Télédétection, 2003, vol. 3, n° 5, p. 403–418
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

RÉDUCTION DE L'ESPACE DES ATTRIBUTS PAR LA GÉNÉRATION D'AXES THÉMATIQUES À PARTIR DES DONNÉES MULTIBANDES D'IKONOS

NICOLAS KONÉ*[a] et DONG-CHEN HE[b].

[a] *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 / 31 92 08 ; télécopieur : (226) 34 02 71

[b] *Centre d'applications et de recherche en télédétection (CARTEL)*
Université de Sherbrooke, 2500 Boul. université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada.

Courriel [(a,b)] : wnkone@yahoo.fr ; Dong-Chen.He@Usherbrooke.ca

(soumis le 8 août 2002 ; révisé le 6 janvier 2003 ; accepté le 25 mai 2003)

Pour faciliter l'interprétation thématique des images satellitaires multibandes en gardant le maximum d'information, nous proposons une réadaptation de la transformation du chapeau haut-de-forme qui suppose des axes thématiques fixes. L'application de la nouvelle méthode proposée, à des images multibandes Ikonos prises en régions sahélienne et tempérée, a montré la faisabilité et son intérêt sur des données d'images de télédétection. Il s'agit de trouver trois axes thématiques portant le plus d'information possible. On fixe d'abord les deux premiers, qui sont les axes de brillance et de verdure. On trace ensuite le troisième par la convergence. Cette convergence est due à la dimensionnalité réduite des données multibandes et à une procédure de maximisation de l'information recherchée. Le troisième axe est, dans le cas présent, indicateur de jaunissement et de l'humidité de surface. En obtenant des coefficients de transformation semblables pour des images de deux zones écologiques différentes, on montre que la structuration interne des données multibandes sur les paysages terrestres en lien avec le sol, la végétation, l'eau et les matériaux fabriqués par l'homme se justifie. L'utilisation des trois axes, en milieu sahélien, permet d'aboutir à la distinction d'une vingtaine de catégories de surface. Ces résultats sont analogues quand on emploie les trois premières d'une analyse en composantes principales. Bien que le principe de la transformation soit valable en tout lieu et donc l'interprétation semblable, l'obtention de coefficients non rigoureusement identiques dans les deux zones écologiques pose le problème de leur relativité par rapport à des paysages de zones écologiques différentes. Cette considération est nécessaire avant toute tentative d'application dans un contexte régional ou quasi universel de paysages terrestres.

Mots-clefs : espace d'attributs ; images multibandes ; dimensionnalité ; axes thématiques ; paysages ; tranformation du chapeau haut-de-forme.

FEATURE SPACE REDUCTION BY THEMATIC AXIS GENERATION FROM IKONOS MULTISPECTRAL DATA

To facilitate the thematic interpretation of satellite multispectral image data with a maximum information gain, we propose a rehabilitation of the Tasseled Cap transformation which supposes a set of fixed thematic axes. The application of the proposed method, to IKONOS-Multispectral data on the Sahel and temperate regions, show the feasibility and its interests for the remotely sensed image data. We fix the two main axes (Brightness and Greenness) by a procedure of maximization of the sought information, and then trace the third axis by convergence. This convergence is due to the reduced dimensionality of multispectral data, and the third axis in this case is related to surface yellowness and humidity. Obtaining similar transformation coefficients for multispectral image data on two different ecological zones shows that the internal organization of multispectral data on landscapes in links with soils, vegetation, water and man made materials is well proven. The use of the three axes allowed to achieve similar results of the discrimination of about twenty surface categories in the sahelian zone, as does the three main axes of a principal component analysis. Although the principle of this transformation is valid on any area and so through an identical interpretation scheme, the none-rigorous identity of the coefficients related to both locations raises a point of their relativity. Consideration with regard to landscapes of different ecological zones is necessary before any attempt of (coefficients) application on a regional or nearly universal landscapes context.

Keywords : feature space ; multispectral image ; dimensionality ; thematic axes; landscapes ; Tasseled Cap tranformation.

1. INTRODUCTION

Depuis le lancement du premier satellite de télédétection des ressources terrestres en 1972, on a toujours été confronté au problème de réduction du volume de données. En désirant le maximum d'information sur les objets terrestres, avec les capteurs de type multibande (MSS, TM, HRV, HRVIR, ETM+, etc.), on a voulu mettre à profit la capacité de détection des propriétés spectrales des

* Correspondant principal

objets afin de pouvoir les identifier, voire les regrouper en classes d'objets. La complexité du problème du volume de données est à des degrés divers en fonction du nombre de bandes spectrales du capteur et de la thématique considérée. Aujourd'hui encore les images multibandes constituent les seules vraies données satellitaires opérationnelles sur les ressources terrestres qui existent en dehors du radar. De plus, elles sont celles qui sont le mieux à la portée des pays en voie de développement là où on ne dispose encore que très peu de connaissances sur les ressources naturelles. Au cours de la trentaine d'années, de 1972 à maintenant, la communauté scientifique et le monde civil ont bénéficié d'images satellitaires de résolutions spatiales de plus en plus fines : de 80 m avec la première série MSS de Landsat, on est passé progressivement à 30 m avec TM de Landsat, puis 20 à 10 m avec HRV (XS et P) de SPOT. L'arrivée de nouveaux satellites de type Ikonos, avec une résolution spatiale de 4 m pour le multibande et 1 m pour le panchromatique, vient mettre à la disposition du monde civil des informations plus fines au niveau de l'homogénéité du pixel.

La télédétection connaît actuellement son essor à travers la vulgarisation de l'outil et beaucoup de gens restent encore familiers de la photo-interprétation des images ou des compositions colorées. Alors qu'on voudrait réunir le maximum d'information pour la distinction des objets, on est souvent limité par la dimension spectrale des données. L'analyse en composantes principales, qui est une bonne méthode de réduction du volume de données (Ricotta *et al.*, 1999 ; Caloz *et al.*, 2001), reste limitée quand il faut passer à l'interprétation thématique des objets : les images dérivées ne gardent pas de lien explicite avec les propriétés thématiques des objets. Depuis longtemps, plusieurs travaux (Bauer *et al.*, 1978 ; Landgrebe and Erickson, 1978) ont été menés pour mieux comprendre la structure des données multibandes en liaison avec les propriétés biophysiques des objets terrestres. Des auteurs pionniers ont fait le constat de la concentration de nuages de points dans l'espace des propriétés spectrales d'une image multibande (Kauth and Thomas, 1976 ; Bauer *et al.*, 1978 ; Jackson, 1983 ; Crist and Cicone, 1984 ; Baret *et al.*, 1993). L'expérience a montré que la dimensionnalité de ces données, en tout cas celles de capteurs opérationnels du spectre de 0,40 à 2,5 µm, est en général limitée à deux ou trois en fonction de la corrélation entre les bandes (Miller et *al.*, 1984). Certains auteurs, comme Kauth et Thomas (1976), ont proposé la projection des données sur des axes thématiques utiles : si son utilisation semble très pratique, les coefficients de cette transformation portent parfois à caution (Caloz et Collet, 2001 ; Bannari *et al.*, 1995 ; Jackson, 1983), ne faisant pas toujours l'unanimité. Crist et Kauth (1986) précisent que les coefficients sont dépendants du capteur, du vieillissement des détecteurs, ainsi que de la mesure physique enregistrée (réflectance, radiance ou en compte numérique), sans dire de façon explicite comment ils sont obtenus. Alors que la capacité de calcul des premiers ordinateurs était limitée, aujourd'hui il est assez aisé d'analyser plus finement la structure de ces données pour en proposer une réduction de volume avec un minimum de perte d'information. En reprenant les différents constats, nous développons ici trois axes de propriétés thématiques optimales, soit ceux de brillance et de verdure, ainsi qu'un troisième qui semble corrélé avec l'humidité de la couverture végétale, la sénescence des plantes et la turbidité des eaux. Outre le sens pratique de ces nouveaux axes, il s'agit de voir avec plus de clarté :

– la relativité des coefficients de cette transformation par rapport aux paysages terrestres ;

– la réactualisation de la transformation pour tenir compte du capteur et des changements qui peuvent intervenir dans sa réponse (Crist and Kauth, 1986) ;

– la pertinence des trois axes proposés en comparaison avec les techniques existantes, notamment l'analyse en composantes principales.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Constats et concepts

