Télédétection, 2006, vol. 6, n° 4, p. 291-304
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DES TERRES EN MILIEU ARIDE À L'AIDE DE DONNÉES MULTI-SOURCES ET DE L'INDICE DE VÉGÉTATION TSAVI

Tidiane OUATTARA[1], Jean-Marie M. DUBOIS[1] et Q. Hugh J. GWYN[2]

[1] Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL)
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1 ; téléphone : 819-821-7181 ; courriel : Jean-Marie.Dubois@USherbrooke.ca
[2] Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL)
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1 ; aussi Groupe HGSP inc., 445, rue Woodward, North Hatley, Québec, Canada J0B 2C0 ; téléphone : 819-842-2740 ; courriel : gwyn@hgsp.info

Soumis le 1er août 2005 ; révisé le 2 février 2006 ; accepté le 12 mars 2007

La précision et l'exactitude des cartes d'occupation des terres sont des préoccupations importantes en planification régionale, en évaluation environnementale et donc pour la communauté scientifique. Dans cet article, on utilise une approche de cartographie de l'occupation des terres en utilisant des images d'ETM+ de Landsat-7, de HRV de SPOT-4, de RSO de RADARSAT et de l'indice de végétation TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*). Afin de contribuer à la recherche de solutions à cette préoccupation, une méthodologie fondée sur la combinaison d'une classification dirigée et du taux de couvert végétal provenant de l'indice TSAVI est présentée. Les résultats, avec des précisions variant entre 80 % et 90 %, mettent en évidence le potentiel qu'offrent les combinaisons d'images multisources. En outre, la méthode est efficace pour la mise en exergue des nuances entre les zones de cultures, les sols nus et la végétation sénescente, d'où l'obtention d'une carte d'occupation des terres plus exacte.

A LAND COVER MAPPING METHOD IN ARID ENVIRONMENT USING MULTISOURCE DATA AND THE TSAVI VEGETATION INDEX

Accuracy of land cover is a significant concern for regional planning as well as for environmental evaluation and for the scientific community in general. This paper presents an approach for land cover mapping using Landsat-7 ETM+, SPOT-4 HRV, RADARSAT SAR images and the TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*). In order to contribute to the research of solutions addressing these concerns, we present a methodology based on the combination of a supervised classification and the vegetation cover based on TSAVI. The results, with accuracy ranging between 80 % and 90 %, highlight the potential multi-source image combinations provide. Moreover, the method is effective for enhancing the contrasts between crop areas, bare soil and senescent vegetation, from which a more accurate land cover map can be derived.

1. INTRODUCTION

L'occupation des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (Foody, 2002). Elle a des effets sur le cycle biogéochimique et le réchauffement planétaire (Penner, 1994), sur l'érosion des terres et le développement durable (Douglas, 1999) ainsi que sur la biodiversité (Champin *et al.*, 2000). Cette importance en fait une thématique incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux. Cette thématique peut être obtenue par le biais de plusieurs techniques et méthodes, dont la télédétection. Cependant, obtenir une bonne cartographie de l'occupation des terres par télédétection demeure un problème délicat. Les cartes obtenues ne sont souvent pas utilisées pour des applications opérationnelles à cause de certaines erreurs et imprécisions (Congalton, 1991).

Ces erreurs et imprécisions sont beaucoup plus élevées en milieu semi-aride à cause de le forte hétérogénéité spatiale et de la variabilité locale du paysage (Pickup and Marks, 2000). Lorsque la végétation est éparse, ce qui est caractéristique de ces milieux, l'effet du sol sous-jacent entraîne une confusion qui ne permet pas d'extraire facilement le taux de couvert végétal (Major *et al.*, 1990 ; Escadafal, 1989) et rend la distinction des différentes catégories d'occupation des terres difficile. Encore, de nos jours, une bonne cartographie de l'occupation des terres demeure un problème, surtout pour la séparation des sols nus et des zones de culture en milieu semi-aride (Bannari *et al.*, 1995 ; Purevdorj *et al.*, 1998).

2. SITE D'ÉTUDE

En Bolivie, on distingue cinq régions géographiques très marquées : l'Altiplano (Haut Plateau) à l'ouest, les Yungas au centre-nord, les Valles Altos (Haute Vallée) au centre, le Gran Chaco au sud ainsi que les Basses terres de l'Amazonie à l'est et au nord (figure 1). Située dans la Haute Vallée et au sud de la ville de Cochabamba, à une altitude de 2 800 m à 3 600 m avec des pentes de 20 % en moyenne, la zone d'étude est le bassin versant du lac Laka-Laka qui couvre 57 km^2. La séquence stratigraphique dans la région à l'étude présente une succession de roches sédimentaires de la formation d'Anzaldo (Ordovicien) et de formations meubles quaternaires (fluviolacustres, gravitaires et alluviales) (CIDRE, 1990). Les formations meubles du Quaternaire, constituées de cailloux, de gravier, de sable, de silt et d'argile, sont généralement localisées le long des cours d'eau, dont les principaux sont les rivières Calicanto et Viscachani. La majeure partie du bassin versant du lac Laka-Laka étant couverte de formations fluviolacustres : la perméabilité du site d'étude varie donc de modérée à faible.

Le bassin versant du lac Laka-Laka est une région semi-aride dont les précipitations sont concentrées en l'été, c'est-à-dire de décembre à mars. D'après le CIDRE, à cette période, on enregistre 80 % des précipitations annuelles dont la moyenne est de l'ordre de 556 mm/an (Ouattara, 2002) (figure 2). Cette saison des pluies présente une température diurne pratiquement stable tandis que la saison sèche et froide, qui s'étend de mai à septembre, est caractérisée par une forte fluctuation thermique. Il existe une petite saison sèche (avril) et une petite saison pluvieuse (octobre à novembre). Les températures maximale et minimale sont respectivement de 29,9 ^{O}C et de - 4,9 ^{O}C, ce qui donne une moyenne annuelle de 12,5 ^{O}C (Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 1995).

À l'intérieur du bassin versant, le couvert végétal est épars. Cependant, on y distingue de petits cactus, des arbustes et des arbres. Ce couvert végétal dépend des saisons. En effet, pendant la saison sèche, la végétation est sénescente et les arbres et arbustes perdent leurs feuilles, favorisant ainsi l'augmentation de la superficie des sols nus. En saison pluvieuse, la strate herbacée, composée en majeure partie de graminées, devient plus dense, les arbres et arbustes se couvrent de feuillage et la superficie des sols nus diminue.

La population du bassin versant du lac Laka-Laka est estimée à 2 500 habitants, ce qui donne une densité d'environ 44 hab/km^2. La plupart des familles possèdent leur propre terre principalement depuis qu'il y a eu une distribution des terres durant la réforme agraire de 1953, d'où une multitude de minifundios, qui sont de petites parcelles. La dimension moyenne des fermes est de 2,8 ha/famille dont 1,2 ha labourable. La production agricole est plutôt consommée (80 %) que commercialisée (20 %). La principale période de culture se situe d'octobre à avril et les principales cultures sont le maïs, la pomme de terre et le blé. On y trouve également une très faible superficie (environ 1 %) de haricots, de luzerne et d'orge. Malgré l'existence d'une rotation des cultures, 84 % des terres sont intensivement utilisées. Il y a peu de mécanisation et on utilise encore la traction animale et les méthodes manuelles. Le reste de l'année (mai à septembre) est surtout consacré à l'élevage. Environ 85 % à 95 % des familles pratique l'élevage de moutons, de chèvres et de bœufs. On y élève aussi des porcs, des chevaux et des ânes (55 % des familles). Toute cette activité d'élevage engendre le surpâturage, qui menace le peu de couvert végétal existant. Dans la partie centrale du bassin versant, il y a une forte utilisation agricole, contrairement aux flancs des montagnes où on retrouve des pâturages naturels.

3. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie générale simplifiée est présentée sur la figure 3, mais le lecteur peut en trouver le détail dans Ouattara (2002).

3.1. Données utilisées

Les images d'ETM$^+$ de Landsat-7 d'août 1999 et de HRV de SPOT du 8 juillet 1994, prises pendant la saison sèche, ont été utilisées, ainsi que des images de HRV de SPOT-4 du 11 octobre 1998 et de RSO de RADARSAT en mode F2 descendant du 27 octobre 1998. Mais le mois d'octobre de l'année 1998 fut exceptionnellement sec. Un modèle numérique d'altitude (MNA) a été élaboré à partir de la carte topographique. Les observations des données (le type et la densité de végétation, les catégories de culture, le sol nu) sur le terrain ont été faites de mai à juillet 1998. Pour s'assurer d'une représentativité la plus complète possible de la zone d'étude, on a choisi l'échantillonnage par placettes (CIDRE, 1990 ; Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 1995).

Les données auxiliaires ont été obtenues à partir de travaux sur le terrain et de recherches bibliographiques. La carte topographique dont on dispose a été faite à partir de photographies aériennes de 1983. Le travail sur le terrain se situant de mai à juillet 1998, il est évident, qu'après 15 ans, les données de la carte topographique relatives à l'occupation des terres sont inexactes. Pour pallier ce manque d'actualisation des données, une image HRV du 8 juillet 1994, prise à la même période climatique (saison sèche) que le travail sur le terrain a été utilisée. Son année d'acquisition est plus près de l'année de réalité de terrain que celle de la

carte topographique avec laquelle il y a plus d'une décennie d'écart. La finesse de la résolution spatiale de l'image HRV de 1994 permet de mieux distinguer, entre autres, les routes et certaines limites de parcelles qui sont importantes comme repères lors des travaux sur le terrain. Plusieurs auteurs (Godard, 1990 ; Lamachère et Puech, 1996 ; Richter, 1997 ; Toutin, 1996 ; Haralick *et al*., 1973 ; Agbu, 1991) ont démontré que, pour extraire l'occupation

des terres à partir d'une classification simple, la correction atmosphérique n'est pas obligatoire si on utilise une seule image ; comme on utilise des images multidates, une correction est de mise.

L'image HRV de 1994 a aussi été géométriquement corrigée afin de la classifier pour aider au choix de l'échantillonnage et de l'organisation de la cueillette des données sur le terrain.

Étant donné que le travail portait sur l'échantillonnage de l'espace, on a choisi les sondages spatiaux qui sont les plus appropriés. Selon ce principe, l'échantillonnage du site d'étude peut se faire par points, par transects ou par placettes. Puisque le travail consiste à faire une cartographie à partir de l'analyse numérique des images, il est conseillé de choisir un échantillonnage par transects ou par placettes (Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 1995). Ce dernier a été utilisé parce qu'il est moins coûteux que celui par transects. La technique d'échantillonnage développée ici

reprend en partie celle qui a été utilisée par Godard (Toutin, 1996) dans le sud-ouest de la Mauritanie, qui est une région sahélienne semi-aride avec une végétation éparse. La taille des placettes d'enquête ne devait pas être inférieure à 3,2 ha (9 x 9 pixels) en raison du niveau de précision de la localisation d'après l'équation de TownshPuisqueend et Justice (De Keersmaecker, 1987) :

$$A = L(1 + 2N) \quad (1)$$

où A est le côté de la plus petite placette ;

L est la taille du pixel (ici 20 m) ;

N est l'erreur de précision en nombre de pixels (ici 4).

Donc : $A = 20\,[1 + (2 \times 4)] = 180$ m = 9 pixels.

Puisque nous sommes en présence d'une formation végétale de type savane arbustive, afin de bien caractériser tant l'occupation des terres que le couvert végétal, nous nous sommes servis de l'approche par placettes utilisée dans les inventaires forestiers. Ces placettes varient de 400 à 600 m de côté en fonction des besoins du terrain.

Le nombre de placettes à utiliser étant fonction de l'hétérogénéité du site d'étude, cette dernière a été appréciée au moyen de la radiométrie de l'image à l'aide d'une classification non-dirigée de l'image de HRV du 8 juillet 1994.

L'hétérogénéité étant très forte et la taille des classes plus petite, les taches retenues n'étaient pas nombreuses, mais elles étaient bien réparties sur tout le bassin versant. Le positionnement des placettes a été facilité en repérant leur origine et leur fin à partir de leurs coordonnées géographiques à l'aide d'un GPS. La direction générale de la ligne était lue à l'aide d'une boussole, des jalons servaient à y séparer les blocs homogènes et la longueur des blocs y était mesurée avec le décamètre. Ainsi, 13 placettes (figure 4) ont été étudiées en 7 jours, à raison de 3 h par placette et de 2 placettes par jour. La dimension du bassin versant délimité approximativement sur l'image est de 350 lignes x 450 pixels et le taux d'échantillonnage est de :

$$\text{Taux d'échantillonnage} = \left(\frac{\text{superficie minimale de placette x nombre de placettes}}{\text{superficie de la zone d'échantillonnage}} \right) \text{x}\, 100 \quad (2)$$

soit : [(20 lignes x 20 pixels x 13) / (350 lignes x 450 pixels)] x 100 = 3,3 %

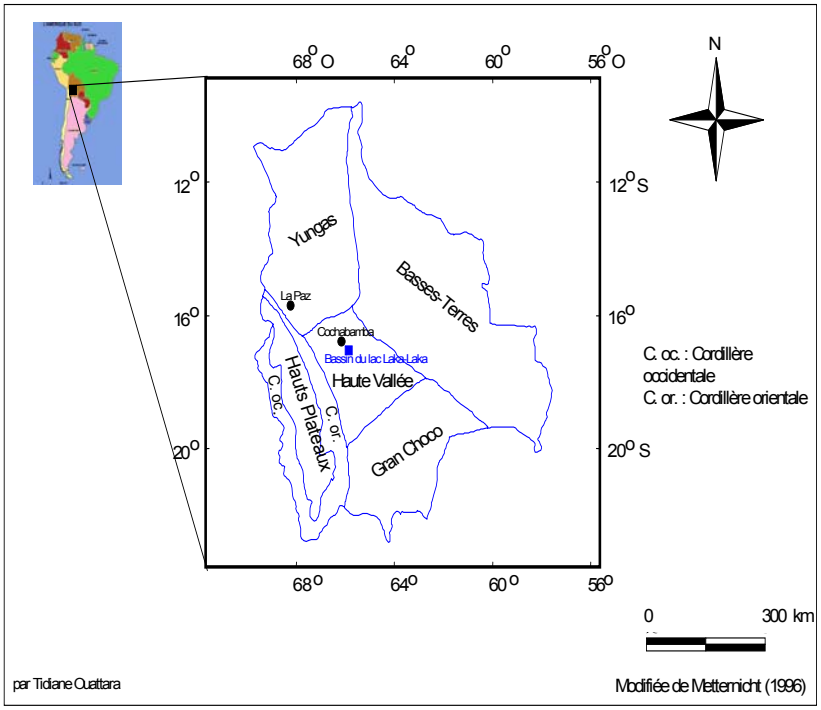


Figure 1 : Localisation du basin versant du lac Laka-Laka. *Location of the lake Laka-Laka watershed*

