

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES

DIPLOME D'AGRONOMIE APPROFONDIE
MATHEMATIQUES APPLIQUEES
OPTION TRAITEMENT DE L'INFORMATION SPATIALE

ETUDES DE METHODES D'EVALUATION
DE L'ALEA EROSIF :
APPLICTION A LA CARTOGRAPHIE DE
L'ALEA EROSIF
SUR UNE ZONE DU SILLON INTER-ANDIN
(BASSIN DE QUITO-EQUATEUR)



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Organisme d'accueil :
ORSTOM-Montpellier
Laboratoire d'étude du Comportement
des Sols Cultivés

Nicolas SABY

Septembre 1998



Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : A * 15748 Ex :

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier premièrement Mme Régine Chaume, M George De Noni et M. Marc Viennot pour m'avoir accueilli chaleureusement au sein du laboratoire, pour leur encadrement scientifique et leur aide précieuse lors de la phase finale de ce travail.

Je tiens également à remercier M Gérard Douaire et M. Pierre Aourousseau qui m'ont guidé dans toute ma réflexion méthodologique.

Un grand merci s'adresse à l'équipe du laboratoire de Spatialisation Numérique de l'ENSAR pour leurs conseils et leur aide toujours souriante. Pour ne pas les citer : Mme Odile Quidu, M. Hervé Squividand et M. Thierry Bouedo. Hélas, pour eux,...la lutte continue !

Je voudrais remercier enfin l'ensemble des personnes travaillant au Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés pour leur bonne humeur, leur gentillesse et leur disponibilité.

Enfin, j'accorderai une attention toute particulière à M. Didier Blavet (chargé de recherche au LCSC) pour son altruisme. Il s'est impliqué largement dans la phase finale de ce travail et son regard scientifique extérieur a enrichi la réflexion.

Spéciale dédicace à mes colocataires de la rue Bartholdi...

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Chapitre I LES FACTEURS DE L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS : Cas particulier du sillon inter-andin.

- 1°) L'érosion, un phénomène complexe...
- 2°) L'érosion dans le sillon inter-andin (Equateur)

Conclusion du chapitre I

Chapitre II ETUDE DE METHODES COMBINATOIRES DES FACTEURS DE L'ALEA EROSIF

- 1°) Conceptualisation de la notion d'Evaluation d'aléa
- 2°) Utilisation du concept dans la méthode SIRIS (Vaillant et al., 1995)
- 3°) Utilisation du concept dans des méthodes basées sur la logique floue
- 4°) Etude des méthodes sur un cas théorique
- 5°) Récapitulation de la démarche des méthodes basées sur la logique floue

Conclusion du chapitre II

Chapitre III APPLICATION DES METHODES RETENUES : cartographie de l'aléa érosif sur une partie du bassin de Quito

- 1°) La zone d'étude
- 2°) Etapes communes aux deux méthodes
- 3°) Etapes spécifiques à la méthode basée sur la logique floue
- 4°) Résultats – Discussion

Conclusion du chapitre III

CONCLUSIONS GENERALES

BIBLIOGRAPHIE

TABLE DES MATIERES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

ANNEXES

INTRODUCTION

Ce mémoire est le résultat d'un travail effectué en collaboration entre le Laboratoire du Comportement des Sols Cultivés de l'ORSTOM (G. De Noni, R. Chaume et M. Viennot) et les Laboratoires d'Informatique (G. Douaire) et de Spatialisation Numérique (P. Arousseau) de l'ENSAR.

En Equateur, comme dans d'autres pays sud-américains et du Tiers-monde, les programmes de développement économique sont centrés sur l'agriculture et sont confrontés à une problématique de fortes dégradations du patrimoine rural dues à une gestion incertaine des ressources naturelles par l'Homme. Parmi ces dégradations, ce sont les processus d'érosion des sols qui sont surtout incriminés. Ils se manifestent en effet activement sur de larges étendues provoquant, dans certaines zones de l'Equateur, la disparition totale et définitive des horizons superficiels les plus fragiles et fertiles. Il en résulte la stérilisation presque irréversible des sols voués originellement à la culture.

Depuis de nombreuses années, ces phénomènes érosifs font l'objet d'études scientifiques entreprises par le Ministère Equatorien de l'Agriculture et de l'Elevage (MAG) en collaboration avec l'ORSTOM (département "Ressources, Environnement et Développement", Unité de Recherche "Dynamique et usages des milieux terrestres méditerranéens et tropicaux"). Dans une optique de gestion durable des terres pour les générations futures en Equateur, la lutte contre l'érosion et la régénération des sols appauvris font partie des axes de recherche prioritaires développés par l'ORSTOM.

Suite à ces recherches menées sur le terrain pour bien comprendre les mécanismes de la dynamique érosive qui affecte l'Equateur, il a été proposé de générer une carte des risques d'érosion afin de fournir un outil d'aide à la lutte anti-érosive, utile aux responsables du développement économique. En effet, le fait de présenter des résultats clairement lisibles sous forme cartographique permet de localiser des régions où des zones représentatives, de diffuser l'information auprès des populations concernées, d'expliquer les décisions prises et d'aider à une meilleure connaissance du risque d'érosion.

Pour évaluer le risque d'érosion, il convient en premier lieu de rappeler ce qu'on entend par « **risque** ». D'après Brugnot (1998), le risque peut se définir par le croisement entre deux dimensions : **aléa** x **vulnérabilité**. L'**aléa** est le phénomène physique aléatoire, par définition à l'abri ou à l'écart de toute installation ou enjeu humain. Ce dernier aspect se traduit par la **vulnérabilité** qui est le pendant, en termes économiques ou en termes de vies humaines, de l'aléa en question.

Dans notre étude sur l'Equateur, par manque d'information sur les paramètres de la vulnérabilité, il n'est pas possible de mettre en oeuvre complètement cette définition du risque. La réflexion doit donc s'orienter uniquement sur la notion d'aléa qui se rapporte au phénomène physique d'érosion des sols. **Toute la problématique de ce mémoire réside donc dans le choix et la mise en oeuvre d'une méthode d'évaluation de ce qu'on appellera dorénavant: « L'aléa érosif ».**

Pour évaluer cet aléa, on peut utiliser des méthodes d'évaluation qualitatives (basées sur une formalisation de la connaissance des thématiciens) ou des méthodes quantitatives

(basées sur des modèles déterministes ou empiriques). Cependant, ces dernières méthodes exigent la prise en compte d'une quantité importante de paramètres, et la mise en œuvre de procédures de validation lourdes. Pour pallier ces contraintes, nous choisirons, par conséquent, **l'approche qualitative, basée sur la formalisation de la connaissance des thématiciens.**

Toute la réflexion consistera alors à trouver une ou des méthodes adaptées à **l'évaluation qualitative de l'aléa érosif.** De telles méthodes pourront être ensuite intégrées à un système d'information géographique afin de mettre en œuvre une cartographie de l'aléa érosif sur une région de l'Equateur.

Par conséquent, on étudiera en premier lieu le phénomène « érosion » lié à l'aléa pour en définir les facteurs principaux et les hiérarchiser entre eux dans le cas de l'Equateur. La deuxième étape consistera à trouver des méthodes adaptées à l'évaluation qualitative de l'aléa érosif, en fonction des contraintes soulignées dans la première étape.. Enfin, ces méthodes seront appliquées à la cartographie de l'aléa érosif sur une zone de l'Equateur, et seront comparées entre elles.

Chapitre I LES FACTEURS DE L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS : Cas particulier du sillon inter-andin.

Ce chapitre a pour but d'expliquer les facteurs de l'érosion afin de comprendre la démarche utilisée pour la cartographie de l'aléa de l'érosion hydrique des sols cultivés. (3^e chapitre).

Puis, les problèmes spécifiques de l'Équateur où est appliquée cette démarche seront particulièrement abordés.

1^o) L'érosion, un phénomène complexe...

1.1.) La notion d'Erosion

1.1.1.) Définitions-généralités

L'origine étymologique du terme érosion est « ERODERE » qui signifie « ronger ». Il convient de distinguer le phénomène naturel qu'on peut nommer « **érosion géologique** » et le phénomène accéléré par l'homme appelé « **érosion des sols cultivés** ». En effet, cette dernière est aujourd'hui 10 à 1000 fois plus rapide que le processus naturel. Il suffit d'une perte en terre de 12 à 15 t/ha/an, soit 1 mm/an ou 1 m/1000 ans pour dépasser la vitesse de l'altération des roches et former un sol (20 à 100 000 ans pour altérer 1 m de granit en conditions tropicales humides selon Leneuf, 1959). S'agissant de sols cultivés, l'action de l'érosion affecte la durabilité des terres agricoles et notamment le maintien de la fertilité des sols.

Dans notre étude, il sera question uniquement d'érosion due au **ruissellement des eaux** de pluies dans le cadre d'une agriculture de montagnes tropicales (De Noni *et al.*, 1997).

1.1.2.) Principe

L'érosion hydrique se divise en trois étapes : **détachement**, **transport** puis **sédimentation**.

A mesure que les gouttes de pluies détachent les particules de sol et que ce dernier se ferme, le ruissellement se développe, et à son tour transporte et arrache les particules. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace. On distingue ainsi : l'**érosion en nappe** ou érosion diffuse et l'**érosion linéaire** ou en rigoles.

Dans les deux cas, les particules emportées peuvent se sédimer lorsque la vitesse du ruissellement diminue.

1.2.) L'érosion en nappe

1.2.1.) Le processus : une érosion discrète mais active.

L'érosion en nappe est due à l'énergie des pluies (battance) sur les sols dénudés (Ellison, 1944). L'énergie de la goutte de pluie détache et disperse les particules **fines** du sol (splash¹). En d'autres termes, cette énergie détruit la structure du sol, puis projette les particules fines de terre dans toutes les directions, à des distances comprises entre quelques millimètres et plusieurs dizaines de centimètres (De Ploey, Savat, 1968). Elle entraîne une dégradation sur l'ensemble de la surface. De ce fait, elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'une érosion importante de 15 à 30 tonnes/ha/an correspond à une hauteur de 1 à 2 mm. Bien que peu visible à l'échelle de l'année, dans un contexte adapté, elle peut entraîner un décapage de la majorité de l'horizon humifère en quelques dizaines d'années.

Le splash a comme conséquence directe la formation d'une croûte de battance. En effet, les particules projetées par la goutte de pluie viennent boucher les interstices du sol et ferme ainsi la surface à l'infiltration, parallèlement la taille des agrégats se réduit. Si la pluie continue, se forment d'abord des flaques qui peuvent par la suite déborder donnant ainsi naissance au ruissellement en nappe. Sa faible vitesse l'empêche d'inciser le sol.

L'érosion en nappe se manifeste sous différents aspects. Le signe le plus connu est la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés des champs (haut de collines, et rupture de pentes). Le deuxième signe est la remontée des cailloux en surface par départ des particules les plus fines (argile et horizon humifère) traduisant l'action sélective de l'érosion. Les cailloux sont trop lourds pour être emportés et s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1973 ; Poesen, 1988). Localement, les zones d'accumulation des cailloux évolue vers des formes de micro-demoiselles coiffées, petits piédestals de terre surmontés d'un caillou.

Les conséquences de l'érosion en nappe sont donc :

1. La squelettisation des horizons superficiels (érosion sélective)
2. Le décapage de l'horizon humifère

1.2.2.) Facteurs principaux

Du processus présenté ci-dessus, on peut définir d'abord deux types de facteurs impliqués dans l'érosion en nappe : les facteurs en relation avec l'énergie de la goutte d'eau qui tombe (érosivité des pluies) et ceux en relation avec la résistance du sol (érodibilité du sol).

L'érosivité est caractérisée par *l'intensité* des pluies qui est définie par la relation hauteur de pluie sur un pas de temps (mm/h). Conventionnellement, le pas de temps utilisé est de 30 minutes et on recherche l'intensité maximale pour cette durée. On peut dire, par soucis de simplification, que l'intensité traduit l'énergie des pluies tombant sur le sol à l'origine de la fonte des agrégats et de la fermeture du sol. En général à un type de climat correspond un type d'agressivité des pluies nécessaire pour définir l'érosivité de celle-ci.

¹ Selon Terry (1998), le splash (rainsplash) peut se définir comme le délogement et la dispersion des particules à la surface du sol par l'impact de la goutte de pluie.

L'érodibilité traduit le comportement du sol et de ses propriétés physico-chimiques et biologiques à l'impact des gouttes de pluie. La résistance de celles-ci peut s'exprimer par la stabilité structurale qui dépend de la matière organique, de la texture, du taux de cailloux...D'après Neboit (1991), la texture détermine dans une mesure considérable la tenue du sol sous la pluie (par exemple, on qualifie les sols limoneux de sols battants) et c'est pourquoi on retiendra surtout le facteur « *sensibilité à la battance* » pour l'érodibilité du sol.

Le sol lorsqu'il est pourvu d'une bonne protection végétale est moins érodible (Auzet, 1987). En effet, la couverture végétale forme un écran protecteur arrêtant la goutte de pluie avant son impact au sol. Le facteur *occupation du sol* (densité, continuité dans le temps et l'espace,...) est donc important pour la détermination de la présence potentielle de protection du sol.

Il faut ajouter enfin les facteurs topographiques qui conditionnent le ruissellement (inclinaison, rupture de pente, longueur de pente). Pourtant, l'érosion en nappe peut avoir des conséquences graves sur des versants de pente inférieure à 2 % ce qui tend à prouver que l'action de la pluie suffit (Fauck, 1956).

Cependant, on retiendra aussi l'effet de la **combinaison** de la pluie et du ruissellement (Neboit, 1991). C. Morgan (1986) a montré que l'effet du ruissellement sous pluie est supérieur à la somme des effets érosifs de chacune de ses deux composantes séparées : splash et ruissellement. Ainsi, l'évaluation d'un phénomène tel que l'érosion doit non seulement tenir compte de l'influence de chaque facteur impliqué mais aussi de la conjonction de ceux-ci (interaction des facteurs).

1.3.) L'érosion linéaire

1.3.1.) Le processus : une érosion remarquée

Lorsque le ruissellement atteint une certaine vitesse, estimée à 25 cm par seconde d'après Hjulström (1935), l'eau acquiert une énergie capable d'inciser le sol : on passe alors de l'érosion en nappe à l'érosion linéaire. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses : non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais aussi des graviers ou des cailloux et des blocs.

L'érosion linéaire se caractérise donc, et se différencie de l'érosion en nappe, par le développement des formes linéaires qu'on distingue selon leur taille : griffes, rigoles, ravines.