De plus en plus, la communauté civile dispose d'images satellitaires à la fois de haute résolution spatiale et spectrale (Jensen *et al.*, 2002), donnant une spectroscopie quasi complète des objets terrestres composant une image. L'analyse et l'interprétation de ces images deviennent plus complexes et assez souvent coûteux. Alors qu'on veut réunir le maximum d'information pour caractériser les objets terrestres par leurs propriétés spectrales, on se retrouve avec une flopée de données dont on voudrait réduire le volume. Il s'agit donc d'aboutir au maximum d'information sur les ressources terrestres avec l'utilisation du minimum de primitives (Anderson *et al.*, 1976 ; Landgrebe and Erickson, 1978 ; Crist and Cicone, 1984 ; Kone *et al.*, 2002). Kauth et Thomas (1976), repris par Crist et Kauth (1986), ont proposé de considérer l'ensemble des données d'une image multibande comme pouvant être représentées dans un espace de propriétés

mathématiques et physiques, soit l'espace multi-dimensionnel où chaque bande spectrale d'un capteur représente une dimension d'axe de mesure des caractéristiques spectrales des objets terrestres. À cause de la capacité plus ou moins marquée pour chaque bande à mettre en exergue une propriété biophysique des différentes classes d'objets présents dans une image (Wang and He, 1991), on a une redondance des valeurs qui se traduit par une concentration des occurrences de valeurs dans un espace ayant la forme d'un chapeau haut-de-forme (*Tasseled Cap*) (Kauth and Thomas, 1976 ; Crist and Kauth, 1986 ; Caloz et Collet, 2001). En observant bien la structure de disposition des classes d'objets dans le nuage de points, ces auteurs ont proposé une vision du nuage de points selon des directions plus appropriées. Elles doivent être capables de traduire une signification thématique pour l'utilisateur et sont nécessairement perpendiculaires par construction (Crist and Cicone, 1984 ; Crist and Kauth, 1986). Outre le sens pratique, ces directions ou axes doivent garder le même sens thématique, d'une image ou d'un capteur à l'autre, ce qui faciliterait leur interprétation. Mais le tout est de pouvoir regarder dans les bonnes directions d'axes thématiques, avec le plus fort contraste et à la période propice où on a l'essentiel de la variété des classes d'objets terrestres. La relativité de cette méthode par rapport aux différents types de paysages terrestres, à diverses saisons de l'année, peut être liée à cette variété de classes d'objets en présence dans l'image (Caloz et Collet, 2001). Autrement, il serait illusoire de vouloir garder des axes assez fixes dans le temps s'ils ne permettent pas de pouvoir distinguer une variété de paysages terrestres, dans un premier temps, et de traduire des phénomènes évolutifs au sein d'un même paysage, dans un second temps. La variété de paysages terrestres reste liée à la diversité des zones écologiques sur la Terre et cette variété est certainement réduite au niveau d'une image satellitaire par la couverture spatiale de cette image. Il importe donc d'avoir toutes les classes extrêmes pour développer les axes thématiques dans un souci d'applicabilité relative de la méthode.

2.2. Optimisation des axes

Les objets terrestres sont essentiellement constitués de sols (sédiments), de végétation, d'eau, de roches et de matériaux fabriqués par l'homme (Crist and Cicone, 1984 ; Jensen *et al.*, 2002). La plupart de ces objets, notamment biologiques, ont une évolution périodique ou critique dans le temps qui se traduit au niveau de la réflectance. Dans un but premier de classification sommaire des objets, Crist et Kauth (1986) ont suggéré un premier plan contenant les sols nus et un autre plan représentant les classes de végétation active dense : brillance et verdure. En aménageant les espaces, l'homme y a apporté des matériaux nouveaux dont un grand nombre ont des réflectances élevées (toitures en alliages métalliques, matériaux de construction, béton, etc.), certains étant carrément de bons diffuseurs de la lumière solaire. Dans un plan des réflectances multibandes, cela engendre une structure d'ellipse de forte excentricité vers les fortes valeurs radiométriques. Pour tenir compte de la forte réflexion spectrale de certains matériaux, la brillance est calculée comme étant la moyenne multidimensionnelle des bandes spectrales, correspondant à la direction hyper-diagonale. Nous employons ici le terme d'hyper pour exprimer tout simplement que la dimension des attributs, c'est-à-dire le nombre de bandes spectrales, est supérieure à trois (tout comme l'hyper-espace). On peut exprimer les composantes du vecteur unitaire de brillance ainsi :

$$B_i = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

où n est le nombre de bandes spectrales.

Comme la dynamique des valeurs sur cet axe peut dépasser la plage maximale des données originales, une recalibration peut être nécessaire pour normaliser ces valeurs en les divisant par la longueur de l'hyper-diagonale (HD) :

$$HD = \sqrt{\Sigma_{i = 1 \text{ à } n} (DN_{max})^2}$$

où DN_{max} est la plage maximale des bandes originales.

L'étape suivante consiste à déterminer la direction de verdure : elle se calcule à partir d'un échantillon de végétation active, traduisant le maximum de contraste avec les zones non recouvertes de végétation (Jackson, 1983).

Les mesures radiométriques de terrain et parfois spectroradiométriques, couplées à l'analyse de données complémentaires *in situ*, ont permis une meilleure connaissance des propriétés spectrales des objets terrestres et d'optimiser le choix des bandes spectrales des capteurs d'imagerie satellitaire. Ainsi, on sait maintenant avec précision que l'activité chlorophyllienne de la végétation reste liée à une grande absorption des radiations solaires dans le rouge (630 à 690 nm), centrée autour de 675 nm, et à une forte réflexion des radiations dans le proche-infrarouge (760 à

900 nm), surtout entre 790 à 890 nm (Landgrebe and Erickson, 1978 ; Yoshioka *et al*., 2000 ; Jensen *et al*., 2002). Plusieurs indices ont ainsi été développés pour caractériser l'activité de la végétation à partir des images satellitaires (Bannari *et al*., 1995 ; Yoshioka *et al*., 2000). Tous ces auteurs sont unanimes à reconnaître la prépondérance des réflectances dans le rouge et le proche infrarouge en proposant diverses formules pour s'affranchir des effets du sol. Il n'y a cependant pas de doute sur le fait que l'indice normalisé de végétation (NDVI) permette de distinguer un sol nu, où il est minimal, d'une couverture végétale totale et pleinement active où il atteint sa valeur maximale. Le NDVI est alors pris comme critère de choix optimal d'échantillons de végétation afin d'orienter l'axe de verdure liée à la végétation. Cette orientation se fait selon la méthode de différence de position proposée par Jackson (1983) : le point échantillon qui correspond au minimum de l'hyper-diagonale est tout à fait indiqué pour établir cette différence. Il faut rappeler que cette orientation assure, selon la méthode de Gram-Schmidt (Jackson, 1983 ; Caloz et Collet, 2001), l'orthogonalité des deux axes (brillance et verdure). En général, si on dispose d'un ensemble de vecteurs V_1, V_2, V_3,…, V_n, la procédure d'orthogonalisation de Gram-Schmidt s'opère comme suit :

(1) $E_1 = B_i = \frac{V_1}{\|V_1\|}$, où $\|V_1\|$ désigne la norme du vecteur V_1 ;

(1) $f_2 = V_2 - |V_2, E_1| E_1$, $E_2 = \frac{f_2}{\|f_2\|}$ où $|V_2, E_1|$ désigne le produit scalaire des deux vecteurs V_2 et E_1 ;

…

(k) $f_k = V_k - |V_k, E_1| E_1 - \ldots - |V_k, E_{k-1}| E_{k-1}$;

$E_k = \frac{f_k}{\|f_k\|}$;

…

Les vecteurs E_1, E_2, … , E_n constituent alors une base orthonormée.

Les exposés suffisamment clairs du concept faits par Kauth et Thomas (1976), Crist et Cicone (1984), puis Crist et Kauth (1986) et les applications faites par différents auteurs (Jackson *et al*., 1983 ; Hill and Megier, 1989 ; Mulders and Girard, 1993 ; Huang *et al*., 2002) montrent que le troisième axe est une composante susceptible de traduire en même temps l'humidité (du sol et de la végétation), la sénescence ou le jaunissement des plantes et la turbidité des eaux. Les travaux de Landgrebe et Erickson (1978) et de Bauer *et al*. (1978) ont montré qu'il existe une corrélation linéaire plus ou moins marquée entre les reflectances des bandes spectrales et la teneur en eau des plantes, la biomasse végétale fraîche et la biomasse végétale sèche. Les valeurs de coefficients rapportés sont données sur le tableau 1.

TABLEAU 1 Coefficients de corrélation entre les réflectances de bandes spectrales TM et les paramètres biophysiques de l'image. *Correlation coefficients between TM spectral reflectance bands and biophysic parameters.*

	Teneur en eau des plantes	Biomasse fraîche	Biomasse sèche
TM1 (0,45 – 0,52 µm)	–0,76	–0,75	–0,69
TM2 (0,52 – 0,60 µm)	–0,82	–0,81	–0,77
TM3 (0,63 – 0,69 µm)	–0,81	–0,80	–0,73
TM4 (0,79 – 0,90 µm)	0,79	–0,76	0,67
TM5 (1,55 – 1,75 µm)	–0,84	–0,83	–0,79
TM7 (2,08 – 2,35 µm)	–0,86	–0,86	–0,81

Pour la teneur en eau des plantes et la biomasse végétale fraîche, qui sont des paramètres biophysiques très liés, on peut considérer l'ordre suivant décroissant de corrélation entre ces paramètres et la réflectance de la bande prise individuellement : TM7, TM5, TM2, TM3, TM4 et TM1. Comme d'une bande à l'autre, les écarts entre les valeurs rapportées ne sont pas toujours bien marqués (1 à 2 centièmes), on peut estimer que cet ordre n'est pas absolu, en particulier entre rangs consécutifs : il est juste indicatif de la prépondérance d'une bande sur l'autre pour traduire la propriété biophysique recherchée, comme la teneur en eau des plantes par exemple. En ce qui concerne la biomasse végétale sèche, et donc la sénescence, les corrélations par rapport aux bandes spectrales sont dans un ordre presque semblable : TM7, TM5, TM2, TM3, TM1 et TM4. Pour mettre en exergue l'humidité du sol, la teneur en eau des plantes, la biomasse végétale fraîche et la biomasse végétale sèche en même temps, l'idée serait de croiser les deux ordres précédents. On obtient ainsi dans l'ordre : TM7, TM5, TM2 puis TM3 ; avec un rang mitigé entre TM4 et TM1.