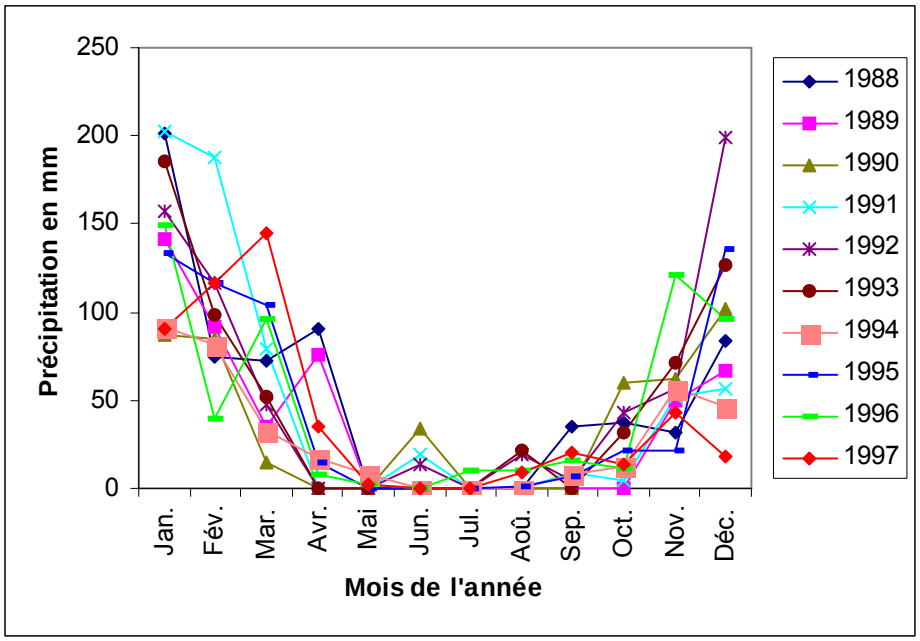
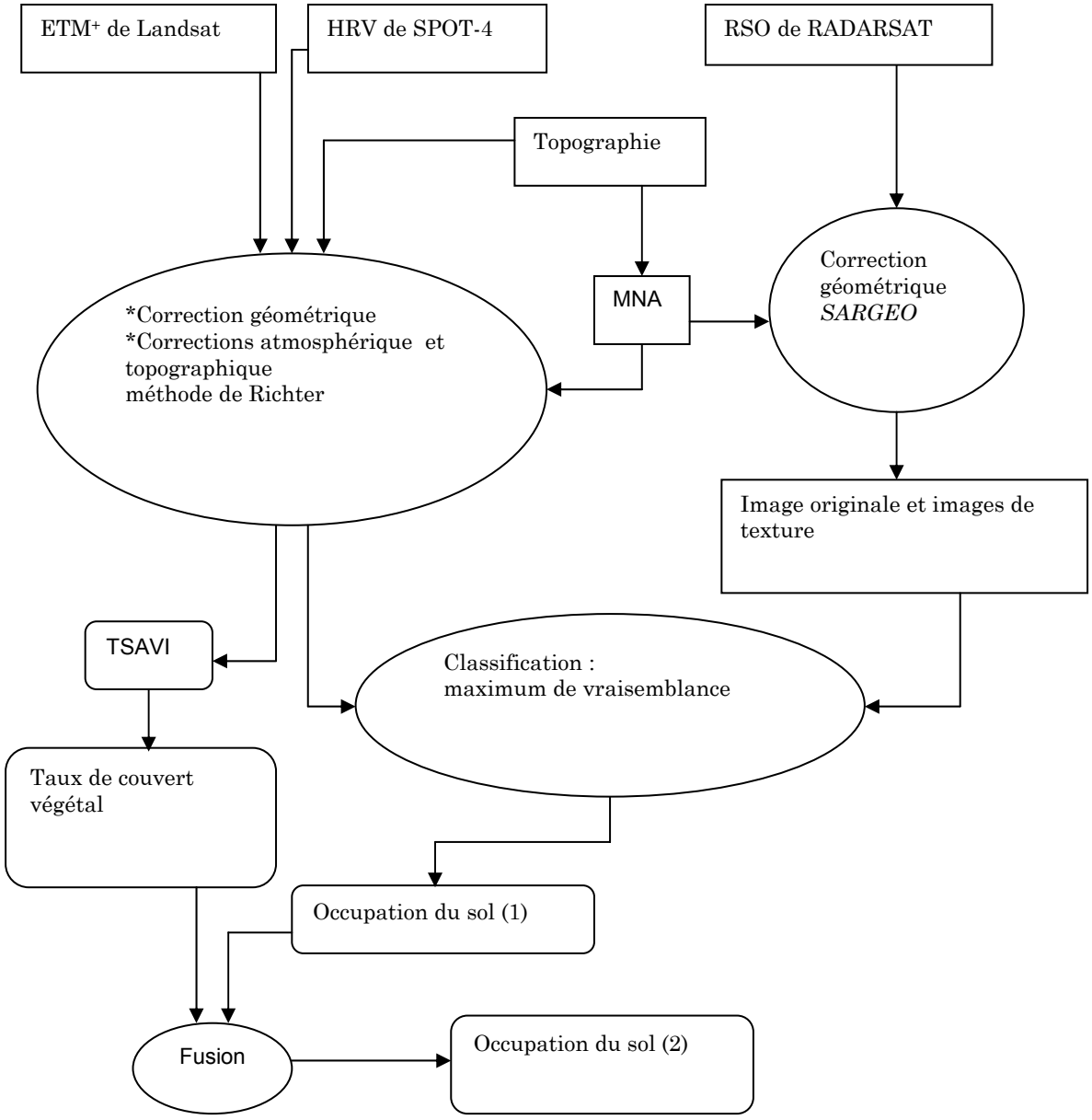


Figure 2 : Exemple de la distribution, sur 10 ans, des précipitations à Tarata, ville située à moins de 1 km du bassin versant du lac Laka-Laka. *Example of the distribution, over 10 years, of precipitations in the Tarata area, located less than 1 km from the lake Laka-Laka watershed.*



Occupation du sol (1) : sans les zones de culture.
Occupation du sol (2) : avec les zones de culture

Figure 3 : Méthodologie d'élaboration de la carte d'occupation des terres. *Methodology for land cover mapping*

