Télédétection, 2002, vol. 2, n° 3, p. 183-192
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2002 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

Évaluation de la bande moyen infrarouge TM5 pour l'identification des cultures et de la végétation naturelle en zone cotonnière du Burkina Faso

NICOLAS KONÉ*, SOULEYMANE PARÉ, LAMOURDIA THIOMBIANO et HALIDOU COMPAORÉ

Cellule de télédétection et systèmes d'informations géographiques
Institut de l'environnement et de recherches agricoles
01 B.P. 476, Ouagadougou 01, BURKINA FASO.
Téléphone : (226) 31 92 02 / (226) 31 92 08 ; télécopieur : (226) 34 02 71.
Courriel : nicokone@hotmail.com

(soumis le 18 décembre 2000 ; révisé le 10 avril 2001 ; accepté le 24 avril 2001)

L'utilisation de l'imagerie satellitale a permis d'évaluer l'occupation spatiale des principales cultures, des types de formations végétales et des surfaces dégradées en zone cotonnière du Burkina Faso. Afin d'évaluer l'apport pratique du canal dans le moyen infrarouge (MIR) du satellite SPOT-4 pour l'amélioration des résultats de statistiques agricoles et la cartographie des grandes formations végétales obtenus avec les capteurs de la première génération de satellites SPOT (1, 2 et 3), nous avons utilisé des images TM de Landsat sur la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso. Ces données ont été corrélées avec la réalité de terrain. Les résultats de cette étude montrent que le mixage du canal dans le moyen infrarouge TM5 avec les deux canaux classiques (proche infrarouge et rouge) permet de mieux distinguer les savanes (arborées et boisées) des formations ripicoles, et les éléments physiques du milieu (buttes, cuirasses, affleurements rocheux, etc.). De même, la distinction entre le coton et les céréales est améliorée, notamment dans la zone des collines birrimiennes où existaient des confusions avec la végétation naturelle du fait de la présence de roches vertes. La bonne identification des céréales (sorgho, mil, maïs) entre elles reste encore par contre un thème à approfondir.

Mots-clefs : cartographie ; télédétection ; bande spectrale ; moyen infrarouge ; zone cotonnière ; Burkina Faso.

Assessment of shortwave infrared band TM5 for crop and natural vegetation discrimination in the cotton belt of Burkina Faso

Satellite imagery use led to assess spatial covering of the main cultivated crops, plants formations types and degraded soils in the cotton belt of Burkina Faso. In order to assess practical effect of the channel in the shortwave infrared (SWIR) spectral band of the SPOT-4 satellite, Landsat Thematic Mapper band 5 have been used to simulate it. TM images on the cotton area of Burkina Faso have been used in addition to field investigations to assess the improvement of farms data and main plants formations mapping results obtained with the sensors on board the first SPOT satellites generation (SPOT 1, 2 and 3). The results of this study show that mixing the channel in SWIR band TM5 with the two classic channels (Near Infrared and Red) allows to make types of savannas (wooded and arboraceous), forest galleries and physical elements in the area (mounds, iron pans, rocky outcrops, etc). In the same way, the sight of coton and cereal crops formerly confused is improved, mainly in the Birimian geological basement where there were doubts in natural vegetation identification due to green rocks. Those latter of birimian hills have a similar radiometric behaviour in the visible and near infrared bands as green vegetation and they are usually covered by a perennial grass influencing the global radiometry. The fair identification of cereal crops (sorghum, millet, corn) between them remains a subject we will have to face in the future.

Keywords : cartography ; remote sensing ; spectral band ; shortwave infrared ; cotton area ; Burkina Faso.

1. INTRODUCTION

Jusqu'à une date récente, les images du capteur HRV (XS) ou (P) de la première génération du satellite SPOT (1, 2 puis 3), de même que TM ou MSS de Landsat ont été utilisées pour améliorer la statistique agricole (Lainé et Paré, 1996), évaluer l'emprise culturale et cartographier les grands types de formations végétales en zone cotonnière du Burkina Faso (Belem *et al.*, 1987 ; Fontès *et al.*, 1990 ; Fontès et Guinko, 1995). Avec ces études, on a montré la capacité de distinguer le coton et les céréales sur une image à trois bandes spectrales, notamment les domaines du vert, du rouge et du proche infrarouge, à condition que les prises de vue soient faites à des

* Correspondant principal

dates bien précises correspondant à une période où le coton est déjà en fin de maturité. Cela est réalisable avec une précision de 80 à 85 %. Par ailleurs, avec ces mêmes bandes spectrales, on peut cartographier les principaux types de formations végétales de la zone avec une précision semblable (85 à 90 %) et parfois moins bonne (70 %) pour des cas de recouvrement foliaire analogue mais de types physionomiques différents (De Wispelaere, 1990 ; Fontès et Guinko, 1995 ; Sanon *et al.*, 1996). On pourrait s'attendre à ce que ces résultats soient encore améliorés en utilisant plus de bandes spectrales (Bonn et Rochon, 1992). Ainsi, à ce titre, nous avons tenté de démontrer l'opérationnalité de la bande du moyen infrarouge du capteur de la seconde génération de satellite SPOT dans les domaines des ressources terrestres. L'étude suivante a été conduite dans la région de Safané avant le lancement de SPOT-4 et s'appuie sur les données du canal TM5 de Landsat pour simuler la bande spectrale moyen infrarouge prévue sur SPOT-4.

2. ZONE D'ÉTUDE

Située à l'ouest du Burkina Faso, la zone d'étude (figure 1) est localisée autour de la ville de Safané et s'étend sur une superficie d'environ 6 200 km^2, entre les coordonnées 3,08° O à 3,63° O et 11,68° N à 12,30° N. Le régime pluviométrique est unimodale et la pluviométrie moyenne annuelle varie de 800 à 900 mm durant 4 à 5 mois, de mai à septembre (Direction de la météorologie nationale, 1997). La saison sèche dure de 7 à 8 mois. Les principaux types de sols rencontrés (Leprun et Moreau, 1969 ; Kissou, 1994) sont des sols minéraux bruts sur les collines birrimiennes et des sols peu évolués d'apport colluvial au niveau des versants, des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions, dominant au niveau des glacis, des sols bruns eutrophes tropicaux dans la zone birrimienne et des sols hydromorphes pseudogley ou amphigley dans les bas-fonds.