Si la corrélation existe pour chacune des bandes, il faut cependant penser qu'elle est relative, plus marquée pour l'une que pour l'autre. Le choix de la bande étant dicté par la loi de fortes valeurs, on

peut estimer que la corrélation est moins marquée pour les coefficients inférieurs en valeur absolue à 0,80. Dans une situation où on disposerait de toutes ces bandes ou des bandes équivalentes, la préférence serait dans l'ordre des poids : TM7, TM5, TM2, puis moyennement TM3. Dans le cas de Ikonos, les bandes spectrales du capteur multibande sont les mêmes que les quatre premières bandes de TM de Landsat-4 et 5 (SpaceImaging, 2002) de sorte que les bandes TM2 et TM3 s'imposent d'emblée. De plus, ces deux bandes ont permis d'établir un lien avec la turbidité des eaux de surface, voire même d'estimer la concentration en sédiments. Des études sur le lac Chicot, en Arkansas, rapportées par Mertes *et al.* (1993), montrent que plus la concentration en sédiments des eaux augmente (de 5,6 à 570,1 mg/l), plus la réflectance de l'eau est élevée, avec un maximum allant progressivement du vert (500 nm) vers le rouge (700 nm). Dans cette étude, les sédiments étaient à prédominance de particules de limon et d'argile, ce qui est généralement le cas des eaux de surface dans les régions soudano-sahéliennes. Les travaux de Lathrop *et al.* (1991) montrent que les meilleures corrélations entre la radiance mesurée, la quantité de sédiments en suspension dans les eaux et la turbidité s'observent dans les bandes TM2 ou TM3 (–0,844 / 0,796 pour TM3 et –0,730 / 0,736 pour TM2).

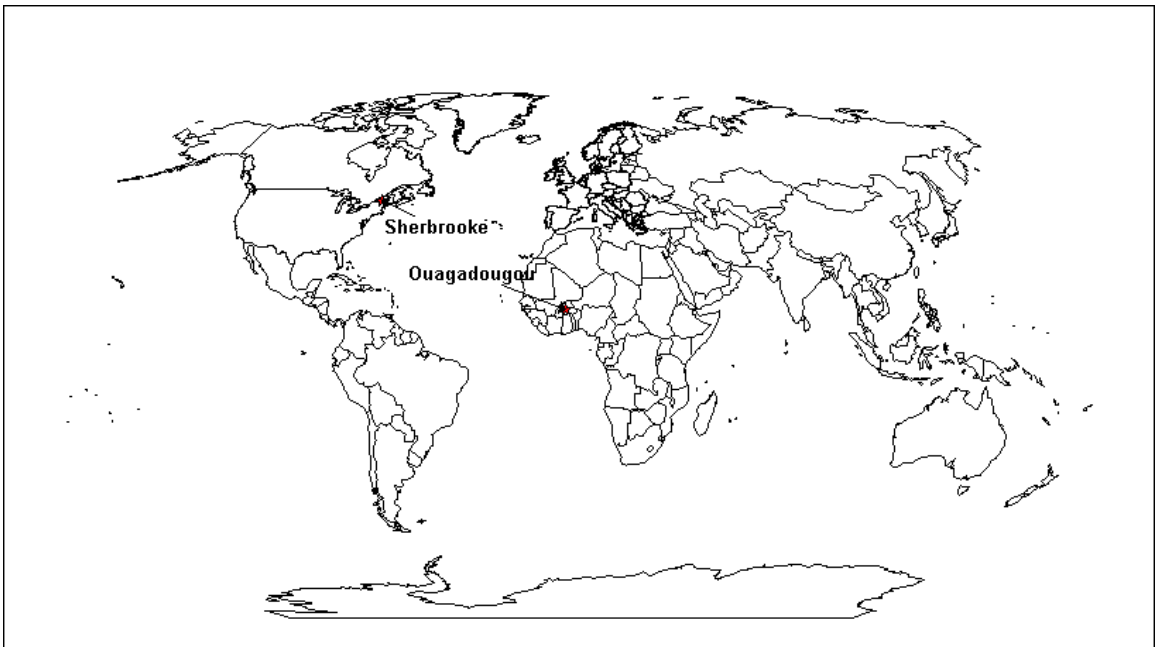
Un moyen de contrôle de la sénescence d'un échantillon de zone végétalisée est sa couleur naturellement jaunâtre. En voulant établir un lien entre les données de télédétection et les couleurs naturelles des sols, Escadafal (1993) montre qu'il y a une bonne concordance avec les trois premières bandes visibles de TM, seules susceptibles de simuler les couleurs naturelles. Ainsi, le rapport TM3/TM2 pourrait être un critère de sélection d'échantillons de végétation sénescente supposée. Ce critère s'avère aussi utile pour l'eau très turbide en milieu sahélien où la plupart des sols sont de couleur brun jaunâtre à jaune rougeâtre (Kone *et al.*, 2002). Mais il faut noter, qu'en dehors d'échantillons de végétation en sénescence formellement reconnue sur le terrain et identifiable sur l'image, il est difficile de conclure à partir de la seule couleur naturelle de l'image qu'une zone est occupée par de la végétation sénescente. Aussi, par manque de réalité de terrain concomittante, il est très difficile de cerner la végétation sénescente et l'humidité en même temps à partir d'observations de terrain, à plus forte raison sur des prises de vue aériennes ou satellitaires. De plus, pour une image d'une zone écologique donnée, ces observations thématiques synchrones dépendent de la période de l'année.

En ce qui concerne le choix d'échantillon dans l'élaboration du troisième axe tel que stipulé dans la méthode préconisée par Jackson (1983), on choisit la loi de variance maximale. Cette manière se justifie par le fait que beaucoup d'auteurs ont noté que la dimension utile des informations multibandes dans le spectre solaire, de 0,40 à 2,50 µm, se réduit à deux ou trois selon les capteurs opérationnels MSS, HRV-XS, TM, etc. (Ricotta *et al.*, 1999 ; Caloz et Collet, 2001 ; Huang *et al.*, 2002). D'après la théorie de l'information, ce sont des directions privilégiées où est concentré le maximum de variances liées à ces informations. On reprend alors les axes de l'analyse en composantes principales et on impose que le troisième axe recherché soit orthogonal aux deux axes précédents de brillance et de verdure. En principe, si la conformation des images multibandes en deux ou trois dimensions s'avère, on devrait s'attendre à une convergence de direction des axes pour des images prises dans des zones de paysages écologiques différents. Cette hypothèse ne peut se justifier que si l'essentiel de l'information contenue dans l'image multibande se retrouve dans les deux premiers axes thématiques créés : plusieurs expériences dont celles d'auteurs comme Landgrebe et Erickson (1978), Miller *et al.* (1984), Crist et Kauth (1986) et Huang *et al.* (2002), autorisent à la poser.

3. ZONES D'ÉTUDE ET DONNÉES UTILISÉES

L'étude a été essentiellement menée sur les zones urbaine et périurbaine autour de la ville de Ouagadougou, au Burkina Faso (figure 1). Cette ville est située en zone soudano-sahélienne caractérisée par un climat tropical sec, avec une saison sèche chaude et une saison pluvieuse. La pluviométrie moyenne annuelle est de 700 mm, généralement concentrée de mi-mai à fin septembre. La végétation est de type savanes arborées ou boisées assez souvent cultivées (Zerbo *et al.*, 1995), constituant un paysage de champs avec des îlots d'arbres épargnés pour leur utilité comestible ou pharmacogène (*Buttyrospermum paradoxum subsp. parkii, Parkia biglobosa, Lannea microcarpa, Guiera senegalensis, Combretum micranthum, Ziziphus mauritiana, Sclerocarya birrea*). Ce dernier paysage, appelé savane-parc, est le plus dominant en zone périurbaine, supplanté par des rangées de grands arbres (*Khaya senegalensis*, *Manguifera indica*) bordant les rues lorsqu'on s'approche du centre ville. La zone aménagée de la forêt classée du

barrage alimentant la ville en eau potable peut être considérée comme le seul espace vert de la ville de Ouagadougou. Les sols sont en général argilo-sableux souvent gravillonnaires, ou gravillonnaires peu profonds sur cuirasse avec tantôt des zones de cuirasses affleurantes colonisées par *Loudetia* sp. Leur couleur va du brunâtre pour les sols argileux au jaune rougeâtre pour les sols limoneux ou sablo-limoneux à cause de l'hématite, de la goethite ou de la limonite en provenance de la cuirasse (Zerbo, 1995 ; Zerbo *et al.*, 1995).



