Télédétection, 2001, Vol. 2, n°1, p 1 - 11
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2001 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *GB Science Publisher*
Imprimé en France

Procédure interprétative de catégorisation de classes multidates pour la détermination des cultures principales à partir d'images TM de Landsat

CHRISTIAN BLUMER et RÉGIS CALOZ

Système d'information à référence spatiale, Département du Génie Rural
École Polytechnique Fédérale de Lausanne ; CH-1015 Lausanne, Suisse
Téléphone : (+4121) 693 57 85 ; télécopieur : (+4121) 693 57 90 ;
courriel : christian.blumer@epfl.ch ; regis.caloz@epfl.ch

(soumis le 21 novembre 1999 ; révisé le 2 octobre 2000 ; accepté le 1er décembre 2001)

Les analyses diachroniques d'images reposent sur la possibilité de procéder aux corrections des effets atmosphériques pour déterminer l'évolution réelle de l'occupation du sol. Le recours à des images d'archive s'impose le plus souvent, alors que, généralement, les conditions atmosphériques présentes lors de la prise de vue ne sont plus connues. Dans le cadre de la protection des sols agricoles contre l'érosion hydrique et du suivi de la couverture végétale, une méthode a été développée afin de permettre à l'analyste de suppléer à cette absence d'information. L'intégration des connaissances que celui-ci a *a priori* à sa disposition sur la région d'étude et sur l'évolution phénologique des cultures dans une démarche de classification, sert à déduire une signature dite *multidate*, pour chaque catégorie d'occupation du sol intégrant les propriétés spectrales et temporelles. L'analyste intervient sur deux bases de décisions formées ; l'une par l'indice TSAVI ; l'autre par la bande TM5 de Landsat respectivement extraites d'images de deux dates différentes. Les catégories prairies, céréales et cultures sarclées ont été déterminées avec des précisions suffisantes pour l'objectif fixé. La robustesse de la procédure est démontrée par la similitude des résultats obtenus selon deux méthodes de classification de nature différente, ce sur deux sites test distincts. En intégrant la variable temporelle, le concept de signature ouvre des perspectives pour une exploitation plus large des images d'archive.

Mots-clefs : classification des cultures, indice de végétation, signature multidate, images d'archives.

Interpretative multidate class categorization for the determination of main crops using Landsat TM data

Interpretative multidate class categorization for the determination of main crops using Landsat TM data Multidate images processing are based on the possibility to apply atmospheric corrections in order to determine the real land use evolution. The use of archived imagery is often necessary although atmospheric conditions prevailing during acquisition are not reported anymore. In the fields of cropland protection against runoff and vegetation cover monitoring a method was developed to allow the operator to compensate for lack of information. Integration of his priori knowledge on the study area and on crop phenology evolution in a classification procedure help deduct signature, called multitemporal, including spectral and temporal properties for each land cover category. The operator interact on two decision bases built on TSAVI index and on Landsat TM5 band respectively and derived from two different dates. Grassland, grain crop and row crop categories were classified with sufficient accuracy with respect to the preliminary objectives. Reliability of the procedure was demonstrated by agreement of results obtained from two different classification approaches and applied on two distinct test sites. By integrating the temporal variable, the concept of signature broaden our perspectives for an extensive exploitation of archived imagery.

Keywords : crop type classification, vegetation index, multidate signature, archived imagery

1. INTRODUCTION

L'évolution de l'occupation du sol à l'aide d'images de télédétection a été maintes fois analysée et diverses variantes de procédures ont été proposées. La plupart reposent sur deux hypothèses : la connaissance de zones d'entraînement pour l'établissement des signatures spectrales pour chaque date d'image analysée, la possibilité de procéder aux corrections radiométriques pour éviter toute ambiguïté sur l'interprétation des changements observés d'occupation du sol. Ces hypothèses sont généralement très contraignantes car de nombreuses analyses diachroniques se basent sur des images d'archive pour lesquelles on ne dispose ni de la réalité de terrain, ni d'informations suffisantes pour procéder aux corrections radiométriques relatives aux effets atmosphériques. De surcroît, d'autres difficultés ont

été soulevées en rapport avec la variation de la réponse spectrale qui peut devenir notable pour certains types de couvert sur de larges étendues en fonction des conditions phénologiques (Cihlar *et al.*, 1998). De telles contraintes laissent peu d'espoir de produire des résultats de qualité satisfaisante sauf si d'autres informations peuvent être insérées en cours d'analyse. Exploitant cette dernière hypothèse, nous proposons une procédure combinant une approche de traitement numérique et une phase interprétative de manière à offrir à l'analyste la possibilité d'introduire les connaissances qu'il possède du lieu d'étude au moment opportun.

Ne disposant d'aucun inventaire cultural correspondant aux images utilisées, notre méthode n'a pas été validée au sens traditionnel du terme dans la mesure où aucune matrice de confusion n'a pu être établie. À notre avis, son intérêt repose sur sa nature nettement bayesienne qui vise à tirer parti de toutes les informations dites *a priori* susceptibles d'améliorer la qualité de la classification. Les compléments apportés s'avèrent suffisants pour les situations où les exigences de précision géométrique ne sont pas trop élevées. Cette approche mérite d'être expérimentée dans d'autres circonstances que celles qui ont motivé la rédaction de cet article.

Notre article est divisé en deux parties : dans la première, nous décrivons les étapes de la méthode avec leur justification théorique et, dans la deuxième, nous traitons d'une application illustrant la méthode et les performances que l'on peut attendre de sa part.

La situation à quoi nous nous proposons de fournir des solutions est apparue dans le cadre d'un projet de recherche européen dénommé FLOODGEN *(FLOOD risk reduction by spaceborne recognition of indicators of excess runoff GENerating areas).*

Il s'agissait d'identifier les surfaces potentiellement génératrices de ruissellement en zone agricole à l'aide des outils de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG). La couverture végétale jouant le rôle protecteur que l'on sait, une partie du problème revient à déterminer la répartition à la fois spatiale et temporelle des grands types de cultures et de les catégoriser en fonction de leur pouvoir protecteur. Pour la zone d'étude, les catégories culturales jugées significatives pour ce propos sont les prairies, les céréales et les cultures sarclées. Ce groupement présente, en outre, l'avantage de réunir des types de végétation ayant une identité spectrale similaire ou peu séparable (Boissezo *et al., 1993).*

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Principe de la méthode

Le principe de la méthode est d'associer les modifications observées sur les images prises à des dates différentes au cycle phénologique des cultures retenues. On extrait ainsi l'information afin d'améliorer la détermination de l'occupation du sol. La signature de chaque catégorie ainsi dérivée intègre les informations spectrales et temporelles.

