

Évaluation spatiale et multi-temporelle de la *cangahua* à partir d'images SPOT

Georges DE NONI, Marc VIENNOT

Abstract

The cangahua, important component of the Ecuadorian highlands landscape presents a very weak fertility. This is the result of old-fashioned and inadequate management by the indigenous populations, whose food needs exceed agricultural supplies.

It was interesting to evaluate a dynamic process such as the extension of the cangahua with remote sensing from images SPOT as the cangahua mineral material presented a typic spectral response in the 3 main bands.

Two experiences are presented:

- *The first dealt with a spatialization of the cangahua on two 10-year periods (1986-1995), on the slopes of the volcano Ilalo, close to Quito, in a well-known and small region (15 sq km).*

- *The second compared a conventional field mapping to a satellite mapping of the whole new volcanic highlands (5 scenes of 60 sq km).*

The method leant on the definition of themes, the identification of these on well-known areas (training samples), the definition of spectral characteristics of the training samples and the extrapolation to the whole region (classification) in order to minimize geometrical distortions, angular incidence and atmospheric conditions.

The first study emphasized the increase of cangahua areas in relation with the settlement, the travelling of men and cattle; the theme of discontinuous cangahua with a broad spectral signature explained a process still dynamic nowadays. The comparison of the 2 mappings showed a convergence for the typic cangahua but the results differed for the discontinuous one.

Remote-sensing is an efficient tool for mapping cangahua. However it requires a good knowledge of the field and improvement and automation of the various distortions.

Keywords: *Hardened Volcanic Soils - Cangahua - Erosion - Remote-Sensing - SPOT -*

INTRODUCTION

Cet article, réalisé sur la base des résultats des travaux de Servenay (1995) et de Faure (1996), relate un essai d'évaluation spatiale et multi-temporelle de la *cangahua* à partir d'images Spot. L'acquisition de ces images a été possible grâce à l'appui financier

du programme de l'Union Européenne n° TS3, CT93-0252 portant sur « La régénération et la conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique latine : Chili, Équateur, Mexique » et au soutien du CNES, à travers son programme de subvention « Incitation à l'utilisation scientifique des images Spot » (ISIS).

Le recours à la télédétection a été choisi pour les raisons suivantes :

- la *cangabua* est une composante des paysages des Andes équatoriennes dont la signature spectrale se prête bien à une approche satellitaire. Du fait de ses caractéristiques propres (couleur claire, absence de végétation), la *cangabua*, en particulier lorsqu'elle affleure et se présente sous la forme d'une surface lisse et homogène englobant plusieurs pixels, réfléchit un rayonnement électromagnétique comparable à celui d'une surface minérale. Ce type de surface est particulièrement bien adapté à la technologie du satellite SPOT dont deux des canaux, XS1 et XS2, permettent d'apprécier dans le spectre visible les éléments minéraux ;
- l'existence de données de terrain qui ont servi de référence pour vérifier la pertinence des traitements et des interprétations réalisées sur les images SPOT. Ces données se présentent sous la forme de cartes thématiques (notamment pour les sols et leur usage actuel) à différentes échelles et de relevés de terrain localisés au GPS (*Global Positioning System*).

Afin d'atteindre l'objectif fixé, 2 types d'échelles ont été pris en compte pour interpréter les images SPOT et appliquer les traitements de télédétection :

- d'une part, une échelle locale, de l'ordre du 1/50 000, correspondant au versant oriental du volcan Ilaló dans le bassin de Quito. C'est dans cette région qu'ont été effectués les premiers essais d'évaluation spatiale de la *cangabua* car cette formation occupe ici de grandes surfaces et présente des caractéristiques morphologiques bien marquées par rapport aux autres thèmes. En outre, l'existence de deux images SPOT couvrant cette même zone, à 10 ans d'intervalle, a permis de procéder à une approche multi-temporelle de la *cangabua* sur des zones-tests ;
- d'autre part, une échelle régionale, de l'ordre du 1/500 000, englobant les parties centrales et septentrionales du bassin interandin concernées par la *cangabua*, depuis l'extrémité nord du bassin d'Ibarra jusqu'au sud de Riobamba. Cet essai de spatialisation de la *cangabua* au niveau du bassin interandin a été entrepris une fois réalisés et calés les premiers essais de détection du matériau sur la région orientale du volcan Ilaló.

CANGAHUA ET TÉLÉDÉTECTION

Le fait que la *cangabua* présente une bonne signature spectrale n'est pas une raison suffisante pour justifier le choix de ce thème pour des traitements de télédétection, d'autant plus qu'il s'agit d'un objet d'étude, *a priori* très lié à une problématique locale équatorienne. En effet, la *cangabua* désigne dans les parties centrale et septentrionale de la montagne andine de l'Équateur une formation indurée inculc en l'état pour l'agriculture. Ce matériau présente en effet de fortes contraintes physiques auxquelles s'ajoute une carence importante en matière organique et en phosphore (Custode *et al.*, 1992).