Source : MapInfo Professional

FIGURE 1 Localisation des zones d'étude : Ouagadougou au Burkina Faso et Sherbrooke au Canada. *Study areas location : Ouagadougou (Burkina Faso) and Sherbrooke (Canada).*

La deuxième zone d'étude se situe à Sherbrooke, dans la province de Québec, au Canada (figure 1). S'étendant sur près de 366 km², la nouvelle ville de Sherbrooke (depuis le 1er janvier 2002) regroupe presque intégralement les limites territoriales des huit entités municipales suivantes : Ascot, Bromptonville, Deauville, Fleurimont, Lennoxville, Rock Forest, Saint-Élie d'Orford et l'ancienne ville de Sherbrooke. Avec une population approximative de 140 000 habitants, la nouvelle ville se trouve en relief accidenté de collines, au confluent des rivières Magog et Saint-François. Son altitude varie entre 141 mètres et 360 mètres au-dessus du niveau de la mer (Société de développement économique Sherbrooke, 2003). Le climat y est de type tempéré avec un hiver rigoureux et un été relativement chaud et humide. Il pleut pendant presque toute l'année quand il ne neige pas, avec une moyenne annuelle de 874 mm de pluie et de 294 cm de neige (Environnement Canada, 2003). La végétation naturelle est constituée de forêts décidues à larges feuilles et de prairies. Il existe à travers la ville une centaine d'îlots de verdure, de parcs et espaces verts aménagés de superficies variables, notamment les parcs riverains longeant les deux rivières pour la protection de leurs berges. La pelouse, comme amélioration de cadre de vie, y est beaucoup prisée, sur des sols de couleur assez souvent noirâtre, ayant un grand contenu de matière organique qui pourrait être confondue avec des champs de céréales et de plantes fourragères. L'une des particularités de la ville de Sherbrooke réside dans la variété de couleurs des toitures de maison faites de bardeaux d'asphalte de différentes teintes (gris, noir, brun, vert, bleu, rouge ou rouge orangé, etc.).

Les images multibandes au format Geotiff d'Ikonos ont été acquises sur les villes de Ouagadougou (07/05/2000 de 2 773 × 4 014 pixels) et de Sherbrooke (20/05/2001 de 3 133 × 3 462 pixels). Sur les figures 2 et 3, on montre un extrait de la composition colorée de l'image des villes de Ouagadougou et de Sherbrooke.

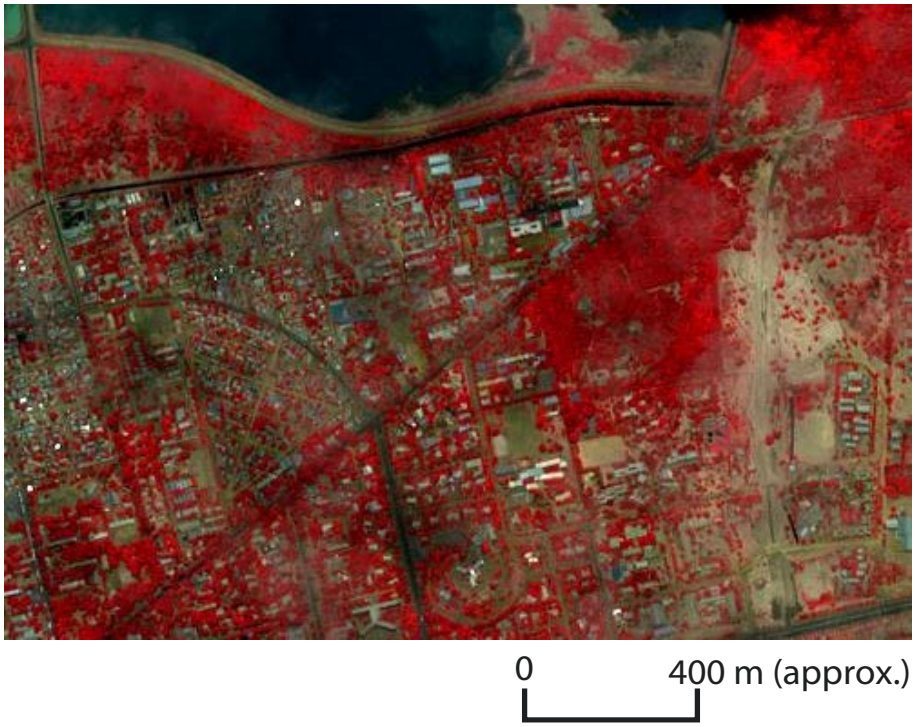


FIGURE 2 Extrait d'image multibande de composition colorée 4/3/2 d'Ikonos pour Ouagadougou. *Sample of IKONOS-Multispectral color composition 4/3/2 on Ouagadougou.*



FIGURE 3 Extrait d'image multibande de composition colorée 4/3/2 d'Ikonos pour Sherbrooke. *Sample of IKONOS-Multispectral color composition 4/3/2 on Sherbrooke.*

4. RÉSULTATS

L'analyse des deux images Ikonos montre une très forte corrélation entre les bandes bleue et verte (> 0,97), verte et rouge (> 0,96), puis bleu et rouge (> 0,88), comme on l'indique sur le tableau 2.

TABLEAU 2 Matrice de corrélation pour les deux images multibandes Ikonos. *Correlation matrix for the two Ikonos-Multispectral coverages.*

	Bande n°1 (Bleue)	Bande n°2 (Verte)	Bande n°3 (Rouge)	Bande n°4 (PR-IR)
Bande n°1	1/ 1 (*)			
Bande n°2	0,9756 / 0,9863	1 / 1		
Bande n°3	0,8883 / 0,9422	0,9603 / 0,9735	1 / 1	
Bande n°4	0,7074 / 0,4863	0,7575 / 0,5010	0,7392 / 0,3904	1 / 1

(*) : Les valeurs à gauche de / sont celles de l'image de Ouagadougou et, à droite, celles de Sherbrooke.

Aussi les diffusogrammes de comptes numériques, constitués à partir des différents couples de bandes spectrales, présentent une structure en forme de manche à houe aux fortes valeurs radiométriques pour les deux images particulièrement plus marquée pour celle de Ouagadougou (figures 4 et 5).

Les images de brillance dérivées des images brutes de Ouagadougou ou de Sherbrooke montrent bien les structures morphologiques des paysages (figures 6 et 7), alors que celles de verdure indiquent en relief la couverture du sol par la végétation fraîche (figures 8 et 9).

La conformation dans le nouvel espace thématique constitué des trois premières bandes dérivées (brillance, verdure, sénescence-humidité) d'une vingtaine de classes thématiques reconnues sur l'image de Ouagadougou corrobore bien, avec leur représentation pratique, les catégories d'eau turbide (faible, moyenne, élevée), les catégories de sols nus (en zone inondable, labourés, non labourés), la cuirasse, l'asphalte, la route en terre battue, les catégories de toitures des maisons (en tôle galvanisée neuve, en tôle galvanisée vieille, en tôle galvanisée très vieille, en tôle bleue), le chemin de fer, le gazon et les catégories de végétation naturelle (herbes, savane-parc arborée, savane boisée, bois ou forêt classée). Sur les figures 10 et 11, on illustre la distribution de ces classes dans les différents espaces bidimensionnels suivant les axes thématiques constitués.

Sur le tableau 5 on évalue les performances d'une classification que l'on voudrait effectuer à partir des échantillons pris sur ces catégories de surface. On compare ici l'utilisation des trois axes thématiques avec celle des trois premières composantes principales, en considérant le cas le plus sélectif qui est obtenu avec la distance de Jeffries-Matusita. On y a seulement rapporté les catégories de surface où la distance est inférieure à 1,9, c'est-à-dire celles qui pourraient occasionner des problèmes de confusion dans une procédure classique de classification basée sur la radiométrie uniquement. En principe la comparaison des performances dans les deux cas est déterminante pour conclure de la pertinence des trois nouveaux axes.