La procédure comprend des phases d'analyse numérique et d'interprétation visuelle de la répartition des classes dans l'espace spectral. On admet par hypothèse que l'analyste possède une bonne connaissance des pratiques culturales et du calendrier des cultures de la région d'étude. Il est censé tirer profit d'une observation formulée par Odenweller et Johnson (1984). Ces auteurs ont montré que, pour une région donnée, le motif temporel de l'évolution des cultures est généralement constant, année après année, seule la répartition spatiale des parcelles est modifiée pour des raisons de conservation de l'aptitude des sols agricoles.

On en déduit que, pour un stade phénologique similaire, toute représentation dans l'espace spectral de la région reste à peu près la même sous réserve de l'importance des effets atmosphériques. Le problème est donc de trouver une ou des représentations dans l'espace spectral offrant, par interprétation visuelle, une bonne capacité discriminante pour les catégories culturales retenues.

Les représentations spectrales utilisées sont un histogramme bivarié formé soit par l'indice TSAVI (Baret *et al.,* 1989) calculé sur chacune des images, soit par la bande TM5 de Landsat. Ce support s'est avéré pertinent quant à l'identification des principaux types culturaux dont la discrimination est fortement liée à la dimension temporelle découlant de l'évolution phénologique de la végétation (Lo *et al.,* 1986 ; Eerens *et al.,* 1991).

Compte tenu du comportement phénologique des cultures, la période la plus favorable pour la séparation des trois groupes s'étend de mi-juillet à mi-septembre. (Lo *et al.,* 1986 ; Hall-Koenyves, 1990 ; Cyr *et al*., 1991 ; Cyr *et al*., 1995). Il s'agit aussi d'une période suffisamment longue pour que la probabilité d'obtenir de données optiques de bonne qualité soit élevée.

2.2. Démarche de traitement

Les différentes étapes de la procédure sont représentées sur la figure 1.

Phase 1

Travaillant uniquement dans l'espace spectral pour procéder à la fixation des paramètres de séparation des catégories végétales significatives pour l'étude, il est nécessaire, dans une première étape, de réduire les images aux seules zones culturales. À cette fin, on procède à un masquage des zones non-agricoles (bâti, chemin, forêts, etc.). *Cf.* figure 1.

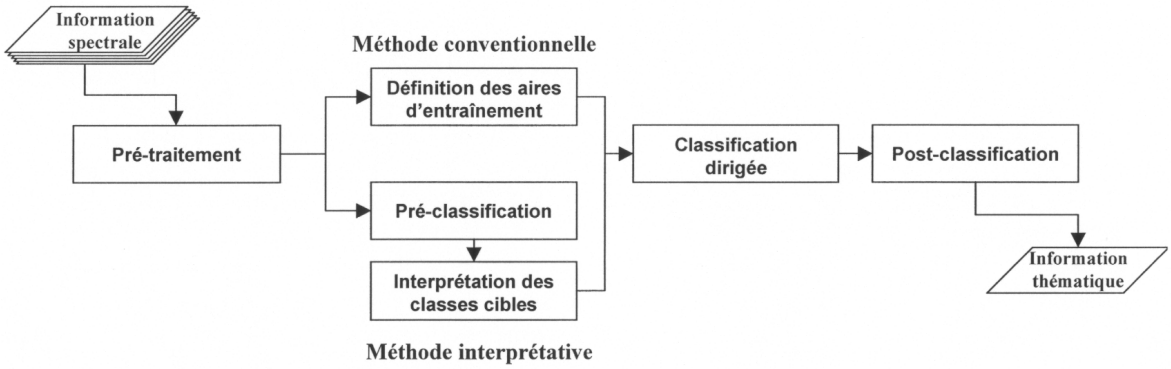


FIGURE 1 Méthode conventionnelle et interprétative pour une classification dirigée. *Conventional and interpretative methods for supervised classification*

Phase 2

Le problème est ensuite d'établir, pour chaque catégorie culturale, une signature spectrale qui prend en compte l'évolution constatée d'une image à l'autre, en d'autres termes qui intègre la dimension temporelle. Cette signature est dénommée par la suite multidate. Pour l'obtenir, on procède à une classification de l'image en se basant uniquement sur les informations spectrales. Les zones d'entraînement sont choisies sur les plages de l'image présentant une bonne homogénéité. Cette étape est dénommée pré-classification. L'étiquetage des zones spectralement homogènes n'est à ce stade pas encore nécessaire. L'objectif est de déterminer dans les deux images des classes spectrales similaires dont on admet qu'elles représentent une même couverture végétale. La détermination des signatures multidates fait l'objet de la section suivante.

Phase 3

La phase suivante laisse une large place à l'interprétation visuelle. L'analyste détermine sur les représentations spectrales choisies, les zones délimitées par les signatures extraites de la première phase se rapportant aux trois groupes de cultures à identifier. Le choix des représentations spectrales est justifié et commenté à la section 2.4. Le critère principal se réfère aux propriétés discriminantes mises en évidence par l'analyse de l'évolution phénologique de la végétation (Lo *et al., 1986 ;* Eerens *et al., 1991).*

Les zones ainsi définies sont exploitées ensuite comme aires d'entraînement pour l'exécution de la procédure de classification des images. Le classificateur utilisé a été le maximum de vraisemblance appliquée sur les bandes retenues pour l'établissement de la base de décision.

Phase 4

Finalement, une phase de post-classification peut être introduite pour l'élimination des groupes de pixels isolés jugés peu significatifs en termes de surface.

2.3. Extraction des signatures multidates

La signature multidate de chaque catégorie est obtenue en fusionnant les classes spectrales qu'elle forme sur les différentes images disponibles. Les classes sont extraites par classification. Le manque d'information admis par hypothèse nous conduit à poser peu de contraintes pour cette étape appelée par la suite pré-classification. L'analyste a le choix du classificateur. Dans quelle mesure cette liberté est susceptible de produire de résultats différents ? Afin de vérifier le degré de sensibilité de cette étape sur les résultats finaux, nous avons réalisé l'ensemble de la procédure à partir de deux modes de pré-classification de nature très différente (figure 2). La convergence des résultats est interprétée comme une preuve suffisante pour démontrer la robustesse de cette étape.

