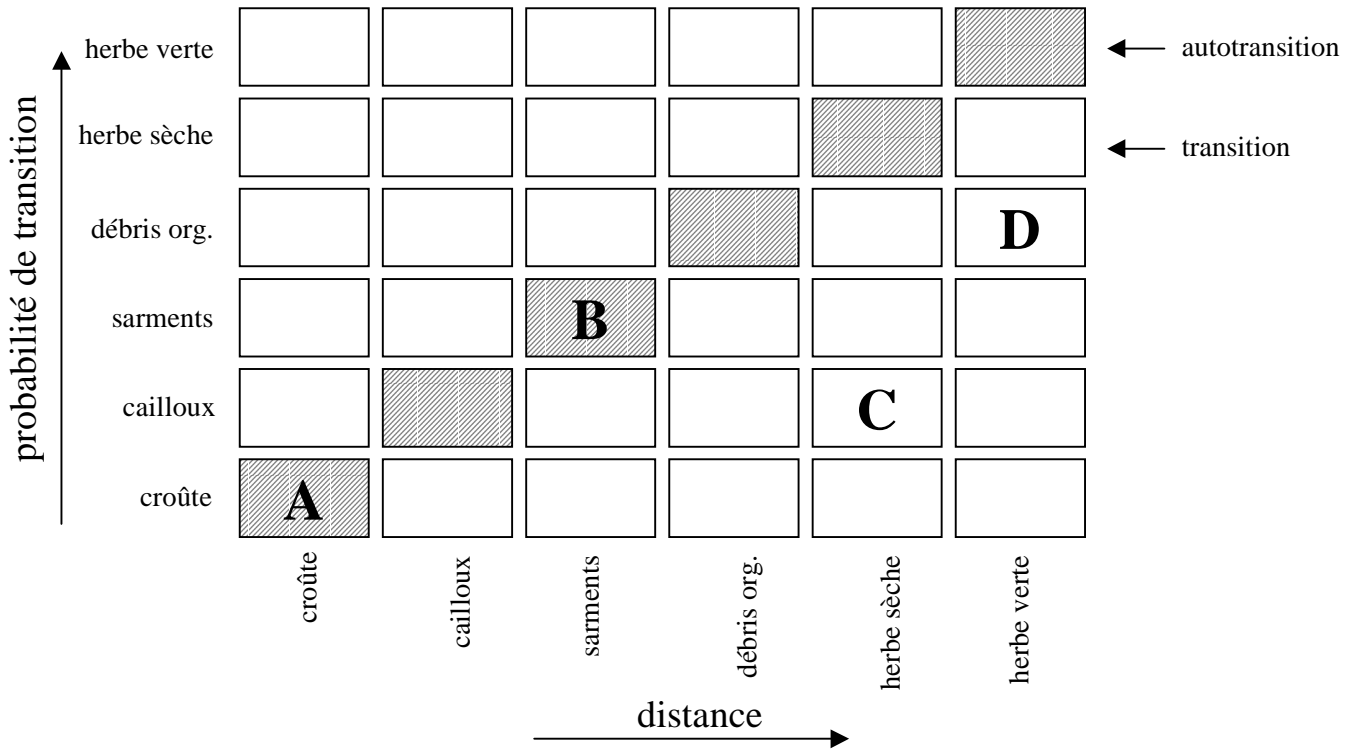


Figure 7.2 Quelques exemples de diagrammes de probabilités de transition pour la parcelle n°6. Les mesures sont indiquées par des ronds, la moyenne des randomisations par des tirets, les limites des randomisations par des traits noirs (intervalle de confiance à 1%) et la transition aléatoire selon la formule 7.2 par un gros trait gris. La projection sur l'abscisse dans les diagrammes d'autotransition (A) indique la longueur moyenne des éléments. Voir annexe 2F pour les autres parcelles.

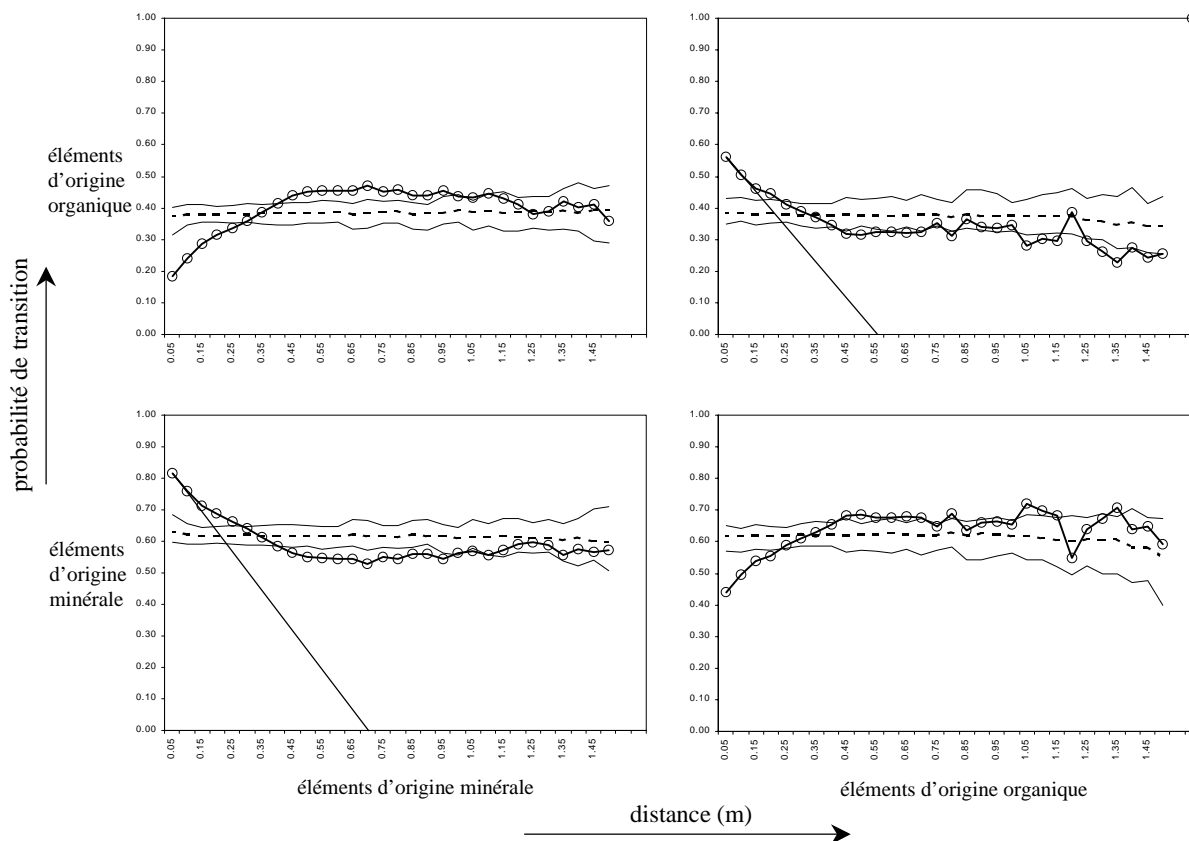


Figure 7.3 Diagrammes de transition pour la parcelle n° 6 après regroupement en éléments minéraux (agrégats, croûtes et cailloux) et éléments organiques (sarments, débris organique et herbe verte et sèche). Voir figure 7.2 pour la signification des symboles et traits.

transition aléatoire : ceci s'explique par le fait que ces éléments se trouvent peu ensemble dans une même série, ce qui à son tour indique la présence d'une ségrégation spatiale. Il en est de même pour la parcelle 6 où des surfaces caillouteuses sont séparées des surfaces plus couvertes de débris organiques et herbe sèche. Au vu des résultats présentés dans le tableau 7.4 et la figure 7.1 on doit conclure que ces différents motifs d'occupation de la surface au niveau de la parcelle n'influencent pas de manière évidente la taille des éléments. A un taux d'enherbement d'autour de 20%, les motifs de colonisation dispersé (parcelle 2) et anisotrope (parcelle 6), donnent des longueurs moyennes semblables.

7.2.2.3 prise en compte de l'effet du changement d'échelle

Quelles sont donc les conséquences de ces résultats pour la façon dont les pixels composant l'image numérique représentent les éléments de la surface ? L'absence d'une prise de vue aérienne au moment des mesures de terrain ne permet pas de réaliser une comparaison directe entre les descriptions obtenues ci-dessus et les résultats de la classification des pixels. Nous avons donc choisi une démarche simple permettant d'obtenir une indication de la façon dont la taille limitée des éléments de la surface et l'absence de règles évidentes de voisinage définissant leur organisation spatiale, influencent leur représentation dans l'image. Il s'agit d'une agrégation virtuelle des observations ponctuelles en pixels dits "théoriques" : chaque séquence d'observations est découpée en groupes de 5 observations de 0.05m, soit au total 0.25m, *i.e.* un pixel (sous l'hypothèse de continuité latérale, voir fin § 7.2.2.1).

Nous présentons ici l'exemple de l'élément *croûte*. Pour que une série de cinq observations puisse être considérée comme une *croûte* "théorique", il est exigé que toutes les cinq soient des observations minérales dont au moins trois sont des croûtes (dans le chapitre 6 l'on a vu que la présence d'éléments autres que minéraux empêche un pixel d'être classé comme *croûte*). Donc, tout en tolérant la présence de quelques cailloux, on obtient le résultat illustré par le tableau 7.5. Une telle démarche démontre

l'effet provoqué par la distribution quasi aléatoire décrite auparavant : à cause de la petite taille des éléments on ne retrouve que peu d'observations *croûte* dans des pixels *croûte*, mais en même temps le rapport entre les deux varie entre les parcelles, sans que l'on puisse y attacher une explication évidente. Si ensuite, on regarde le voisinage entre ces pixels théoriques, on s'aperçoit que plus de la moitié des pixels *croûte* se trouve isolée parmi d'autres types de pixels. Comme ceux-ci seront souvent difficiles à détecter (à cause du maillage de l'image, l'ombre portée d'herbes avoisinantes, etc.) le taux de pixels *croûte* détecté est censé être intermédiaire entre les deux dernières colonnes du tableau 7.5. Ce tableau semble indiquer que dans les parcelles à forte dominance de croûtes minérales non couvertes (parcelles n° 3 et 4), la fraction de pixels non isolés est plus forte. Dans ces parcelles une partie importante de la surface encroûtée devrait directement pouvoir être identifiée comme telle. Mais comme ces parcelles sont souvent dans un stade d'évolution peu avancé, tout dépendra de la rugosité restante.

parcelle	croûte observée	pixels <i>croûte</i> estimés	groupes de 2 ou plus de pixels <i>croûte</i> voisins
1	45	23	7
2	28	11	3
3	71	43	21
4	60	50	28
5	17	5	2
6	21	16	5
7	29	13	4

Tableau 7.5 Estimations théoriques illustrant l'effet du changement d'échelle des observations ponctuelles de terrain vers l'image pour l'élément *croûte* à la surface des différentes parcelles. Les chiffres sont en pourcentage de la surface totale de la parcelle.

Pour les autres éléments les résultats sont à peu près comparables, sauf bien sûr pour les sarments. Partant d'un recouvrement par l'herbe verte par exemple d'autour de 10%, il reste moins de 5% de pixels *herbe verte* après application d'une règle de transformation exigeant quatre ou cinq observations d'herbe verte sur cinq pour que la série soit considérée comme une série se traduisant en un pixel *herbe verte* sur classification radiométrique. Et de nouveau les résultats de cette transformation varient entre les parcelles (4.8% sur 8% au total pour la parcelle n° 3 et 2.2% sur 11.5% au total pour la parcelle n° 7).

⇒ conclusions

Pour la gamme de stades d'évolution étudiés, on n'a pas pu mettre en évidence, à l'aide du faible nombre de parcelles étudiées, la présence de "lois" de taille et de voisinage des éléments des états de surface permettant soit de lever directement une ambiguïté spectrale sur la base de critères de taille ou de voisinage, soit d'en déduire le stade d'évolution d'une parcelle (et par ce biais une indication de l'état de surface). Il semble que la nature de la distribution spatiale des éléments soit quasi aléatoire.

En conséquence des résultats décrits, on doit s'attendre à de fort taux de pixels *mélange* et *F1/cailloux* aux dépens de pixels *croûte* dans le cas des parcelles à faciès fermé. L'absence de lois de distribution a de fortes implications sur l'approche de synthèse au niveau de la parcelle : elle ne permet pas d'établir des critères texturaux permettant d'identifier l'état de surface au niveau de la parcelle. En conséquence, la synthèse sera dans un premier temps fortement basée sur les fréquences. La connaissance d'expert disponible est d'une précision limitée et le modèle nécessitera un minimum de calage. Afin de rendre ce modèle robuste il importe de vérifier que l'intégralité de la surface de la parcelle soit soumise aux mêmes pratiques culturales, ce qui fait l'objet du paragraphe suivant.

7.3 Modèle de reconnaissance de discontinuités à l'échelle de l'interrang

7.3.1 Introduction

À ce stade de l'étude nous savons extraire l'information correspondant à la surface du sol éclairée d'une parcelle reconnue comme cultivée en vigne. Nous savons également interpréter la partie spectrale de cette information et nous disposons de quelques connaissances en vue de synthétiser l'information interprétée en une description de l'état de surface de la parcelle.

Cette synthèse sera cependant soumise à l'hypothèse d'une pratique culturale uniforme à l'intérieur de la parcelle. Prenons pour exemple une des situations importante à reconnaître, la parcelle labourée. Nous avons vu que l'interprétation spectrale ne permet que rarement d'identifier sans ambiguïté une surface comme étant labourée, mais nous savons que sa singularité réside dans son homogénéité spatiale : des pixels *potentiellement labourés* couvrant la quasi-intégralité de la parcelle mènent logiquement à une classification de la parcelle comme étant labourée. Des transitions vers d'autres classes hydro-spectrales, à des échelles variant du mètre à la centaine de mètres, nous permettent d'exclure la possibilité d'une surface labourée et les pixels pourront alors être attribués à/aux autre(s) membre(s) de la classe floue.

Voici déjà en bref une partie de la démarche qui est décrite dans le paragraphe suivant. Mais il est évident que ceci fait tort à la reconnaissance d'un état de surface de la parcelle issu d'une pratique culturale sinon généralisée, du moins fréquemment rencontrée. Cette pratique peut être intitulée la pratique "discontinue". Décrite dans le chapitre 3, cette pratique englobe des cas comme la concentration de sarments taillés en un interrang sur deux, le désherbage de un sur N interrangs (où N est un entier variant de 2 à 10, constant pour une parcelle donnée) ou encore, ce qui est le plus fréquemment rencontré et de loin le plus significatif du point de vue hydrologique, l'absence de labour dans un sur N interrangs d'une parcelle labourée.

Utiles pour le viticulteur car rendant les interventions mécanisées plus faciles et efficaces, ces pratiques gênent l'interprétation par télédétection de l'état de surface d'une parcelle si cette interprétation se base sur l'hypothèse d'homogénéité des pratiques. Cette homogénéité doit donc d'abord être vérifiée et pour les cas où il est question de discontinuité, il faudra trouver un moyen pour la prendre en compte. La difficulté principale réside dans la nécessité de distinguer cette discontinuité de celles induites par les variations en substrat et les composants organiques couvrant la surface au cours de son évolution.

7.3.2 Choix de l'approche

Comme dans les chapitres 4 et 5 on se tourne vers les techniques d'analyse texturale d'image, car on s'intéresse à la comparaison des segments de l'image que sont les interrangs. En surgit l'idée d'une segmentation de la parcelle en parties correspondant à cette échelle intermédiaire entre pixel et parcelle, qui paraît séduisante dans un premier temps. Les techniques employées dans les chapitres 4 et 5 s'intéressaient déjà à cette échelle et les informations obtenues pourraient faciliter la tâche. Les résultats de l'analyse fréquentielle (chapitre 4) permettent de définir un masque de bandes orientées qui pourrait être calé par comparaison statistique sur l'image pour identifier les interrangs. Le masque (vigne et ombre portée) produit par analyse multi-résolution (chapitre 5) sépare dans beaucoup de cas déjà les différents interrangs.

La première idée – une trame construite à l'aide des résultats de l'analyse fréquentielle, calé sur l'image – par contre, montre une forte sensibilité à une éventuelle variation de l'orientation ou de

l'emplacement des rangs, même légère : un changement d'orientation d'un ou quelques degrés, ce qui arrive plus qu'exceptionnellement, rendra un masque à bandes droites sans valeur. De plus, des artefacts liés au prétraitement de l'image peuvent parfois décaler une partie d'une parcelle par rapport au reste (erreur induite par le mosaïquage p. ex.). En ce qui concerne le masque d'interrang éclairé, celui-ci est souvent discontinu pour les rangs d'une vigne palissée (fonction des trous dans le rang) et inutile pour des parcelles en gobelet (la segmentation produite ne permet pas d'obtenir l'objet interrang). Des méthodes de segmentation plus orthodoxes comme la segmentation de *blobs* (Farrokhnia & Jain, 1991 ; Tomasi, 1996) ou par *region growing* (Wilkinson, 1996 ; Wang *et al.*, 1997 ; Campbell & Murtagh, 1998 ; Stuckens *et al.*, 2000) connaissent les mêmes désavantages (que faire des trous dans l'interrang et d'inclusions de la bordure de la parcelle ? Ils provoqueront un effet de "fuite" dans le cas de par exemple *region growing*, rassemblant au moins deux interrangs en un seul objet.) et posent le problème de définition de seuils. Peut-être une combinaison des différentes techniques pourrait-elle apporter une solution, mais a-t-on vraiment besoin d'"individualiser" chaque interrang ?

Avec la connaissance d'expert disponible, on peut comparer les interrangs voisins sans les isoler au préalable. Trois approches ont retenu notre attention : l'analyse fréquentielle par transformation Fourier, exactement comme développée dans le chapitre 4, l'analyse par variance locale (Anys *et al.*, 1994 ; Coops & Culvenor, 2000) et l'analyse de la matrice de cooccurrence (Haralick *et al.*, 1973 ; Haralick, 1979 ; Anys *et al.*, 1994 ; Anys *et al.*, 1998 ; Campbell & Murtagh, 1998).

L'intérêt de l'utilisation du spectre Fourier serait de voir si à la même orientation que celle de la fréquence principale identifiant la vigne, on trouve de fortes amplitudes à des fréquences plus basses correspondant à N fois l'écartement. Or, il se trouve que ces basses fréquences se trouvent trop près du centre du spectre, une zone de fortes amplitudes (voir chapitre 4 et Meyer, 1992) parmi lesquelles la fréquence recherchée est difficile à identifier. De plus, un désavantage important est que même si cela permettait d'identifier la présence d'une pratique discontinue, cette approche ne permettra pas de localiser spatialement les exceptions, et donc de prendre en compte cet aspect dans la suite de l'étude.

L'idée de l'analyse par variance locale est de faire varier la taille du voisinage sur lequel la variance est calculée, et de déduire une information sur le changement dans la moyenne de cette variance locale. Utilisée pour la détermination de la résolution optimale d'analyse (Woodcock & Strahler, 1987 ; Atkinson & Curran, 1997), cette méthode permettrait dans notre cas de comparer la variance interne de l'interrang (voisinage de petite taille) et la variance de l'interrang influencée par les interrangs contigus (plus grande taille, calculée sur des images où vigne et ombre sont masquées). Ceci permettrait de distinguer entre parcelles labourées en entier ou de façon discontinue. Mais la méthode est sensible aux variations irrégulières comme on les trouve dans des parcelles "en voie de colonisation" par l'herbe. Afin de rendre l'analyse uniquement sensible aux variations spatiales liées à la pratique culturale et donc à l'interrang, il faut restreindre la variabilité étudiée à la différence entre interrangs.

Il semble possible d'obtenir une telle méthode visant la spécificité des parcelles à pratique culturale dite "discontinue", en imposant des contraintes spatiales à la comparaison, contraintes issues de la structure spatiale de la culture comme elle est analysée dans le chapitre 4 : l'orientation des interrangs et leur espacement sont connus et peuvent donc servir dans la définition du protocole de comparaison. En s'intéressant à la comparaison d'un voisinage avec un voisinage à une distance donnée et dans une direction donnée, nous nous trouvons dans le domaine de l'analyse par cooccurrence. Bien que d'autres solutions soient envisageables, seule l'analyse par cooccurrence nous semble suffisamment directe, le problème en question ne méritant pas des procédures d'une complexité démesurée. Comme nous le verrons, l'approche retenue permet également de déterminer la fréquence d'apparition des interrangs d'exception, et même de les prendre en compte par masquage.

7.3.3 Organisation et hypothèses du modèle

Le type d'utilisation de la cooccurrence le plus employé en télédétection correspond à une approche statistique. Sur la matrice de cooccurrence, ou *histogramme de second ordre* (Anys *et al.*, 1998), on peut calculer un grand nombre de *mesures de texture* (au sens de la texture d'image) que l'on calcule souvent en grand nombre pour ensuite retenir la mesure la plus significative sur la base d'une analyse statistique (Ruiz *et al.*, 1998). Notre approche est plus mécaniste dans le sens que nous vérifions une réponse spécifique à des caractéristiques connues ayant une signification physique.

Une matrice de cooccurrence est une valeur estimée de la densité de probabilité jointe d'un pixel de valeur i et d'un pixel de valeur j , pour une translation donnée entre ces deux pixels. Elle peut être obtenue localement par comparaison d'un voisinage autour d'un pixel avec le voisinage après translation (figure 7.4). La cellule (i,j) de la matrice de cooccurrence contient la fréquence relative $P(i,j)$ du voisinage des valeurs i et j . La taille de cette matrice, et donc la lourdeur du calcul, dépend du nombre de valeurs différentes rencontrées. On se base généralement sur une image de catégories ou de classes au lieu de valeurs brutes.

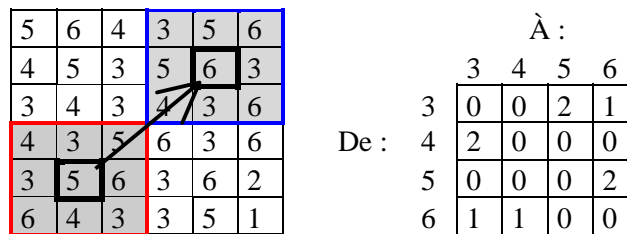


Figure 7.4 Principe du calcul de cooccurrence. À gauche : "image" (chaque cellule représente un pixel et sa valeur l'identifiant de la "classe" à laquelle ce pixel est affecté) avec le voisinage d'origine (de 3x3 pixels, pixel central affecté à la classe "5") et un voisinage obtenu par déplacement de la fenêtre (pixel central affecté à la classe "6"). À droite : la matrice de cooccurrence résultante. Cette matrice est obtenue par comparaison de chaque pixel du voisinage d'origine avec le pixel du voisinage déplacé situé à la même position à l'intérieur de la fenêtre. Chaque cellule de la matrice de cooccurrence représente la fréquence de transition d'une classe à une autre.

L'idée qui est à la base de la méthode proposée est d'arriver à placer un ensemble de ces voisinages dans des interrangs voisins et de comparer leur composition entre eux par le biais de la matrice de cooccurrence. Soit v_1 un voisinage pris dans un interrang, soient $v_2, v_3, \dots, v_k, v_t$ de voisinages de la même forme et taille, situés dans des interrangs voisins et perpendiculairement aux rangs : v_2 à un interrang du premier, v_3 à deux interrangs, \dots v_k à $(k-1)$ interrangs, t étant le nombre total de voisinages. En comparant v_1 à chacun des $v_{k=1, k=2, \dots, k=t}$, nous obtenons $(t-1)$ matrices de cooccurrence estimant la probabilité de transition entre classes à des éloignements croissants.

Nous nous basons sur l'image issue du chapitre 6, *i.e.* les pixels d'interrang éclairé classés en une ou plusieurs classes hydro-spectrales, à cause du problème de la lourdeur du calcul sur une image non classée (beaucoup de valeurs différentes, donc une matrice de cooccurrence très grande), ainsi que pour l'indépendance des classes hydro-spectrales par rapport à la géométrie vue-éclairage (qui influence le contraste recherché entre les deux types d'interrang). Une autre raison est que cela évite l'influence du rang, absent dans ces images (voir chapitre 5).

