

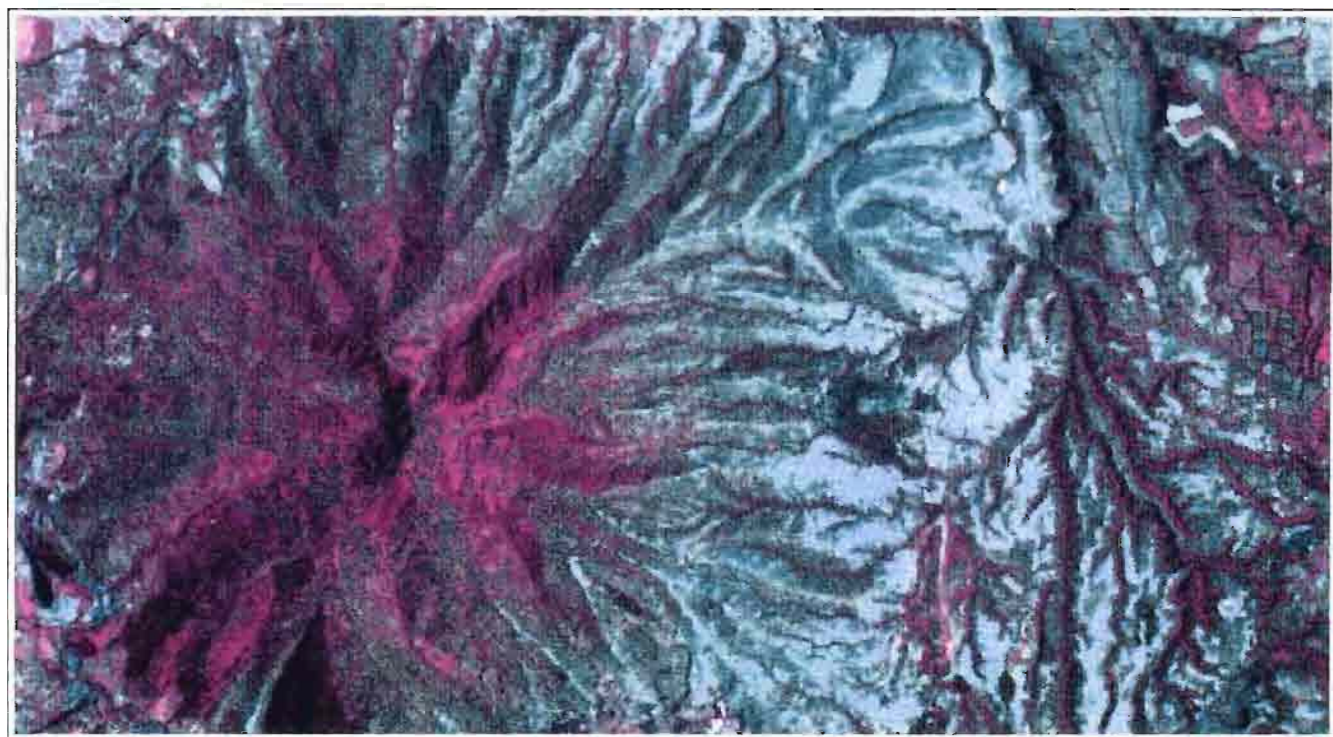
Université PARIS VII
Institut Universitaire Professionnalisé
Gestion de l'environnement

ORSTOM
L'institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération
Centre de Montpellier
Maison de la Télédétection

Rapport de stage

SPATIALISATION DE LA CANGAHUA EN ÉQUATEUR À PARTIR DE DONNÉES SPOT :

CAS DU BASSIN DE QUITO
(RÉGION D'ILALO ET MOJANDA)



Présenté par

Alice SERVENAY

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MAÎTRISE DE GESTION DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION "ESPACES ET MILIEUX"

Tuteur scientifique

André SIMONIN
IMAGEO - CNRS
Institut de Géographie Paris

Maître de stage

Régine CHAUME
Maison de la télédétection
ORSTOM Montpellier

Encadrement thématique

Georges DE NONI
Marc VIENNOT
Laboratoire d'Étude du
Comportement des Sols Cultivés
ORSTOM Montpellier

Septembre 1995

Spatialisation de la *cangahua* en Equateur à partir de données SPOT : cas du bassin de Quito

(région d'Ilalo et Mojanda)

Sommaire

Remerciements

Introduction

I. Le contexte et les objectifs

I.1. Les travaux effectués

I.2. Les objectifs

I.3. Cadre du stage : l'ORSTOM Montpellier

II. Le cadre d'étude : contexte régional et facteurs conditionnants l'affleurement de la *cangahua*

II.1. La géomorphologie

II.2. Climat

II.3. Occupation du sol et végétation

II.4. Le rôle de l'homme dans l'érosion des sols

II.5. Les formes d'érosion rencontrées en Équateur

III. Utilisation de la télédétection pour la spatialisation de l'érosion

III.1. Les données utilisées

III.2. Les traitements préalables des données SPOT

III.3. Choix de la méthode de classification des extractions

III.4. Étude multi-temporelle

Conclusion

Annexes

Bibliographie thématique

Liste des figures

Table des matières

Remerciements

Je tiens à remercier :

Régine Chaume pour avoir accepté de me reprendre en stage au sein de son laboratoire et m'avoir guidée tout au long de ce travail ;

George De Noni et **Marc Viennot** pour leur collaboration active et leur participation quasi quotidienne aux traitements des données, ainsi que pour leur aide à une meilleure compréhension de ces paysages particuliers des Andes que je n'ai vu qu'à travers SPOT et leurs yeux;

Hervé Lemartret pour m'avoir si souvent sorti des nombreux problèmes informatiques et avoir participé très activement à l'avancement de ce travail ;

Nadine Dessay pour ses nombreux conseils et sa précieuse aide dans l'utilisation pratique des logiciels de traitement d'images ;

Jean-Marie Fotsing, mon père spirituel et ami, pour ses conseils avisés malgré ma "tête dure";

Françoise Axes, Jean-Philippe et Sophie ChereI, et **Francisco Guerra**, mes voisins de bureau à la Maison de la Télédétection, pour leurs conseils et soutiens quotidien;

Martine Fréon pour les nombreuses recherches bibliographiques qu'elle a effectuée pour moi ;

André Simonin pour avoir accepté, cette année encore, d'être mon maître de stage et m'avoir suivi à distance au cours de ce travail ;

Marc Lointier pour ses suggestions en matière de traitement d'images ;

Anne-Marie Segretain pour m'avoir accueillie dans sa charmante demeure Montpelliéraine un deuxième été ;

Ainsi que l'ensemble des personnes travaillant au Laboratoire d'Étude du Comportement des Sols Cultivés pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Introduction

L'Équateur, petit pays de l'Amérique Latine, d'une superficie de 270.000 km², connaît des problèmes de dégradation de l'environnement et notamment d'érosion des sols. Ceux-ci sont particulièrement accentués dans les Andes équatoriennes. Ces régions montagneuses connaissent une érosion très active des sols surtout dans le bassin intra-andin. Cette érosion conduit à l'affleurement d'horizons indurés d'origine volcanique. Ceux-ci que l'on retrouve dans d'autres pays d'Amérique latine (Mexique, Colombie, Nicaragua) sont appelés cangahua¹ en Équateur. Le paysage de la Sierra est fortement marqué par cette formation pédogéologique et sa dégradation. Celle-ci résulte d'une part, des conditions naturelles particulières (climat aux précipitations agressives, fortes pentes, nature du substrat). D'autre part, elle a été, et est toujours, en certains endroits, accentuée par l'utilisation que fait l'homme de ces milieux. Des études menées par G. De Noni et M. Viennot (1994) ont montré que le façonnement de ces paysages ne date pas seulement du Quaternaire (creusement des canyons et quebradas qui sillonnent le bassin). L'érosion est non seulement active encore aujourd'hui mais elle touche des régions entières de manière irréversible. Ainsi, peu à peu, ces terres fertiles, où avaient entrepris il y a bien longtemps de s'installer les Amérindiens (Quichuas, Pastos), sont en voie de disparition progressive. Pour mieux connaître l'ampleur globale de ce phénomène, déjà étudié par ailleurs de manière ponctuelle sur le terrain, nous avons choisi d'utiliser des images satellites SPOT, afin de spatialiser de manière précise les affleurements de cangahua au niveau du bassin intra-andin. A terme il est prévu de réaliser une cartographie de la cangahua sur l'ensemble de la cordillère Équatorienne.

Cette étude s'inscrit dans le grand projet intitulé "Régénération et conservation de sols volcaniques indurés et stérils d'Amérique latine : Chili, Équateur, Mexique", coordonné par Paul Quantin de l'ORSTOM, dans le cadre d'un programme CCE (n° ER3-TS3*CT930252). Au sein de ce projet, différents aspects du problème sont abordés à la fois sur place, dans les pays concernés, et en France. Pour ce qui concerne la partie sur l'Équateur les thèmes abordés sont :

- Caractérisation et géographie des sols à cangahua
- Régénération de la fertilité de cangahua cultivée
- Érosion et conservation de la cangahua cultivée
- Étude socio-économique

C'est dans le cadre de la caractérisation et la cartographie des sols à cangahua qu'intervient le travail de télédétection que nous avons effectué durant ce stage.

L'ensemble de l'étude étant prévue sur six mois et toutes les données n'ayant pas encore été collectées (deux scènes SPOT de la partie sud de la zone d'étude sont toujours en programmation) le travail présenté ici résume d'une manière concise l'avancement des recherches et des traitements déjà effectués sur des sites précis. Les techniques employées et les résultats obtenus seront par la suite étendus à l'ensemble de la région géographique concernée.

¹ Terre infertile en "Quetchua", langue indigène héritée de l'empire Inca.

I. Le contexte et les objectifs

I.1. Les travaux effectués

En ce qui concerne les travaux sur l'érosion ou la conservation des sols en Équateur et sur la cangahua en particulier, nous avons pu retrouver plusieurs références qui sont répertoriées en bibliographie. Les principaux auteurs sont De Noni, Derruau, Pourrut, Trujillo et Viennot ainsi que Colmet Daage et al, Winckell et Zebrowski. Ces ouvrages traitent aussi bien des aspects historiques et anthropiques de l'érosion que des aspects scientifiques (mesures de terrain concernant les propriétés de ces sols érodés : composition, essais de pluie sur des parcelles de ruissellement, infiltration...).

D'un point de vue plus technique en relation avec l'utilisation de la télédétection , Augusto Gonzalez Artieda et Richard V. Ringleb ont effectué à Quito en 1991 une étude sur les caractéristiques spectrales de la cangahua en Équateur. Ce travail a été mené au sein d'un programme d'étude générale de la cangahua en Équateur à travers un projet entre l'Université du Montana (USA) et l'école polytechnique nationale de Quito. Ils ont utilisé des données Landsat TM de 1990 ainsi que des relevés radiométriques de terrain effectués dans les mêmes intervalles de longueur d'ondes que celles du satellite. Les conclusions de l'étude indiquent que l'apport de la télédétection est important pour la spatialisation des phénomènes, cependant les affleurements de cangahua ne correspondant pas toujours à de grandes surfaces, la résolution du pixel Landsat TM ne permet pas une cartographie fine.

Plus récemment, une scène SPOT en mode multispectral de 1986 sur la région de Quito appliqué à la même thématique a été traitée au laboratoire de télédétection de l'ORSTOM Montpellier (Servenay, 1994). Lors de ce stage d'initiation un grand nombre d'aspects techniques sur les traitements d'images ont été abordés; cependant la durée de ce premier stage n'a permis d'obtenir aucun résultat satisfaisant sur la spatialisation de la cangahua. Tous les aspects théoriques et pratiques concernant la télédétection et SPOT en général ne seront pas rappelés ici étant donné que ce travail s'inscrit dans la suite logique du travail déjà effectué l'année passée.

I.2. Les objectifs

Il s'agit de spatialiser les affleurements de cangahua dans leurs divers stades de dégradation à partir de cinq scènes SPOT de 1995 couvrant l'ensemble du bassin intra-andin en Équateur et de hiérarchiser les zones érodées en fonction de l'intensité des manifestations (zones érodées, en cours d'érosion, et zones vulnérables). Le traitement, plus approfondi dans un premier temps sur des zones bien connues (longuement étudiées sur le terrain notamment par

De Noni et Viennot, 1979 à 1994), devrait permettre d'extrapoler les résultats à l'ensemble de la région concernée. De plus la scène SPOT de 1986 sur la région de Quito nous permet d'envisager, comparativement à la scène de 1995, une étude multi-temporelle et d'évaluer la vitesse d'extension de la cangahua sur des zones connues.

I.3.Cadre du stage : l'ORSTOM Montpellier

L'ORSTOM est l'institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération. Il s'agit d'un établissement public à caractère scientifique et technologique qui intervient dans 40 pays dans le monde au travers de recherches dans quatre grands thèmes qui sont :

- Environnement et grands écosystèmes océaniques, aquatiques et terrestres
- Agriculture et milieux tropicaux fragiles
- Environnement et santé
- Hommes et sociétés en mutation

A Montpellier les différents laboratoires présents sur le centre sont :

- Hydrologie;
- Halieutique et écosystèmes aquatiques;
- Génétique, amélioration et multiplication des espèces tropicales;
- Phytopathologie;
- Biotechnologie physiologie et métabolisme cellulaires;
- Étude du comportement des sols cultivés;
- Études agraires;
- Épidémiologie des maladies à vecteurs;
- Rétrovirus;
- Génétique moléculaire des parasites et des vecteurs;
- Nutrition tropicale.

Il existe en plus de ceux-ci un certain nombre de laboratoires hors centre qui sont localisés sur Montpellier et travaillent en collaboration et en cohabitation avec d'autres organismes de recherche (CEMAGREF, CIRAD, ENSA, INRA, CNRS, IGN, ...) qui sont :

- Groupe aquaculture continentale méditerranéenne et tropicale;
- Phytovirologie des régions chaudes;
- Équipe d'acarologie inter organisme;
- Groupement d'intérêt public - Réseau d'études des changements dans les localisations et les unités spatiales;
- Laboratoire de lutte contre les insectes nuisibles;
- Télé-détection et traitement d'images.

I.3.1. Le laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés

Laboratoire divisé en trois unités internes qui sont :

- Matière organique des sols
- Propriétés physiques et physico-chimiques des sols
- Gestion et conservation des sols

C'est au sein de cette dernière unité où sont insérés G. De Noni, H. Lemartret et M. Viennot, que s'intègre le programme cité préalablement sur la régénération et la conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine.

I.3.2. Le laboratoire de télédétection et de traitement d'images, et la Maison de la télédétection

I.3.2.1. Organismes présents à la Maison de la Télédétection

La Maison de la Télédétection regroupe toutes les institutions présentes sur Montpellier qui ont recours à l'outil télédétection, ainsi, hormis le laboratoire ORSTOM dirigé par R. Chaume, assistée de N. Dessay, y sont présents :

- CEMAGREF (Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts)
- ENGREF (ÉCOLE Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts)
- CIRAD (Centre de coopération International en Recherche Agronomique)
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique)
- ENSA (École Nationale Supérieure d'Agronomie)

I.3.2.2. Activités du laboratoire de télédétection ORSTOM

Les activités du laboratoire de télédétection et de traitement d'images de l'ORSTOM sont :

- Appuis scientifiques dans l'utilisation de données satellites pour la spatialisation thématique de l'information
- Accueil scientifique des chercheurs ORSTOM ou partenaires ORSTOM pour l'acquisition de données (satellites, cartographiques, statistiques), l'extraction de l'information et la restitution des résultats
- Programmes de recherche contribuant à l'évolution scientifique et méthodologique de la télédétection
- Formation à la télédétection dans le cadre de stages
- Transfert de toutes les données images sur CD-ROM

I.3.2.3. Moyens techniques

Les équipements spécifiques du laboratoire de télédétection de l'ORSTOM sont :

- 4 stations de travail (Sun)
- 1 scanner A0 noir et blanc et 1 scanner A4 couleur
- 1 système d'enregistrement CD-ROM
- 1 système multimédia
- 2 imprimantes couleurs A0
- 3 imprimantes couleurs A4
- 1 table à digitaliser A0
- 5 P.C.

Le tout est relié sur réseau.

Plusieurs logiciels de traitement d'images sont utilisés dont certains sont des logiciels développés par l'ORTSTOM, tels PLANETE et OSIRIS. Les autres sont GEOIMAGE, MULTISCOPE, TEIS et TERA VUE.

II. Le cadre d'étude : contexte régional et facteurs conditionnants l'affleurement de la cangahua

L'Équateur est un petit pays à l'échelle du continent sud-américain, sur ses 270.000 km² de superficie 70.000 sont occupés par la cordillère des Andes. Localement appelée "Sierra", elle traverse le pays du Nord au Sud (*Fig. 1 a et b*). Ce pays est caractérisé par l'abondance et la richesse de ses ressources renouvelables, dues à sa situation équatorienne et à la présence de deux cordillères d'origine volcanique. Cependant, ce patrimoine naturel est menacé par l'accélération de l'érosion, phénomène remarqué depuis une trentaine d'années, depuis la période d'après guerre, grâce à la généralisation de l'utilisation de la photographie aérienne.

Le type d'érosion auquel nous nous intéressons est celui qui est concentré à l'intérieur du bassin intra-andin, et plus spécialement dans la zone nord. Il s'agit d'une érosion hydrique accélérée des sols agricoles due à la pression de l'homme sur le milieu. Dans la partie centre et nord de la montagne le décapage des sol provoque l'affleurement d'une formation volcanique particulière, la "cangahua".

II.1. La géomorphologie

II.1.1. Le cadre physique

La cordillère des Andes ne se présente pas comme une simple montagne d'altitude moyenne de 4500 mètres. Elle est caractérisée par sa forme longiligne qui souligne toute la partie ouest du continent sud américain en bordure du Pacifique, en Équateur la cordillère s'étend sur 650 km, pour une largeur variant de 100 à 150 km (*fig. n° 2 : Carte de situation avec mise en évidence des deux cordillères parallèles*). Comme nous le montre le schéma ci-après (*fig. n° 3 : Coupe ouest-est de la cordillère au niveau de l'Équateur*), les Andes sont en fait divisées en deux cordillères parallèles, séparées par le bassin intra- andin.

II.1.1.1. Les cordillères occidentale et orientale :

Elles sont caractérisées par des versants extérieurs à forts dénivelés (4000 à 4500 mètres d'altitude) et en marches d'escaliers, et couronnées par de hauts volcans (5500 à 6000 mètres). Ceux-ci sont responsables de l'épaisse couche de cendres qui a fossilisé les formes du relief (granite et roches métamorphiques). Les plus élevés de ces volcans culminant à 6300 m sont toujours recouverts de neiges et de glaces.

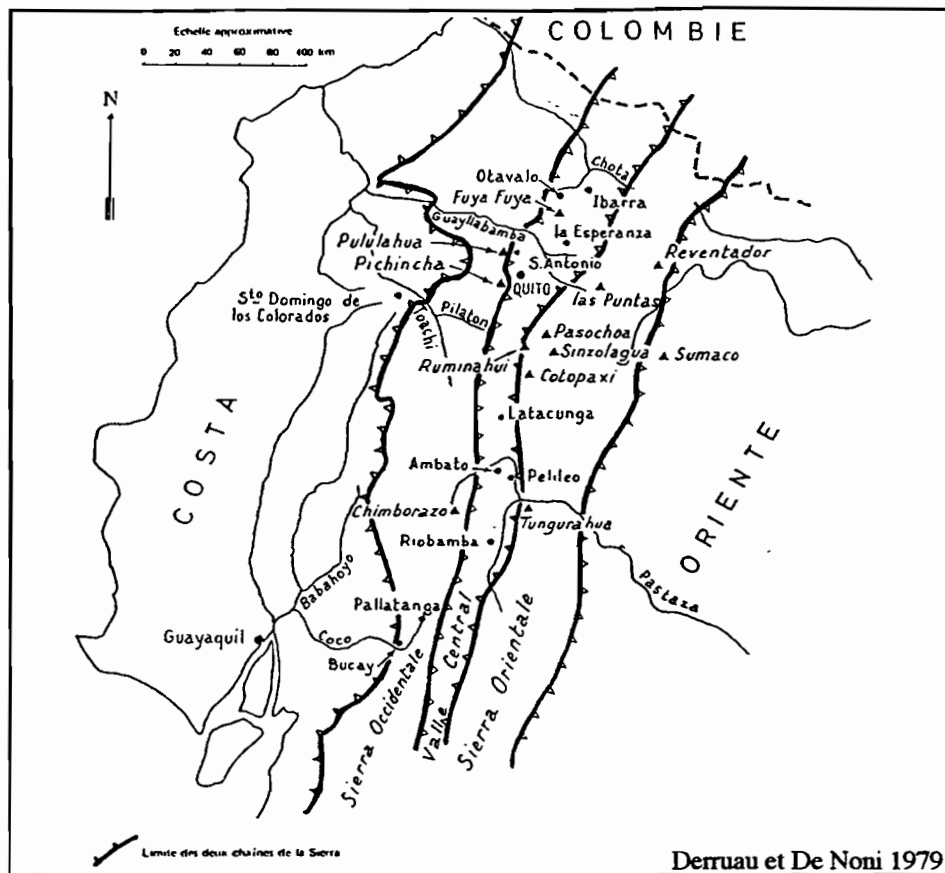


Fig. 2 : Carte de situation

La cordillère occidentale domine la région côtière. Le flanc de la cordillère orientale est tourné vers le bassin Amazonien au Nord et vers le plateau du Brésil plus au Sud.