1.3.2.) Facteurs du ruissellement

Le volume et la vitesse de l'eau ruisselée sont des paramètres qui conditionnent fortement la dynamique de l'érosion linéaire.

a) Facteurs intervenant sur le volume d'eau ruisselée

La pluie est le premier facteur à considérer. Elle a une action directe sur le volume d'eau ruisselée, soit par sa hauteur en provoquant la saturation du sol soit par son intensité en 30 mn (Wischmeier et Smith, 1960 ; Roose, 1973 ; De Noni *et al.*, 1988) en favorisant la fermeture du sol et la formation de croûtes.

L'humidité initiale du sol est aussi un facteur aggravant. Ainsi, sur un sol limoneux humide par exemple, la dégradation superficielle est plus rapide que sur un sol sec (Bolline, 1982).

Un facteur simple mis en évidence par Stocking (1978) est la surface du bassin versant drainé par le même chenal.

De même, le facteur **longueur de pente** intervient sur le volume ruisselé. Si théoriquement, ce volume reste constant en pourcentage le long de la pente, il apparaît dans de nombreux cas, lorsque les sols sont dénudés, que le coefficient de ruissellement diminue lorsque la longueur de pente augmente. Ceci s'explique par l'hétérogénéité de surface qui augmente avec sa longueur. Il en résulte un piégeage du ruissellement le long du versant (Roose, 1973 ; Valentin, 1978 ; De Noni *et al.*, 1997).

Enfin, les caractéristiques des formations superficielles sont aussi importantes que la nature de la roche en place. La perméabilité intervient en premier (roche poreuse ou non) puis la granulométrie mais les opinions sur le rôle de cette dernière divergent (Neboit, 1991). D'après Mosimann (1991), aux sols moins profonds correspond une diminution de la capacité de rétention et donc augmentation du volume ruisselé. Par contre, la rugosité de la surface du sol influence surtout la pluie d'imbibition². Cette influence diminue lorsque la pente augmente, le volume stocké dans les flaques diminuant sur les pentes fortes.

Les techniques culturales peuvent augmenter de façon considérable l'infiltration. A Pouni (Burkina Faso), il a été effectué une comparaison entre l'infiltration sur un sol nu non travaillé, et celle sur les mêmes sols piochés avec résidus de culture ou en billonnage cloisonné. L'infiltration d'une pluie de 120 mm passe de 35 à 104 mm (Roose, 1994).

La mésofaune³ influence également l'infiltration d'une façon importante. Un pore de 2 mm débitera 32 fois plus qu'un pore de 1 mm. Or, les pores laissés par un vers de terre dépassent 4 mm.

b) Facteurs intervenant sur la vitesse de l'eau

D'après De Ploey et Savat (1982), l'inclinaison de la pente serait le facteur déterminant de la formation de rigoles. Par delà d'inévitables différences d'appréciations, les mesures de nombreux auteurs convergent pour reconnaître le **rôle primordial de la pente** et l'existence de valeurs critiques. Ces valeurs pourraient correspondre à celle pour lesquelles la vitesse critique de cisaillement définie par Hujström est atteinte (Neboit, 1991).

La position de la parcelle dans la topographie peut aussi avoir un rôle majeur par l'action conjuguée du ruissellement et de la résurgence des eaux de drainage au pied du versant (Heutsch, 1970).

Enfin, la quantité d'eau ruisselée dépend de la conjonction entre la hauteur de pluie tombée et son intensité.

² Hauteur d'eau capable d'être retenue avant que démarre le ruissellement.

³ Vers de terre, fourmis,...

c) Autres facteurs

L'influence du couvert végétal sur l'érosion linéaire est multiple. La végétation protège contre la battance des pluies, donc maintient l'ouverture du sol et réduit le volume ruisselé. Sa litière entretient la mésofaune (laquelle creuse la macroporosité) et absorbe une grande quantité d'énergie du ruissellement. Enfin, la rugosité du sol dépend de la densité de la végétation présente. C'est ainsi qu'une couverture végétale est très efficace pour protéger le sol contre le ruissellement et favoriser l'infiltration. Du fait de sa consommation en eau, la végétation peut drainer et assécher le sol. Cependant, l'implantation d'une culture nécessite dans un premier temps une période où le sol est nu et où sa rugosité est faible (Auzet, 1987)

L'érosion hydrique est donc un phénomène relativement complexe . En effet, il existe deux dynamiques principales (érosion en nappe et érosion linéaire) découlant de différents facteurs aux multiples interactions. Cependant, on peut proposer un regroupement de ces facteurs (King *et al.*, 1992) : en quatre grands domaines :

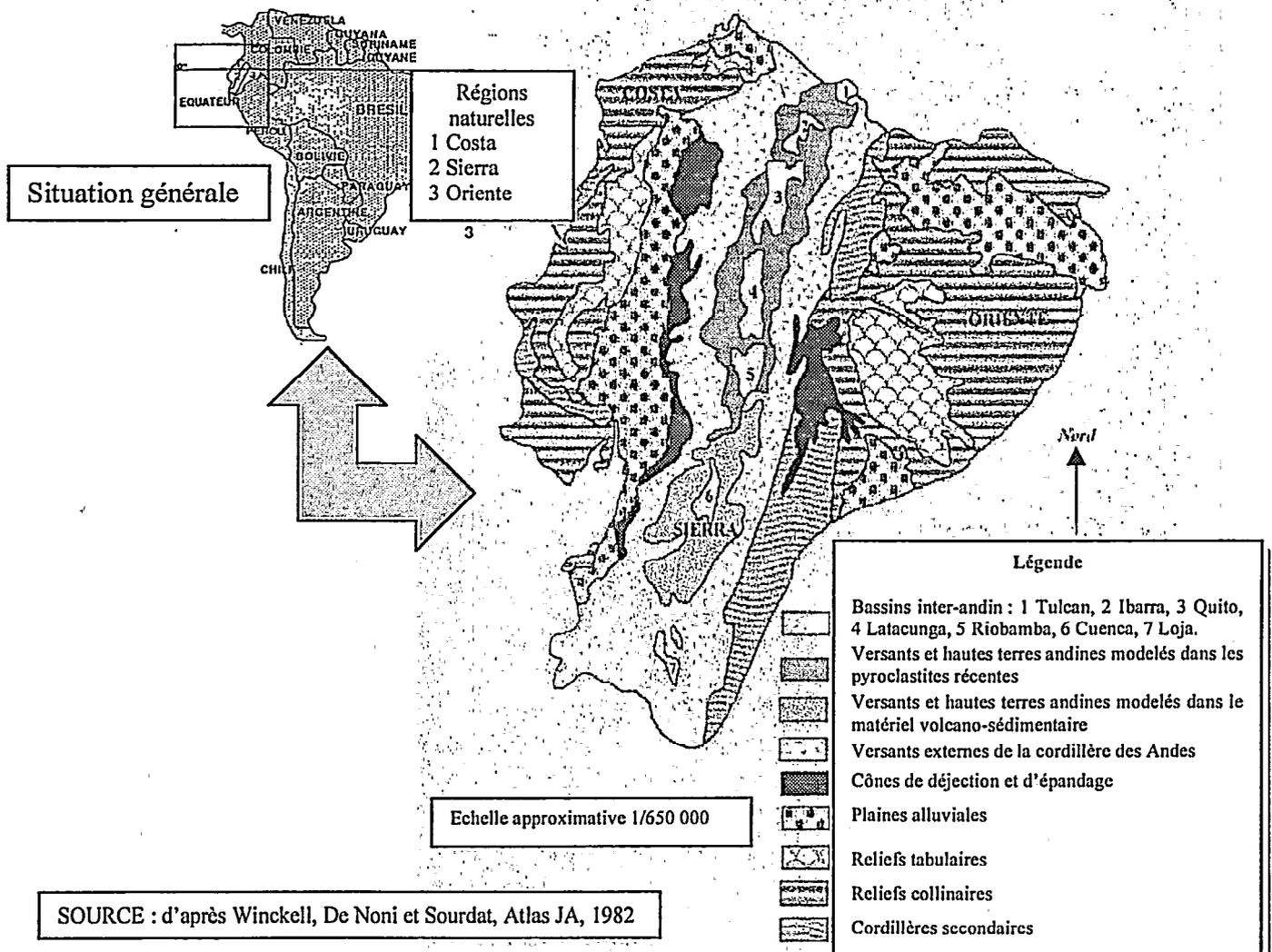
- le sol,
- l'occupation du sol,
- la topographie,
- et le climat.

Dans la suite, on utilisera ces grands domaines afin de comprendre le sillon inter-andin de l'Equateur, de déterminer la dynamique principale et de définir les aléas correspondants.

2°) L'érosion dans le sillon inter-andin (Equateur)

2.1.) Situation générale du pays et de l'érosion

L'Equateur est un pays d'Amérique du Sud d'environ 270 600 km² bordant l'Océan Pacifique entre 1,5° Nord et 6° Sud. Il est limité au Sud et à l'Est par la frontière (contestée) avec le Pérou ; la Colombie limite la partie Nord du territoire.



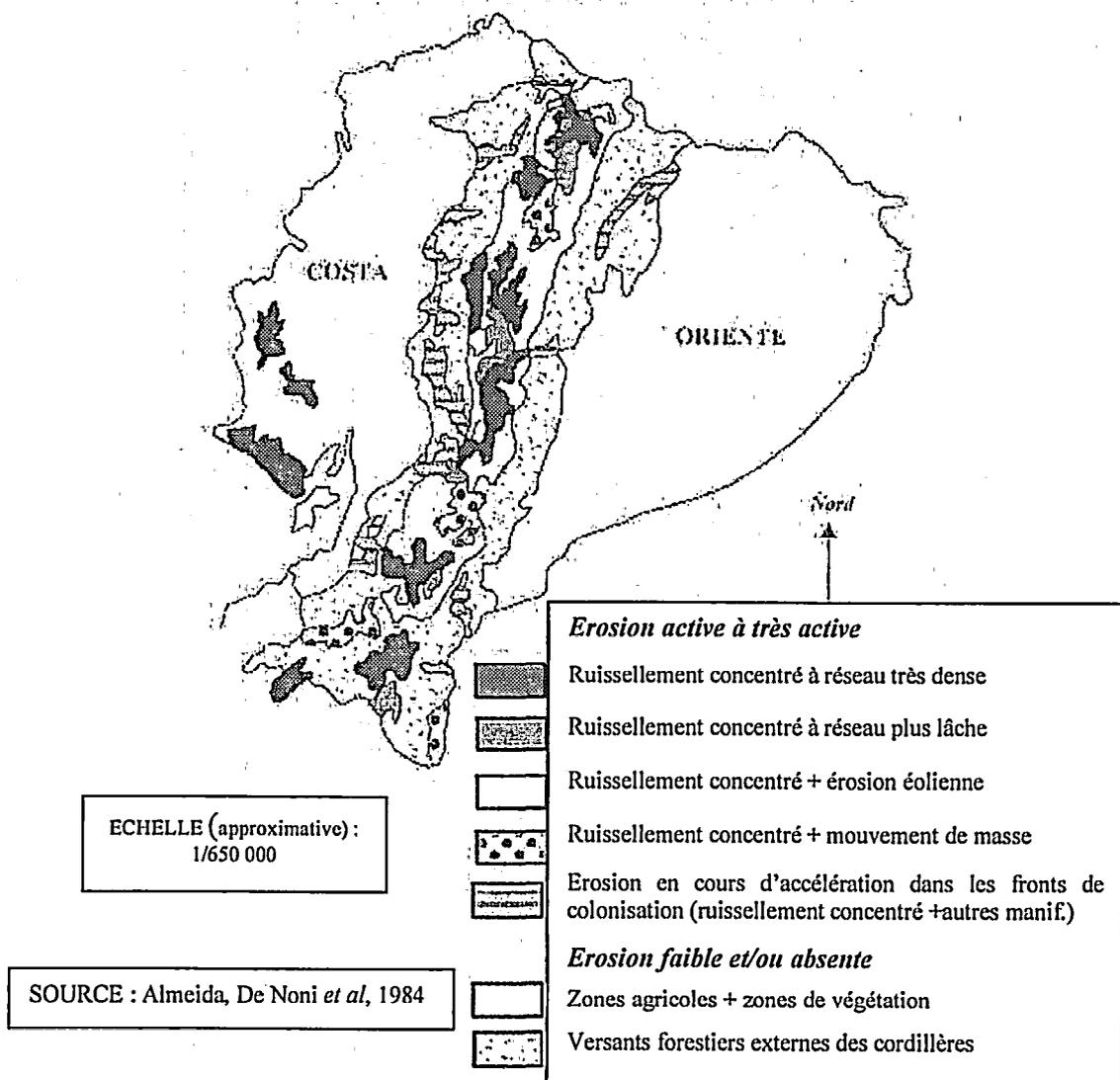
carte 1: Situation générale et principaux ensembles topographiques de l'Equateur

Comme on peut le constater à la lecture des cartes ci-dessus, ce pays bénéficie d'une position géographique très particulière, à la croisée de la ligne de l'équateur et de la chaîne des Andes. Les paysages équatoriens, particulièrement variés et contrastés, se répartissent schématiquement en trois grandes unités :

1. Zone amazonienne de forêts denses à l'est, dite Oriente ;
2. Zone de haute montagne dans la partie médiane du territoire, dite Sierra ;
3. Zone côtière pacifique à l'Ouest, dite Costa.

Le sillon inter-andin, bassin d'altitude des Andes équatoriennes, appartient à la seconde grande unité décrite. C'est une des régions où les dégradations des milieux, et notamment des sols qui nous intéressent plus particulièrement, sont les plus intenses. On y rencontre les zones où l'érosion des sols cultivés est la plus forte (De Noni *et al.*, 1997).

Selon De Noni et Viennot (comm. pers.), l'érosion concentrée, soit dominante soit associée, est le type de dynamique prédominante. La carte 2 synthétise ce constat. Les valeurs en moyenne fortes des pentes dans le sillon inter-andin favorisent la concentration du ruissellement sur des surfaces souvent défrichées. Les autres formes d'érosion sont présentes mais **mêlées spatialement ou temporellement** à l'érosion concentrée dominante



carte 2: Carte des principales manifestation de l'érosion en Equateur

2.2.) Les principaux facteurs de l'érosion dans le sillon inter-andin

2.2.1.) Une topographie contrastée

D'une largeur de 30 à 40 km environ, le sillon divise la Sierra en deux cordillères (les cordillères « orientale » et « occidentale ») dont les pentes, bien qu'irrégulières, sont globalement fortement inclinées (de 10 à 50 %). le sillon est formé d'une enfilade de bassins d'effondrement (voir carte 1) et parsemé de volcans comme Ilalo (3078 m), qui est situé à proximité de Quito, la capitale. Globalement, ce sillon peut se scinder en 3 sous-zones :

1. La première, relativement basse et plane, située vers 2400 m d'altitude, présente des pentes de 0 à 20 % d'inclinaison ;
2. La seconde est située entre 2400 et 3200 m d'altitude. Il s'y succède altitudinalement une partie plane striée par un réseau de « quebradas⁴ » très profondes (pentes jusqu'à 100 %) et une partie plus pentue au contact de la zone montagneuse ;
3. Les hautes terres andines commencent plus haut, à partir de 3200 m ; les pentes sont fortement inclinées (entre 40 et 70 %) et les interfluves, modelés par l'érosion glaciaire, montrent des versants moins raides : 20 à 40 % d'inclinaison en moyenne.