Pourquoi s'intéresser à la *cangabua*, compte tenu de son acception très locale et de ses très faibles potentialités pour l'agriculture ? Plusieurs réponses peuvent être apportées à ce questionnement :

- au-delà de la terminologie locale, il ressort, sur la base d'autres recherches menées en Amérique latine, que la présence d'horizons indurés dans les sols volcaniques n'est pas un phénomène isolé et typique de l'Équateur. En effet, ce matériau occupe, outre

l'Équateur, une grande extension à l'échelle du continent, notamment au Mexique (*tepetate*), au Nicaragua (*talpetate*) et plus localement en Colombie et au Chili (Prat, 1991 ; Zebrowski, 1992) ;

- dans les régions concernées, les horizons indurés, *cangabua* ou autres, n'affleurent qu'après le décapage par l'érosion hydrique des horizons plus meubles qui les coiffent. Dans un milieu où l'emprise forte des Andes, cumulée à une augmentation de la pression démographique sur les sols, est à l'origine d'une érosion chronique et sans cesse plus grave, la connaissance et le suivi de la *cangabua* constituent des indicateurs de première importance pour évaluer la dynamique des processus (De Noni *et al.*, 1986) ;
- des essais agronomiques ont montré qu'après ameublissement et avec une régénération adaptée, la *cangabua* retrouve les propriétés d'un sol et fournit une productivité acceptable. Dans d'autres cas, des essais de reboisement, notamment en eucalyptus, se sont révélés également satisfaisants. Les régions qui ne bénéficient pas d'actions de ce type périlclitent et se vident progressivement de leurs habitants. L'étude de la *cangabua* intéresse donc aussi les planificateurs agricoles qui doivent décider d'actions de réhabilitation des sols et de conservation des pentes (De Noni *et al.*, 1992 ; Quantin, 1992).

Parmi les éléments de connaissance à acquérir en premier lieu, se pose, pour les planificateurs agricoles, la question de la dimension spatiale et multi-temporelle de la *cangabua*.

Une réponse partielle est fournie à cette question par les travaux de l'ORSTOM, menés en coopération avec le Ministère équatorien de l'Agriculture, qui ont conduit à la réalisation, entre 1974 et 1984, d'une série de cartes pédologiques qui couvrent tout le pays. La montagne andine a donc été entièrement cartographiée, aux échelles de 1/50 000 et 1/200 000. Une carte de synthèse sur la *cangabua* a été réalisée, sur la base d'informations datant de 1984 (Zebrowski, 1997).

Néanmoins, une cartographie de ce type n'est pas suffisante pour répondre aux questions posées ci-avant, notamment en ce qui concerne la dynamique multi-temporelle de la *cangabua*. Rappelons que ce matériau constitue une sorte d'indicateur naturel d'évolution de l'érosion des sols et qu'il change donc de limites spatiales au cours du temps. Autrement dit, une cartographie élaborée en 1984 ne peut pas renseigner correctement sur l'état du matériau en 1995 ce qui pose la nécessité du recours à une autre approche. En ce sens, la télédétection présente un avantage indéniable dans la mesure où elle peut permettre d'augmenter la fréquence de saisie spatiale du matériau et d'effectuer ainsi un suivi multi-temporel des phénomènes, opérations difficilement concevables par les méthodes conventionnelles de cartographie.

Les traitements de télédétection

QUELQUES RAPPELS DE BASE SUR LA TÉLÉDÉTECTION ET LE SATELLITE SPOT

La télédétection se définit comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (J.O. du 12 décembre 1980 et Commission Ministérielle de la Terminologie de la Télédétection Aéro-spatiale, COMITAS, 1980). Ces objets peuvent être déterminés sans contact matériel parce qu'ils produisent des ondes électromagnétiques dues soit au réfléchissement de l'énergie solaire dans le spectre « visible » et « proche infra-rouge » (bande spectrale de 0,4 à 2 μ) soit à l'émission du rayonnement terrestre dans l'infra-rouge (bande spectrale de 2 à 14 μ).