II.1.1.2. Le bassin intra-andin

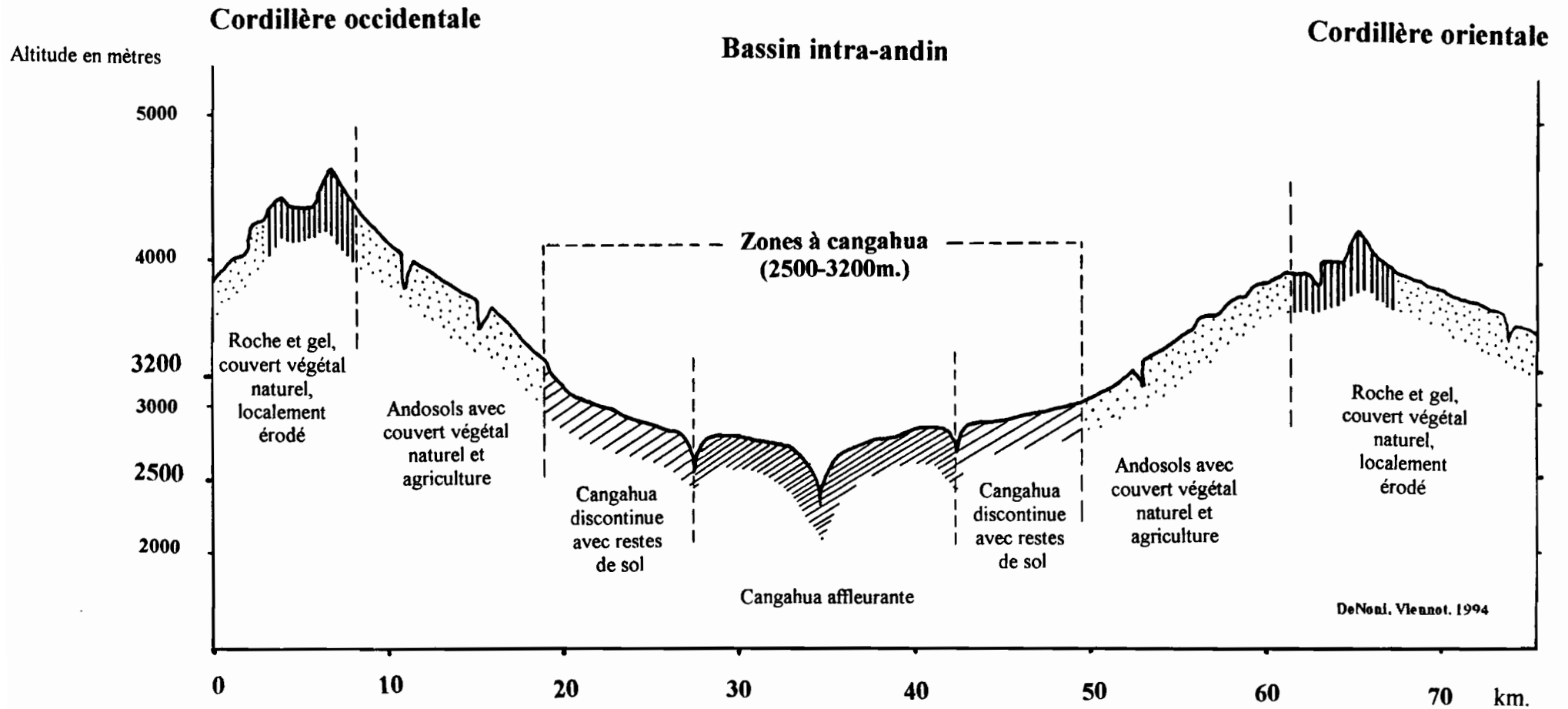
Ce bassin forme un long couloir de 30 à 40 km de large, lui même divisé en un certain nombre de petits bassins constitués d'une série de grabens et de horsts d'origine tectonique. Le dénivelé de cette partie centrale va de 1500 à 3000 mètres d'altitude. Ces bassins centraux longitudinaux communiquent facilement entre eux par des seuils. Cette zone centrale en vallée, où s'étendent des terres fertiles bien mises en valeur dans le cadre d'exploitations agricoles de type industriel et de type traditionnel, est une zone de peuplement dense. Il existe quelques rares cônes volcaniques localisés dans le bassin et séparant les "sous-bassins" entre eux, tel l'Ilalo à proximité de Quito, ou encore le Mojanda.

Ces bassins sont entaillés par de profonds canyons ou "*quebradas*" pouvant atteindre plusieurs dizaines (voir centaines) de mètres de profondeurs.

A une altitude proche de 2850 mètres, dans le bassin de Quito, est implantée la capitale du pays.

C'est entre les deux cordillères, dans les parties centre et nord du bassin intra-andin, que l'on trouve les sols érodés et indurés appelés cangahua.

Fig.3 : Coupe schématique de la cordillère des Andes



II.1.2. Formations superficielles, sols, et dynamiques de mise en place dans la Sierra

Dans ce paragraphe nous décrivons les sols auxquels nous nous intéressons dans le traitement des images satellites. Il s'agit de sols érodés indurés calciques (Cangahua), et des autres formations superficielles pouvant également affleurer dans la région.

II.1.2.1. La cangahua

Il existe dans la cordillère équatorienne des sols particuliers, de couleur brun-jaune clair, caractérisés par la présence d'horizons indurés. A l'origine, ces sols sont enterrés à plus ou moins grande profondeur selon les régions sous le sol actuel de couleur foncée (Mollisol). Ils n'apparaissent en surface qu'après enlèvement des horizons supérieurs, plus meubles, sous l'effet d'agents dynamiques externes, notamment l'érosion hydrique. L'importance spatiale de cette formation en fait l'une des composantes principales du paysage des piémonts de la cordillère en Équateur. On estime qu'elle occupe au moins 20% des terres volcaniques du bassin intra-andin. La cangahua affleure sur tous types de topographies, elle est indépendante de l'inclinaison des pentes. En profondeur cette formation peut s'étendre sur plusieurs dizaines de mètres, voir des centaines. Elle peut être localement inter stratifiée avec d'autres types de projections volcaniques, notamment des ponces blanches (De Noni, Derruau, 1979).

La cangahua est localisée dans les régions centre et nord du bassin intra-andin, là où se sont principalement déposées les projections pyroclastiques émises par d'importants strato-volcans comme le Chimborazo (6310 m) ou le Cotopaxi (5900 m), dès la fin du Tertiaire jusqu'à récemment. D'un point de vue physique la cangahua est peu favorable : c'est un matériau compact, peu perméable, dur, à faible macroporosité accessible à l'air.

D'un point de vue chimique, la cangahua présente des propriétés particulières en regard de sa faible teneur en argile. Sa capacité d'échange cationique est en général élevée, de 15 à 25 milliéquivalents/100g, ainsi que sa teneur en bases échangeables d'après des dosages effectués sur le calcium, le magnésium, et le potassium (Custode et al., 1992). Le pH varie de neutre à légèrement basique, avec une influence de la teneur en calcaire sur l'alcalinité des sols à cangahua (Cf. tableau). Les sols indurés sont fortement carencés en matière organique (moins de 0,3%), en azote (moins de 0,04 pour 1000) et en phosphore assimilable (moins de 3 ppm) (De Noni et al., 1994).

Tableau des caractéristiques chimiques de la cangahua (CUSTODE et al., 1992)

	Ca meq/100g	Mg meq/100g	K meq/100g	Na meq/100g	S meq/100g	M.O. %	N %	C/N	pH H ₂ O	pH KCl
A	9,5	4,5	0,81	0,30	15,1	3,9	0,247	9,3	6,0	5,4
B	14,4	11,4	1,94	0,86	28,6	2,1	0,107	11,6	7,2	6,2

A : Cangahua affleurante

B : Cangahua encore recouverte de sol.

Les propriétés physiques défavorables et les déficiences chimiques de la cangahua indurée entraînent sa stérilité et un abandon des zones où elle affleure ainsi qu'un dépeuplement des agriculteurs.

La mise en place de ce matériau est encore très discutée à l'heure actuelle, et plus particulièrement l'aspect induration de cette formation. Deux hypothèses principales existent : celle des géologues d'une part et celle des pédologues d'autre part.

En 1979 certains pensaient qu'il pouvait s'agir d'un loess datant des époques glaciaires, mais celui-ci contenant en plus des particules fines (caractéristiques des loess) des grains plus grossiers, ainsi que des traces de remaniement par ruissellement. L'hypothèse a été remplacée par des retombées volcaniques accompagnées de pluies, mais il n'est pas prouvé que le matériau n'ait pas séjourné au sol avant d'être repris par le vent à la manière d'un loess (De Noni, Derruau, 1979). L'induration à ce stade s'est vue expliquée par un climat modérément aride qui n'aurait pas de signification particulière.

La proportion importante de hornblende et de pyroxènes parmi les minéraux lourds, de feldspaths, de verres volcaniques ainsi que de carbonate de calcium dans la cangahua peut laisser supposer qu'il s'agit d'une cendre fine, andésitique ou dacitique dont l'encroûtement calcaire est d'origine pédologique (De Noni et al., 1991). D'une manière générale l'école des géologues tend à affirmer que l'induration de la cangahua s'est effectuée en même temps que son dépôt sous forme d'un tuf; alors que les pédologues pensent plutôt que l'induration est corrélative de la pédogenèse. Cependant la teneur infime en matière organique et en phosphore assimilable suggèrent qu'il ne s'agit pas vraiment d'un sol, mais plutôt d'un horizon d'altération à la base d'un sol. Des horizons analogues : talpetates au Nicaragua (Prat 1991), tepetates au Mexique (Quantin et col. 1992, Hidalgo 1995) sont attribués à une formation de tuf volcanique altéré.

II.1.2.2. Les autres formations superficielles

Sols argileux

Au dessus de 3000-3200 m, lorsque le climat devient plus humide, la cangahua n'affleure plus. Elle est recouverte par des mollisols¹ et des sols bruns argileux à smectites et halloysite (Colmet-Daage, 1986). Ces mollisols sont plus ou moins proches de la cangahua dans leur composition chimique mais n'ont pas les mêmes propriétés physiques. Ils ne sont pas indurés mais meubles et permettent la pénétration racinaire des végétaux sans avoir besoin de traitements particuliers préalables. Avec l'accroissement de l'humidité en altitude la présence de la cangahua près de la surface disparaît. Cette formation s'affirme au contraire en aval en climat plus aride.

¹ Mollisol n'a pas ici le sens classique employé en géomorphologie (partie superficielle du sol qui subit les actions de la dynamique périglaciaire et est gorgé d'eau de fusion des glaces pendant l'été), couramment utilisé sur le continent américain, il désigne une formation pédologique meuble peu acide, dont la capacité d'échange cationique est saturée en bases, notamment en calcium, et de couleur foncée; équivalent sols Isohumiques de climat subaride de la classification pédologique française.

Sols sableux

Dans les endroits où la cangahua n'a pas encore été décapée et est donc toujours recouverte par un sol, ce dernier peut être soit du type "brun vertique", soit sableux, ponceux et pulvérulents du type "peu évolué d'apport". Les sols sableux proviennent de la dégradation des ponces présentes en certains endroits au même niveau que la cangahua et peuvent avoir été remaniés partiellement par le vent. Ils ne sont pas nécessairement recouverts par la végétation et peuvent donc affleurer au même titre que la Cangahua, ce qui pose un problème pour la télédétection.

II.2. Climat

En Équateur la gamme des climats est très étendue du fait de la situation géographique du pays et de la présence de la cordillère des Andes. En dehors de la région amazonienne, pendant environ 9 mois de l'année, de mi-septembre à fin mai, les précipitations faisant suite à une saison sèche de trois mois ou plus sont à l'origine de l'érosion mécanique du sol. La Sierra est la région du pays la plus touchée.

II.2.1. Facteurs du climat et régime des pluies en Équateur

Les principaux facteurs qui déterminent la gamme très variée des climats sont la latitude, l'effet relief/altitude de la cordillère des Andes, et la proximité de l'océan pacifique et de ses courants.

Le pays, situé sur l'Équateur géographique, dans la zone de convergence intertropicale, subit l'influence des caractéristiques particulières de la circulation atmosphérique à cet endroit, soit à la fois une circulation méridienne et une circulation zonale. Cela se traduit par l'invasion de masses d'air tempéré et peu humide venant du sud, de septembre à décembre vers l'hémisphère sud, l'Équateur étant alors soumis à des masses d'air chaud et humide en provenance du Nord (Pourrut 1983).

Le relief élevé de la Sierra constitue une barrière dont le rôle est essentiel pour la formation, la séparation ou le déplacement des masses d'air locales ou régionales. L'altitude élevée engendre des masses d'air froid, modifie les régimes des pluies et forme un obstacle entre les masses d'air provenant du Pacifique et de celles situées sur la plaine d'Amazonie. Le relief quant à lui, a une action sur la circulation des vents, soit par des effets dynamiques en favorisant les mouvements ascendants, soit par effet thermique qui modifie leurs trajectoires et leurs vitesses (Pourrut 1983).

La présence de l'océan Pacifique et de ses courants, et plus particulièrement le courant froid de Humbolt et le courant chaud de El Niño ont également leur part d'influence sur le climat. Le courant de Humbolt est à l'origine de masses d'air humide mais de température peu élevée dont la condensation est faible. En revanche le phénomène épisodique causé par El Niño et l'invasion des eaux chaudes en provenance du golf de Panama peuvent être à l'origine de précipitations exceptionnelles (De Noni, Pourrut, Viennot, 1993).

D'une manière générale en Équateur et dans le corridor intra-andin en particulier on distingue une saison humide et une saison plus sèche, ces deux saisons sont elles même subdivisées. La première période de pluies commence entre le 15 septembre et le 15 octobre et dure jusqu'au 15 décembre. Jusqu'à la mi-janvier le climat est plus sec puis la deuxième période de pluie arrive pour durer jusqu'aux alentours du 15 juin.

II.2.2. Répartition altitudinale des précipitations

La barrière montagneuse constituée par les Andes introduit des modifications majeures dans la répartition des pluies. Le milieu morphoclimatique est extrêmement varié en raison de la zonation d'altitude et des grands contrastes de pluviosité à latitude égale. Ces contrastes sont effectivement marqués et s'expliqueraient par les effets de foehn de l'alizé (Humbolt, 1853).

Les effets de l'altitude et de l'exposition des versants font qu'il existe un grand nombre de microclimats, tous influencés à la fois par les conditions climatiques générales de cette région et par les conditions locales. De plus la position particulière de chaque milieu est en interaction avec les zones avoisinantes. Ainsi, les milieux les plus arrosés sont ceux qui se situent au dessus de 3000 mètres. Ce seuil d'humidité correspond à la limite supérieure de présence des sols indurés, au dessus de laquelle peuvent être présents des sols comportant des caractéristiques chimiques similaires à la cangahua, mais qui sont meubles.

II.2.3. Rôle du climat sur l'érosion des sols

Les facteurs d'érosion les plus importants d'un point de vue climatique sont l'eau, puis le vent. Les précipitations sont caractérisées par des hauteurs pluviométriques élevées sur des intervalles de temps relativement longs (800 à 1200 mm par an), et par leur intensité (De Noni, Nouvelot, 1986). Ce sont les pluies de plus de 10 mm./heure, d'une fréquence variant en moyenne de 20 à 50 par an selon les zones considérées, qui sont responsables de l'érosion. Une aggravation des processus de ruissellement et d'érosion aggravée par l'exploitation agricole du sol sont fréquemment observées dans le pays, surtout au niveau de la cordillère. Durant les trois mois d'été le vent intervient et devient le principal facteur de la dégradation des sols.

II.3. Occupation du sol et végétation

II.3.1. Cultures

D'une manière générale les principales cultures rencontrées dans le bassin intra-andin sont les céréales (blé, orge...), le maïs, les fèves, le haricot et la pomme de terre. Certaines régions, comme la côte, vouées à l'exportation, cultivent la banane ou le riz. Ces cultures de type "grandes cultures mécanisées" se situent dans des zones basses irrigables. Par

contre la petite agriculture située dans le bassin intra-andin et la plus durement frappée par l'érosion se concentre sur le maïs et le riz en sec, qui est remplacé par du soja juste après la récolte de maïs. Le maïs et le soja sont en principe destinés à la fabrication d'aliments pour le bétail. Les pratiques culturales dans cette région sont très importantes vis à vis de la dégradation des sols, d'autant plus que le taux médiocre du couvert des cultures telle le maïs tend à augmenter et concentrer le ruissellement et la perte en terre. La mise en jachère se pratique; elle permet une régénération naturelle des sols sur lesquels se développe alors une végétation naturelle qui le recouvre et permet une meilleure protection face à l'érosion par ruissellement.

II.3.2.Plantations d'Eucalyptus

Ces plantations sont relativement courantes dans cette région pour différentes raisons. Il s'agit d'une exploitation ligneuse rentable sur une durée relativement courte comparée à d'autres types d'arbres. Les jeunes Eucalyptus sont cultivés sous serre avant d'être transplantés; ils ont la particularité de bien s'adapter aux sols dénudés comme la cangahua. Ainsi ils permettent à la fois d'utiliser des espaces érodés délaissés par les agriculteurs, et de maintenir une protection temporaire vis à vis du ruissellement qui sans cela aurait une action de dégradation beaucoup plus importante sur ces surfaces.

II.3.3.Végétation spontanée

Les volcans qui n'atteignent pas l'altitude de 4600 m (limite approximative des neiges persistantes sous ce climat équatorial), sont recouverts par la végétation herbacée des *paramos*, qui sont des plateaux d'altitude. Cette zone de *paramos* descend jusqu'à 3000 m, limite inférieure du gel modéré. La plante caractéristique est le *Ichu* en topographie sèche, alors qu'en fonds humides les thufurs¹ sont couverts par la *Garpeta*, une herbe rampante à feuilles étoilées. Au dessous du *paramo* on est dans le domaine du *matorral*. Il s'agit d'une brousse arbustive qui comporte un aspect varié selon les différences de pluviosité. Il peut être associé à par des forêts ou des steppes plus ou moins arborées.

II.4.Le rôle de l'homme dans l'érosion des sols

Outre les conditions naturelles de ce milieu qui favorisent l'érosion, vient s'ajouter l'action de l'homme. Celui-ci d'une manière générale ne se préoccupe que peu de ses propres effets sur la dégradation du milieu et a tendance à accuser les conditions climatiques pour justifier la perte en sol.

¹ Thufur : Figuration lié à la dynamique périglaciaire formé par une lentille de glace dans le sol qui forme des buttes gazonnées d'un diamètre de quelques décimètres. On parle souvent de champs de thufurs (Coque, 1977).

II.4.1. Les sociétés andines pré coloniales

Durant les 1000 ans qui précèdent la conquête espagnole, l'agriculture connaît un développement spectaculaire. Le piémont de la Sierra est le lieu privilégié de cette évolution, car les conditions climatiques y sont moins difficiles qu'ailleurs. Ces sociétés précoloniales avaient des méthodes d'exploitation agricoles qui étaient bien adaptées à l'environnement particulier des Andes. Avant de cultiver le sol, pour pouvoir à la fois contrôler les pertes en terre causées par les pentes et introduire des systèmes d'irrigation pour les cultures, ils construisaient des terrasses parallèles aux courbes de niveau. Leur production était diversifiée et respectait l'équilibre naturel des éléments nutritifs du sol sans entraîner de carences en certains éléments comme peuvent le faire certaines cultures monospécifiques intensives. De plus un cycle de rotation était pratiqué pour les cultures qui contribuait à maintenir l'équilibre général des sols. Les espèces végétales cultivées étaient réparties selon leur étage écologique d'une manière altitudinale, ainsi entre 2000 et 3000 mètres se situait l'étage du maïs, et on ne cultivait la pomme de terre qu'au dessus de 3200 m. Les étages les plus hauts où la culture est impossible étaient voués au pâturage des lamas. Ils ont donc su utiliser très tôt la diversité climatique et la bonne qualité des terres andines à leur profit tout en essayant de les respecter.