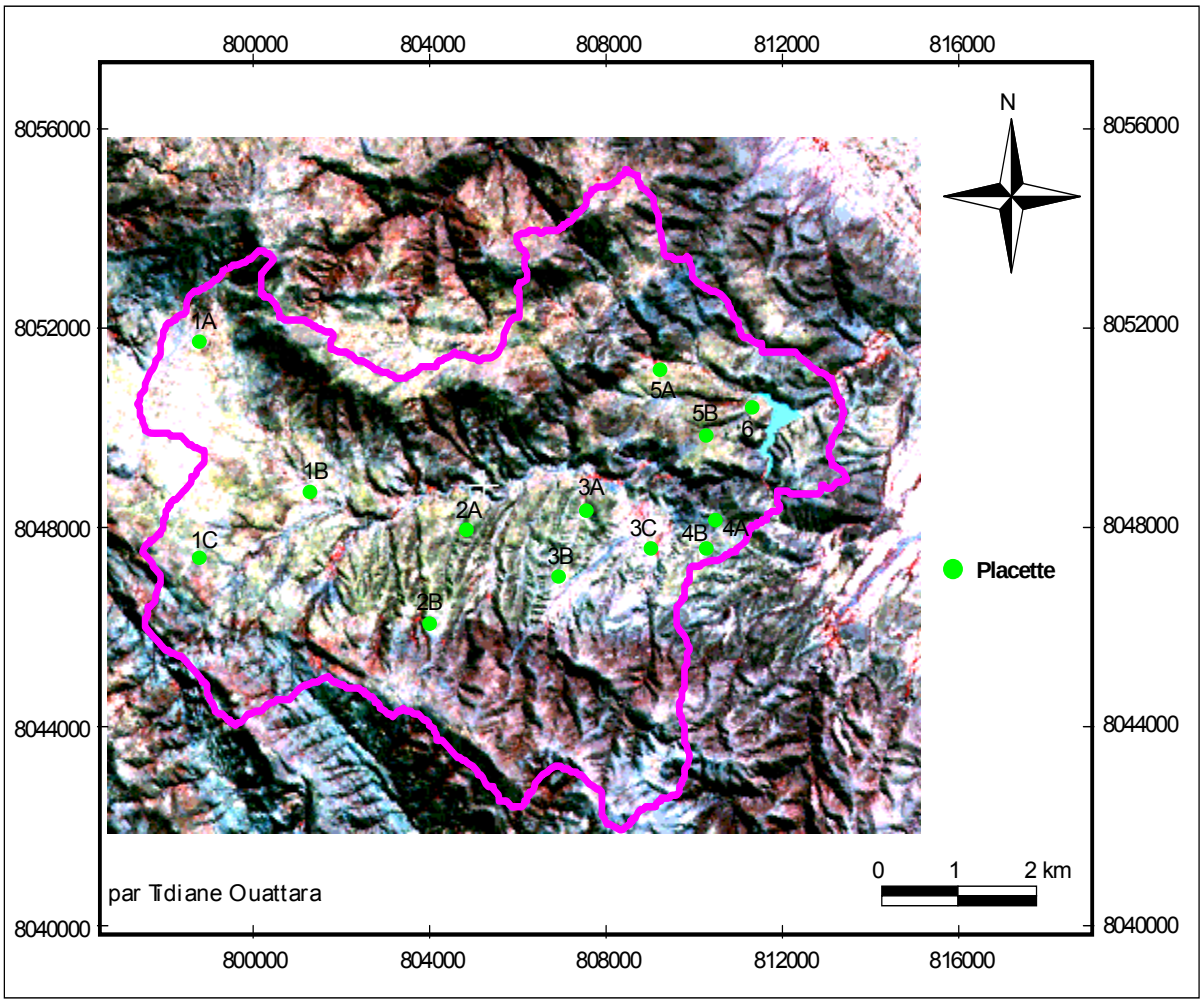


Figure 4 : Localisation des placettes (images de HRV du 8 juillet 1994). *Location of the sample sites (SPOT HRV, July 8th, 1994)*

Pour un bassin versant dont la superficie est comprise entre 20 et 400 km², il est conseillé d'avoir un taux d'échantillonnage compris entre 1 et 10 % (Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 1995). Le bassin versant à l'étude étant d'environ 57 km², le taux d'échantillonnage a été jugé acceptable car il est à l'intérieur de la fourchette conseillée.

3.2. Prétraitements des images

D'après Zang et Montgomery (1994), il faut ajuster la résolution d'un MNA à l'ensemble des données recueillies. Comme certaines données sont dérivées de la carte topographique à 1 : 50 000, on a retenu 30 m comme résolution spatiale de travail pour le MNA et toutes les images ont donc été ramenées à cette résolution spatiale.

L'image d'ETM⁺ a été corrigée géométriquement en fonction de la même carte topographique. Pour ne pas sérieusement détériorer la valeur des pixels, on a choisi un échantillonnage par la méthode la plus simple, qui est celle du plus proche voisin, et l'ordre polynomial 1, qui permet de faire une simple translation linéaire (Richards, 1986). Ensuite, l'image de HRV de 1998 a été corrigée à son tour en fonction de l'image corrigée de celle d'ETM⁺. On a ainsi

obtenu une précision ou une erreur résiduelle moyenne inférieure à 1 pixel.

Afin d'obtenir des valeurs fiables de taux de couvert végétal, des corrections atmosphérique et topographique (puisque le site d'étude est en zone montagneuse) ont été appliquées sur les bandes ETM$^+$1, ETM$^+$2, ETM$^+$3, ETM$^+$4, ETM$^+$5 et ETM$^+$7.

À cet effet, on a utilisé la méthode de Richter (1997) (figure 5), qui intègre les deux catégories de corrections. Ce modèle, qui a été conçu pour des altitudes comprises entre 0 et 1 500 m (Richter, 1997), a donné de bons résultats pour des altitudes supérieures.

Les luminances des bandes d'ETM$^+$ ont été calculées en les étalonnant au moyen des équations du modèle 6-S permettant de le faire pour les bandes de ce capteur (Tanré *et al*., 1986). On a fait varier l'épaisseur optique dans le modèle 6-S jusqu'à ce que la luminance ($L3_{6s}$) de la bande 3 d'ETM$^+$ pour la forêt soit identique à celle ($L3_{cal}$) obtenue au moyen de l'équation appliquée sur la même bande et pour la même cible. Dès lors, les paramètres nécessaires à l'utilisation du modèle de Richter ont été retenus : θ_s (angle zénithal solaire), φ_s (angle azimutal solaire), τ_v (transmittance de l'angle de vue sol-capteur), τ_s (transmittance direct soleil-sol), L_b ou L_p (radiance atmosphérique intrinsèque), E_S (irradiance solaire extraterrestre) et E_d (éclairement solaire direct).

En outre, à partir du MNA, l'altitude (Z), l'inclinaison de la pente (θ_n) et l'orientation de la pente (φ_n). θ_n et φ_n ont été calculées, permettant de calculer cosβ (cosinus de l'angle entre les rayons solaires et la surface normale). Tous ces paramètres intégrés à l'équation de Hay (équation 3) fournissent le paramètre Ed* (flux solaire diffus). Enfin, en introduisant chaque bande et ses paramètres atmosphériques, ainsi que Ed*, qui lui sont propres dans l'équation de Richter (équation 4), la réflectance corrigée est obtenue :

$$Ed^*(x,y,z) = E_d(z)\left[\tau_s(z)\cos\beta(x,y) + \{1-\tau_s(z)\cos\theta_s\}\cos^2(\theta_n(x,y)/2)\right] \quad (3)$$

$$\rho(x,y) = \frac{\pi\left[d^2\{c_o + c_1 DN(x,y)\} - L_p(z)\right]}{\tau_v(z)\left[Es\tau_s(z)\cos\beta(x,y) + Ed^*(x,y,z)\right]} \quad (4)$$

où DN (x, y) est le niveau de gris du pixel considéré ;

c_o et c_1 sont l'offset et le gain dans l'équation de calibrage pour chaque bande spectrale ;

d est la distance terre soleil en unité astronomique

Dans le but de rendre perceptibles les objets sur l'image radar, un filtrage a été fait avant la correction géométrique car cette dernière altère la valeur des pixels à cause du ré-échantillonnage (Richards, 1986). À cet effet, le filtre Gamma d'une taille de 7 x 7 a été retenu car il donne le meilleur résultat. Le résultat du filtrage a été apprécié en se fondant sur la netteté de la délimitation des contours des objets de l'image. Le résultat du filtrage est meilleur si les contours des objets sont bien définis, si le lissage n'est pas trop fort et si l'aspect textural (sel-poivre) est plus ou moins conservé. Ces deux derniers éléments sont importants car ils permettent l'analyse de texture dans l'optique de mieux identifier des objets difficilement identifiables ou dissociables.