Le premier classificateur suit une approche par pixel. La classification est semi-dirigée dans la mesure où les zones d'entraînement (AE) sont sélectionnées à l'écran en raison uniquement de l'homogénéité spectrale pour chaque image, séparément à partir des canaux les plus significatifs (TM3, TM4, TM5). Par interprétation, elles représentent les classes culturales majeures (CCM) mentionnées en introduction. Les classes de chaque date sont ensuite croisées pour obtenir l'image de toutes les combinaisons des deux classes (CC). On procède ensuite à un filtrage pour éliminer des zones significatives du fait de leur petite taille. Deux critères principaux sont utilisés : un indice de diversité moyen CVM (Murphy, 1985) et la taille proportionnelle exprimée par rapport aux classes-mères.

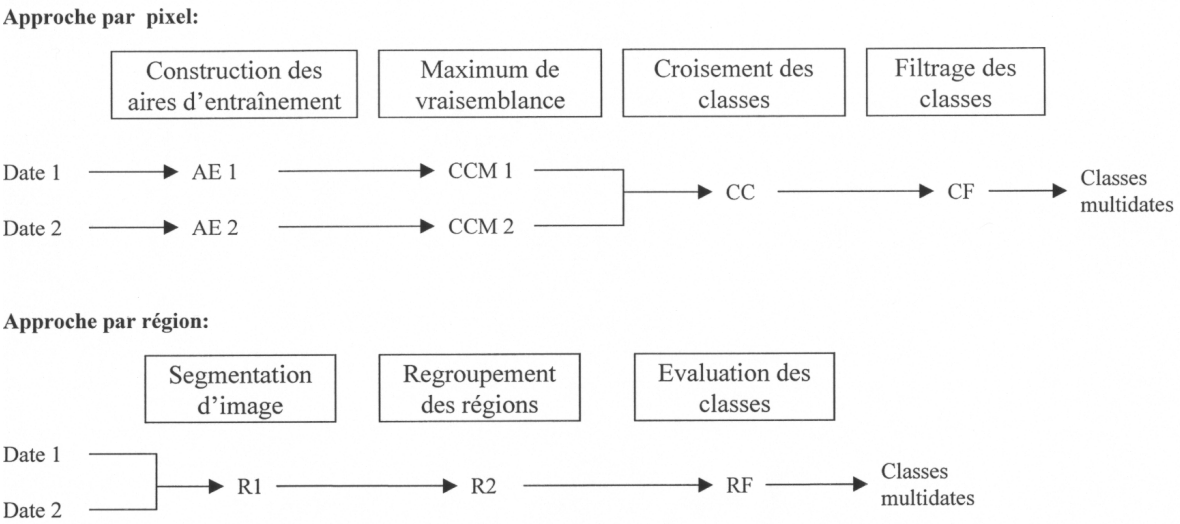


FIGURE 2 Déroulement de l'approche par pixel et par région pendant la phase de pré-classification. *Pixel-based and region based approach during pre-classification step*

La deuxième méthode utilisée suit une approche par région et consiste en deux phases. Dans un premier temps, un algorithme de segmentation d'image par croissance de région est appliqué ; il est suivi d'une procédure de regroupement des régions similaires (Kettig and Lanedrebe, 1976). Cette méthode est appliquée sur les canaux TM5 et TSAVI de chaque date et permet une extraction automatique des classes multidates.

2.4. Constitution de la base de décision

Tel que mentionné plus haut, la base de décision est une représentation visuelle dans l'espace spectral. Elle est donc indépendante de la référence spatiale des pixels. Les deux représentations choisies sont des histogrammes bivariés formés respectivement par l'indice TSAVI *(Transformed Soil Adjusted Vegetation index)* et par la bande du proche infrarouge TM5, calculés et extraits respectivement de chacune des deux images.

L'indice de végétation TSAVI, développé par Baret *et al.* (1989), est basé sur la détermination de la droite des sols à partir des bandes TM3 et TM4. Il a été construit dans le but de réduire l'influence du sol par rapport à celle de la végétation et est, de ce fait, mieux adapté que d'autres indices de végétation comme le NDVI ou le PVI pour le suivi du taux de couverture du sol des différents types de cultures au cours de l'année (Baret and Guyot, 1991 ; Cyr *et al.,* 1995).

La bande du proche infrarouge a été choisie pour ses propriétés complémentaires à celles du TSAVI. Elle offre un effet discriminant accru pour certaines cultures (Townshend, 1984). Le proche infrarouge, notamment la fraction recouverte par la bande TM5, est inversement corrélé avec la teneur en eau de la végétation (Bauer *et al.*, 1981) permettant une meilleure différentiation des formations végétales (Baret *et al.*, 1988 ; Andrieu and Baret, 1991 ; Thenkabail *et al.*, 1994 ; Jacobsen *et al.*, 1995).

Notre base de décision regroupe ainsi l'information de trois bandes spectrales sur un support graphique à deux dimensions.

2.5. Interprétation visuelle des signatures spectrales définitives et classification

Pour le cas de figure présenté, on dispose de deux images sur l'année convenablement réparties sur la période végétative. On construit les deux diagrammes annoncés précédemment. Sur le premier, on porte en abscisse le TSAVI calculé sur l'image de date 1 et, en ordonnée, le TSAVI de l'image date 2. La même logique est appliquée pour le deuxième diagramme avec la bande TM5 à la place du TSAVI (figure 3). L'asymétrie des deux nuées met bien en évidence les évolutions intervenues entre les deux dates (produites partiellement au moins par les différents états atmosphériques présents probablement lors des prises de vue).

Il est important de noter que la représentativité d'un tel diagramme dépend fortement de la qualité de la co-géoréférence des deux images utilisées. Une imprécision risque en effet de se traduire par un étalement exagéré du nuage de points. C'est à ce stade que l'on introduit les signatures multidates définies à la section 2.2. Elles sont représentées par leur ellipse d'équiprobabilité (ou ellipse de covariance) dérivée de la fonction de densité conjointe des deux variables (ici TSAVI et TM5) sous l'hypothèse d'une distribution normale bivariée.