La zone d'étude se prête bien à la culture du coton (*Gossypium barbadense*) dont les exigences pluviométriques annuelles sont de 800 mm en moyenne et demande des sols fertiles d'une profondeur de 30 à 40 cm au moins (Belem *et al.*, 1987 ; Laine et Paré, 1996). Les différentes cultures pratiquées dans la zone sont le mil (*Pennisetum typhoides*), le sorgho (*Sorghum bicolor, S. durum*), le maïs (*Zea maize*), le voandzou ou pois chiche (*Voandzea subteranea*), la patate (*Hypomea batatas*), l'arachide (*Arachis hypogea*) et le sésame (*Sesamum indicum*). La culture spéculative du coton est pratiquée dans la plupart des exploitations agricoles avec une proportion qui diffère selon le groupe ethnique du propriétaire.

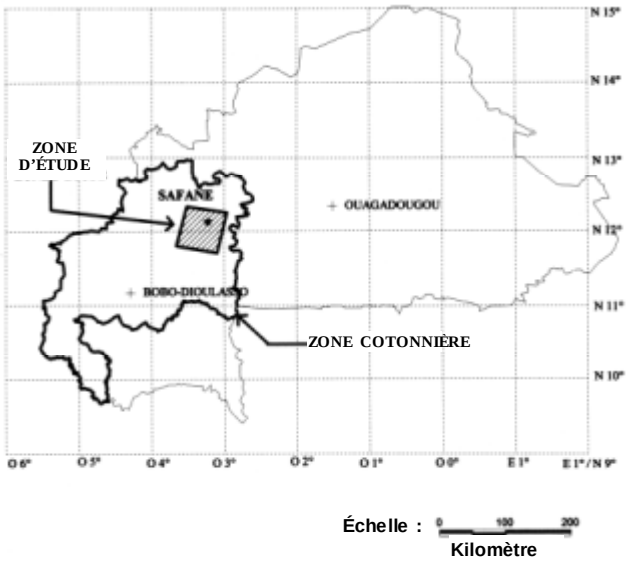


FIGURE 1 Localisation de la zone d'étude. *Location of the study area.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les capteurs et détecteurs d'observation de la Terre, dont le principe est de capter l'énergie solaire réfléchie par les surfaces terrestres ou l'énergie thermique émise intègrent une portion d'énergie dans une bande de longueurs d'onde données (Bonn et Rochon, 1992). Cette bande spectrale constitue un intervalle spectral autour d'une longueur d'onde moyenne. Ainsi, il importe de rappeler qu'il existe plus ou moins une équivalence spectrale respectivement entre les trois bandes spectrales XS du capteur HRV à bord du satellite SPOT, et les trois bandes TM2, TM3 et TM4 du capteur TM de Landsat (tableau 1).

TABLEAU 1 Équivalence entre les bandes spectrales des capteurs HRV (XS) de SPOT et TM Landsat. *Spectral band equivalence between SPOT HRV(XS) and Landsat TM.*

Canaux de HRV (XS)	Canaux de TM	Appellation commune
	TM1 (0,45-0,52 µm) - 30 m	Bleu
XS1 (0,50-0,59 µm) - 20 m	TM2 (0,52-0,60 µm) - 30 m	Vert
XS2 (0,61-0,68 µm) - 20 m	TM3 (0,63-0,69 µm) - 30 m	Rouge
XS3 (0,79-0,89 µm) - 20 m	TM4 (0,76-0,90 µm) - 30 m	Proche infrarouge
	TM5 (1,55-1,75 µm) - 30 m	Moyen infrarouge
	TM7 (2,08-2,35 µm) - 30 m	Moyen infrarouge
	TM6 (10,4-12,5 µm) - 120 m	Infrarouge thermique

(tiré de Bonn et Rochon,1992)

L'utilisation en cartographie d'images synchrones obtenues de la même zone pour plusieurs bandes spectrales enrichit les capacités d'analyse grâce à l'information spectrale (Beaubien, 1984). Les études de Bonn et Cliche (1982) ont montré, dans le cas de la région agricole du sud du Québec, que l'information contenue dans la bande TM5 de Landsat, c'est-à-dire du canal dans le moyen infrarouge, est statistiquement indépendante de celles des autres bandes. Ils notent que cette bande est très sensible à la teneur en eau des végétaux et à la biomasse avec quelques exception. À leur suite, les travaux de Thomson *et al.* (1984) confirment la grande sensibilité de ce canal à l'humidité de surface présente dans les végétaux et le sol.

Pour simuler les données du canal dans le moyen infrarouge sur SPOT-4 en zone cotonnière du Burkina Faso, nous avons alors utilisé les seules informations de simulation disponibles, celles contenues dans la bande TM5 de Landsat. L'étude conduite avant le lancement de SPOT-4, les données TM ont ainsi été utilisées pour simuler le comportement spectral dans les bandes XS1, XS2, XS3 et du canal dans le moyen infrarouge en gardant la taille des pixels à 30 mètres. Une simulation plus rigoureuse des données multispectrales de SPOT-4 à partir des données du capteur TM de Landsat nécessiterait une réalisation en deux étapes : celle des bandes spectrales d'abord, puis de la résolution spatiale (Thomson *et al.*, 1984) ; bien que plus rigoureuse, cette manière de procéder ne génère pas de données de simulation absolues à cause de la différence entre les modes d'acquisition d'image entre les deux capteurs. D'ailleurs, le rééchantillonnage des pixels de 30 à 20 m risque d'introduire des valeurs radiométriques purement artificielles avec un lissage linéaire ou bilinéaire. Dans la configuration de notre étude, pour évaluer l'apport du canal moyen infrarouge, il faut d'abord établir la précision actuelle de la capacité à cartographier des canaux vert, rouge et proche infrarouge.