Le sillon est donc caractérisé par des pentes en moyenne fortes et localement très fortes (voir carte des pentes en annexe). Or, d'après De Noni *et al* (1997), il existe une très bonne corrélation entre perte en terre due à l'érosion linéaire et l'inclinaison de la pente. Parmi les facteurs topographiques, on peut souligner le rôle **primordial** de l'inclinaison de la pente dans l'accélération de l'érosion linéaire.

2.2.2.) un climat équatorial de montagne

Ce sont les conditions climatiques de la Sierra qui participent en partie à l'érosion constatée. Elles pèsent sur les équilibres morphodynamiques et expliquent en partie la morphologie andine brièvement décrite précédemment. La lecture de la carte 1 laisse supposer une certaine diversité climatique en Equateur liée à la présence des cordillères des Andes et des fronts océaniques pacifique et atlantique, et à sa situation équatoriale.

Les grands traits du régime pluviométrique du bassin sont quantifiables, cependant c'est une mosaïque de micro-climats qui compose le climat local de la Sierra équatorienne. Ils résultent des effets combinés des conditions locales particulières tels l'altitude, la pente, l'exposition aux vents, les effets de foehn... et des facteurs climatiques régionaux liés à l'organisation équatoriale des climats : il y a superposition de climats régionaux et locaux.

D'une manière générale, la circulation des masses atmosphériques autour du globe résulte des mouvements alternés de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT). Il en résulte une alternance saisonnière des circulations de masses d'air à l'origine des saisons sèches et humides. En conditions climatiques normales, on considère schématiquement que la saison des pluies dure 9 mois de l'année entre mi septembre et fin mai avec une atténuation des pluies en décembre et janvier. La saison sèche, d'une durée approximative de 3 mois, s'étale entre fin mai et début septembre.

⁴ Une quebrada est un terme locale pour définir une entaille encaissée, de grande profondeur et en U ou V. On peut le traduire par ravin ou canyon.

Les influences océaniques et surtout celles des Andes corrigent sensiblement ce modèle général et conduisent, pour la Sierra, à l'identification de sous-régimes pluviométriques spécifiques.

Les cordillères andines et leurs reliefs très élevés sont de véritables barrières naturelles qui influencent le déplacement des masses d'air locales ou régionales. Le relief fait obstacle à la circulation atmosphérique entre le Pacifique et l'Amazonie et agit sur la vitesse et la trajectoire des vents par effet thermique. Il favorise les mouvements verticaux par effet dynamique. Le corridor inter-andin présente une gamme de micro-climats née du caractère orographique des pluies :

Dans la montagne andine, les intensités maximales en 30 minutes sont faibles à moyennes dans l'ensemble. Elles sont comprises entre 20 et 50 mm/h durant 30 minutes (De Noni et al., 1988). Dès que l'on monte en altitude, les intensités maximales en 30 minutes **baissent** tandis que les totaux des pluies **augmentent**. En résumé, on retiendra que **l'érosivité des pluies diminue avec l'altitude**

2.2.3.) Les sols

Selon les études ORSTOM et MAG (Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage de L'Équateur) (Colmet Daage, 1979 et 1980) menées sur la région, les sols sont récents et formés sur matériel pyroclastique (cendres, ponces...). L'âge des dépôts et les caractéristiques du climat sont les principaux facteurs déterminant la répartition spatiale des sols.

Au dessus de 3600-3800 m d'altitudes, on trouve des andosols désaturés, très humifères (> 10%) et hydratés (contenant plus de 50 % de leur poids en eau à pF3). L'altération d'un matériau volcanique pyroclastique (cendre, lappili,...) conduit à la formation d'allophane (silicate d'alumine amorphe) qui forme des complexes stables avec la matière organique.

Entre 3200 et 3600 m, il se forme des mollisols sur matériau d'altération riche en halloysite ayant perdu leurs caractères andiques. Ils sont saturés ou proches de la saturation, encore humifères (5 à 10 %), riches en limons.

Entre 2800 et 3200 m, il se forme des mollisols argileux humifères (3 à 6 %). Ils sont saturés.

Dans le fond du bassin, entre 2500 et 2800 m, on trouve de mollisols peu épais souvent sur matériau induré volcanique. Ils sont saturés et parfois recalifiés. Très cultivés, ils sont peu humifères. Soumis à l'érosion, ils perdent leurs horizons humifères supérieurs, le matériau induré ("*cangahua*") affleure de façon plus ou moins continue. Sur le plan agronomique, la fertilité de ce matériau induré est nulle.

En résumé, **la résistance des sols du sillon à l'érosion** est très liée à la teneur en allophane, elle-même régit par l'altitude. A l'opposée, en absence d'allophane, les sols les moins résistants à l'érosion sont ceux qui présente une forte teneur en limons.

2.2.4.) Végétation naturelle et agriculture

Dans les Andes équatoriennes comme dans les autres massifs montagneux, les types de végétation comme les types de cultures s'étagent le long des versants suivant une répartition altitudinale calquée sur celle des pluies.

Si l'on progresse des basses altitudes du bassin vers les hauts sommets, on observe l'organisation suivante:

- les zones inférieures à 2 400 mètres d'altitude sont couvertes par des formations végétales discontinues arborées et arbustives avec cactus. Ces couverts végétaux sont associés, grâce à une irrigation importante, à la culture de canne à sucre et à une production maraîchère et fruitière.
- entre 2 400 et 3 200 mètres, ce sont les cultures qui dominent les paysages, avec une prévalance du maïs et des pâturages naturels et artificiels.

Ces deux étages concentrent les affleurements de cangahua, que l'on rencontre sur parcelles cultivées en mélange avec des reliquats de sols ou totalement indurée sur parcelles abandonnées : ce sont les cangahuas affleurantes et discontinues. Les étages supérieurs décrits brièvement ci-après ne présentent pas d'affleurement de cangahua.

- à partir de 3 600 mètres s'étend le "matorral" ou "chaparral", qui couvre des topographies abruptes. Ce sont des strates arbustives et arborées fermées. Le gel y est présent de juin à août. Ces terres sont en constante mutation du fait de l'extension des activités agricoles depuis une vingtaine d'années. On y cultive la pomme de terre, les fèves et l'orge au dépens des formations naturelles qui sont défrichées.
- à partir de 3 800 mètres et jusqu'à 4 400 mètres, la végétation naturelle évolue vers une strate herbacée d'altitude, le "paramo". L'ichu, herbacée locale, y prédomine en régime pluviométrique plus restreint. Lorsque les pluies sont localement plus intenses, l'ichu laisse la place à la garpeta, herbe rampante à feuilles étoilées. Ces formations sont elles aussi menacées par l'avancée des terres agricoles. La limite des cultures se situe vers 3 900 mètres d'altitude.
- au delà de 4 400 mètres la végétation disparaît.

Notons la présence de l'eucalyptus, qui pousse spontanément ou est cultivé pour la rapidité de sa croissance. Ces arbres, élevés en pépinières avant d'être replantés, s'adaptent bien à tous types de sols, y compris les plus érodés (ceux où affleure la cangahua). Les zones érodées, inaptées à l'agriculture, restent donc exploitables. Mais les plantations sur ces terrains dégradés ne retiennent guère les matériaux et tamponnent à peine les effets de l'érosion hydrique (De Noni *et al.*, 1997).

De manière générale, la mise en culture des terres aux dépens des formations végétales naturelles déséquilibre les conditions naturelles de stabilité des sols, de telle sorte que les actions anthropiques sont l'un des facteurs principaux de l'érosion dans le sillon inter-andin. Les activités humaines modèlent l'occupation des sols en détruisant la protection naturelle contre l'érosion que constituent les couverts végétaux arborés, arbustifs et herbacés. Elles

accélèrent les dynamiques érosives régressives le long des versants du bassin dans des proportions alarmantes, révélant la *cangahua* au fur et à mesure que progresse le défrichement. (De Noni *et al.*, 1997)

Sans intervention de l'Homme, le milieu inter-andin est relativement stable d'un point de vue morphodynamique : La morphogénèse est dite « admissible » (De Noni G. *et al.*, 1990), c'est à dire qu'il existe un certain équilibre entre celle-ci et la pédogénèse.

L'occupation humaine, très développée dans cette région, date de l'époque précolombienne et peut s'expliquer en partie par le haut potentiel agronomique des terres volcaniques à pyroclastites rencontrées. Depuis la conquête espagnole les activités humaines jouent un rôle considérable dans l'évolution morphodynamique du bassin, déstabilisant les équilibres physiques naturels. L'histoire est donc un recours indispensable pour analyser les grandes étapes de la morphogénèse agricole ayant conduit à l'apparition des vastes zones érodées du corridor inter-andin (De Noni B., De Noni G., Viennot M, 1990).

Dès que le sol est **mis à nu** par l'action de l'homme, son comportement physico-chimique (érodibilité) est modifié et les risques d'érosion sont augmentés, parfois de façon très accélérés si aucune mesure de protection n'est prise.

Conclusion du chapitre I

L'érosion linéaire en Equateur est donc un phénomène très actif. Ses principales causes peuvent se résumer par le schéma 1.

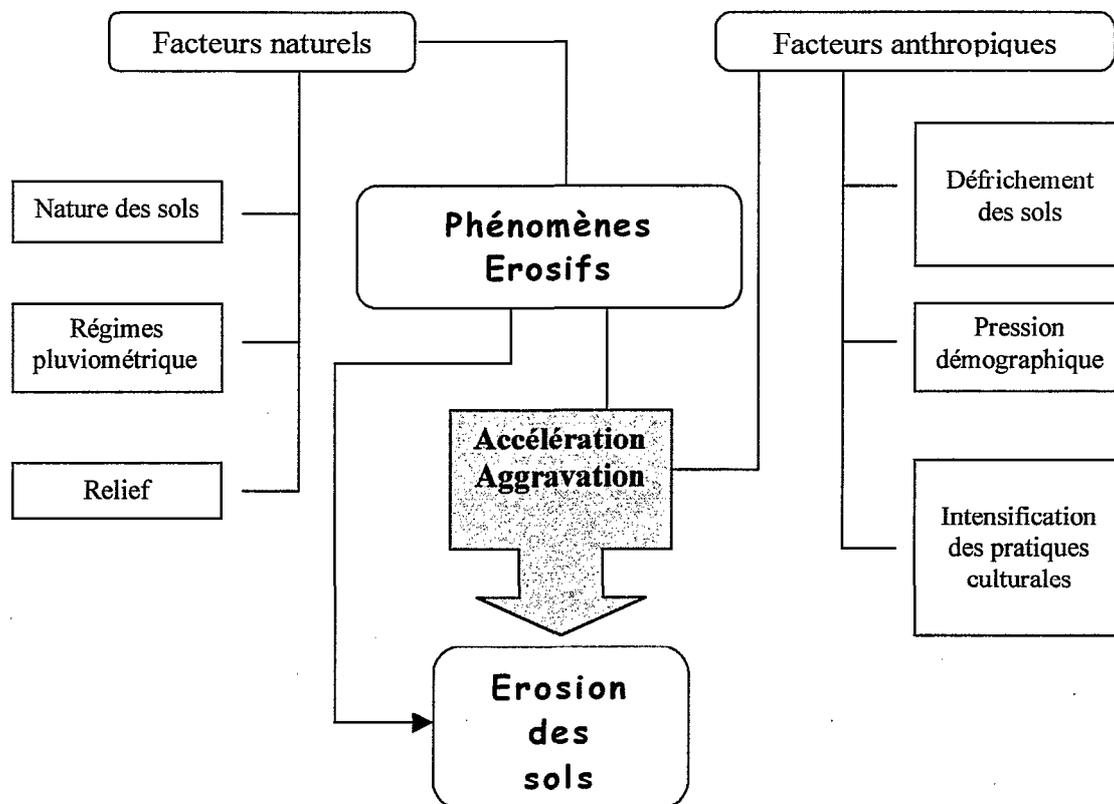


schéma 1 : Synthèse des conditions de mises en place des processus d'érosion

Dans le cas de la situation particulière de l'Equateur, on retrouve les 4 grands types déjà soulignés en conclusion du 1^{er} paragraphe. En outre, les informations fournies par les thématiciens ont permis de classer ces facteurs selon l'ordre suivant :

- i) le facteur « inclinaison de la pente » (topographique) ;
- ii) le facteur « présence de couverture végétale » (occupation du sol) ;
- iii) le facteur « stabilité structurale du sol » (sol) ;
- iv) le facteur « agressivité des pluies » (climat).

Ce classement a constitué une étape essentielle pour poursuivre la méthode et tester les différents modèles d'évaluation d'aléa.

Chapitre II ETUDE DE METHODES COMBINATOIRES DES FACTEURS DE L'ALEA EROSIF

Ce chapitre a pour objet la détermination d'une méthode d'évaluation de l'aléa érosif. Il ne s'agit pas de quantifier l'érosion par un modèle de perte en terre basé sur des lois physiques mais bien d'évaluer cet aléa à partir des connaissances actuelles du phénomène grâce à un modèle probabiliste intégrant les facteurs identifiés dans le chapitre I. Pour évaluer cet aléa, il existe de nombreuses méthodes d'évaluation que l'on peut classer en plusieurs familles :

- Les arbres de décision qui décrivent toutes les situations possibles et les expertises des thématiciens associées à ces situations;
- Les méthodes par pondération qui se subdivisent en 3 familles :
 - Les méthodes additives : la note finale est la somme des notes attribuées aux différents facteurs pris en compte;
 - Les méthodes multiplicatives : la note finale est le produit des notes attribuées aux différents facteurs pris en compte;
 - Les méthodes combinatoires : c'est une combinaison des deux précédentes.
- Les méthodes de rang : l'évaluation finale est un classement des situations sur une échelle croissante ou décroissante de gravité du phénomène.