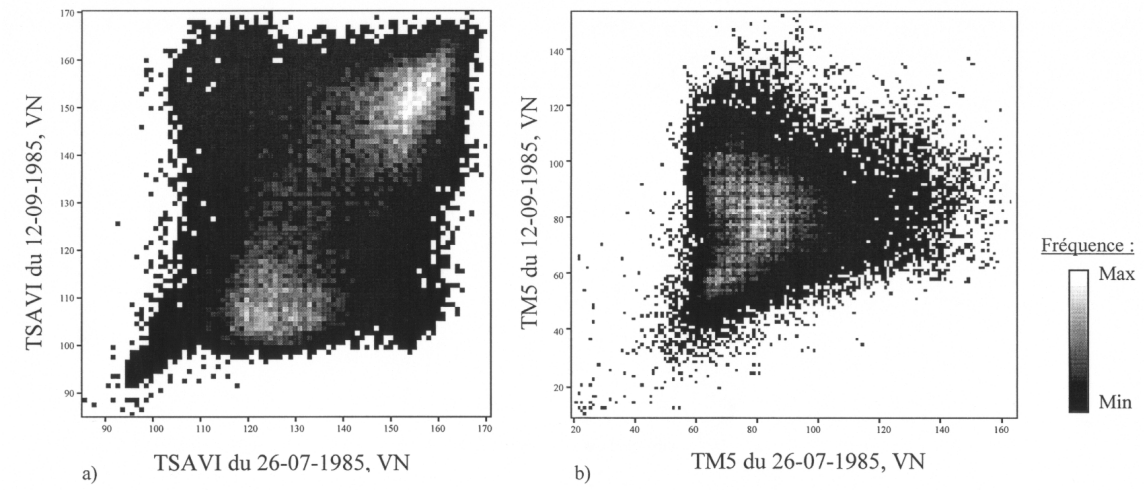


FIGURE 3 Bases de décision multidate selon les histogrammes bivariés des TSAVI et des canaux TM5 de deux images pour l'année 1985 (VN : valeur numérique). *Multi date decision basis according to bivariate histograms between TSAVIs and TM5 channels for two 1985 images (VN: digital number)*

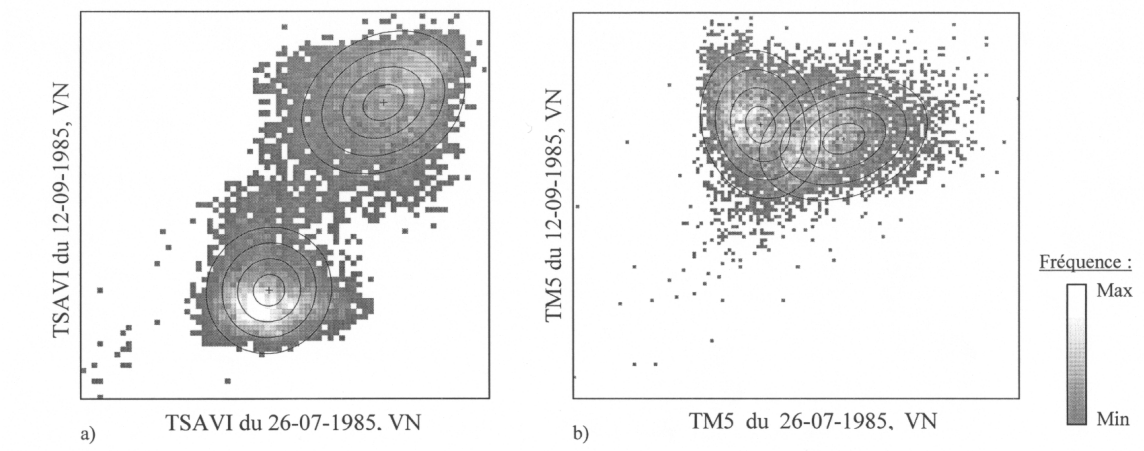


FIGURE 4 Ellipses d'équiprobabilité de deux classes spectrales dans la base multidate selon une fraction de l'écart type de 0,5, 1, 1,5 et 2 et leurs histogrammes bivariés correspondants. *Equiprobability ellipses of two spectral classes in multi date basis according to standard deviation multiple of 0,5, 1, 1,5 and 2, and their related bivariate histograms*

Les figures 4a et 4b illustrent le cas pour la présence de deux classes. Chaque ellipse représente une densité de probabilité constante dans l'espace des variables : elle s'exprime plus clairement en une fraction ou un multiple de l'écart type. Les propriétés de cette ellipse sont les suivantes :

- le centre correspondant aux valeurs moyennes de chaque variable :
- ses axes principaux indiquent la direction de la variance minimale et maximale ;
- le premier axe principal donne l'orientation de la droite de corrélation.

L'ellipse d'équiprobabilité reportée dans l'espace spectral choisi traduit de manière visuelle l'extension de la distribution de chaque classe. Divers essais ont montré, qu'avec des axes égaux à un écart type, les ellipses fournissent une bonne séparation des différentes classes tout en conservant un niveau de représentativité suffisant.

En présence de plusieurs ellipses représentatives d'une même catégorie thématique, issues des zones d'entraînement définies dans la phase de pré-classification, l'analyste redéfinit manuellement à l'écran de nouvelles ellipses, une pour chaque classe

thématique, intégrant le mieux possible les premières ellipses. Les nouvelles ellipses définissent les signatures spectrales définitives qui seront exploitées pour la classification des images.

3. EXEMPLES D'APPLICATION

La méthode décrite a été appliquée dans une zone choisie dans le cadre du projet FIOODGEN pour laquelle nous disposions de suffisamment d'informations pour estimer le bien-fondé de notre procédure.

3.1. Description du site d'étude

Le site d'étude est une région située à approximativement 30 km au nord de Lausanne en Suisse (figure 5). Sa superficie est de 75 km^2. La vocation agricole y est prépondérante malgré la présence de nombreux massifs forestiers qui morcellent le paysage et l'hétérogénéité du terrain étroitement liée au réseau hydrographique. La géomorphologie du terrain représente le facteur déterminant des pratiques culturales.