Nous attendons à ce que le phénomène recherché influence ces classes hydro-spectrales, donnant des résultats différents dans les interrangs d'exception, mais en même temps rendant l'information par interrang plus homogène. Ceci constitue l'une des deux hypothèses du modèle de comparaison : la variation des classes rencontrées à l'intérieur du voisinage est faible par rapport à la différence entre

les deux types d'interrang. Une deuxième hypothèse est que la composition des deux types d'interrang est relativement constante à courte distance (une dizaine d'interrangs). À des échelles plus petites cette composition peut éventuellement changer (comme cela peut par exemple arriver si un changement de pente n'est pas prise en compte par le MNT) sans que cela compromette pour autant le fonctionnement de la méthode.

7.3.3.1 Identification de pratiques culturelles discontinues

La méthode proprement dite est la suivante. Grâce à l'analyse fréquentielle (chapitre 4) nous connaissons l'orientation et l'écartement des rangs et nous savons donc dans quelle direction et sur quelle distance il faudra déplacer notre fenêtre afin de comparer le voisinage dans un interrang à celui d'un interrang voisin. Si Δ désigne le déplacement (nombre de fois l'écartement) perpendiculairement à l'orientation du rang, soit la distance de translation, nous obtenons des comparaisons avec des interrangs plus ou moins distants en faisant varier Δ de 1 à $(t-1)$, avec $t=8$. Si nous sommes en présence d'une pratique discontinue, la différence entre les deux types d'interrang provoque une homogénéité très basse dans la matrice de cooccurrence, *i.e.* des fréquences très faibles sur et autour de la bissectrice, pour un grand nombre de voisinages. Si nous réalisons ces matrices de cooccurrence pour tous les pixels d'interrang éclairé de la parcelle (ayant un voisinage de 3×3 pixels d'interrang), alors en moyenne l'homogénéité des matrices doit rester sensiblement constante lorsque Δ varie, jusqu'à ce que $\Delta = N$. À ce moment là, la répétitivité de la structure (dont N est la période) fait que chaque voisinage de pixels d'interrang v_k est comparé à un voisinage dans un interrang du même type (v_{k+N}), ce qui fait fortement monter la moyenne de l'homogénéité. À $\Delta = N+1$, l'homogénéité reprend son niveau d'avant. Nous avons limité Δ maximal à 7, car la variable recherchée N ne dépasse que très exceptionnellement 6 interrangs. De plus un déplacement supérieur risque de compromettre l'analyse de beaucoup de parcelles déjà étroites à cause de la zone tampon imposée. Dans la version actuelle de la méthode, des parcelles extraites comprenant moins de 8 interrangs ne sont pas testées pour une pratique culturelle discontinue.

Une fois la matrice de cooccurrence calculée pour le voisinage d'un pixel à un niveau Δ de déplacement donné, reste à exprimer la ressemblance entre la composition des deux fenêtres. Haralick *et al.* (1973) proposaient 14 mesures de texture pour cela et d'autres s'y sont rajoutées plus tard. Plusieurs d'entre elles expriment la ressemblance ou inversement le contraste et contiennent donc à peu près la même information. Il n'existe pas de règles définissant le domaine d'application de chacune de ces mesures. Sur une base empirique (tests sur trois parcelles à pratique culturelle discontinue) nous avons retenu la mesure de *Inverse Difference Moment* f_{IDM} , proposée par Haralick :

$$f_{IDM}(\Delta) = \sum_i \sum_j \frac{1}{1+(i-j)^2} p(i,j)(\Delta) \quad (7.1)$$

où $p(i,j)$ est la valeur de la matrice de cooccurrence normalisée à l'adresse (i,j) définie par $P(i,j)/R$, R étant une constante de normalisation. Cette mesure est une mesure d'*homogénéité* donnant un fort poids aux valeurs près de la bissectrice, ce poids diminuant de façon hyperbolique avec l'éloignement à cet axe.

Ensuite les populations (images) de mesures locales de f_{IDM} , résultant des différents déplacements, doivent être comparées entre elles afin de "décider" si l'évolution des résultats en fonction de Δ est typique d'une pratique culturelle discontinue ou non. À cette fin nous retenons du calcul de notre indice à un déplacement Δ donné pour l'ensemble des voisinages de pixels d'interrang éclairé d'une parcelle, uniquement la moyenne $\bar{f}_{IDM}(\Delta)$ et l'écart-type $\sigma(\Delta)$ au niveau de la parcelle (fig. 7.5). Les tests statistiques comparant les très grandes populations de pixels n'ont pas été employés pour deux

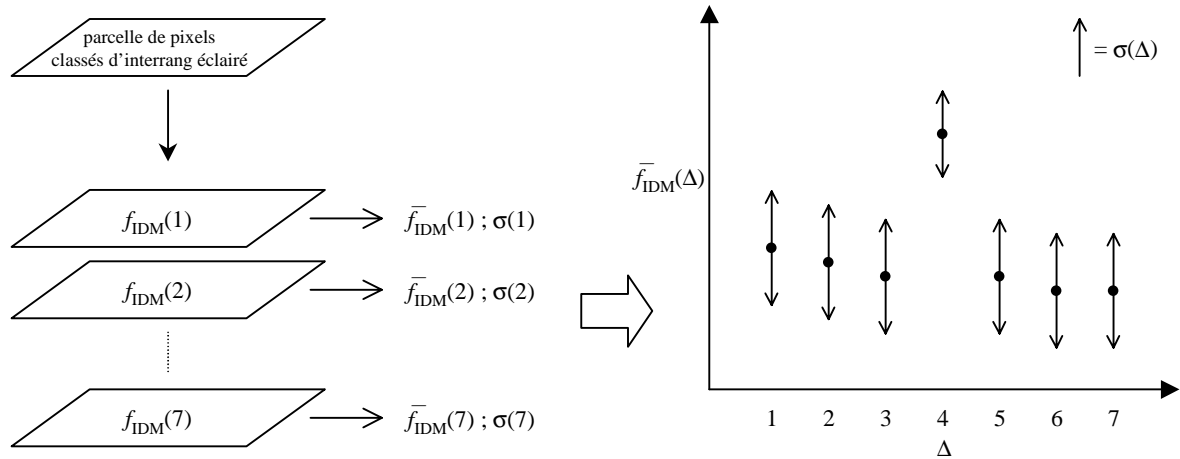


Figure 7.5 Illustration de la représentation comme produite par le modèle : par parcelle, 7 images d'une mesure de texture (f_{IDM}) par pixel sont dérivées de l'image de pixels classés d'interrang éclairé, produite dans le chapitre 6. De chacune de ces images, calculées à des translation différentes, on calcule la moyenne \bar{f}_{IDM} et l'écart-type σ de la mesure de texture f_{IDM} . L'évolution de cette moyenne en fonction de Δ (le diagramme à droite) est l'information sur laquelle l'identification des pratiques culturales discontinues est fondée.

raisons : ils sont extrêmement lourds en termes de calcul et leurs résultats sont généralement significatifs à un très haut niveau ce qui génère un risque de commission. Or nous considérons très important d'éviter des détections erronées de pratiques discontinues.

De façon empirique (tests sur le même triplet de parcelles et sur toutes les parcelles de Neffîs de la prise de vue n° 1) nous avons choisi d'utiliser le critère suivant, permettant de détecter les pratiques culturales discontinues s'exprimant clairement dans l'image sans qu'aucune des autres parcelles ne soit faussement retenue comme telle : deux populations de $f_{IDM}(\Delta)$ obtenues à des Δ différentes, sont considérées significativement différentes si les gammes de valeurs définies par leurs moyennes \bar{f}_{IDM} plus et moins une fois leur écart-type $\sigma(\Delta)$ n'ont pas de recouvrement (diagramme à droite dans la figure 7.5).

La figure 7.6 illustre la clé de décision employée pour détecter la présence de $N \in (2, 3, 4, 5, 6, 7)$. À un déplacement $\Delta=1$ chaque interrang est comparé à l'interrang avoisinant (côté Est) ; Si nous supposons maintenant que la parcelle concernée est labourée un rang sur deux, nous trouverons une homogénéité moyenne \bar{f}_{IDM} beaucoup plus élevée à $\Delta=2$, car les voisinages v_k de chaque interrang labouré sont comparés à des voisinages v_{k+N} d'un autre interrang labouré et de même pour les voisinages d'interrangs non labourés. À $\Delta=3$ nous retombons dans la même situation que à $\Delta=1$, et à $\Delta=4$ nous obtenons de nouveau un \bar{f}_{IDM} élevée comme à $\Delta=2$. Si une telle situation se confirme nous arrêtons les comparaisons car seule une parcelle à $N=2$ peut produire une telle évolution et nous avons donc obtenue l'information recherchée. Le fait de ne pas comparer d'avantage à d'autres $\bar{f}_{IDM}(\Delta)$ à des Δ plus élevé rend la méthode plus robuste

Test ⇓	Conditions à satisfaire						
	$\Delta : 1$	2	3	4	5	6	7
$N = 2 ?$	●	○	●	○	⊗	⊗	⊗
$N = 3 ?$	⊗	●	○	●	●	○	●
$N = 4 ?$	⊗	●	●	○	●	●	⊗
$N = 5 ?$	⊗	⊗	●	●	○	●	●
$N = 6 ?$	⊗	⊗	⊗	●	●	○	●
$N = 7 ?$	⊗	⊗	⊗	●	●	●	○

Figure 7.6 Clé de décision pour identifier et décrire la présence d'une pratique culturelle discontinue. Chaque rond représente une population de f_{IDM} , obtenue pour un déplacement Δ donné. Par test ($N = x ?$), les ronds à croix représentent les populations pas considérées dans le test, les ronds noirs des populations non différentes (voir conditions dans texte) entre elles, et les ronds blancs des populations non différentes entre elles, mais à f_{IDM} significativement plus élevée par rapport aux populations "avoisnantes" (ronds noirs). La première "clé" rencontrée – dans l'ordre d'analyse – dont les conditions sont satisfaites fournit le résultat final.

(moins sensible à des variations à grande distance sans rapport avec les pratiques culturales). Si maintenant la parcelle concernée n'est pas labourée un rang sur deux, mais par exemple trois rangs sur quatre, la situation d'une $\overline{f_{IDM}}(\Delta)$ très élevée ne sera pas rencontrée à un déplacement $\Delta=2$, mais par contre à un déplacement $\Delta=4$ si ! C'est le cas de la figure 7.5 où l'on constate que les conditions pour $N=2$ et $N=3$ (fig. 7.6) ne sont pas satisfaites, car les $\overline{f_{IDM}}$ obtenus à un déplacement $\Delta=2$ et $\Delta=3$ ne diffèrent pas de façon significative des $\overline{f_{IDM}}$ obtenus à un déplacement voisin. Par contre, les conditions sont satisfaites pour $N=4$ où l'analyse s'arrête. Si aucun des tests entraîne la détection d'une pratique culturale discontinue, la parcelle est considérée comme étant soumise à une pratique culturale uniforme.

Comme l'exemple de la figure 7.5 l'illustre, $\overline{f_{IDM}}(\Delta)$ a souvent tendance à diminuer graduellement avec l'augmentation de Δ . Ceci est généralement provoqué par des transitions graduelles à travers l'image classifiée de la parcelle. En évitant d'inclure dans les comparaisons les populations de f_{IDM} obtenues par un déplacement $\Delta < (N-2)$ et $\Delta > (N+2)$ (ronds à croix dans la figure 7.6), la sensibilité à de telles tendances est minimalisée. Donc si nous évaluons la possibilité que la parcelle donnée est labourée un rang sur deux ($N=2$, première étape, figure 7.6), nous ne considérons pas les populations de $f_{IDM}(\Delta)$ à $\Delta > (4)$. Si les conditions de $N=2$, ni celle de $N=3$ sont satisfaites, nous évaluons la possibilité que $N=4$, dans quel cas nous considérons donc uniquement les populations de $f_{IDM}(\Delta)$ à $\Delta = 2, 3, 4, 5, 6$.

Pour des parcelles à $N=2$ ou $N=3$, la comparaison de tous les voisinages d'interrang avec des voisinages d'autres interrangs du même type ("superpositions" de la structure répétitive) est rencontrée plus d'une fois dans la gamme de déplacements Δ pour laquelle les calculs de f_{IDM} sont effectués. En exigeant dans les tests visant la reconnaissance de ces types de parcelles (fig. 7.6), la détection de deux de ces "superpositions" consécutives, ceci permet d'assouplir les critères pour la détection de chacune d'entre elles, au point de seulement considérer les populations de $f_{IDM}(\Delta)$ directement "avoisinentes" ($(N-1) \leq \Delta \leq (N+1)$; $(2N-1) \leq \Delta \leq (2N+1)$).

L'approche que nous venons de décrire présente un avantage considérable : non seulement elle permet d'identifier une pratique discontinue, mais de plus elle la décrit par la détermination de N .

7.3.3.2 Prise en compte des interrang d'exception

Une fois que l'on a identifié une parcelle de vigne à pratiques culturales discontinues, que peut-on en faire ? La prise en compte de cette connaissance est difficile si l'on ne sait pas quelle est la distribution de fréquences dans chacun des deux types d'interrang. Il est notamment important de savoir de quelle façon la distribution des classes est modifiée par le masquage des interrangs dits "exceptionnels". Il faut donc compléter la procédure afin de localiser au mieux les pixels appartenant à ce type d'interrang.

Les images de f_{IDM} nous sont utiles à cette fin. Pour les parcelles à $N \geq 3$ (où N correspond donc en quelque sorte à la "période" de la pratique discontinue), on constate une différence de comportement intéressante entre l'image $f_{IDM}(1)$ et $f_{IDM}(2)$: avant que l'on n'atteigne la situation de forte homogénéité (déplacement de N fois l'écartement : $\overline{f_{IDM}}(\Delta)$ élevée), cette homogénéité reste relativement basse pour deux raisons : tous les voisinages de tous les interrangs "exceptionnels", ceux que l'on recherche, sont comparés à des voisinages d'interrangs soumis aux pratiques plus communes, et l'inverse arrive également : des interrangs soumis aux pratiques plus communes, les voisinages d'un sur N interrangs parmi eux sont comparés à des voisinages d'interrangs "exceptionnels". Mais il y a une distinction entre les deux cas : là où dans le premier cas (voisinages des interrangs "exceptionnels" comparés à ceux d'interrangs "communs") ce sont les **mêmes** interrangs qui montrent une faible homogénéité pour les déplacements $\Delta=1$ et $\Delta=2$ (figure 7.7) : les **mêmes** interrangs "exceptionnels", sont comparés à **d'autres** interrangs "communs" (son voisin direct, puis le voisins de son voisin). Par contre, ça en sont

des interrangs différents dans le deuxième cas : pour $\Delta=1$ et $\Delta=2$ ce ne sont pas les mêmes interrangs "communs" qui sont comparés aux interrangs "exceptionnels" ! C'est cette différence là qui permet de localiser les interrangs que l'on souhaite masquer.

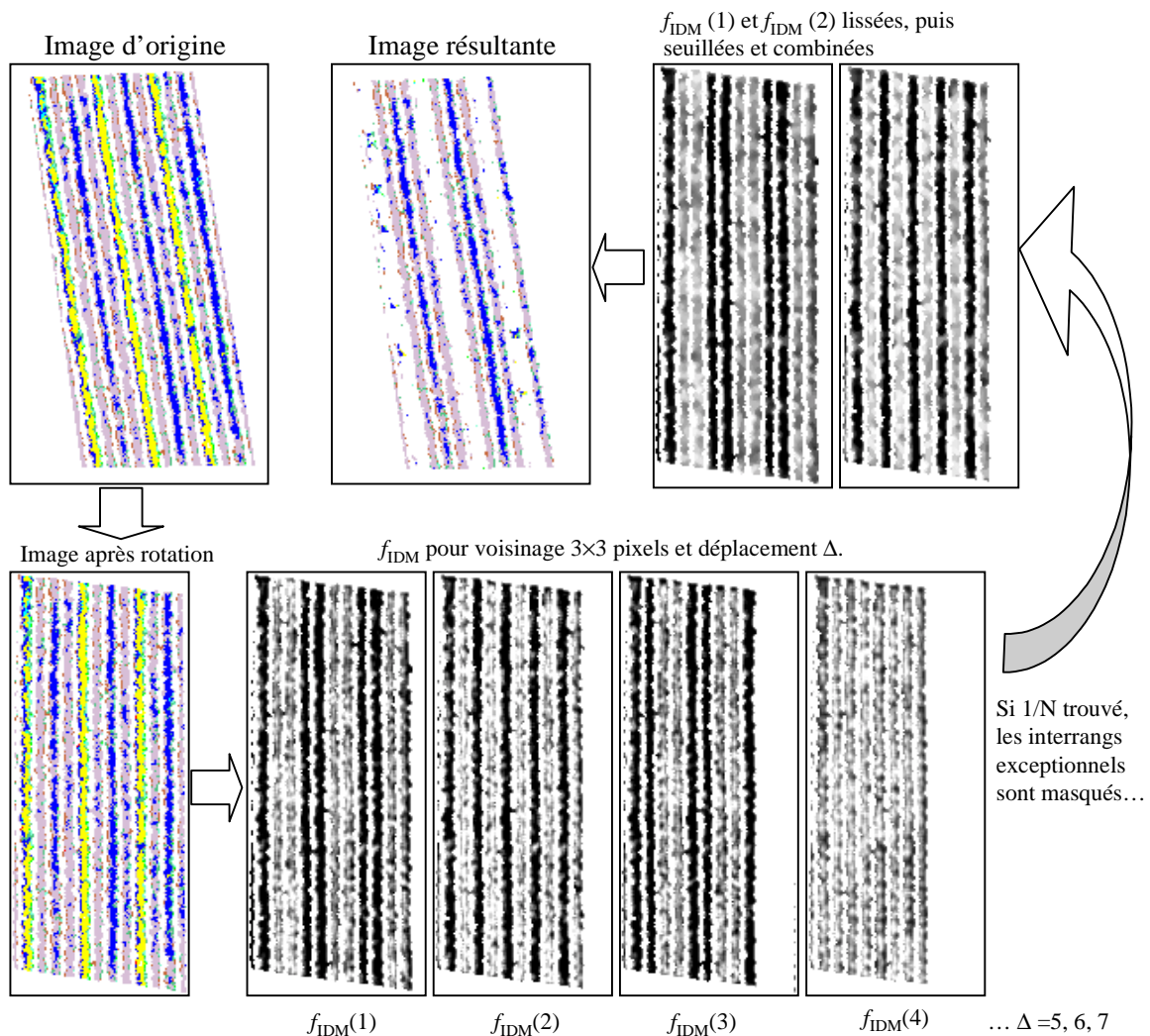


Figure 7.7 Exemple d'imagette extraite de l'image classée (parcelle à $N=4$), et les images dérivées au cours de la procédure d'analyse et segmentation par cooccurrence. La rotation de l'imagette est basée sur l'orientation des rangs, une information obtenue dans le chapitre 4. Ce chapitre a également fourni l'écartement qui constitue l'unité de déplacement (horizontal). Dans les imagettes à échelles de gris, les pixels sombres sont ceux qui ont une faible homogénéité (f_{IDM}) de cooccurrence.

Ce principe ne fonctionne pas dans le cas $N = 2$: à $\Delta =$ nombre impair, f_{IDM} sera faible pour tous les interrangs et à $\Delta =$ nombre pair, f_{IDM} sera élevé. La segmentation pose dans ce cas également un problème sémantique : chaque type d'interrang couvre la moitié de l'espace et on ne peut donc parler d'un type "d'exception". C'est pour cela que dans le cas $N = 2$, l'on se limite à l'identification du phénomène sans procéder à une segmentation.

La réalisation de la segmentation selon le principe décrit ci-dessus exige deux étapes complémentaires. D'abord une règle d'or en morphologie mathématique comparable à la recherche de la résolution optimale en télédétection : afin d'obtenir des objets homogènes (nous devons localiser et donc en quelque sorte "créer" l'objet "interrang") il faut effectuer un lissage adapté. Pour les mêmes raisons que celles mentionnées dans le chapitre 5, le filtre médian a été employé. Comme par contre maintenant nous ne nous intéressons plus à la justesse des valeurs des pixels, mais avant tout à la forme/localisation de l'objet, l'homogénéité interne est favorisée par une triple itération de ce filtrage.

Ces lissages ont augmenté la netteté du contraste entre les deux types d'interrang et diminué la variation à l'intérieur de chacun.

À ce stade nous pouvons appliquer un seuil sur l'image lissée de f_{IDM} . Comme nous savons que *a priori* les pixels des interrangs à f_{IDM} élevé doivent constituer une fraction $2/N$ des pixels d'interrang de l'image, le seuil est posé à un niveau tel qu'une fraction $2/N$ ait une valeur supérieure. Finalement les interrangs exceptionnels sont représentés par les pixels qui dépassent ce seuil tant pour le premier que pour le deuxième déplacement. Une conséquence de cette approche est que les deux derniers interrangs côté "Est" de la parcelle sont perdus (figure 7.7). Dans la grande majorité des cas, ceci ne pose aucun problème pour la suite de l'analyse.

7.3.4 Résultats et discussion

La figure 7.8 montre la validation sur les sites Caux et Rou-Al, pour la prise de vue n°1, de la méthode calibrée sur le site de Neffiès. La majorité des parcelles à pratique culturale discontinue (pic très prononcé de \bar{f}_{IDM}) a été reconnue et, fait important, aucune parcelle n'a été faussement identifiée comme étant soumise à une telle pratique. Dans les diagrammes $\Delta - \bar{f}_{IDM}$, les courbes des parcelles à pratique uniforme (à gauche dans la figure 7.8) témoignent de la diminution graduelle de \bar{f}_{IDM} avec l'augmentation de Δ , commentée ci-dessus. En même temps les diagrammes des parcelles à pratique uniforme témoignent de la grande variété d'évolutions de \bar{f}_{IDM} qu'on y rencontre. Dans certains cas même des pics y apparaissent. Ces pics ne sont pas détectés comme étant significatifs.

Cependant toutes les parcelles qui sur le terrain ont été reconnues comme étant soumises aux pratiques culturales discontinues, n'ont pas pu être identifiées comme telles. L'étude des sections correspondantes de l'image classifiée a démontré que cela est le plus souvent dû au fait que l'interrang dit "exceptionnel" ne comporte que sur une partie de sa longueur une composition de classes d'images différente de celle des interrangs à côté, et qu'en même temps cette portion n'est pas la même pour les interrangs "exceptionnels" avoisinants. Cela peut être expliqué par d'un côté les classes floues, *i.e.* des classes hydrologiques et même hydro-spectrales différentes (entre les interrangs avoisinants) qui peuvent parfois se retrouver dans une même classe floue (voir chapitre 6). De l'autre côté l'évolution naturelle qui a lieu après la pratique culturale peut au fur et à mesure provoquer l'apparition de classes hydro-spectrales identiques dans les interrangs avoisinants ayant pourtant des pratiques culturales différentes.

Ces explications semblent s'appliquer à la majorité (6 sur 8) des erreurs identifiées sur le site Rou-Al, pour la première prise de vue. L'une des autres erreurs concerne une parcelle à $N = 11$, *i.e.* une exception non prise en compte par le modèle. Un certain nombre d'erreurs semble être provoqué par des artefacts : dans certains cas (1 sur les 8 erreurs de Rou-Al1 et 1 sur les 2 erreurs de Caux1) l'inspection visuelle de l'image de réflectance ne permet pas de confirmer la présence de deux types d'interrangs différents, moins encore que l'analyse numérique. Il se peut qu'il s'agisse dans ces cas de parcelles labourées où les interrangs ont été partiellement compactés par le passage d'un engin peu après labour. Un autre artefact identifié par inspection visuelle est un labour discontinu mais inachevé (l'autre des deux erreurs sur Caux1), ce qui peut rendre les changements de l'indice f_{IDM} non significatif en moyenne sur la parcelle.

Il ne paraît par contre pas possible d'assouplir les critères d'admission pour l'identification de telles pratiques. La figure 7.8 montre que parmi les parcelles à pratique spatialement continue, on trouve parfois des évolutions de f_{IDM} en fonction du déplacement, qui sont semblables à celles des cas non reconnus. Un assouplissement du critère de détection provoquera leur détection comme étant des parcelles soumises à une pratique culturale discontinue. Il serait intéressant d'étudier l'origine de la discontinuité dans ces parcelles.