L'hypothèse est que l'identification visuelle sur la composition colorée donne une bonne idée des possibilités de classification. Une composition colorée à partir des canaux TM2, TM3 et TM4 de l'image TM 196/52 de Landsat acquise le 3 octobre 1990 a été élaborée à cet effet. Elle a été utilisée comme support pour les missions de réalité de terrain (août, novembre et décembre 1996). À cause de l'écart de six ans entre les deux dates, plusieurs hypothèses ont été posées, notamment sur la couverture au sol et l'utilisation des terres, pour permettre de relativiser les résultats d'observations sur le terrain. Les données pluviométriques recueillies à la Direction de la météorologie nationale du Burkina Faso (figure 2) indiquent une baisse en 1990 du nombre de jours de pluies d'environ 15 jours dans la zone d'étude par rapport à 1996, entraînant une baisse des hauteurs de pluie de 110 à 200 mm, voire 400 mm.

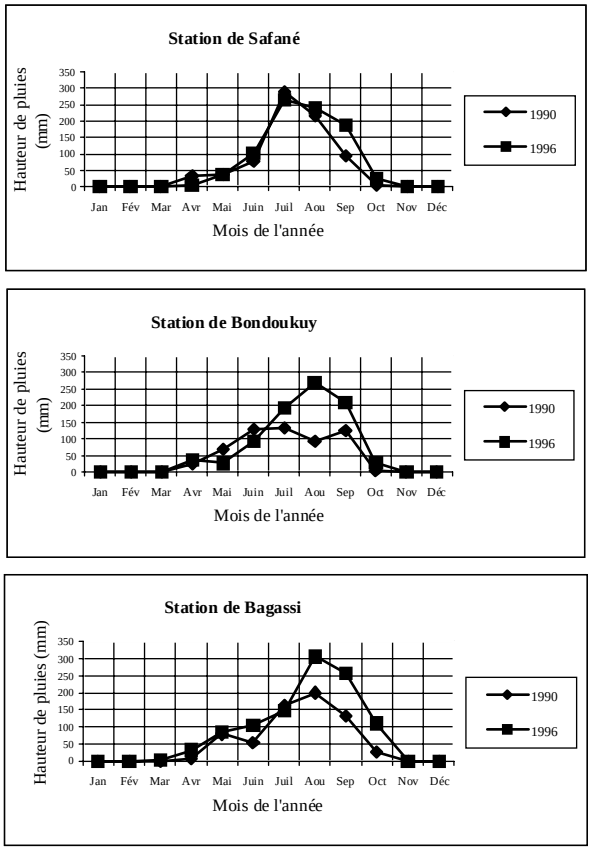


FIGURE 2 Pluviométrie sur trois stations météorologiques couvrant la zone. *Mean rainfall in three meteorological stations on the study area.*

L'expérience montre que les producteurs savent s'adapter à certaines conditions climatiques par les techniques variétales endogènes (Chantereau et Nicou, 1991 ; INERA, 1993), l'observation et l'association d'indicateurs écologiques empiriques pour la détermination de la période de semis (arrivée des pluies, reprise du tapis herbacé, fin de fructification du karité ou *Butyrospermum paradoxum* subsp *parkii*, cueillette des fruits du néré ou *Parkia biglobosa* et mûrissement du « pekoun » ou *Lannea microcarpa*, migrations de certains oiseaux, etc) et le suivi de la campagne agricole. Quant aux formations naturelles, elles n'ont pas connu de changement climatique profond et sont moins sensibles à l'impact de six années de fluctuations climatiques dans cette

zone agro-écologique. Par contre, l'érosion hydrique peut apparaître comme un facteur important de dégradation des terres à cause de l'agressivité des pluies et du ruissellement. Cela se traduit par un lessivage des horizons de surface du sol, la perte de matière organique et l'augmentation de la réflectance (INERA, 1993 ; Kissou, 1994). Ainsi, lors d'observations sur le terrain, outre l'évaluation rapide de l'impact de l'évolution climatique sur l'état de la couverture actuelle au sol, le degré d'anthropisation du site de sondage est un critère très important pour juger de la nécessité de mener des enquêtes plus ou moins approfondies. Des relevés sur le terrain ont été effectués par zonage sur la base d'homogénéité dans la teinte, la texture et la structure d'une zone de l'image. Les observations sur le terrain ont eu pour objectif d'interpréter les différences de teintes observées sur la composition colorée de l'image satellitale et la réalité des composantes du paysage naturel. Ces composantes sont la végétation, les parcelles de cultures, la topographie, la géologie, l'hydrographie, la géomorphologie et les sols. Ainsi, les critères de description de site utilisés sont :

– le type de formation végétale (savanes, cordon ripicole, bowé) avec les espèces ligneuses et herbacées dominantes en ce qui concerne la végétation ;

– la présence de buttes (rocheuse, cuirassée), d'interfluve (cuirassée, gravillonnaire), de glacis (gravillonnaire, argile/sable/limon), de bas-fonds, etc. pour la topographie ;

– la présence d'affleurements de roche ou de cuirasse pour la structure géologique ;

– la texture limon/sable/argile et la couleur du sol (code Munsell) pour les sols ;

– les types actuels de cultures et la localisation du site en rapport avec le village le plus proche dans un premier temps en ce qui concerne les parcelles. Ces informations serviront à vérifier par la suite les hypothèses sur les pratiques culturales dans la zone, notamment en ce qui concerne le respect des systèmes de rotation des cultures depuis l'introduction de la culture du coton et l'encadrement des producteurs par les agents de développement rural (Paré, 1993 ; Lainé et Paré, 1996).