II.4.2. La conquête espagnole

Le but initial des conquistadores n'était pas de conquérir des terres agricoles, mais d'exploiter les ressources minières afin d'enrichir la couronne d'Espagne. Après des tentatives peu fructueuses de prospection de l'or ils décidèrent de se consacrer principalement à l'agriculture.

Celle-ci n'a fait qu'accélérer une situation déjà précaire jusqu'à rendre certaines terres incultes par endroit. La conquête a commencé par entraîner une baisse généralisée de la population autochtone asservie. Les colons ont joué un grand rôle dans la répartition des terres et l'organisation des cultures. C'est à cette époque que furent créées les grandes propriétés foncières ou "haciendas", regroupant la main d'oeuvre servile sur les terres conquises pour travailler les champs des "maîtres" (Rubio Obre, 1987). Mais en plus de cela les pratiques culturelles changèrent. Les Espagnols imposèrent les méthodes qu'ils connaissaient sans prendre garde à la différence fondamentale qui existe entre les milieux auxquels ils étaient habitués et ce nouveau milieu montagnard. L'exploitation des terres se concentre alors dans les vallées et dans les plaines, et l'utilisation des terrasses ainsi que des rotations de cultures sont abandonnées au profit de l'agriculture castillane. Cette dernière entraîne des mutations profondes notamment avec l'introduction d'arbres fruitiers, des cultures maraîchères et des céréales, le développement de l'élevage (bovin, ovin, porcin et chevalin), et l'utilisation de la traction animale pour les labours.

II.4.3. La réforme agraire

La réforme agraire du 11 juillet 1964 entraîne une nouvelle division des terres entre le petit paysannat ou "minifundio" et les grands propriétaires "hacendados". Cette réforme agraire n'a pas eu les effets escomptés sur la répartition des sols cultivés. Les grands propriétaires ont été contraints de céder une partie de leurs terres au reste de la population. En fait ils n'ont abandonné que les mauvaises terres, celles situées sur les plus fortes pentes en périphérie des plaines. Ils ont gardé pour eux les meilleures souvent vouées à l'élevage extensif : 0,7 tête en moyenne par hectare en 1985 (Delaunay, 1989). C'est alors que les activités agricoles furent redistribuées vers les sommets : les terres situées le long des versants furent cultivées de manière intensive par une population sans autre ressource. Ces petites parcelles ou "minifundios" accélèrent l'érosion car les labours se font sur fortes pentes. A mesure que les sols s'érodent les petits cultivateurs se déplacent en altitude jusqu'à atteindre la limite supérieure de l'agriculture (Bonifaz, 1982). Pour cela, ils déboisent le matorral qui n'apparaît plus dans le paysage à certains endroits que comme un squelette entourant les parcelles cultivées, ainsi que le Paramo. De plus la croissance démographique du pays qui a marqué particulièrement les campagnes (multiplication par 10 de la population équatorienne en un siècle) a aggravé la situation en accentuant la division des terres.

II.4.4. La mécanisation des cultures

L'homme contribue encore plus à l'érosion qu'il ne le fait depuis toujours lorsqu'il adopte de nouvelles pratiques culturales pour lesquelles il n'a pas été formé et qui sont bien souvent inadaptées aux conditions d'agriculture en montagne. L'emploi de plus en plus généralisé du labour "moto mécanique" est significatif de ce problème, d'autant plus qu'il est de plus en plus courant d'observer des tracteurs sur des versants dont les pentes peuvent atteindre 60% (De Noni et Trujillo, 1986).

Tous ces événements associés aux conditions extrêmes du milieu rendent l'érosion très active sur les champs cultivés, mais également sur les pâturages. Les zones les plus érodées se situent entre 1500 et 3000 m où on observe actuellement l'abandon de nombreux terroirs, alors que l'on constate une progression active de l'érosion sur les hautes terres. Ainsi, de l'analyse de l'environnement physique et humain il ressort que l'érosion en liaison avec les activités agricoles est un phénomène de grande ampleur.

II.5. Les formes d'érosion rencontrées en Équateur

Les manifestations de l'érosion englobent les processus de creusement, de transport, et d'accumulation (Derruau, 1988). Différentes classes de processus d'érosion ont été déterminées. Pendant la période de culture, l'érosion climatique et anthropique donnent lieu à diverses manifestations. Il y a le ruissellement qui va de diffus jusqu'à très concentré. Ce processus courant touche l'ensemble de la Sierra, il est très facilement repérable dans le paysage qui est découpé par un réseau relativement dense de rigoles et de ravines qui confluent vers les

ravins, ou "quebradas" étroites et profondes en V, qui sillonnent les vallées. Ces dernières sont les témoins d'une époque géologique où l'érosion était très active (Quaternaire). Il arrive que le ruissellement soit associé à de petits mouvements de masses, dus à une discontinuité texturale des sols volcaniques dont les effets sont notables à partir de 15-20% de pentes. Il se manifeste dans la partie septentrionale de la sierra. Des mouvements de masses affectent les sols argileux, non volcaniques développés sur des reliefs collinaires, dans la région de Cuenca et sur les contreforts externes très humides de la cordillère des Andes. Enfin il existe localement des formes d'érosion éoliennes qui se manifestent par la présence de dunes de sables dans des zones plus sèches, où les formations superficielles affleurantes sont plus sableuses; elles correspondent à un apport donc une perte pour des régions voisines. Cette érosion éolienne peut être associée parfois au ruissellement concentré (De Noni, De Noni et Viennot, 1990; De Noni, Pourrut, Viennot, 1993). Les phénomènes éoliens dans la Sierra touchent aussi bien les fonds de bassin que les versants ou les hautes terres.

Ces phénomènes d'érosion, notamment pluviale sur les versants, sont de différentes intensités. Des mesures menées sur le terrain entre 1980 et 1984 révèlent des pertes en terre variant entre 50 et plus de 600 tonnes par hectare et par an selon le type de sol et sa couverture végétale (De Noni, Viennot, 1994).

Il y a quatre facteurs principaux de l'érosion, à savoir :

- sol et formations superficielles,
- précipitations,
- pratiques culturales,
- facteurs socio-économiques,

Ces facteurs dans les Andes Équatoriennes en particulier sont propices au développement de l'érosion et à l'affleurement de la cangahua. Pour évaluer l'ampleur de ce phénomène à l'échelle régionale nous avons choisi d'utiliser les moyens apportés par la télédétection et l'imagerie satellitaire SPOT.

III. Utilisation de la télédétection pour la spatialisation de l'érosion

III.1. Les données utilisées

III.1.1. Les scènes SPOT

Les 4 scènes SPOT utilisées ont été acquises avec le concours du programme ISIS¹ (CNES² à Toulouse) et un financement du programme de la Commission Européenne. Il y en a une du 26 novembre 1986 prise sur le bassin de Quito, et trois du 8 février 1995. Ces dernières ont été prises sur une même trace du satellite et couvrent à la fois le bassin de Quito et les régions situées immédiatement au nord et au sud de celui-ci. Toutes ces images ont été prises en mode multi-spectral (XS1, XS2, XS3) avec une résolution au sol de 20 x 20 m. (Cf. tableau n°1 en annexe 4). Les vues du 8 février 1995 ont été prises pendant une période exceptionnellement sèche, dans l'intervalle entre la petite saison des pluies d'octobre à décembre et la grande saison des pluies de février à mai. A cette époque la couverture végétale est suffisante pour discriminer les zones dénudées comme la cangahua affleurante.

III.1.2. Cartes

Des cartes à différentes échelles et thématiques ont été utilisées (Cf. tableau n°2 annexe 5). Les cartes à 1 : 1 000 000, sur les paysages agraires de l'Équateur ainsi que sur les paysages naturels de l'Équateur ont permis une vision, sur l'ensemble du pays, de la répartition de l'occupation des sols; ainsi les secteurs les plus favorables à l'affleurement de la cangahua ont été précisés. Les cartes des sols et les cartes de l'utilisation actuelle du sol et des formations végétales à 1 : 200 000 furent utiles pour vérifier, avec plus de précision que les cartes précédentes, l'emplacement des sols indurés et leurs différents degrés d'induration et d'altération. Elles ont apporté un complément d'information non négligeable à la vérité terrain. Enfin, c'est avec l'aide des cartes topographiques à 1 : 50 000 qu'ont été faits les repérages et les recalages géographiques des images.

¹ Incitation à l'utilisation Scientifique des Images Spot
² Centre National d'Etudes Spatiales

III.1.3.Relevés GPS¹

Ces relevés GPS (Cf. tableaux ci-après) ont été effectués par G. De Noni et M. Viennot en mai 1993 dans deux zones bien connues d'eux, l'une à proximité immédiate de Quito dans la partie sud-est : Ilalo; et l'autre plus au nord de la capitale, toujours à l'est, sur la partie sud du volcan Mojanda. Ils ont essentiellement servi à caler la vérité terrain à travers l'initialisation des zones test.

Relevés GPS pris sur le Volcan Ilalo

N°	Latitude	Longitude	Descriptif
Q1	00 13 5786S	078 22 1023W	Parcelle de Tumbaco; au milieu de pâturages, sol sur cangahua, versant orienté sud
Q2	00 13 54 29S	078 22 0703W	Granja de Tumbaco; sol reconstitué à partir de cangahua affleurante
Q3	00 15 0246S	078 21 4947W	Cangahua affleurante
Q4	00 12 3736S	078 23 1038W	Jardins irrigués
Q5	00 14 5602S	078 21 5856W	Cangahua affleurante
Q6	?*	?	Pâturages sur cangahua
Q7	00 14 4909S	078 22 2819 W	Chemin dans cangahua
Q8	00 14 4935S	078 22 2704W	Cangahua affleurante discontinue avec végétation
Q9	00 15 2798S	078 22 2416W	Cangahua blanche affleurante
Q10	00 15 4756S	078 22 3432W	École de Chuspiaco; sur cangahua, bois d'Eucalyptus aux alentours
Q11	?	?	Almeida : Cangahua récupérée par mécanisation
Q12	00 16 0474S	078 22 3201W	Cangahua affleurante et cangahua récupérée en toutes petites parcelles
Q13	00 16 1485S	078 22 5178W	Cangahua affleurante jouxtant bois d'Eucalyptus
Q14	?	?	Zone arbustive très entaillée
Q15	?	?	Mélange arbustif/herbacées peu dense avec cangahua affleurante intermédiaire
Q16	?	?	Cangahua affleurante non indurée, zone à végétation prédominante

** Les coordonnées correspondant aux relevés Q6, Q11, Q14, Q15, et Q16 n'ont pu être enregistrés sur le terrain suite à une erreur de manipulation de l'appareil, cependant elles figurent sur la carte de terrain avec une précision suffisamment grande pour pouvoir les utiliser pour initialiser les zones test.*

¹ Global Positioning System

Relevés GPS sur le volcan Mojanda

N°	Latitude	Longitude	Descriptif
Q18	?*	?	Cangahua affleurante avec végétation
Q19	?	?	Entrée sur le triangle de Malchingui
Q20	?	?	Petite clairière de maïs joutant bois d'Eucalyptus
Q21	00 02 4463N	078 18 0176W	Jachère herbeuse (terrain de football)
Q22	00 00 4121N	078 21 0812W	Eucalyptus
Q23	00 01 0512N	078 21 0422W	Petite parcelle de maïs sur sol très sableux
Q24	?	?	Village de Malchingui
Q25	00 03 2792N	078 20 2439W	Place centrale du village de Malchingui (sable)
Q26	00 04 0263N	078 20 1063W	Mollisols
Q27	00 04 0394N	078 20 0929W	Parcelle d'orge sur mollisol
Q28	00 03 1391N	078 19 4773W	Eucalyptus
Q29	00 03 0993N	078 19 2524W	Interfluve entre deux quebradas; orge, blé, en grandes parcelles séparés par des haies d'Eucalyptus
Q30	00 03 1127N	078 18 4787W	Les Tolas : maïs, céréales
Q31	00 02 4510N	078 18 0233W	Talweg du ravin; flanc Eucalyptus dense
Q33**	00 02 3922N	078 17 2066W	Place centrale du village de Tocachi
Q34	00 04 1011N	078 17 3262W	Parcelles de pommes de terre dans le Matorral

*Les coordonnées correspondant aux relevés Q18, Q19, Q20, et Q24 n'ont pu être enregistrés sur le terrain suite à une erreur de manipulation de l'appareil, cependant elles figurent sur la carte de terrain avec une précision suffisamment grande pour pouvoir être utilisées dans l'initialisation les zones test.

**Le relevé Q32 n'existe pas.

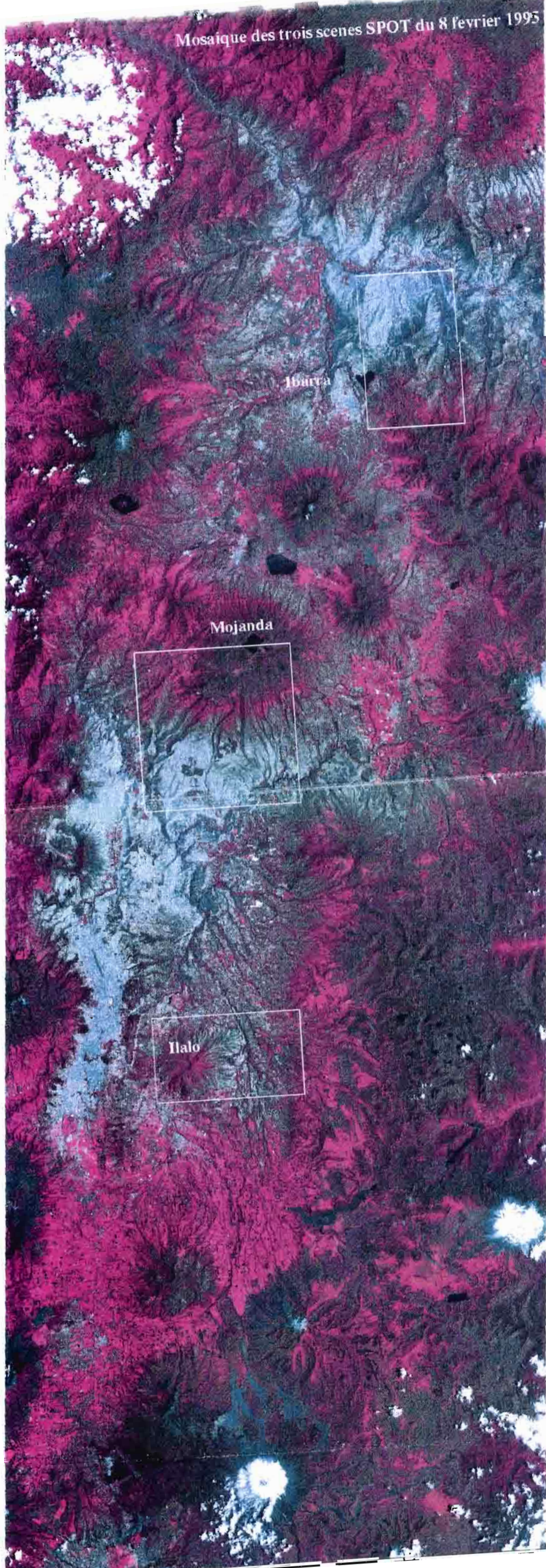
III.2. Les traitements préalables des données SPOT

Les données sont enregistrées par les capteurs sous forme de segments le long de la trace du satellite. Ensuite chaque segment est découpé en scène, et chaque scène est optimisée par rapport à son histogramme propre. Cela explique pourquoi lorsque l'on a deux scènes contiguës prises à une même date, un pixel commun aux deux dates n'aura pas nécessairement la même valeur dans les deux scènes.

Ainsi, avant de commencer à travailler sur les images de 1995 qui font toutes partie du même segment, il nous a fallu effectuer une mosaïque des trois images disponibles. Ensuite une égalisation des valeurs à partir d'une scène de référence et des bandes communes de superposition des scènes. Cela nous a permis d'avoir une couverture continue de l'ensemble du bassin intra-andin et par la suite de pouvoir prétendre à généraliser les traitements.

Fig-5

Mosaïque des trois scènes SPOT du 8 février 1995



Dans un premier temps nous avons choisi de ne travailler que sur des extractions effectuées sur des zones pour lesquelles nous avons des données de terrain, pour ensuite appliquer les résultats à l'ensemble de la mosaïque.

III.2.1. Mosaïque des scènes SPOT de 1995

Pour effectuer l'assemblage des scènes nous sommes passés par différentes étapes :

- 1 - repérage de l'image servant de "référence radiométrique" entre les trois scènes : il s'agit de la scène centrale (K-J 640-350), présentant le moins de perturbations atmosphériques ou de nuages;
- 2 - égalisation radiométrique à partir de l'image de référence pour chacun des canaux bruts des deux autres images;
- 3 - création de l'image de fond de la mosaïque d'une taille suffisante (3600 colonnes et 8800 lignes) pour pouvoir accueillir les trois scènes, en tenant compte de l'orientation des scènes qui n'est pas perpendiculaire aux lignes;
- 4 - repérage pour chaque scène des lignes communes avec la scène suivante et choix de pixels de référence pour la superposition;
- 5 - assemblage des scènes une à une sur l'image de fond de manière à obtenir une nouvelle image couvrant l'espace des trois scènes (Fig. 5 Mosaïque des trois scènes de 1995).

III.2.2. Extractions de sites connus

A partir de l'assemblage nous avons donc pu extraire les zones qui nous intéressaient plus particulièrement (Fig. 5 à 8), en fonction du travail déjà effectué en 1994 (sur les mêmes zones extraites de la scène de 1986), des relevés GPS de 1993, et de la connaissance des zones susceptibles de présenter le type d'érosion recherché.

Ainsi chaque extraction inclut une partie d'altitude supérieure à 3200 mètres recouverte de végétation et non atteinte par les phénomènes d'induration des sols, et une partie de piedmont avec quelques quebradas, et des zones à cangahua affleurante en grandes plaques ou en plaques discontinues en alternance avec des zones encore recouvertes partiellement de sol.

La première zone extraite est celle d'Ilalo (fig. 6) du nom du volcan présent à cet endroit. Elle fut tout d'abord limitée en superficie à la zone extraite sur l'image de 1986, mais

nous avons choisi par la suite d'étendre l'extraction plus au sud de manière à englober des zones pouvant poser des problèmes de discrimination par rapport à la thématique de recherche. Ceci a été permis grâce à la mosaïque, car sans elle la scène s'arrêterait juste au niveau du volcan Ilalo.

La deuxième extraction (fig. 7) correspond à la partie sud du volcan Mojanda. Comme pour l'extraction précédente elle correspond à la zone traitée en 1994 sur l'image de 1986, avec cependant une extension légèrement plus importante de la zone vers l'est et le nord.