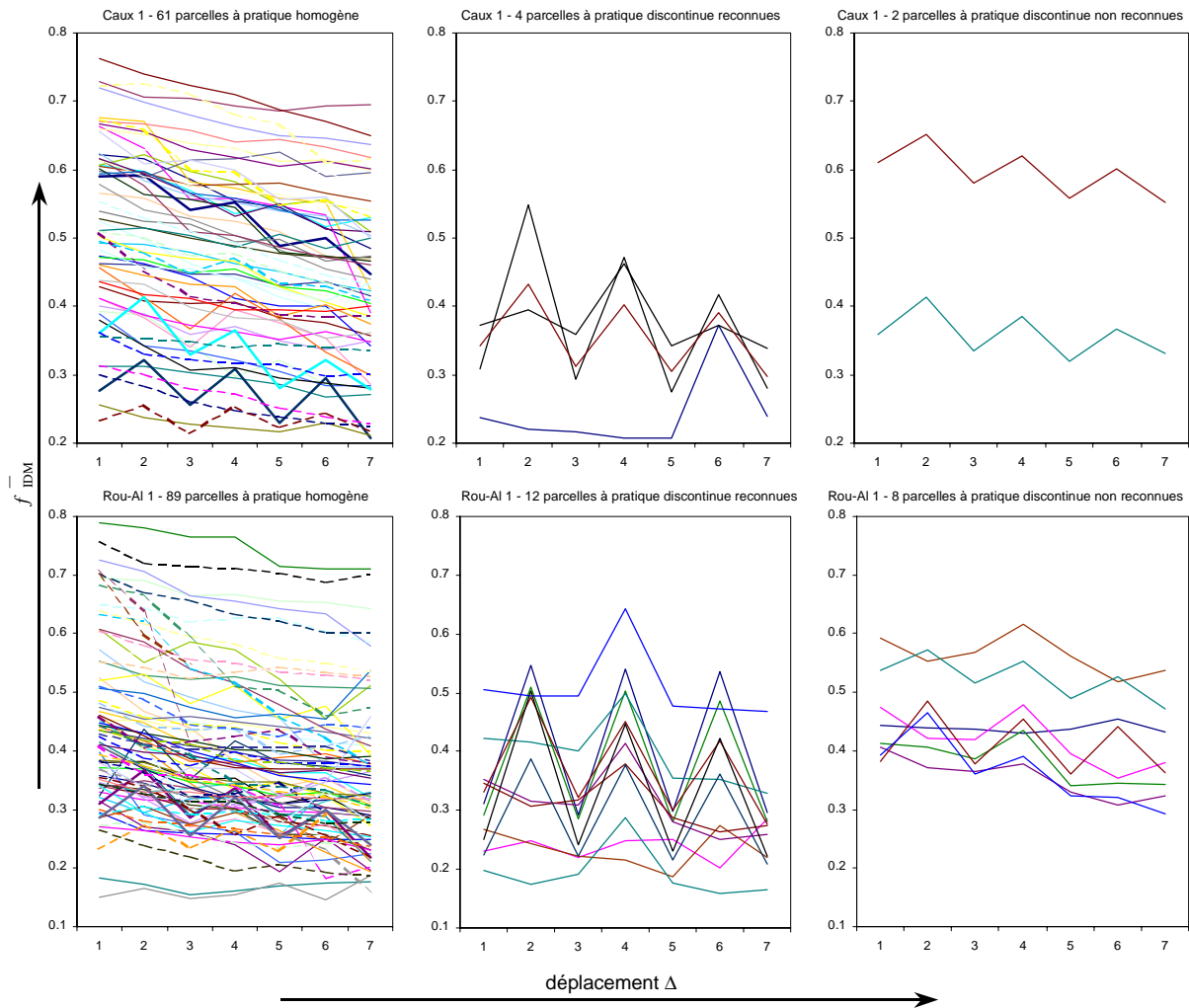


Figure 7.8 Évolution de \bar{f}_{IDM} en fonction de Δ . Résultats obtenus sur les parcelles des sites Rou-AI. (en dessous) et Caux (au dessus) couvertes par les mosaïques de la première prise de vue. Les diagrammes de gauche et du milieu montrent les parcelles qui ont été bien reconnues (par comparaison à la vérité terrain) comme étant resp. soumises à une pratique culturale homogène (gauche) et discontinue (centre). Les diagrammes de droite montrent les cas où la pratique culturale discontinue n'a pas été reconnue.

Cette dernière remarque rejoint une autre considération, celle de la prise en compte de la signification des classes hydro-spectrales ou, plus précisément, des distances inter-classes : actuellement les classes sont codées dans l'ordre de leur présentation (tableau 6.1) sans que la ressemblance entre les classes ait été étudiée. L'ordre évolutif du faciès est néanmoins respecté (dans le calcul de f_{IDM} F1 est donc considéré plus "proche" de F0 que F2), ainsi que le contraste entre des surfaces enherbées et nu (occupant des positions opposées dans l'ordre). Il est cependant possible que les parcelles à labour discontinu seraient par exemple plus facilement détectées si les classes F0 (F0 et ses classe floues, voir § 6.2) seraient placées à une extrémité et les autres classes regroupées.

Pour l'ensemble des prises de vues et sites étudiés, les résultats sont énumérés dans le tableau 7.6. Ils semblent confirmer la validation décrite ci-dessus, sauf pour deux exceptions. La première est d'ordre technique : comme on l'a vu à la fin du chapitre 4, l'aspect non plan de la pellicule argentique des clichés de la deuxième prise de vue sur le site de Rou-AI. a rendu l'image localement floue lors de la numérisation. Déjà cela empêchait certaines vignes d'être identifiées comme telles, et il en est de même ici pour les pratiques culturales discontinues (en italique sur fond grisé dans le tableau 7.6). Le contraste radiométrique entre les deux types d'interrang est réduit, empêchant dans certains cas leur distinction.

Neffiès 1			Caux 1			Rou-Al. 1			Pézenas 1			Rou-Al. 2		
	H	D		H	D		H	D		H	D		H	D
H	67	0	H	61	0	H	89	0	H	15	0	H	90	0
D	0	4	D	2	4	D	8	12	D	0	0	D	3	5

Pézenas 2			Neffiès 3			Caux 3			Rou-Al. 3			Pézenas 3		
	H	D		H	D		H	D		H	D		H	D
H	19	0	H	65	0	H	62	0	H	90	0	H	15	0
D	0	0	D	3	3	D	0	0	D	11	5	D	0	0

Tableau 7.6 Tableaux de contingence par site et prise de vue entre les parcelles à pratique culturale homogène (H) et discontinue (D) observées au sol (lignes) et identifiées dans l'image par la procédure d'analyse de $\tilde{f}_{IDM}(\Delta)$ (colonnes). Les chiffres sont en nombre de parcelles.

Les résultats obtenus sur la prise de vue réalisée en hiver sont moins satisfaisants. Ce problème semble avoir une double cause : la première est liée à l'absence du couvert végétal. Les zones masquées par la méthode décrite en chapitre 5 sont d'une taille très réduite, ce qui rapproche en quelque sorte les zones d'interrang. Le voisinage utilisé pour le calcul de f_{IDM} risque ainsi d'incorporer de l'information de l'interrang voisin.

La deuxième cause est celle liée au stade d'évolution avancé comme décrit au début de ce paragraphe. Les parcelles à pratiques discontinues fraîchement labourées étaient rares au moment de la prise de vue (2 sur les 16 de Rou-Al.) et dans beaucoup de cas la variabilité spatiale intra-parcellaire avait progressé au point de rendre la pratique discontinue indétectable.

7.3.5 Conclusions sur la reconnaissance de pratiques "discontinues"

La méthode proposée ici fournit un moyen relativement direct et d'une complexité réduite pour détecter, décrire et prendre en compte le phénomène de la pratique discontinue. Cette pratique en moyenne peu importante, mais localement dominante (ex. commune d'Alignan) se caractérise par deux types d'interrangs aux états de surface généraux différents. Caractérisés par des vitesses d'évolution différentes, ces états de surface se rapprochent au fil du temps.

La méthode, qui cherche nécessairement à être insensible aux variations à la même échelle mais non liées à ce type de pratique culturale, tire profit de la connaissance obtenue lors des étapes précédentes de l'étude. En conséquence la performance est la meilleure là où les stades d'évolution sont les plus contrastés. Pour les cas très évolutifs comme le labour, ce moment est juste après labour. Comme il s'agit des cas les plus importants à prendre en compte d'un point de vue hydrologique (les deux types d'état de surface présentant des propriétés hydrodynamiques très différentes), les résultats peuvent être considérés comme étant satisfaisants.

On constate néanmoins une diminution de la performance lorsque la méthode est appliquée sur des images acquises en dehors de la saison végétative. Il se peut que l'indice de texture employé soit peu optimal dans ces cas. Cet indice est sensible à la position des pixels à l'intérieur du voisinage et exige donc une faible variation locale pour être robuste. En absence d'un masque correspondant au couvert végétal séparant les interrangs, cette condition n'est souvent pas satisfaite à cette période.

7.4 Modèle de reconnaissance du faciès et de fortes discontinuités dans la parcelle

7.4.1 Introduction

Après avoir formalisé la connaissance d'expert sur la distribution fréquentielle et spatiale dans la parcelle des variables de l'état de surface (§ 7.2) et après avoir pris en compte les pratiques culturales spatialement discontinues (§ 7.3), on peut s'intéresser à l'objectif proprement dit de ce chapitre, *i.e.* la synthèse des informations sur l'état de surface du sol au niveau de la parcelle. Comme indiqué dans l'introduction du chapitre, la synthèse est à la fois une simplification (l'ensemble de différentes classes de pixels est résumé en un seul état) et un enrichissement (par rapport à la connaissance disponible au niveau du pixel).

Les résultats obtenus lors des précédentes étapes de l'étude permettent d'identifier d'emblée quelques aspects qui vont obligatoirement gêner cette synthèse spatiale et la précision des résultats qu'elle pourra atteindre. Ces aspects se situent au niveau de la classification spectrale des pixels, de la distribution spatiale réelle des états de surface et au niveau de la vérité terrain telle qu'elle a été acquise lors de notre étude.

En ce qui concerne la classification spectrale des pixels on distingue des aspects liés au dispositif et des aspects inhérents au comportement spectral des états de surface. Au niveau du dispositif, le choix de la résolution spatiale intervient par sa relation avec la taille des éléments comme étudiée au début de ce chapitre. Un autre aspect également important est que la légèreté du dispositif introduit une marge d'erreur non négligeable dans la classification spectrale du pixel. Concernant le comportement spectral des états de surface, on rappelle qu'à l'échelle d'étude choisie certains types ne peuvent pas être distingués (ce qui parfois est fonction de la géométrie capteur-soleil donnée). Tous ces aspects limitent la précision avec laquelle on peut transposer la connaissance experte de la réalité aux images.

Même si elle était transposable, on a dû constater (§ 7.2) que cette connaissance permet rarement de définir des lois de voisinage ou de taille, utile dans l'analyse des images. Ces différents aspect empêchent l'utilisation de méthodes mécanistes d'analyse provenant du domaine du traitement d'image comme nous avons pu les employer dans des étapes précédentes de l'étude. L'intérêt d'autres approches d'analyse texturale (au sens traitement d'image), d'un caractère plus statistique, semble également faible, car il ne semble pas y exister de fortes différences texturales entre les images classifiées des parcelles aux états de surface différents. En conséquence, c'est surtout la distribution des fréquences qui constitue un point de repère dans la synthèse sans que pour autant on puisse s'attendre à une description détaillée sur la base de cette seule information.

En dernier lieu c'est la vérité terrain qui limite le niveau de précision recherché dans la synthèse. Les descriptions sont générales et les estimations quantitatives ont fait preuve d'un degré non négligeable de subjectivité. C'est en partie cette subjectivité, mais surtout le manque d'information sur la distribution spatiale des éléments de l'état de surface à l'intérieur de la parcelle, qui restreint la possibilité de vérifier la qualité d'une classification très précise de la parcelle.

En fonction de cet ensemble de constatations, faites au cours de l'étude, et des considérations hydrologiques exprimées dans le chapitre 2, l'objectif choisi ici est d'arriver à une distinction du premier niveau, *i.e.* entre les groupes d'état de surface les plus distincts. On évaluera la possibilité de reconnaître et de décrire, dans les conditions données, les stades d'évolution initiaux, intermédiaires et finaux et les fréquences des classes donneront une idée de l'importance du couvert organique. Ce premier niveau de reconnaissance devra permettre de lever une grande partie de l'incertitude liée au caractère flou des classes hydro-spectrales. Les résultats et l'analyse des erreurs permettront d'identifier les limites de l'étude et de proposer des modifications à différents niveaux.

Dans cette dernière partie le terme *état de surface* désigne l'état de surface au niveau de la parcelle et ne concerne plus l'état de surface à l'échelle du pixel.

7.4.2 Organisation et hypothèses du modèle

A l'origine on trouve une dernière fois le paradigme, qui constitue le fil conducteur de l'étude ; la supposition que l'analyse basée sur des connaissances d'expert de terrain, traduites en termes d'image, fournit des résultats satisfaisants ayant comme avantage par rapport aux autres approches possibles d'être plus robustes et transposables. L'utilisation de connaissances d'expert dans l'analyse par parcelle était déjà préconisée par Mason *et al.* (1988) et partiellement mise en œuvre par Jansen & Molenaar (1995). Il ne peut être exclu que pour une zone et une prise de vue donnée, d'autres approches comme une approche statistique (Smith *et al.*, 1997), empirique (Kettig & Landgrebe, 1976) ou d'intelligence artificielle (Woodcock & Strahler, 1987 ; Wilkinson, 1996) puissent fournir des résultats en meilleur accord avec la vérité terrain. L'intérêt du travail n'est pourtant pas là, mais dans la découverte des limites d'une approche mécaniste.

Au vu d'un manque de connaissance et surtout d'une absence de critères spatiaux (§ 7.2) il paraît pourtant nécessaire d'accepter un minimum de mesures de calage afin de fixer des seuils à l'intérieur d'une fourchette connue. Ces seuils, fixés par calibration sur 15 parcelles de Neffiès et 15 parcelles de Caux (prise de vue n° 1, pour chaque site 5 parcelles de faciès F0, de faciès F1 et de faciès F2, sélectionnées à l'aide des observations de terrain) sont fixés une fois pour toutes et supposés transposables en temps et espace à l'intérieur de la zone d'étude. Ils seront présentés dans le tableau 7.8 et correspondent à l'attente basée sur la connaissance experte qui pour autant n'est pas en mesure de fournir leur valeur précise.

La démarche suivie par le modèle est une démarche déductive (figure 7.9). D'abord la présence de l'état initial *labour* est vérifiée, car c'est l'état qui est supposé le moins varier entre et dans les parcelles et pour lequel on peut donc le plus précisément définir les critères de reconnaissance (voir aussi tableau 7.1). Ensuite, par exclusion, il est évalué s'il peut s'agir d'une parcelle à faciès intermédiaire, bien qu'un faciès fermé ne puisse être exclu : la dispersion d'éléments organique (§ 7.2) peut "cacher" cet état de la surface minérale, ou bien il peut s'agir non pas d'un faciès intermédiaire, mais fermé à fort taux de cailloux. L'exclusion d'un état à faciès intermédiaire fait aboutir le modèle à un faciès fermé.

De façon indissociable, les fréquences des classes hydro-spectrales renseignent sur l'état de recouvrement du sol minéral par les éléments organiques. Seulement pour la fréquence de pixels verts la nature de cet élément peut être précisée. Ces fréquences constituent un indice du stade d'évolution de l'état de surface. Cet indice n'est pas pour autant pris en compte, car ce stade ne présente pas un intérêt hydrologique en soi et ne peut pas non plus être vérifié par une vérité terrain. Par ailleurs on peut espérer pouvoir déduire le taux réel de recouvrement par ces éléments à l'aide des fréquences, ce qui fait l'objet du § 7.4.3.2.

Le choix de la démarche n'est pas uniquement un choix de logique d'analyse, mais comporte deux autres intérêts. Le plus important est que celle-ci respecte au mieux l'ordre de priorité (hydrologique) de détection comme défini dans le chapitre 2 (§ 2.1.5) en s'intéressant tout d'abord au faciès du sol, puis à l'enherbement. Un deuxième intérêt est qu'elle permet d'accomplir l'autre objectif de ce chapitre (§ 7.1) : en cas d'acceptation ou de rejet d'un état de surface, au cours de l'analyse comme illustrée par la figure 7.9, le flou des classes à combinaison de classes hydro-spectrales peut en grande partie être résolu comme le montre le tableau 7.7. Si par exemple les conditions pour que la parcelle soit classée "labourée" sont satisfaites ("Acceptation de *Labour*", tableau 7.7), les pixels classés flou *mélange-F0* restent inchangés car la présence des deux est possible dans ce cas. Les pixels *mélange-F0-F1* par contre rejoignent les pixels *mélange-F0*, et les pixels *F0-F1* deviennent *F0*.

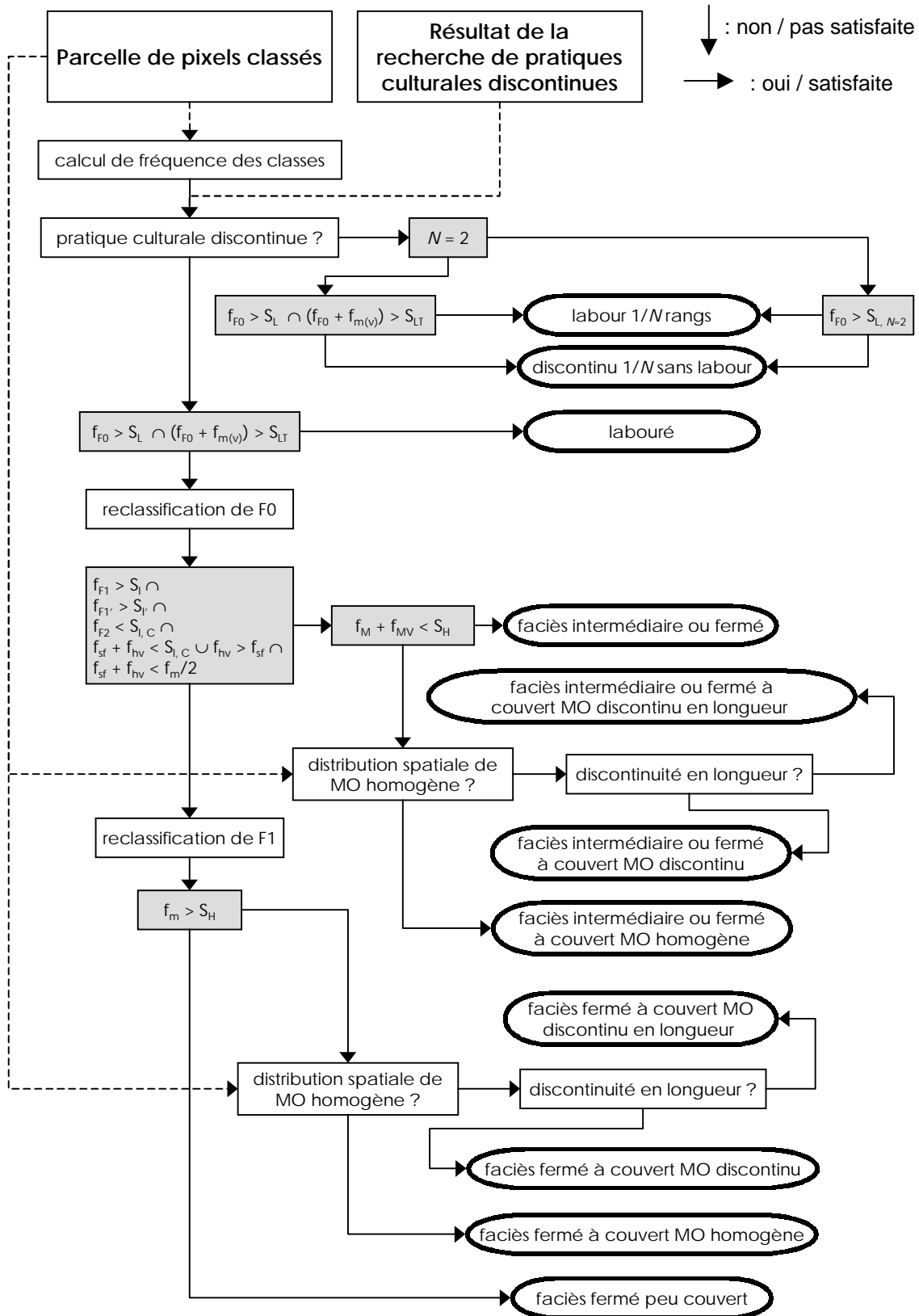


Figure 7.9 Organigramme du modèle de synthèse basé sur les fréquences et la détection de fortes discontinuités à l'échelle de la parcelle. Les pointillés représentent les entrées du modèle. Les boîtes à fond gris représentent des conditions (où f = fréquence et S = seuil). Les tests statistiques (points d'interrogation) sont des tests non-paramétriques (test de Wilcoxon signe et rang) à $\alpha = 0.01$, voir aussi figure 7.10.

Classe <i>floue</i>	Acceptation de <i>Labour</i>	Rejet de <i>Labour</i>	Acceptation de <i>Faciès intermédiaire</i>	Rejet de <i>Faciès intermédiaire</i>
mélange – F0	mélange – F0	mélange	mélange	mélange
mélange – F0 – F1	mélange – F0	mélange – F1	mélange – F1	mélange
F0 – F1	F0	F1	F1	F2 "contaminé"
F1 – F2	-	F1 – F2	F1	F2

Tableau 7.7 Clé de reclassification des pixels classés dans des combinaisons de classes hydro-spectrales (classe *floue*, première colonne), en fonction des étapes parcourues par le modèle et le résultat y obtenu.

En dernier lieu le modèle vise à reconnaître des fortes discontinuités en couvert herbacé au niveau de la parcelle. Une telle connaissance a un intérêt écologique dans le sens qu'elle donne une idée de la façon dont l'espace est colonisé. La justification de sa considération dans le cadre de l'étude est surtout de démontrer le riche potentiel de l'analyse par télédétection par rapport aux observations générales de terrain. Elle indique l'existence d'au moins deux types d'état de surface différents, spatialement disjoints. Même si pour l'instant elle ne constitue pas une demande explicite de la part de l'hydrologue, elle a le mérite d'ouvrir un dialogue. La méthode de détection employée est illustrée dans la figure 7.10. Il ne s'agit pas d'une segmentation à l'aide de techniques de traitement d'image, car le but est d'enrichir la description synthétique et non pas de segmenter des zones à l'intérieur des parcelles. Comme le montre l'organigramme du modèle (fig. 7.9), la méthode permet de décrire, même si de façon rudimentaire, l'organisation spatiale à l'intérieur de la parcelle ce qui peut avoir un intérêt si cette connaissance est combinée avec d'autres informations sur la situation géographique de la parcelle.

⇒ *les critères du modèle*

Pour les seuils de fréquences à déterminer (S , fig. 7.9), les classes de fréquence présentées dans le tableau 7.1 servent de base, sauf en ce qui concerne les pixels F2 car on a vu par la suite que leur fréquence sera faible dans la plupart des cas. Les seuils obtenus par la calibration sont marqués dans le tableau 7.8. Les parcelles à pratique culturale discontinue sont supposées être identifiées comme telles grâce à la procédure de § 7.3 et leur interrang d'exception masqué. Dans l'analyse d'un éventuel labour du sol ("labour 1/N rangs" ou "discontinu 1/N sans labour", fig. 7.9), on applique donc le même seuil (S_L) que pour un labour homogène ("labouré"), sauf dans le cas $N = 2$ où l'on applique un seuil à une valeur moitié moins grande ($S_{L, N=2}$), car les interrangs non labourés n'ont pas pu être masqués ici et constituent la moitié de la parcelle.