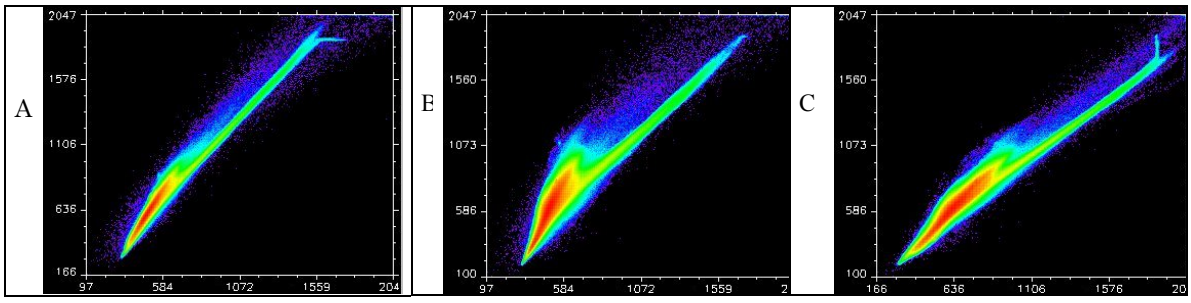


FIGURE 4 Diffusogrammes des bandes bleu/vert (A), bleu/rouge (B), vert/rouge (C) (horizontal/vertical) de l'image Ikonos de Ouagadougou. *Set of scatterplots blue/green (A), blue/red (B) and green/red (C) (horizontal/vertical) from Ikonos image on Ouagadougou.*

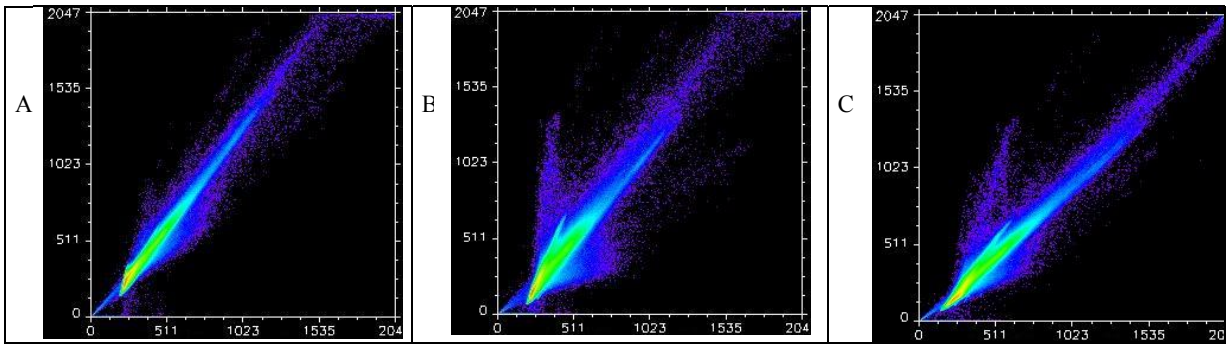


FIGURE 5 Diffusogrammes des bandes bleu/vert (A), bleu/rouge (B), vert/rouge (C) (horizontal/vertical) de l'image Ikonos de Sherbrooke. *Set of scatterplots blue/green (A), blue/red (B) and green/red (C) (horizontal/vertical) from Ikonos image on Sherbrooke.*

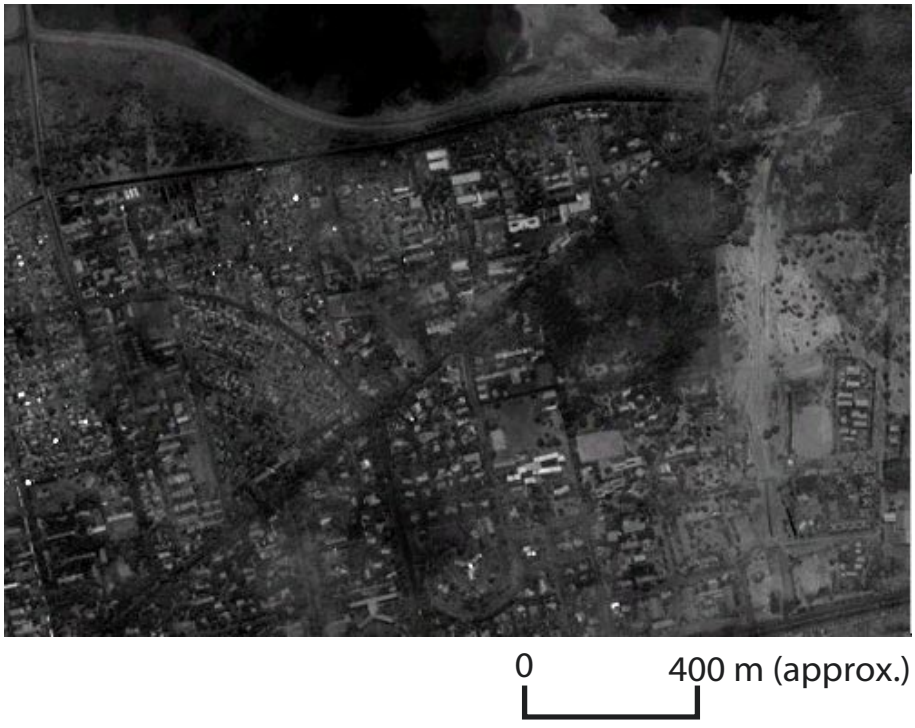


FIGURE 6 Extrait de l'image de brillance de la ville de Ouagadougou. *Sample of Brightness image on Ouagadougou.*

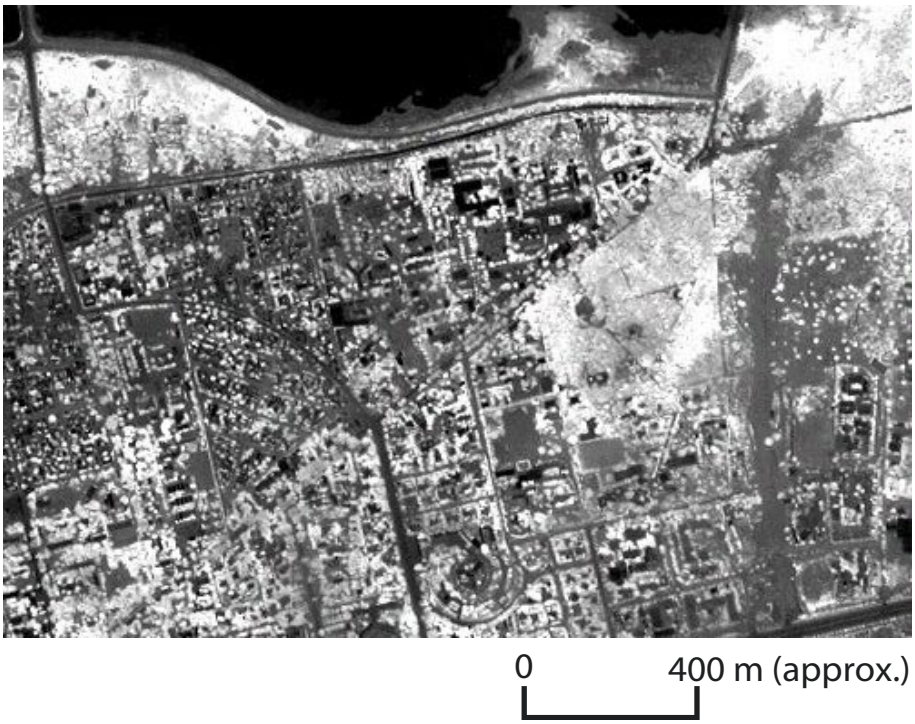


FIGURE 7 Extrait de l'image de brillance de la ville de Sherbrooke. *Sample of Brightness image on Sherbrooke.*



FIGURE 8 Extrait de l'image de verdure de la ville de Ouagadougou. *Sample of Greenness image on Ouagadougou.*

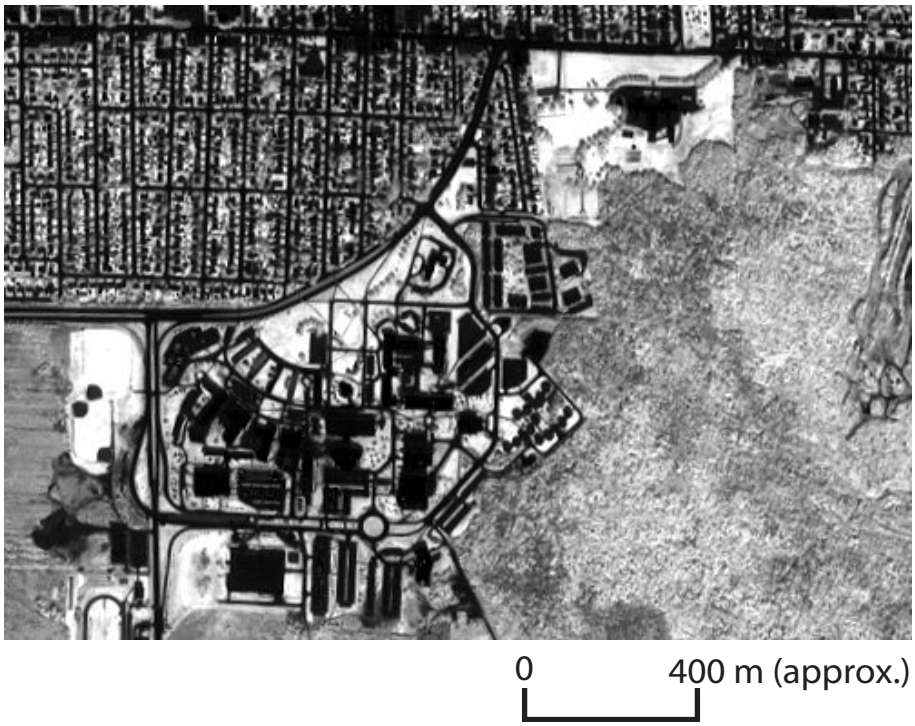


FIGURE 9 Extrait de l'image de verdure de la ville de Sherbrooke. *Sample of Greenness image on Sherbrooke.*