L'inconvénient des arbres de décision tient dans sa nécessité d'avoir un avis d'expert pour chaque situation décrite, ce qui ne pose pas de problème lorsque le nombre de facteurs est faible. Mais, dès que le nombre de facteurs augmente – et c'est le cas lorsque le phénomène en rapport avec l'aléa devient complexe (Vaillant *et al.*, 1995) - le nombre de situations à juger pousse les thématiciens à simplifier rapidement certaines branches de l'arbre afin de diminuer l'effort de décision. La complexité de l'érosion soulignée auparavant nous oblige à écarter ce type d'évaluation bien que certains auteurs (Le Bissonais *et al.*, 1998) aient effectué cet effort.

Il apparaît plus simple de mettre en œuvre une méthode réduisant l'effort de décision demandé aux thématiciens.

Les méthodes par pondération vont dans ce sens mais restent à améliorer car elles sont jusqu'à présent insuffisamment justifiées mathématiquement pour traduire sans subjectivité l'avis des experts. Enfin, les méthodes de rang vont également dans ce sens. Elles n'exigent pas l'affectation de pondérations et donnent de bons résultats. Cependant, elles ne sont pas très explicites dans leur mode de calcul des rangs.

En conséquence, ce chapitre contient d'abord une réflexion sur la notion d'aléa et les outils mathématiques qui peuvent servir à son évaluation. Il contient également une discussion sur **une nouvelle méthode par pondération** plus satisfaisante que les précédentes sur le plan mathématique, et l'étude d'une méthode de rang existante (**La méthode SIRIS**). Cette dernière, employée par le ministère de l'environnement, pourra servir de base de comparaison pour l'étude du comportement de la nouvelle méthode proposée.

1°) **Conceptualisation de la notion d'Evaluation d'aléa**

1.1.) **Importance et état d'un facteur**

Le risque se définit par le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité. Nous ne reviendrons pas sur la notion de risque qui a été soulignée en introduction, mais nous essaierons de trouver une définition de l'aléa.

D'après la définition du risque, l'aléa fait référence au phénomène physique. Or, comme le montre le chapitre 1, un phénomène physique tel que l'érosion dépend de nombreux facteurs interagissant entre eux. C'est à dire que pour mesurer de façon qualitative l'aléa, il faut **identifier** les facteurs du phénomène, les **mesurer** et arriver, à partir des évaluations individuelles des facteurs, à les **combiner** pour obtenir l'évaluation globale désirée. Chaque facteur est alors pris en tant que critère dans une prise de décision. Cependant, intuitivement, on remarque que tous les facteurs ne prennent pas la même **importance** dans cette prise de décision. Il existe une certaine hiérarchie des facteurs qui interviennent dans le phénomène observé. Par ailleurs, la valeur de chaque facteur conditionne la prise de décision finale. En d'autres termes, l'**état** du facteur est à prendre en compte dans la combinaison. Ainsi, on peut définir la **mesure** d'un facteur par deux dimensions : **importance et état du facteur**.

De façon plus simple, on effectuera avant toute évaluation de l'aléa une **hiérarchie des facteurs** et un découpage de chaque facteur en **modalités** (ou classes) **d'état**.

Ainsi, on parlera « d'état favorable » pour un facteur qui se trouve dans un état tendant à améliorer la situation et, défavorable dans le cas contraire : un état non défavorable sera attribué à une pente nulle car l'érosion y est très faible.

1.2.) **Contraintes de l'évaluation de l'aléa**

L'évaluation de l'aléa se caractérise par la combinaison des deux dimensions (importance et état) de chaque facteur du phénomène. Tout le problème réside dans le choix de la méthode de combinaison des facteurs qui doit répondre à 2 contraintes :

- La première est la prise en compte de phénomènes d'**interaction** entre les facteurs. Par exemple, l'érosion dans la situation *pente forte x sol nu* est plus importante que dans la situation *pente forte x sol couvert à 100 %*, car l'effet positif du deuxième facteur interagit avec l'effet négatif du premier ;
- La deuxième est l'existence d'une différence d'importance des facteurs. Cette différence doit se traduire dans la méthode de combinaison par une pondération par son importance de l'état d'un facteur. En d'autres termes, il s'agit de combiner des critères d'importance inégale.

2°) **Utilisation du concept dans la méthode SIRIS (Vaillant et al., 1995)**

Vaillant a proposé une méthode d'évaluation du risque et donc de l'aléa découlant de ce concept et répondant aux contraintes précédentes. Elle sera présentée succinctement car elle a déjà été étudiée en détails (Simon, 1994 ; Arousseau *et al.*, 1995).

2.1.) Principe

La méthode S.I.R.I.S. (Système d'Intégration des Risques par Interactions des Scores) transforme des critères de décision quantitatifs ou qualitatifs, en variables qualitatives ordonnées (Arousseau *et al.*, 1995). Cette stratégie ne limite pas l'information aux seules variables quantitatives. L'agrégation de différents critères est possible quelle que soit la nature des critères. On procède ensuite à un classement des critères par ordre de gravité et à un choix de modalités dans les facteurs également rangées par ordre d'importance dans un système de **pénalisation** (non défavorable, moyennement défavorable, ..., défavorable). Aux modalités défavorables sont attribuées des pénalités dont le total conduit à un rang sur une échelle d'aléa. La conjonction de modalités défavorables amplifie ainsi la **pénalisation**. Le classement obtenu donne alors une indication d'**ordre** ; celle-ci permet uniquement de dire qu'une situation de rang x est plus pénalisée qu'une situation de rang $x-30$.

2.2.) Mise en œuvre : le système d'auto pénalisation

La mise en œuvre du système d'auto-pénalisation sera ici rapidement décrite pour en souligner les propriétés principales. On peut dire que le système d'auto pénalisation permet de tenir compte de circonstances aggravantes de plusieurs critères interagissant négativement qui pèseront sur la décision d'une façon nettement plus pénalisante qu'une simple addition. Pour une situation x , la note attribuée à la modalité d'état d'un facteur qui sera additionnée aux autres notes, dépend à la fois de la conjonction des facteurs et de l'importance du facteur à évaluer.

Les facteurs n'ont pas le même poids sur la décision, et sont dans un premier temps hiérarchisés par les thématiciens. Ensuite, pour chaque critère, ces derniers établissent des classes. Trois classes peuvent suffire telles que, « non défavorable (o) », « moyennement défavorable (m) » et « défavorable (d) » mais, il arrive que l'on rajoute une ou deux classes (D, Td, ...).

On considère, par exemple, dans le tableau suivant, deux variables X_1 et X_2 . X_1 est plus importante que X_2 car pour toutes les classes « o », « m », « d » le rang attribué à X_1 est supérieur à celui attribué à X_2 . Par exemple, pour X_1 on a, $m=2$ et pour X_2 , $m=1$.

X_1	X_2	Total
o = 0	o = 0	0
	m = 1	1
	d = 2	2
m = 2	o = 0	2
	m = 1	3
	d = 3	5
d = 5	o = 0	5
	m = 2	7
	d = 4	9

tableau 1 :Principe du système d'auto-pénalisation . Comité de liaison (1995).

En partant de la colonne X_2 , on ajoute 1 à d chaque fois que X_1 change de classe. Le niveau $d=5$ pour X_1 provient du dernier d de la colonne X_2 auquel on ajoute 1. De plus, on pose $m=d/2$ (dans une même colonne) et lorsque d est impair, on arrondit la valeur de m à la valeur inférieure. Il est fourni en annexe le principe, plus détaillé, de remplissage de la grille des pénalisations.

Conclusion : La méthode SIRIS fonctionne bien (Arousseau *et al.*, 1995) mais n'est pas très explicite. Cette méthode est simple mais pêche par son manque de justifications quant aux résultats obtenus. Elle sera par la suite utilisée pour cartographier l'aléa érosif, mais son manque d'arguments mathématiques nous pousse à prolonger la réflexion méthodologique.

3°) Utilisation du concept dans des méthodes basées sur la logique floue

3.1.) Les outils mathématiques de l'évaluation du risque

3.1.1.) De l'aléa aux concepts mathématiques

On a vu que l'idée d'évaluer un aléa érosif pouvait s'assimiler à celle d'une **prise de décision**. En général, le décideur tient à sa disposition plusieurs avis ou évaluations partielles de la situation et doit les rassembler en vue de prendre une décision unique ou évaluation globale. La prise de décision consiste alors à **agrèger** l'ensemble des opinions en une seule. Pour évaluer l'aléa, on possède des évaluations partielles correspondant aux évaluations⁵ de chaque facteur comme s'il était seul et, on veut obtenir une évaluation globale unique de la situation.

L'évaluation de l'aléa ne se définit plus comme une combinaison de facteurs mais comme une **agrégation** d'évaluations partielles, répondant aux deux contraintes du 1.2. Chaque facteur intervient par son état en tant que **critère** de jugement hiérarchisé par son importance, il s'agit d'agrégation de critères d'importance inégale.

3.1.2.) Agrégation de critères d'importance inégale

Ce concept se retrouve dans la méthode de pondération des objectifs ou critères de jugement (Dubois et Prade, 1987). En effet, dans cette méthode, on peut assimiler les objectifs G_i aux états E_i des facteurs f_i qui agissent sur un objectif global lui-même assimilable à l'aléa. Chaque état E_i du facteur f_i se voit alors affecté d'une pondération numérique p_i (ou importance pour l'évaluation de l'aléa).

Cependant, celle-ci est problématique car il s'agit d'effectuer des choix a priori d'autant plus difficiles que les facteurs ne sont pas de même nature. Enfin, il est impossible de combiner des facteurs qui ne sont pas des nombres.

Une solution⁶ consiste à admettre comme raisonnable la définition d'objectifs flous G_i pour chaque état (Dubois et Prade, 1987). On combine alors plusieurs sous-ensembles flous pour obtenir un sous-ensemble flou final qui correspond à l'objectif global. L'attribution des poids est alors simplifiée. On montrera plus loin une méthode d'affectation numérique des pondérations.

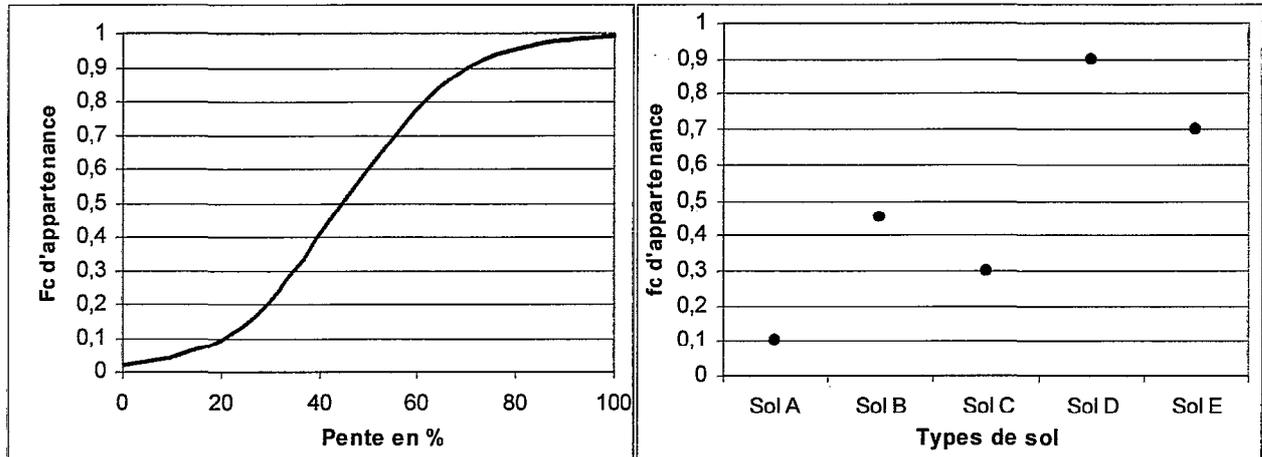
⁵ C'est aussi l'état du facteur.

⁶ Une deuxième justification de ce choix se trouve dans la nature même des informations manipulées qui sont fondamentalement imprécises, vagues, incertaines ou incomplètes (Saint-Joan, 1996).

3.1.3.) Les sous-ensembles flous (Zadeh, 1993)

Un sous-ensemble flou A de U^7 se définit par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui mesure le degré d'appartenance de x de U à A . Si x n'est pas du tout dans A alors $\mu_A(x)=0$, s'il est tout à fait $\mu_A(x)=1$ et s'il est «un peu» $\mu_A(x) = \alpha \in [0,1]$. L'ensemble de référence U peut être l'ensemble des nombres réels ou dans notre cas, les différents types de sols d'une carte, les différentes valeurs de l'inclinaison de la pente, etc ...

Dans l'évaluation de l'aléa érosif, on pourrait entendre par sous-ensemble flou, une valeur fixe des différents facteurs qui se rattachent à l'objectif global (par exemple, le sous-ensemble « pente forte », « sol battant »). Cependant, en terme d'aléa, il est plus facile de définir directement les sous-ensembles flous à partir de l'ensemble de référence « état » car c'est cette notion qui intervient dans la combinaison mathématique. Dès lors, $\mu_{Ei}(f_i(x))$ valuera le degré d'appartenance d'une valeur $f_i(x)$ du facteur f_i pour la situation x au sous-ensemble flou E_i « état défavorable » (ou favorable, selon le choix fait). Les graphiques suivants donnent deux exemples de fonction d'appartenance au sous-ensemble "état défavorable" pour la pente et les types de sol.



graphique 1 : Exemples de fonctions d'appartenance⁸ de la pente et des types de sol aux sous-ensembles flous "état défavorable".

Au terme de l'agrégation, on obtient un degré d'appartenance $\mu_R(x)$ de la situation x à un sous-ensemble flou R . Si les états sont considérées comme défavorable, R n'est autre que le sous-ensemble « aléa fort ». On pourra alors traduire les valeurs numériques obtenues en termes qualitatifs.

⁷ U est l'ensemble de référence du sous-ensemble flou.

⁸ Elles sont le résultat de discussions avec les thématiciens. Selon leurs dires, la valeur de la pente (par exemple) n'appartient pas, peu ou appartient complètement au sous-ensemble "état défavorable".

L'équation suivante est *une* façon de résumer les considérations précédentes

$$\mu_R(x) = \sum_{i=1}^q p_i \mu_{E_i}(f_i(x)) \quad (1)$$

Avec

$$\sum_{i=1}^q p_i = 1$$

La somme des p_i doit être égale à 1 pour obtenir une valeur de somme qui corresponde à une fonction d'appartenance, i.e. appartenant à $[0,1]$.