Seuil	Description	Valeur calibrée (%)
S_L	somme des fréquences des classes potentiellement F0	85
S_{LT}	somme des fréquences des classes potentiellement F0 ou mélange	90
$S_{L, N=2}$	somme des fréquences des classes potentiellement F0 si $N = 2$	40
S_I	somme des fréquences des classes potentiellement F1	70
S_T	somme maximal dans 2 classes F1 spectralement juxtaposées	60
$S_{I, C}$	seuil du niveau de <i>contamination</i> acceptée	5
S_H	somme des fréquences des pixels en partie ou totalement couvert d'éléments organiques	30

Tableau 7.8 Description et valeur des différents seuils utilisés par le modèle de synthèse.

La valeur des seuils est choisie de façon à permettre la distinction entre les quelques parcelles de calibration tout en accordant un maximum d'espace aux classes hydro-spectrales *a priori* erronées (§ 6.2.3). Ceci afin de rendre la synthèse au maximum robuste dans la présence des différentes sources d'erreur, notamment celle de contamination par inclusion de la bordure. Ainsi le total des pixels

typiques d'une parcelle labourée (*F0* et un petit peu de *mélange*) n'a qu'à atteindre 90% (S_{LT}) afin de faire accepter l'hypothèse de labour. Dans l'évaluation d'un éventuel faciès intermédiaire, une contamination de 5% de pixels *croûte* est acceptée.

Du fait de son stade d'évolution peu précisément connu, les critères d'une parcelle intermédiaire ("faciès intermédiaire ou fermé", fig. 7.9), sont plus complexes que ceux des autres faciès. La fourchette radiométrique prédite (chapitre 6) est souvent très large, car la rugosité de surface varie fortement parmi différentes parcelles à faciès intermédiaire (toute la gamme entre labouré et encroûté). On n'est pas censé trouver cette variation au sein d'une seule parcelle. C'est pour cela que l'on exige une forte majorité de pixels potentiellement *F1* de se situer dans au maximum deux classes floues juxtaposées (S_I). L'exigence d'un recouvrement spatial important par *F1/cailloux* (S_I) est moins forte que pour celui de *F0* dans le cas du labour (70% contre 85%), ce qui s'explique par un recouvrement potentiellement plus fort par l'herbe. S_I reste néanmoins relativement fort, dans l'espoir que cela permette d'éviter que des parcelles à faciès fermé puissent être classé "intermédiaire ou fermé". Vu que même les parcelles au stade d'évolution avancé peuvent avoir un taux important de *F1/cailloux*, un seuil d'un niveau plus faible n'aurait plus d'intérêt. À cause de cette difficulté de distinguer entre les surfaces de sol nu à faciès intermédiaire et fermé, on est obligé d'imposer un maximum au recouvrement total par *mélange*, *herbe verte* et *sarments/feuilles mortes* ($100-70 = 30\%$), ce qui ne correspond pas forcément à chaque stade d'évolution possible sur un faciès encore intermédiaire. Dans la logique de la colonisation graduelle de l'espace par l'herbe on exige sur ce faciès intermédiaire plus de pixels *herbe verte* que de pixels *feuilles mortes* ($f_{hv} > f_{sf}$, sauf si ensemble ils ne dépassent pas le seuil de contamination $S_{I,C}$), et deux fois plus de pixels *mélange* ($f_{sf} + f_{hv} < f_m/2$).

Enfin ; à partir d'un taux de plus de 30% de pixels contenant des composants organiques (S_H), on s'intéresse à leur distribution à la surface (figure 7.10). L'approche très simple consiste à couper la parcelle, le long du côté le plus long de l'enveloppe carré, en deux parties de taille égale. Puis chaque moitié est découpée en sens opposé en deux parties égales. La comparaison statistique entre les quatre parties résultantes permet de reconnaître une discontinuité et de dire si elle se présente dans le sens de la longueur (*A'* pas différent de *A''*, et *B'* pas différent de *B''*, mais *A'* et *A''* différents de *B'* et *B''*) de la parcelle ou pas.

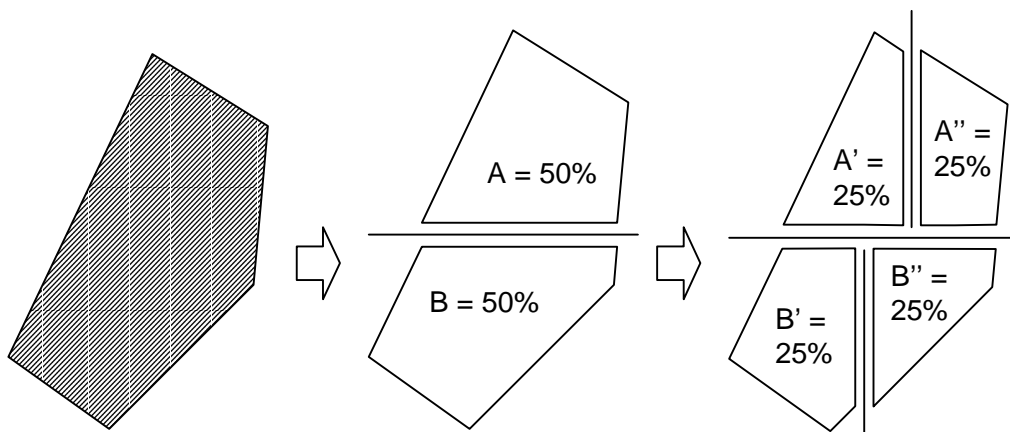


Figure 7.10 Schéma illustrant le découpage d'une parcelle extraite de l'image afin de mettre en évidence d'éventuels contrastes spatiaux dans la parcelle. Le découpage est réalisé de manière à produire 4 quarts découpés NS et EW de surfaces égales.

7.4.3 Résultats et discussion

L'application du modèle constitue la dernière étape de l'étude en ce sens qu'elle est censée fournir une information au niveau de la parcelle sur l'état des paramètres d'entrée du modèle hydrologique distribué (sauf le couvert végétal de la vigne, déjà obtenu lors d'une étape précédente de notre travail), dans la mesure où cela est possible sur la base d'un seul jeu de données télédétections acquis à un moment donné. A ce premier niveau de synthèse, les deux variables les plus significatives du point de vue hydrologique sont : le faciès du sol et la présence d'un fort enherbement. Afin de tester la qualité du modèle et la robustesse de sa calibration dans le temps et dans l'espace, le modèle a été appliqué à tous les sites et tous les prises de vue considérés dans cette étude (tableau 3.2) : prise de vue n°1 (Neffiès, Caux, Rou-AI, Pézenas) et n°2 (que Rou-AI et Pézenas) au printemps et été 1998, et n°3 (Neffiès, Caux, Rou-AI, Pézenas) en hiver 1999.

7.4.3.1 Reconnaissance du faciès

Le tableau 7.9 montre les résultats de la reconnaissance de la variable considérée la plus importante, le faciès du sol. Ces résultats sont très satisfaisants dans le sens que le modèle, calibré une fois pour toutes, permet la reconnaissance avec une grande précision (plus de 90%) des faciès initiaux (ouvert, F0) et terminaux (fermé avec encroûtement probable, F2) à travers toute la vallée de la Peyne et à différents moments de l'année. Le faciès intermédiaire F1 par contre n'est pas identifié avec une précision satisfaisante : en moyenne le modèle ne reconnaît qu'un cinquième des parcelles rapportées "à faciès intermédiaire" comme ayant possiblement un tel faciès. Ceci s'explique en partie par la conception du modèle, dont l'objectif à du être réduit à la reconnaissance très partielle de ce faciès (§ 7.4.2). Un autre facteur majeur d'explication est sans doute l'importante variation en stade d'évolution du faciès (et de rugosité qui l'accompagne) et son éventuel recouvrement par les adventices ou débris organiques : sous le dénominateur "F1" on trouve également les faciès F0/F1 et F1/F2 (Boiffin & Bresson, 1987), ce qui peut donner des réponses radiométriques à l'échelle du pixel semblables à celles

	prise de vue 1				prise de vue 2		prise de vue 3				Total
	C	N	P	R-A	P	R-A	C	N	P	R-A	
faciès ouvert	25	26	8	15	4	16	5	6	1	6	112
erreur modèle	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	6
erreur autre	3	4	3	1	0	8	1	0	0	3	23
performance modèle	95	100	80	92	75	88	100	100	100	67	93
performance système	84	85	50	87	75	44	80	100	100	33	74
faciès intermédiaire	11	10	1	24	10	20	19	38	13	43	189
erreur modèle	5	10	1	19	10	13	14	26	13	27	138
erreur autre	1	0	0	0	0	1	2	8	0	3	15
performance modèle	50	0	0	21	0	32	18	13	0	33	21
performance système	45	0	0	21	0	30	16	11	0	30	19
faciès fermé	26	33	4	54	5	48	33	25	1	55	284
erreur modèle	0	4	0	8	0	1	4	3	0	3	23
erreur autre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
performance modèle	100	88	100	85	100	98	88	88	100	94	92
performance système	100	88	100	85	100	98	88	88	100	93	92

Tableau 7.9 Résultats issus du modèle comparés à la vérité terrain. Par faciès et par site (C = Caux, N = Neffiès, P = Pézenas, R-A = Rou-AI) le nombre de parcelles correspondant est indiqué avec en dessous le nombre de parcelles parmi celles-là non-reconnues par le modèle comme ayant un tel faciès à cause d'une erreur soit propre au modèle (*erreur modèle*), soit provoqué par un effet externe au modèle (*erreur autre*). Les causes de ces dernières erreurs seront précisées dans le tableau 7.10. La **performance du modèle** (%) prend uniquement en compte le premier type d'erreur. La **performance du système** (%) prend en compte toute erreur induite au cours de l'analyse à partir de la reconnaissance de la parcelle comme vigne.

de F0 et F2 (voir chapitre 6). Il est probable que cela se traduit par des parcelles à faciès réellement intermédiaires classées respectivement "ouvert" ou "fermé". Malheureusement on ne dispose pas de descriptions plus fines du faciès, ce qui aurait permis de vérifier cette hypothèse. On pourrait penser que dans certaines configurations géométriques de vue et d'éclairage (annexe 2C), une parcelle à faciès intermédiaire se confond plus facilement avec une parcelle labourée, et dans d'autres configurations d'avantage avec une parcelle à faciès fermé. L'étude de la localisation des parcelles présentant différents types de confusions n'a pourtant pas mis en évidence une influence de cette géométrie. Si elles étaient attendues plus en direction du *hot spot*, en réalité les parcelles à faciès intermédiaire mais jugées comme étant labourées sont aussi bien rencontrées en contre-jour. Il n'empêche que leur distinction reste plus facile en contre jour comme le montre la figure 7.11.

Mis à part les erreurs de classification liées à la simplification de la réalité par le modèle, d'autres erreurs peuvent être identifiées (tableau 7.9). Celles-ci sont provoquées par des non conformités entre les hypothèses posées au cours des étapes précédentes et la situation réelle ou celle trouvée dans l'image. Ces différents types de non conformité, précisés dans le tableau 7.10, influencent surtout la reconnaissance des parcelles labourées (diminution de la performance de 93% vers 74%). C'est que les conditions du modèle y sont les plus restrictives concernent l'intégralité de la parcelle, ce qui à quatre reprises n'a pas toujours été le cas. Une pratique 7.3) est censée induire deux types d'interrangs fortement contrastés. Quatre fois un contraste trop faible a empêché la reconnaissance d'une telle pratique, et par là provoqué une erreur de classification. La source d'erreur la plus importante, concernant aussi les erreurs externes au modèle de reconnaissance du faciès intermédiaire, est une composition minéralogique de la surface du sol minéral dont les propriétés réflectives dévient significativement de l'ensemble de situations représentées par les sites observés par goniomètre (chapitre 6, annexe 2B). Ces compositions de surface plus ou moins exceptionnelles, discutées dans le paragraphe 6.2.3.3, concernent une surface

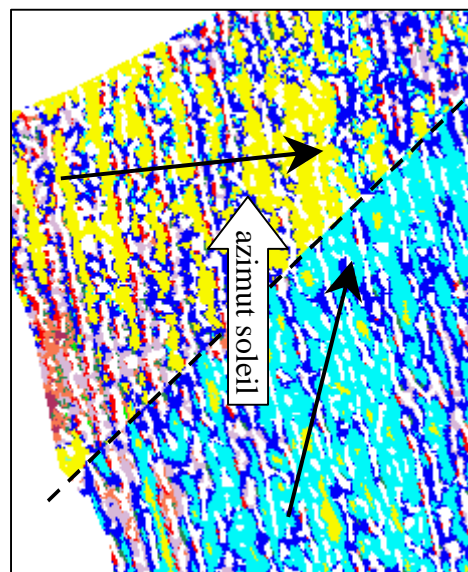


Figure 7.11 Influence de l'angle de vue sur la classification. Cet extrait de la parcelle AW 260 (Rou-A1, prise de vue 3) est composé par deux images et donc vu sous deux angles azimutaux différents (flèches noires). La surface à faciès intermédiaire ou caillouteuse (jaune) ne peut plus être distinguée d'un éventuel labour si vue plus en contre jour (classe floue, aquamarin).

	prise de vue 1				prise de vue 2		prise de vue 3				Total
	C	N	P	R-A	P	R-A	C	N	P	R-A	
faciès ouvert											
substrat non conforme	2	3	1	-	-	4	1	-	-	-	11
pente	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
labour partiel / parcelle composée	-	1	-	-	-	2	-	-	-	1	4
1/N non reconnu	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	4
autre	-	-	2	1	-	-	-	-	-	-	3
faciès intermédiaire											
substrat non conforme	1	-	-	-	-	-	2	8	-	-	11
1/N non reconnu	-	-	-	-	-	1	-	-	-	3	4
faciès fermé											
autre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1

Tableau 7.10 Typologie des erreurs de classification du faciès de la parcelle, provoquées par des non-conformités avec les hypothèses propres aux différentes étapes de l'analyse.

limitée et dont la localisation est stable – localisation qui même non connue, est prévisible grâce aux informations existantes : il s'agit soit d'affleurements de la roche mère calcaire, indiqués par la coïncidence d'une forte pente et des unités pédologiques lithochromes rapportés par la carte pédologique (1/100.000) disponible (cas des sites Rou-Al, Caux et Pézenas), soit d'unités géologiques non représentatives et à l'étendue très limitée, mais rapportées par la carte géologique (cas d'un récif à polypiers dans la partie nord du site de Neffiès). Si l'on souhaite donc appliquer la méthode ailleurs dans un milieu comparable, il faudra étudier de tels endroits "sensibles" par une prospection de terrain.

Dans 11 cas, la perturbation induite par ce substrat non conforme a dépassé le seuil de flexibilité du modèle, conduisant à une synthèse erronée. Une fois inventoriés, ces cas pourraient être pris en compte ou exclus, grâce à leur stabilité géographique, apportant ainsi une amélioration de 10% à la performance du système au niveau de la reconnaissance du labour (84% au lieu de 74%). Cette amélioration est exprimée en % de la surface, et non pas en nombre de parcelles, ce qui est moins important vu que les parcelles en pente sont plus petites.

7.4.3.2 Quantification des couverts herbeux et des débris végétaux

La figure 7.12 montre que le modèle permet de distinguer entre parcelles à état de surface homogène et parcelles où soit l'enherbement, soit la concentration de débris organiques, provoque l'existence de grandes zones à état de surface contrasté. Même si cette variabilité au sein de la parcelle, n'est pour l'instant pas intégrée dans le modèle hydrologique distribué, la démonstration de la possibilité de sa détection peut se révéler utile si de recherches hydrologiques futures démontraient l'importance de sa prise en compte, par exemple pour la détermination de l'écoulement ou de l'infiltration.

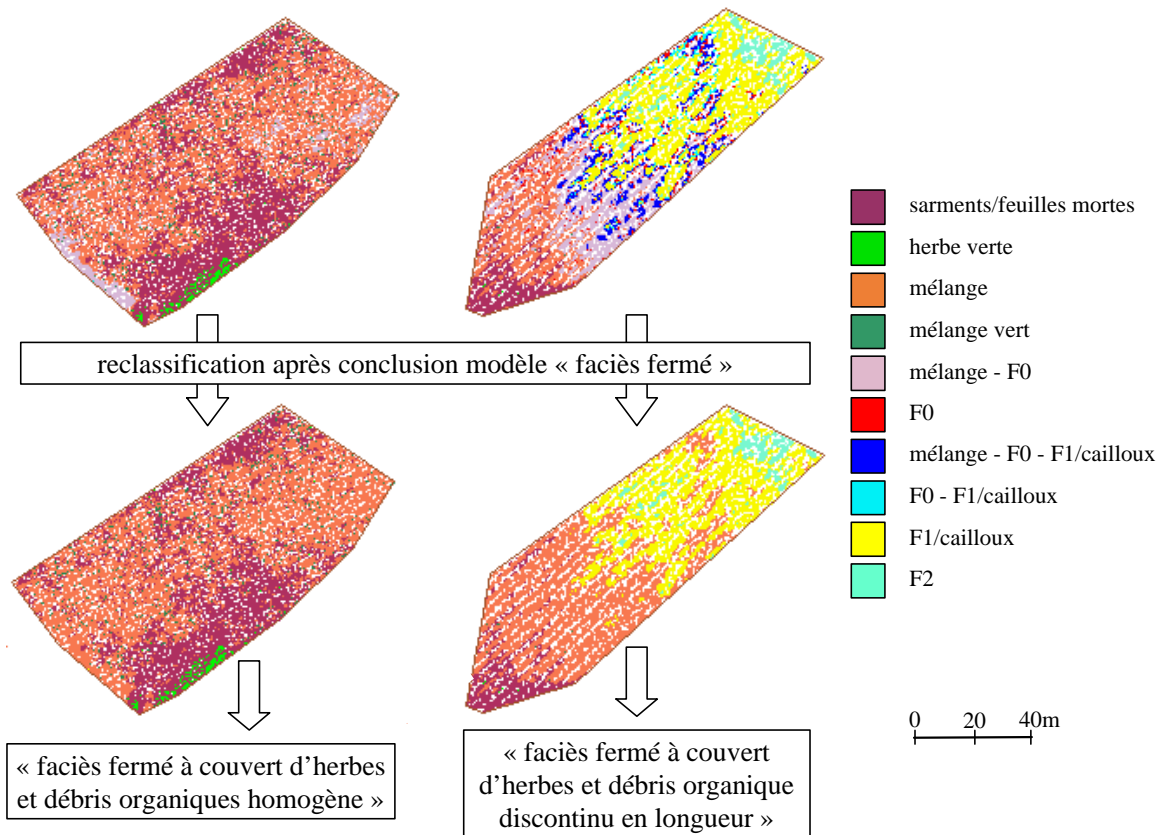


Figure 7.12 Exemples de résultats de l'analyse de la distribution des herbes à l'intérieur de la parcelle. Il s'agit des parcelles E3 759 (gauche) et D2 327 (droite), Caux, prise de vue 3, représenté à 25% de leur taille originale.

Ce qui actuellement intéresse plus l'hydrologue, c'est de connaître l'importance de l'enherbement en moyenne au niveau de la parcelle, si possible sous la forme d'une estimation quantitative comme on le note dans les observations de terrain (§ 3.2.2), sinon du moins par une classification en "important" ou "négligeable" (du point de vue hydrologique). Théoriquement on devrait pouvoir obtenir une telle estimation par une fonction de changement d'échelle descendante (*downscaling*), prenant en compte les fréquences des pixels *mélange*, *herbe verte* et *sarments/feuilles mortes*. Par contre, on sait d'avance qu'une telle estimation sera gênée par d'une part des problèmes liés au dispositif de télédétection, et d'autre part par des imprécisions contenues dans la vérité terrain.

Si dans ce contexte, on tente quand même d'obtenir une estimation et de la comparer à ce qui est censé constituer une vérité terrain, on obtient des relations peu satisfaisantes comme le montre la figure 7.13. Ces estimations sont basées sur des simples lois de transfert d'échelle (tableau 7.11). Si l'on regarde par exemple les résultats obtenus sur les mosaïques de la première prise de vue, ces lois semblent pourtant valide : pour chaque site, la régression linéaire a une pente près de 1.0. Par contre, le coefficient de corrélation varie fortement ($R^2=0.89$ à Pézenas, $R^2=0.49$ à Neffiès, $R^2=0.33$ à Caux et près de zéro à Rou-Al), ce qui semble une indication de l'influence de l'observateur.

classe hydro-spectrale	faciès ouvert	faciès intermédiaire	faciès fermé
sarments – herbe sèche – feuilles mortes	1.0	1.0	1.0
herbe verte	1.0	1.0	1.0
mélange, moitié inférieure de fourchette	0.4	0.5	0.6
mélange, moitié supérieure de fourchette	0.2	0.3	0.4

Tableau 7.11 Fonction empirique de transfert d'échelle pour l'estimation de l'enherbement. Les chiffres indiquent le facteur de multiplication pour les classes hydro-spectrales respectives.

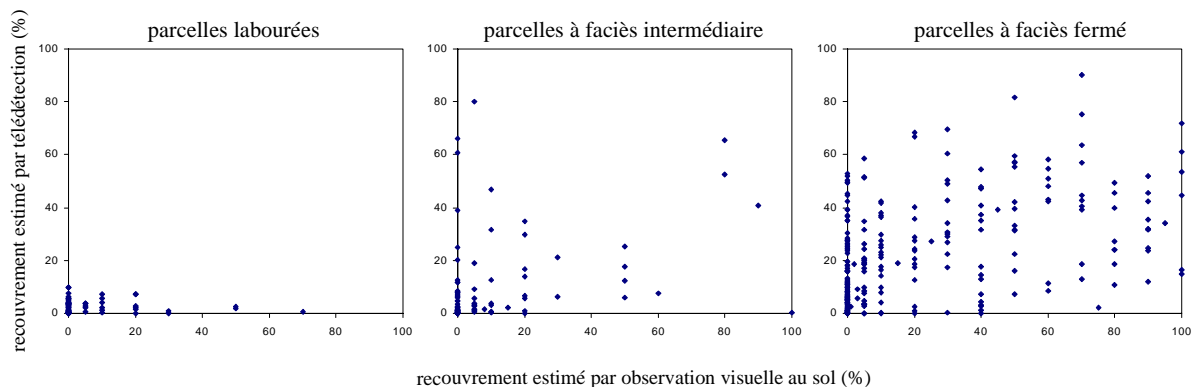


Figure 7.13 Rapport par faciès entre l'estimation de l'enherbement par la fonction de transfert d'échelle basée sur les fréquences des classes hydro-spectrales et l'estimation visuelle de l'enherbement sur le terrain.

L'imprécision contenue dans l'estimation subjective par prospection au sol est en effet considérable. Plusieurs constatations l'indiquent : le tableau 7.2 met en évidence des écarts parfois importants entre l'estimation visuelle et celle basée sur une approche statistique. L'étude des observations de terrain met en évidence des incohérences parfois irréelles, comme un taux d'enherbement de 50 ou 70% pour une parcelle labourée. La figure 7.12 fournit un autre exemple : au moment de la prise de vue n° 3, la parcelle D2 327 est rapportée comme ayant un taux de recouvrement par l'herbe de 90% dans l'interrang. Ceci nous renseigne plus sur l'itinéraire de l'observateur que sur l'état réel de la parcelle !

En ce qui concerne le dispositif de télédétection, deux aspects interviennent : il a été démontré (chapitre 6) que certains facteurs, notamment la correction radiométrique, provoquent des erreurs de classification de pixels, ce qui se répercutera dans une estimation quantitative basée sur la fréquence des classes. L'autre aspect est l'impossibilité, aux résolutions spatiale et spectrale données, de distinguer entre sarments/feuilles mortes, des concentrations d'herbes sèches, et leur association. Si cette distinction n'est pas forcément très significative du point de vue hydrologique, elle l'est pour la validation de l'estimation : l'on risque de comparer ce qui en réalité est du débris organique au couvert herbacé estimé par prospection visuelle au sol.

L'influence des sarments dans la comparaison est démontrée par la figure 7.14. Elle correspond au diagramme de droite de la figure 7.13, sauf qu'elle est basée uniquement sur les parcelles sans sarments au sol. Le coefficient de corrélation est quelque peu plus élevé ($R^2=0.33$ contre $R^2=0.18$ avec sarments inclus), mais ce qui est plus important à noter est que l'omission des parcelles à sarments au sol se traduit par une tendance plus claire de regroupement autour de la bissectrice. Un nombre substantiel de parcelles se trouve cependant en dessous, du fait soit d'une sous-estimation par le modèle, soit d'une surestimation sur le terrain.