Pour enregistrer ces ondes, il existe différents types de capteurs. Dans notre cas, on a utilisé les données fournies par le satellite français SPOT, équipé de détecteurs ou radiomètres qui enregistrent en continu, au cours du déplacement orbital, les valeurs réfléchies par la surface terrestre. Ces valeurs sont codées sur 8 octets ce qui permet de disposer de 256 valeurs radiométriques (0-255). SPOT travaille en mode multispectral dans le spectre « visible » et « proche infra-rouge ». Il prend en compte 3 longueurs d'ondes principales et génère donc 3 canaux : XS1, XS2 et XS3 (CNES, 1992) :

Longueur d'ondes (en μm)	Ondes électro-mag. réfléchies	Canaux de SPOT
0,50-0,59	Vert	XS1
0,61-0,68	Rouge	XS2
0,79-0,89	Proche Infra-rouge	XS3

Chaque canal est composé de lignes et de colonnes où le point élémentaire de la mesure au sol (pixel) est de 20 x 20 m. La largeur au sol des enregistrements de SPOT est fonction de l'angle d'incidence des prises de vue : pour les images utilisées dans cette recherche, la largeur au sol est comprise entre 60 et 80 km.

Pour pouvoir couvrir la partie du bassin interandin, où se trouve la *cangabua*, on a utilisé 5 images SPOT. Une 6^e image a été acquise afin de réaliser l'étude multi-temporelle de la zone de l'Ilaló. Les caractéristiques de ces images sont les suivantes :

Zones couvertes	Références K-J	Date de prise de vue	latit. / long. (centre de l'image)	Angle d'incidence en °
Ibarra-Otavallo	640-349	8/02/95	N0°30'04" W78°10'06"	6,3
Quito-Cayambe	640-350	26/11/86	S0°00'01" W78°10'06"	6,3
Quito-Cayambe	640-350	8/02/95	N0°00'00" W78°16'58"	6,3
Machachi-Cotopaxi	640-351	8/02/95	S0°30'03" W78°23'34"	6,3
Latacunga-Ambato	640-352	25/07/95	S01°00'07" W78°30'28"	28,9
Chimborazo-Riobamba	640-353	25/07/95	S01°30'11" W78°37'16"	28,9

Les premiers essais d'interprétation de la *cangabua* ont porté sur la zone de l'Ilaló qui se trouve sur les images référencées Quito-Cayambe, captées par SPOT respectivement le 29/11/1986 et le 08/02/1995 (Servenay, 1995). Les 5 images prises en 1995 couvrent les parties nord et centre du bassin interandin et ont servi à l'interprétation régionale (Faure, 1996).

LES TRAITEMENTS RÉALISÉS

Pour caractériser l'extension spatiale et l'évolution temporelle de la *cangabua*, on a eu recours aux techniques conventionnelles de la télédétection. Celles-ci reposent sur

la mise en œuvre de traitements spécifiques des images : compositions colorées, extractions et parcelles d'entraînement qui conduisent à des « classifications ». Les méthodes de classification sont des opérations portant sur les valeurs spectrales et visent à faire correspondre à une thématique donnée des groupements de valeurs radiométriques. La qualité de cette démarche dépend, bien entendu, de la pertinence à formuler une hypothèse statistique qui dépend, à son tour, d'une connaissance minimale des réalités du terrain.

En fonction des connaissances acquises sur la région du volcan Ilaló, cas traité en premier, et des échelles d'approche différentes, les deux exemples présentent, au niveau des traitements de télédétection, une partie commune et une partie qui les différencie.

Ce qui est commun aux deux approches

Dans les deux cas, quelle que soit l'extension de la zone d'étude et le niveau d'échelle pris en compte, le processus de traitement de l'image s'applique aux 3 canaux de SPOT et passe par les 3 étapes suivantes : composition colorée, extractions et calcul de néo-canaux.

La composition colorée, qui est un néo-canal, est une représentation en fausses couleurs de la zone d'étude où sont superposés les 3 canaux (Lundén *et al.*, 1990). Initialement, la visualisation de chaque canal repose sur l'attribution d'un niveau de gris à une valeur radiométrique. Dans la table de codage associée à l'image, il existe donc 256 niveaux de gris différents. Pour pouvoir apprécier l'apport de chaque canal lorsqu'on les superpose, on leur affecte des couleurs primaires : bleu pour XS1, vert pour XS2 et rouge pour XS3. En réalisant une composition colorée, on additionne ces couleurs deux à deux et on obtient une visualisation de la zone d'étude en fausses couleurs qui reproduisent l'ensemble du spectre visible. En règle générale, la végétation apparaît en rouge ce qui correspond à la bande spectrale du proche infra-rouge captée par XS3. Les éléments minéraux ou sans végétation sont, quant à eux, captés par XS1 et XS2 et ressortent en bleu (Dubucq, 1989).

Sur l'image, les zones de *cangabua* sont donc à rechercher parmi les unités bleutées ou à dominante de bleu, tout en sachant que ces mêmes teintes représentent aussi d'autres objets sans végétation, radiométriquement proches de la signature spectrale de la *cangabua* : villes, autres sols nus, affleurements rocheux, bordures de nuages...