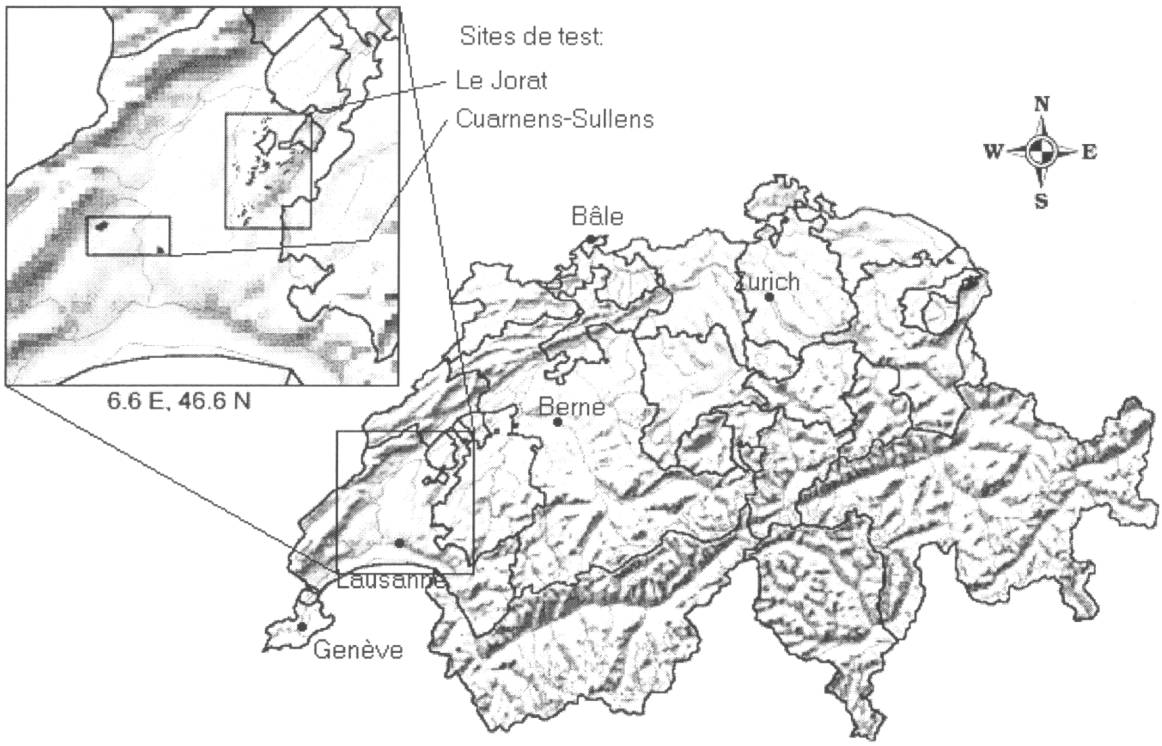


FIGURE 5 Localisation des sites de test. *Geographical localization of test sites*

Les principales cultures pratiquées sont des types céréaliers (blé d'hiver, orge, etc.) et fourrager. Les cultures sarclées sont pratiquées en moindre mesure car le terrain est moins favorable à ce type de culture intensive. Les données utilisées sont des images TM de Landsat - 5 acquises pendant les mois d'été en 1985, précisément les 26 juillet et 12 septembre. Les traitements sont appliqués sur deux sites tests du site d'étude : Cuamens-Sullens et le Jorat.

Outre leur localisation et leur géomorphologie, ces deux sites ont l'intérêt de posséder des assolements différents. Les cultures de céréales sont pratiquées plus fréquemment à Cuarnens-Sullens, alors qu'au Jorat, les prairies permanentes ou temporaires sont majoritaires.

Seuls les résultats pour l'année 1985 du site de Cuarnens-Sullens sont présentés ici. La situation des classes multidates issues de la première méthode est illustrée sur les figures 6a et b et celles de la seconde méthode sur les figures 7a et b. Les ellipses d'équiprobabilité correspondent à une fois l'écart-type. L'interprétation des classes multidates issues des deux méthodes de pré-classification a permis d'identifier six classes thématiques intermédiaires pouvant être rattachées à un des trois groupes de culture. Chaque classe thématique traduit une évolution spécifique de la végétation entre les deux dates d'acquisition des images. Une description de ces classes est donnée sur le tableau 1.

TABLEAU 1 Description des classes thématiques pour 1985. *Thematic class descriptions for 1985.*

Types	Description	Récolte	Exemples
Prairies	Champs couverts d'une manière continue par de la végétation verte	Non	Pâturage, prairie fourragère, jachère verte
Céréales 1	Champs cultivés en céréale, et laissés à nu après la récolte	Avant le 16 juillet	Blé d'automne / hiver, colza, jachère
Céréales 2	Champs cultivés en céréale	Entre le 26 juillet et le 12 septembre	Blé d'automne, d'hiver, colza, orge
Céréales 3	Champs cultivés en céréale avec semis d'une interculture après la récolte	Oui	Blé d'automne, d'hiver, colza, orge avec interculture
C. sarclées 1	Champs en cultures sarclées	Non	Maïs, tournesol
C. sarclées 2	Champs en cultures sarclées	Entre le 26 juillet et le 12 septembre	Patates, maïs

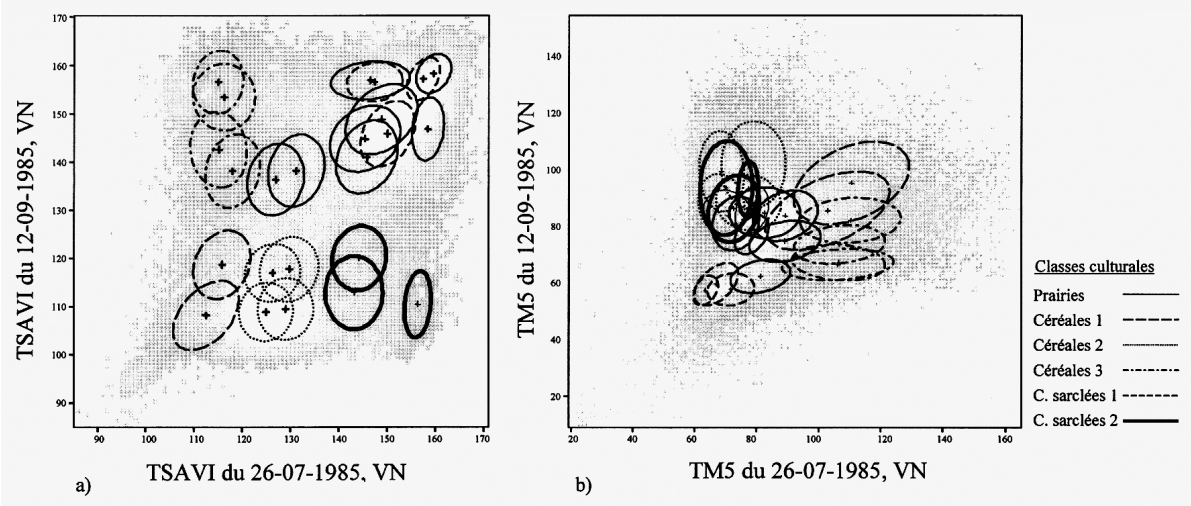


FIGURE 6 Situation des classes multidates issues de l'approche par pixel et leur catégorisation : site de Cuarnens-Sullens. *Multitdate class location according pixel-based approach and their categorization Cuarnens-Sullens site*