Ainsi, pour se placer dans la configuration optimale d'observation de terrain nécessaire, la première mission de reconnaissance a eu lieu en août pour les formations végétales surtout et le parcellaire dans une moindre mesure. En effet, compte tenu du décalage de six ans entre la date d'acquisition de l'image et le terrain, il était plus recommandé de conduire les enquêtes aréolaires après les récoltes (mi octobre à novembre) alors que les paysans sont plus disposés à se prêter aux questions. La première mission de reconnaissance de terrain a été complétée par la suite avec des observations en début novembre et en fin décembre. Les sondages ont validé des unités d'entité teinte, texture et structure homogène, avec une moyenne de cinq observations localisées au moyen d'un récepteur portable de type Garmin GPS 50. La dernière phase de terrain, plus orientée sur le parcellaire a consisté en des entretiens très poussés avec les propriétaires des champs pour établir l'historique des parcelles pendant une période de six à dix ans. Toutes ces observations géoréférencées servent par la suite à la constitution de parcelles d'apprentissage et de contrôle pour la classification automatique par maximum de vraisemblance à partir du logiciel *MultiScope*™.

Dans seconde étape, on a évalué l'apport de la bande moyen infrarouge, ici la bande TM5, pour l'amélioration des statistiques agricoles et la cartographie des grandes formations végétales. Pour prendre en compte cette bande spectrale, testée visuellement sur la base d'une combinaison de la bande moyen infrarouge avec les autres canaux, les résultats de la photo-interprétation visuelle de cette combinaison sont comparés à ceux de la composition colorée classique. L'espace des couleurs étant constitué des trois couleurs fondamentales, rouge, vert et bleu, nous avons testé la combinaison de trois canaux bruts parmi quatre qui donne le maximum d'informations dans la problématique d'identification des cultures (coton/maïs/mil/sorgho) et des formations végétales.

Une autre technique utilisée ici pour exploiter les informations de l'ensemble des quatre canaux bruts est d'élaborer l'analyse en composantes principales des quatre bandes spectrales. Cela permet de prendre en compte toute l'information contenue dans chaque canal brut par la considération de la notion d'information en imagerie optique qui reste liée à la variance des comptes numériques (Leboucher and Lowitz, 1978 ; Richards, 1986).

L'analyse en composantes principales s'appuie sur la matrice de corrélation entre les canaux bruts ou la matrice de covariances subséquentes, ce qui permet de générer de nouveaux canaux où les informations contenues par ces canaux dérivés sont supposées non redondantes. Le néocanal issu de la première composante de l'analyse en composantes principales constituant un canal dérivé, une autre configuration permettant d'évaluer l'apport de la bande spectrale moyen infrarouge est de la combiner avec les deux canaux bruts les moins corrélés parmi les quatre.

Les résultats de classification sont d'abord vérifiés au laboratoire à l'aide d'une matrice de confusion qui mesure la proportion des pixels de parcelles d'apprentissage et de contrôle bien ou mal classées. Une dernière vérification de cette classification est réalisée sur le terrain avant de valider les résultats grâce aux enquêtes sur l'historique des parcelles de cultures et des formations végétales en relation avec des prises de vues aériennes basse altitude réalisées en 1992 et 1993 (Lainé, 1993 ; Paré, 1993).

4. RÉSULTATS

Les observations de terrain ont permis d'identifier près de neuf classes sur la composition colorée de l'extrait de l'image TM du 03-10-1990 (figure 3) :

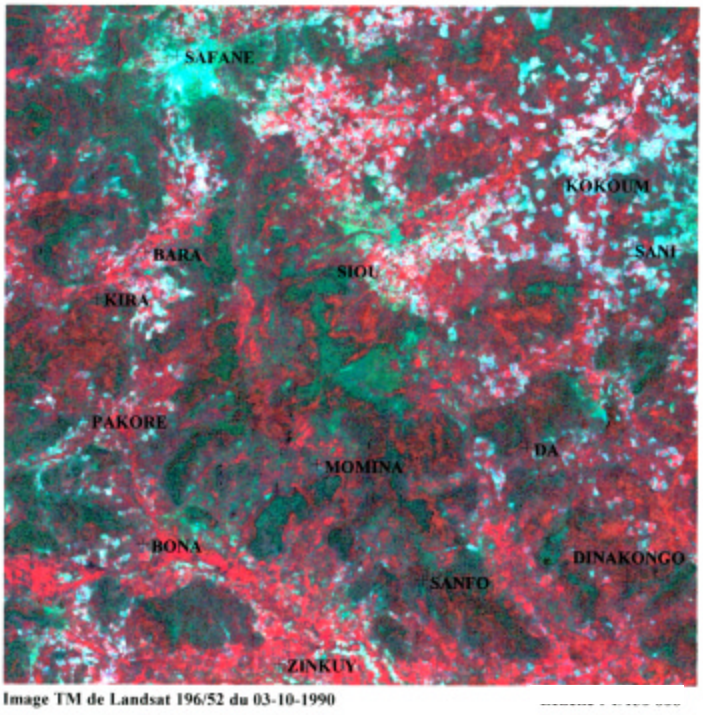


FIGURE 3 Composition colorée RGB des bandes TM 4/3/2. *RGB Color composition of bands TM 4/3/2.*

– les **bowé** qui apparaissent en verdâtre avec des taches rouge/rose dues à la chlorophylle de la végétation ;

– les **buttes et affleurements de cuirasse** qui sont en vert sombre comportant des taches rosâtres ou bleuâtres ;

– les parcelles de **coton** qui se distinguent par leurs formes géométriques rougeâtres, la forme étant liée au parcellaire ; la taille du pixel de 30 m n'est pas un handicap pour l'identification de cette culture de rente où la superficie de ce type de champ est en général supérieure à 2 ou 3 ha.

– les **formations ripicoles** sont des cordons rougeâtres quand les canopées sont jointives et denses, ou par association des cordons autour des zones de teintes noirâtres lorsque les lits mineurs des bas-fonds sont visibles ;

– les parcelles de **céréales** apparaissent comme des formes géométriques blanchâtres pour la céréale 1, ou bleuâtres pour la céréale 2 : les enquêtes de terrain autorisent à penser qu'il est fort probable que la céréale 2 soit du sorgho tandis que la céréale 1 serait du mil ou parfois du maïs ;

– les **plans d'eau** sont en noir (eau limpide) ou en bleu (eau turbide) avec une forme géométrique régulière lorsqu'ils sont aménagés ;

– les **savanes** (arborée et arbustive) sont des taches de rouge de pureté variable en fonction du recouvrement herbacé et de la densité des arbres ou des arbustes.