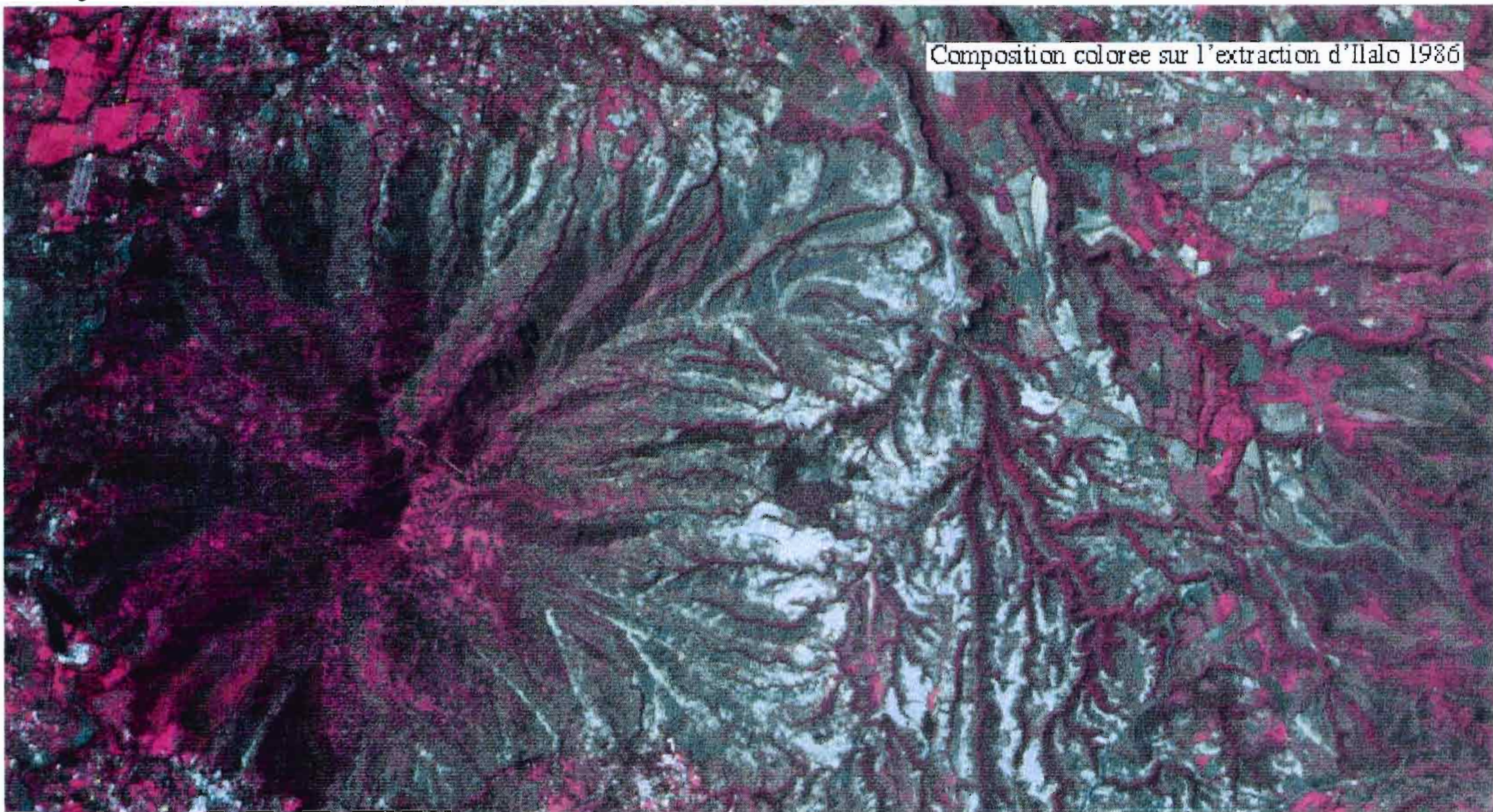
La troisième extraction a été choisie après examen de la composition colorée effectuée sur l'ensemble de la mosaïque. Elle correspond à un espace pour lequel nous ne disposons pas d'autre information que les cartes. Cependant la qualité de la composition colorée nous permet d'apprécier au préalable les zones susceptibles de correspondre effectivement aux sols érodés indurés. Ceux-ci se distinguent très bien des espaces où la végétation est plus ou moins abondante du fait d'une augmentation de l'altitude et corrélativement de l'humidité qui empêche l'induration de la formation. Il s'agit d'une zone située au nord-est de la ville d'Ibarra (fig. 8). Nous n'avons pas eu le temps pour l'instant de faire plus que de choisir cette zone, elle servira ultérieurement de premier test à l'application des méthodes de classification choisies, avant application à l'ensemble de la mosaïque.

III.2.2. Compositions colorées des extractions

Sur chacune des extractions décrites précédemment nous avons effectué une composition colorée (fig. 6 à 8). Celles-ci facilitent la première analyse visuelle du paysage et on y repère déjà avec une grande précision les secteurs touchés par l'érosion de la cangahua qui ressortent en bleu clair.

Fig-6

Composition coloree sur l'extraction d'Ilalo 1986



Composition coloree sur l'extraction d'Ilalo 1995

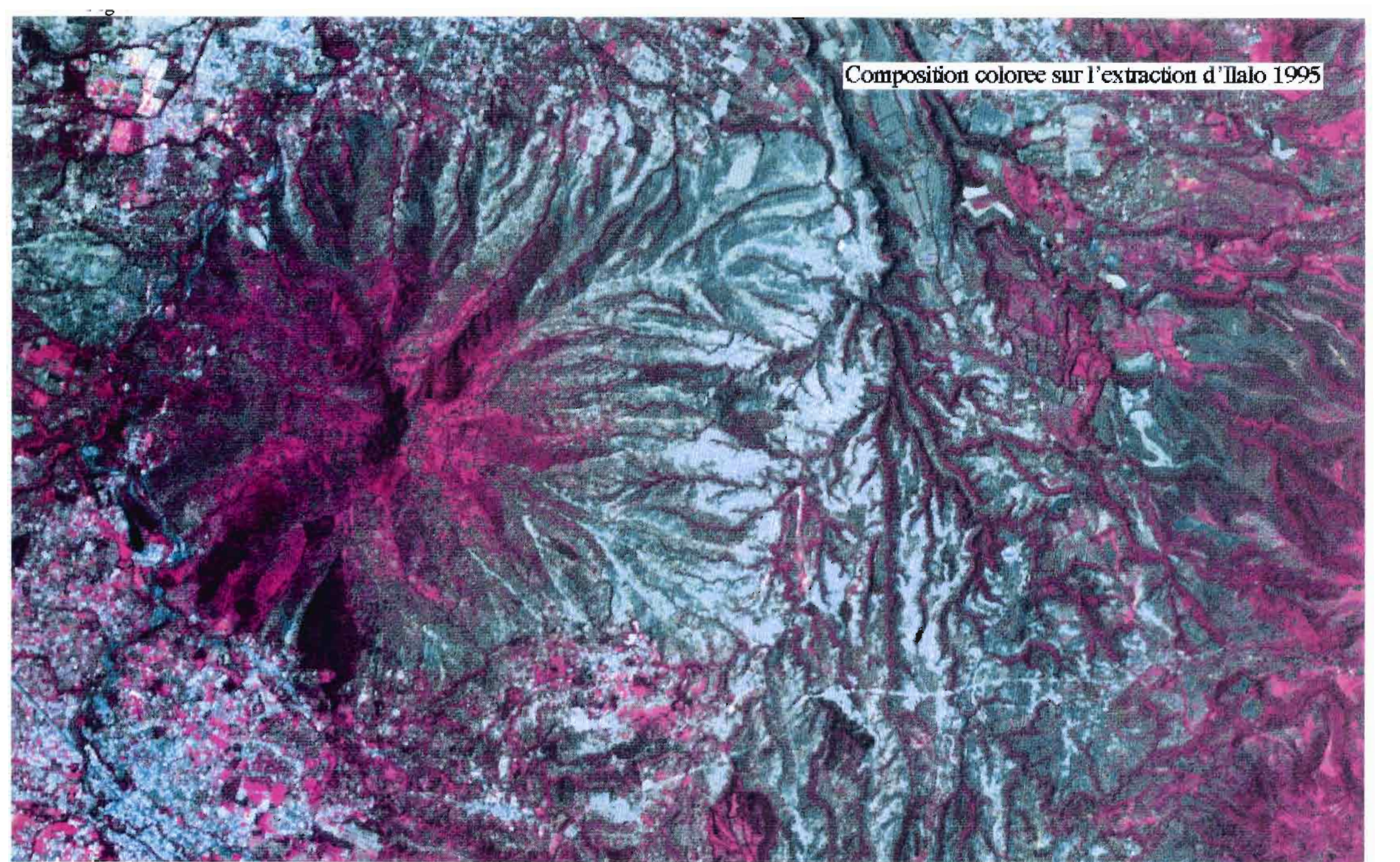
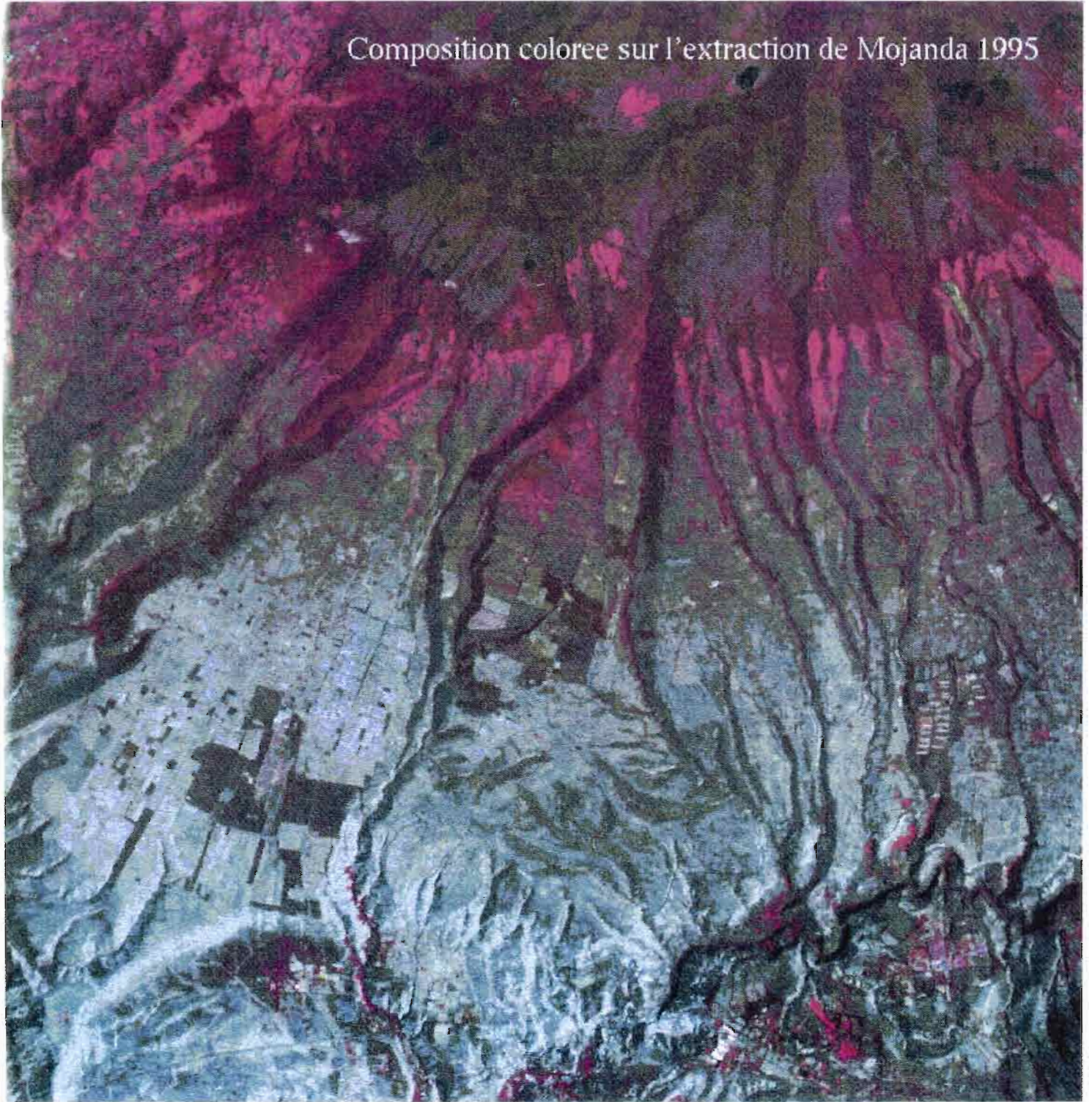
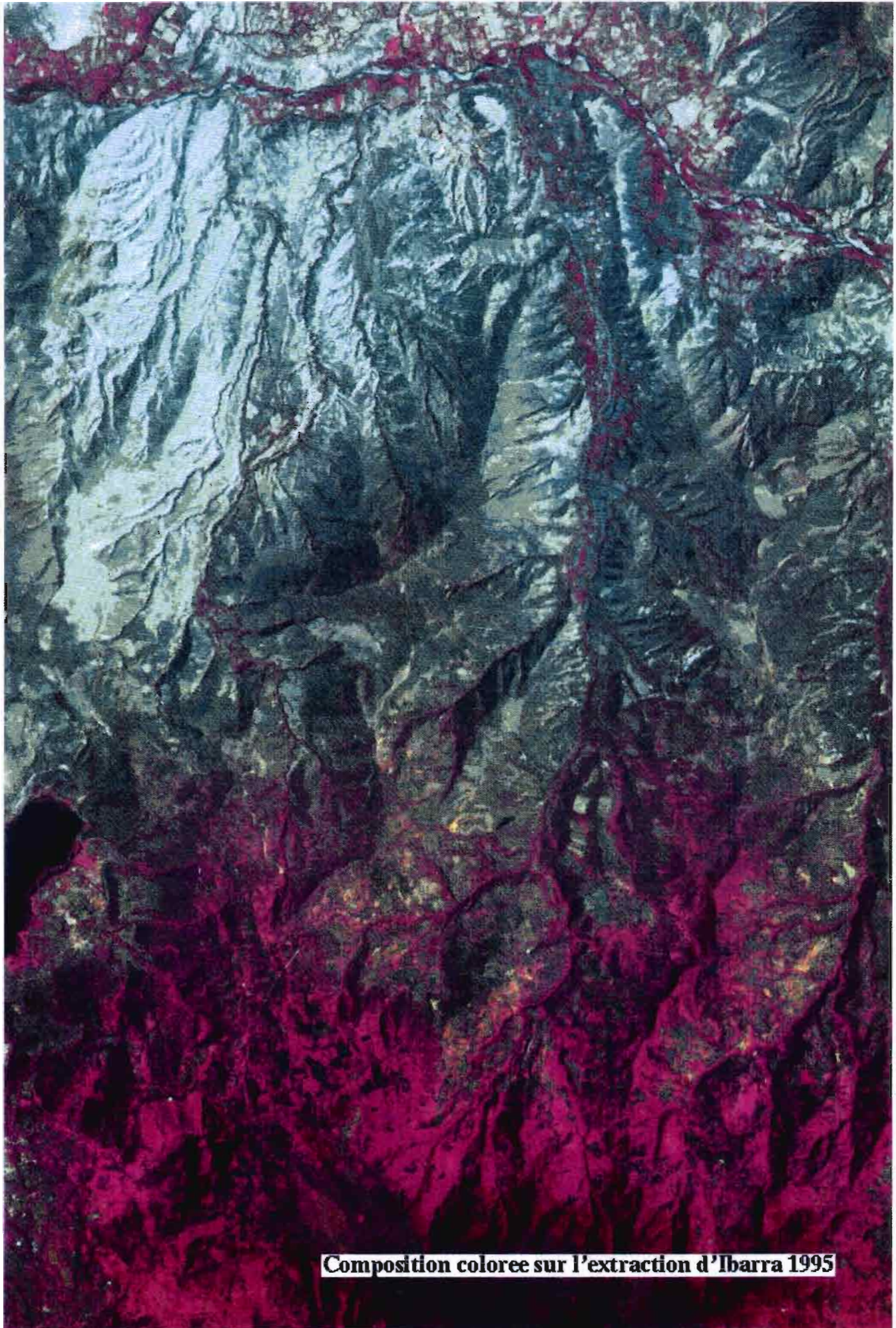


Fig-8

Composition coloree sur l'extraction de Mojanda 1995





Composition coloree sur l'extraction d'Ibarra 1995

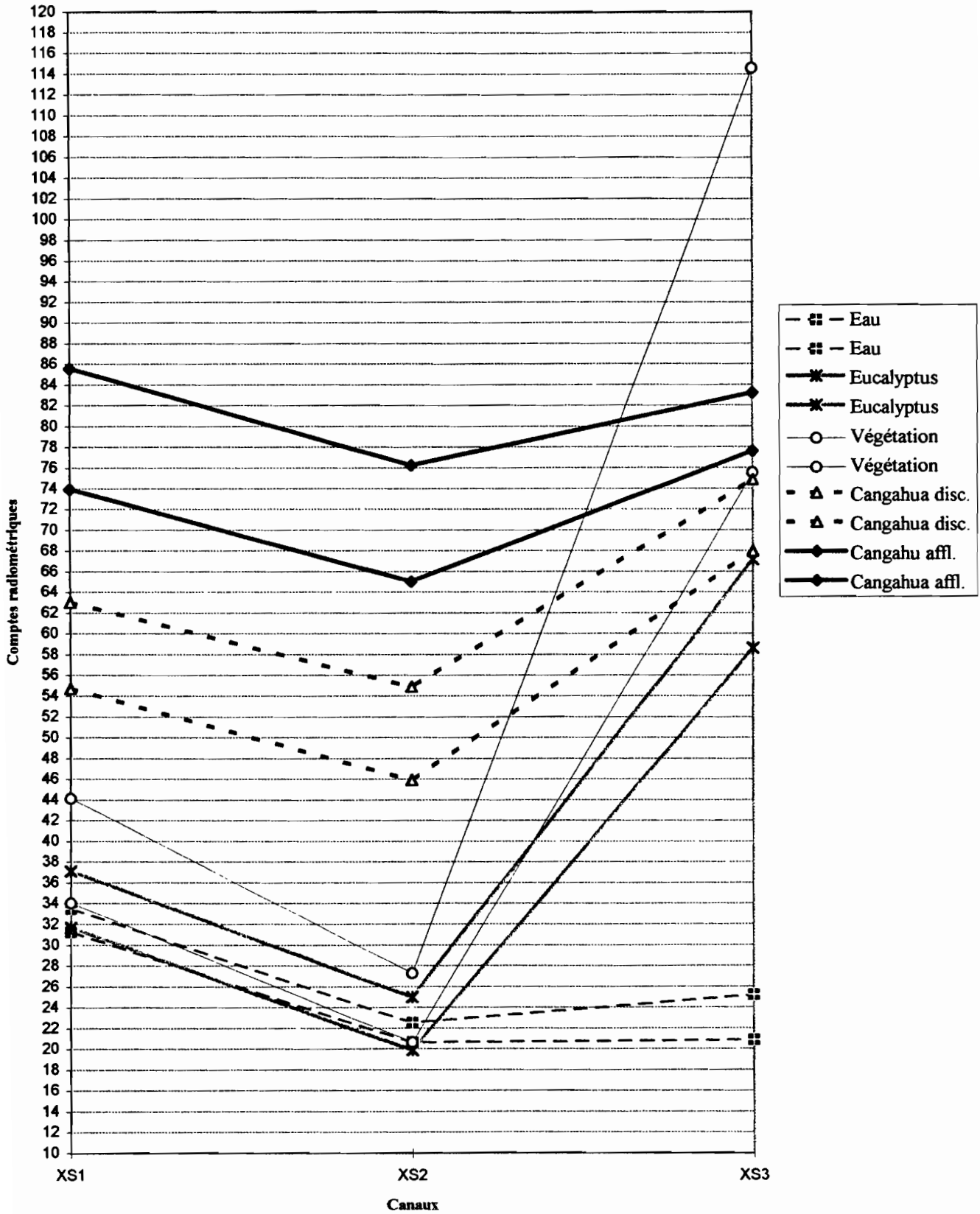
III.3. Choix de la méthode de classification des extractions

Plusieurs méthodes de classification ont été expérimentées. Il s'agit essentiellement d'expliciter celle choisie afin de discriminer les différents thèmes identifiés sur les compositions colorées (Fig. 6 à 9), à l'aide des diverses données terrain disponibles.

III.3.1. Rappel des méthodes testées en 1994

Classification	Méthode	Principe	Résultats pour la thématique recherchée
Non dirigée : Méthode statistique visant à effectuer une partition de l'espace qui ne nécessite aucune connaissance <i>a priori</i> sur l'organisation des individus.	Nuées dynamiques	Segmente les valeurs multispectrales du champ de pixels qu'est l'image en intervalles radiométriques.	Peu satisfaisant, trop de confusions entre certains thèmes.
Dirigée : Méthodes utilisant des zones de vérité terrain qui sont initialisées sur l'image à traiter afin de servir de base aux classifications. Ces zones test sont représentatives de thématiques connues et permettent donc d'effectuer une classification moins aléatoire. De plus, en n'introduisant pas toutes les zones connues pour la classification cela permet de vérifier et de valider par la suite la classification obtenue de manière objective.	Sebestyen	Chaque pixel est affecté à la classe qui lui est la plus proche, la mesure de similarité étant calculée à partir de la moyenne du carré des distances entre le pixel et les points constituant la classe.	Insatisfaisant, confusions entre l'eau et les ombres des versants, ainsi qu'au sein de la végétation.
	Euclidienne	Pour chaque point dans l'espace des canaux on calcule la distance au centre de gravité de la classe et on affecte le point à la classe la plus proche.	Insatisfaisant, l'eau libre et l'Eucalyptus sont confondus avec les ombres.
	Hypercubes	Les classes de l'image sont représentées par des segments de radiométries définis par un minimum et un maximum successifs qui ne se chevauchent pas, chaque pixel est ainsi placé dans la classe dont le segment comprend sa radiométrie	Satisfaisant, d'autant plus si l'on utilise la moyenne plus ou moins l'écart type à la place des valeurs minimum et maximum, cela augmente la discrimination entre les thèmes de manière rigoureuse.
	Histogramme bidimensionnel	Partition plus ou moins aléatoire sous forme de zones à l'intérieur de l'histogramme bidimensionnel réalisé à partir de deux canaux autant décorrelés que possible de l'image	Méthode qui peut donner des résultats satisfaisants, cependant manque de rigueur dans la partition des thèmes.