Compte tenu de la taille énorme du fichier informatique correspondant à une image SPOT (de 30 à 35 méga-octets), on procède, afin de ne pas saturer l'espace mémoire de la machine et de ne pas employer un temps infini dans l'exécution des différents traitements, à des extractions sous forme d'imagettes. Celles-ci sont de taille moyenne (de l'ordre de 500 colonnes par 700 à 800 lignes) et délimitées sur des zones de l'image où la visualisation de la thématique, en liaison avec les connaissances de terrain, est bonne. Par exemple, les relevés GPS, effectués sur le pourtour du volcan Ilaló, ont servi de référence pour le tracé des extractions. Dans un premier temps, chaque extraction est traitée en composition colorée et soumise à une interprétation visuelle. Dans les deux cas, il a été ainsi possible d'ébaucher une première détermination des thèmes majeurs où on a distingué :

- *cangabua* affleurante,
- *cangabua* discontinue,
- végétation et boisement d'eucalyptus,
- cultures,
- eau (lacs et cours d'eau),
- pixels non classés.

Puis, pour optimiser la recherche de critères pertinents de spatialisation, ces extractions ont fait l'objet de la création de néo-canaux. Pour cela, on a utilisé, parmi les méthodes conventionnellement employées en télédétection, les calculs suivants :

- analyse en composante principale,
- indice de végétation,
- indice de brillance.

Au terme de cette étape, on dispose donc, à l'échelle d'une extraction, de 3 canaux bruts (XS1, XS2 et XS3) et de 3 néo-canaux correspondant à chaque type de calcul. Puis, on saisit sur chaque extraction des parcelles d'entraînement (Chaume et Combeau, 1983). La méthode consiste à tracer, pour tous les thèmes définis visuellement, des polygones pixel à pixel. Ceux-ci sont caractérisés par des fichiers statistiques où sont notés les moyennes et les écarts-types se rapportant aux valeurs radiométriques ou numériques des pixels pris en compte.

La représentation graphique adoptée pour pouvoir visualiser ces statistiques est celle des « serpents radiométriques » : les lignes brisées représentent la fluctuation des valeurs radiométriques ou numériques, pour une statistique donnée, des thèmes selon le canal choisi.

Dans le cas de l'Ialó (figure 1), les statistiques choisies sont dérivées du calcul de la moyenne plus ou moins l'écart-type. Sur les graphes correspondants, on n'a représenté que les valeurs de XS1, XS2, XS3 et des 2 néo-canaux se référant aux indices de végétation et de brillance car les écarts-types de l'analyse en composante principale se sont révélés trop élevés et inutilisables. À la lecture de ces graphes, on constate que ce sont les 2 néo-canaux qui permettent de différencier au mieux les thèmes choisis (Servenay, 1995).

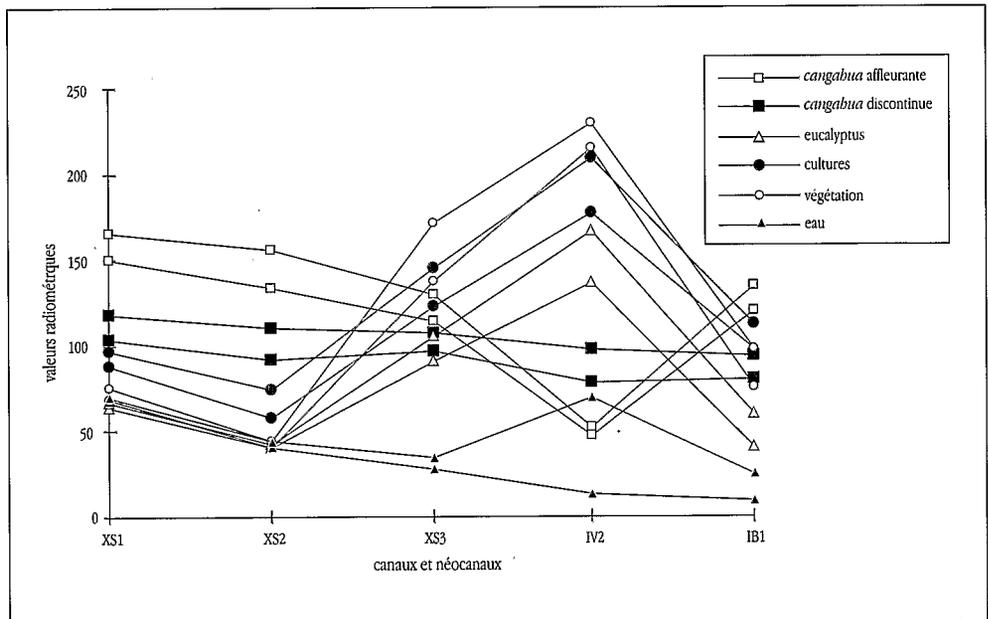


Figure 1 - Serpents radiométriques correspondant aux thèmes d'une extraction centrée sur le volcan Ialó, images SPOT Quito-Cayambe de 1995 (d'après Servenay, 1995)