Une classification binaire en parcelles fortement enherbées (plus de 50% ; Hatier, 2000) ou sans enherbement significatif, est-elle donc plus satisfaisante ? Des 28 parcelles à faciès fermé dont l'image suggère un fort enherbement, 16 ont effectivement été identifiées comme telles sur le terrain. Par contre les observations de terrain rapportent deux fois plus de parcelles fortement enherbées. Une surestimation dans les estimations subjectives au sol semble probable. Si l'on s'intéresse uniquement aux parcelles sans sarments, le taux d'identifications correctes s'élève de 16/28 à 7/9.

7.4.3.3 Quel potentiel pour le contexte temporel ?

On rappelle que les parcelles à faciès intermédiaire se sont avérées difficilement reconnaissables par la démarche décrite dans ce chapitre, car spectralement (1) leur faciès couvre une large gamme, comparable sur les bords à la réponse des classes avoisinantes de F0 et de F2 et (2) ce faciès ne peut être dissocié d'une surface caillouteuse. Spatialement le faciès est homogène, mais le motif de la couverture par l'herbe et/ou le débris organique varie fortement et ne permet pas la distinction par rapport au faciès fermé et encroûté.

Le terme "intermédiaire" lui-même indique en quoi cet état se distingue des autres : plus que par des caractéristiques spatiales ou spectrales, c'est l'information temporelle, puisqu'il s'agit d'un stade dans une évolution : cet état apparaît après l'état de labour et avant l'encroûtement, et est fonction de la quantité de pluie (et son intensité) reçue depuis le dernier labour (hormis l'éventualité de passage d'un engin entre les rangs). Le potentiel d'un suivi temporel est donc important, notamment lorsque la présence de faciès intermédiaire est fréquente. Pourvu que la densité d'échantillonnage temporelle soit suffisamment dense afin de permettre la détection de tout labour avant que le faciès ne soit dégradé, l'évolution peut en grande partie être prédite, permettant d'éliminer l'imprécision dans la télédétection du faciès. Et là où l'on ne constate pas de labour, ni d'évolution du faciès, le suivi temporel devrait permettre de lever l'ambiguïté entre un faciès intermédiaire et une surface caillouteuse.

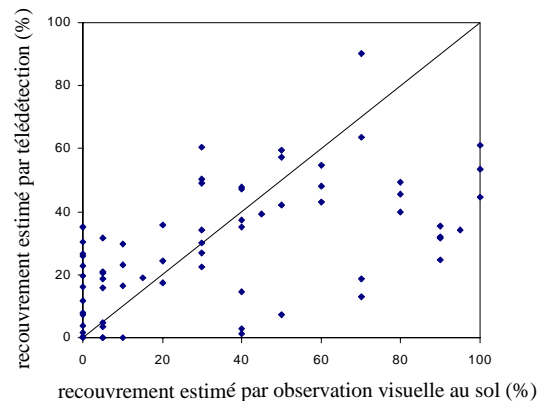


Figure 7.14 Rapport entre l'estimation de l'enherbement par télédétection et l'estimation visuelle obtenue au sol pour les parcelles à faciès fermé sans sarments à la surface.

Notre étude ne permet pas de mettre en évidence cette contribution importante, car elle a surtout pour objectif de démontrer le potentiel de l'information spatiale et spectrale d'un dispositif le plus adapté possible à la problématique, bien que la légèreté permettant le suivi temporel a pesé beaucoup dans le choix du dispositif. Notre dispositif permet donc d'aborder ce sujet prochainement.

Une première indication est obtenue par la comparaison de prises de vue n° 1 et n° 2, qui ont eu lieu un mois l'une après l'autre. Si l'on prend en compte les résultats obtenus sur la première prise de vue dans l'analyse de la deuxième, une amélioration significative de la détection du faciès intermédiaire serait obtenue. Pour les parcelles qui étaient en état labouré lors de la première prise de vue, on exclut la détection d'un faciès fermé un mois plus tard vu la faible quantité de pluie reçue entre-temps. Ainsi la performance du modèle vis-à-vis du faciès F1 pour Pézenas, deuxième prise de vue, monte de 0% à 29%, et celle pour Rou-Al de 32% à 42%. En supposant que pour toute parcelle la date du dernier labour soit connue, une performance réellement satisfaisante pourra être obtenue.

7.4.4 Conclusions sur la reconnaissance du faciès et de l'enherbement

Nous avons démontré qu'il est possible de reconnaître les parcelles labourées et celles à faciès fermé avec une précision satisfaisante dans un contexte opérationnel, avec un dispositif léger et à l'aide d'un simple modèle semi-empirique qui, une fois calibré, semble applicable partout dans la zone d'étude et à tout moment. Par contre, la classification de la réflectance bidirectionnelle servant d'entrée au modèle est valide sous un certain nombre d'hypothèses qui quant à elles ne sont pas toujours satisfaites (voir chapitre 6). En préservant un maximum de "souplesse", le modèle de synthèse est peu sensible à ces erreurs comme par exemple l'inclusion de la bordure de la parcelle, sauf en ce qui concerne les substrats minéraux extraordinaires. La prise en compte de ces zones stables est possible et améliore la performance du système.

Si la performance du système tel qu'il est présenté ici peut être jugée satisfaisante, elle dépend fortement de l'importance de la présence de parcelles à faciès intermédiaires, généralement mal reconnues, et peut donc varier dans le temps et dans l'espace. Pour une performance globale satisfaisante et stable, il semble indispensable d'enrichir le système avec un suivi et une modélisation temporelle. Il n'existe aucun obstacle à un tel enrichissement, qui permettra vraisemblablement également d'identifier les parcelles à croûte caillouteuse.

Il semble tout à fait possible qu'une fois le faciès déterminé, le modèle soit complété par un simple module de transfert d'échelle fournissant une estimation quantitative de l'enherbement. Les résultats d'une première tentative semblent intéressants, mais ne peuvent être validés faute d'une vérité terrain fiable. On n'est donc pas en mesure d'évaluer la façon dont se répercute l'imprécision radiométrique dans l'information d'entrée du système. Il serait souhaitable d'effectuer des observations du type décrit dans le paragraphe 7.2.2.1 sur certaines parcelles au moment de la prise de vue, et d'inclure dans les estimations visuelles habituelles une estimation quantitative du recouvrement par le débris organique.

7.5 Conclusions

Les objectifs de ce chapitre étaient de fournir une description synthétique de l'état de surface par parcelle pouvant être interprétée en termes hydrologiques, et d'éliminer le plus possible l'imprécision contenue dans les résultats issus du chapitre précédent.

L'étude de la distribution des objets à l'intérieur de la parcelle (§ 7.2) nous a montré qu'à la résolution spatiale adoptée, il n'est guère possible d'identifier des objets sur la base de leur forme, taille ou voisinage direct. Ceci exclut donc l'élimination de l'imprécision par cette voie et l'accès à l'état de surface. La seule autre voie qui nous était ouverte était celle de l'utilisation de connaissances en termes de fréquences, appliquées dans une approche de classification par parcelle.

Une telle démarche nécessite la reconnaissance préalable d'une éventuelle pratique culturale "discontinue". L'analyse par cooccurrence (§ 7.3) a démontré sa capacité à reconnaître une telle pratique, pourvu que les deux types d'interrang soient bien contrastés. Cette approche a comme atout de permettre la prise en compte de ce type de discontinuité en effaçant les interrangs "exceptionnels".

Dans l'analyse de l'état de surface de la parcelle, ce qui compte le plus pour l'hydrologue est la reconnaissance du faciès. Le modèle qui vise à reconnaître ce faciès (§ 7.4) prouve que dans l'état actuel, le dispositif permet la détection fiable des parcelles labourées, même si quelques améliorations techniques ne seraient pas inutiles. Au vu des résultats fournis par l'analyse géostatistique (§ 7.2), la distinction entre un faciès intermédiaire et fermé est difficile et peu directe, car elle doit encore en grande partie être déduite de l'évolution des composants organiques qui le recouvrent. Comme de plus l'aspect d'un faciès intermédiaire peut fortement varier et que spectralement il reste indissociable d'une surface caillouteuse, la performance de sa reconnaissance est actuellement peu satisfaisante, bien que les faciès fermés soient reconnus avec une bonne précision. On s'attend à ce que, et le potentiel en est démontré, le suivi temporel à un pas de temps approprié permette d'obtenir une reconnaissance fiable de tous les principaux faciès, pourvu que l'on acquière une connaissance experte plus précise sur l'évolution du faciès.

L'approche d'analyse par parcelle permet également de renseigner la base de données de parcelles avec des informations sur leur uniformité spatiale. Par rapport au couvert herbacé, ceci peut avoir un intérêt direct pour la modélisation hydrologique, mais peut aussi servir comme indicateur du stade d'évolution de l'état de surface de la parcelle. Afin de pouvoir exploiter ce dernier aspect, une connaissance plus fine de cette évolution est requise, notamment en termes spatiaux. La reclassification après reconnaissance du faciès des pixels se trouvant dans des classes floues, semble donner accès à une estimation quantitative du recouvrement par l'herbe et les débris organiques, bien que la qualité de la vérité terrain disponible ne permette pas de le valider complètement.

PARTIE V

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

8	<i>CONCLUSIONS GÉNÉRALES - LA CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE.....</i>	<i>167</i>
9	<i>PERSPECTIVES.....</i>	<i>171</i>
9.1	Améliorations proposées	171
9.2	L'intégration dans la modélisation	173
9.3	Valorisation par transposition.....	173
9.4	Les évolutions futures.....	174

8 Conclusions générales - la contribution à la modélisation hydrologique

En commençant ce travail, nous cherchions à savoir si en milieu méditerranéen viticole la télédétection pouvait répondre à une des attentes des hydrologues modélisateurs, concernant la reconnaissance des états de surface. Leur reconnaissance et leur caractérisation sont indispensables pour pouvoir garantir une paramétrisation satisfaisante du modèle hydrologique élaboré par l'UMR Sol et Environnement de l'INRA-ENSA de Montpellier. Les caractéristiques du milieu et de la modélisation de son fonctionnement hydrologique imposent de fortes contraintes à la télédétection que nous avons tenté de respecter par la mise au point d'un dispositif léger.

Nous pouvons à présent répondre à la question suivante : un dispositif léger de télédétection, est-il capable de satisfaire les attentes de la modélisation hydrologique distribuée dans le cas particulier du milieu viticole méditerranéen ? Ceci revient à se demander quelles étaient jusque là les facteurs qui limitaient l'utilisation de la télédétection pour la modélisation hydrologique et comment nous avons essayé d'y remédier. Nous avons vu que les limitations les plus importantes sont (1) l'inadéquation entre les échelles d'espace ou de temps entre celles demandées par les modèles et celles associées aux observations de télédétection et, (2) la nature des variables identifiées par télédétection par rapport à celles requises en entrée des modèles (Blanchard *et al.*, 1999). C'est sur ces aspects que réside la contribution novatrice de cette thèse dédiée à l'utilisation de la télédétection pour l'hydrologie. D'une part, la mise au point d'un dispositif de télédétection spécifique a permis de s'adapter aux exigences de résolutions spatiale et temporelle. Même si c'est surtout l'aspect spatial qui a été abordé ici, les caractéristiques du système mis au point permettent vraisemblablement également la satisfaction des exigences temporelles. D'autre part, les méthodes d'analyse développées permettent – souvent grâce à l'utilisation de connaissances existantes – la reconnaissance et parfois même la quantification de caractéristiques physiques au lieu de la détection d'indices peu utiles dans le cadre d'une modélisation.

Les aspects novateurs de ce travail se situent donc tant au niveau des informations fournies à la modélisation hydrologique qu'au niveau de l'approche de télédétection. On traitera ces deux niveaux séparément en commençant par le dernier.

Ü De la télédétection "adaptée"

Le développement d'un dispositif de télédétection "adaptée" nous a permis d'être en accord avec les préoccupations actuelles de la recherche en télédétection pour l'observation de la terre : nous avons prêté une oreille attentive à l'intérêt croissant qui est accordé depuis quelques années au choix d'une échelle spatiale appropriée. Ceci nous a permis de prendre en considération deux autres préoccupations : (1) l'utilisation de connaissances exogènes dans une démarche de télédétection plus mécaniste et (2) l'intégration de la télédétection avec et dans un système d'informations spatialisées.

Bien que le dispositif ainsi mis au point a montré quelques faiblesses techniques, rendant le prétraitement des données quelque peu laborieux et les données résultantes d'une fiabilité pas toujours parfaite, nous avons pu évaluer son potentiel.

Le choix d'une très haute résolution spatiale (0.25×0.25m), permettant d'accéder directement à l'objet étudié – le sol entre les ceps de vigne – rend possible l'application d'un ensemble de techniques issues du domaine du traitement d'image, permettant à leur tour de valoriser la connaissance *a priori* sur l'organisation spatiale du milieu. Ceci prend souvent la forme d'une intégration SIG – télédétection, où d'une manière plus large la démarche peut être caractérisée comme l'intégration de la télédétection en

tant que composante et vecteur dans un système de connaissance. Ceci sous-entend une évolution de la télédétection qui semble être en train de trouver sa place dans l'analyse spatio-temporelle. Elle doit pour cela dépasser le stade de la découverte de ses capacités, pour contribuer en tant qu'une information parmi d'autres à la solution de problèmes ou la satisfaction de besoins. Le terme "SIG intégré" pourrait alors devenir une tautologie.

Les avantages de cette intégration sont souvent à double sens. Si par exemple le parcellaire numérisé facilite la télédétection des parcelles de vigne, les résultats de cette détection enrichissent en retour l'information sémantique du parcellaire. Les connaissances d'expert (non spatialisées) permettent de suivre des démarches mécanistes dans l'analyse, que ce soit sur le plan spatial (définition de la structure d'une vigne pour un modèle textural), spectral (la surface éclairée du sol entre les ceps est constituée d'un ou plusieurs objets parmi un nombre limité d'objets connus) ou temporel (connaissance sur l'évolution de l'état de surface).

C'est également en considérant que la télédétection est une composante d'un système de connaissances et d'informations, que nous avons pu négliger l'effet de certains facteurs de l'état de surface du sol comme l'humidité de surface et la texture (au sens pédologique). D'autres informations sont disponibles et la télédétection ne peut fournir toutes les informations requises sur les états de surface. Des informations d'ordre météorologique, pédologique, hydrologique et agronomique peuvent compléter les informations télédéteectées (comme c'est le cas de la texture minéralogique de surface, voir chapitre 2), ainsi que "guider" la télédétection, soit au niveau des conditions d'acquisition (le cas de l'humidité, figure 2.3, chapitre 2), soit au niveau de l'analyse des données (voir par exemple les chapitre 4 et 5).

Ü De l'information télédéteectée pour la modélisation hydrologique en milieu viticole méditerranéen

Bien que l'estimation de quelques caractéristiques ait été volontairement abandonnée, il en reste plusieurs autres que nous avons voulu estimer à l'aide de données télédéteectées provenant d'une seule source. Théoriquement ceci est possible si chacune d'entre elles se distingue par ses caractéristiques spatiales, spectrales ou temporelles et si l'information télédéteectée est adaptée à la reconnaissance de ces caractéristiques. Ceci exige une très bonne connaissance des objets étudiés. Cette thèse a permis de construire un ensemble de connaissances qui pourtant s'avère quelquefois insuffisant. De plus, nous avons uniquement pu aborder les aspects spatiaux, spectraux et directionnels, sans exploiter plus à fond la dimension temporelle.

Dans ces conditions, quelles sont les informations ayant un intérêt hydrologique fournies par les données télédéteectées ? Pour la zone d'étude, les analyses automatisées nous permettent d'accéder à :

- ◆ la surface cultivée en vigne ;
- ◆ le mode de conduite de la parcelle et de sa géométrie (sens du travail, écartement des rangs), utile à la détermination de l'écoulement ;
- ◆ une estimation du couvert végétal de la vigne, comme produit annexe d'une étape de segmentation permettant d'analyser l'état de la surface du sol ;
- ◆ la présence d'un éventuel labour "discontinu" (*i.e.* qui ne concerne pas tous les interrangs) ;
- ◆ une détermination du faciès du sol minéral, d'une qualité très satisfaisante en ce qui concerne les faciès ouverts et fermés ;
- ◆ une cartographie de la parcelle en classes hydro-spectrales et la présence d'éventuelles fortes discontinuités à cette échelle ;
- ◆ une première estimation quantitative de l'enherbement, bien que non encore validée.

Chacune des ces informations contient cependant un certain niveau d'erreur dont nous avons tenté de quantifier l'effet et d'expliquer la cause. Dans certains cas ces erreurs proviennent en grande partie des faiblesses techniques du dispositif (un problème – occasionnel et local – dans la mise au point du scanner, gênant la détection de l'occupation du sol, ou encore des imprécisions contenues dans la connaissance de la géométrie vue-éclairage, gênant la classification radiométrique). Ces erreurs sont susceptibles de pouvoir être réduites (voir chapitre 9). D'autres erreurs sont liées au milieu physique, comme c'est par exemple le cas là où la composition minéralogique de la surface dévie fortement de la composition attendue, induisant une erreur de classification spectrale. Le niveau significatif d'imprécision parfois rencontré dans les estimations est lié aux caractéristiques de l'information télédéteectée. La résolution spatiale par exemple limite la précision avec laquelle nous pouvons estimer le couvert végétal de la vigne (voir chapitre 5). Et l'impossibilité d'obtenir des triplets BRDF à l'aide de l'information disponible nous empêche parfois d'affecter les pixels à une seule classe hydro-spectrale, ce qui gêne l'interprétation de la classification produite.

On considère néanmoins que ces résultats constituent une avancée très significative. Quand on compare les résultats obtenus aux attentes (§ 2.1.5), on constate que les seules informations véritablement manquantes sont la pierrosité et la reconnaissance de parcelles à faciès intermédiaire. Nous avons cependant démontré que le suivi temporel est une voie qui devrait permettre de distinguer entre des parcelles à faciès intermédiaire et celles à croûte caillouteuse. La modélisation hydrologique ne sera réellement satisfaite que si nous arrivons à remédier à ces imperfections. Dans nos conditions opérationnelles, les sarments peuvent seulement être détectés précisément par télédétection lorsqu'ils sont présents en forte concentration, ce qui constitue heureusement le seul cas ayant un intérêt hydrologique. Dans leur état dispersé habituel, l'exigence en résolution spatiale pour permettre leur détection ne peut être satisfaite.

La qualité des résultats obtenus reflète tout le potentiel du système léger de télédétection mis en œuvre, pourtant limité en richesse et qualité de l'information spectrale. Des résultats plus détaillés et précis ne pourront être obtenus avant que l'analyse temporelle soit considérée et que des améliorations soient apportées tant sur le dispositif d'acquisition que sur la connaissance experte sur les états de surface.

Grâce à l'approche suivie, nos méthodes peuvent être considérées comme étant transposables (à d'autres régions viticoles et agricoles) et nous pouvons préciser l'étendue de la zone de validité : connaissant par exemple la variété de substrats sur lesquels les triplets BRDF (permettant la classification spectrale) ont été établis, l'étude de l'étendue de ces substrats – par une requête dans un SIG – nous permettra de déterminer, sans étude préalable, si nos modèles sont directement applicables à une région voisine.

9 Perspectives

Les perspectives ouvertes par cette étude sont multiples et se situent à des niveaux très différents.

Une première perspective concerne bien sûr l'utilisation du système mis au point pour un réel suivi temporel et l'intégration des résultats dans une modélisation distribuée. L'intégration de l'information de télédétection à un ensemble d'autres informations au travers de SIG dynamiques, devrait aboutir à la caractérisation efficace des états de surface du sol et à l'utilisation de cette information par les modèles hydrologiques.

Une toute autre perspective est la valorisation du travail en transposant l'approche développée et/ou des méthodes particulières à d'autres cultures discontinues.

Enfin il ne semble pas impossible que la vision défendue dans ce travail du rôle de la télédétection, connaisse un engouement dans un futur proche grâce aux évolutions technologiques.

Avant toute chose, il faudra pourtant envisager un certain nombre de modifications et de compléments à un niveau très pratique. Ceci afin de remédier à des imperfections du dispositif et de la connaissance d'expert exposées dans ce travail, dont nous avons pu constater l'impact négatif sur la qualité des résultats obtenus.

9.1 Améliorations proposées

Ces améliorations se situent à différents niveaux et leur importance peut varier du "souhaitable" au "nécessaire". Les différents niveaux concernent (1) des aspects techniques liés au dispositif, (2) la connaissance sur les états de surface et (3) la vérification des attentes de l'étude temporelle.

9.1.1 Aspects techniques

Nous listons ici un ensemble de propositions, motivé par deux inconvénients principaux du dispositif tel qu'utilisé dans notre étude : la lourdeur de l'étape de correction géométrique du prétraitement et l'imperfection de la correction radiométrique.

- ◆ La **caractérisation** géométrique du capteur et son montage sur un dispositif **gyroscopique**, afin de permettre la correction par aérotriangulation et afin de connaître plus précisément l'angle zénithal de vue. Cette proposition est en cours d'étude.
- ◆ Pour compléter ces avancées, qui permettront de réduire considérablement la lourdeur du prétraitement géométrique tout en augmentant sa précision, un **MNT à une résolution plus fine** est souhaité. Il existe par exemples des procédures automatisées pour calculer un MNT à une résolution XY autour de 0.50m à l'aide de couples stéréoscopiques d'orthophotos. Ceci permettrait également de reconnaître et d'extraire des éléments de "contamination" dans l'image. Des arbres par exemple pourraient être segmentés sur la base d'un critère de forme MNT de dôme. Ceci devra être effectué sur des images prises en hiver pour éviter l'influence de la végétation de la vigne. Ce MNT pourrait aussi se révéler très intéressant pour la modélisation hydrologique distribuée elle-même, permettant de mieux prédire le cheminement du ruissellement.
- ◆ La numérisation devrait de préférence se faire sur un **scanner à tambour sous vide**, pour éviter toute déformation et génération de flou. De plus les transformations effectuées dans le codage

numérique de la densité optique mesurée par les CCD (*Charged Coupled Device*, le "capteur" du scanner) devraient être connues et contrôlables, afin de pouvoir reconvertir le compte numérique en luminosité. On pourrait aussi envisager l'utilisation des appareils numériques. La résolution de ces appareils commence à se rapprocher de celle des supports argentiques, mais la capacité limitée de stockage des données numérique reste un problème qui est seulement surmontable à l'aide d'un investissement considérable.

- ◆ Des **panneaux de référence radiométrique** devraient être installés au sol lors d'une prise de vue aérienne. Ces panneaux doivent être d'une luminosité moyenne et à propriétés bidirectionnelles connues, le plus près possible du lambertien (cet aspect a déjà été réalisé lors d'une quatrième prise de vue réalisée en juin 1999, et non considérée dans la thèse).
- ◆ Dans un deuxième temps il est intéressant d'évaluer la faisabilité de modifier le dispositif amélioré dans le but d'enrichir l'information acquise du point de vue bidirectionnel, car cela permet une meilleure précision dans la détermination de la classe hydro-spectrale à laquelle chaque pixel appartient (§ 6.3.5).

9.1.2 La connaissance sur les états de surface

Sur les quatre axes d'information dont se sert la télédétection (spatial, spectral, directionnel et temporel), une meilleure connaissance de l'état de surface est souhaitée, et même exigée en ce qui concerne les axes temporel et spatial :

- ◆ spatialement, il s'agit surtout d'un besoin d'**observations de terrain plus précises** et exhaustives sur un petit nombre de parcelles lors de la prise de vue. La démarche adoptée dans le chapitre 7 permet en effet d'étalonner et valider des estimations par un modèle de transfert d'échelle fournissant des estimations quantitatives. Dans un premier temps ceci concerne surtout l'enherbement ;
- ◆ temporellement, l'étude de l'**évolution du faciès** et de la rugosité en fonction des précipitations est souhaitée – un premier travail en ce sens est en cours (Andrieux, comm. personnelle). L'étude de l'**évolution de l'enherbement** en fonction du temps écoulé depuis le dernier labour est également nécessaire ;
- ◆ au niveau spectral et directionnel, le jeu de données recueillies par goniomètre pourrait être enrichi pour la zone d'étude afin de mieux décrire par exemple la transition entre le faciès intermédiaire et le faciès fermé très légèrement "contaminé", même si cela n'améliorera que marginalement le système de classification. Par contre, l'acquisition de jeux de données comparables sur des types de substrat dont on sait que les propriétés réfléchives diffèrent significativement, et dont on connaît l'étendue et la localisation, permettrait de mieux définir le domaine de validité de l'approche.