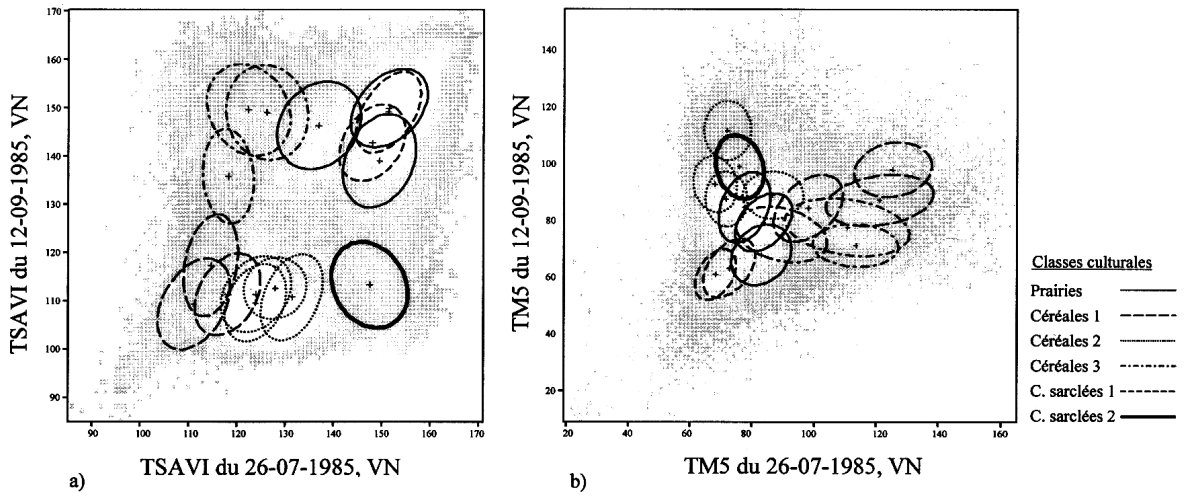


FIGURE 7 Situation des classes multidates issues de l'approche par région et leur catégorisation site de Cuarnens-Sullens. *Multitdate class location according region-based approach and their categorization Cuarnens-Sullens site*

La description de la clef d'interprétation utilisée pour la catégorisation des classes multidates est donnée sous la forme d'un diagramme illustrant les repères principaux utilisés (figures 8a et b). On observe que la plupart des classes thématiques sont bien séparées sur la base de l'évolution temporelle du TSAVI uniquement (figure 8a).

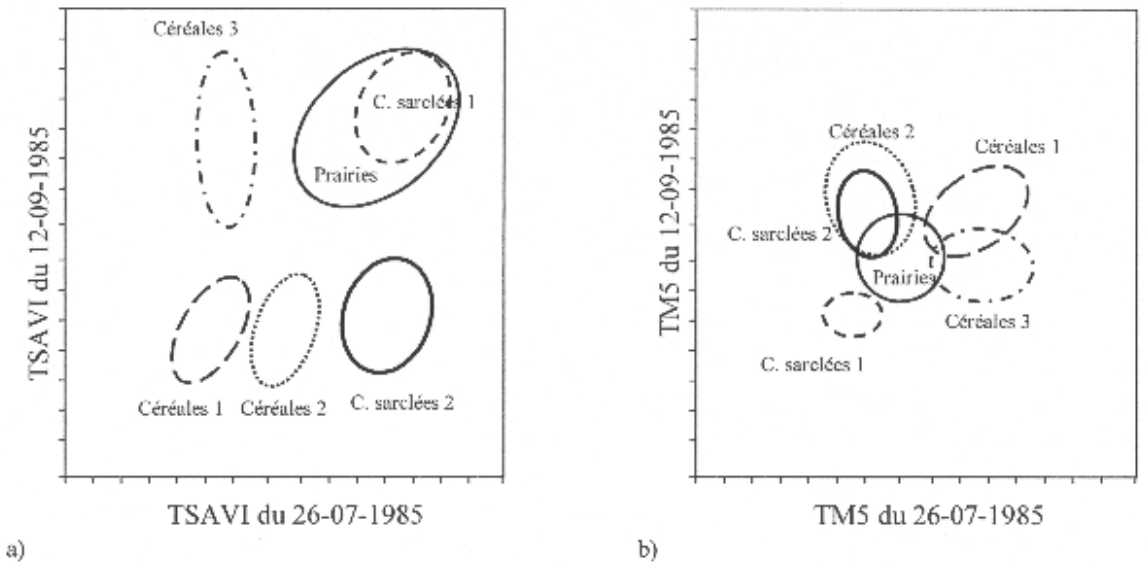


FIGURE 8 Repères utilisés pour l'interprétation des classes multidates et la définition des classes thématiques pour 1985 : site de Cuarnens-Sullens. *Guide marks used for multi date class interpretation and the thematic class definition for 1985 : Cuamens-Sullens site*