Dans l'autre cas, les serpents radiométriques (figure 2) se rapportent aux extractions réparties sur les 3 images SPOT couvrant la partie centre et nord du bassin interandin, soit plus de 120 parcelles d'entraînement. Les statistiques choisies sont : en ordonnées, les valeurs moyennes et par une barre verticale, les écarts-types. À la lecture du graphe, on note que la séparation des thèmes de *cangabua* est réalisée dans XS1, XS2, l'acp1 et l'indice de brillance et que celle-ci est optimale dans l'acp1. Par contre, les thèmes de végétation ne se discriminent avec aucun canal sauf avec le néo-canal IVN où ils ne se confondent pas avec ceux de *cangabua*. Ce sont donc l'acp1 et l'IVN qui ont été finalement retenus (Faure, 1996).

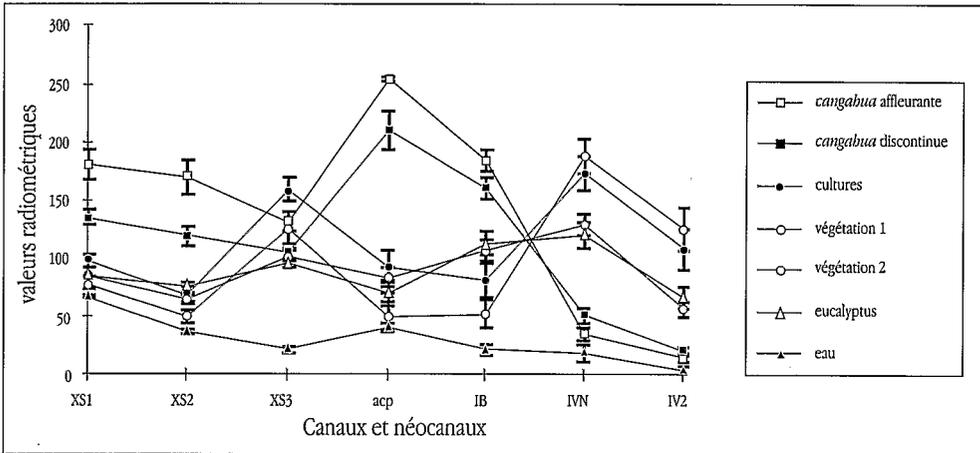


Figura 2 - Serpents radiométriques résultant de l'interprétation de 6 extractions saisies sur la mosaïque de 3 images SPOT de 1995 qui couvrent la partie nord du bassin interandin (d'après Faure, 1996)

Ce qui différencie les deux approches

Il ressort, en comparant les résultats issus des serpents radiométriques de ces 2 cas, que l'indice de végétation est le néo-canal sur lequel la végétation et les thèmes de *cangabua* sont le mieux décorrélés. En revanche, la réponse du thème *cangabua* aux traitements statistiques est sensiblement différente. L'une des principales raisons est la taille de la zone prise en compte. Dans le cas de l'Ilaló, la zone d'étude est limitée à l'aire du massif volcanique où le thème minéral majeur est la *cangabua*. Dans l'autre cas, la zone d'étude se situe à l'échelle régionale et englobe d'autres thèmes qui réfléchissent comme des thèmes minéraux et entrent, par conséquent, en confusion avec la *cangabua*. Parmi ceux-ci, le thème urbain est l'un des principaux éléments perturbants. Compte tenu des caractéristiques spatiales et thématiques des 2 zones, la valorisation des résultats est confrontée à 2 types d'options méthodologiques :

- dans le cas du volcan Ilaló, où la confusion entre les thèmes est minimale, il a été possible, par un algorithme de classification, de discriminer les différents thèmes en un seul traitement. C'est la méthode de classification par les hypercubes qui a été retenue car elle a permis de restituer, de manière satisfaisante, les différents thèmes recherchés dans la zone d'étude (ORSTOM, 1978) ;

- dans l'autre cas, le travail simultané sur 5 images (soit une surface au sol de l'ordre de 300 x 60 km) et la manipulation de fichiers informatiques très volumineux n'ont pas permis l'enchaînement des opérations en un seul traitement. Le principal facteur limitant a résidé dans la confusion du thème *cangabua* avec d'autres thèmes minéraux, en particulier avec l'urbain. Par exemple, à la suite de la première classification sur les 2 néo-canaux retenus, le résultat obtenu, comparé aux cartes topographiques existantes, est très décevant car le contour des villes et des villages ne se distingue pas des zones de *cangabua*.