La classification automatique de l'image composée des bandes spectrales TM2, TM3 et TM4 donne la matrice de confusion suivante pour les différentes classes (tableau 2).

De l'examen de cette matrice de confusion, il se dégage que les unités sont assez bien reconnues dans l'ensemble (81,7 à 96,3 % de succès) sauf dans le cas de la savane arbustive où on observe seulement un taux de classification de 67,3 %.

Pour évaluer l'apport du canal dans le moyen infrarouge dans l'identification des unités, la composition TM4, TM5 et TM3 a retenu notre attention pour l'identification visuelle après plusieurs tests avec d'autres compositions différentes de la classique (trois au total : 2/3/5, 2/4/5 et 3/4/5, sans considération de l'ordre). Il ressort que la morphologie des paysages apparaît beaucoup plus nettement, notamment le parcellaire, l'hydrographie et les limites des éléments physiques (buttes, collines, affleurements rochers). Sur le tableau 3, on donne la situation sur les confusions possibles.

On constate que la bande dans le moyen infrarouge (i.e. TM5) permet d'améliorer de façon sensible la discrimination des différents thèmes, excepté les bowés et la céréale 2 qui enregistrent une baisse sensible (1,9 % et 8,7 % respectivement).

Dans tous les deux cas, on peut souligner un taux de rejet assez important (3,7 % en moyenne) au regard des matrices de confusion, ce qui représente un espace géographique de plus de deux à trois terroirs villageois dans la zone.

Pour tenir compte de l'ensemble des informations disponibles, notamment celles du canal dans le vert (i.e. TM2), nous avons élaboré l'analyse en composantes principales (ACP) des quatre canaux bruts. Les matrices de corrélation et de passage aux plans ACP sont données sur le tableau 4.

On constate que la plus petite corrélation entre le canal dans le moyen infrarouge (i.e. TM5) et les autres est celle avec le canal dans le proche infrarouge (i.e. TM4) qui vaut 0,21. La plus forte valeur de coefficient de corrélation relevé (0,92) se trouve entre les canaux dans le vert (i.e. TM2) et dans le rouge. (i.e. TM3). C'est pour cela que la composition 4/3/2 donne moins d'informations. La classification à partir de la composition TM4, TM5 et ACP0 (première composante principale) donne une matrice de confusion (tableau 5) qui semble plus intéressante que la précédente (tableau 4). On observe une meilleure identification des buttes/cuirasse (89,8 %) , du coton (98,3 %) et des céréales 2 (96,3 %). La précision de l'identification des autres classes reste presque stationnaire. Le taux de rejet d'ensemble des pixels passe en moyenne de 3,6 à 3,9 %, ce qui n'est pas significatif (0,3 %) par rapport au gain en précision dans l'identification des surfaces.

TABLEAU 2 Matrice de confusion de la classification à partir de la combinaison des canaux TM4/TM3/TM2. *Confusion matrix from classification by the use of TM spectral bands 4, 3 and 2.*

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**Rejet**
1 - Bowé	**96,3**	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
2 - Buttes / Cuirasse	7,1	**85,8**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	2,4
3 - Coton	0,0	0,0	**94,9**	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2
4 - Formation ripicole	0,0	0,0	0,0	**82,2**	0,0	0,0	11,9	0,9	0,0	5,0
5 - Céréale 1	0,2	0,0	0,0	0,0	**89,6**	0,0	0,0	5,2	2,0	3,0
6 - Plan d'eau	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**93,3**	0,0	0,0	0,0	6,7
7 - Savane arborée	0,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,0	**81,7**	8,1	0,0	1,5
8 - Savane arbustive	0,4	21,2	0,0	0,0	1,3	0,0	6,2	**67,3**	0,0	3,6
9 - Céréale 2	0,7	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,3	**93,7**	3,3

TABLEAU 3 Matrice de confusion de la classification à partir de la combinaison des canaux TM4/TM5/TM3. *Confusion matrix from classification by the use of TM spectral bands 4, 5 and 3.*

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**Rejet**
1 - Bowé	**94,4**	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7
2 - Buttes / Cuirasse	7,9	**86,6**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	2,3
3 - Coton	0,0	0,0	**97,4**	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6
4 - Formation ripicole	0,0	0,0	0,0	**91,3**	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	7,3
5 - Céréale 1	0,4	0,0	0,0	0,0	**92,8**	0,0	0,0	0,4	3,4	3,0
6 - Plan d'eau	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**94,3**	0,0	0,0	0,0	5,7
7 - Savane arborée	0,0	0,0	0,0	8,4	0,0	0,0	**85,2**	5,2	0,0	1,2
8 - Savane arbustive	0,4	17,7	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	**74,2**	0,0	3,6
9 - Céréale 2	0,7	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	**89,6**	3,3

TABLEAU 4 Matrices de corrélation et de transformation de l'analyse en composantes principales. *Correlation and transformation matrices in a principal component analysis of TM spectral bands 5,4,3 and 2.*

	TM5	TM4	TM3	TM2
TM5	1,00	0,21	**0,88**	**0,86**
TM4	0,21	1,00	0,07	0,34
TM3	**0,88**	0,07	1,00	**0,92**
TM2	**0,86**	0,34	**0,92**	1,00

	TM5	**TM4**	**TM3**	**TM2**	**Cst**
1e Composante	0,94	0,57	2,22	4,03	–213,28
2e Composante	–0,28	5,04	–1,72	0,43	–197,20
3e Composante	6,04	0,08	–6,26	–13,76	279,55
4e Composante	–0,95	5,37	23,56	–40,86	357,01

TABLEAU 5 Matrice de confusion de la classification à partir de la combinaison des canaux TM4/TM5/ACP0. *Confusion matrix from classification by the use of TM spectral bands 4, 5 and the first principal component.*