Nous constatons également que une définition plus explicite de la description de la parcelle recherchée par le l'hydrologue, est nécessaire pour pouvoir définir les méthodes d'analyses (spatiale) les plus appropriées. Nous avons proposé un indice décrivant la distribution spatiale de l'herbe dans la parcelle, mais cet indice ne peut être validé tant que nous ne connaissons pas sa signification hydrologique. Il en est de même pour la détection des pratiques culturales discontinues : conçue pour éviter des problèmes dans la classification de la parcelle, le résultat de cette méthode peut avoir un intérêt hydrologique en soi. Au vu des résultats, la méthode semble perfectible, mais est-ce nécessaire ? La difficulté que l'on rencontre parfois dans la détection de telles pratiques indique également qu'elles n'influencent pas toujours fortement le signal télédétekté, mais peut être son intérêt hydrologique quant à lui justifie l'effort de tenter d'améliorer la méthode.

9.1.3 L'étude temporelle pour compléter le "système"

La connaissance améliorée de l'évolution des états de surface permettrait de définir une expérimentation ayant pour but de confirmer et formaliser les attentes concernant l'apport du suivi temporel au système mis au point dans cette thèse. Dans la condition que les observations de terrain soient enrichies dans le sens décrit ci-dessus, on pourrait envisager de prendre un ensemble relativement important de vues, acquises sur une petite zone, au cours d'une période où labour et pluie sont fréquents. Ce complément est essentiel pour évaluer le potentiel de l'approche.

9.2 L'intégration dans la modélisation

Une fois le potentiel de l'ensemble du système de télédétection démontré, un échange avec les hydrologues s'impose pour définir quels variables vont être intégrées, et sous quelle forme elles devront être fournies. Nous savons actuellement que le dispositif mis au point ne permet pas de reconnaître toutes les caractéristiques avec la précision exigée par la typologie proposée par l'hydrologue (chapitre 2). Nous avons par contre également démontré la possibilité de détecter des informations auxquelles l'hydrologue ne s'est pas encore intéressé en détail et dont on peut néanmoins attendre une influence sur le comportement hydrologique des parcelles. Des aspects comme par exemple la détection de pratiques culturales discontinues (et la possibilité que cela donne de prendre en compte les états de surface des "interrangs exceptionnels" !) et la description de la distribution spatiale du couvert herbacé (chapitre 7) constituent un retour qui ne sera peut-être pas sans conséquences pour l'hydrologue.

Les besoins combinés de la télédétection (les besoins pour la reconnaissance des variables recherchées à la précision souhaitée) et de l'hydrologie (concernant la fréquence et l'étendue spatiale souhaitées de l'information) permettront de définir un cahier des charges qui pourra être proposé aux décideurs/acteurs qui s'intéressent au comportement hydrologique du milieu, aux risques de pollution et à l'influence environnementale des pratiques culturales.

9.3 Valorisation par transposition

L'ensemble de l'approche a été conçu de manière à permettre sa transposition. Elle devrait donc pouvoir servir à l'étude d'une région viticole quelconque nécessitant une information sur les états de surface du sol. Les différentes étapes du système peuvent également constituer un intérêt en soi pour d'autres types d'applications de la télédétection de la vigne : la méthode de reconnaissance de parcelles de vigne peut servir à l'inventaire de l'occupation du sol. Dans ce contexte, il est intéressant de savoir que le cadastre sur toute la France est actuellement en voie de numérisation. Un autre exemple est la méthode de segmentation du sol éclairé, qui peut être transformée en méthode de segmentation du couvert végétal de la vigne, afin de servir l'étude du fonctionnement de la vigne.

Ensuite, il est tout à fait envisageable de transposer nos méthodes à la télédétection d'autres cultures discontinues, en adaptant soit nos méthodes de traitement, soit les paramètres de prise de vue. En milieu méditerranéen, l'approche est directement transposable à l'oléiculture, le milieu étant soumis à des risques comparables à ceux qui constituent la motivation de la modélisation hydrologique en milieu viticole. Mais il est également possible d'appliquer des parties ou l'ensemble de l'approche aux

cultures pérennes discontinues comme celles rencontrées en région tropicale ou subtropicale, et même à des cultures associées.

9.4 Les évolutions futures

Une étude actuellement en cours utilise les images acquises dans le cadre de cette thèse, dans le but de reconnaître des ceps manquants dans les parcelles de vigne et de relier cet indicateur de l'état sanitaire à d'éventuels problèmes liés au substrat. Après l'acquisition d'une connaissance thématique dans la dimension spatiale, les recherches visent actuellement à développer des descripteurs de forme appropriés. Ceci constitue un exemple d'approches correspondantes à la vision défendue dans la conclusion générale (chapitre 8) sur la télédétection à très haute résolution spatiale pour l'observation de la terre. Ce type d'approche est pour l'instant loin d'être une pratique généralisée dans ce domaine.

La tendance vers une telle approche physique, mécaniste, concerne actuellement principalement l'utilisation de la dimension spectrale, voire hyperspectrale, car c'est plus dans la recherche orientée vers ces dimensions et appliquée au suivi des grandes cultures que l'on commence à disposer d'une part d'une bonne connaissance du comportement réflectif et émissif des objets, et d'autre part d'une information télédétectée d'une telle précision et richesse (spectrale) que la connaissance physique sur le fonctionnement des objets devient transposable.

Rien ne dit qu'une telle évolution n'aura pas lieu dans le domaine spatial, une fois ces mêmes conditions remplies. Déjà, les avancées technologiques sont énormes et la recherche tant thématique que méthodologique doit les emboîter le pas, voire, idéalement, les précéder. Depuis un peu plus d'une année, la télédétection satellitale à résolution spatiale métrique est à la portée de tous. Ceci pourrait être très intéressant pour l'agriculture de précision, pourvu que l'on connaisse le comportement spatial des phénomènes recherchés (distribution, dimension et forme d'ensembles de plantes malades dans une parcelle, des zones touchées par des ravageurs, de problèmes liés au substrat) et que l'on développe des descripteurs permettant leur reconnaissance.

Et puis il ne semble pas irréel de penser qu'un jour nous pourrions disposer d'une information télédétectée par voie satellitale à une résolution spatiale telle que la notre et, qui sait, des résolutions temporelle, spectrale et bidirectionnelle permettant d'exploiter voire enrichir les méthodes développées dans le présent travail.

Bibliographie

- Ambroise, B., 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : processus et modèles. Séminaire du conseil scientifique du Département "Science du Sol" de l'INRA, Dijon, 26/03/1991. INRA.
- Andrieux, P., Bouzigues, R., Joseph, C., Voltz, M., Lagacherie, P., Bourlet, M., 1993. Le bassin versant de Roujan ; caractéristiques générales du milieu. INRA - UR Science du Sol, Montpellier, Août.
- Andrieux, P., Louchart, X., Voltz, M., Bourgeois, T., 1996. Déterminisme du partage infiltration-ruisseau sur parcelles de vigne en climat méditerranéen. Documents du BRGM, 256, 7-11.
- Anys, H., Bannari, A., He, D. C., Morin, D., 1994. Texture analysis for the mapping of urban areas using airborne MEIS-II images. First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11/9 - 15/9. ERIM.
- Anys, H., Bannari, A., He, D. C., Morin, D., 1998. Cartographie des zones urbaines à l'aide des images aéroportées MEIS-II. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (5), 883-894.
- Argillier, J. P., 1989. Interdépendance des facteurs de la qualité. Chambre d'Agriculture de l'Hérault, Montpellier, novembre 1989.
- Argillier, J. P., 1991. Produire des grands vins en Languedoc. Tome 1 : Les sols de graves (Villafrancien). Chambre d'Agriculture de l'Hérault, Montpellier, novembre 1991.
- Argillier, J. P., 1999. La pérennité des sols viticoles dans l'Hérault. Euroviti 99, 12ème colloque viticole et oenologique, Montpellier, 16-18 novembre. Isatis, pp. 213.
- Arrouays, D., King, C., Vion, I., Le Bissonais, Y., 1996. Detection of soil crusting risks related to low soil organic carbon contents by using discriminant analysis on Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 11 (4), 11-16.
- Atkinson, P. M., Curran, P. J., 1997. Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63 (12), 1345-1351.
- Bacha, S., 1990. Caractérisation de la signature spectrale, spatiale et temporelle d'un couvert végétal discontinu et structuré : la vigne. Mise au point de la méthode d'étalonnage. ENSA.M - INRA, Montpellier, octobre 1990.
- Baize, D., Girard, M.-C., 1995. Référentiel pédologique. 2. INRA, Paris, 332 p.
- Bales, J., Betson, R. P., 1981. The curve number as a hydrologic index. International Symposium on Rainfall-Runoff Modelling., Mississippi, pp. 371-386.
- Bannari, A., Haboudane, D., Bonn, F., 1999. Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Ottawa, Ontario, Canada, 21/6 - 24/6. pp. 359-367.
- Baret, F., Jacquemoud, S., 1994. Modeling canopy spectral properties to retrieve biophysical and biochemical characteristics. In: *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, 4. edited by Hill, J. and Mégier, J. Kluwer Academic Publishers, Brussels, pp. 145-167.
- Barnsley, M., Hobson, P., 1996. Making sense of sensors. *GIS Europe*, 5 (5), 34-36.
- Barth, H. J., 1999. Desertification in the Eastern province of Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 43 (4), 399-410.
- Benallegue, M., 1993. Etude de la faisabilité de la mesure par radar de l'humidité et de la rugosité des sols : Thèse de Doctorat. centre d'Orsay, Paris. Université de Paris XI.
- Beven, K. J., Fisher, J., 1996. Remote sensing and scaling in hydrology. In: *Scaling up in hydrology using remote sensing*, edited by Ed. John Wiley & Sons, 1-18.
- Billmeyer, F. W. J., Saltzman, M., 1981. Principles of Color Technology. 2nd. Wiley, New York, 196 p.
- Binley, A. M., Elgy, J., Beven, K. J., 1989. A physically-based model of heterogeneous hillslopes, I. Runoff production. *Water Resources Research*, 25 (6), 1219-1226.

- Blanchard, E., King, C., Le Bissonnais, Y., Bourguignon, A., Souchère, V., Desprats, J.-F., Maurizot, P., 1999. Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des systèmes d'information géographiques. Application à des bassins versants du Pays de Caux. *Étude et Gestion des Sols*, 6 (3), 181-199.
- Blumberg, D. G., Freilikh, V., 1999. A low cost airborne microwave scatterometer experiment to assess soil moisture over farmlands in the Negev. Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Ontario, Canada, 21/6 - 24/6.
- Bober, M. L., Wood, D., McBride, R. A., 1996. Use of digital image analysis and GIS to assess regional soil compaction risk. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62 (12), 1397-1404.
- Boiffin, J., Bresson, L. M., 1987. Dynamique de formation des croûtes superficielles: apport de l'analyse microscopique. In: *Micromorphologie des sols-Soil Micromorphology*, edited by Fedoroff, N., Bresson, L. M. and Courty, M. A. AFES, Plaisir, France, pp. 393-399.
- Boiffin, J., Papy, F., Eimberck, M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. 1. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8 (8), 663-673.
- Boiffin, J., Sebillotte, M., 1976. Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. *Annales Agronomiques*, 27 (3), 295-325.
- Boisvert, J. B., Gwyn, Q. H., Chanzy, A., Major, D. J., Brisco, B., Brown, R. J., 1997. Effect of surface soil moisture gradients on modelling radar backscattering from bare fields. *International Journal of Remotes Sensing*, 18 (1), 153-170.
- Bonfils, 1993. Carte pédologique de la France au 1/100.000, Feuille de Lodève (notice + carte). INRA SESCOF, Orléans.
- Bonn, F., 1998. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, 3 (9), 185-192.
- Bouchon-Meunier, B., 1993. La Logique Floue. Editions "Que sasi-je ?", Presses universitaires de France, Paris.
- Boursiquot, J. M., 1999. Communication personnelle.
- Breton, A., 1997. Reconnaissance des états de surface sur le bassin versant viticole de Roujan. INRA et BRGM, Montpellier.
- BRGM, 1977. Carte géologique de la France à 1:50.000 : Moyenne plaine de l'Hérault, feuille de Pézenas 26-44, n° 1015. Orléans.
- Bridges, E. M., Oldeman, L. R., 1999. Global assessment of human induced soil degradation. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13 (4), 319-325.
- Brun, C., Bernard, R., Vidal-Madjar, D., Gascuel-Oudou, C., Mérot, P., Duchesne, J., Nicolas, H., 1990. Mapping saturated areas with a helicopter-borne C band scatterometer. *Water Resources Research*, 26 (5), 945-955.
- Bugden, J. L., Salinas de Salmuni, G., Howarth, P. J., 1999. Vineyard identification in the Tulum Valley, Argentina. Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Ontario, Canada, 21/6 - 24/6.
- Cahill, A. T., Parlange, M. B., Jackson, T. J., O'Neill, P., Schmugge, T. J., 1999. Evaporation of non-vegetated soil surfaces: Surface aridity methods and passive microwave remote sensing. *Journal of Applied Meteorology*, 38 (9), 1346-1351.
- Campbell, J. G., Murtagh, F., 1998. Automatic visual inspection of woven textiles using a two-stage defect detector. *Optical Engineering*, 37 (9), 2536-2542.
- Campbell, J. G., Murtagh, F., 1998. Image Processing and Pattern Recognition, 4th year BSc Applied Computing BEng Electronics and Computing. Faculty of Informatics, University of Ulster, Ulster.

- Carle, S. F., Fogg, G. E., 1996. Transition probability-based indicator geostatistics. *Mathematical Geology*, 28 (4), 453-476.
- Carothers, J., 2000. The art of winemaking. *Imaging Notes*, 15 (1), 18-21.
- Casenave, A., Valentin, C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130, 231-249.
- Champagnol, F., 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Dehan, Montpellier, 351 p.
- Champion, I., Faivre, R., 1996. The field row direction relative to the radar azimuth considered as an apparent surface roughness for smooth bare soils. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (16), 3305-3311.
- Chantelot, E., 1999. Les sols viticoles et les pratiques culturales. Euroviti 99, 12ème colloque viticole et oenologique, Montpellier, 16-18 novembre. Isatis, pp. 213.
- Chenu, C., 1999. La matière organique composante essentielle de la fertilité du sol. Euroviti 99, 12ème colloque viticole et oenologique, Montpellier, 16-18 novembre. Isatis, pp. 213.
- Chopping, M. J., 1998. Linear semi-empirical kernel-driven bidirectional reflectance distribution function models in monitoring semi-arid grasslands from space. : Thèse de Doctorat. department of Geography, Nottingham. University of Nottingham, 501 p.
- Chopping, M. J., 2000. Testing a LiSK BRDF model with in situ bidirectional reflectance factor measurements over semiarid grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 74 (2), 287-312.
- Cialella, A. T., Dubayah, R., Lawrence, W., Levine, E., 1997. Predicting soil drainage class using remotely sensed and digital elevation data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63 (2), 171-178.
- Cierniewski, J., Verbrugge, M., 1997. Inferring soil surface roughness from soil bidirectional reflectance data. *International Agrophysics*, 11, 147-157.
- Clegg, Z., Farres, P. J., Poese, J. W., 1999. Soil surface drip point features: an integrated approach using analytical photogrammetry and soil micromorphology. *Catena*, 35 303-316.
- Clevers, J. G. P. W., 1988. Multispectral aerial photography as a new method in agricultural field trials analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 9 (2), 319-332.
- Clevers, J. G. P. W., van Stokkum, H. T. C., 1992. The quantitative evaluation of false colour photography with application of a red filter. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (9), 1709-1733.
- Cognard, A. L., Loumagne, C., Normand, M., Olivier, P., Otle, C., Vidal-Madjar, D., Louahala, S., Vidal, A., 1995. Evaluation of the ERS1/SAR capacity to estimate surface soil moisture. Two years results over the Naizin watershed. *Water Resources Research*, 31, 975-982.
- Coleman, T. L., Agbu, P. A., Montgomery, O. L., 1993. Spectral differentiation of surface soils and soil properties: is it possible from space platforms? *Soil Science*, 155 (4), 283-293.
- Collinet, J., Valentin, C., 1979. analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 17 (4), 283-328.
- Company, A., Beaudoin, A., King, C., Rakotoarivony, L., 1995. Apport de l'imagerie SAR dans l'estimation de paramètres de rugosité, pour la modélisation des risques de ruissellement. 95040, BRGM, Orléans.
- Company, A., Delpont, G., Guillobez, S., Arnaud, M., 1994. Potentiel des données radar ERS-1 pour la détection des surfaces contributives au ruissellement dans les vignobles méditerranéens du Roussillon (France). 6ème Symposium International "Mesures Physiques et Signatures en Télédétection", Val d'Isère, 17-21 janvier 1994. pp. 375-382.
- Company, A., King, C., Beaudoin, A., Delpont, G., 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. pp. 151-167.

- Company-Remond, A., 1997. Images SAR : possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (modélisation et expérimentation) : Thèse de Doctorat. Sciences de la terre, laboratoire Géosol, Dijon. Université de Bourgogne, 254 p.
- Condit, H. R., 1970. The spectral reflectance of American soils. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 34 (9), 955-960.
- Coops, N., Culvenor, D., 2000. Utilizing local variance of simulated high spatial resolution imagery to predict spatial pattern of forest stands. *Remote Sensing of Environment*, 71 (3), 248-260.
- Courault, D., 1989. Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Thèse. *Sols*, 17 239.
- Curran, J. C., 1994. Imaging spectrometry - its present and future role in environmental research. In: *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, 4. edited by Hill, J. and Mégier, J. Kluwer Academic Publishers, Brussels, pp. 1-23.
- Curran, P. J., 1999. Remote Sensing: Using the spatial domain. *Spatial Statistics for Production Ecology*, Wageningen, 19/4 - 21/4.
- Dagnelie, P., 1975. Théorie et méthodes statistiques, applications agronomiques. Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- de Jong, S., Sommer, S., Lacaze, B., Scholte, K., Van Der Meer, F., 1998. The DAIS La Peyne experiment : using airborne imaging spectrometry for land degradation survey and modelling. EARSel Symposium: Operational Remote Sensing for Sustainable Development., Enschede, 11-15 Mai.
- de Jong, S. M., 1992. The analysis of spectroscopical data to map soil types and soil crusts of Mediterranean eroded soils. *Soil Technology*, 5, 199-211.
- de Jong, S. M., 1994. Derivation of vegetative variables from a Landsat TM image for modelling soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 165-178.
- de Jong, S. M., Paracchini, M. L., Bertolo, F., Folving, S., Mégier, J., de Roo, A. P. J., 1999. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data. *Catena*, 37, 291-308.
- Despan, D., Bedidi, A., Cervelle, B., 1999. Bidirectional reflectance of rough bare soil surfaces. *Geophysical Research Letters*, 26 (17), 2777-2780.
- Dewez, A., Dautrebande, S., 1992. Utilisation des données SAR d'ERS-1 pour l'étude des états de surface. Proceedings First ERS-1 symposium - Space at the Service of our Environment, Cannes, France, 1993. pp. 569-571.
- Diggle, P. J., 1983. Statistical analysis of spatial point patterns. Academic Press, New York, 148 p.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., 1986. Preliminary evaluation of the SIR-B response to soil moisture, surface roughness, and crop canopy cover. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-24 (4), 453-461.
- Douglas, I., 1999. Hydrological investigations of forest disturbance and land cover impacts in South-East Asia: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 354 (1391), 1725-1738.
- DRAF, 1998. Mémento agricole. DRAF, Service Régionale de Statistique Agricole, Montpellier.
- Dubois, P. C., van Zyl, J., Engman, T., 1995. Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33 (4), 915-926.
- Dunne, T., Zhang, W., Aubry, B. F., 1991. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, 27 (9), 2271-2285.
- Engineers, U. S. Army Corps of, 1976. Storage, treatment, overflow, runoff model, "STORM". Program No. 723-38-12520, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corp of Eng., Davis, California.
- Engman, E. T., Gurney, R. J., 1991. Remote Sensing in hydrology. Ed. Chapman and Hall, 225 p.

- Escadafal, R., 1994. Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters - examples from arid regions. In: *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, 4. edited by Hill, J. and Mégier, J. Kluwer Academic Publishers, Brussels, pp. 71-87.
- Escadafal, R., Pontanier, R., Belgith, A., 1995. 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*, pp. 263-272.
- Everitt, J. H., Escobar, D. E., Villareal, R., Noriega, J. R., Davis, M. R., 1991. Airborne video systems for agricultural assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 231-242.
- Farrand, W. H., Singer, R. B., Merényi, E., 1994. Retrieval of apparent surface reflectance from AVIRIS data: a comparison of empirical line, radiative transfer, and spectral mixture methods. *Remote Sensing of Environment*, 47, 311-321.
- Farrokhnia, F., Jain, A. K., 1991. A multi-channel filtering approach to texture segmentation. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June. pp. 364-370.
- Fohrer, N., Berkenhagen, J., Hecker, J. M., Rudolph, A., 1999. Changing soil and surface conditions during rainfall - Single rainstorm/subsequent rainstorms. *Catena*, 37 (3-4), 355-375.
- Freeman, W. T., Adelson, E. H., 1991. The design and use of steerable filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13 (9), 891-906.
- Frot, E., 1998. Analyse de la diffusion des produits phytosanitaires à l'exutoire du bassin versant de Roujan en fonction des différents scénarios de pratiques culturales d'un modèle économique. *INRA Science du Sol, Montpellier, 25 septembre*.
- Gabor, D., 1946. Theory of communication. *Journal of the IEE*, 93, 429-441.
- Gaddas, F., 1997. Infiltrabilité des états de surface en milieu méditerranéen viticole. (Bassin versants de Roujan). *INRA, UMR Science du Sol, Montpellier, 01/07/97*. 44.
- Gahegan, M., Flack, J., 1996. A model to support the integration of image understanding techniques within GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (5), 483-490.
- Garen, D., Woodward, D., Geter, F., 1999. A user agency's view of hydrologic, soil erosion and water quality modelling. *Catena*, 37 (3-4), 277-289.
- Gascuel-Oudou, C., Mérot, P., 1986. Variabilité spatiale du transfert de l'eau dans le sol : utilisation du traçage et analyse géostatistique. *Journal of Hydrology*, 89, 93-107.
- Gemmell, F., McDonald, A. J., 2000. View zenith angle effects on the forest information content of three spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 72 (2), 139-158.
- Girard, M.-C., 1983. Télédétection de la surface du sol. *les colloques de l'INRA*, pp. 177-193.
- Girard, M.-C., Girard, C.-M., 1989. Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. 2. Masson, Paris, 260 p.
- Goma-Fortin, N., Argillier, J. P., 1994. Produire des grands vins en Languedoc. Tome 2 : Les sols de schistes. *Chambre d'Agriculture de l'Hérault, Montpellier, novembre 1994*.
- Goma-Fortin, N., Argillier, J. P., 1999. Gestion environnementale des terroirs viticoles méditerranéens. *Chambre d'Agriculture, Hérault, novembre*. 55.
- Goma-Fortin, N., Durel, A. C., Guerber, M., Halma, A., Medina, E., Planas, R., 1998. La conduite du vignoble en Languedoc-Roussillon. Tome 2 : Raisonner son itinéraire technique en fonction des objectifs de production. *Chambres d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, Montpellier, novembre 1998*.
- Goma-Fortin, N., Guerber, M., Halma, A., Planas, R., Medina, E., 1997. La conduite du vignoble en Languedoc-Roussillon. Tome 1 : Respecter et disposer le feuillage pour une qualité optimale. *Chambres d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, Montpellier, octobre 1997*.
- Graps, A., 1995. An introduction to wavelets. *IEEE Computational Science and Engineering*, 2.
- Greiner, R., 1999. An integrated modelling system for investigating the benefits of catchment management. *Environment International*, 25 (6-7), 725-734.