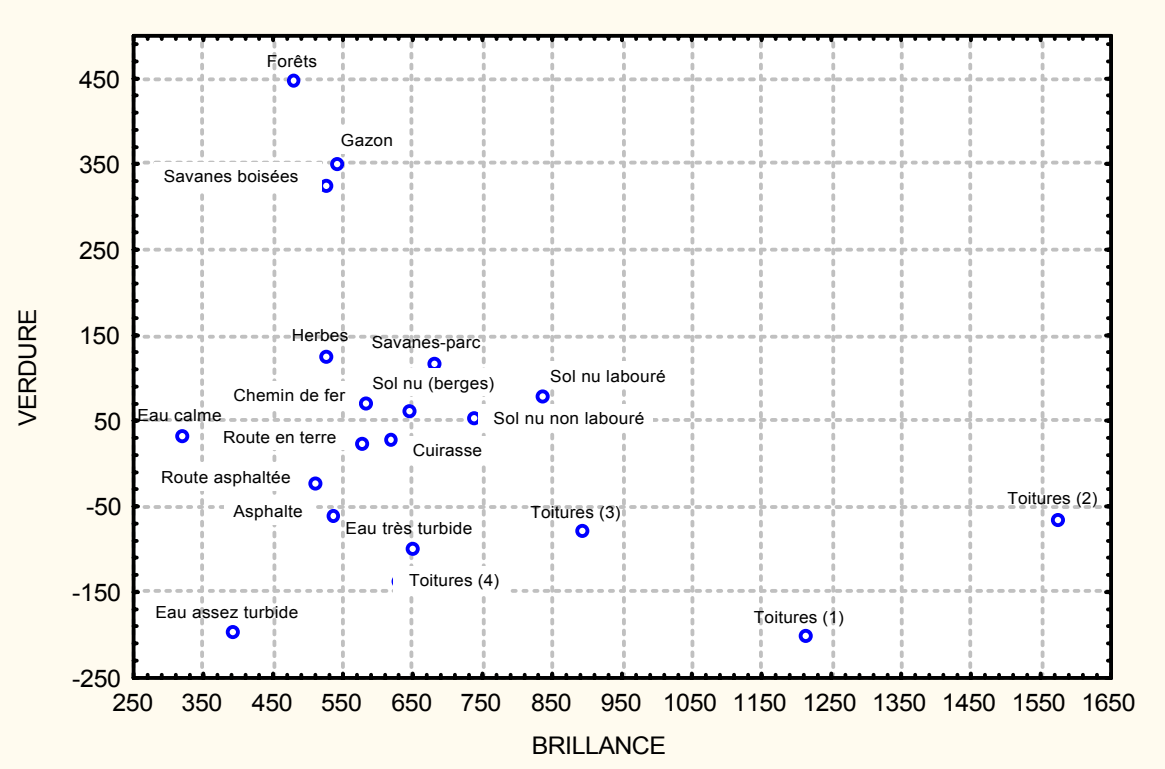


FIGURE 10 Distribution moyenne des classes dans le plan de la végétation (brillance, verdure). *Mean distribution of surface categories in the plane of vegetation (brightness, greenness).*

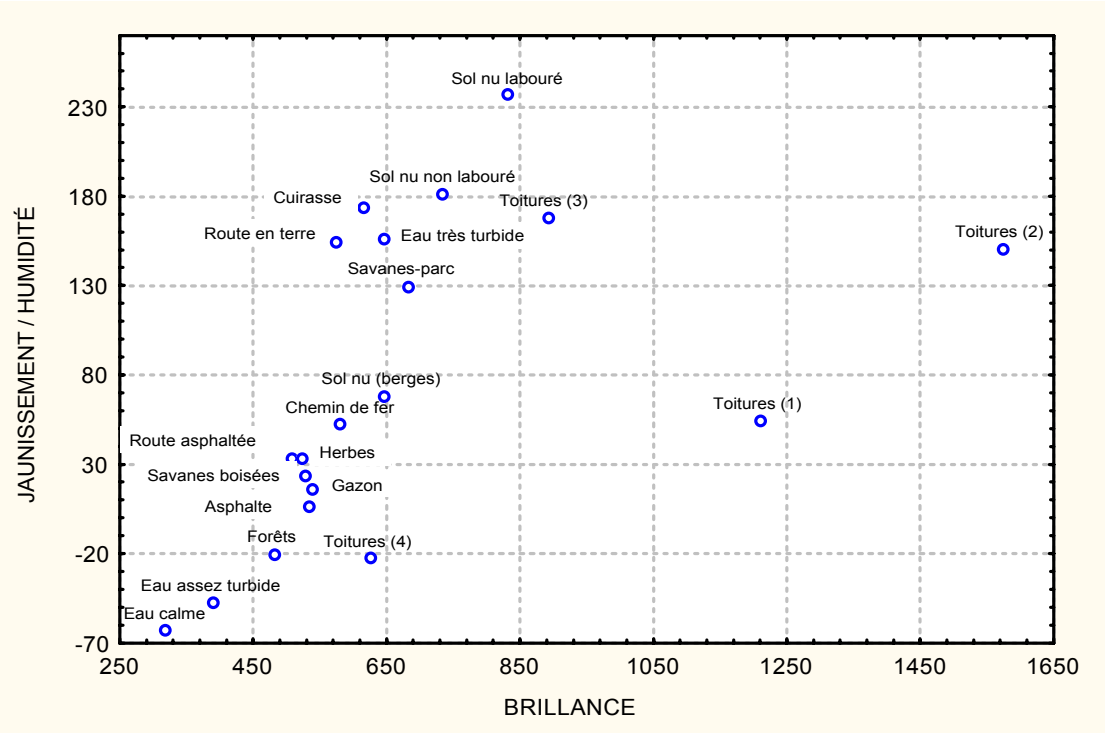


FIGURE 11 Distribution moyenne des classes dans le plan des sols (brillance, jaunissement-humidité). *Mean distribution of surface categories in the plane of soils (brightness, yellowness-humidity).*

5. DISCUSSION

D'abord, il faut noter que les coefficients de transformation (tableaux 3 et 4) sont respectivement de mêmes signes et de mêmes ordres de grandeur pour les deux images de zones écologiques différentes. Cela dénote d'une structure thématique quasi universelle des objets terrestres : sols, végétation, eau et objets fabriqués par l'homme. Il y a là une confirmation du caractère pratique de la transformation thématique pressentie par les auteurs Kauth et Thomas (1976). Les coefficients ne sont pas rigoureusement identiques d'une zone écologique à l'autre, ce qui traduit leur relativité par rapport aux paysages terrestres. Mais il reste que, de manière relative, on peut interpréter les données de la même façon quelle que soit la zone d'étude. De plus, sur les figures 10 et 11, on trouve une similarité de distribution des objets avec les schémas de présentation théorique faits par Crist et Cicone (1984). Cela permet de confirmer la pertinence de la conformation pratique des axes thématiques proposés avec la structure des données d'images multibandes.

Dans la recherche du troisième axe, connaissant les deux premiers de brillance et de verdure, ainsi que la dimension réduite des données multibandes, nous avons préféré considérer la structuration interne de celles-ci. Comme on aboutit à la convergence du troisième axe pour différentes zones écologiques, on peut se demander si son sens thématique est le même que celui proposé depuis, c'est-à-dire « humidité-sénescence ». Dans le cas de la zone d'étude de Ouagadougou, on observe la disposition suivante des différentes classes sur cet axe (figure 11) : les sols nus labourés, les sols nus non labourés, la cuirasse, les toitures en tôle galvanisée très vieille, l'eau très turbide, la route en terre, les toitures en tôle galvanisée neuve, la savane-parc arborée, les sols nus en zone inondable, les toitures en tôle galvanisée vieille, le chemin de fer, la route asphaltée, les herbes, la savane boisée, le gazon, l'asphalte, les bois ou forêts, les toitures en tôle bleue, l'eau moyennement turbide et l'eau calme. Pris dans la direction contraire, cela donnerait la même disposition, car il suffirait d'inverser les signes des coefficients : ici nous avons voulu que les eaux plus turbides aient des valeurs radiométriques plus élevées dans le sens positif. À la lumière de cette disposition, on peut dire que c'est le facteur de jaunissement qui est d'abord prépondérant avant l'humidité des objets. En effet, tel souligné dans la section

précédente, les sols de la région autour de Ouagadougou ont une couleur dominante brunâtre à jaune rougeâtre. Cela a un impact immédiat sur la couleur des eaux de ruissellement qui se retrouvent dans les retenues. L'eau apparaissant plus calme vient certainement de la décantation naturelle occasionnée par le dépôt des sédiments en profondeur. Par ailleurs, les toitures en zinc (tôle galvanisée) très vieilles ont aussi une couleur gris-jaune. L'une des études intéressantes à envisager serait de voir quelle est la corrélation exacte entre cet axe et les facteurs d'humidité de surface et de sénescence des plantes. Une analyse sommaire, à partir des coefficients de transformation, donne 70 % de la différence entre les bandes rouge et bleue, augmentée de 10 % de la différence entre les bandes proche infrarouge et verte.