Dans le cadre de la correction géométrique de l'image radar, la méthode photogrammétrique a été utilisée (Toutin, 1996). Le principe consiste à illuminer le MNA sous le même angle que l'image radar originale. Avec l'image simulée résultante,

l'image originale est corrigée à l'aide de points de contrôle. La méthode du plus proche voisin et l'ordre polynomial 1 ont été appliqués afin de moins détériorer les valeurs des pixels (Richards, 1986). L'erreur résiduelle moyenne est de 0,23 pixel.

3.3. Création des néobandes : les paramètres de texture

Une analyse visuelle de l'image radar corrigée montre que la seule utilisation de la radiométrie ne pouvait pas permettre d'extraire toutes les informations recherchées, d'où la création de néobandes basées sur les paramètres de texture. Des 14 paramètres proposés par Haralick *et al.* (1973) pour résumer le contenu en information de texture des matrices de cooccurrence, ont été retenus l'homogénéité, le contraste, la dissimilarité, la moyenne, l'écart type, l'entropie, le second moment angulaire et la corrélation. Ces paramètres ont fait leur preuve dans l'identification de catégories d'occupation des terres (Ratté, 1999). Ensuite, les paramètres de texture qui ont les mêmes contenus en information ont été mis en évidence afin d'éviter une redondance en les utilisant. À cet effet, le coefficient de corrélation a été calculé pour ces paramètres pris deux à deux. Pour un coefficient de corrélation inférieur ou égal à 0,4, deux images de texture sont considérées comme non corrélées c'est-à-dire ayant des informations non redondantes (Bannari *et al*., 1995).

3.4. Cartographie de l'occupation des terres

On a choisi une classification dirigée par maximum de vraisemblance portant sur les bandes d'ETM+ (sauf la bande 6), les bandes de HRV, les paramètres de texture ainsi que l'image radar originale afin d'obtenir la carte initiale d'occupation des terres.

Cette première classification montrait qu'il était impossible de délimiter les zones de cultures sur les images utilisées. Afin de bien identifier et délimiter les zones de cultures et afin d'obtenir la carte finale d'occupation des terres, la carte d'occupation des terres initiale a été fusionnée avec celle du taux de couvert végétal.

Les indices de végétation ont été développés dans le domaine de la télédétection pour mieux évaluer la présence et le taux de couvert végétal (Baret *et al*., 1989). L'intérêt de ces indices dans cet article est d'abord de mieux cartographier les catégories de couverts des terres et, ainsi, d'augmenter la précision des classifications. Purevdorj *et al*. (1998) ont fait une étude comparative entre plusieurs de ces indices de végétation dans le but de calculer le taux de couvert végétal tant en zone semi-aride à végétation éparse qu'en zone humide de végétation dense. Ils arrivent à la même conclusion que Baret *et al.* (1989) : le TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) est le plus efficace pour le calcul des taux de couvert végétal en milieu semi-aride à végétation éparse, car il donne des résultats comparables à la réalité de terrain. En s'appuyant sur les bandes dans le proche infrarouge et le rouge, Baret *et al*. (1989) ont utilisé la pente de la ligne des sols nus et son origine dans le calcul du TSAVI.

En s'appuyant sur la courbe de régression linéaire (figure 6) et les équations 5 et 6 (Ouattara, 2002 ; Baret *et al*., 1989), le taux de couvert végétal a été calculé :

$$\mathrm{TSAVI} = \frac{\left[a\left(\mathrm{NIR} - a\mathrm{R} - b\right)\right]}{\left(\mathrm{R} + a\mathrm{NIR} - ab\right)} \qquad (5)$$

où a est la pente de la courbe des sols nus ;

b est l'origine de la courbe ;

NIR est la bande spectrale dans le proche infrarouge ;

R est la bande spectrale dans le rouge.

(équation de Purevdorj *et al*., 1998)

$$\text{Le taux de couverture végétale}\left(\%\right) = 1{,}062 + \left(43{,}5442 * \mathrm{TSAVI}\right) + \left(97{,}817 * \mathrm{TSAVI}^2\right) \qquad (6)$$

Pour valider la carte de taux de couvert végétal, cette dernière a été comparée à la réalité de terrain, tout en étant conscient que ces observations avaient été prises l'année précédente lors d'une saison particulièrement sèche, ce qui n'est pas idéal. Pour chaque classe, le nombre d'observations concordantes ont été comptabilisées et, de ce fait, le pourcentage de réussite. La moyenne de réussite générale s'obtient ensuite en utilisant les pourcentages de réussite des différentes classes.