- Grésillon, J. M., 1994. Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants, approches numériques et expérimentales à différentes échelles. LTHE, Université Joseph Fourier, Grenoble, 156.
- Guichard, F., Morel, J. M., 1999. Mathematical models in image processing: image iterative smoothing and P.D.E.'s. Advanced course on mathematical aspects of image processing, CRM, CVC, Universidad de Barcelona, 6/7 - 16/7.
- Hapke, B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy, 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 86 3039-3054.
- Haralick, R. M., 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, 67 (5), 786-804.
- Haralick, R. M., Shanmugan, K., Dinstein, I., 1973. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3 (6), 610-621.
- Hatier, A., 2000. États de surface et infiltrabilité des sols d'un bassin versant viticole en milieu méditerranéen. INRA Science du Sol - Université Henri Poincaré Nancy I, Montpellier, 05-07-2000. 21.
- Hatton, T. J., Nulson, R. A., 1999. Towards achieving functional ecosystem mimicry with respect to water cycling in southern Australian agriculture. *Agroforestry Systems*, 45 (1-3), 203-214.
- Heeger, D. J., Bergen, J. R., 1995. Pyramid-based texture analysis/synthesis. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Los Angeles, ACM Siggraph, pp. 229-238.
- Heinzle, Y., 1995. La mécanisation en viticulture. *Les Agro-Equipements, Bulletin technique d'information, ministère de l'agriculture et de la pêche*, 20, 26-30.
- Hewlett, J. D., Hibbert, A. R., 1976. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. International Symposium on Forest Hydrology (1965), Pergamon, Oxford, pp. 275-290.
- Hill, J., 1993. High precision land cover mapping and inventory with multi-temporal earth observation satellite data. The Ardèche Experiment. : Thèse de Doctorat. Institute for remote sensing applications, Environmental Mapping and Modelling Unit, Luxembourg. Joint Research Centre, Commission of the European Communities, 120 p.
- Hill, J., Mégier, J., Mehl, W., 1995. Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing Reviews*, 12, 107-130.
- Hill, J., Mehl, W., Altherr, M., 1994. Land degradation and soil erosion mapping in a mediterranean ecosystem. In: *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, 4. edited by Hill, J. and Mégier, J. Kluwer Academic Publishers, Brussels, pp. 237-260.
- Hill, J., Sturm, B., 1991. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (7), 1471-1491.
- Hinton, J. C., 1996. GIS and remote sensing integration for environmental applications. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10 (7), 877-890.
- Hollenbeck, K. J., Schmugge, T. J., Hornberger, G. M., Wang, J. R., 1996. Identifying soil hydraulic heterogeneity by detection of relative change in passive microwave remote sensing observations. *Water Resources Research*, 32 (1), 139-148.
- Horaud, R., Monga, O., 1993. Vision par ordinateur, outils fondamentaux. Hermès, Paris, 378 p.
- Hu, B., Lucht, W., Strahler, A., Barker Schaaf, C., Smith, M., 2000. Surface albedos and angle-corrected NDVI from AVHRR observations of South America. *Remote Sensing of Environment*, 71 (2), 119-132.
- Hursch, C. R., Brater, E. F., 1941. Separating storm hydrographs from small drainage areas into surface and subsurface flow. *Transactions of the American Geophysical Union*, 22, 863-870.
- IGN, 1997. La BD topographique. Spécifications détaillées, version 3.1, édition 4. SIT/97/0155, Paris, 244.

- Jackson, T. J., Schmugge, T. J., 1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils. *Remote Sensing of Environment*, 36 (3), 203-212.
- Jacquemoud, S., Baret, F., Hanocq, J.-F., 1993. Modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle des sols. Application au concept de droite de sols. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 28 (1), 31-43.
- Jacquemoud, S., Baret, F., Hanocq, J. F., 1992. Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 41, 123-132.
- Jansen, L. L. F., Molenaar, M., 1995. Terrain objects, their dynamics and their monitoring by the integration of GIS and remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33 (3), 749-758.
- Johnson, H., 1989. Une histoire mondiale du vin. De l'Antiquité à nos jours. Hachette, 648 p.
- Johnson, L., Lobitz, B., Bosch, D., Wiechers, S., Williams, D., Skinner, P., 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.
- Kalluri, S. N. V., Zhang, Z., Liang, S., JaJa, J., Townshend, J. R. G., 1997. Retrieval of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) at continental scales from AVHRR data using high performance computing. IGARSS '97, pp. 174-176.
- 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. pp. 4.
- Karlen, D. L., Kramer, L. A., James, D. E., Buhler, D. D., Moorman, T. B., Burkart, M. R., 1999. Field-scale watershed evaluations on deep-loess soils: I. Topography and agronomic practices. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54 (4), 693-704.
- Karnieli, A., Kidron, G. J., Glaesser, C., Ben-Dor, E., 1999. Spectral characteristics of cyanobacteria soil crust in semiarid environments. *Remote Sensing of Environment*, 69 (1), 67-75.
- Kay, S., Meyer-Roux, J., Delincé, J., Van de Steene, M., 1997. Operational activities involving airborne remote sensing related to the Common Agricultural Policy. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, 7/7-10/7. ERIM.
- Kessler, J., Chambraud, A., 1986. La météo de la France, tous les climats localité par localité. J. Clottes, 230 p.
- Kettig, R. L., Landgrebe, D. A., 1976. Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, GE-14 (1), 19-26.
- King, C., Lefebvre-d'Hellencourt, T., 1982. La réflectance de sols en place, étude de l'influence de certaines caractéristiques propres à la surface du sol nu. International Symposium of the ISPRS, Commission 7 Symposium, Toulouse, France, pp. 305.
- King, D., 1991. Determination and reduction of cover type brightness variations with view angle in airborne multispectral video imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57 (12), 1571-1577.
- Koolen, A. J., Koenigs, F. F. R., Bouten, W., 1979. Remote sensing of surface roughness and top soil moisture of bare tilled soil with a X-band radar. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 27, 248-296.
- Kotb, T. H. S., Watanabe, T., Ogino, Y., Tanji, K. K., 2000. Soil salinization in the Nile Delta and related policy issues in Egypt. *Agricultural Water Management*, 43 (2), 239-261.
- Lacaze, B., Caselles, V., Coll, C., Hill, J., Hoff, C., Jong de, S., Mehl, W., Negendank, J. F. W., Riezebos, H., Rubio, E., Sommer, S., Teixeira Filho, J., Valor, E., 1996. DeMon, integrated approaches to desertification mapping and monitoring in the mediterranean basin. Final report of the DeMon-1 project. JRC, space applications institute, environmental mapping and modelling unit, Brussels, 1996.

- Lacaze, R., Roujean, J. L., Goutorbe, J. P., 1999. Spatial distribution of Sahelian land surface properties from airborne POLDER multiangular observations. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 104 (D10), 12131-12146.
- Laine, A., Fan, J., 1993. Texture classification by wavelet packet signatures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15 (11), 1186-1191.
- Launay, M., Dedieu, G., Guerif, M., 1999. 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. Journée scientifique CEMAGREF - REGLIS : Télédétection à très haute résolution et analyse d'image, Montpellier, 14/12/1999. CEMAGREF.
- Le Forner, S., Moussa, R., Voltz, M., Lagacherie, P., Andrieux, A., 1999. Distributed hydrological modelling in agricultural areas with dense ditches network. International Conference of the European Geophysical Society, Den Haag, Pays Bas.
- Le Men, H., Boldo, D., 2000. Mosaïque automatique d'orthophotographies. RFIA'2000, 12ème Congrès Francophone AFRIF-AFIA de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle., Paris, 1-3/02/00.
- Lee, K. S., Lee, G. B., Tyler, E. J., 1988. Determination of all characteristics from Thematic Mapper data of a cropped organic-inorganic soil landscape. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 1100-1104.
- Leiss, I. A., Sandmeier, S., Itten, K. I., Kellenberger, T. W., 1995. Improving land use classification in rugged terrain using radiometric corrections and a possibility based classification approach. Proceedings of IGARSS '95, Firenze, Italy, pp. 1924-1926.
- Lelong, F., Roose, E., Darthout, R., Trevisan, D., 1993. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. Expérimentation au champ sous pluies simulées. *Science du Sol*, 31 (4), 251-279.
- Léonard, J., Andrieux, P., 1998. Infiltration characteristics of soil in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32, 209-223.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., 1994. Remote sensing and image interpretation. 3. John Wiley, New York, 750 p.
- Louchart, X., 1999. Transfert de pesticides dans les eaux de surface aux échelles de la parcelle et d'un bassin versant viticole. Étude expérimentale et éléments de modélisation. : Thèse de Doctorat. Laboratoire de Science du Sol, INRA, Montpellier. ENSA.M, 263 p.
- Louchart, X., Causeret, F., Dejean, C., Andrieux, P., Lagacherie, P., Rio, P., Voltz, M., 1997. Première évaluation des risques et origines de la pollution diffuse des eaux de surface par les pesticides en zone viticole Languedocienne. INRA, Montpellier, novembre 1997.
- Macaire, P., 1998. Les vins du Pic St. Loup. Le Plein des Sens, Notre-Dame de Londres, 218 p.
- Mallat, S., 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, 674-693.
- Mallat, S., 1998. A wavelet tour of signal processing. Academic Press, Boston, MA.
- Mantel, S., Van Engelen, V. W. P., 1999. Assessment of the impact of water erosion on productivity of maize in Kenya: An integrated modelling approach. *Land degradation and Development*, 10 (6), 577-592.
- Mason, D. C., Corr, D. G., Cross, A., Hogg, D. C., Lawrence, D. H., Petrou, M., Taylor, A. M., 1988. The use of digital map data in the segmentation and classification of remotely-sensed images. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2 (3), 195-215.
- Mathews, H.-L., Cunningham, R.-L., Peterson, G.-W., 1973. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 37, 421-425.
- Mathieu, R., King, C., Le Bissonnais, Y., 1997. Contribution of multi-temporal SPOT data to the mapping of a soil erosion index. The case of the loamy plateaux of northern France. *Soil Technology*, 10, 99-110.

- Maurer, H., 1974. Texture analysis with Fourier series. Ninth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, april. pp. 1411-1420.
- Mausel, P. W., Everitt, J. H., Escobar, D. E., King, D. J., 1992. Airborne videography: current status and future perspectives. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58 (8), 1189-1195.
- Meyer, Y., 1992. Les ondelettes, algorithmes et applications. 2. Armand Colin, Paris, 172 p.
- Midi Libre, 2000. L'agroalimentaire devient la locomotive de l'exportation. 11/02/00.
- 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. pp. 430-433.
- Mishchenko, M. I., Dlugach, J. M., Yanovitskij, E. G., Zakharova, N. T., 1999. Bidirectional reflectance of flat, optically thick particulate layers: an efficient radiative transfer solution and applications to snow and soil surfaces. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 63 (2-6), 409-432.
- Monnier, G., Boiffin, J., Papy, F., 1986. Réflexion sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie.*, 12 (2), 123-131.
- Montero, F. J., Melia, J., Brasa, A., Segarra, D., Cuesta, A., Lanjeri, S., 1999. Assessment of vine development according to available water resources by using remote sensing in La Mancha, Spain. *Agricultural Water Management*, 40, 363-375.
- Moussa, R., Voltz, M., Andrieux, P., 2000. Effects of the spatial organization of agricultural management on the behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, soumis.
- Naert, B., 1985. Caractérisation de la signature spectrale, spatiale et temporelle des vignes et vergers - Application à la télédétection du sol et de la culture. 3rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arcs, France, 16-20 Dec. pp. 467-474.
- Nagler, P. L., Daughtry, C. S. T., Goward, S. N., 2000. Plant litter and soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 71 (2), 207-215.
- Nègre, T., Grépin, G., 1997. Light aerial remote sensing applied to local rural development. FAO, Rome, 56 p.
- Niblack, W., 1986. An introduction to digital image processing. Prentice-Hall Int., London.
- Padovan, A. L., 2000. Création d'orthophotoplans issus de photographies aériennes à haute résolution: définition et amélioration de la chaîne de production. ESGT, le Mans, 44.
- Palacios-Orueta, A., Pinzon, J. E., Ustin, S. L., Roberts, D. A., 1998. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica mountains: II. Hierarchical foreground and background analysis. *Remote Sensing of Environment*, 68 (2), 138-151.
- Palacios-Orueta, A., Ustin, S. L., 1998. Remote Sensing of Soil Properties in the Santa Monica Mountains : I. Spectral Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 65 (2), 170-183.
- Papy, F., Boiffin, J., 1988. Influence des systèmes de cultures sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. 2. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie*, 8 (9), 745-756.
- Papy, F., Douyer, C., 1991. Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie*, 11, 201-215.
- Passioura, J. B., 1999. Can we bring about a perennially peopled and productive countryside? *Agroforestry Systems*, 45 (1-3), 411-421.
- Peck, E. L., Keefer, T. N., Johnson, E. R., 1981a. Strategies for using remotely sensed data in hydrologic models. NASA-CR-66729, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.
- Peck, E. L., Keefer, T. N., Johnson, E. R., 1982. Suitability of remote sensing capabilities for use in hydrologic models. International Symposium on Hydrometeorology, Denver, Colorado, pp. 59-63.

- Peck, E. L., McQuirey, R. S., Keefer, T. N., Johnson, E. R., Erekson, J. L., 1981b. Review of hydrologic models for evaluating use of remote sensing capabilities. NASA-CR-166674, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.
- Pedley, M. I., Curran, P. J., 1991. Per-field classification: an exemple using SPOT HRV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 2,181-2,192.
- Pilesjö, P., 1992. GIS and Remote Sensing for Soil Erosion Studies in Semi-arid Environments. Estimation of Soil Erosion Parameters at Different Scales. : Thèse de Doctorat. Geografiska Institution, Lund. Meddelanden från Lunds Universitets, 203 p.
- Pinty, B., Verstraete, M. M., Dickinson, R. E., 1989. A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soils. *Remote Sensing of Environment*, 27, 273-288.
- Poesen, J., Ingelmo-S., F., Mücher, H., 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Processes and Landforms*, 15, 653-671.
- Privette, J. L., Eck, T. F., Deering, D. W., 1997. Estimating spectral albedo and nadir reflectance through inversion of simple BRDF models with AVHRR/MODIS-like data. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D24), 29,529-29,542.
- Prosser, I. P., Abernethy, B., 1999. Increased erosion hazard resulting from log-row construction during conversion to plantation forest. *Forest Ecology and Management*, 123 (2-3), 145-155.
- Puech, C., 1993. Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. : Thèse de Doctorat. Université J. Fourier, 214 p.
- Puech, C., 1995. Télédétection et modélisation hydrologique : quelle vision, quelle échelle, quels processus ? Télédétection et ressources en eau., Montpellier, 1997. FAO, pp. 89.
- Quattrochi, D. A., Luvall, J. C., 1999. Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes/ methods and applications. *Landscape Ecology*, 14 (6), 577-598.
- Rahman, H., Pinty, B., Verstraete, M. M., 1993-2. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model. 2. Semiempirical surface model usable with NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data. *Journal of Geophysical Research*, 98 (D11), 20,791-20,801.
- Rahman, H., Verstraete, M. M., Pinty, B., 1993-1. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model. 1. Model description and inversion on synthetic data. *Journal of Geophysical Research*, 98 (D11), 20,779-20,789.
- Rallison, R. E., Miller, N., 1981. Past, present and future SCS runoff procedure. International Symposium on Rainfall-Runoff Modelling, Mississippi, pp. 353-364.
- Ramos, M. C., Nacci, S., Pla, I., 2000. Soil sealing and its influence on erosion rates for some soils in the Mediterranean area. *Soil Science*, 165 (5), 398-403.
- Ranchin, T., Naert, B., Albuissou, M., Boyer, G., Astrand, P., 2001. An automatic method for vine detection in airborne imagery using wavelet transform and multiresolution analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 (1), 91-98.
- Rango, A., Feldman, A., George III, T. S., Ragan, R. M., 1983. Effective use of Landsat data in hydrologic models. *Water Resources Bulletin*, 19 (2), 165-174.
- Remond, A., Beaudoin, A., King, C., 1999. SAR imagery to estimate roughness parameters when modelling runoff risk. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (13), 2613-2625.
- Romero-Diaz, A., Cammeraat, L. H., Vacca, A., Kosmas, C., 1999. Soil erosion at three experimental sites in the Mediterranean. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24 (13), 1243-1256.
- Roujean, J.-L., 2000. A parametric hot spot model for optical remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, 71 (2), 197-206.
- Roujean, J. L., Leroy, M., Deschamps, P. Y., 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 97, 20,455-20,468.

- Rousset, G., 1997. Le vignoble languedocien en plein révolution ; l'impact des mesures structurelles. *Midi Libre*, 10 décembre, pp. 17.
- Rubner, Y., Tomasi, C., 1998. Texture metrics. Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, october. IEEE, pp. 7.
- Ruiz, L. A., Iñan, I., Baridon, J. E., Lanfranco, J. W., 1998. Combining multispectral images and selected textural features from high resolution images to improve discrimination of forest canopies. IV Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing. European Symposium on Remote Sensing., Barcelona, 21/9 - 24/9. pp. 11.
- Ruzon, M. A., 1998. Texture segmentation, an introductory primer. Stanford University, Stanford.
- Ryherd, S., Woodcock, C., 1996. Combining spectral and texture data in the segmentation of remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (2), 181-194.
- Sandmeier, S., Itten, K. I., 1997. A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35 (3), 708-717.
- Scarth, P., Phinn, S., 2000. Determining forest structural attributes using an inverted geometric-optical model in mixed eucalypt forests, Southeast Queensland, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 71 (2), 141-157.
- Schmugge, T. J., Blanchard, B., Anderson, A., Wang, J., 1978. Soil moisture sensing with aircraft observations of the diurnal range of surface temperature. *Water Resources Bulletin*, 14, 169-178.
- Schmugge, T. J., Jackson, T. J., Wang, J. R., 1991. Passive microwave remote sensing of soil moisture: Results from HAPEX, FIFE and MONSOON 90. Proceedings of the 5th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Neuilly, France, ESA.
- Schulz, G. A., 1987. Parameter determination and input estimation in rainfall-runoff modelling based on remote sensing. *IAHS*, Publication no. 164, 425-438.
- Sentenec, G., Molot, B., Coulon, T., 1999. De la production raisonnée à la production intégrée, les démarches proposées. Euroviti 99, 12ème colloque viticole et oenologique, Montpellier, 16-18 novembre. Isatis, pp. 213.
- Sentex, M., 1984. Télédétection : application à la viticulture. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Montpellier, octobre 1984.
- Serra, J., Soille, P., 1994. Mathematical morphology and its applications to image processing. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Simon, C., 1999. Vendanges tardives ; les vins de Pays d'Oc renouent avec la tradition. *Vignes et Terroirs*, Languedoc Roussillon, octobre/novembre, pp. 45.
- Skidmore, A. K., Bijker, W., Schmidt, K., Kumar, L., 1997. Use of remote sensing and GIS for sustainable land management. International Conference on Geo-Information for Sustainable Land Management, Enschede, the Netherlands, 17/8 - 21/8. ITC.
- Smith, G. M., Fuller, R. M., Amable, G., Costa, C., Devereux, B. J., 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, pp. 21-26.
- Smith, M. O., Adams, J. B., Sabol, D. E., 1994. Spectral mixture analysis - new strategies for the analysis of multispectral data. In: *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, 4. edited by Hill, J. and Mégier, J. Kluwer Academic Publishers, Brussels, pp. 125-143.
- SPDG, 1999. Quelles perspectives pour le cadastre ? réunion à l'occasion du Salon des Maires, 20-11.
- Starck, J.-L., Murtagh, F., Bijaoui, A., 1998. Image processing and data analysis, the multiscale approach. 1. Cambridge University Press, Cambridge, 287 p.

- Stein, A., Bastiaanssen, W. G., De Bruin, S., Cracknell, A. P., Curran, P. J., Fabbri, A. G., Gorte, B. G. H., Van Groeningen, J. W., Van der Meer, F. D., Saldaña, A., 1998. Integrating spatial statistics and remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (9), 1793-1814.
- Stoner, E. R., Baumgardner, M. F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 45 (6), 1161-1165.
- Stuckens, J., Coppin, P. R., Bauer, M. E., 2000. Integrating contextual information with per-pixel classification for improved land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 71 (3), 282-296.
- Thébé, B., 1987. Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun, bassin versant de Mouda, contribution à l'étude des transferts d'échelles. : Thèse de Doctorat. Hydrologie, Montpellier. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 306 p.
- Tomasi, C., 1996. Topics in computer vision, the analysis of visual texture. Stanford University, Stanford.
- Tondu, M., 1998. Association Climatologique de l'Hérault. Communication personnelle.
- Trolier, L. J., Philipson, W. R., Philpot, W. D., 1989. Landsat TM analysis of vineyards in New York. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (7), 1277-1281.
- Ulaby, F. T., Aslam, A., Dobson, M. C., 1982b. Effects of vegetation cover on radar sensitivity to soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-20 (4), 476-481.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K., 1982a. Microwave remote sensing. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Valentin, C., Bresson, L.-M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55, 225-245.
- van de Griend, A. A., Engman, E. T., 1985. Partial area hydrology and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 81, 211-251.
- van Dijck, S., 2000. Effects of agricultural land use on surface runoff and erosion in a Mediterranean area. : Thèse de Doctorat. Physical Geography, Utrecht, Pays-bas. University of Utrecht, 246 p.
- Vauclin, M., 1983. Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols. Les colloques de l'INRA, pp. 9-43.
- Vernet, C., 1998. Communication personnelle.
- Viné, P., 1997. Identification de l'hétérogénéité spatio-temporelle des comportements hydrologiques. Apports de la télédétection satellitale. : Thèse de Doctorat. LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier. Institut National Polytechnique de Grenoble, 285 p.
- Voltz, M., Andrieux, P., Boquillon, C., Rambal, S., 1994. Le site atelier ALLEGRO, Languedoc. Séminaire National GIP HydrOSystèmes : Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales., Paris, 10/5 - 11/5. pp. 121-130.
- Voltz, M., Andrieux, P., Bouzigues, R., Moussa, R., Ribolzi, O., Joseph, C., Trambouze, W., 1996. Major hydrological processes in a farmed catchment of the Mediterranean area. Ecohydrological processes in small basins., Strasbourg, UNESCO, pp. 111-122.
- Wall, S. D., Farr, T. G., Muller, J.-P., Lewis, P., Leberl, F. W., 1991. Measurement of surface microtopography. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57 (8), 1075-1078.
- Wang, X., Hanson, A. R., Collins, R. T., Dehart, J., 1997. Surface microstructure extraction from multiple aerial images. SPIE: Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III., pp. 251-262.
- Wanner, W., Li, X., Strahler, A. H., 1995. On the derivation of kernels for kernel driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 100, 21,077-21,090.
- Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., Robbez-Masson, J. M., 2000. Vineyard identification and description of spatial crop structure by per-field frequency analysis. *International Journal of Remote Sensing*, accepté.

- 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. pp. 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 (1), 85-101.
- Williams, R. J., White, C., Dreyman, S., Gouy, V., Garon-Boucher, C., Souiller, C., 1999. Fate and behaviour of pesticides in farm ditches. *1999 Brighton Conference: Weeds*, 1-3, 675-680.
- Woodcock, C. E., Strahler, A. H., 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21, 311-332.
- Zavarzina, A. G., Rozanova, M. S., Sukhanova, N. I., Lomonosov, M. V., 1996. Humous content and reflectivity of upper horizons of soils of the southern regions of European Russia. *Eurasian Soil Science*, 28 (11), 349-360.
- Zhangshi, Y., Lee, W., 1997. Obtaining spatial and temporal vegetation data from Landsat MSS & AVHRR/NOAA satellite images for a hydrological model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 69-77.