Le fait de ne pas utiliser d'échantillons de sénescence ou d'humidité pour élaborer le troisième axe, tel que proposé par Jackson (1983), se trouve aussi justifié par les difficultés liées à cette méthode. En effet, il nous est apparu difficile de rechercher sur le terrain un échantillon de végétation sénescente que l'on pourrait facilement identifier sur l'image. L'exemple de la ville de Sherbrooke, en zone tempérée, en témoigne : on trouve parfois de la pelouse envahie par les pissenlits dont les fleurs ont une couleur jaune donnant à l'ensemble une couleur jaune-verdâtre au printemps. Un autre cas d'observation de ces pelouses est, qu'au mois de mai, avec la repousse de la végétation après la saison hivernale, on trouve des herbes mortes en dessous de la pelouse montante, ce qui confère une couleur mélangée de vert-jaune. En outre, il existe aussi beaucoup d'arbres en période de feuillaison, dont les feuilles sont jaunes à cause des variations brutales de températures, donnant une impression d'ensemble que l'on pourrait confondre avec la végétation sénescente. Sans échantillon au sol préalablement reconnu, il est hasardeux de vouloir appréhender la végétation sénescente dans un tel contexte à partir de la couleur d'une vue aérospatiale. Caloz et Collet (2001) attirent d'ailleurs l'attention sur les dangers d'une telle procédure, en supposant un pixel réputé sénescent par sa couleur.

Le tableau 5 renseigne sur la divergence entre les catégories de surface en présence dans l'image Ikonos de la ville de Ouagadougou, sur la base de l'utilisation des trois premiers axes dérivés dans une première configuration, puis des trois premières composantes principales dans la seconde. Dans les deux cas, on retrouve les mêmes catégories de surface en conflit et des valeurs de divergence quasiment identiques. L'intérêt d'une telle démarche est de pouvoir comparer les performances de distinction de classes entre l'utilisation des trois premiers axes thématiques dérivés, d'une part, et les trois composantes principales, d'autre part. Normalement si cette étape est franchie, il est logique de penser qu'on peut avoir une performance analogue, voire meilleure que dans le cas d'utilisation des composantes principales. En principe, c'est plutôt le tableau croisé de divergence des différentes catégories de surface qu'il faudrait analyser pour aboutir à une conclusion valable. Dans la réalité, c'est ce que nous avons fait, mais un tel tableau avec une vingtaine de catégories de surface est très lourd à présenter. C'est pourquoi nous avons seulement présenté, pour les deux configurations, les catégories de surface susceptibles de créer une confusion de classification. Dans le cas présent, on peut dire qu'on a la même performance de distinction des classes parce que les mêmes catégories de surface se trouvent être en conflit, avec les mêmes valeurs d'indice de séparabilité selon la distance la plus sélective (celle de Jeffries-Matusita). Cependant, il ne faut pas perdre de vue que les premiers gardent une signification thématique à la différence des derniers.

En faisant l'hypothèse d'une bonne calibration des données du capteur multibande, les coefficients de transformation ne devraient pas beaucoup varier pendant une période d'un à deux ans pour des images couvrant la même zone éco-paysagique. L'intérêt de toujours garder les mêmes axes thématiques quel que soit le capteur ou la zone d'étude se trouve justifié par la possibilité d'interprétation analogique. Ce lien thématique pourrait être exploité par un système d'interprétation automatique. Dans un contexte qui se voudrait régional ou sous-régional, la transformation exigerait de tenir compte de tous les types de paysages de cette région et de l'évolution de leurs physionomies en fonction du temps pour élaborer les coefficients de transformation. Il faudrait alors choisir une image suffisamment contrastée, c'est-à-dire qui contienne l'essentiel de tous ces paysages avec leurs physionomies extrêmes. L'un des intérêts serait de voir quels coefficients on trouve pour des zones éco-paysagiques différentes (arctiques et sub-arctiques, tempérées, méditerranéennes, tropicales humides, semi-arides, arides, urbaines et péri-urbaines), sous différentes latitudes, de manière à pouvoir tirer une conclusion plus précise sur la relativité de la transformation grâce à une série de données suffisantes.

TABLEAU 3 Vecteurs de transformation : image Ikonos de Ouagadougou. *Transformation vectors for Ikonos-Multispectral data on Ouagadougou.*

Vecteur	**Bande n°1**	**Bande n°2**	**Bande n°3**	**Bande n°4**
E1 – Brillance	+0,500000	+0,500000	+0,500000	+0,500000
E2 – Verdure	–0,250112	–0,218253	–0,390453	+0,858719
E3 – Sénescence	–0,700717	–0,092244	+0,701515	+0,091447
E4 – Indéterminé	–0,443214	+0,833006	–0,324688	–0,065103

TABLEAU 4 Vecteurs de transformation : image Ikonos de Sherbrooke. *Transformation vectors for Ikonos-Multispectral data on Sherbrooke.*

Vecteur	**Bande n°1**	**Bande n°2**	**Bande n°3**	**Bande n°4**
E1 – Brillance	+0,500000	+0,500000	+0,500000	+0,500000
E2 – Verdure	–0,259852	–0,249530	–0,353781	+0,863163
E3 – Sénescence	–0,681483	–0,101948	+0,722098	+0,061333
E4 – Indéterminé	–0,466966	+0,823007	–0,321579	–0,034461

TABLEAU 5 Indice de séparabilité des catégories de surface pouvant induire des confusions de classification : image Ikonos de la région de Ouagadougou. *Report of critical separabilities for surface categories classification – Ikonos-Multispectral data on Ouagadougou.*

Catégorie de surface	Catégorie de surface confusive	Distance de Jeffries-Matusita
Eau très turbide	Savanes-parc	1,70 / 1,70 (*)
	Sols nus non labourés	1,86 / 1,86
Eau moyennement turbide	Néant	
Eau calme	Néant	
Sols nus labourés	Sols nus non labourés	1,75 / 1,75
	Savanes-parc	1,76 / 1,76
Sols nus en zone inondable	Chemin de fer	1,13 / 1,13
	Savanes-parc	1,84 / 1,84
Sols nus non labourés	Savanes-parc	1,36 / 1,36
Cuirasse	Route en terre battue	0,55 / 0,56
	Route asphaltée	1,83 / 1,83
Route en terre	Néant	
Route asphaltée	Chemin de fer	1,36 / 1,36
	Herbes	1,41 / 1,41
	Route en terre	1,85 / 1,85
Asphalte	Route asphaltée	1,66 / 1,66
	Chemin de fer	1,70 / 1,70
	Toiture en tôle bleue	1,79 / 1,79
Chemin de fer	Herbes	0,85 / 0,85
	Savanes boisées	1,41 / 1,41
	Savanes-parc	1,50 / 1,50
	Gazon	1,79 / 1,79
	Toiture en tôle bleue	1,85 / 1,85
Toiture tôle galvanisée vielle	Toiture tôle galvanisée neuve	1,77 / 1,78
Toiture tôle galvanisée neuve	Toiture tôle galvanisée très ancienne	1,86 / 1,86
Toiture tôle galvanisée très ancienne	Toiture en tôle bleue	1,78 / 1,78
Toiture en tôle bleue	Néant	
Bois – forêt	Savanes boisées	1,20 / 1,19
	Gazon	1,76 / 1,76
Savanes boisées	Gazon	0,93 / 0,94
	Savanes-parc	1,19 / 1,19
	Herbes	1,20 / 1,20
Savanes-parc	Herbes	1,49 / 1,49
	Gazon	1,80 / 1,80
Gazon	Herbes	1,53 / 1,53
Herbes	Néant	

(*) : Les valeurs pour les trois axes thématiques sont indiquées à gauche du signe /. À droite, on a celles obtenues à partir de l'utilisation des trois premières composantes principales.

Cette méthode pourrait s'appliquer aux données de n'importe quel capteur multibande du spectre solaire (0,40 à 2,50 µm). Dans le cas d'un nombre de bandes supérieur à quatre, les axes 4, 5 et les suivants peuvent être déduits en considérant toujours les critères d'orthogonalité et de variance maximale. Il faudrait alors établir avec certitude la corrélation thématique du troisième axe et on peut s'attendre à une concordance avec les travaux de Huang *et al.* (2002). En effet, à partir de données ETM de Landsat, ces derniers ont montré que le troisième axe de la transformation chapeau haut-de-forme a une très forte corrélation avec l'humidité de surface. Dans le cas d'applications avec des capteurs différents, il serait plus judicieux d'opérer sur les données de réflectance intrabande extra-atmosphérique pour pouvoir les comparer ou les introduire dans un système d'analyse unique. Il faut s'attendre à ce que les coefficients de passage pour des données de réflectance intrabande extra-atmosphérique, corrigées ou non corrigées des effets atmosphériques, soient différents de ceux appliqués aux données de comptes numériques.