Fig. 10 : Serpents radiométriques à partir de la moyenne plus ou moins l'écart type pour l'extraction d'Iloilo 1986



III.3.2. Classification par hypercubes

Le choix de la méthode de classification à adopter pour nos images s'est donc imposé en fonction des résultats obtenus auparavant et suite à une meilleure maîtrise et compréhension de ces différentes méthodes dans leur aspect théorique et pratique.

Rappel de la méthode de classification choisie :

On décide de créer un certain nombre de classes pour lesquelles on possède des zones de vérité terrain. La méthode peut se décomposer en deux phases principales : l'apprentissage et la classification.

III.3.2.1. Apprentissage

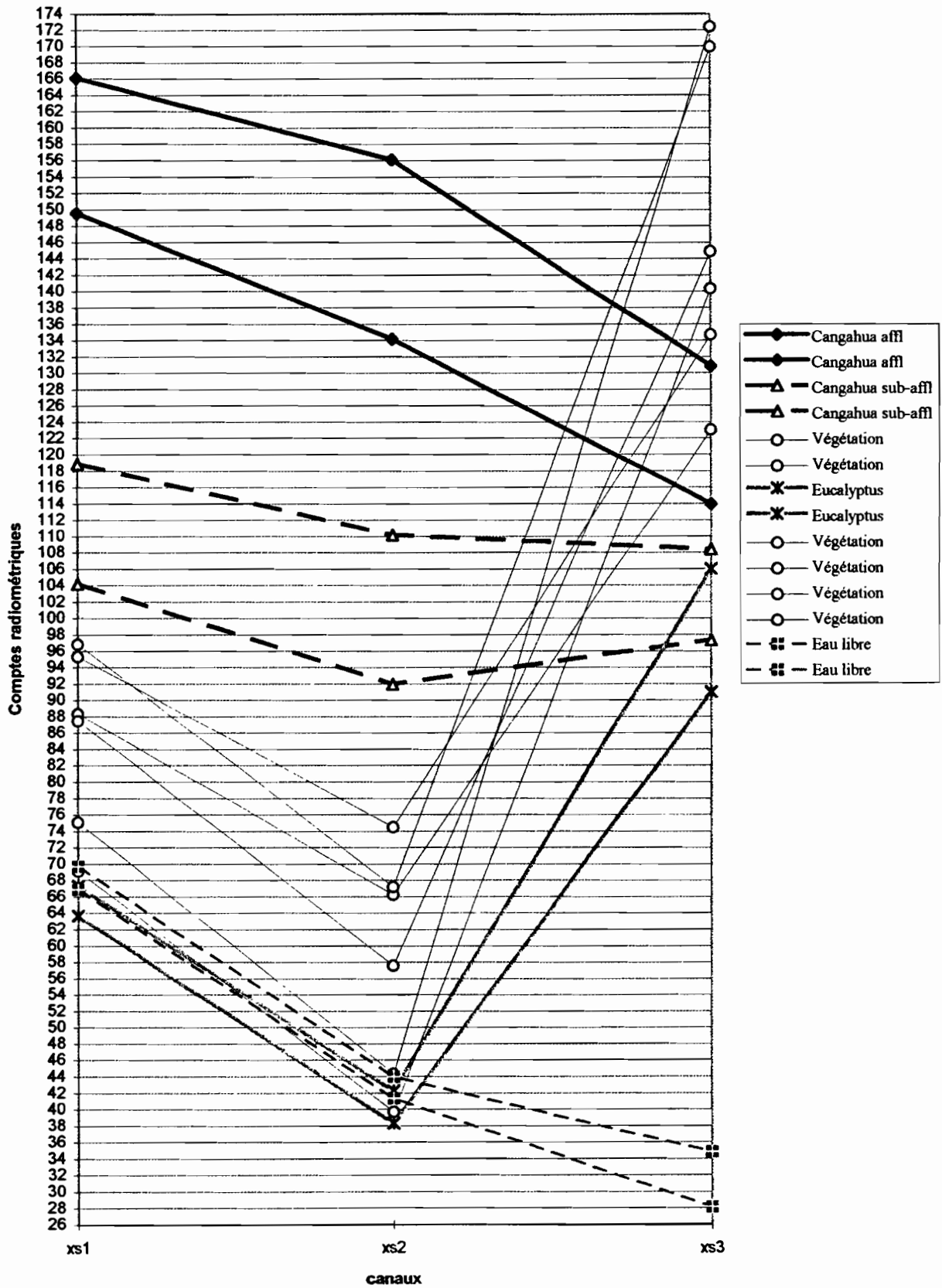
L'apprentissage vise à déterminer les caractéristiques radiométriques des classes que l'on souhaite créer. Pour cela on commence par digitaliser les parcelles test, c'est à dire que l'on reporte sur l'image les zones correspondant aux thèmes recherchés, que l'on a identifiés au préalable sur le terrain. Les étapes successives de l'apprentissage sont les suivantes :

- Choix des zones : qu'il s'agisse de l'extraction d'Illalo ou de Mojanda les zones test ont été choisies après analyse des différents documents cartographiques et en utilisant autant que possible l'information plus précise apportée par les relevés de terrain (GPS). Les différents thèmes retenus dans le choix des zones sont la cangahua affleurante et la cangahua discontinue qui sont les plus importants, mais nous avons également intégré d'autres éléments du paysage (l'eau libre, la végétation active d'une manière générale et l'Eucalyptus en particulier) aisément repérables et repérés de manière à les utiliser éventuellement comme un moyen de validation supplémentaire.

- Traitements statistiques : à partir des parcelles numérisées sur l'image on lance des calculs statistiques pour chaque zone, comprenant moyenne, écart type, valeurs minimales et maximales, nombre de pixels. Cela nous permet de définir les classes du point de vue de leurs caractéristiques radiométriques (*Cf. annexes 1 à 3 pour les résultats statistiques*).

- Utilisation des résultats statistiques des différents thèmes : l'analyse statistique permet de constituer des groupes homogènes correspondants aux thèmes recherchés. Pour cela on examine l'homogénéité entre les valeurs statistiques des zones de même thème de manière à éventuellement éliminer des zones trop éloignées du reste.

Fig. 11 : Serpents radiométriques à partir de la moyenne plus ou moins l'écart type pour l'extraction d'Ilalo 1995



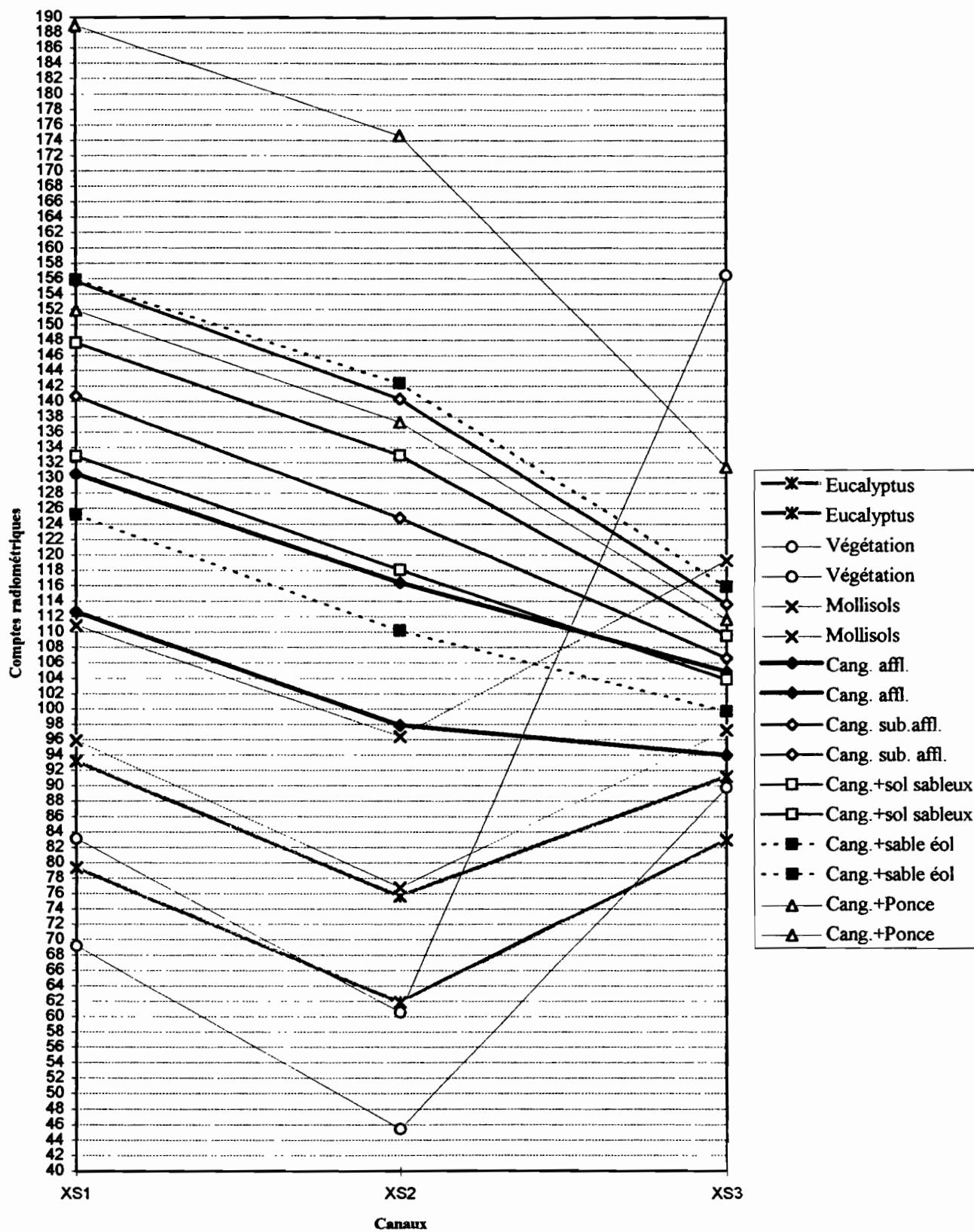
- **Construction des polynombres et des serpents radiométriques :** On regroupe les valeurs statistiques concernant les zones test de même thème. Il s'agit de reporter sur un graphique les valeurs radiométriques comprises entre 0 et 255 et les valeurs minimales et maximales de chaque zones dans chaque canal. Ainsi chaque polynombre de niveau trois (car composé d'une suite de trois nombres faisant référence à la même zone dans des longueurs d'ondes différentes), est représenté par une ligne brisée (ORSTOM, 1978). Pour permettre une meilleure discrimination des thèmes entre eux sur le graphique final nous avons choisi de remplacer les valeurs minimales et maximales de chaque zone par des valeurs égales à la moyenne plus ou moins l'écart type. Cela enlève simplement les valeurs extrêmes, souvent aberrantes, englobées dans la zone et qui de toutes façons ne sont pas représentatives de l'ensemble de celle-ci. Une fois les deux polynombres (moyenne plus écart type et moyenne moins écart type) de chaque zone représentés sur le graphique on effectue un regroupement des polynombres de même zone. Ce regroupement correspond à la création de serpents radiométriques. Un serpent radiométrique est un ensemble de polynombres P1 et P2 de même niveau K tel que $P1 \geq P2$ vérifiant la relation $P1 \geq Pn \geq P2$ (ORSTOM, 1978). Chaque serpent radiométrique est donc représenté par un intervalle entre deux valeurs pour chaque canal de SPOT. Les serpents représentés pour chacune des zones correspondent à la signature spectrale des différents thèmes. La signature spectrale est spécifique à chaque objet en fonction de ses caractéristiques d'absorption et de réflectance dans chaque longueur d'onde (Fig. 10, à 12 : serpents radiométriques des différentes classes définies sur Ilalo et Mojanda).

- **Discrimination des thèmes à partir des serpents radiométriques :** C'est à l'aide des serpents radiométriques de l'ensemble des thèmes identifiés à travers les zones test que l'on découpe l'espace radiométrique de chaque canal de manière à dissocier les thèmes les uns des autres grâce à leur signature spectrale.

- **Choix des axes :** Le découpage de l'espace radiométrique pour dissocier les différents thèmes peu s'effectuer dans tous les canaux disponibles (ici les trois canaux bruts de spot, mais il peut s'agir d'indices ou d'analyses en composantes principales); cependant on peut ne sélectionner qu'un nombre restreint de canaux que l'on aura retenu en fonction d'une discrimination suffisante des thèmes à l'intérieur de ceux-ci. C'est ce que nous avons fait pour la classification effectuée sur la zone d'Ilalo sur l'image de 1995 car l'information est redondante entre les deux premiers canaux (XS1 et XS2) à l'exception près que certains thèmes sont légèrement plus confondus dans XS2. Ainsi nous avons retenu comme axes pour classer l'espace uniquement XS1 et XS3.

Pour la classification de l'extraction sur le volcan Mojanda en revanche nous n'avons pu nous contenter de deux canaux car la majorité des thèmes sont partiellement ou totalement confondus dans XS3, alors l'apport de XS2 est non négligeable pour une meilleur discrimination. Même en utilisant les trois canaux il reste une part de confusion entre certains thèmes (Cangahua + sables éoliens et cangahua + sols sableux) qu'il nous a été impossible de différencier, nous les avons donc regroupés en un seul : "cangahua + sable".

Fig. 12 : Serpents radiométriques à partir de la moyenne plus ou moins l'écart type pour l'extraction de Mojanda 1995



III.3.2.2. La classification

La classification permet d'appliquer à l'ensemble de l'image les résultats obtenus lors de la discrimination des thèmes à partir des valeurs statistiques et des graphiques effectués sur les zones test.

III.3.2.2.1. Découpage des axes en vue de la détermination des classes

Une fois les axes choisis pour effectuer la séparation des thèmes (chaque axe correspondant à l'un des canaux du capteur), on procède au découpage à partir des serpens radiométriques. Lors d'un premier essai nous avons choisi de découper l'ensemble de l'espace radiométrique sur les axes retenus de manière à classer l'ensemble de l'image. La classification obtenue à l'issue d'un tel découpage comprend bien évidemment des éléments bien classés, cependant il y a également énormément de zones mal classées ou mal délimitées du fait de l'imprécision des limites entre zones. C'est pourquoi par la suite nous avons opté pour des classifications comprenant des espaces non classés ne se rapportant à rien de connu *a priori* sur l'image, ou bien faisant référence à des objets non significatifs pour la thématique abordée.

Pour cela on introduit à l'aide des serpens radiométriques des conditions de manière à dissocier chaque thème. Par exemple, pour le thème de la cangahua affleurante de 1995 pour l'extraction Ilalo on demande à ce que la classification prenne en compte toutes les valeurs comprises à la fois entre les valeurs 149 et 166 sur XS1 et entre 114 et 131 sur XS3. En effectuant cette même opération pour chacun des thèmes recherchés on détermine l'espace radiométrique qui sera pris en compte pour chaque thème dans chaque canal utilisé puis on lance ensuite la classification.

III.3.2.2.2. Affinage des classes

En introduisant dans le découpage des axes des zones non classées ils arrive que des thèmes proches (la "cangahua affleurante" et la "cangahua discontinue", qui sont des zones faisant référence à la même formation à des stades de dégradation différents) , se retrouvent séparés. Or les différents stades de dégradation de la cangahua constituent un phénomène continu dans l'espace avec tous les niveaux intermédiaires possibles. Cependant les zones test ayant été initialisées sur des parcelles relativement homogènes il est normal que les stades intermédiaires ressortent comme des zones non classées.

Pour tenir compte de la continuité du phénomène dans l'espace nous avons le choix entre deux méthodes. Dans la première on ne garde que deux thèmes pour les états de dégradation de la cangahua, auquel cas nous modifions les limites respectives des deux classes dans l'espace qui les sépare sur les différents axes de manière à ce qu'elles soient contiguës.

Le nom de la méthode de classification par hypercubes fait référence à l'espace pris en compte entre les axes utilisés. Si l'on choisi de ne prendre en compte que deux canaux pour la classification, les classes retenues auront la forme de rectangles. Si on utilise les trois canaux de Spot pour classifier notre image, la séparation des thèmes se fera dans un espace à trois dimensions dans lequel chaque classe aura l'aspect plus ou moins proche d'un cube ou d'une boîte rectangulaire. Par contre si on travaille dans un espace comprenant plus de trois dimensions comme cela arrive avec des données Landsat, on se met alors à créer des "hypercubes" dans un "hyperspace".

Fig. 13-a : Découpage des axes en "boîtes" pour la classification par hypercubes sur Ilalo 1986

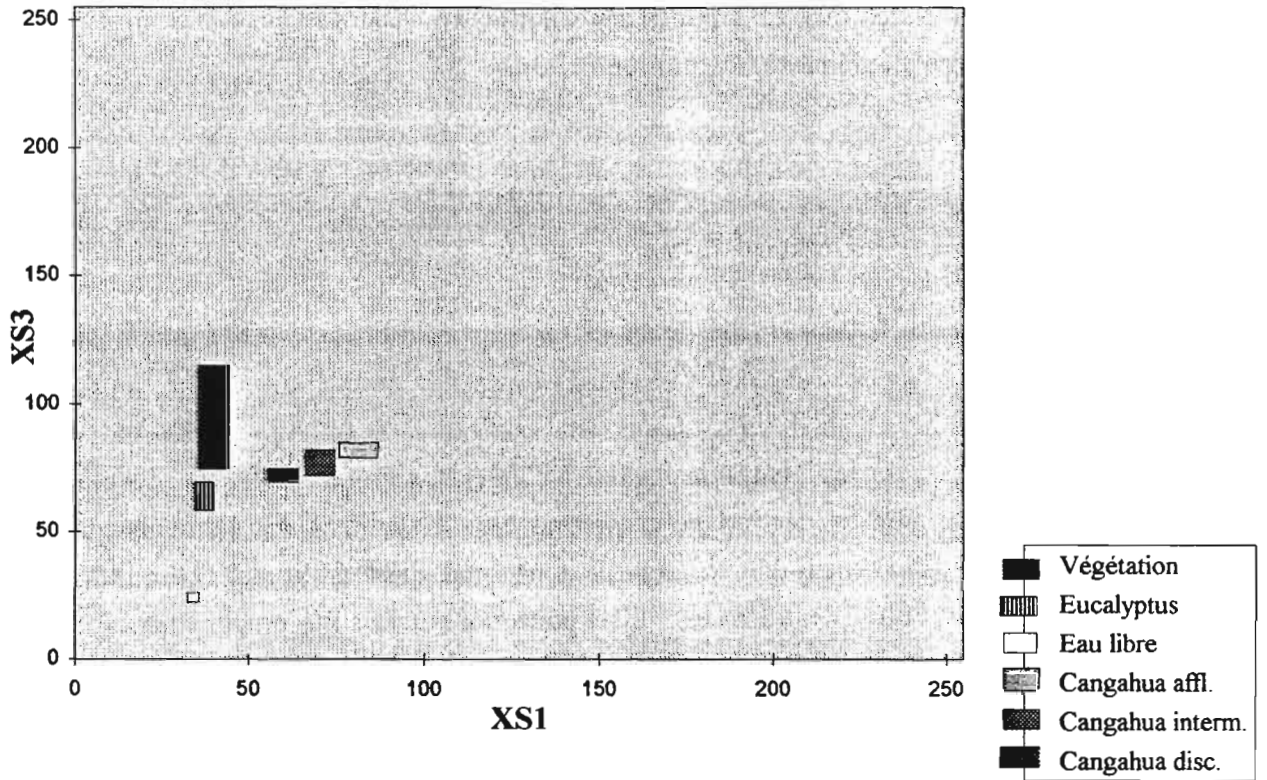
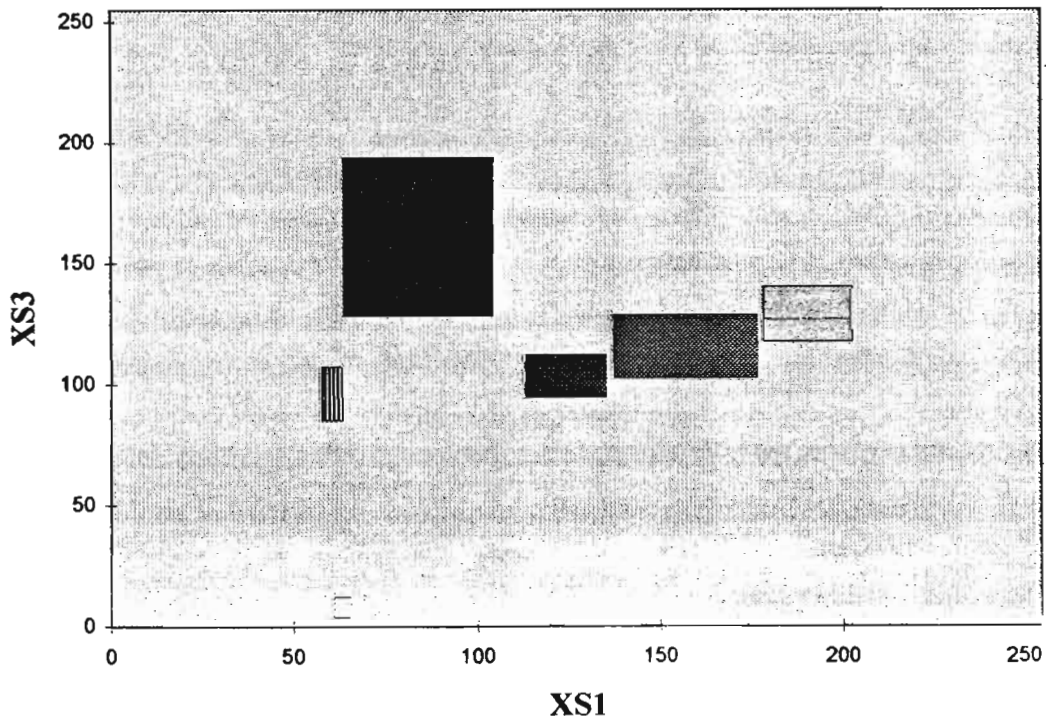