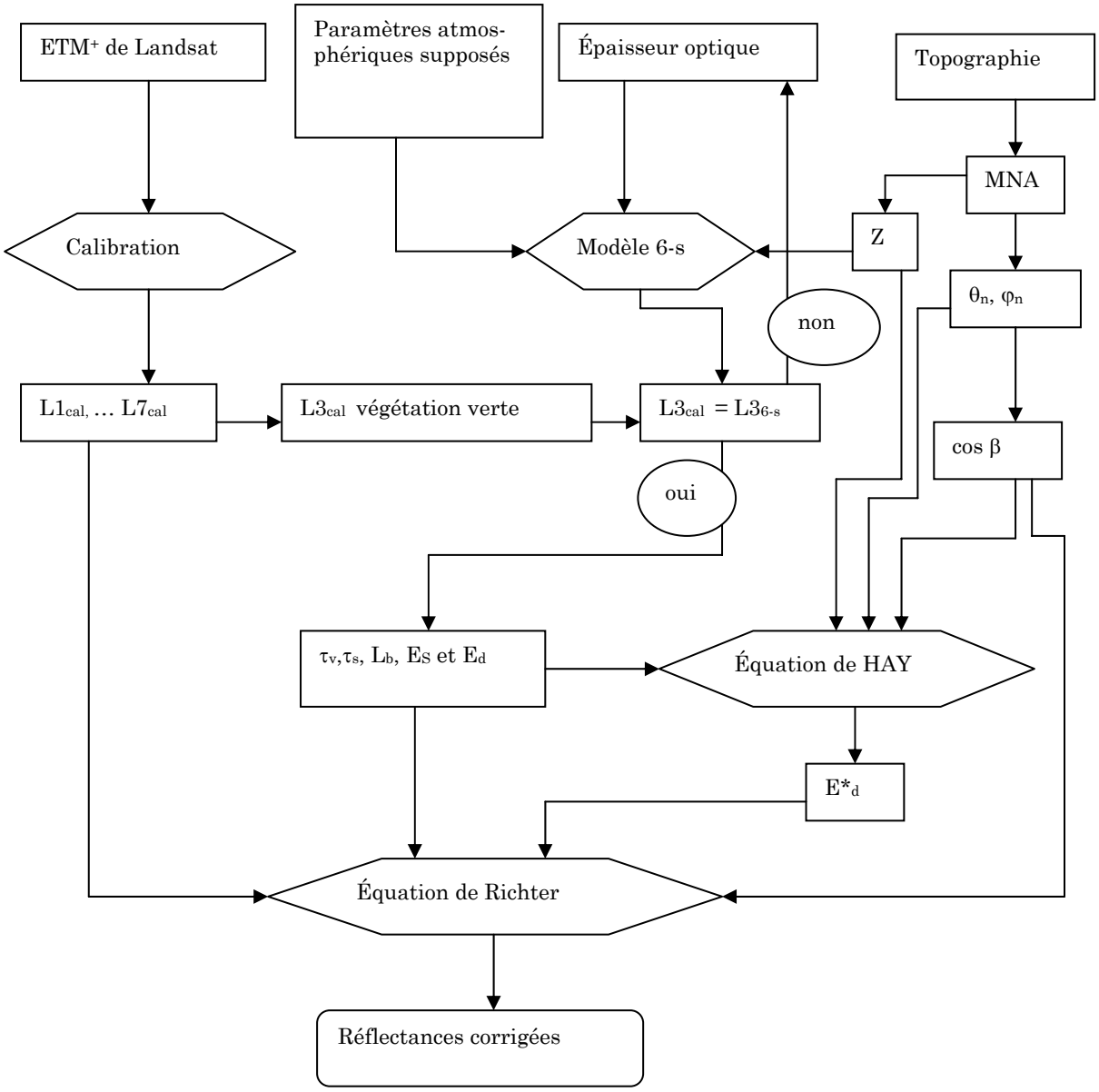


Figure 5 : Corrections atmosphérique et topographique d'après la méthode de Richter (1997). *Atmospheric and topographic corrections according to Richter (1997)*

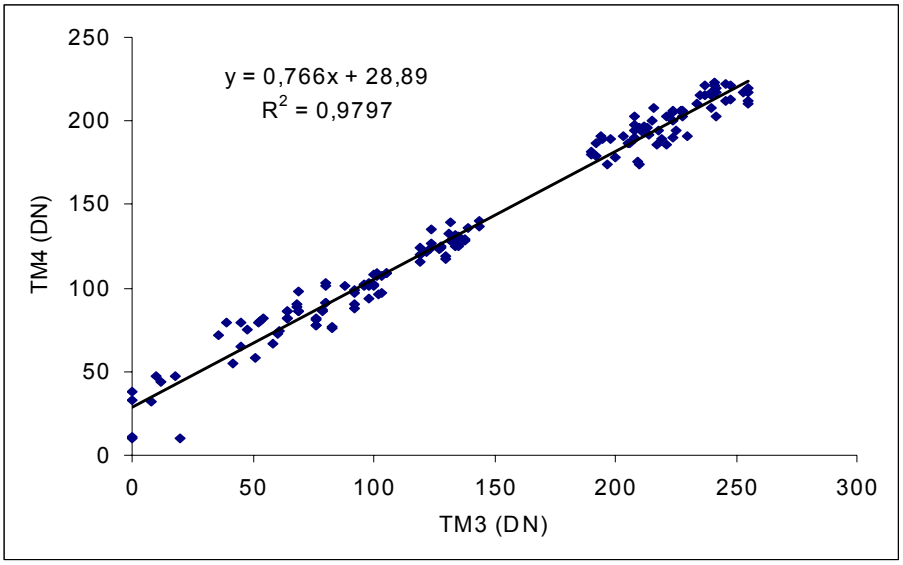


Figure 6 : Droite de corrélation entre les sols nus et le DN corrigé de 3 200 pixels dans le bassin versant du lac Laka-Laka. *Bare soil and DN correlation for 3 200 pixels in the lake Laka-Laka watershed*

4. RÉSULTATS

La carte de taux du couvert végétal (figure 7) montre que 98 % de la superficie du bassin versant du lac Laka-Laka (5 586 ha) est couverte de végétation dont la densité varie entre 0 et 15 %. Les densités végétales de plus de 15 % se trouvent en général sur les sommets. La validation de la carte a donné une précision globale de 87 %. Cette précision peut paraître élevée, mais elle a été faite avec seulement cinq catégories d'occupation des terres. De plus, sur les 836 combinaisons de bandes testées, il y en tout de même 14 qui donnent une précision supérieures à 80 % (tableau 1).

La classification des images a permis d'identifier la végétation verte, la végétation sénescente brune, le sol nu et l'eau. Des combinaisons de bandes donnent un coefficient Kappa de 0,9 et plus, ainsi qu'un taux moyen de classification de plus de 90 % (tableau 1). Toutes ces combinaisons offrent un taux de classification supérieur à 80 % pour chaque classe. L'image des bandes d'ETM$^+$ prises individuellement donne de très bons résultats surtout pour les combinaisons ETM$^+$2-ETM$^+$3-ETM$^+$4, ETM$^+$1-ETM$^+$3-ETM$^+$4, ETM$^+$1-ETM$^+$2-ETM$^+$4, ETM$^+$2-ETM$^+$4-ETM$^+$5. En n'ayant que les bandes 2 et 4 de l'image d'ETM$^+$, l'image radar est d'un apport certain. Les types de combinaison suivants mettent en évidence l'apport de l'image radar originale et des paramètres de texture en les utilisant conjointement avec les bandes 2 et 4 de l'image d'ETM$^+$ dans l'optique de la cartographie de l'occupation des terres : entropie-ETM$^+$2-ETM$^+$4, corrélation-ETM$^+$2-ETM$^+$4, homogénéité-ETM$^+$2-ETM$^+$4, moyenne-ETM$^+$2-ETM$^+$4, écart type-ETM$^+$2-ETM$^+$+4, image radar originale-ETM$^+$2-ETM$^+$4, dissisimilarité-ETM$^+$2-ETM$^+$4 et second moment angulaire-ETM$^+$2-ETM$^+$4. Enfin, une combinaison d'ETM$^+$ et de HRV donne des taux de classification élevés avec XS1-ETM$^+$3-ETM$^+$4 et XS2-ETM$^+$3-ETM$^+$4.

La combinaison ETM$^+$2-ETM$^+$3-ETM$^+$4 a été choisie pour élaborer la carte initiale d'occupation des terres car elle donne le meilleur résultat de classification, aussi bien pour la végétation verte (91 %) que pour la végétation sénescente brune (100 %), le sol nu (98 %) et l'eau (87 %). La combinaison des cartes initiales d'occupation des terres et de taux de couvert végétal a permis d'identifier et de délimiter les zones de culture, d'où la carte finale d'occupation des terres (figure 8). En effet, on a constaté que la zone de culture est mise en évidence lorsque le taux de couvert végétal se situe entre 1 et 5 % et coïncide avec du sol nu.

Le sol nu se confond donc avec les zones de culture dans les classifications de l'occupation des terres. Cependant, quand on examine la combinaison de la carte d'occupation des terres (sans cultures) avec le taux de couvert végétal, les zones de cultures (1-5 % de couvert végétal) ressortent.

Sur la carte finale d'occupation des terres, la végétation occupe 81 % du bassin versant, soit 4 617 ha, tandis que le sol nu, les zones de cultures et l'eau (le lac) couvrent 19 % du bassin versant. Bien qu'ils soient, par endroits, sur le substratum rocheux, les sols nus et les zones de cultures sont généralement contigus et principalement localisés sur les formations meubles silteuses et sableuses.