3.1.4.) Principes déduits

On peut discerner à ce stade de l'analyse des étapes importantes que l'on retrouve dans beaucoup d'autres méthodes utilisées par les spécialistes du SIG. (King *et al.*, 1992 ; Arousseau *et al.*, 1995 ; Vaillant *et al.*, 1995)

Il est nécessaire avant toute combinaison de hiérarchiser les facteurs et de découper chaque facteur en modalités : d'une part, la hiérarchisation permet d'attribuer les importances à ces facteurs et, d'autre part, le découpage en modalités d'état de ces facteurs permet de définir les sous-ensembles flous de l'équation (1).

Par ailleurs, on peut choisir d'utiliser la **pénalisation** pour l'attribution des valeurs numériques des importances et des modalités d'état des facteurs. Le sous-ensemble flou « état défavorable » traduit alors le caractère **défavorable** du facteur f_i sur la situation. Ce choix permet entre autre de se positionner dans le même cadre que celui de SIRIS.

En choisissant la pénalisation, on peut désormais définir le type d'interactions entre les facteurs. En effet, ce type d'attribution des valeurs numériques oblige à prendre comme référence la situation la plus grave. En conséquence, ce sont des phénomènes de **compensations** entre les facteurs qui devront être pris en compte.

Enfin, il est très important de définir clairement l'objectif global à évaluer. En effet, de l'objectif global dépend la définition des fonctions d'appartenance (on sait, par exemple, que l'influence de la pente dépend du type d'érosion).

3.2.) Les opérateurs d'agrégation des facteurs.

3.2.1.) Attitudes face à la décision et choix des opérateurs

Revenons ici sur la notion de prise de décision. Lorsqu'on définit l'objectif global de façon tout ou rien (présence ou non d'érosion), les seules agrégations possibles entre les critères sont la conjonction et la disjonction. Quand l'objectif est plus nuancé comme l'évaluation de l'aléa (faible, moyen, etc...), le compromis (ou compensation) entre les critères de jugement devient une attitude naturelle. Mais, les deux premières attitudes, à savoir la satisfaction simultanée des deux critères ou la redondance de l'un d'eux, sont aussi très

naturelles et donc à souligner. Pour bien comprendre le choix à faire des opérateurs, on peut formaliser ce qui précède en distinguant les 3 attitudes fondamentales du décideur devant l'agrégation de critères :

h étant un opérateur d'agrégation, s et t des critères flous quelconques, on a

$$1. \quad \forall (s,t), h(s,t) \leq \min (s,t)$$

L'évaluation globale ne peut être pire que l'évaluation du facteur le moins défavorable. Ce sont les opérations de **conjonction** qui peuvent servir aux intersections d'ensembles flous.

$$2. \quad \forall (s,t), h(s,t) \geq \max (s,t)$$

C'est à dire que le facteur le plus grave conditionne l'évaluation globale. Ce sont les opérations de **disjonction** qui peuvent servir aux unions d'ensembles flous.

$$3. \quad \min < h < \max$$

L'évaluation globale se situe alors à un niveau intermédiaire entre la pire et la meilleur des évaluations. Cette attitude de **compromis** coïncide avec l'idée de compensation soulignée en 3.1.4.

Ainsi, parmi l'ensemble des opérateurs disponibles, seuls les opérateurs du 3^{ème} type sont susceptibles de nous convenir. Il s'agit des opérateurs de moyenne, de sommes symétriques et d'une famille d'opérateurs traduisant une attitude hybride entre la conjonction et la disjonction. Nous nous attacherons dans la suite à présenter les opérateurs de moyennes et les opérateurs hybrides qui sont les plus simples à mettre en œuvre.

3.2.2.) Les opérateurs hybrides

Pour couvrir l'ensemble d'attitude entre disjonction et conjonction, Zymmerman et Zysno (1982) ont proposé une famille d'opérateurs paramétrés (h) en posant :

$$h(s,t) = I(s,t)^\gamma \cdot U(s,t)^{(1-\gamma)}, \gamma \in [0,1] \quad (2)$$

s et $t \in [0,1]$, sont des critères flous quelconques

I est une intersection et U une union, de sous-ensembles flous

En choisissant une intersection et une union d'ensembles flous parmi celles proposées par les auteurs, on obtient une famille d'opérateurs qui convient à l'évaluation de l'aléa et ses contraintes. γ représente alors le compromis entre les attitudes de conjonction et de disjonction.

L'intérêt tient dans le choix d'opérateurs de conjonction et de disjonction associatifs pour l'expression (2) qui permettent alors facilement le passage de 2 à n critères pondérés, $f_i(x)$ $i=1$ à n :

$$h[\{p_i, \mu_{E_i}(f_i(x))\}, i=1,n] = U[\{p_i, \mu_{E_i}(f_i(x))\}, i=1,n]^\gamma \cdot I[\{p_i, \mu_{E_i}(f_i(x))\}, i=1,n]^{(1-\gamma)}, \gamma \in [0,1] \quad (3)$$

Somme des p_i valant 1.

Reste à arrêter le choix de U et I . Une première idée serait de choisir les opérateurs de Kleene ($I = \min$ et $U = \max$) pour leur simplicité. Mais cette idée est à proscrire car ces opérateurs ne traduisent pas la conjonction de l'ensemble des facteurs. En effet, pour simplifier, le résultat final de h avec \min . et \max . dépend uniquement de la plus petite et de la plus grande des

évaluations partielles (c.ad. des évaluations individuelles des facteurs). L'évaluation globale se résume alors à un compromis entre le facteur le plus défavorable et le moins défavorable (ou le plus favorable et le moins favorable). On aimerait des opérateurs qui fassent intervenir dans le résultat les valeurs de toutes les évaluations partielles. Or, Yager a proposé une famille d'opérateurs d'intersection et d'union associatifs répondant à cette dernière remarque (Klir *et al.*, 1988):

- Intersection : $I(s,t)=1-\min(1,((1-s)^\omega+(1-t)^\omega)^{1/\omega})$; $\omega \geq 0$
- Union : $U(s,t)=\min(1,(s^\omega+t^\omega)^{1/\omega})$; $\omega \geq 0$
s et t $\in [0,1]$, sont des critères quelconques

L'expression de (3) avec l'intersection et l'union de Yager découle logiquement de l'expression (1). C'est à dire qu'on pondère dans la formule les objectifs. On obtient alors la combinaison directement applicable suivante :

$$\mu_R(x) = \left[1 - \min \left(1, \left(\sum_{i=1}^q p_i (1 - \mu_{E_i}(f_i(x)))^\omega \right)^{1/\omega} \right) \right]^\gamma \cdot \left[\min \left(1, \left(\sum_{i=1}^q p_i (\mu_{E_i}(f_i(x)))^\omega \right)^{1/\omega} \right) \right]^{(1-\gamma)} \quad (4)$$

3.2.3.) Les opérateurs de moyenne

On peut trouver dans l'expression (1), l'expression d'une opération de moyenne. En fait, (1) peut s'écrire de façon plus générale comme suit avec $k(x) = \text{identité}(x)$:

$$\mu_R(x) = k^{-1} \left[\sum_{i=1}^q p_i k[\mu_{E_i}(f_i(x))] \right] \quad (5)$$

Or, on appelle par définition, les opérations de moyenne, les fonctions de la forme

$$k^{-1} \left(\frac{k(s) + k(t)}{2} \right) \quad (6)$$

où k est continue et strictement monotone et (s,t) des critères flous quelconques.

De ce fait, avec la somme des pondérations valant 1, l'expression (1) est une opération de moyenne et donc un cas particulier de la combinaison (5).

On s'intéressera en particulier à la famille m_α générée par la fonction $k(x)=x^\alpha$ (continue et strictement monotone). Pour celle-ci la combinaison (5) se met sous la forme définitive :

$$\mu_R(x) = \left[\sum_{i=1}^q p_i [\mu_{E_i}(f_i(x))]^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (7)$$

avec la somme des p_i égale à 1.

Cette famille sera notée par la suite m_α .

Il est facile de montrer que l'expression (7) est une fonction associative. La démonstration est fournie en annexe. De ce fait, (7) se trouve être un cas particulier dans les opérations de moyennes. Cette propriété provient de la définition des pondérations en tant que « importance » réduite⁹.

3.3.) Discussions sur les méthodes exposées

3.3.1.) Analyse du comportement des opérateurs en fonction de α , ω et γ

Il n'est pas question ici d'arrêter les valeurs des paramètres, mais il convient par contre de donner quelques outils aux utilisateurs pour les aider dans les choix numériques.

On peut constater premièrement que m_α est en fait un cas particulier de Zimmerman pour $\gamma=0$ et $\alpha=\omega$. Ainsi, il sera plus facile d'étudier en premier lieu m_α puis d'étendre les propriétés au « compromis » de Zimmerman.

a) valeurs de α de m_α (opérations de moyenne)

Etudions premièrement la fonction $m_\alpha [(p,x),(q,y)]$, où p et q sont les pondérations de x et y respectivement, pour α sur l'ensemble des réels. Cette fonction est continue sur $]-\infty, 0[$ et $]0, +\infty[$. Il est facile de montrer qu'elle possède une limite égale à droite et à gauche en 0. On peut donc définir la fonction continue sur l'ensemble des réels en posant $m_0(x,y) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} m_\alpha(x,y)$.

Le tableau ci-après montre le comportement de m_α pour des valeurs caractéristiques de α :

α	$m_\alpha[(x,p),(y,q)]$
$-\infty$	Min(x,y)
-1	$(xy)/(qx+py)$
Limites en 0^- et 0^+	$x^p y^q$
1	Somme pondérée
$+\infty$	Max(x,y)

tableau 2 : Valeurs caractéristiques de α de m_α .

On savait déjà que m_α était comprise entre le min. et le max. mais le tableau 2 peut être complété par le graphique fourni en annexe. Celui-ci montre que m_α se comporte comme le min. jusqu'à des valeurs assez proches de -1 . De plus, étant donné les faiblesses du max.(opérateur de Kleene) et de la somme pondérée (méthode additive), l'évaluation, pour des valeurs de α comprises entre 1 et $+\infty$, n'apporte rien à la méthode. On restreindra donc l'intervalle d'étude de α à $[-1 ; 1[$. La suite de l'étude est empirique et a été effectuée sur une

⁹ Cela signifie que les poids sont réduits pour que leur somme soit égale à 1. Pour cela, on divise les poids initiaux dans l'expression (7) par leur somme. On les dit « réduits »

série de situations fictives à évaluer. L'expérience a montré que les valeurs les plus adaptées à l'évaluation de phénomènes intégrant des compensations fortes entre facteurs sont comprises entre 0 et 1.

Il faut bien comprendre que m_α représente, dans notre contexte, une attitude comprise entre une attitude indulgente (min) et une attitude sévère (max). Si on remarque dans le phénomène observé des compensations importantes entre les facteurs, ce sont vers des valeurs faibles de α (i.e. proche de 0) qu'on se penchera. Si, au contraire, les compensations sont faibles et le facteur le plus grave conditionne l'évaluation finale, ce sont des valeurs forte de α qu'on étudiera.

On peut donc restreindre l'intervalle des valeurs possibles de α en formalisant le type d'interaction entre les facteurs. La valeur numérique finale pourra être précisée par une méthode développée plus loin.

b) valeurs de ω et γ (« compromis »)

Partant de la remarque faite en introduction du § 3.3.1, on peut dire que le « compromis » permet d'approfondir la notion d'agrégation par opération de moyenne. On peut jouer non seulement sur le paramètre de Yager (ω) mais aussi sur celui de Zimmerman (γ). C'est à dire que l'on peut faire varier la sensibilité des opérateurs d'union et d'intersection mais aussi le type de décision. Cette propriété rend plus complexe l'approche pratique de l'équation (4).

Il est nécessaire de **continuer la réflexion** sur l'influence des ces deux paramètres. Il n'a pas été possible durant ce stage de déterminer de façon précise les outils pour guider l'utilisateur dans son choix numérique de ω et γ . Cependant, cela ne veut pas dire qu'il faille proscrire la méthode par « compromis » mais plutôt de prolonger la réflexion sur le comportement précis de l'équation (4) avant de la mettre en oeuvre.

Par conséquent, on étudiera **uniquement** par la suite les fonctions de moyenne dont la mise en oeuvre est plus facile. De plus, on montrera que l'agrégation par opération de « moyenne » répond de **façon satisfaisante** à nos attentes sur l'évaluation de l'aléa érosif.

3.3.2.) Discussion sur l'attribution de valeurs numériques dans le cas de l'opération de moyenne

Dans les méthodes utilisant la logique floue comme les opérations de moyenne, trois étapes demandent l'attribution de valeurs numériques :

- transformation des facteurs en sous ensembles flous,
- détermination de la valeur du paramètre α ,
- affectation des poids aux différents facteurs.

On a déjà des idées assez précises sur les valeurs numériques des deux premiers points. Pour le premier point, on peut trouver facilement en première approche une logique simple d'attribution qui se base sur la connaissance du phénomène par les thématiciens. Le deuxième point est celui qui pose le moins de problèmes car on a déjà un intervalle restreint de valeurs possibles. Par conséquent, des valeurs numériques peuvent être fixées sans trop de biais.

Reste le troisième point qui semble poser le plus de problèmes. A première vue, on ne peut pas trouver de règles précises pour l'attribution numérique des pondérations et les thématiciens ne mesurent pas facilement en valeurs numériques la hiérarchie qu'ils proposent.

A ce stade de l'analyse, on pourrait penser que l'attribution des valeurs numériques contient une grande part de subjectivité, rendant l'évaluation finale relativement biaisée.

Pour s'affranchir de ce problème, on peut utiliser un outil adapté à l'optimisation de valeurs numériques dans une équation (optimiseur du Solver d'Excel, réseau de neurones,...). Connaissant approximativement les valeurs d'une partie des variables numériques à renseigner (μ et α), on peut d'abord optimiser sous contraintes (celles qui émanent de la formalisation du phénomène) l'autre partie des variables (p_i) sur un ensemble de situations dont l'évaluation est connue. La suite de l'algorithme consiste à revenir sur la première partie des variables, tout en fixant les valeurs nouvellement obtenues, en les optimisant sur les mêmes situations. Ce « va et vient » peut être effectué jusqu'à obtenir le meilleur résultat.

Il convient toutefois de se fixer au préalable la logique d'attribution des valeurs numériques de $\mu_R(x)$. Pour chaque modalité d'aléa, on doit trouver une valeur comprise entre 0 et 1 qui traduise l'appartenance au sous-ensemble flou « aléa fort ». A partir de ces valeurs fixées, on peut ajuster toutes les autres variables. Il n'y a plus désormais de subjectivité dans l'attribution numérique de la majeure partie des variables : le modèle s'ajuste aux contraintes émanant de la connaissance des thématiciens sur le fonctionnement du phénomène.