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Rejet
1 -	**Bowé**	**93,5**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,5
2 -	**Buttes / Cuirasse**	0,0	**89,8**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,9	0,0	2,3
3 -	**Coton**	0,0	0,0	**98,3**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7
4 -	**Formation ripicole**	0,0	0,0	0,0	**92,7**	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	6,4
5 -	**Céréale 1**	0,7	0,0	0,0	0,0	**92,2**	0,0	0,0	0,4	3,2	3,5
6 -	**Plan d'eau**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**89,5**	0,0	0,0	0,0	10,5
7 -	**Savane arborée**	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	0,0	**85,5**	6,1	0,0	1,1
8 -	**Savane arbustive**	0,4	16,5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	**76,7**	0,0	2,7
9 -	**Céréale 2**	0,7	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	**96,3**	1,0

Sur la figure 4, on présente un résumé du degré de confusion par thème pour les trois types de combinaisons de bandes spectrales ou de bandes dérivées effectuées.

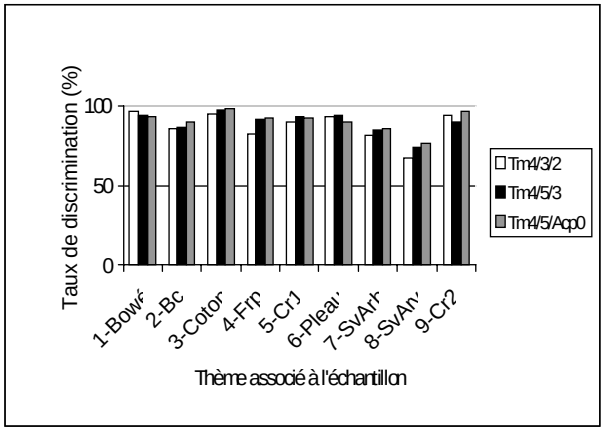


FIGURE 4 Distinction des échantillons de surface en fonction de la combinaison de bandes spectrales. *Land cover types discrimination according to spectral bands combination.*

Outre la vérification par les matrices de confusion, les résultats de classification ont été validés sur le terrain pour chaque type d'unité. La vérification des formations naturelles et des plans d'eau n'a pas posé de problème majeur. Par contre, il n'en a pas été de même pour le parcellaire à cause de l'ancienneté de la date d'acquisition des images où il a fallu des enquêtes historiques approfondies auprès des propriétaires de champs pour connaître leurs pratiques culturales effectives et déterminer le type de cultures en fonction des cycles de rotation. Lors des entretiens avec les paysans, il est apparu qu'en général il y a un manque d'intérêt à répondre aux questions dès lors qu'on dépasse trois « hivernages » et que le schéma théorique de la rotation de cultures coton/céréales n'est pas toujours respecté. L'application de ce schéma reste tributaire de la conjoncture socio-économique et des aléas climatiques. En relation avec ces enquêtes, des documents annexes portant sur une campagne de prise de vues aériennes basse altitude en 1992 et 1993 pour les statistiques agricoles dans la zone d'étude (Lainé, 1993 ; Paré, 1993) ont permis une tentative de reconstruction assez fidèle du parcellaire correspondant à la date d'acquisition de l'image TM de Landsat en 1990.

5. DISCUSSION

On sait que la texture de l'horizon de surface du sol a une influence sur la réflectance des surfaces élémentaires qui composent un pixel (environ 30 m × 30 m ici). Cette influence varie en fonction du taux de recouvrement du sol par la végétation ou les cultures. Ces données sont très importantes pour l'analyse et l'interprétation de la composition en fausses couleurs des combinaisons de bandes spectrales.

5.1. Composition colorée

En octobre, les parcelles cultivées en céréales 2, très probablement du sorgho, apparaissent en bleuâtre sur une composition colorée classique parce que le sorgho est encore sur pied, recouvrant bien le sol avec les feuilles en

sénescence qui sont brunes à rougeâtres. Les parcelles apparaissant en blanchâtre sont cultivées en céréales 1 qui peuvent être du maïs ou du mil ; celles en maïs apparaissent en sols nus blanchâtres parce que récoltées bien avant les autres et qu'on a des sols clairs de texture limono-sableuse ou argilo-sableuse. On constate dans la zone d'étude que les sols nus sableux apparaissent blanchâtres, les sols gravillonnaires ou les cuirasses verdâtres, et les sols limoneux à limono-sableux bleuâtres. Ceci confirme les observations faites ailleurs en zone sahélienne par différents auteurs (De Wispelaere, 1990 ; Sanon *et al.*, 1996). Le mil est une céréale qui supporte bien les sols squelettiques, sa principale exigence étant le drainage parce qu'il ne supporte pas l'inondation. Les parcelles cultivées en mil sur des sols variés peuvent apparaître bleuâtre, blanchâtre ou même verdâtre suivant la texture de l'horizon de surface. Cependant, certaines zones dénudées (glacis, berges de rivières, espaces dégradées péri villageoises) sont blanchâtres ou en bleu verdâtre également. L'irrégularité de leurs formes permet alors de les distinguer des parcelles par un contourage manuel.

Selon le tableau 2, la savane arbustive est plus difficile à discriminer à partir d'une composition des canaux dans le vert, le rouge et le proche infrarouge et se confond à 21 % avec les buttes et affleurements de cuirasse qui s'individualisent mieux. Cette confusion pourrait être due au fait que, précisement, les savanes arbustives de ce secteur apparaissent le plus souvent sur cuirasse ou sur sols gravillonnaires. Quant à la savane arborée et la formation ripicole, elles se confondent avec un taux variable entre 8,7 et 11,9 %. On peut expliquer cela par l'importance du taux de recouvrement végétal au niveau des cordons ripicoles ; mais la confusion pourrait être levée en tenant compte de la position et de la linéarité de ce type de paysage grâce à un outil d'analyse de structure. Les deux types de savanes (arbustive et arborée) se confondent avec un taux variable de 6,2 à 8,1 %. La difficulté de discriminer ici ces deux types physionomiques proviendrait de la densité en arbustes et du recouvrement ligneux ou herbacé qui peuvent être différents alors que la réflectance d'ensemble est la même.