Fig. 13-b : Découpage des axes en "boîtes" pour la classification par hypercubes sur Ilalo 1995



Cette méthode engendre cependant quelques approximations quant à la limite effective entre les deux classes et sa position par rapport aux classes d'origine, même si l'on peut décider d'introduire la limite exactement au milieu de l'espace intermédiaire entre les deux pour être plus juste d'un point de vue statistique. La méthode que nous avons choisie consiste à garder les bornes d'origine de nos deux classes principales et à introduire dans l'espace intermédiaire une troisième classe qui correspond à une zone de transition entre la cangahua affleurante et la cangahua discontinue. Cependant un travail est actuellement en cours avec les thématiciens connaissant le terrain pour raccrocher cette zone intermédiaire à l'un des deux autres thèmes de cangahua de la manière la plus juste possible. Effectivement, les subtilités de superficies de cangahua encore recouvertes de sol ne sont pas ce que nous recherchons et nous tenterons ultérieurement de nous limiter aux deux états de dégradation les plus évidents.

Voici pour chaque extraction classée les différentes bornes prises pour chacun des thèmes dans les axes pris en comptes (pour Ilalo 1986 et 1995 voir également fig. 12 et 13, représentation graphique du découpage effectué sur les deux axes pris en compte) :

**Bornes inférieures et supérieures des classes
prises sur l'extraction d'Ilalo 1986 :**

Ilalo 1986	Cangahua affl.	Cangahua intermed.	Cangahua disc.	Végétation	Eucalyptus	Eau libre
XS1	74-86	64-73	54-63	34-44	32-38	31-34
XS3	78-84	71-81	68-74	74-115	58-68	21-25

**Bornes inférieures et supérieures des classes
prises sur l'extraction d'Ilalo 1995 :**

Ilalo 1995	Cangahua affl.	Cangahua intermed.	Cangahua disc.	Végétation	Eucalyptus	Eau libre
XS1	149-166	120-148	104-119	69-97	64-68	67-70
XS3	114-131	103-122	97-109	122-172	90-106	28-35

**Bornes inférieures et supérieures des classes
prises sur l'extraction de Mojanda 1995 :**

Mojanda 1995	Cangahua affl.	Cangahua + ponce	Cangahua + sable	Mollisol	Eucalyptus	Végétation
XS1	112-130	152-189	131-152	96-110	80-93	69-83
XS2	98-116	135-174	117-134	77-97	62-76	45-60
XS3	94-105	110-131	106-109	97-119	82-91	90-156

II.3.3. Résultats et réflexion sur les méthodes de classification

Les classifications obtenues par la méthode des hypercubes donnent des résultats relativement satisfaisants du point de vue de la spatialisation des états de dégradation des sols érodés indurés (fig. 15, 16, et 17). Cependant il est important de rappeler que cette méthode découpe l'espace dans lequel se répartissent les points de l'image selon le principe de "boîtes" rectangulaires. Or, les points de l'images précisément se répartissent sous forme de nuage dans l'espace de nos trois canaux, et les thèmes eux mêmes n'ont pas une position bien carrée comme pourrait le laisser supposer la méthode employée. Ils sont définis sous forme de zones

plus ou moins "patatoïdales". Il faut donc garder à l'esprit les biais pouvant avoir été introduits par cette méthode.

Une évaluation géographique montre qu'avec la méthode employée, on peut être sûr que ce qui a été classé l'est correctement. Ainsi tout l'espace non classé qui ressort dans ces trois classifications ne correspond à rien de déterminant pour l'étude menée. Les superficies classées pour les différents thèmes sont les suivants :

Superficie des thèmes classés sur l'extraction d'Ilalo 1986

Thèmes	nombre de pixels-	Aire (ha)	-	%
Cang. affl.	748-	29.92	-	0.15
Cang. inter.	3621-	144.84	-	0.75
Cang. disc.	11083-	443.32	-	2.28
Végétation	77177-	3087.08	-	15.90
Eucalyptus	29784-	1191.36	-	6.14
Eau libre	84-	3.36	-	0.02
Non classé	362934-	14517.36	-	74.77
Total	485431 -	19417.2	ha.	

Superficie des thèmes classés sur l'extraction d'Ilalo 1995

Thème Val	nombre de pixels	-Aire (ha)	-	%
Cang. affl.	2185-	87.40	-	0.45
Cang. inter.	17110-	684.40	-	3.52
Cang. disc.	20472-	818.88	-	4.22
Végétation	129814-	5192.56	-	26.74
Eucalyptus	6415-	256.60	-	1.32
Eau libre	82-	3.28	-	0.02
Non classé	309353-	12374.12	-	63.73
Total	485431 -	19417.2	ha.	

Superficie des thèmes classés sur l'extraction de mojanda 1995

Thème	nombre de pixels -	Aire (ha) -	-	%
Cangahua affl.	60031 -	2401.24	-	8.39
Cang. + ponce	11458 -	458.32	-	1.60
Cang. + sable	19002 -	760.08	-	2.66
Mollisols	57434 -	2297.36	-	8.02
Eucalyptus	14168 -	566.72	-	1.98
Autre vég.	111772 -	4470.88	-	15.62
Non classé	441826 -	17673.04	-	61.73
Total	715691 -	28627.6	ha.	

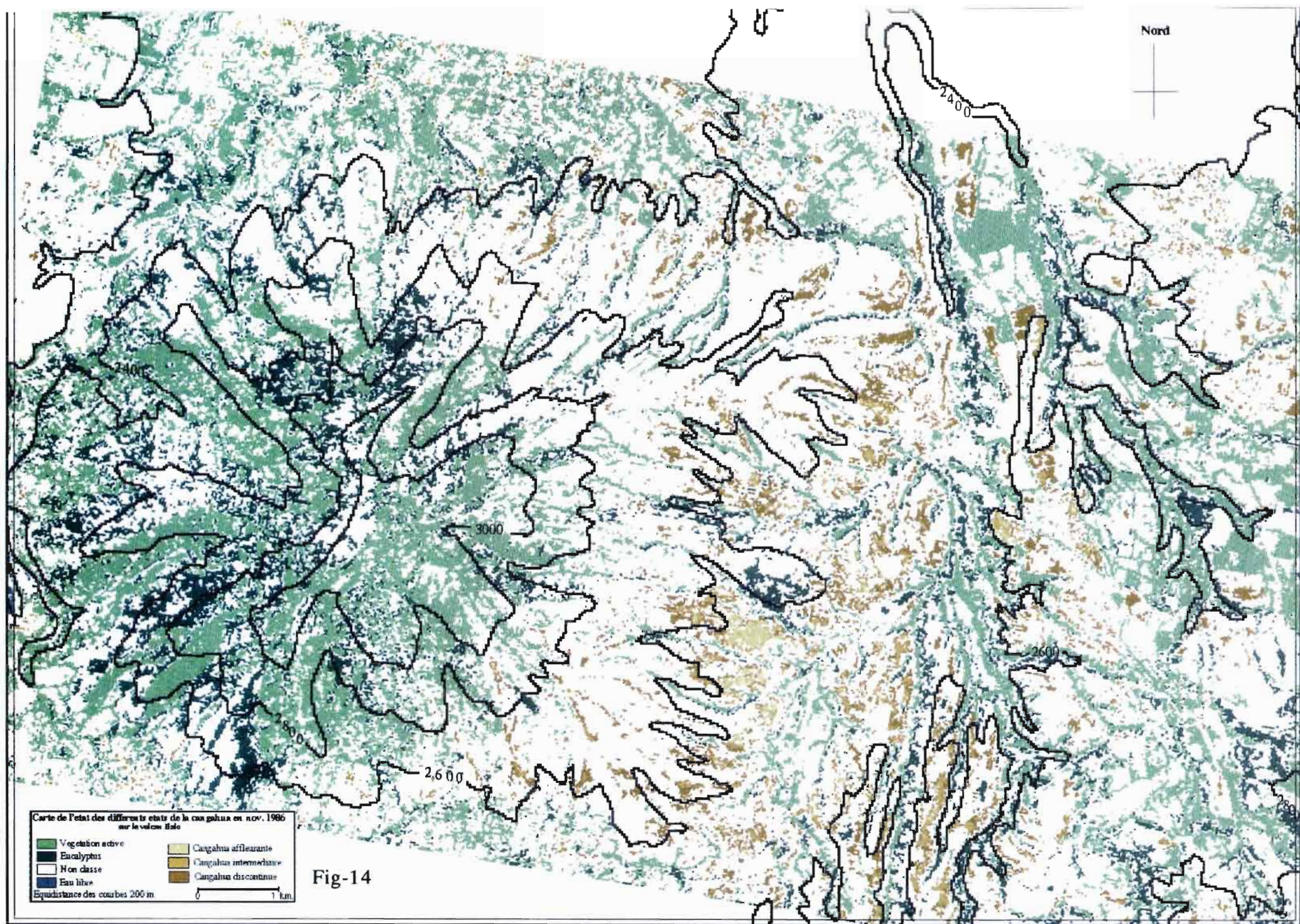


Fig-15

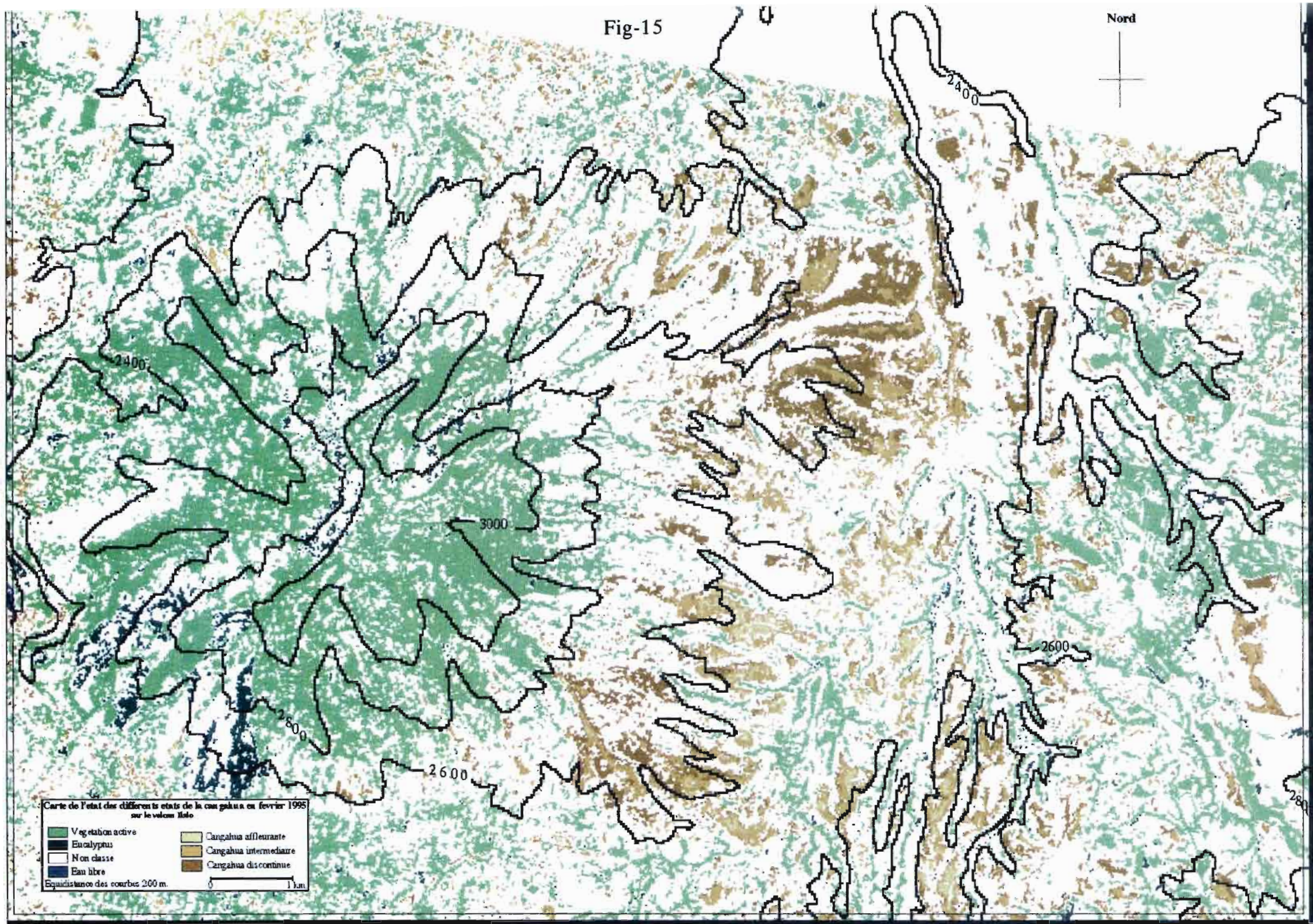
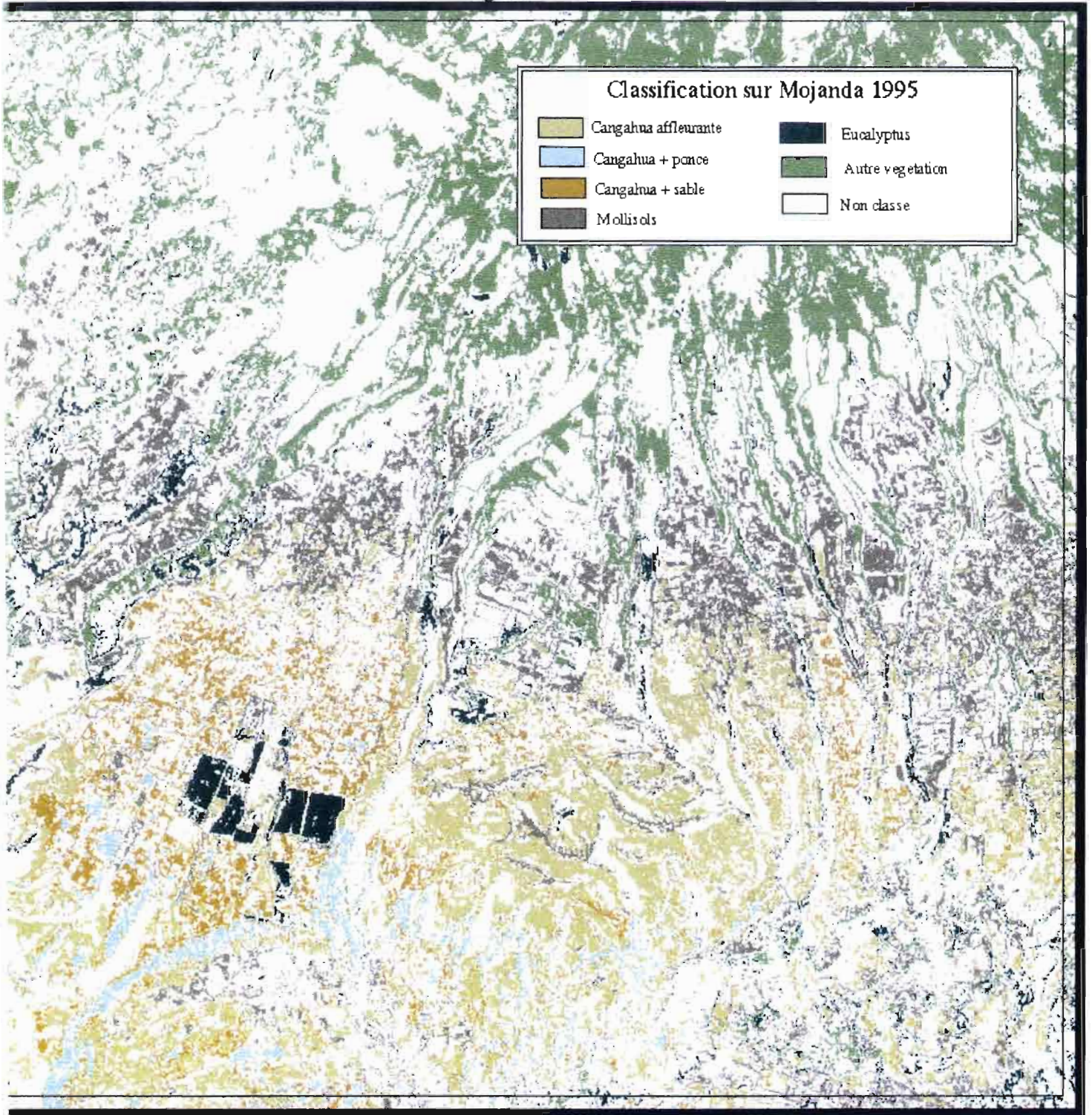


Fig-16



Ces résultats seront sans doute améliorés par l'utilisation d'algorithmes plus appropriés que la classification par hypercube et par l'emploi de néo-canaux comme l'indice de végétation et surtout l'indice de brillance dans les classifications dirigées. Ni le temps ni les moyens matériels ne me permettaient d'expérimenter ces procédures, mais elles seront largement prises en compte dans la suite du travail.

III.4. Étude multi-temporelle

L'étude multi-temporelle nous permet d'estimer les nouvelles surfaces de cangahua affleurantes qui sont apparues entre 1986 et 1995. Les dates de prises de vues différentes impliquent des conditions de prise de vue différentes, à savoir que l'angle de prise de vue n'est pas le même ($+7,6^\circ$ en 1986 et $-5,56^\circ$ en 1995), les conditions atmosphériques aussi. Pour que les données soient comparables il faut procéder à un recalage radiométrique et géométrique des données entre elles avant d'envisager l'étude multitemporelle. Pour des raisons de délais et à titre purement expérimental nous avons choisi donc de nous limiter à la comparaison du volcan Ilalo entre 1986 et 1995.

III.4.1. Recalage radiométrique

Le recalage radiométrique est la première opération à effectuer afin d'appliquer les mêmes espaces radiométriques dans chaque canal pour les différentes dates lors des classifications. Ce recalage se fait à partir des points de repères fixes de deux images ("zones étalons"), dont on est sûr qu'ils ne peuvent pas avoir bougés entre les deux dates; comme la mer en eau profonde, ou une grande surface à nue tel un désert. Pour être fiables ces zones de référence doivent représenter une surface suffisamment grande, sinon elles peuvent subir l'influence de proximité d'autres objets. A partir de là on effectue la rectification radiométrique des scènes en ajoutant à celle qui a les valeurs les plus faibles la différence des valeurs étalons, de manière à ce que les étalons aient en sortie la même valeur.