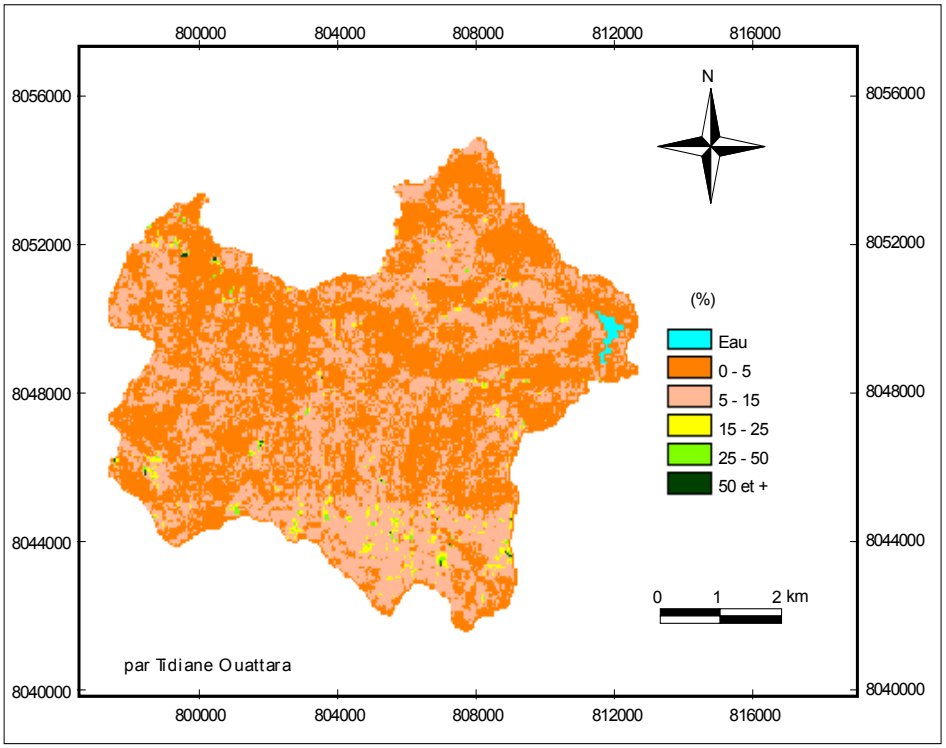


Figure 7 : Taux de couvert végétal du bassin versant du lac Laka-Laka en 1999. *Vegetation cover rate for the lake Laka-Laka watershed in 1999*

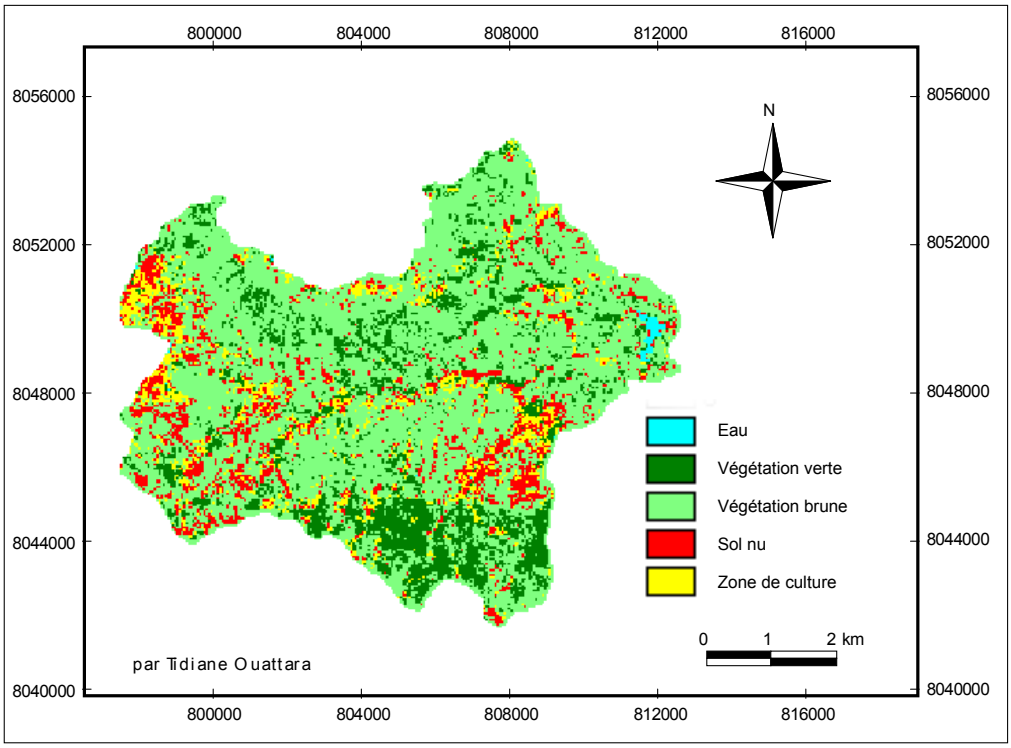


Figure 8 : Occupation des terres du bassin versant du lac Laka-Laka en 1999. *Land cover of the lake Laka-Laka watershed in 1999*

Tableau 1 : Principaux résultats des classifications d'images. *Main results of image classifications*

Combinaison de bandes	Végétation verte (%)	Végétation brune (%)	Sol nu (%)	Eau (%)	Précision moyenne (%)	Précision générale (%)	Coefficient Kappa
14,15,16	91,6	100	98,6	87,7	94	96	0,94
13,15,16	88,2	100	97,9	93,8	95	96	0,94
2,14,16	83,4	99,6	98,6	87,7	92	95	0,92
1,14,16	80,1	99,6	100	87,7	92	95	0,92
9,14,16	83,9	99,8	97,8	88,1	92	95	0,92
10,14,16	84,3	99,8	96,9	88,2	92	94	0,91
4,14,16	82,7	99,5	97,9	87,7	92	94	0,91
13,14,16	75,9	98,1	100	87,7	90	94	0,90
7,14,16	83,7	96,9	97,3	87,7	91	94	0,90
8,14,16	83,7	96,9	97,3	87,7	91	94	0,90
12,14,16	83,5	97,2	97,2	87,7	91	94	0,90
14,16,17	83,9	99,8	94,2	89,2	92	93	0,90
6,14,16	81,1	97,5	97	87,9	91	93	0,90
11,14,16	81,4	98,3	96,4	87,7	91	93	0,90

N.B. : Signification des chiffres dans la colonne des combinaisons de bandes :
- bandes de HRV : 1 = XS1 ; 2 = XS2 ;
- paramètres de texture issus de RSO : 4 = homogénéité ; 6 = dissimilarité ; 7 = moyenne ; 8 = écart type ; 9 = entropie; 10 = corrélation; 11 = second moment angulaire; 12 = image radar originale ;
- bandes d'ETM^+ : 13 = ETM^+1 ; 14 = ETM^+2 ; 15 = ETM^+3 ; 16 = ETM^+4 ; 17 = ETM^+5.

5. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

En général, le bassin versant présente un faible taux de couvert végétal. Ce taux s'explique d'abord par le climat semi-aride caractérisé par une faible pluviosité. Ensuite, les formations meubles sur lesquelles poussent les végétaux se ressuient généralement de façon excessive à cause de leur faible aptitude à la rétention d'eau. Enfin, les activités humaines (labours et coupes de bois de feu) contribuent à réduire la densité du couvert végétal. Les rares taux élevés de couvert végétal se rencontrent sur les sommets car ce sont généralement des endroits d'accès difficiles. Cependant, lorsque ces taux élevés sont situés dans les zones fréquentées, il s'agit de parcelles de reboisement. Les zones de cultures occupent des endroits où la matrice argileuse et sableuse des sols l'emporte sur la pierrosité. Les sols nus et les zones de cultures sont contigus à cause de la pratique agricole de rotation des cultures et de la répartition de la pluviosité. La surexploitation, qui s'explique par la rareté des zones cultivables due à la forte pierrosité, épuise les sols. Les sols nus peuvent aussi s'expliquer par la présence de sols labourés prêts à être cultivés.