5.2. Utilisation du canal dans le moyen infrarouge

L'utilisation du canal dans le moyen infrarouge en combinaison avec les canaux dans le rouge et le proche infrarouge permet de mieux faire ressortir la morphologie des paysages notamment le parcellaire, l'hydrographie et les limites des éléments physiques comme les buttes, les collines et les affleurements rochers. Dans ce cas, la distinction entre les formations ripicoles et les savanes arborées est améliorée, la confusion baissant de 11,9 % à 1,4 %. Sur le terrain, les premières se distinguent des secondes par leur proximité immédiate avec les cours d'eau et le recouvrement foliaire qui est très important en général. Y aurait-il un lien entre cette amélioration et la différence notable d'humidité qui existe entre ces deux types de formations végétales ? Ou est-ce plutôt au niveau de l'indice foliaire qui serait mieux perceptible par le canal moyen infrarouge ? Pour ce qui concerne les savanes arborées et les savanes arbustives, la confusion a baissé de 2,1 % environ dans le meilleur des cas. Par contre, la céréale 1 et la céréale 2 se confondent avec un taux variable de 3,4 à 6,4 % alors qu'elle était plus faible (2 %) dans le cas de la composition colorée classique.

L'un des objectifs essentiels de la télédétection est de chercher à exploiter de façon optimale les informations disponibles, et donc avec un minimum d'erreurs. La technique de l'analyse en composantes principales des quatre canaux bruts est une des méthodes pour atteindre cet objectif. Les valeurs de corrélation obtenues confirment bien le choix de la composition dans le proche infrarouge, le moyen infrarouge et le rouge (TM4/5/3). En effet, le canal dans le proche infrarouge est celui qui est le moins corrélé avec le canal dans le moyen infrarouge et la plus grande corrélation existante est celle entre les canaux dans le vert et le rouge (0,92 %). Comme on connaît les deux premiers canaux (i.e. TM 4 et 5), pour réaliser la combinaison optimale de trois canaux parmi les quatre, le troisième canal est alors celui dans le rouge (TM3) parce qu'étant le moins corrélé avec les deux premiers.

5.3. Classification à partir de la composition TM4, TM5 et ACP0

La classification à partir de la composition dans le proche infrarouge, le moyen infrarouge et la première composante principale (TM4, TM5, ACP0) donne des résultats plus précis pour l'ensemble des unités en dehors des plans d'eau où on enregistre une baisse de 6 %, et de 1 % pour les bowé. On observe ainsi une meilleure identification des buttes/cuirasse, du coton et de la céréale 2. Cependant, on constate un fort taux de rejet des pixels par rapport au cas précédent, selon les unités. Cela est d'ailleurs général à l'ensemble de l'étude où le taux moyen de rejet des pixels est assez élevé (3,7 à 3,9 %) ce qui pourrait être imputable à l'algorithme de classification

dirigée dont la paramétrisation est essentiellement basée sur la radiométrie. Cette paramétrisation ne tient pas compte de certains critères tels que la forme, la texture et la structure ce qui limite sa capacité par rapport à l'interprétation visuelle.

La figure 4 qui condense l'essentiel des résultats de la démarche montre clairement l'avantage de la composition TM4/5/3 par rapport à celle de TM4/3/2 pour l'identification des paysages. La composition TM4/5/Acp0 améliore sensiblement les résultats de la classification à partir de la composition TM4/5/3 dans le cas de notre zone d'étude. Le choix d'une telle composition s'explique par le fait que le canal proche infrarouge est sensible à l'activité chlorophyllienne, le moyen infrarouge à l'humidité de surface des végétaux et du sol, et la première composante principale est le néocanal qui contient le plus grand contraste (plus forte variance). Par ailleurs, cette composition avait le plus retenu notre attention pour l'identification visuelle après plusieurs tests opérés avec les autres composantes. Il y a lieu de voir comment on pourrait procéder à la projection des quatre bandes spectrales sur les trois couleurs fondamentales de manière à réaliser l'information optimale avec le minimum de perte, pour une démarche qui se voudrait généralisable. On peut retenir que le canal dans le moyen infrarouge permet de mieux identifier les formations végétales et les éléments physiques du milieu, tel que mentionné précédemment. La distinction entre le coton et les céréales est améliorée mais la distinction des céréales entre elles reste toujours un thème à approfondir étant donné qu'il subsiste encore des doutes pour l'identification des cultures du mil et du maïs. À ce propos, les enquêtes sur le terrain font ressortir les limitations majeures suivantes :

i) la difficulté de recueillir des données aréolaires historiques fiables antérieures à une période de trois « hivernages » sans grande patience ;

ii) le non respect du schéma théorique de la rotation de cultures qui ne permet pas de situer toujours le parcellaire et les cultures correspondantes avec une bonne exactitude.

En outre, des données d'images plus récentes corrélées à des mesures radiométriques parallèles et des observations de terrain permettraient de mieux se prononcer sur les capacités d'identification des cultures pures et associées, notamment l'association de légumineuses qui constitue une technique prouvée et actuellement prisée pour le maintien de la fertilité des sols.