L'absence de zones de référence fiable dans la région ne nous a pas permis d'effectuer cette rectification radiométrique. Nous avons donc choisi de trouver un biais pour pouvoir comparer les images en absence de rectification radiométrique. La méthode adoptée fut le traitement séparé des images par la même méthode de classification sur des critères les plus rigoureux possibles et par comparaison des résultats obtenus.

III.4.2.Recalage géométrique

On effectue un recalage appliqué à l'ensemble des canaux des deux extractions pour les rendre superposables. Pour cela on prend un certain nombre de points d'appuis dans les deux images que l'on souhaite superposer et on lance une méthode d'interpolation pour obtenir l'image redressée.

Nous nous sommes interrogés au cours des traitements sur la meilleure étape pour faire le recalage géométrique des images entre elles de manière à les rendre superposables :

- faut-il le faire sur les données brutes ?
- vaut-il mieux le faire après obtention de résultats uniquement pour comparer ?

Sachant que pour rendre les images superposables pixel à pixel, compte tenu des différences liées à la prise de vue, on transforme une partie de l'information, il a paru préférable d'effectuer des classifications similaires sur les deux dates et de rendre alors les résultats superposables. Cependant la méthode de recalage par plus proche voisin permet de redresser l'image, en déplaçant simplement chacun des pixels en en redéfinissant le contour par rapport à l'image de référence, sans entraîner de modification dans le spectre radiométrique. Nous avons donc choisi cette méthode pour effectuer le recalage géométrique. Dans un premier temps nous avons recalé l'extraction de 1986 par rapport à celle de 1995 de manière à rendre les résultats des classifications comparables, et ensuite nous avons recalé le résultat final de l'étude multi-temporelle par rapport à un repère géographique fiable (carte topographique à 1/50 000). Ce dernier recalage nous a permis également de superposer les courbes de niveau préalablement scannées sur les classifications individuelles pour chacune des deux dates (fig. 14 et 15).

Nous avons pensé dans un premier temps que pour obtenir des résultats qui soient réellement comparables entre eux (à défaut d'avoir des images à valeurs radiométriques comparables) l'idéal était de pouvoir appliquer sur les deux dates exactement les mêmes zones test. C'est à dire qu'une fois que l'on a créé un fichier zone de référence pour une scène, on le superpose à l'autre scène. Cela de manière à ce qu'une zone test prise sur la scène de 1986 se retrouve exactement au même emplacement sur la scène de 1995, (avec la même valeur de zone et la même surface) pour avoir des résultats statistiques et des classifications comparables. Mais l'ampleur des évolutions présumées entre les deux dates a entraîné des résultats aberrants, car certains thèmes présents en 1986 à un endroit ne sont plus du tout valables en 1995.

Nous nous sommes donc appuyés sur les compositions colorées des deux dates et sur les relevés GPS de 1993 pour prendre des zones test bien délimitées à chaque date et correspondant bien à la même thématique. Sur l'extraction de 1986 la classification a été faite après le recalage géométrique par la méthode du plus proche voisin par rapport à l'image de 1995. Ainsi bien que les zones tests prises dans les deux scènes ne sont pas exactement les mêmes, cependant elles correspondent aux mêmes thèmes sur les mêmes sites.

III.4.3. L'analyse multi-temporelle

III.4.3.1. Résultats bruts

Voir carte de l'évolution de la Cangahua entre novembre 1986 et février 1995 sur le volcan Ilalo (fig. 17).

Superficies des changements à partir de l'étude multi temporelle sur l'extraction d'Ilalo entre 1986 et 1995

	nombre de pixels-	Aire(ha)-	%
Pas de changement (zones stables)			
Cangahua affleurante	0301	12.04	00.63
Cangahua intermédiaire	1461	58.44	03.05
Cangahua discontinue	1566	62.64	03.27
Total	3328	133.12	06.95
Amélioration			
Cangahua affl. vers non classé	260	10.40	00.54
Cang. affl. vers cang. interm.	178	07.12	00.37
Cang. affl. vers cang. disc.	9	00.36	00.02
Cang. interm. vers non classé	1482	59.28	03.10
Cang. interm. vers cang. disc.	206	08.24	00.43
Cang. disc. vers non classé	6340	253.60	13.25
Total	8475	339.00	17.71
Dégradation			
Non classé vers cang. affl.	1283	51.32	02.68
Non classé vers cang. interm.	12423	496.90	25.96
Non classé vers cang. disc.	18691	747.60	39.06
Cang. disc. vers cang. affl.	129	05.16	00.27
Cang. interm. vers cang. affl.	472	18.88	00.99
Cang. disc. vers cang. interm.	3048	121.90	06.37
Total	36046	1441.76	75.33
Total	47849	1914.0-ha.	

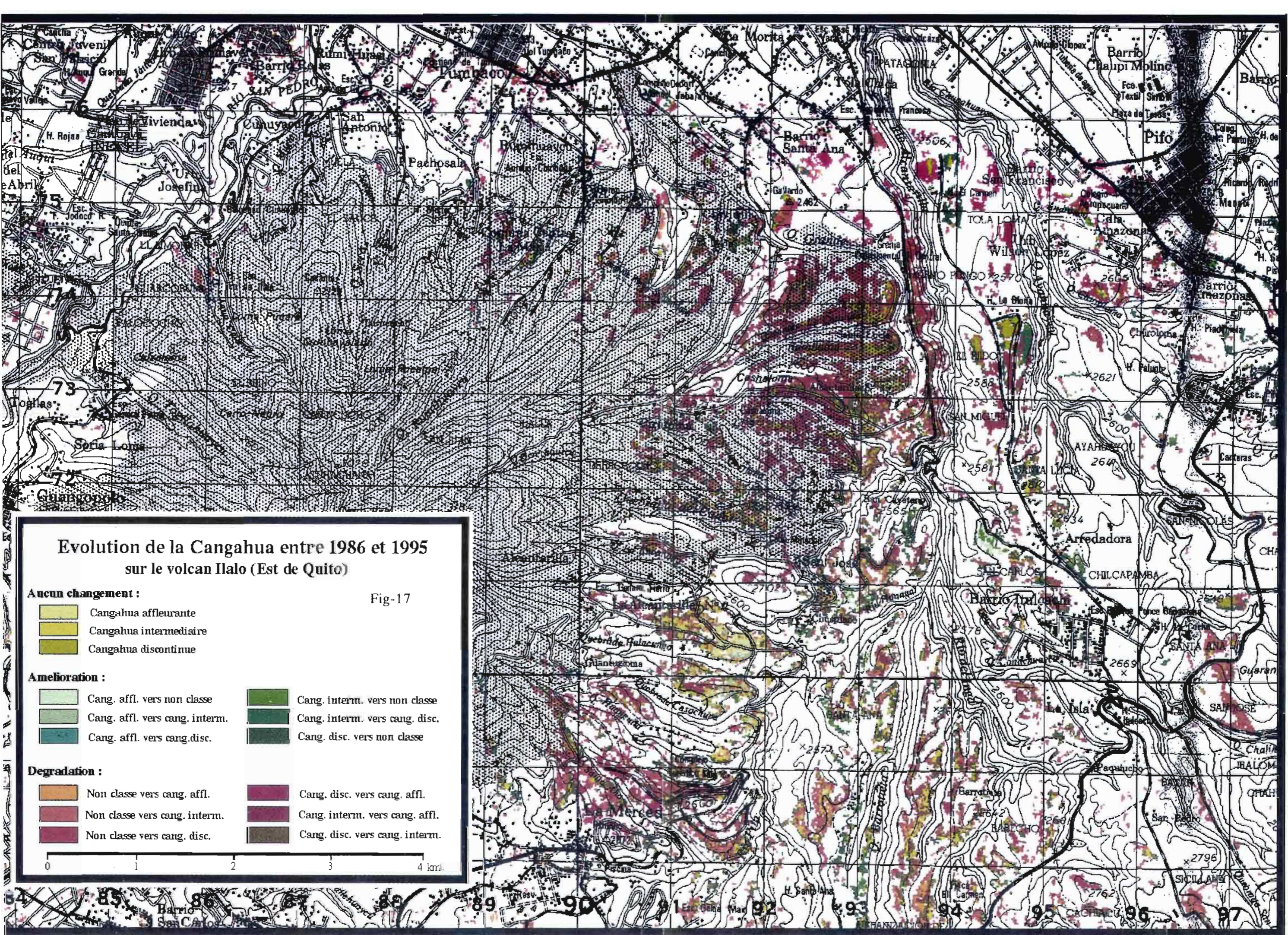
III.4.3.2. Discussion et analyse des résultats

Le document cartographique obtenu par une superposition des résultats de l'étude multi-temporelle à une carte topographique scannée de la zone, ainsi que les résultats chiffrés concernant les superficies érodées nous montrent une érosion intense sur neuf années. Parmi toutes les superficies recensées comme cangahua à différents stades en 1995, les superficies dégradées depuis 1986 correspondent à plus de 75%.

Cependant, ces résultats paraissent bien surprenants même pour une érosion active.

Les différents critères nous permettant d'expliquer le résultat obtenu sont les suivants :

La différence de saison entre les deux prises de vue est un premier critère de remise en cause de ce résultat. Bien que les deux scènes aient été prises pendant la saison humide, il paraît possible que les conditions climatiques plus pluvieuses en novembre 1986 aient eu un effet sur la réponse spectrale des végétaux et des sols. D'où la faible superficie de sols érodés ressortant sur l'image de 1986.



Evolution de la Cangahua entre 1986 et 1995 sur le volcan Ilalo (Est de Quito)

Fig-17

Aucun changement :

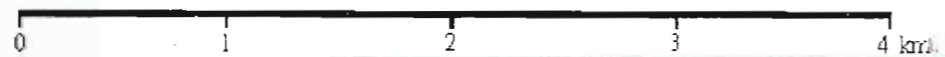
- Cangahua affleurante
- Cangahua intermediaire
- Cangahua discontinue

Amelioration :

- | | |
|---|---|
| Cang. affl. vers non classe | Cang. intern. vers non classe |
| Cang. affl. vers cang. intern. | Cang. intern. vers cang. disc. |
| Cang. affl. vers cang. disc. | Cang. disc. vers non classe |

Degradation :

- | | |
|--|---|
| Non classe vers cang. affl. | Cang. disc. vers cang. affl. |
| Non classe vers cang. intern. | Cang. intern. vers cang. affl. |
| Non classe vers cang. disc. | Cang. disc. vers cang. intern. |



Dans le même esprit il aurait été intéressant d'avoir un bulletin météorologique concernant les jours ayant précédé le passage du satellite aux deux dates. Cela nous aurait permis de vérifier les conditions d'humidité ou de sécheresse du milieu, qui influent sur la réponse spectrale des sols, qui réfléchissent d'autant moins qu'ils sont imbibés d'eau. L'analyse des serpents radiométriques obtenus sur les zones test, nous a fait envisager un résultat imparfait quant à la signature spectrale de la cangahua. Elle forme un léger pic vers le bas dans le vert en 1986 (fig. 9), alors qu'au contraire elle augmente en 1995 (fig. 10), cela étant significatif de différence d'états des sols concernés au deux dates, probablement des différences d'humidité.

Mis à part l'humidité relative on peut noter deux autres critères de remise en cause partielle des résultats.

Tout d'abord le domaine urbain n'a pas été pris en compte lors de ce traitement multi-temporel. Même si l'oeil repère aisément les zones urbanisées à partir de la composition colorée, les traitements pour l'éliminer sont complexes. Nous recherchons actuellement des méthodes plus efficaces que le masque géographique, pour dissocier l'urbain de la cangahua affleurante. Ainsi, les superficies calculées automatiquement sur les classifications englobent tous des pixels de même valeur sans faire de distinction entre les deux thèmes.

Enfin il existe un autre biais non négligeable qui est la dimension des extractions effectuées sur les deux scènes qui sont légèrement différentes. Cela est due à la zone d'étude choisie, qui sur la scène de 1986 se trouve en limite de scène; alors qu'avec la mosaïque de 1995 nous nous sommes permis une extraction débordant légèrement au sud de manière à englober des nouvelles zones connues pour valider les résultats. Cela a également pu entraîner des distorsions sur toute la bordure de la carte.

Les possibilités de remise en cause des résultats énoncées précédemment n'excluent cependant pas que l'évolution va tout à fait dans le sens recherché. De plus, l'ampleur de la dégradation depuis 1986 qui peut *a priori* paraître énorme est tout à fait possible à quelques degrés près. D'après les études effectuées par G. De Noni et M. Viennot de 1981 à 1984 sur des parcelles de ruissellement, les pertes annuelles en sol peuvent être de 400 à 600 tonnes (Cf. tableau ci-après); ce qui rapporté sur 10 ans peut correspondre à une diminution de 6 centimètres de sol en moins. L'érosion dans cette région est donc un phénomène toujours très actif, et sur ce point les résultats concordent bien avec la vérité terrain.

**Pertes en terre sur des parcelles de ruissellement de 50 m² sur le volcan Ilalo
(tonnes/hectares/an), De Noni, Viennot (1994).**

Année	Mollisols sur cangahua (Maïs)	Cangahua (Jachère)
1981-84	631	71
1982	421	58

Pour ce qui est des superficies classées en "amélioration", nous ne nous attendions pas à en avoir autant. Bien sûr il était prévisible en théorie, que la méthode de comparaison des deux dates (par superposition et addition des valeurs) amène également une évolution "positive". Cependant les facteurs d'érosion étant bien plus efficaces que les moyens humains pour y remédier, il semble peu vraisemblable qu'il y ait eu autant de réhabilitation des sols indurés (ameublissement de la cangahua, apport nutritif de complément, ...). Il est donc bien possible ici encore que différents artefacts soient entrés en ligne de compte. Mais on peut difficilement dire lesquels.

Conclusion

L'étude menée pendant ces trois mois de stage a été centrée principalement sur le volcan Ilalo situé à l'Est de Quito. Les résultats en matière de spatialisation de la cangahua et son évolution entre 1986 et 1995 sont tout à fait satisfaisants. L'extension des zones ayant subi une dégradation ou une érosion pendant ces neuf ans peut être corrélée assez bien avec les mesures d'érosion effectuées sur des parcelles de ruissellement. Même si l'ampleur de ce phénomène peut apparaître comme ayant été légèrement surestimée par différents artefacts : la saison et l'humidité, le document résultant semble correct sur la situation des zones érodées à cangahua affleurante et le sens de leur évolution.

Au travers de l'étude multi-temporelle et des tentatives de spatialisation de la cangahua, différents points sont apparus comme devant être traités en parallèle. Il s'agit tout d'abord du contraste entre les versants, qui introduisent des variations dans les réponses spectrales des unités paysagères en fonction de l'éclairement des pentes au moment des enregistrements. Le domaine urbain est également un élément perturbateur des classifications de par sa réponse spectrale très proche de celle de la cangahua. Sur ces deux points particuliers, des recherches méthodologiques sont en cours. La construction d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sur le bassin de Quito à partir des scènes SPOT de 1986 et 1995 (dont la différence d'angle est supérieure à 12°) est prévue pour le courant du mois de Septembre. Ce MNT devrait nous permettre d'améliorer de manière significative les résultats obtenus. Des recherches bibliographiques ont été effectuées ainsi que des tentatives de discrimination du domaine urbain à partir de la texture et non de la radiométrie. Pour l'instant ces essais ne nous ont pas encore donné satisfaction à cause de la complexité des paramètres texturaux, dont les algorithmes de classification sont loin d'être aussi performants que ceux des classifications radiométriques classiques de pixel à pixel.

La démarche pour effectuer la spatialisation de la cangahua étant mise au point, nous allons ultérieurement appliquer ces résultats aux scènes SPOT de 1995 disponibles. Nous tâcherons ainsi d'apporter toutes les améliorations possibles lors des traitements à venir. Il va sans dire que ce genre d'étude demande beaucoup de temps. A terme, il sera nécessaire de confronter les résultats directement sur le terrain, avec l'aide de personnes avisées pour les confirmer avec plus de certitude et éventuellement mieux les affiner. Beaucoup reste donc encore à faire sur le sujet, afin de mieux valoriser les résultats.

ANNEXES

Annexe n°1

Valeurs statistiques des critères radiométriques de classification thématique regroupant les zones test prises sur Ilalo 1986

ZONE numero : 1 - Surface : 64

Eau Libre

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	31	36	32.41	1.13
XS2	20	24	21.61	0.96
XS3	21	36	23.06	2.16

ZONE numero : 2 - Surface : 351

Eucalyptus

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	29	43	34.41	2.71
XS2	18	32	22.45	2.55
XS3	51	79	62.90	4.27

ZONE numero : 3 - Surface : 599

Végétation active

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	3	47	39.11	5.04
XS2	3	33	23.97	3.31
XS3	3	133	95.07	19.51

ZONE numero : 10 - Surface : 155

Cangahua discontinue

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	49	73	58.87	4.16
XS2	41	62	50.42	4.48
XS3	65	81	71.42	3.45

ZONE numero : 15 - Surface : 84

Cangahua affleurante

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	63	87	79.77	5.82
XS2	54	78	70.65	5.63
XS3	70	85	80.45	2.80

Annexe n°2

**Valeurs statistiques des critères radiométriques de classification thématique
regroupant les zones test prises sur Ilalo 1995**

ZONE numero : 1 - Surface : 275

Cangahua affleurante

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	121	185	156.78	11.13
XS2	116	182	145.93	13.57
XS3	108	147	124.00	9.38

ZONE numero : 2 - Surface : 832

Cangahua discontinue

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	95	142	111.41	7.09
XS2	79	136	100.97	8.82
XS3	87	120	102.78	5.35

ZONE numero : 3 - Surface : 243

Vegetation

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	82	105	91.82	3.49
XS2	56	81	70.37	4.14
XS3	117	150	128.85	5.84

ZONE numero : 4 - Surface : 533

Eucalyptus

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	61	84	67.40	4.74
XS2	36	67	42.83	6.36
XS3	76	123	99.48	7.53

ZONE numero : 5 - Surface : 270

Vegetation

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	65	78	72.12	2.97
XS2	36	48	42.03	2.31
XS3	125	221	156.40	16.04

ZONE numero : 6 - Surface : 165

Vegetation

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	79	102	92.17	4.66
XS2	49	73	62.39	4.81
XS3	121	189	157.44	12.53

ZONE numero : 7 - Surface : 54

Eau libre

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	66	74	68.33	1.41
XS2	41	48	42.69	1.30
XS3	29	48	31.50	3.34

Annexe n°3

**Valeurs statistiques des critères radiométriques de classification thématique
regroupant les zones test prises sur Mojanda 1995**

ZONE numero : 2 - Surface : 956

Eucalyptus

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	71	118	86.28	6.92
XS2	53	102	68.78	6.90
XS3	80	107	87.11	4.10

ZONE numero : 3 - Surface : 6814

Vegetation

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	62	101	76.16	6.97
XS2	36	73	53.00	7.56
XS3	80	233	123.13	33.34

ZONE numero : 4 - Surface : 5167

Mollisols

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	79	130	103.36	7.49
XS2	51	121	86.61	9.83
XS3	82	183	108.28	11.03

ZONE numero : 5 - Surface : 1349

Cangahua affleurante

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	96	149	121.58	8.95
XS2	75	134	107.14	9.27
XS3	85	119	99.44	5.42

ZONE numero : 6 - Surface : 1129

Cangahua sub-affleurante

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	114	167	148.20	7.47
XS2	97	152	132.57	7.78
XS3	102	125	110.12	3.49

ZONE numero : 7 - Surface : 2558

Cangahua + sol sableux

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	116	169	140.31	7.39
XS2	98	152	125.57	7.45
XS3	99	118	106.70	2.83

ZONE numero : 8 - Surface : 1982

Cangahua + sables eoliens

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	111	254	140.56	15.35
XS2	92	248	126.30	16.08
XS3	79	176	107.83	8.08

ZONE numero : 9 - Surface : 1341

Cangahua + ponce sableuse en bancs alternes

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype
XS1	133	247	170.41	18.53
XS2	116	228	156.00	18.70
XS3	98	164	121.54	9.88

Annexe n°4

Tableau 1: Caractéristiques des scènes SPOT utilisées

K - J	640 - 350	640 - 349	640 - 350	640 - 351
Date de prise de vue	26/11/1986	08/02/1995	08/02/1995	08/02/1995
Satellite	SPOT 1	SPOT 1	SPOT 1	SPOT 1
Instrument	HRV 1	HRV 1	HRV 1	HRV 1
Mode spectral	XS	XS	XS	XS
Latitude du centre de la scène	S000°00'01"	N000°30'04"	N000°00'00"	S000°30'03"
Longitude du centre de la scène	W078°30'13"	W078°10'06"	W078°16'50"	W078°23'34"
Heure de prise de vue	15 h 48 mn 00 s	15 h38 mn 16 s	15 h38 mn 24 s	15 h38 mn 33 s
Orientation de la scène	008,6°	008,9°	008,9°	008,9°
Angle de prise de vue	+7,6°	-5,56	-5,56	-5,56
Angle d'incidence	L08,7°	R06,3°	R06,3°	R06,3°
Azimut solaire	+140,2°	+121,4°	+120,7°	+119,9°
Élévation solaire	062,7°	058,9°	059,1°	059,3°

Annexe n°5

Tableau 2 : Cartes thématiques sur l'Équateur

Titre	Région	Echelle	Date
Paysages agraires de l'Équateur	Équateur	1:1 000 000	1990
Paysages naturels d'Équateur	Équateur	1:1 000 000	1989
Mapas de suelos	Ibarra	1:200 000	1984
Mapas de suelos	Quito	1:200 000	1978
Mapas de uso actual del suelo y formaciones vegetales	Ibarra	1:200 000	1983
Mapas de uso actual del suelo y formaciones vegetales	Quito	1:200 000	1983
Carte topographique	Cayambe	1:50 000	1989
Carte topographique	El Quinche	1:50 000	1989
Carte topographique	Mojanda	1:50 000	1988
Carte topographique	Quito	1:50 000	1989
Carte topographique	Sangolqui	1:50 000	1989

Bibliographie thématique

Les Andes et l'Équateur : histoire, géographie, géologie, pédologie, climatologie ... et érosion

BONIFAZ E., Los indígenas de altura del Ecuador. Quito, Publitécnica, 260 p.