Il faut également noter que bien des combinaisons théoriques n'existent pas dans la réalité. Il convient donc d'optimiser les valeurs numériques sur des situations réelles, afin que le comportement de l'équation soit un reflet assez proche du phénomène étudié.

4°) Etude des méthodes sur un cas théorique

4.1.) Description du contexte du test

Pour évaluer le comportement des méthodes décrites plus haut, on invente un ensemble de situations qui découlent des contraintes déjà exprimées. 4 facteurs ont été classés et découpés en plusieurs modalités d'état. Le nombre de modalité des états varie suivant le facteur envisagé. Le tableau ci-dessous décrit les facteurs :

Facteurs		Modalités des états		
Ordre	Importance	Nbre	Attribut	μ
1	p ₁	4	D	$\mu_{1,1}$
			d	$\mu_{1,2}$
			m	$\mu_{1,3}$
			o	$\mu_{1,4}$
2	p ₂	3	d	$\mu_{2,1}$
			m	$\mu_{2,2}$
			o	$\mu_{2,3}$
3	p ₃	4	D	$\mu_{3,1}$
			d	$\mu_{3,2}$
			m	$\mu_{3,3}$
			o	$\mu_{3,4}$
4	p ₄	3	d	$\mu_{4,1}$
			m	$\mu_{4,2}$
			o	$\mu_{4,3}$

Légende :

D : Très défavorable

d : Défavorable

m : Moyennement Défavorable

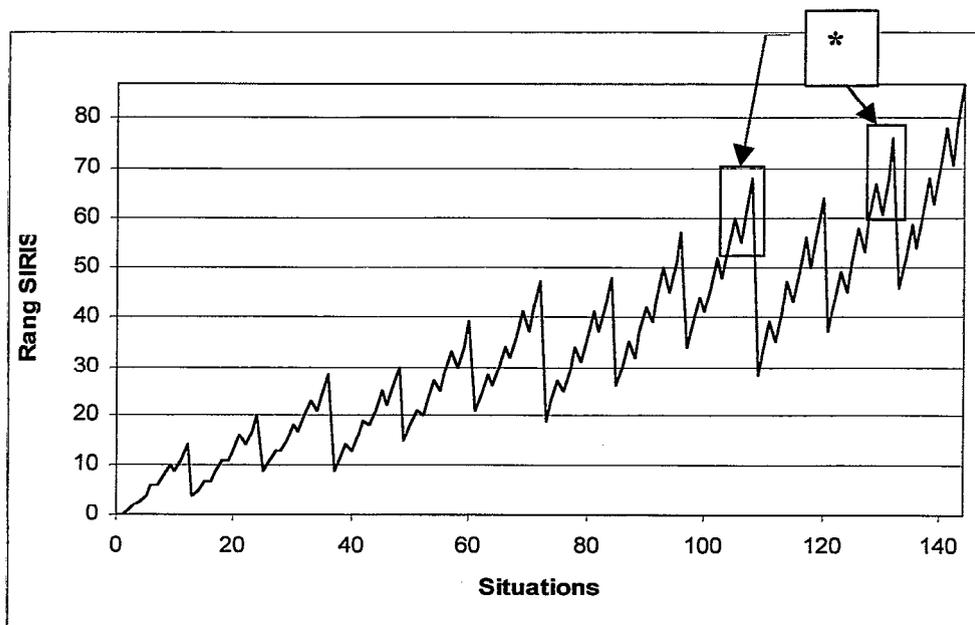
o : Non défavorable

tableau 3 :description des facteurs du test

Les situations seront décrites sous forme d'**arbre**, le niveau des nœuds correspond alors à la hiérarchie des facteurs. L'attribution d'un numéro i à une situation se fera alors par un parcours « en profondeur d'abord » de l'arbre de gauche à droite, i.e. de l'état le moins défavorable au plus défavorable. Par exemple, la situation 1 correspond à la situation « oooo », la situation 2 à « o.o.o.m », la 3 à « o.o.o.d », la 4 à « o.o.m.o », la 5 à « o.o.m.m », etc...la dernière à « D.d.D.d ». La liste des situations est fournie en annexe et permet de mieux comprendre le classement des situations. Toutes les évaluations de l'aléa par les méthodes envisagées seront faites en fonction des situations ainsi classées.

4.2.) Méthode SIRIS

Le classement des situations par SIRIS est fourni par le graphique suivant. Le tableau de tous les rangs est fourni en annexe.



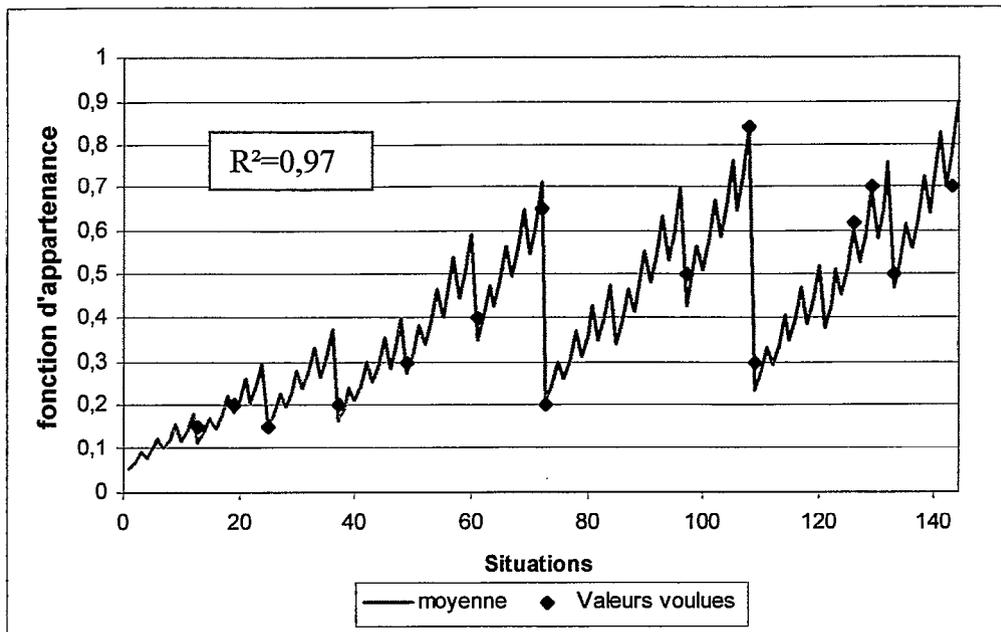
graphique 2 : Rang SIRIS des situations décrites comme l'explique le 4.2

La compensation est, de par la conception même de la méthode, bien prise en compte. On peut remarquer que l'influence des facteurs secondaires s'amplifie lorsque le facteur 1 voit sa modalité s'aggraver. Cette propriété n'est pas forcément bonne car rien ne dit que dans l'érosion, l'influence des facteurs secondaires varie avec le type de situation. Cependant, on peut nuancer cela en tenant compte du caractère ordinal des résultats d'évaluation. En fait, les rangs finaux des situations s'espacent lorsque le premier facteur s'aggrave. Il convient alors d'étaler les échelles d'interprétation des rangs en « niveau d'aléa ». Pourtant, certains rangs peuvent devenir grands par l'importance de la note attribuée au dernier facteur (*). De telles situations, si elles existent dans la nature, seront alors largement sur-évaluées.

4.3.) Méthode basée sur la logique floue (moyenne)

4.3.1.) L'évaluation des situations

Le graphique suivant donne le résultat d'évaluation de l'aléa sous contraintes de situations inventées.



graphique 3 : Evaluation de l'aléa selon les situations par opération de moyenne. Optimisation des valeurs sous contraintes

$$\alpha=0.3 ; \\ p_1 = 17 ; p_2 = 17 ; p_3 = 12 ; p_4 = 8.$$

Encore une fois, sans optimisation, il est très difficile de fournir une appréciation numérique de la hiérarchie des facteurs. En effet, non seulement cette hiérarchie est difficile à déterminer (Simon, 1994), mais encore la traduction numérique de cette hiérarchie est nécessairement subjective. Une remarque peut être aussi faite pour la définition des sous-ensembles flous.

En conséquence, **on s'affranchit de cette difficulté en utilisant l'optimisation sous contraintes**. De cette façon, on limite pour les cas concrets l'intervention des thématiques à une expression qualitative adaptée à leurs connaissances du phénomène, en leur demandant d'évaluer quelques situations réelles (cf. graphique 3).

La qualité des évaluations obtenues par la méthode d'agrégation est mesurable par le calcul du coefficient de corrélation entre ces évaluations et celles effectuées par les thématiques. Il est sur le graphique 3 de très bonne qualité mais, bien que les évaluations de références aient été faites dans l'optique de l'évaluation de l'aléa érosif, il faut nuancer ce résultat en sachant que le problème a été simplifié dans cette partie.

4.3.2.) Flexibilité de cette méthode et arguments mathématiques

La remarque importante que l'on puisse faire sur SIRIS tient dans sa non-flexibilité. En effet, SIRIS se contente de classer les facteurs sans tenir compte de leur importance relative. A l'inverse, l'agrégation permet par l'intermédiaire des avis des thématiciens d'affiner la pondération des facteurs et son comportement et, ajuster ainsi aux mieux l'évaluation. Certes, le nombre de paramètres à renseigner est important mais cette étape se réalise facilement à l'aide de graphiques d'un tableur. En fait, quand SIRIS se contente d'un classement des situations, l'agrégation donne derrière une valeur x plus d'information qu'un simple classement car c'est de fonctions d'appartenance qu'il s'agit. L'utilisation des sous-ensembles flous est donc un plus sur le plan de l'information contenu dans le résultat. Non seulement, on obtient un classement des situations sur une échelle de gravité d'aléa mais on peut mesurer les différences entre les évaluations.

De plus, la méthode par agrégation s'appuie sur des propriétés mathématiques que SIRIS ne peut revendiquer. L'agrégation est en effet un des opérateurs d'un ensemble mathématiquement défini qui est celui des ensembles flous. Elle possède par conséquent toutes les propriétés qui sont nécessaires à sa définition mathématique. Ainsi, de cette rigueur découle une confiance accrue dans les résultats qu'elle fournit.

Enfin, la mise en oeuvre des méthodes utilisant les opérateurs d'agrégation fait appel à des calculs simples qu'on peut effectuer dans n'importe quel logiciel de système d'information géographique.

5°) *Récapitulation de la démarche des méthodes basées sur la logique floue*

La démarche pour évaluer l'aléa érosif peut être synthétisée par les 7 points suivants :

- I. Le type d'érosion dont l'aléa est à évaluer doit être clairement défini et un compromis doit être trouvé sur les facteurs qui interviendront dans son évaluation ;
- II. Les facteurs sont hiérarchisés par les thématiciens ;
- III. Le système de pénalisation ou de majoration est choisi. Il servira à choisir le sous-ensemble flou de l'ensemble de référence ;
- IV. Les fonctions d'appartenance aux ensembles flous sont définies et une première logique d'attribution des valeurs numériques est retenue (exemple : état défavorable = 0,8-0,9) ;
- V. L'intervalle de valeurs de α est déterminée par formalisation du problème (compensation, conjonction,...) ;
- VI. L'algorithme d'optimisation des valeurs numériques est mis en oeuvre grâce aux avis d'expert sur un ensemble de situations ;
- VII. Les valeurs des évaluations par agrégation sont interprétées en terme de « niveau d'aléa érosif » et la génération de cartes représentant l'aléa érosif mise en oeuvre.

Conclusion du chapitre II

Parmi l'ensemble des méthodes d'évaluation existantes, la méthode SIRIS constitue un outil d'évaluation de l'aléa érosif que nous retiendrons par la suite. Cependant, son caractère non explicite nous a conduit à chercher une méthode plus satisfaisante sur le plan mathématique.

La réflexion sur la notion d'évaluation de l'aléa nous a permis de trouver une méthode explicite basée sur la logique floue et sur plusieurs opérateurs d'agrégation potentiels. Deux opérateurs ont été particulièrement étudiés : l'opérateur de moyenne et le « compromis de Zimmerman » :

- en ce qui concerne le compromis de Zimmerman, il est nécessaire de poursuivre la réflexion pour bien fixer le rôle des paramètres ω et γ ;

- en revanche, **la méthode basée sur la logique floue utilisant l'opérateur de moyenne se révèle opérationnelle**, et pourra être utilisée pour la cartographie de l'aléa érosif.

En définitive, deux méthodes d'évaluation de l'aléa érosif apparaissent utilisables : la méthode SIRIS et la méthode par opération de moyenne.

Chapitre III APPLICATION DES METHODES RETENUES : cartographie de l'aléa érosif sur une partie du bassin de Quito

L'objet de ce chapitre est la mise en œuvre des deux méthodes d'évaluation de l'aléa érosif retenues dans le deuxième chapitre (méthode basée sur la logique floue et l'opérateur de moyenne, et méthode SIRIS), à partir des facteurs déterminés et hiérarchisés dans le premier chapitre, et des discussions menées avec les thématiciens (G. De Noni et M. Viennot). L'aléa cartographié concernera uniquement l'érosion linéaire. La formalisation du phénomène, la hiérarchie des facteurs et leur découpage en modalité d'état seront donc faits dans cette optique.

Auparavant, il faut se donner une zone d'étude restreinte pour mettre en œuvre ces méthodes d'évaluation. En effet, il convient en premier lieu de les mettre en œuvre sur une zone où l'érosion linéaire est significative, puis de les valider, et enfin de généraliser la démarche à l'ensemble du sillon inter-andin. De plus, en choisissant une zone restreinte spatialement, on limite la masse de données à traiter et par la suite, les temps de calcul nécessaires aux réglages des paramètres.

1°) La zone d'étude

Le bassin de Quito a été retenu pour cette étude car il présente de gros problèmes d'érosion linéaires (voir carte 2, chapitre I).

Au sein de ce bassin, une zone d'à peu près 25 km d'Est en Ouest sur 18 km du nord au Sud a été retenue. Cette zone est suffisamment restreinte pour permettre des temps de calcul et de traitement courts. D'Est en Ouest, cette zone s'étend du sommet de l'Ilalo jusqu'aux sommets de la cordillère orientale, ce qui permet d'inclure une vaste gamme d'altitudes, de couverts végétaux, de climats et de sols. La limite nord, située au niveau de l'Ilalo, permet d'éviter les zones fortement urbanisées, où l'évaluation de l'aléa érosif aurait été difficile.