Pour pallier à ce problème et améliorer les résultats de cette première classification, il a donc été nécessaire d'effectuer une succession de nouvelles classifications (itérations) en utilisant, thème par thème, des masques numériques et spatiaux. Un masque est un traitement de l'image permettant sa segmentation par sélection d'une plage radiométrique ou numérique ou par contourage spatial d'une zone à isoler. Le logiciel Geoimage permet une gestion assistée de 3 types de masques :

- (a) des masques spatiaux : contourage visuel d'une ou plusieurs zones ;
- (b) des masques numériques : sélection de pixels d'un ou plusieurs thèmes mal classés ;
- (c) des masques combinés : sélection de pixels à l'intérieur de masques spatiaux.

Il est ainsi possible de retraiter automatiquement une image mal classée, par saisie et traitement de masques. Les résultats des classifications de chacun des masques sont ensuite incrustés dans l'image classée qui résulte d'un emboîtement des différents masques. Concrètement, après la première classification, la méthode s'est déroulée selon l'enchaînement suivant :

- édition de masques de confusion de type (c) pour retraiter les pixels classés en *cangabua* mais se rapportant à d'autres thèmes minéraux. Par exemple pour le thème urbain, on a procédé successivement à un contourage visuel sur la composition colorée de limites urbaines connues, à l'édition du masque de confusion pour sélectionner les pixels classés en *cangabua* dans la zone contourée et ne retenir que les « pixels urbains », à la classification du masque de confusion et à son incrustation dans l'image ;
- édition de masques de confusion de type (b) pour traiter les pixels non classés à l'étape précédente. C'est ainsi que d'autres thèmes minéraux ont pu être identifiés ainsi que des thèmes de végétation.

RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Les méthodes de télédétection appliquées au thème *cangabua* dans les Andes de l'Équateur, soit en un seul traitement statistique soit par l'amélioration d'une classification sous masques de confusion, montre que cet outil est adapté à une recherche portant sur un matériau comme la *cangabua*. Il a été ainsi possible de répondre à un double objectif :

- spatialisation de la *cangabua* aux échelles locale et régionale,
- évaluation spatiale de la dynamique multi-temporelle de la *cangabua*.

Dans les deux cas étudiés ici, on a pu mettre en évidence l'existence de deux unités : *cangabua* affleurante prédominante et *cangabua* affleurante discontinue. D'autre part, les principaux paysages associés à cet environnement ont pu également être délimités : différentes classes de végétation selon l'activité chlorophyllienne, les boisements d'eucalyptus, les cultures et les zones urbaines.

Sur l'image de l'Ilaló, on apprécie, pour un cas précis et de manière relativement détaillée, les affleurements de *cangabua* dont la localisation concorde avec les relevés effectués au GPS. En ce qui concerne l'extension du matériau à l'échelle régionale, elle peut

être appréciée sur la mosaïque des 5 images SPOT où ressort l'importance de l'extension actuelle des affleurements de *cangabua* qui occupent approximativement 20 % des terres du bassin interandin. Globalement, on observe que la *cangabua* affleurante est systématiquement localisée au sein de zones à *cangabua* discontinue plus vastes. En revanche, on note la présence de larges étendues de *cangabua* discontinue sans la présence de *cangabua* affleurante. Le zonage de la *cangabua* correspond à la région géologique où s'est déposée la majeure partie des projections pyroclastiques émises par d'imposants strato-volcans. La *cangabua* est donc bien un matériau d'origine volcanique, situé entre 2 000 et 2 800 m (climat subaride, 600 mm/an), dans des positions topographiques diverses : dans les parois abrupts des nombreux ravins et cañons, sur les interfluvies plats du bassin ou en position de transition sur les piémonts de versants et glaciis-terrasses. Les images satellite montrent bien également les limites supérieures du matériau grâce à l'excellente réflectance de la végétation de *páramo* et de *matorral* dans le canal XS3. Lorsque le climat devient plus humide, les *cangabuas* disparaissent en altitude vers 3 200-3 400 m.