L'une des limitations de cette étude est qu'elle est orientée vers des applications comme l'occupation des terres, la gestion des ressources végétales et agricoles, les eaux de surface, l'aménagement de l'espace, etc. Son applicabilité à des domaines, comme la cartographie des types de sols, la bathymétrie, la qualité des eaux ou la prospection minière, reste posée parce qu'aucune corrélation n'a été établie ici avec certains éléments de ces domaines.

6. CONCLUSION

La transformation du chapeau haut-de-forme réadaptée ici montre par l'obtention de coefficients de transformation semblables pour des images multibandes d'Ikonos de deux zones écologiques différentes (Sahel et région tempérée), que la structuration interne des données multibandes sur les paysages terrestres, en lien avec le sol, la végétation, l'eau et les matériaux fabriqués par l'homme, se justifie. La convergence du troisième axe obtenu après fixation des deux premiers (brillance et verdure) et à partir d'une procédure de maximisation de l'information recherchée prouve bien cette structuration thématique interne, en partie due à la dimensionnalité réduite des données multibandes.

Les coefficients de transformation développés ici restent en toute rigueur valables pour les données multibandes d'Ikonos de régions arides et semi-arides de la zone soudano-sahélienne ou de la zone tempérée à hiver rigoureux et à été relativement chaud et humide. Son intérêt est très pratique dans un contexte régional (ou sous-régional) qui tiendrait compte de tous les types de paysages et de leurs différentes physionomies en fonction du temps. Les principes de la transformation et de l'interprétation sont les mêmes en tout espace géographique. Ils peuvent s'appliquer à toute la génération de nouveaux capteurs multibandes (MSS de OrbView-3 ou QuickBird-2, ETM+ de Landsat, HRVIR de SPOT, AVNIR de Adeos, OPS de Jers, LISS de Irs, etc.). Dans un contexte d'utilisation universelle à tous les types de paysages terrestres, une tentative d'élaboration de coefficients de transformation pourrait s'avérer plus fructueuse à partir de données de réflectances. Il faudrait alors tenir compte des conditions atmosphériques et de l'étalonnage du capteur (selon la zone de surveillance ou d'étude). Cependant, les atmosphères terrestres sont si différentes selon les régions du globe qu'il est difficile de remonter à des valeurs absolues de réflectances d'objets terrestres grâce aux mesures de capteurs embarqués à bord de satellites.

En faisant l'hypothèse d'une bonne calibration des données du capteur multibande, on peut s'attendre à une stabilité relative des coefficients de transformation pendant une période d'un à deux ans pour des images couvrant la même zone éco-paysagique. L'intérêt de toujours garder les mêmes axes thématiques quel que soit le capteur ou la zone d'étude se justifie par la possibilité d'interprétation analogique.

Références

Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T. and Witmer, R. E. (1976) A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. USGS Professional Paper 964, U.S. Geological Survey, Reston, V.A., 28 p.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A. R. (1995) A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 95-120.

Baret, F., Jacquemoud, S. and Hanocq, J. F. (1993) The soil line concept in remote sensing. Remote Sensing Reviews, vol. 7, p. 65-82.

Bauer, M. E., Hixson, M. M., Biehl, L. L., Daughtry, C. S. T., Robinson, B. F., Stoner, E. R. and Landgrebe, D. A. (1978) Vol. I: Agricultural scene understanding. Final Report, LARS (laboratory for applications of remote sensing) Contract Report 112578, Purdue University, West Lafayette, 120 p.

Caloz, R. et Collet, C. (2001) Précis de télédétection – Vol. 3 : Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec et AUF, Québec, p. 237-252.

Crist, E. P. and Cicone, R. C. (1984) A physically-based transformation of thematic mapper data – The Tasseled Cap. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-22, n°3, p. 256-263.

Crist, E. P. and Kauth, R. J. (1986) The Tasseled Cap de-mystified. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, no 1, p. 81-86.

Environnement Canada (2003), Service météorologique du Canada. http://www.msc-smc.ec.gc.ca/climate/, 16-05-2003.

Escadafal, R. (1993) Remote sensing of soil color : principles and applications. Remote Sensing Reviews, vol. 7, p. 261-279.

Hill, J. and Megier, J. (1989) The use of multi-temporal TM Tasseled Cap features for land use mapping in european marginal areas : an operational approach. Proceedings of IGARSS'89, vol. 2, p. 798-801.

Huang, C., Wylie, B., Homer, C., Yang, L. and Vogelman, J. (2002) A tasseled cap transformation for Landsat-7 ETM+ at-satellite reflectance. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n°8, p. 1741-1748.

Jackson, R. D. (1983) Spectral indices in *n*-Space. Remote Sensing of Environment, vol. 13, p. 409-421.

Jackson, R. D., Slater, P. N. and Pinter, P. J. Jr. (1983) Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. Remote Sensing of Environment, vol. 13, p. 187-208.

Jensen, J., Saalfeld, A., Broome, F., Cowen, D., Price, K., Ramsey, D. and Lapine, L. (2002) Spatial data acquisition and integration. Department of Geography, University of South Carolina, University Consortium for Geographic Information Science.
http://www.cla.sc.edu/geog/ucgis/, 26-03-2002.

Kauth, R. J. and Thomas, G. S. (1976) The Tasselled Cap : a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. Proceedings of Symposium on Machine processing of remotely sensed data. Purdue University, West Lafayette, Indiana, p. 4B41-4B51.

Kone, N., Pare, S., Thiombiano, L. et Compaore, H. (2002) Évaluation de la bande moyen infrarouge TM5 pour l'identification des cultures et de la végétation naturelle en zone cotonnière du Burkina Faso. Télédétection, vol. 2, n°3, p. 183-192.

Landgrebe, D. A. and Erickson, J. D. (1978) Analysis of agronomic and spectral data for physical understanding. Annual Technical Summary Report, LARS (laboratory for applications of remote sensing) Contract Report no.113078, Purdue University, West Lafayette, , 93 p.

Lathrop, R. G., Lillesand, T. M. and Yandell, B. S. (1991) Testing the turbidity of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. International Journal of Remote Sensing, vol 12, n°10, p. 2045-2063.

Mertes, L. A. K., Smith, M. O. and Adams, J. B. (1993) Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. Remote Sensing of Environment, vol. 43, n°3, p. 281-301.

Miller, G.P., Fuchs, M., Hall, M.J., Asrar, G., Kanemasu, E.T. and Johnson, D. E. (1984) Analysis of seasonal multispectral reflectances of small grains. Remote Sensing of Environment, vol. 14, p. 153-167.

Mulders, M. A. and Girard, M. C. (1993) Remote sensing of soils in warm arid and semi-arid lands. Remote Sensing Reviews, vol. 7, p. 341-363.

Ricotta, C., Avena, G. C. and Volpe, F. (1999) The influence of principal component analysis on the spatial structure of a multispectral dataset. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, n°17, p. 3367-3376.

Société de développement économique Sherbrooke,
http://www.sdes.ca/tourisme/, 16-05-2003.

Space Imaging (2002) Frequently asked questions and 4-m Multispectral technical specifications.
http://www.spaceimaging.com/, 06-03-2002.

Wang, L. and He, D. C. (1991) Un nouvel algorithme de classification non dirigée. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, no 11, p. 2439-2444.

Yoshioka, H., Miura, T., Huete, A. R. and Ganapol B. D. (2000) Analysis of vegetation isolines in Red-NIR reflectance space. Remote Sensing of Environment, vol. 74, p. 313-326.

Zerbo, L. (1995) Caractérisation des sols des stations de recherches agricoles de l'INERA. Kamboinsé, Farakoba, Saria et Niangoloko. INERA (Institut de l'Environnement et des Recherches Agricoles)\CTIG (Comité Technique Interministériel de Gestion), rapport d'étude, Ouagadougou, 114 p.

Zerbo, L., Kone, N., Morant, P. et Pare, S. (1995) Utilisation combinée d'images multispectrale et haute résolution spatiale pour la cartographie des sols et de la végétation, p. 11-17, dans « Interprétation agronomique des données de sol : un outil pour la gestion des sols et le développement agricole », Séminaire BUNASOLS (Bureau National des Sols, Burkina Faso) /AB-DLO (Institut de la Biologie Agronomique et de la Fertilité du Sol, Pays Bas) /INERA (Institut de l'Environnement et des Recherches Agricoles, Burkina Faso), Ouagadougou, 14-16 Mars 1995. Série AB-DLO Thema's 2, AB-DLO, Haren, Pays Bas 208 p.