L'échelle de travail est le 1/50 000, en absence de données plus précises sur l'Equateur.

2°) Etapes communes aux deux méthodes

2.1.) Acquisition des différentes couches

D'après les méthodes retenues, il faut définir précisément les facteurs à prendre en compte.

Pour mémoire, on peut redonner les facteurs retenus en fin de première partie :

- inclinaison de la pente (intensité du ruissellement)
- type de couverture (protection du sol)
- type de sol (érodibilité)
- type de climat (érosivité)

L'étape suivante consiste à intégrer ces facteurs dans un SIG et donc de discuter de leur acquisition.

2.1.1.) La pente, variable dérivée du MNT¹⁰

a) Le MNT

Le mnt de la zone a été généré à partir des courbes de niveaux de cartes topographique au 25 000 (Chatelin *et al*, 1995). La méthode d'interpolation utilisée est inspirée de Yoeli (1986). Celle-ci consiste à calculer la valeur moyenne pondérée de l'altitude interpolée à l'aide de fonction splines cubiques le long de 4 axes (Depraetere, 1992). Sa résolution est de 55,77 m. Elle conditionnera par la suite la résolution des autres couches et du résultat final (1/50 000). Il est difficile en effet d'augmenter la résolution du facteur qui a la plus forte importance dans l'évaluation de l'aléa. En effet, le sur-échantillonnage d'une couche (mnt) servant à générer une autre couche (pente) nous expose à une création dangereuse d'information.

La validité du mnt a pu être appréciée par la qualité de la méthode d'interpolation et une rapide étude de l'histogramme des altitudes. Cette dernière a permis de conclure à l'absence d'artefacts (pas d'augmentation de la proportion des valeurs d'altitudes au niveau des courbes de niveaux), ce qui est rassurant pour la qualité du mnt.

b) Calcul de la pente

Pour calculer la pente, on a utilisé le logiciel « MNT SURF » du laboratoire de spatialisation numérique de l'École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. Il n'a pas été possible de faire fonctionner le logiciel Alliance® pour le calcul des pentes. Certaines commandes ne fonctionnant pas comme celle du calcul des probabilités et du croisement raster, il était difficile d'utiliser le résultat du calcul des pentes au format Alliance® pour l'évaluation de l'aléa (SIRIS et agrégation).

L'angle de la pente correspond alors à l'angle du plan de régression entre les huit points voisins au point où la pente est calculée.

Le fichier obtenu est binaire et donc facilement utilisable dans un programme en C.

2.1.2.) Occupation du sol, classification de l'image SPOT multi-spectrale

Les 4 scènes SPOT que détient le LCSC ont été acquises avec le concours du programme ISIS, (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 (XS 1, XS2, XS3) avec une résolution au sol de 20 x 20 m. 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 différentes formes de végétation.

¹⁰ Modèle numérique de terrain

On a uniquement retenu les scènes couvrant Quito et celle datant de l'année 1995 afin de déterminer l'état actuel de l'érosion. Ces scènes avaient déjà été redressées et projetées dans le système de projection UTM¹¹ zone 17 (Servenay, 1995).

La zone d'étude a été extraite et une procédure de classification a été mise en place (des classifications avaient déjà été mises en oeuvre sur la zone mais les thèmes choisis traduisaient mal le pourcentage de couverture (Faure, 1996)). La classification mise en oeuvre est une classification supervisée, dont la méthode est fournie en annexe. L'intérêt d'une telle méthode tient dans la possibilité qu'on a de juger à posteriori sa qualité par le calcul de la **matrice de confusion**¹².

Après classification, 9 thèmes ont été retenus. La matrice de confusion de la classification est fournie ci-après :

	os1	os2	os3	os4	os5	os6	os7	os8	os9	non classés	Total
os1	55%	0%	0%	1%	17%	9%	11%	0%	0%	7%	100%
os2	0%	62%	27%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	1%	100%
os3	0%	0%	40%	0%	0%	1%	0%	59%	0%	0%	100%
os4	0%	0%	0%	98%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	100%
os5	0%	0%	0%	0%	97%	0%	0%	0%	0%	3%	100%
os6	0%	0%	0%	18%	0%	81%	0%	0%	0%	1%	100%
os7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	99%	0%	0%	1%	100%
os8	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	96%	0%	3%	100%
os9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	5%	100%

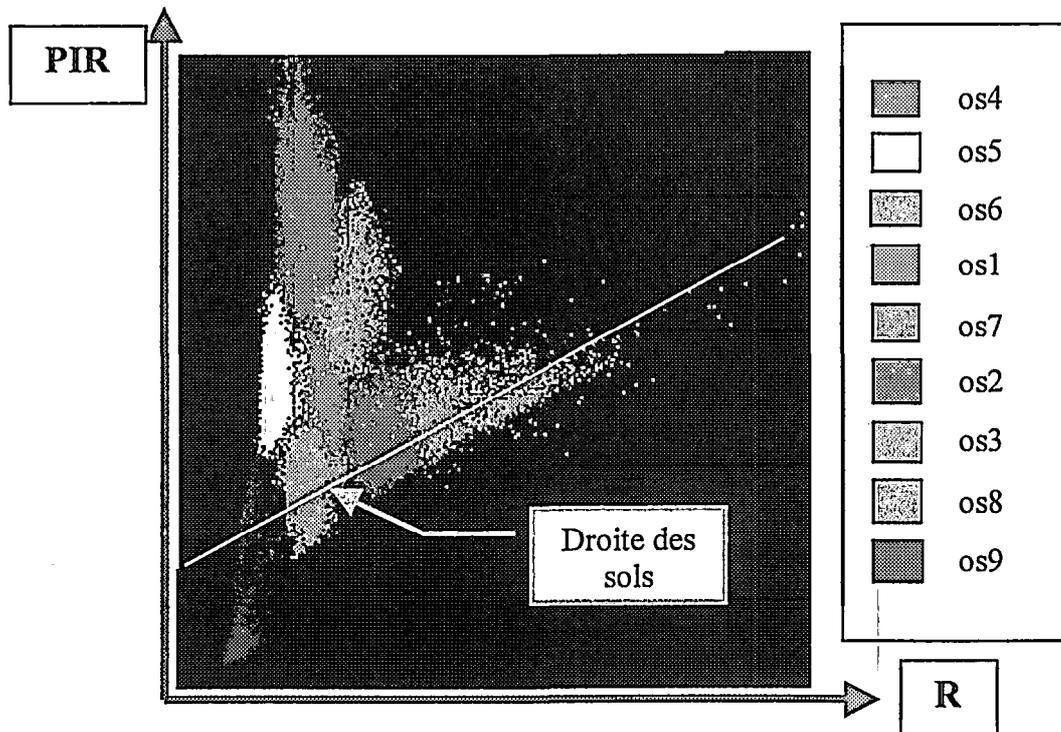
tableau 4 : matrice de confusion en fin de classification

A partir de cette matrice de confusion, nous avons calculé le test Kappa, qui permet de juger de la qualité de la classification. Nous avons obtenu une valeur de 0,84, ce qui indique, selon les auteurs, une classification satisfaisante à bonne. Pourtant, on peut remarquer qu'il reste encore quelques confusions entre certaines classes (1 et 5 ; 2 et 3 ; 2 et 6 ; 3 et 8 ; 6 et 4)). Pour minimiser ce problème de confusion des classes, nous les avons donc regroupées selon leur signature spectrale (cf. graphique 4).

¹¹ Universal Transversal Mercator : c'est le système de projection utilisé pour l'ensemble des couches.

¹² Une matrice de confusion permet d'évaluer la qualité de l'apprentissage en simulant la classification des pixels des parcelles constituant les thèmes de l'apprentissage (échantillons) et en comparant la classe affectée à ces pixels par rapport à leur thème d'apprentissage.

La matrice de confusion est un tableau à deux dimensions où chaque ligne correspond à un thème de l'apprentissage et chaque colonne représente le thème de classification. Une case exprime le pourcentage des pixels de l'échantillon (ligne) classé dans un thème donné (colonne).



graphique 4 : Signatures spectrales des thèmes retenus dans l'espace PIR¹³ x R¹⁴

En excluant le thème 9 qui est sans conteste de l'eau, nous avons défini trois ensembles parmi les huit thèmes restants.

1. Un ensemble de thèmes (os4 et os5) qui possèdent une signature forte dans le PIR et faible en R. Cela signifie que la couverture végétale est importante (prairies naturelles ou irriguées). Cet ensemble sera appelé par la suite « couverture dense ».
2. un ensemble de thèmes dont la signature spectrale se répartit le long de la droite des sols (os2, os3 et os8). Cet ensemble traduit donc un couvert végétal faible ou nul, que nous appellerons « couverture faible ».
3. un dernier ensemble de thèmes qui ont une signature hybride (os1, os6 et os7). Leur couverture végétale est donc moyenne (mélange de sol nu et de végétation). Cet ensemble sera donc appelé « couverture moyenne ».

Après ce regroupement, l'influence de la confusion des classes est minimisée (ce qui est plus rassurant pour l'évaluation de l'aléa).

Notons que cette classification aurait encore pu être améliorée si nous avions pu disposer de plus de temps.

¹³ PIR : Proche Infra-Rouge, ou la bande XS3 de l'image SPOT.

¹⁴ R : Rouge, ou la bande XS2 de l'image SPOT.

2.1.3.) Types de sols (érodibilité)

Cette couche a été produite à partir des cartes pédologiques au 1/50 000. Le L.C.S.C. possède l'ensemble des cartes pédologiques de l'Equateur.

Quatre feuilles ont été mosaïquées, numérisées puis vectorisées afin de produire une couche vecteur de la zone.

Il faut noter l'existence d'un décalage entre le mnt et cette couche. Il nuit à la qualité de la couche « aléa ». Ce décalage est situé au niveau des zones de hautes altitudes à l'Est de la zone. Il provient sûrement d'une mauvaise qualité de la couche vecteur sur cette partie de la zone. En effet, les cartes pédologique sont dépourvus de quadrillage UTM dans les zones de montagne, ce qui rend le mosaïquage des feuilles difficile.

2.1.4.) Le climat (érosivité)

La seule carte représentant les intensités maximales en 30 minutes disponible possède une résolution bien insuffisante pour la cartographie de l'aléa érosif de la zone. Elle a été tracée au millionième et est donc de ce fait inutilisable compte tenu de l'échelle qui a été retenue pour l'étude.

Ce problème a pu être résolu en utilisant la carte pédologique au 50 000. Elle possède en effet des informations sur le pédo-climat. Certes, celui-ci n'est pas une représentation fidèle de la répartition des intensités pluviométriques maximales en 30 minutes. Mais, il la caractérise bien en donnant une information sur le type de pluviométrie par une mesure l'état hydrique du sol durant l'année. Le régime hydrique est alors découpé en 4 classes (SCS USDA, 1975) :

1. Régime « aridic » ou aride qui est caractérisé par plus de neuf mois de période sèche qui prévaut dans les bassins surbaissés (altitudes inférieures à 2600 m).
2. Un régime sec prévaut dans les zones à basses altitudes du bassin (altitudes comprises entre 2600 et 3000 m). Sous l'effet de conditions locales la pluviométrie annuelle n'y dépasse pas 800 mm/an; c'est un régime dit « ustique » ou semi-aride.
3. Un régime plus humide se manifeste lorsque l'on progresse le long des versants (altitudes comprises entre 3000 et 3400 m) ; c'est un régime dit « udique » ou semi-humide caractérisé par des précipitations comprises entre 800 et 1 500 mm/an.
4. Régime « pérudic » ou humide caractérisé par l'absence de période sèche qui prévaut dans les zones de haute altitude et dans les versants dans les vents (altitudes supérieures à 3400 m).

Ainsi, ces 4 classes peuvent traduire la décroissance des intensités maximales des pluies avec l'altitudes soulignée en première partie. En fait, l'information qu'on cartographie par ce biais permet de dire simplement qu'il y a plus de probabilités que les intensités soient fortes en climat aridic qu'en climat udique. Partant de cette donnée unique tirée du pédo-climat, on écarte la redondance – que l'on pourrait facilement lui reprocher - de la couche « agressivité des pluies » avec celle des « types de sols ».

Malgré tout, le facteur « agressivité des pluies » doit être considéré avec précaution.

2.2.) Hiérarchisation des facteurs

Un consensus sur la hiérarchie des facteurs a été trouvé. On a déjà expliqué dans la première partie les raisons de cette hiérarchisation Elle sera donc rapidement rappelée ici (cf. tableau 5).

Hiérarchie	nom du facteur
1	Inclinaison de la pente
2	Pourcentage de couverture
3	Types de sols (érodibilité)
4	Types de climat (érosivité)

tableau 5 : hiérarchie des facteurs de l'aléa érosif

2.3.) Découpage des facteurs en « modalités d'état »

L'opération consiste ici à déterminer les modalités d'états des différents facteurs pour les deux méthodes retenues : SIRIS et l'agrégation par moyenne. Pour plus de lisibilité, on emploiera la notation {o, m, d, D, Td} définie dans la méthode SIRIS.

2.3.1.) La pente

Le découpage du facteur pente a été effectué selon les 4 modalités présentées au tableau 6.

Valeurs de la pente	modalités d'état
0 - 15 %	o
15 - 25 %	m
25 - 50 %	d
Plus de 50 %	D

tableau 6 : Classes d'état de la pente

En effet, jusqu'à 15 % , on peut considérer que l'érosion **linéaire** est faible. Cette dernière devient prédominante au delà de 15 % de pente, forte de 25 à 50 % et très forte au dessus de 50 %.

2.3.2.) Pourcentage de couverture

L'occupation du sol est un facteur qualitatif. Le nombre de modalités d'état pour ce facteur (3) est une conséquence directe de la classification de l'image présentée au paragraphe 2.1.2. Le tableau suivant explicite ces modalités.

états du facteur	modalités d'état
couverture dense	o
couverture moyenne	m
couverture faible	d

tableau 7 modalités d'état du facteur couverture végétale

2.3.3.) Type de sols (érodibilité).