Liste des figures

- Figure 2.1 Les différentes organisations structurales superficielles (d'après Gaddas, 1997)
- Figure 2.2 Infiltrabilité des OSS d'après Gaddas (1997). Les barres d'erreur indiquent l'écart-type. $n = 5$.
- Figure 2.3 Un exemple schématique de l'évolution des différents paramètres évolutifs de l'état de surface au cours de l'année (exemple basé sur la pluviométrie de l'année 1993) pour une parcelle labourée (à gauche) et une parcelle désherbée chimiquement (à droite).
- Figure 2.4 Représentation schématique des niveaux de résolution d'observation.
- Figure 2.5 Les flux d'énergie dans un système de télédétection. Gauche : la voie "source-objet-capteur". Droite : les voies de l'énergie incidente.
- Figure 2.6 Exemples de courbes de réflectance (d'après Lillesand & Kiefer, 1994)
- Figure 2.7 Schéma de réflectance bidirectionnelle dans le plan du soleil à 3 échelles. Les flèches rouges indiquent la rétrodiffusion et les vert la direction spéculaire. A droite est indiqué le résultat bidirectionnel si l'on intègre sur la surface dessinée à gauche (indiqué par flèches cumulées). La taille de chaque flèche est proportionnelle à la taille du segment plane qu'elle représente. À l'échelle 1 les flèches représentent la totalité de la réflectance du segment spéculaire. Aux échelles 2 et 3 les flèches indiquent la direction dominante de la réflectance comme on peut le voir dans le diagramme de droite à l'échelle précédente. Ici le reste du rayonnement réfléchi est considéré également distribué sur tous les angles.
- Figure 2.8 Étapes de la démarche générale d'analyse
- Figure 2.9 Schéma d'une vue orthogonale d'une parcelle de vigne en gobelet (gauche) et palissée (droite), mettant en évidence les trois objets constituant l'image de la parcelle : le pied de vigne et sa végétation, la surface du sol ombragée, et la surface du sol éclairée. L'azimut du soleil est situé au sud-ouest.
- Figure 3.1 Localisation de la zone et des sites d'étude. Le cadre en pointillés délimite la zone présentée en annexe 1.
- Figure 3.2 Sol "défoncé" avant plantation de vigne (après la pluie dans une plaine marneuse).
- Figure 3.3 Arrachage et défoncement du sol au ripper (plateau Pliocène, Caux).
- Figure 3.4 Le dispositif des prises de vue sur pellicule argentique.
- Figure 3.5 Caractéristiques de l'émulsion utilisée. Gauche : courbes caractéristiques ; droite : courbes de sensibilité spectrale (la sensibilité égale l'inverse de l'exposition exprimée en ergs/cm^2). D'après la documentation technique FUJI.
- Figure 3.6 Une des deux cibles test.
- Figure 3.7 Extrait du canal vert de l'image numérique brute (agrandi 4 fois) présentant les cibles test.
- Figure 3.8 Ligne empirique de correction radiométrique correspondant à la prise de vue n°1. Gauche : avec prise en compte de la BRDF ; droite : sans prise en compte de la BRDF.
- Figure 3.9 Illustration du prétraitement géométrique et des données qui en résultent. Hormis les tâches classiques de sélection de GCPs et de numérisation de la ligne de coupe, toutes les étapes ont été automatisées.
- Figure 3.10 Le dispositif de mesures goniométriques. Le support, ici en position verticale, peut être incliné jusqu'à 60° . Les mesures sont effectuées dans le plan du soleil et perpendiculairement au plan du soleil.
- Figure 4.1 Flow chart showing the different procedure steps.
- Figure 4.2 Circularly constant frequency sections within which the peaks of the corresponding classes need to be located.
- Figure 4.3 Classification criteria of the model.
- Figure 4.4 Extract of an image mosaic covering an area situated in the La Peyne valley. The images were taken at the end of may 1998.

- Figure 4.5 Illustration of the procedure on field 1 (figure 3). Left shows the image information extracted and temporarily stored in a square matrix; the centre shows the Fourier transform of this image; right shows the frequencies remaining after thresholding (only the part contained within the white rectangle of the centre image is represented, because outside no frequencies remained). Both pixel pairs, visible within the small white circles, are located within the vine frequency zone. The pairs are, once transformed into geographical space, near perpendicular. These observations lead to classification as goblet mode. From their position with respect to the centre spacing and orientation are computed.
- Figure 4.6 Evolution of the vine frequency peak's amplitude in the FT power spectrum as a function of (1) orientation, simulated by rotation, and (2) shape, simulated by resampling the original vine field. The data represented by the diagram on the left have been obtained on a 100m long and 50m wide wire-trained ploughed vine field. The diagram on the right corresponds to an abandoned, i.e. very low contrast, vineyard of equal dimensions.
- Figure 5.1 Between and within field reflectance variation. The image sample shows the red (650nm) reflectance in May 1998 for a few pixels of two juxtaposed vineyards, the one on the left (A) with mainly bare calcareous soil, and the one on the right (B) covered with weed. Shadowed surfaces have not been considered in this illustration. From the pixel reflectance values (graph on the right) it can be seen that neither a general, nor a field specific threshold allows to distinguish between the objects sunlit soil and vine.
- Figure 5.2 Schematic vine and soil contributions to the canopy reflectance under a solar zenith angle around noon in summer in the Mediterranean region (20°).
- Figure 5.3 Schematic illustration of the result of a 3×3 and 5×5 median filter on a red channel vine pixel (black, the example centre pixel having a white contour). Sunlit soil is represented by white cells and the transitional fringe by light and dark grey cells. The schematic image fragment represents part of a theoretic red channel response on a wire trained vineyard. The bars show the filter pixels in an ordered manner.
- Figure 5.4 Illustration of the sunlit soil recognition method on a ploughed wire-trained vineyard sample (May 1998) containing a non-ploughed inter-row. The white line in the original image sample (red band) presents the location of the cross section of figure 5.5.
- Figure 5.5 Cross section (see figure 5.4) showing the original pixel values (red band) and their change upon two dimensional median filtering (line graphs). The black and white/grey bars correspond resp. to the black and white pixels of the corresponding procedure steps in figure 5.4.
- Figure 5.6 Illustration of the object delimitation by conditional erosion/dilation. The grey (resp. white) histograms correspond to the region covered by the white pixels (resp. black). The contrast between the two pixel populations obtained by application of the original (C_{ori}), the dilated (C_{dil}) and the eroded (C_{ero}) mask is indicated. In this example the original mask fits best (highest contrast). The dilated mask case shows a significant increase in variation within the "sunlit soil" pixel population.
- Figure 5.7 Mosaic with small parts of 12 different vine fields. The variation between these samples represents a large part of the between-field variation as found in the images due to varying geometric configuration (viewing, illumination, crop orientation), varying crop size, age and training mode, changes in soil and soil surface state.
- Figure 5.8 The application of the two steps of the procedure (see figures 5 and 7) on the image of figure 8 are shown by the binary images on the right is presented on the right. The comparison between the final results and the manually produced 'ground truth' are shown by the table on the lower left side (each cell corresponding to the image sample at the same location in the mosaic): shortage is the percentage of pixels visually identified as sunlit soil and not recognised as such by the procedure, excess is the inverse and net their difference, i.e. the accuracy of the vine and shadow cover estimation.
- Figure 5.9 Une vigne en gobelet, taillée, au mois de février (2000) autour de midi (parcelle E3 706, Caux).
- Figure 5.10 Extrait de la prise de vue d'hiver (gauche : Caux3, i.e. février 1999), illustrant le fort effet de la présence d'un cavaillon enherbé et sa prise en compte par la méthode de multi-résolution par parcelle (droite). La parcelle claire à gauche correspond à la parcelle E3 706 (figure 5.9).
- Figure 6.1 Géométrie du dispositif de mesures radiométriques de terrain.
- Figure 6.2 Exemple des résultats de l'inversion du modèle BRDF. Les observations proviennent d'une surface encroûtée avec un très faible taux de graviers, mesurées dans le plan du soleil (gauche, angle négatif : rétrodiffusion, i.e. soleil "dans le dos") et perpendiculaire à ce plan (droite). Les prédictions du modèle (courbes) s'ajustent

- bien aux observations ($R_{\text{vert}}^2=0.96$; $R_{\text{rouge}}^2=0.96$; $R_{\text{pir}}^2=0.95$). L'angle zénithal du soleil est de 33° . Le pic du *hot spot* n'est pas représenté, car il ne peut être mesuré (ombre du capteur).
- Figure 6.3 Comportement spectral et bidirectionnel d'une surface labourée (symboles reliés par tirets) et encroûtée (symboles seuls) d'un même sol (plateau Pliocène, Roujan), sous un angle zénithal d'éclairement de 20° . Gauche : plan du soleil (positif : contre-jour ; négatif : rétrodiffusion) ; milieu : perpendiculairement au plan du soleil ; droite : rapport entre les canaux spectraux du rouge et proche infrarouge.
- Figure 6.4 Rapports entre les trois canaux spectraux obtenus par mesures goniométriques sur les sites I3, H3 et H4 (annexe 2C). Les "+" correspondent à (une partie de) la droite de la figure 6.3.
- Figure 6.5 Les 4 paramètres décrivant le comportement réfléchissant bidirectionnel de tous les sites observés ($\rho_0 \approx$ l'intensité, $k \approx$ l'anisotropie, $\Theta \approx$ degré de rétrodiffusion, et l'indice de couleur).
- Figure 6.6 Triplets BRDF et indice de couleur des sites observés, regroupés par classe hydrologique.
- Figure 6.7 Les critères spectraux définissant les classes *hydro-spectrales*. Gauche : les triplets BRDF définissant la réponse du canal rouge. Droite : les classes finales obtenues par seuillage sur indice de couleur (rayures = gamme non autorisée).
- Figure 6.8 Prédiction de gammes radiométriques du canal rouge des classes hydro-spectrales sous un angle zénithal d'éclairage de 32° . Gauche : dans le plan du soleil, angle zénithal de vue de 20° en direction du point chaud. Droite : idem, mais en direction de contre jour. Les zones grisées indiquent les gammes radiométriques où 2 ou 3 classes se recouvrent.
- Figure 6.9 Deux exemples de classification extraits d'une mosaïque d'interrangs éclairés de vignobles. Caux, prise de vue n° 1. R = réflectance.
- Figure 6.10 Pente (gauche) et angle zénithal de vue (droite, prise de vue n°1) de Caux (annexe @). Les polygones indiquent les parcelles (hors bordure) du site d'étude cultivées en vigne.
- Figure 6.11 Effet d'une rotation simulée du dispositif de prises de vue sur la classification radiométrique. Les symboles noirs et carrés représentent une rotation en direction du *hot spot*, les cercles représentent une rotation en sens inverse, vers le soleil. Les traits noirs relient les niveaux estimés de changements d'affectation des pixels et les pointillés indiquent la partie de ces changements qui représente une réelle erreur d'affectation.
- Figure 6.12 Imagettes de 50×50 m illustrant les différentes situations rencontrées non conformes à l'hypothèse que l'information intra-parcellaire comprend uniquement des surfaces éclairées soumises à la pratique culturale. Voir figure 6.13 pour la légende des classes.
- Figure 6.13 Affleurement de la roche mère blanchâtre en bordure du plateau de Caux (février 1999). Gauche : parcelle à faciès intermédiaire (notez les pixels "F2" et les trous dus au dépassement des gammes). Droite : parcelle labourée.
- Figure 6.14 Ensemble d'échantillons de matériel minéral de surface indicatif de la variation en couleur dans la zone d'étude. Les sols échantillonnés sont les profils découpés repérés visuellement sur les mosaïques (cadres blancs) et un ensemble de sites sélectionnés au hasard par site d'étude (RA = Roujan-Alignan ; P = Pézenas ; C = Caux ; N = Neffiès) supposé représentatif du reste de la zone (cadres rouges et jaunes, le rouge indiquant les sols les plus rubéfiés). Le matériel, provenant des tous premiers millimètres du sol, séché à l'air et tamisé à 0.3mm , est photographié en contre jour et vers le point chaud (affiché ici à gauche) en état de poudre égalisée et après formation d'une croûte. Ceci fournit l'ensemble des points représentés dans le diagramme de droite, exprimant le rapport entre les canaux rouge et vert en compte numérique.
- Figure 7.1 Évolution de la longueur moyenne (m) en fonction du recouvrement de la surface (%) par l'élément concerné.
- Figure 7.2 Quelques exemples de diagrammes de probabilités de transition pour la parcelle n°6. Les mesures sont indiquées par des ronds, la moyenne des randomisations par des tirets, les limites des randomisations par des traits noirs (intervalle de confiance à 1%) et la transition aléatoire selon la formule 7.2 par un gros trait gris. La projection sur l'abscisse dans les diagrammes d'autotransition (A) indique la longueur moyenne des éléments. Voir annexe 2F pour les autres parcelles.
- Figure 7.3 Diagrammes de transition pour la parcelle n° 6 après regroupement en éléments minéraux (agrégats, croûtes et cailloux) et éléments organiques (sarmants, débris organique et herbe verte et sèche). Voir figure 7.2 pour la signification des symboles et traits.

- Figure 7.4 Principe du calcul de cooccurrence. À gauche : "image" (chaque cellule représente un pixel et sa valeur l'identifiant de la "classe" à laquelle ce pixel est affecté) avec le voisinage d'origine (de 3x3 pixels, pixel central affecté à la classe "5") et un voisinage obtenu par déplacement de la fenêtre (pixel central affecté à la classe "6"). À droite : la matrice de cooccurrence résultante. Cette matrice est obtenue par comparaison de chaque pixel du voisinage d'origine avec le pixel du voisinage déplacé situé à la même position à l'intérieur de la fenêtre. Chaque cellule de la matrice de cooccurrence représente la fréquence de transition d'une classe à une autre.
- Figure 7.5 Illustration de la représentation comme produite par le modèle : par parcelle, 7 images d'une mesure de texture (f_{IDM}) par pixel sont dérivées de l'image de pixels classés d'interrang éclairé, produite dans le chapitre 6. De chacune de ces images, calculées à des translations différentes, on calcule la moyenne \bar{f}_{IDM} et l'écart-type σ de la mesure de texture f_{IDM} . L'évolution de cette moyenne en fonction de Δ (le diagramme à droite) est l'information sur laquelle l'identification des pratiques culturales discontinues est fondée.
- Figure 7.6 Clé de décision pour identifier et décrire la présence d'une pratique culturale discontinue. Chaque rond représente une population de f_{IDM} , obtenue pour un déplacement Δ donné. Par test ($N = x ?$), les ronds à croix représentent les populations pas considérées dans le test, les ronds noirs des populations non différentes (voir conditions dans texte) entre elles, et les ronds blancs des populations non différentes entre elles, mais à f_{IDM} significativement plus élevée par rapport aux populations "avoisinentes" (ronds noirs). La première "clé" rencontrée – dans l'ordre d'analyse – dont les conditions sont satisfaites fournit le résultat final.
- Figure 7.7 Exemple d'imagette extraite de l'image classée (parcelle à $N=4$), et les images dérivées au cours de la procédure d'analyse et segmentation par cooccurrence. La rotation de l'imagette est basée sur l'orientation des rangs, une information obtenue dans le chapitre 4. Ce chapitre a également fourni l'écartement qui constitue l'unité de déplacement (horizontal). Dans les imagettes à échelles de gris, les pixels sombres sont ceux qui ont une faible *homogénéité* (f_{IDM}) de cooccurrence.
- Figure 7.8 Évolution de \bar{f}_{IDM} en fonction de Δ . Résultats obtenus sur les parcelles des sites Rou-Al. (en dessous) et Caux (au dessus) couvertes par les mosaïques de la première prise de vue. Les diagrammes de gauche et du milieu montrent les parcelles qui ont été bien reconnues (par comparaison à la vérité terrain) comme étant resp. soumises à une pratique culturale homogène (gauche) et discontinue (centre). Les diagrammes de droite montrent les cas où la pratique culturale discontinue n'a pas été reconnue.
- Figure 7.9 Organigramme du modèle de synthèse basé sur les fréquences et la détection de fortes discontinuités à l'échelle de la parcelle. Les pointillés représentent les entrées du modèle. Les boîtes à fond gris représentent des conditions (où f = fréquence et S = seuil). Les tests statistiques (points d'interrogation) sont des tests non-paramétriques (test de Wilcoxon signe et rang) à $\alpha = 0.01$, voir aussi figure 7.10.
- Figure 7.10 Schéma illustrant le découpage d'une parcelle extraite de l'image afin de mettre en évidence d'éventuels contrastes spatiaux dans la parcelle. Le découpage est réalisé de manière à produire 4 quarts découpés NS et EW de surfaces égales.
- Figure 7.11 Influence de l'angle de vue sur la classification. Cet extrait de la parcelle AW 260 (Rou-Al, prise de vue 3) est composé par deux images et donc vu sous deux angles azimutaux différents (flèches noires). La surface à faciès intermédiaire ou caillouteuse (jaune) ne peut plus être distinguée d'un éventuel labour si vue plus en contre jour (classe floue, aquamarin).
- Figure 7.12 Exemples de résultats de l'analyse de la distribution des herbes à l'intérieur de la parcelle. Il s'agit des parcelles E3 759 (gauche) et D2 327 (droite), Caux, prise de vue 3, représenté à 25% de leur taille originale.
- Figure 7.13 Rapport par faciès entre l'estimation de l'enherbement par la fonction de transfert d'échelle basé sur les fréquences des classes hydro-spectrales et l'estimation visuelle de l'enherbement sur le terrain.
- Figure 7.14 Rapport entre l'estimation de l'enherbement par télédétection et l'estimation visuelle obtenue au sol pour les parcelles à faciès fermé sans sarments à la surface.

Liste des tableaux

- Tableau 2.1 Les paramètres de surface qui interviennent dans le comportement hydrodynamique de la parcelle viticole.
- Tableau 2.2 Relations spatiales entre paramètres de surface. \Leftarrow : relation causale, hiérarchique ; \leftrightarrow : relation par exclusion mutuelle ou occultation.
- Tableau 2.3 Extrait de l'offre actuelle de différents types d'information télédéctée. La propriété spectrale est notée en nombre de bandes dans le domaine concerné, la propriété spatiale en taille de l'élément de résolution (mètres), la propriété temporelle en temps de revisite (jours) et la propriété bidirectionnel nombre d'angles proposés. ? = propriété inconnue ; - = orientation fixe ; * = propriété selon besoin de l'utilisateur. Si un deuxième temps de revisite est indiqué entre parenthèses, ceci indique le temps de revisite le plus rapide possible, mais sous un angle de vue différent. Acronymes du champ "origine" : ESA=*European Space Agency* ; EU : États Unis ; DLR : *Deutsches Luft und Raumfahrt Zentrum* (agence spatial allemand) ; NASA : *National Aeronautics and Space Agency* (agence spatial américain).
- Tableau 3.1 Calendrier cultural type de la vigne sur le bassin versant de Roujan (d'après Louchart *et al.*, 1997). TEV : le travail et l'entretien de la vigne ; TES : le travail et l'entretien du sol ; F : la fertilisation ; PC : la protection de la vigne ; V : les vendanges.
- Tableau 3.2 Les prises de vue.
- Table 4.1 Results as provided by the model. Calculated orientation of frequencies are expressed in degrees with respect to north (0), negative westward and positive eastward.
- Tableau 4.2 Performance du modèle comme résultant de son application aux sites d'études pour les prises de vue en saison végétative. Les erreurs dans l'avant-dernière colonne (Rou-A1 2) ne sont pas représentatives de la performance du modèle, car elles sont surestimées suite à un problème technique (flou local dû à des diapositives non planes). C'est pour cela que l'on trouve deux chiffres dans chaque cellule de la colonne "Total" : le premier chiffres prend en compte tous les sites et prises de vue présentés ; le deuxième chiffre (italique) présente le total sans pris en compte de Rou-A1 2.
- Tableau 6.1 Classes hydro-spectrales d'états de surface à l'échelle du pixel. Les exemples concernent les échantillons présentés en annexe 2B.
- Tableau 6.2 Changement d'affectation du pixel induit par non prise en compte de la pente (fig. 6.10) pour le site de Caux, prise de vue n° 1. Chaque ligne montre la redistribution de la population de pixels d'une classe dont la fréquence relative est marquée à droite. S = sarments/feuilles mortes ; HV = herbe verte ; M = mélange non-vert ; MV = mélange vert ; F0 = sol labouré ; F1 = faciès intermédiaire/cailloux ; F2 = sol nu encroûté.
- Tableau 6.3 Comme tableau 6.2, mais sans prendre en compte l'angle de vue (fig. 6.10).
- Tableau 6.4 Changement d'affectation du pixel induit par modification de la radiométrie pour le site de Caux, prise de vue n° 1. Chaque ligne montre la redistribution de la population de pixels d'une classe. Gauche : limite inférieure de l'intervalle de confiance. Droite : limite supérieure de l'intervalle de confiance.
- Tableau 6.5 Changement d'affectation du pixel induit par modification de l'heure de passage d'une heure pour le site de Caux, prise de vue n° 1. Chaque ligne montre la redistribution de la population de pixels d'une classe. Gauche : heure de passage une heure plus tôt que le passage réel. Droite : idem, une heure plus tard que le passage réel.
- Tableau 7.1 Gamme de fréquences de classes hydro-spectrales considérées possibles pour les principaux types d'état de surface.
- Tableau 7.2 Description de l'état des parcelles observées comme notée sur le terrain (pour légende voir annexe 2A). Les pourcentages en deuxième ligne sont les fréquences issues du jeu d'observations "statistiques" et servent de comparaison à l'estimation visuelle. Notez que les sarments présents au sol ne proviennent pas d'une taille récente, ce qui aurait faussé les résultats.
- Tableau 7.3 Fréquence des différentes classes observées par parcelles en général (P), sur le rang (R) et dans l'interrang (I). Comme la parcelle 4 est une vigne en gobelet sans cavillon la distinction entre rang et interrang ne peut pas être fait (tirets).

Tableau 7.4	Longueur moyenne (m) des éléments estimée selon la méthode de Carle & Fogg, 1996. Le chiffre supérieur est l'estimation générale et le chiffre inférieur l'estimation basée sur les observations dans l'interrang réalisées parallèlement au rang. Les éléments Minéral et Org. (organique) présentent la longueur estimée après regroupement resp. des éléments agrégat, croûte et cailloux, et de l'autre côté des éléments sarments, débris organique, herbe sèche et verte. * = non présent ; < = inférieur au seuil de détectabilité.
Tableau 7.5	Estimations théoriques illustrant l'effet du changement d'échelle des observations ponctuelles de terrain vers l'image pour l'élément <i>croûte</i> à la surface des différentes parcelles. Les chiffres sont en pourcentage de la surface totale de la parcelle.
Tableau 7.6	Tableaux de contingence par site et prise de vue entre les parcelles à pratique culturale homogène (H) et discontinue (D) observées au sol (lignes) et identifiées dans l'image par la procédure d'analyse de $\bar{f}_{IDM}(\Delta)$ (colonnes). Les chiffres sont en nombre de parcelles.
Tableau 7.7	Clé de reclassification des pixels classés dans des combinaisons de classes hydro-spectrales (classe <i>floue</i> , première colonne), en fonction des étapes parcourues par le modèle et le résultat y obtenu.
Tableau 7.8	Description et valeur des différents seuils utilisés par le modèle de synthèse.
Tableau 7.9	Résultats issus du modèle comparés à la vérité terrain. Par faciès et par site (C = Caux, N = Neffiès, P = Pézenas, R-A = Rou-Al) le nombre de parcelles correspondant est indiqué avec en dessous le nombre de parcelles parmi celles-là non-reconnues par le modèle comme ayant un tel faciès à cause d'une erreur soit propre au modèle (<i>erreur modèle</i>), soit provoqué par un effet externe au modèle (<i>erreur autre</i>). Ces dernières erreurs sont précisées dans le tableau 7.10. La performance du modèle (%) prend uniquement en compte le premier type d'erreur. La performance du système (%) prend en compte toute erreur induite au cours de l'analyse à partir de la reconnaissance de la parcelle comme vigne.
Tableau 7.10	Spécification des erreurs de classification du faciès de la parcelle, provoquées par des non conformités avec les hypothèses propres aux différentes étapes de l'analyse.
Tableau 7.11	Fonction empirique de transfert d'échelle pour l'estimation de l'enherbement. Les chiffres indiquent le facteur de multiplication pour les classes hydro-spectrales respectives.