6. CONCLUSION

Les résultats de l'étude faite ici montrent que :

– d'une manière générale l'utilisation du canal dans le moyen infrarouge permet d'affiner la discrimination entre les savanes arborées et boisées, d'une part, et les formations ripicoles, d'autre part, par rapport à la composition classique obtenue à partir des canaux dans le vert, le rouge et le proche infrarouge ; de même, les éléments physiques du milieu (buttes, cuirasses, réseau hydrographique, affleurements rocheux) ressortent mieux ;

– la discrimination coton/céréales est améliorée mais, par contre, la distinction des céréales entre elles demeure encore difficile ; des images plus récentes corrélées à des mesures radiométriques *in situ* pourraient permettre d'approfondir cette thématique ;

– la meilleure combinaison pour discriminer les unités identifiées est celle entre les bandes dans le proche infrarouge, le moyen infrarouge et la première composante principale des quatre canaux bruts. Toutefois, il est difficile d'aboutir à un résultat de classification automatique très précis essentiellement basée sur la radiométrie pour l'ensemble des thèmes étudiés à partir d'une seule combinaison de bandes spectrales. La teinte étant prise en compte par l'algorithme utilisé, il serait intéressant d'utiliser ou de développer dans le futur des algorithmes de classification automatique qui tiennent aussi compte de la structure, et par conséquent de la texture des paysages dans l'image ; les paysages naturels soudano-sahéliens ont une structure particulière dont l'analyse permettrait de faciliter leur identification sur l'image.

Remerciements

Au CIRAD-Cultures Annuelles pour la collaboration dans le cadre de projet commun financé par le Centre national d'études spatiales (CNES) et le Ministère de la coopération française (19-03-1996 au 18-03-1997).

Références

Beaubien, J. (1984) Une méthode de rehaussement d'images Landsat pour la classification du couvert végétal. Actes du 8e Symposium canadien de télédétection et 4e congrès de l'Association québécoise de télédétection, 3-6 mai 1983, Montréal (Québec), 840 p.

Belem, C., Berger, M., Kilian, J., Lainé, G. et Morant, P. (1987) Identification des systèmes de culture dans la zone cotonnière de l'Ouest du Burkina Faso. Actes du colloque international SPOT-1, Paris, novembre 1987, p. 415-419.

Bonn, F. et Cliche, G. (1982) Une étude préliminaire de l'information contenue dans la bande Thematic Mapper 5 (1,55-1,75 µm) de Landsat D à partir d'un vol de simulation. Les Colloques de l'INRA, Signatures spectrales d'objets en

télédétection, Colloque international Avignon (France), 8-11 septembre 1981, 674 p.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes. Les Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 486 p.

Chantereau J. et Nicou R. (1991) Le sorgho. Collection le Technicien d'agriculture tropicale. Éditions Maisonneuve & Larose, 159 p.

De Wispelaere, G. (1990) Dynamique de la désertification au Sahel du Burkina Faso. Cartographie de l'évolution et recherches méthodologiques sur les applications de la télédétection. Thèse d'Ingénieur, Conservatoire national des arts et métiers, Maisons-Alfort, Institut d'élevage et de médecine vétérinaire tropicale, 546 p.

Direction de la météorologique nationale du Burkina Faso (1997) Pluviométrie de Safané (200056), Bondoukuy (200100) et Bagassi (200105) des années 1989 à 1996. Ouagadougou, B.P. 576, téléphone : (226) 30 09 04 / 30 09 25.

Fontès, J. et Guinko, S. (1995) Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Notice explicative. Laboratoire d'écologie terrestre, Institut de la carte internationale de la végétation / Institut de développement rural, Faculté de sciences et techniques, Ministère de la Coopération Française, Projet Campus, 67 p.

Fontès, J., Tersiguel, P. et Paré, S. (1990) Intensification de l'agriculture en zone soudanienne et évaluation de son impact sur les paysages végétaux par télédétection, p. 343-354, in J.-M. M. Dubois et F. Blasco (réd.) Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Presse de l'université de Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 444 p.

INERA (1993) Rapport d'activités : campagne 1992 – 1993 du programme « recherche sur les systèmes de production (RSP) ». Institut d'études et de recherches agricoles, B.P. 7192 Ouagadougou 03, 170 p.

Kissou, R. (1994) Contraintes et potentialités des sols du Plateau de Bondokuy vis à vis des systèmes de culture paysans. Rapport de stage d'ingénieur de développement rural, Université de Ouagadougou, 90 p. + figures + annexes.

Lainé, G. (1993) Évaluation cartographique et statistique des surfaces cultivées en coton et en céréales dans la zone cotonnière ouest du Burkina Faso (juin 1992 – décembre 1993). Rapport intermédiaire du projet CIRAD – INERA, Convention FAC No 87 000 72 00. CIRAD – Cultures Annuelles, document interne, 44 p. + annexes.

Lainé, G. et Paré, S. (1996) Apport de l'imagerie SPOT pour l'évaluation statistique et cartographique des surfaces cultivées en coton et en vivrier dans la zone cotonnière du Burkina Faso. Actes du symposium international AISS (groupes de travail RS et DM), Ouagadougou (Burkina Faso), du 6 au 10 février 1995, ORSTOM Éditions, p. 407-416.

Leboucher, G. and Lowitz, G. E. (1978) What a histogram can really tell the classifier. Pattern Recognition, vol. 10, p. 351-357.

Leprun J.C. et Moreau, R. (1969) Notice pédologique de la Haute-Volta. Région ouest-nord. Orstom, Dakar-Hann, 341 p.

Paré, S. (1993) Évaluation cartographique et statistique des surfaces cultivées en coton et en céréales dans la zone cotonnière ouest du Burkina Faso. Projet CIRAD-INERA, INERA, document interne, 12 p. + annexes.

Richards, J.A. (1986) Feature reduction *In* Remote sensing digital image analysis. An introduction. Springer-Verlag, Berlin, 281 p.

Sanon, H.O., Koné, N., Morant, P., Somda, M., Poissonet, J. et De Wispelaere, P. (1996) Évaluation des potentialités pastorales du terroir de Ménégou au Burkina Faso. Actes du symposium international de l'Association internationale des spécialistes en sciences du sol (groupes de travail RS et DM), Ouagadougou, (Burkina Faso), du 6 au 10 février 1995, ORSTOM Éditions, p. 255-268.

Thomson, K.P.B., Bernier, M., Teillet, P., Horler, D. et Gosselin, C. (1984) Évaluation des capteurs TM, MSS et HRV pour estimer la superficie du maïs dans le contexte canadien. Les Actes du 8e symposium canadien de télédétection et 4e congrès de l'association québécoise de télédétection, 3-6 mai 1983, Montréal (Québec), 840 p.