À travers la correction des effets topographiques, on apporte une rigueur dans l'utilisation des images satellitaires pour la cartographie de l'occupation des terres en zones de fort relief. On apporte de nouveaux éléments à la cartographie de l'occupation des terres. En effet, on démontre, qu'en n'ayant que les bandes 2 et 4 d'ETM^+, il est possible d'utiliser les images de texture de RSO de RADARSAT afin de réaliser une bonne cartographie de l'occupation des terres. Enfin, on met en évidence que la combinaison de résultats indépendants, soit une carte générale d'occupation des terres et une carte du taux de couvert végétal obtenue à l'aide du TSAVI,

permet d'améliorer la distinction entre les sols nus et de zone de culture en milieu semi-aride, ce qui est à notre avis une importante contribution. Et ce constat est validé à l'aide de la réalité de terrain. Il se peut que ce constat ne soit pas nécessairement vrai partout ailleurs, mais c'est un fait dans cette région.

Une des faiblesses de l'étude semble être le fait que le taux de couvert végétal a été validé par une réalité de terrain faite en 1998, soit un an avant la prise des données satellitaires d'ETM+, et on peut se demander si les conditions exceptionnellement sèches de 1998 permettent de refléter la réalité de la végétation en 1999. En fait, l'expérience montre que l'importance est que nous avons affaire à une végétation sèche et qu'elle soit plus ou moins sèche ne change rien puisque de toute façon elle est difficile, voire impossible, à repérer avec ETM+. Cependant, l'utilisation du TSAVI offre une porte de sortie efficace pour distinguer, des sols nus, cette catégorie d'occupation des terres très importante que sont les zones de cultures. En effet, les zones de culture sont plus vulnérables à l'érosion que les sols nus car elles sont labourées.

6. CONCLUSION

Différentes combinaisons de bandes, provenant d'images de HRV, d'ETM+ et de RSO, donnent des résultats intéressants pour obtenir une carte d'occupation des terres en milieu semi-aride à végétation éparse. Tout comme les autres combinaisons conventionnelles, aucune n'arrive à faire une bonne distinction entre la végétation sénescente brune, les sols nus et les zones de culture, d'où l'importance de l'utilisation de l'indice TSAVI. En utilisant le taux de couvert végétal provenant de l'indice TSAVI, on a pu cartographier les zones de culture, améliorant ainsi le résultat de la cartographie des catégories d'occupation des terres. Cette façon de faire permet ainsi de remédier à la difficulté de différenciation de la végétation sénescente brune, des sols nus et des zones de culture. Par ailleurs, les méthodes de démixage spectral et de réseau de neurones combinées aux indices de végétation sont d'autres voies à explorer.

Remerciements

Nous remercions le Gouvernement ivoirien, le Centre d'investigation et de recherche en télédétection (CISTEL) de l'Universidad Mayor de San Simon, en Bolivie, l'Association des universités et collèges du Canada (AUCC) ainsi que le Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) (projet 4250) pour le soutien financier et matériel ayant permis la réalisation de ce projet.

Références

Agbu, P.A. (1991) Comparison between spectral mapping units derived from SPOT image texture and field soil map units. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, nº 4, p. 397-405.

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

Baret, F., Guyot, G. and Major, D.J. (1989) TSAVI : A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *In* Proceedings of The 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, 1989, p. 1355-1358.

Champin, F.S. III, Zavaleta, E.S., Eviner, V.T., Naylor, R.L., Vitousek, P.M., Reynolds, H.L., Hooper, D.U., Lavorel, S., Sala, O.E., Hobbie, S.E., Lack, M.C. and Diaz, S. (2000) Consequences of changing biodiversity. Nature, nº 401, p. 234-242.

CIDRE (Centro de Investigación y Desarrollo Regional) (1990) Proyecto múltiple de recursos hídricos Laka-Laka. Cochabamba, Bolivia, 56 p.

Congalton, R.G. (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, vol. 37, p. 35-46.

De Keersmaecker, M.L. (1987) Stratégie d'échantillonnage des données de terrain intégrées dans l'analyse d'images satellitaires. L'espace géographique, vol. XIV, nº 3, p. 195-205.

Douglas, I. (1999) Hydrological investigations of forest disturbance and land cover impacts in South-East Asia : a review. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, p. 1725-1738.

Escadafal, R. (1989) Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Études et thèses, ORSTOM, Paris, 312 p.

Foody, G.M. (2002) Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment, vol. 80, p. 185-201.

Godard, V. (1990) Télédétection et « enquête terrain » dans le sud-ouest mauritanien : optimisation des enquêtes de terrain pour la cartographie de l'occupation du sol et diagnostic de l'état de l'environnement. *In* CNRS (réd.) Actes des Tables rondes internationales : Télédétection et paysages tropicaux. Octobre 89, CNRS-CEGET, p. 85-105.

Haralick, R. M., Shannugam, K. and Its'hak, D. 91973) Textural features for images classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, p. 610.

Lamachère, J.-M. et Puech, C. (1996) Télédétection, cartographie des états de surface et modélisation hydrologique. *In* ORSTOM (réd.) Actes de l'atelier FAO. Montpellier, 55 p.

Major, D.J., Baret, F. and Guyot, G. (1990) A ration vegetation index adjusted for soil brightness. International Journal of Remote Sensing, vol. 11, n° 5, p. 727-740.

Metternicht, I.G. (1996) Detection and monitoring land degradation features and processes in the Cochabamba valleys, Bolivia. A synergistic approach. Thèse de doctorat, Université de Ghent (Belgique), 390 p.

Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (1995) Assessment of sedimentation of the Laka-Laka reservoir, Bolivia. Northwest Hydraulic Consultants Ltd, North Vancouver, 107 p.

Ouattara, T. (2002) Modélisation de l'érosion hydrique en milieu semi-aride de forte énergie de relief à partir de données de télédétection : application à la Bolivie. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 174 p.

Penner, J.E. (1994) Atmospheric chemistry air quality. *In* W.B. Meyer, B.L. Turner II (réd.) Changes in land use and land cover: a global perspective. Cambridge University Press, Cambridge, p. 175-209.

Pickup, G. and Marks, A. (2000) Identifying large-scale erosion and deposition processes from airborne gamma radiometrics and digital elevation models in a weathered landscape. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 25, p. 535-557.

Pratt, W.K. (1991) Digital image processing. 2e édition, John Wiley, New York, 698 p.

Purevdorj, Ts., Tateishi, R., Ishiyama, T. and Honda, Y. (1998) Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 18, p. 3519-3535.

Ratté, K. (1999) Identification de la composante formations meubles avec des images RSO de RADARSAT pour la cartographie des districts écologiques de l'île d'Anticosti (Québec). Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 79 p.

Richards, J.A. (1986) Remote sensing digital image analysis: an introduction. Springer-Verlag, Berlin, 281 p.

Richter, R. (1997) Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n° 5, p. 1099-1111.

Schowengerdt, R.A. (1983) Technique for image processing and classification in remote sensing. Academic Press Inc., New York, 245 p.

Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.-J., Perbos, J. and Deschamps, P.Y. (1986) Simulation of the satellite signal in the solar spectrum. Université des Sciences & Techniques, Laboratoire d'optique atmosphérique, Lille, 115 p.

Toutin, T. (1996) La correction géométrique rigoureuse : un mal nécessaire pour la santé de vos résultats. Journal canadien de télédétection, vol. 22, n° 2, p. 184-189.

Zang, W. and Montgomery, D.R. (1994) Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. Water Resources Research, vol. 30, n° 4, p. 1019-1028.