À l'échelle des parties nord et centre du bassin interandin, les deux thèmes de *cangabua* forment 3 sous-ensembles régionaux :

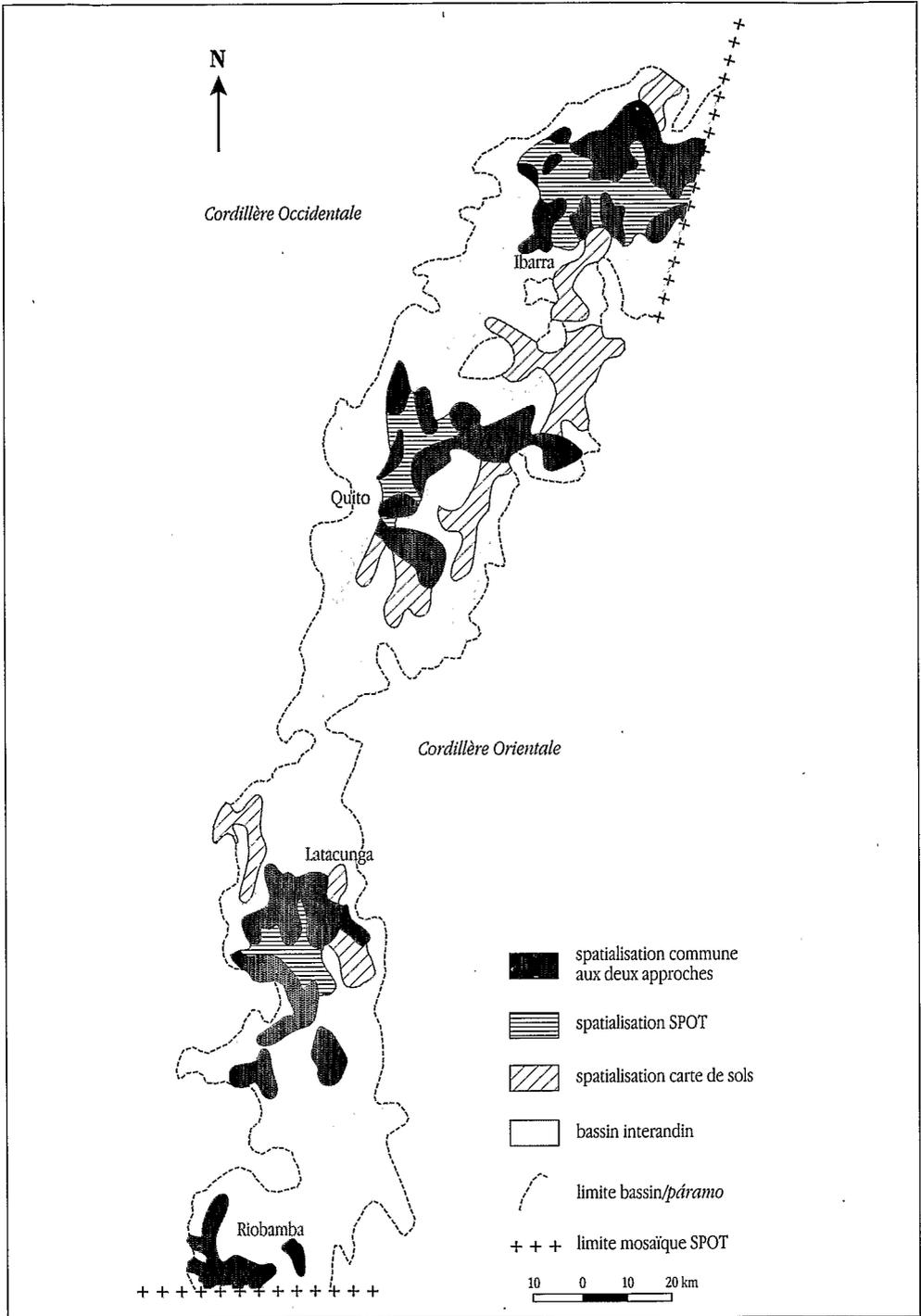
- le premier est localisé au nord de l'image, dans la région du bassin d'Ibarra,
- le second se situe au centre de l'image, dans la partie nord et orientale du bassin de Quito,
- le troisième prend place entre les grands volcans Cotopaxi et Chimborazo et la région du bassin de Riobamba.

Pour ce qui est de la dynamique multi-temporelle, elle a pu être évaluée dans l'étude de cas sur l'Ilaló en comparant les images prises respectivement en 1986 et 1995. De la superposition des interprétations correspondant à ces 2 dates, il ressort que :

- la partie sud-est de ce volcan montre peu de différence entre les dates. Il s'agit là d'un secteur très dégradé qui révélait déjà en 1986 d'importantes surfaces de *cangabua* ;
- la partie nord-est de l'Ilaló, quant à elle, montre une évolution notable. En 1986, il y avait peu de surfaces de *cangabua* affleurante par rapport aux zones de *cangabua* discontinue. En 1995, les zones de *cangabua* affleurante sont plus nombreuses, en particulier sur les lignes de crête où passent la plupart des chemins, ce qui témoigne d'une activité agricole plus active qu'au sud-est où les terres arables ont beaucoup diminué.