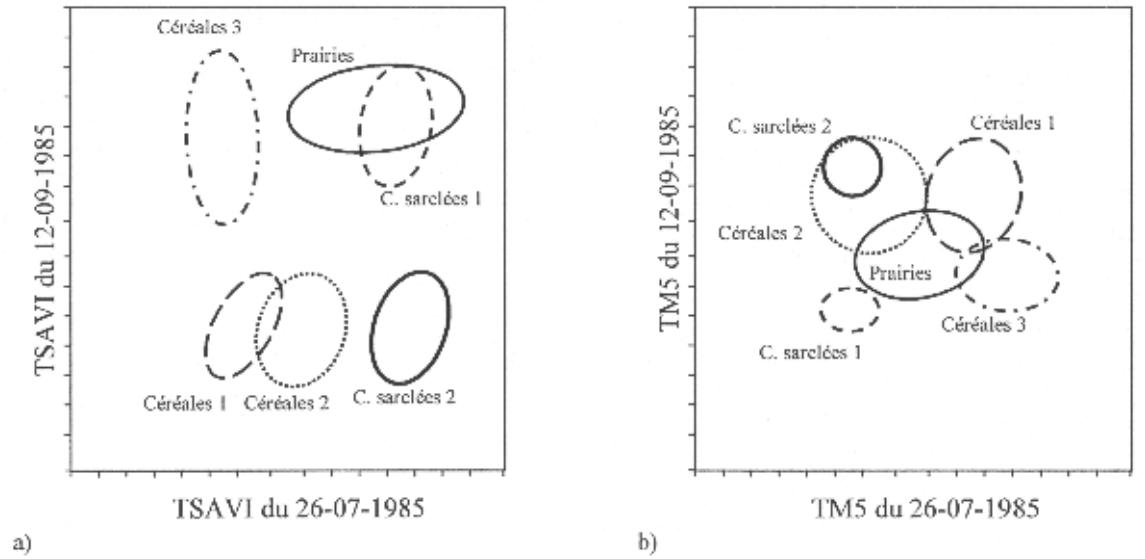


FIGURE 9a, 9b Repères utilisés pour l'interprétation des classes multidates et la définition des classes thématiques pour 1985 : site du Jorat. *Guide marks used for multi date class interpretation and the thematic class definition for 1985 : Le Jorat site*

Le groupe des céréales se sépare nettement des deux autres en raison de valeurs de TSAVI qui restent à un niveau bas. On distingue toutefois une classe de céréales présentant une augmentation du TSAVI en septembre, probablement en raison de la mise en place d'une interculture après la récolte. Dans la base de décision de la bande TM5, la dispersion des trois classes de céréale rend compte de l'influence variable de l'humidité du sol sur le proche infrarouge. La séparation des cultures sarclées par rapport aux

prairies est impossible avec le TSAVI seul et nécessite le recours au canal TM5 (figure 8b). La teneur en eau plus élevée des cultures sarclées produit une réponse plus faible dans le proche infrarouge. On observe toutefois un second type de cultures sarclées qui se distingue des autres cultures sur la base du TSAVI. Il s'agit de cultures récoltées d'une manière précoce à la fin du mois d'août. Les résultats obtenus sur le site de Jorat sont très similaires à ceux-ci puisque les mêmes classes thématiques sont observées dans une situation semblable (figure 9a et b).

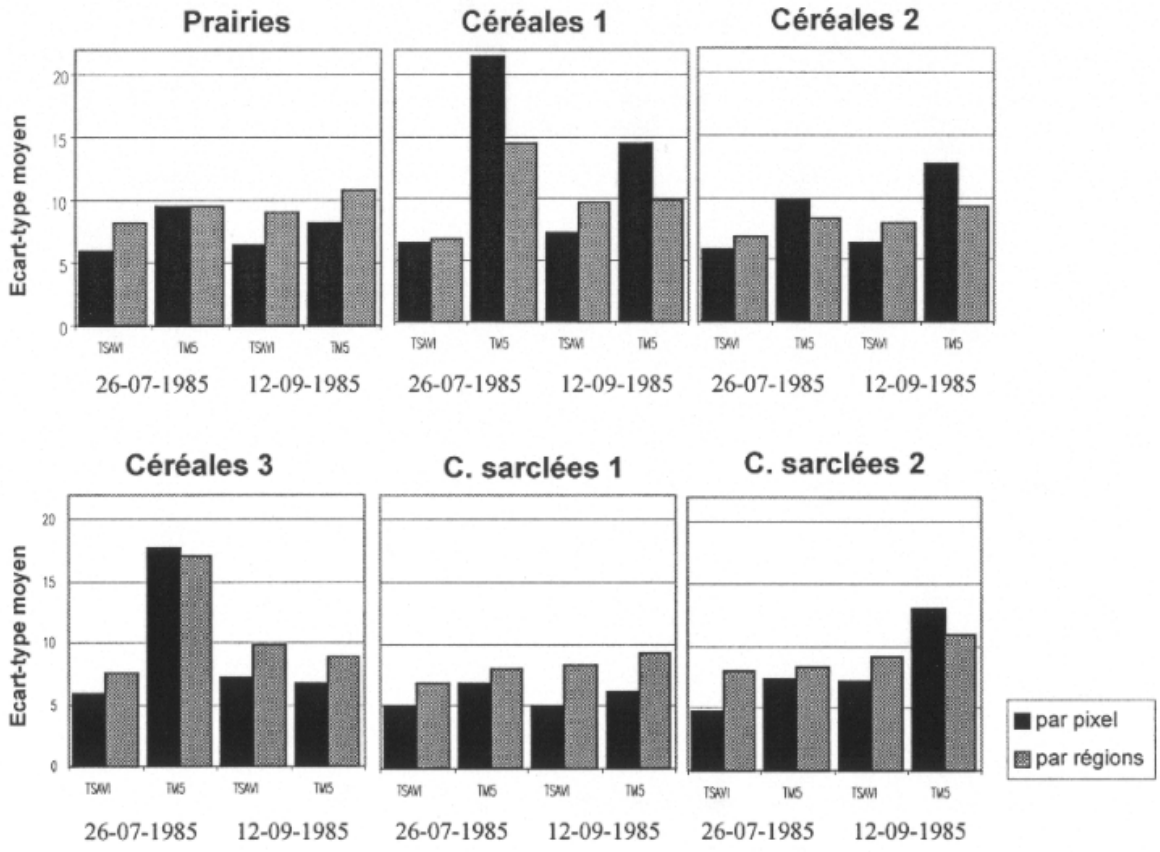


FIGURE 10 Comparaison de l'approche par pixel et par région suivant l'écart type moyen pour chaque attribut des classes thématiques. *Pixel-based and region-based approach comparison according to mean standard deviation for each thematic class attribute*

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Notre méthode s'est construite sur la mise à profit des connaissances est censé, *a priori*, posséder l'analyste sur la phénologie des cultures et sur les pratiques culturales de la région d'étude. Dans quelle mesure la pertinence de ces deux hypothèses s'est vérifiée ?

La première trouve sa justification par les observations faites à propos de l'évolution des signatures spectrales. En effet, l'état phénologique de la végétation au cours de l'année dépend, notamment, des conditions météorologiques. On observe bien plusieurs réponses spectrales pour une même culture à une date donnée qui, à leur tour, sont la source de plusieurs classes multidates pour une même catégorie thématique.

Les pratiques culturales concernent les types de cultures pratiquées ainsi que les semis d'interculture. Les deux s'observent par le fait qu'il a été nécessaire de définir des classes thématiques supplémentaires pour un même groupe de culture, notamment le groupe des céréales et celui des cultures sarclées.