COLMET-DAAGE F., KIMPE C., DELAUNE M., SIEFFERMAN G., GAUTHEYROU J., GAUTHEYROU M., FUSIL G., KOUKOU M., (1969). "Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendre volcaniques". Cahiers ORSTOM. serie Pédologie , vol. 7, n°4 pp. 495-560.

COQUE R., (1977), Géomorphologie. Edition Armand Colin, Paris, 452 pages.

CUSTODE E., DE NONI G., VIENNOT M., TRUJILLO G., (1992). "La Cangahua en el Ecuador : caracterización morfológica y comportamiento frente a la erosión". In Terra vol. 10, número especial , pp. 332-346.

DALMAYRAC B., LAUBACHER G., MAROCCO R., (1978). Géologie des Andes Péruviennes. Travaux et documents de l'ORSTOM n° 93, 94, 95, ORSTOM, Paris

DAVILA A., MAXIMY R., GODARD H., SOURIS M., SALVADOR LARA J., (1992). Atlas infographique de Quito : socio-dynamique de l'espace et politique urbaine. IPGH; IGM; ORSTOM Quito.

DELAUNAY D., (1989). L'espace d'une transition démographique. ORSTOM, Paris pp. 209-226.

DELER, Jean-Paul, (1980). "Genèse de l'espace équatorien. Essai sur le territoire et la formation de l'Etat National". Thèse doctorat d'Etat, Paris VII.

DE NONI G., "Análisis cualitativo de tres procesos de erosión predominantes en la Sierra volcánica del Ecuador". Geografía Aplicada-Documentos de investigación n°2 pp. 39-53.

DE NONI G., DERRUAU M., (1979). Sur la géomorphologie dans les Andes de l'Equateur. Cahiers ORSTOM, série sciences humaines, vol. XVI, n°3 , pp. 251-259.

DE NONI G., VIENNOT M., TRUJILLO G., (1986). L'érosion et la conservation des sols en Equateur. Cahiers ORSTOM, série Sciences Pédologie, vol. XXII, n°2, pp.235-245.

DE NONI G., VIENNOT M., (1983). Les recherches sur l'érosion par L'ORSTOM, évolution et perspectives: cas de la montagne équatorienne. Les écosystèmes intertropicaux fonctionnement et usages CNRS-ORSTOM, Lyon 13, 14, et 15 janvier .

DE NONI G., NOUVELOT JF., TRUJILLO G., (1986). Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos : las parcelas de Alangasi y Ilalo, CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación n° 6, Quito, pp.35-47.

DE NONI G., TRUJILLO G., (1986). "Quelques réflexions au sujet de l'érosion et de la conservation des sols en Equateur". Colloques et Séminaires -Equateur 1986 vol.1, Quito, du 7 au 12 juillet.

DE NONI B., DE NONI G., FERNANDEZ DE CASTRO M.A., PELTRE P., (1988). "Drainage urbain et accidents climatiques à Quito (Equateur)". ORSTOM Cahiers sciences humaines.

DE NONI G., VIENNOT M., TRUJILLO G., (1989-90). Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Equateur. Cahiers ORSTOM, série Pédologie vol. XXII, n°1-2.

- DE NONI B., DE NONI G., VIENNOT M., (1990). "Le poids de l'histoire sur la morphogénèse agricole des Andes de L'Equateur". Association des Publications de la faculté des lettres et Sciences Humaines de Clermont-Ferrand (France).
- DE NONI G., TRUJILLO G., et VIENNOT M., (1992). Análisis histórico, social y económico de la cangahua en el Ecuador. in Terra vol. 10, numero especial, pp. 503-514.
- DE NONI G., VIENNOT M., (1994). in Bulletin FAO n° 70.
- DERRUAU, (1988). Précis de géomorphologie, Masson 7ème édition, Paris, 533 pages.
- DOLLFUS, O. , (1978). "Les Andes intertropicales : une mosaïque changeante". In Annales ESC.vol 33, Armand Colin, Paris.
- DOSSO M., et RUELLAN A., (1993). Regards sur le sol. Universités francophones, Foucher-Aupelf, 192 pages.
- GONDARD, P., (1975). "Tipos de utilización del suelo de los Andes Ecuatorianos". MAG-ORSTOM- Quito- septembre.
- GONDARD, P., (1978). "Estudio del uso del suelo y paisajes vegetales de los Andes ecuatorianos -ejemplo de geografía aplicada". In 1° simposio nacional de geografía, revista geografía I.G.M. n° 10-mai -pp 89 -100
- GONDARD, P., (1986). "La utilización actual del suelo en los Andes equatorianos". MAG; ORSTOM, Quito.
- GONDARD, P., (1987). Regard : paysages et cartographie- Séminaire méthodologie des recherches pluridisciplinaires sur les sociétés rurales de montagne- Grenoble 17-18 juin 1987.
- GONDARD, P., (1988). Des Cartes, discours pour une méthode : cartographie de l'utilisation actuelle des sols et des paysages végétaux dans les Andes équatoriennes. Etudes et thèses, éditions de l'ORSTOM, Paris.
- GONDARD P., LEON J., SYLVA P.C., et FAUROUX E., (1988). Geografía básica del Ecuador. CEDIG, Quito, 134 p.
- GONZALEZ ARTIEDA A. et RINGLER R., (1992). Características espectrales de la cangahua en el Ecuador. In Terra vol. 10, número especial, pp. 120-130.
- HUMBOLT A., (1853). Kleine Schriften geognostische and physikalische Erinnerungen, Stuttgart und Tübingen
- POURRUT P., (1983). Los climas del Ecuador : fundamentos explicativos. CEDIG, Quito, pg. 7-41.
- RUBIO OBRE G., (1987). Los indios ecuatorianos : evolución histórica y políticas indigenista, Quito, Corporación ed. nacional.
- SERVENAY A., (1994). Rapport de stage : Utilisation des données SPOT à la spatialisation de l'érosion des sols dans les Andes d'Equateur, ORSTOM Montpellier.
- TRUJILLO G., CUSTODE E., DE NONI G., VIENNOT M., ET LOPEZ C., (1994). La réhabilitation agricole de la cangahua en Equateur, in 15ème Congrès Mondial de la Science du Sol, Volume 6b : commission V : Poster sessions, acapulco, Mexico, July 10-16, pp. 243-245.
- VERA R., et LOPEZ R., (1992). Tipología de la cangahua. in Terra vol. 10, número especial, pp. 113-119.

WINCKELL A., et ZEBROWSKI C., (1992). La cangahua en Ecuateur : Le contexte paléogéographique de sa formation. In Terra vol. 10, numéro spécial, pp. 107-112.

Télédétection et cartographie :

AXES F., (1981). Complémentarité SIG-télédétection, Définition d'une méthodologie de classification avec intégration de données exogènes, contribution à la cartographie de l'occupation du sol en Languedoc-Roussillon. Mémoire de DEA. "Sciences de l'Information Géographique" ENSG-Paris VII.

BAYLE O., (1993). Cartographie d'occupation du sol par télédétection avec intégration de données exogènes. Mémoire de DEA Sciences de l'Information Géographique de l'Université de Marne La Vallée.

BLAMONT D., ET MERING C., (1986). Use of remote sensing for vegetation and land use mapping in mountainous area : the case of central Nepal. in Proceedings of the twentieth international symposium on remote sensing of environment, Volume III, 4-10 december, Nairobi, Kenya, pp.1157-1164.

BONN F. et ROCHON F., (1992). Précis de Télédétection, vol. 1: Principes et méthodes. Presse de l'Université du Québec/AUPELF, 485 p.

BYSTRÖM M., (1988). A test of SPOT satellite data for detailed land use planning in Lesotho. Satellite Image Corp., Sweden, UNGI rapport, (68), pp. 29-37.

C.N.E.S., (1991). Guide des utilisateurs des données SPOT.

CHAUME R., COMBEAU A., (1983). Evaluations saisonnières comparées des signatures spectrales de divers milieux pérennes (forêts, prairies, sols nus) à partir de documents Landsat. Initiation - Documentations Techniques N°56, ORSTOM, Paris, 49 pages.

CIHLAR J., (1987). "A methodology for mapping and monitoring cropland soil erosion". Can. J Soil Sci. 67 : 433-444.

COURAULT D. , (1989). Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Analyses spectrales et diachroniques -Sols- Institut national agronomique Paris-Grignon, 239 pages.

DENEGRE, J., (1988). "Thematic mapping from satellite imagery, an international report". Elsevier applied science publishers LTD. , N.Y. U.S.A.

DESSAY N., (1989-1990). Télédétection et cartographie, application thématique. Rapport de stage, Institut Universitaire de Montpellier-Nîmes, département informatique.

DOSSO M., (1990). Mise en relation de l'organisation tridimensionnelle des formations superficielles et de différentes données de télédétection correspondantes. Exemple pris en zone tropicale et en zone tempérée. Thèse de l'Université Paris 7 -UER Sciences Physiques de la terre.

DUBUCQ M., (1986). "Télédétection spatiale et Erosion des sols : étude bibliographique". Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXII, n°2, pg. 247-258.

DUBUCQ M., (1989). Identification et cartographie par télédétection des sols érodés : application au Lauragais Toulousain (Sud-ouest France). Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 247 pages.

ESCADAFAL R., (1989). Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Edition de l'ORSTOM, collection Etudes et Thèses, Paris 317 pages.

FENTON T.E., (1982). Estimating soil erosion by remote sensing techniques, in Remote sensing resource management. Edited by Chris J. Johannsen and James L. Sanders, by the Soil Conservation Society of America. pp. 217-231.

FOIN P., (1987). Télédétection satellitaire. Vol.4 : Cartographie topographique et thématique. ed. Paradigme.

GIRARD M-C., (1995). Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols, un exemple dans la région de Lodève. AFES Etude et gestion des sols, vol.2, N°1, pp. 7-24.

GIRARD, C.M. & M.C., (1975). Applications de la Télédétection à l'étude de la biosphère. Masson, Paris.

GIRARD, C.M. & M.C., (1989). Télédétection appliquée aux zones tempérées et intertropicales. Masson, Paris.

GUILLANDE R., HUAMAN D., MERING C., ET LEGELEY-PADOVANI A., (1995). Méthode de cartographie des coulées de lave par traitement des images SPOT, l'exemple du Sabancaya (Pérou). Photo-interprétation N°1, pp. 3-17.

GUYOT G., (1992). Télédétection satellitaire vol.5 : Signatures spectrales des surfaces naturelles. ed. Paradigme.

GUYOT G., (1993). Initiation à la télédétection, Laboratoire Commun de Télédétection. CEMAGREF ENGREF, support de cours ISTOM du 24 au 28 mai.

JOLY G., (1986). Télédétection satellitaire. Vol 3 : Les fichiers-images. ed. Paradigme.

JOLY G., (1988). Télédétection satellitaire. Vol 2 : Les données-images. ed. Paradigme.

KING C., (1983). "Etude des sols et des formations superficielles par télédétection". Doc. BRGM n° 96 -thèse-174 pg -Orléans.

LAPORTE J.M., (1983) Etude de la texture sur des simulations d'image du satellite de télédétection SPOT. Thèse présenté à l' Université Paris VII.

LUNDÉN B., NORDSTRÖM K., and STRÖMQUIST L., (1990). An evaluation of soil erosion intensity mapping from SPOT satellite imagery by studies of colour air-photos and top-soil content of ¹³⁷Cesium. University Stockholm, dep. physical geography, Sweden, UNGI rapport (74), pp.13-37.

MARION A., (1987). Introduction aux techniques de traitement d'images. Ed. Eyrolles, Paris, 278 pages.

MULDERS M.A., (1987). Remote sensing in soil science. Development in soil science 15. ELSEVIER -Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo- 379 pages.

NAERT B., (1975). Utilisation de techniques de traitement photographique (équidensité, combinaisons chromatiques, maculographie) en télédétection des ressources terrestres. Applications à la cartographie pédologique et aux programmes d'aménagements ruraux. Séminaire de sensibilisation sur la télédétection des ressources terrestres. Tunis 29-30 octobre, Groupe de recherche sur la télédétection de Montpellier S.E.S. N° 267, éditions INRA, 19 pages.

ORSTOM, (1978). Analyse multivariable, Procédure "loterie", Application à l'analyse multispectrale en télédétection. Initiations - Documentation Techniques N°39, ORSTOM Paris, 78 pages.

PAUL S., AIMEDIEU P., CLAISSE M., DESCHAMPS C., DUBAR J., PAULI E., THIREAU M., VIEL C., (1993). Dictionnaire de termes normalisés des sciences et techniques. Journal officiel de la république française, Association Nationale des Docteurs ès Sciences.

PHILIPPEAU G., (1986). "Comment interpréter les résultats d'une Analyse en Composantes Principales ?". Service des études statistiques STAT-ITCF.

PUECH C. ET CARETTE J., (1989). Apport de la télédétection à l'aménagement de petits bassins-versants en Afrique soudano-sahélienne. Rapport CEMAGREF.

RACOTO M., (1992). Guide d'utilisation du logiciel PLANETE.

SALI E. and WOLFSON H., (1992). Texture classification in aerial photographs and satellite data. in International journal of Remote Sensing, vol. 13, N° 18, pp. 3395-3408.

SARRAT D., (1977). Analyse de la texture des images de réflectance terrestre. Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 247 pages.

VAUZELLE, LAIDET, PECCOUD, GAY, CERBELAUD, LEFFE, PROY, MEYER-ROUX, SCANVIC, MEMANTEAU, DONNAY, (1992). Télédétection spatiale-Université d'été Européenne Toulouse 1990, CNES, Cépaduès-éditions.

Liste des figures

Figure 1-a :	L'Equateur	6
Figure 1-b :	Situation de la zone d'étude : Les Andes équatoriennes	6
Figure 2 :	Carte de situation	8
Figure 3 :	Coupe scématique de la cordillère des Andes	8bis
Figure 4 :	Hauteurs pluviométriques inter-annuelles (1963-1978)	12
Figure 5 :	Mosaïque des trois scènes SPOT du 8 février 1995	21
Figure 6 :	Composition colorée sur l'extraction d'Ilalo 1986	24
Figure 7 :	Composition colorée sur l'extraction d'Ilalo 1995	25
Figure 8 :	Composition colorée sur l'extraction de Mojanda 1995	26
Figure 9 :	Composition colorée sur l'extraction d'Ibarra 1995	27
Figure 10 :	Serpents radiométriques à partir de la moyenne plus ou moins l'écart type pour l'extraction d'Ilalo 1986	29
Figure 11 :	Serpents radiométriques à partir de la moyenne plus ou moins l'écart type pour l'extraction d'Ilalo 1995	31
Figure 12 :	Serpents radiométriques à partir de la moyenne plus ou moins l'écart type pour l'extraction de Mojanda 1995	33
Figure 13-a :	Découpage des axes en "boîtes" pour la classification par hypercubes sur Ilalo 1986	35
Figure 13-b :	Découpage des axes en "boîtes" pour la classification par hypercubes sur Ilalo 1995	35
Figure 14 :	Carte des différents états de la cangahua en nov. 1986 sur le volcan Ilalo.	38
Figure 15 :	Carte des différents états de la cangahua en février 1995 sur le volcan Ilalo	39
Figure 16 :	Classification sur Mojanda 1995	40
Figure 17 :	Evolution de la Cangahua entre 1986 et 1995 sur le volcan Ilalo (Est de Quito)	44

Table des matières

Remerciements.....	1
Introduction.....	2
I. Le contexte et les objectifs.....	3
I.1. Les travaux effectués.....	3
I.2. Les objectifs.....	3
I.3. Cadre du stage : l'ORSTOM Montpellier.....	4
I.3.1. Le laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés.....	4
I.3.2. Le laboratoire de télédétection et de traitement d'images, et la Maison de la télédétection.....	5
I.3.2.1. Organismes présents à la Maison de la Télédétection.....	5
I.3.2.2. Activités du laboratoire de télédétection ORSTOM.....	5
I.3.2.3. Moyens techniques.....	5
II. Le cadre d'étude : contexte régional et facteurs conditionnants l'affleurement de la cangahua.....	7
II.1. La géomorphologie.....	7
II.1.1. Le cadre physique.....	7
II.1.1.1. Les cordillères occidentale et orientale :.....	7
II.1.1.2. Le bassin intra-andin.....	8
II.1.2. Formations superficielles, sols, et dynamiques de mise en place dans la Sierra.....	9
II.1.2.1. La cangahua.....	9
II.1.2.2. Les autres formations superficielles.....	10
II.2. Climat.....	11
II.2.1. Facteurs du climat et régime des pluies en Équateur.....	11
II.2.3. Rôle du climat sur l'érosion des sols.....	13
II.3. Occupation du sol et végétation.....	13
II.3.1. Cultures.....	13
II.3.2. Plantations d'Eucalyptus.....	14
II.3.3. Végétation spontanée.....	14
II.4. Le rôle de l'homme dans l'érosion des sols.....	14
II.4.1. Les sociétés andines pré coloniales.....	14
II.4.2. La conquête espagnole.....	15
II.4.3. La réforme agraire.....	15
II.4.4. La mécanisation des cultures.....	16
II.5. Les formes d'érosion rencontrées en Équateur.....	16
III. Utilisation de la télédétection pour la spatialisation de l'érosion.....	18

III.1. Les données utilisées.....	18
III.1.1. Les scènes SPOT.....	18
III.1.2. Cartes.....	18
III.1.3. Relevés GPS.....	19
III.2. Les traitements préalables des données SPOT.....	20
III.2.1. Mosaïque des scènes SPOT de 1995.....	22
III.2.2. Extractions de sites connus.....	22
III.2.2. Compositions colorées des extractions.....	23
III.3. Choix de la méthode de classification des extractions.....	28
III.3.1. Rappel des méthodes testées en 1994.....	28
Fig. 10 : Serpents radiométriques à partir de la moyenne plus ou moins l'écart type pour l'extraction d'Ialo 1986.....	29
III.3.2. Classification par hypercubes.....	30
III.3.2.1. Apprentissage.....	30
III.3.2.2. La classification.....	34
III.3.2.2.1. Découpage des axes en vue de la détermination des classes.....	34
III.3.2.2.2. Affinage des classes.....	34
III.3.3. Résultats et réflexion sur les méthodes de classification.....	36
III.4. Étude multi-temporelle.....	41
III.4.1. Recalage radiométrique.....	41
III.4.2. Recalage géométrique.....	42
III.4.3. L'analyse multi-temporelle.....	43
III.4.3.1. Résultats bruts.....	43
III.4.3.2. Discussion et analyse des résultats.....	43
Conclusion.....	47
Annexes.....	48
Bibliographie thématique.....	54
Liste des figures.....	59