Pour juger de la pertinence des traitements de télédétection, nous avons utilisé le document thématique où est cartographiée la *cangabua* à la date de 1984 (Zebrowski, 1997). À des fins comparatives, on a réalisé une carte où sont superposées les informations dérivées de cette carte et celles obtenues à partir de la mosaïque SPOT de 1995 (figure 3). Il ressort de ce document que :

- globalement, les principales zones d'affleurement de *cangabua* sont localisées dans les mêmes zones sur les deux documents. La superposition est signalée sur la figure 3 par la légende « spatialisation commune aux 2 approches » ;
- néanmoins, dans le détail s'expriment des différences qui concernent la *cangabua* affleurante discontinue et qui se trouvent :
 - soit dans des zones communes aux deux approches où la mosaïque SPOT indique, notamment dans les zones d'Ibarra, Quito-nord et Latacunga-Ambato, une extension plus grande de ce thème (noté « spatialisation/Spot » dans la légende de la figure 3). Plusieurs hypothèses, à vérifier par des travaux complémentaires de terrain, sont envisageables pour expliquer la différence : (i) les surfaces de *cangabua* affleurante discontinue ont progressé entre 1986 et 1995 ; (ii) la carte thématique ou alors les traitements de télédétection ne sont pas assez précis sur ce point. Le thème *cangabua* discontinue, qui est un thème



composé, est plus difficile à discriminer que le thème *cangabua* « pure » caractérisé par une signature spectrale bien définie. D'autre part, la *cangabua* peut réfléchir, localement, comme les sables ponceux volcaniques ;

- soit dans des zones qui ne sont pas communes aux deux approches et où il existe une information qui provient de la carte thématique (noté « spatialisation/cartes de sols » dans la légende de la figure. 3). Dans ce cas, la mosaïque SPOT n'a donné aucune réponse. Les deux documents n'ont pas été conçus dans le même esprit. Rappelons que la *cangabua* n'affleure qu'après décapage des horizons superficiels qui la coiffent. Lorsqu'elles n'affleurent pas, les *cangabuas* sont coiffées par des sols bruns vertiques ou par des sols sableux, ponceux et pulvérulents. Dans la carte thématique, tous les types de *cangabua* ont été pris en compte, que le matériau affleure ou soit recouvert par un sol. Dans les traitements de télédétection, compte tenu de l'importance de la signature spectrale d'un thème, seuls ont été retenus les thèmes de *cangabua* qui se concrétisent en surface par un affleurement total ou partiel.

Références bibliographiques

- CHAUME, R.; COMBEAU, A., 1983: *Evaluations saisonnières comparées des signatures spectrales de divers milieux pérennes (forêts, prairies, sols nus) à partir de documents Landsat*, Documents techniques, N° 56, ORSTOM, Paris, 46 p.
- CNES, 1992: *Télédétection spatiale*, Éditions Cépadués, 305 p.
- CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La cangahua en el Ecuador: caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (nombre especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346.
- DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1986: L'érosion et la conservation des sols en Équateur, dans *Cahiers ORSTOM*, Série Pédologie, XXII, 2, p. 235-245.
- DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador, en *Terra*, Vol. 10 (nombre especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 503-514.
- DUBUCQ, M., 1989: *Identification et cartographie par télédétection des sols érodés : application au lauragais Toulousain*, Thèse, l'Université P. Sabatier, Toulouse, 247 p.
- FAURE, J.F., 1996: *Spatialisation et cartographie des affleurements de cangahua par télédétection dans le bassin interandin (Équateur)*, DESS, Université Paul Valéry, Montpellier, 111 p.
- LUNDEN, B.; NORDSTROM, K.; SKOTMQUIST, L., 1990: An Evaluation of Soil Intensity Mapping from Spot Satellite Imagery by Studies of Colour Air-photos and Top-soil Content of 137 Censium, *University of Stockholm Rap.*, 74, Suède, p. 13-37.
- ORSTOM, 1978: Analyse multivariable, Procédure «Loterie», Application à l'analyse multispectrale en télédétection, *Documents Techniques*, N° 39, Paris, 78 p.
- PRAT, C. 1991: *Étude du talpetate de la région Centre Pacifique du Nicaragua*, Thèse, Université Paris VI, Paris, France.
- QUANTIN, P., 1992: *Étude des sols volcaniques indurés « tepetates » des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole*, Rapport scientifique final, contrat CEE/ORSTOM TS2-0212.
- SERVENAY, A., 1995: *Spatialisation de la cangahua en Équateur à partir de données Spot : cas du bassin de Quito*, Mémoire de maîtrise IUP Gestion de l'environnement, Université Paris VII, 61 p.
- ZEBROWSKI, C. 1992: Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina, en *Terra*, Vol. 10 (nombre especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 15-23.
- ZEBROWSKI, C. 1997: Los suelos con cangahua en el Ecuador, en este volumen.