Un autre point important était celui de la robustesse statistique de la phase de pré-classification. Elle paraît démontrée par le fait que l'on obtient une clef d'interprétation similaire (figures 8 et 9) par les deux approches choisies, par pixel ou par région. On observe toutefois une variance plus élevée des classes multidates

produites par l'approche pixel que celle correspondant à l'algorithme « croissance de région » (figure 10). Cette différence se manifeste par une taille des ellipses d'équiprobabilité plus importante sur la figure 7. La similarité des résultats obtenus sur les deux sites tests conforte la robustesse de la méthode, la variabilité spatiale des signatures de la végétation ne s'étant que faiblement manifestée. Une analyse de séparabilité des classes entre les deux sites permet de mieux quantifier cette similitude (tableau 2).

Les différentes classes observées traduisent bien les catégories d'occupation du sol présentes dans la région. On peut déduire, de surcroît, que la mise en application de la méthode à plus grande échelle est possible.

Notre étude confirme le potentiel de l'exploitation temporelle des variables TSAVI et TM5 (infrarouge) pour la détermination des catégories culturales présentant un intérêt pour la protection des sols contre l'érosion.

Elle met en évidence, une fois de plus, la pertinence d'une approche bayesienne des problèmes en sciences naturelles. Elle permet de suppléer le manque d'observations objectives sur le phénomène étudié et souvent sa complexité par les connaissances *a priori* en possession de l'analyste. Notre approche ouvre des perspectives sur une exploitation plus large des images d'archive lorsque l'évolution temporelle est utilisée pour compléter la signature spectrale d'une classe d'occupation du sol.

TABLEAU 2 Divergence transformée moyenne pour la comparaison des classes des deux sites test Site test de Cuarnens-Sullens. *Mean transformed divergence for test site class comparison*

		Prairies	Céréale 1	Céréale 2	Céréale 3	Sarclée 1	Sarclée 2
Site test du Jorat	Prairies	**1879**	*	*	*	1936	*
	Céréales 1	*	**1699**	1497	1852	*	*
	Céréales 2	*	*	**859**	*	*	1979
	Céréales 3	1973	*	*	**1592**	*	*
	Sarclées 1	1890	*	*	*	**1431**	*
	Sarclées 2	1986	*	*	*	*	**1779**

* : valeur supérieure à 1900, 2000 représente une séparabilité totale

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet européen FLOODGEN financé par le CEO sous le contrat ENV4-CT96-0386 et par l'Office Fédéral Suisse de l'Éducation et de la Science. Nous remercions Ferdinand Bonn, du CARTEL de l'Université de Sherbrooke, pour la lecture critique de notre article.

Références

ANDRIEU, B. and BARET, F. (1991) Étude par simulation de la sensibilité d'indices de végétation utilisant le moyen infrarouge. 5th International Colloquium, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, p. 597-600

BARET, F., GUYOT, G., BEGUE, A., MAUREL, P. and Podaire, A. (1988) Complementarity of Middle-infrared with visible and near-infrared reflectance for monitoring wheat canopies. Remote Sensing of Environment, vol. 26, no 3, p. 213-225.

BARET, F., GUYOT, G. and MAJOR, D. (1989) TSAVI : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. 12th Canadian symposium on remote sensing and IGARSS 89, Vancouver Canada, p. 1355-1358

BARET, F. and GUYOT, G. (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote sensing of the Environement, vol. 35, no 1, p. 161-173.

BAUER, M. E., DAUGHTRY, C. S. T. and VANDERBILT, V. C. (1981) Spectral-agronomic relationship of maize, soybean and wheat canopies. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Colloque international, Avignon, France, p. 261-272.

BOISSEZON, H. d., GONZALES, G., POUS, B. and SHARMAN, M. (1993) Rapid estimate of crop acreage and production at a european scale using high resolution imagery operational review. International Symposium operationalization of remote sensing, Enschede, The Netherlands, p. 94-105

CIHLAR, J., XIAO, Q., CHEN, J., BEAUBIEN, J., FUNG, K. and LATIFOVIC, R. (1998) Classification by progressive generalization : a new automated methodology for remote sensing multichannel data. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, no 14, p. 2685-2704.

CYR, L., BONN, F. and PEASANT, A. (1995) Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. Ecological Modelling, vol. 79, no 2-3, p. 277-285.

CYR, L., PERRAS, S., BONN, F., PEASANT, A. and WILLM, T. (1991) Évaluation de la couverture du sol en milieu agricole par mesures in-situ et images multitemporelles pour la modèlisation de l'érosion hydrique. Proceedings of the 5th international Colloquium Physical measurements and Signatures in remote Sensing, Courchevel, France, p. 659-662.

EERENS, H., HEMELINGS, T. and GOMBEER, R. (1991) An integrated modelling approach for the spectral identification of crops. Proceedings of the 5 th international Colloquium Physical measurements and Signatures in remote Sensing, Courchevel, France, p. 565-568.

HALL-KOENYVES, K. (1990) Crop monitoring in Sweden. International Journal of Remote Sensing, vol. 11, no 3, p. 461-484.

JACOBSEN, A., BROGE, N. H. and HANSEN, B. U. (1995) Monitoring wheat fields and grasslands using spectral reflectance data. International Symposium On Spectral Sensing Research, Melbourne, Australia, p. 157- 164.

KETTIG, R. L. and LANDGREBE, D. A. (1976) Classification mof multispectral image data by extraction and classification of homogenous objects. IEEE transactions on Geoscience electronics, vol. ge-14, no 1, p. 19-26.

LO, T. H., SCARPACE, F. L. and LILLESAND, T. M. (1986) Use of multitemporal spectral profiles in agricultural land-cover classification. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 52, no 4, p. 535-544.

MURPHY, D. L. (1985) Estimating Neighborhood Variability with a Binary Comparison Matrix. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 51, no 6, p. 667-674.

ODENWELLER, J. B. and Johnson, K. 1. (1984) Crop identification using landsat temporal spectral profiles. Remote Sensing of Environment, vol. 14, no 1-3, p. 39-54.

THENKABAIL, P. S., WARD, A. D., LYON, J. G. and MERRY, C. J. (1994) Thematic mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 60, no 4, p. 437-442.

TOWNSHEND, J. R. G. (1984) Agricultural land-cover discrimination using thematic mapper spectral bands. International Journal of Remote Sensing, vol. 5, no 4, p.681-698.