Les principaux types de sols rencontrés dans la zone étudiée selon les cartes au 1/50000 (MAG-ORSTOM) correspondent aux classes suivantes de la *USDA soil taxonomy* :

- Les sols de classe D correspondent aux sols noirs dérivés de cendres volcaniques, riches en allophanes : il s'agit d'**andosols typiques**, plus ou moins hydratés et désaturés. On connaît déjà leurs qualités.
- Les sols isohumique M correspondent à des sols où il y a apparition d'argiles différentes de l'allophane.
- Les sols sur cangahua C sont des sols sans allophane où la teneur en argiles est moins importante que celle en sables et en limons. On peut distinguer deux types qui diffèrent par l'épaisseur de sol sur la cangahua (plus ou moins de 20 cm). Lorsque les sols ($C_{(2)}$) sont peu épais, moins de 20 cm de profondeur, la texture est sablo-limoneuse. au delà de 20 cm de profondeur, les sols ($C_{(1)}$) se distinguent par leur plus forte teneur en argile.
- Les sols H correspondent à des sols noirs limoneux très érodibles.
- La cangahua affleurante.

De cette description, on a utilisé le critère minéralogique (présence ou absence d'allophane) et le critère "texture" pour différencier ces sols en fonction de leurs comportements à l'érosion. Ces derniers sont résumés dans le tableau suivant :

Classes de sols	Facteur de Discrimination		modalités d'état
D	1: avec allophane		o
M	2: absence d'allophane	Argile > (S+L)	m
$C_{(1)}$		(S+L) > A	d
$C_{(2)}$		S > L	D
H		L > S	Td

tableau 8 : modalités d'état du facteur « type de sols »

On mettra la cangahua affleurante avec les sols H car on y observe une érosion très grave.

2.3.4.) Le climat (érosivité)

Les 4 modalités du facteur climat présentées au tableau 9 ont déjà été explicitées au paragraphe 2.1.4. Elles traduisent le caractère décroissant de l'érosivité du facteur. On notera l'absence du pédoclimat « aridic » sur notre zone et la présence d'un hybride « ustic-udic » :

Types de pédo-climat	modalités d'état
Pérudic	o
Udic	m
Ustic + udic	d
Udic	D

tableau 9 : modalités d'état du facteur « type de pédo-climat »

3°) Etapes spécifiques à la méthode basée sur la logique floue

Il s'agit maintenant d'attribuer des valeurs numériques aux modalités d'état qu'on vient de déterminer, c'est à dire de définir des fonctions d'appartenance. Comme on l'a souligné dans le chapitre 2, il convient de se donner une logique d'attribution des valeurs numériques avant de lancer l'optimisation sur un ensemble de situations.

3.1.) Résumé des étapes

La méthode d'attribution des valeurs numériques peut être décrite ainsi :

- 1) La logique choisie, dans le cas des facteurs, consiste à découper l'intervalle $[0,1]$ en sous-intervalles d'égale grandeur. Le nombre de sous-intervalles dépend uniquement du nombre de modalités d'état. Les facteurs sont d'abord tous considérés comme des facteurs qualitatifs, i.e. découpés de façon discrète. On attribue alors à chaque modalité d'état du facteur la valeur du centre des sous-intervalles de $[0,1]$. Ainsi, pour un facteur découpé en trois modalités, les valeurs $\{o, m, d\}$ correspondent respectivement à $\{0,16 ; 0,5 ; 0,82\}$. On a bien alors pris le centre des 3 sous-intervalles $[0 ; 0,33]$ $[0,33 ; 0,66]$ $[0,66 ; 1]$.
- 2) Les valeurs numériques des modalités d'état des facteurs étant choisies, on détermine alors celles à affecter aux modalités d'aléa par une logique à peu près identique. Sachant que l'évaluation de l'aléa par opération de moyenne est comprise entre le min. et le max., il paraît plus logique en effet de réduire l'intervalle qui doit être découpé en sous-intervalles aux valeurs possibles d'évaluation, c'est à dire $[\min(\mu_{Ei}), \max(\mu_{Ei})]$. Dans notre cas, on verra que l'intervalle des valeurs de l'aléa est $[0,1 ; 0,9]$.
- 3) On peut alors lancer l'optimisation sous contraintes pour que les valeurs des variables d'entrée (μ_{Ei} , α et p_i) s'ajustent à des situations connues et évaluées par les thématiciens.
- 4) Lorsque les facteurs sont quantitatifs (pente), i.e. continue, l'attribution se fait d'abord de façon identique à celle d'un facteur discret. Puis, on essaie de trouver une fonction $\mu_{Ei} = f(\text{état du facteur})$ qui passe par les points déterminés par optimisation. (voir le cas de la pente)

3.2.) Mise en œuvre des étapes

3.2.1.) Pré-attribution de valeurs numériques

La pré-attribution de valeurs numériques correspond aux points 1 et 2 du paragraphe 3.1. En ce qui concerne le point 1 (attribution de valeurs numériques aux modalités d'état des facteurs), on pourra se référer au tableau 12, à la colonne "valeurs avant optimisation". Le point 2 (attribution de valeurs numériques aux valeurs d'aléa) conduit au tableau d'interprétation des valeurs de l'aléa érosif suivant (tableau 10).

modalités d'Aléa	Valeurs numériques attribuées
faible (f)	0,2
moyen (m)	0,4
fort (d)	0,6
très fort (D)	0,8

tableau 10 : modalités d'aléa

3.2.2.) Optimisation sous contraintes

Cette étape correspond aux points 3 et 4 du paragraphe 3.1.

En pratique, il a été demandé aux thématiciens d'évaluer un nombre restreint de situations afin de mettre en place l'algorithme d'optimisation. Le tableau 11 résume leur expertise. Chaque situation est repérée par son numéro dans le tableau général de toutes les situations qui est fourni en annexe.

Ces situations ont été choisies afin de pouvoir représenter la réalité du terrain. Afin d'améliorer la qualité de l'optimisation sous contraintes, ces situations se répartissent sur tout l'ensemble des situations possibles, et certaines d'entre elles caractérisent le cas où les facteurs changent totalement de modalité d'état (par exemple : passage du premier facteur à une modalité supérieure et des autres à la modalité la plus petite).

Número de la situación	Inclinación de la pente	Taux de couverture	Types de sol	Types de pédo-climat	expertise	expertise traduite
19	o	Td	d	d	f	0,2
29	m	d	o	o	f	0,2
39	m	td	d	d	f-m	0,3
40	m	td	D	D	m	0,4
44	d	o	D	D	f-m	0,3
60	d	Td	D	D	m	0,6
61	o	o	o	o	f	0,2
80	o	Td	D	D	m	0,4
81	m	o	o	o	f-m	0,3
106	d	m	m	m	m	0,4
110	d	d	m	m	d	0,6
120	d	Td	D	D	d	0,6
121	o	o	o	o	f	0,2
156	m	D	D	D	m-d	0,6
161	d	o	o	o	d	0,6
176	d	D	D	D	D	0,8
181	o	o	o	o	f	0,2
200	o	Td	D	D	m	0,4
201	m	o	o	o	d	0,6
218	m	Td	m	m	d-D	0,7
221	d	o	o	o	D	0,8
239	d	Td	d	d	d	0,6
240	d	Td	D	D	D	0,8

tableau 11 : Liste des situations expertisées

Par suite, une optimisation des variables d'entrée a été réalisée grâce au solveur d'Excel utilisant une méthode non linéaire d'optimisation sous contraintes adaptée et robuste (Ladson *et al.*, 1978 ; Ladson & Smith, 1992). Une dizaine de « va et vient » ont été effectués afin de maximiser le coefficient de corrélation entre les valeurs voulues des modalités d'aléa et les valeurs calculées par l'agrégation.

a) Valeurs des pondérations p_i et de α

Nous sommes partis d'une valeur de α appartenant à l'intervalle défini dans le chapitre II. Les contraintes sur α étaient donc d'appartenir à $[0,1]$. La valeur finale s'est révélé être 0,522.

Pour les pondérations, nous sommes partis de valeurs aléatoires mais qui traduisaient la hiérarchie. Les contraintes imposées ont été :

- de respecter la hiérarchie des facteurs,
- d'obtenir une somme des poids valant 1,
- d'obtenir des poids non nuls.

Le résultat final est le suivant : 0,397 pour le facteur pente ; 0,397 pour celui de la couverture végétale ; 0,105 pour le facteur « types de sol » ; 0,101 pour le facteur « pédo-climat ».

b) Fonctions d'appartenance

Le résultat de l'optimisation peut être synthétisé dans le tableau suivant :

Types de facteur	modalités d'état	Valeurs avant optimisation	Valeurs après optimisation
Inclinaison de la pente	o	0,12	0,12
	m	0,37	0,32
	d	0,62	0,62
	D	0,82	0,75
couverture végétale	o	0,16	0,07
	m	0,5	0,51
	d	0,82	0,8
Erodibilité	o	0,1	0,11
	m	0,3	0,21
	d	0,5	0,8
	D	0,7	0,9
	Td	0,9	1
Erosivité	o	0,12	0,32
	m	0,37	0,42
	d	0,62	0,52
	D	0,82	1

tableau 12 : Valeurs numériques finales des modalités d'état des facteurs

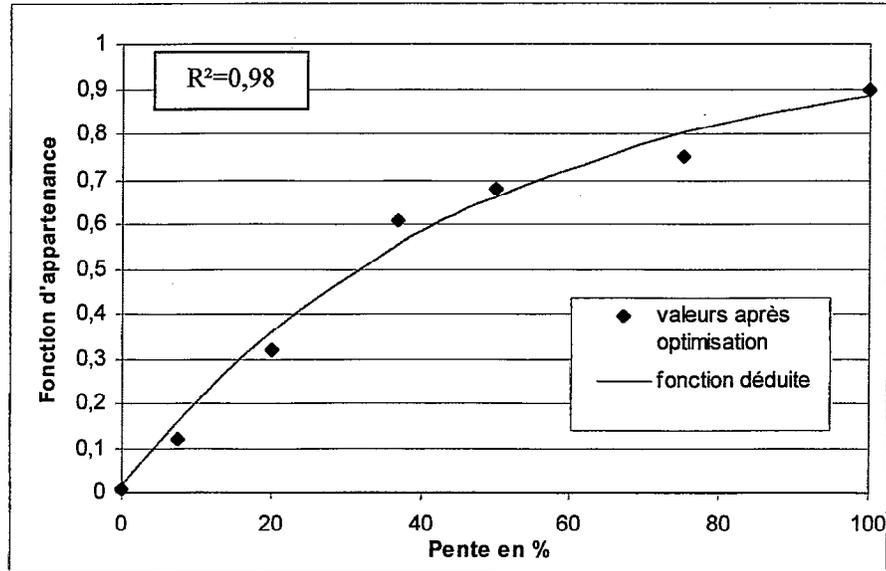
A partir de ce tableau, nous avons déterminé la fonction d'appartenance continue du facteur pente au sous-ensemble flou « état défavorable ». L'équation obtenue est du type :

$$f(\text{pente}) = 1 - A \cdot e^{-B \cdot \text{pente}} \quad \text{où la pente est donnée en \%}$$

les valeurs de A et B trouvées par optimisation sont :

$$A = 0,9838 \text{ et } B = 0,0214.$$

La courbe de la fonction est donnée sur le graphique suivant.



graphique 5 : fonction d'appartenance de la pente à l'ensemble flou « exposition défavorable »

4°) Résultats – Discussion

Nous avons désormais tous les éléments pour mettre en oeuvre la cartographie de l'aléa érosif sur la zone retenue. Cette partie fournit donc les résultats de l'évaluation ainsi que les cartes d'aléa obtenus par les deux méthodes. Pour obtenir ces cartes, les couches du SIG de chaque facteur ont été renseignées et l'agrégation a été effectuée en mode **raster** à une résolution de 55,77m (celle du mnt).

4.1.) Résultats obtenus avec la méthode SIRIS

4.1.1.) Obtention des rangs SIRIS

Le calcul des rangs a été effectué à l'aide d'un programme développé par le laboratoire de spatialisation numérique de l'ENSAR. Le résultat de ce calcul est fourni en annexe.

4.1.2.) Détermination des classes de rang SIRIS

Pour générer une carte lisible de modalité d'aléa érosif évaluées par la méthode SIRIS, nous avons, dans un premier temps, découpé l'échelle des rangs SIRIS en 4 modalités. Cette opération a été faite avec l'aide des thématiciens à partir des rangs SIRIS fournis en annexe. Le résultat obtenu est fourni au tableau 13.

modalités d'Aléa érosif	Classes de rangs SIRIS
o	0-20
m	20-40
d	40-70
D	70-110

tableau 13 : Classes de rangs SIRIS en fonction des modalités d'aléa érosif

On notera que le découpage tient compte des remarques exposées au paragraphe 4.2 du chapitre II. En effet, les modalités d'aléa s'étalent lorsque la gravité de la situation augmente. Cette opération s'avère délicate car le thématicien doit trouver des classes finies sur l'échelle des rangs SIRIS. Ce point de la méthode est très subjectif et certaines évaluations par SIRIS ne rentrent pas dans les classes définies par le thématiciens. Par exemple, les situations 39, 156, 181, 200, 221 et 239 du tableau 11 posent des problèmes. Ces derniers sont dus à l'influence trop importante des facteurs 3 et 4.

4.1.3.) Carte d'aléa érosif

En première approche, la carte d'aléa (voire carte fournie ci-après) générée à l'aide de la méthode SIRIS révèle de façon satisfaisante les problèmes d'érosion de la zone choisie. En effet, les aléas les plus importants se situent aux endroits où les pentes sont les plus fortes. La méthode SIRIS révèle par exemple les gros problèmes d'érosion sur les pentes d'Ilalo constatés par les thématiciens. Les zones de hautes altitudes, à l'est de la carte, où les prairies sont denses, sont reconnues peu affectées par l'érosion, ce qui est confirmé par les thématiciens.

Cependant, il existe des zones qui contredisent les observations de terrain. En effet, à l'est de Pintag, sur le bas des flancs de la cordillère orientale, des zones où l'érosion est forte sont trouvées alors que l'érosion qui est observée est faible à moyenne. Il faut pour expliquer cela interroger les couches du SIG pour s'apercevoir que des sols de type H, un pédo-climat agressif et une couverture moyenne à forte se rencontrent sur ces fortes pentes. On se trouve donc dans une situation où le deuxième facteur doit modérer l'influence des facteurs 3^{ième} et 4^{ième} ordre. Cependant, la modalité du premier facteur étant forte, la méthode SIRIS affecte des notes fortes aux modalités des derniers facteurs (cf chapitre II) et sur-évalue par conséquent l'aléa.

Même si l'appréciation générale est bonne, la carte générée par la méthode SIRIS contient donc des zones sur-évaluées.

Evaluation de l'aléa érosif par la méthode SIRIS sur la zone du Bassin de Quito

Légende

Aléa érosif



Faible



moyen



Fort



Très fort



Pixels non classés
de l'image SPOT



Zone Urbaine



Réseau hydrographique



Lac d'altitude



Echelle:
1/100 000

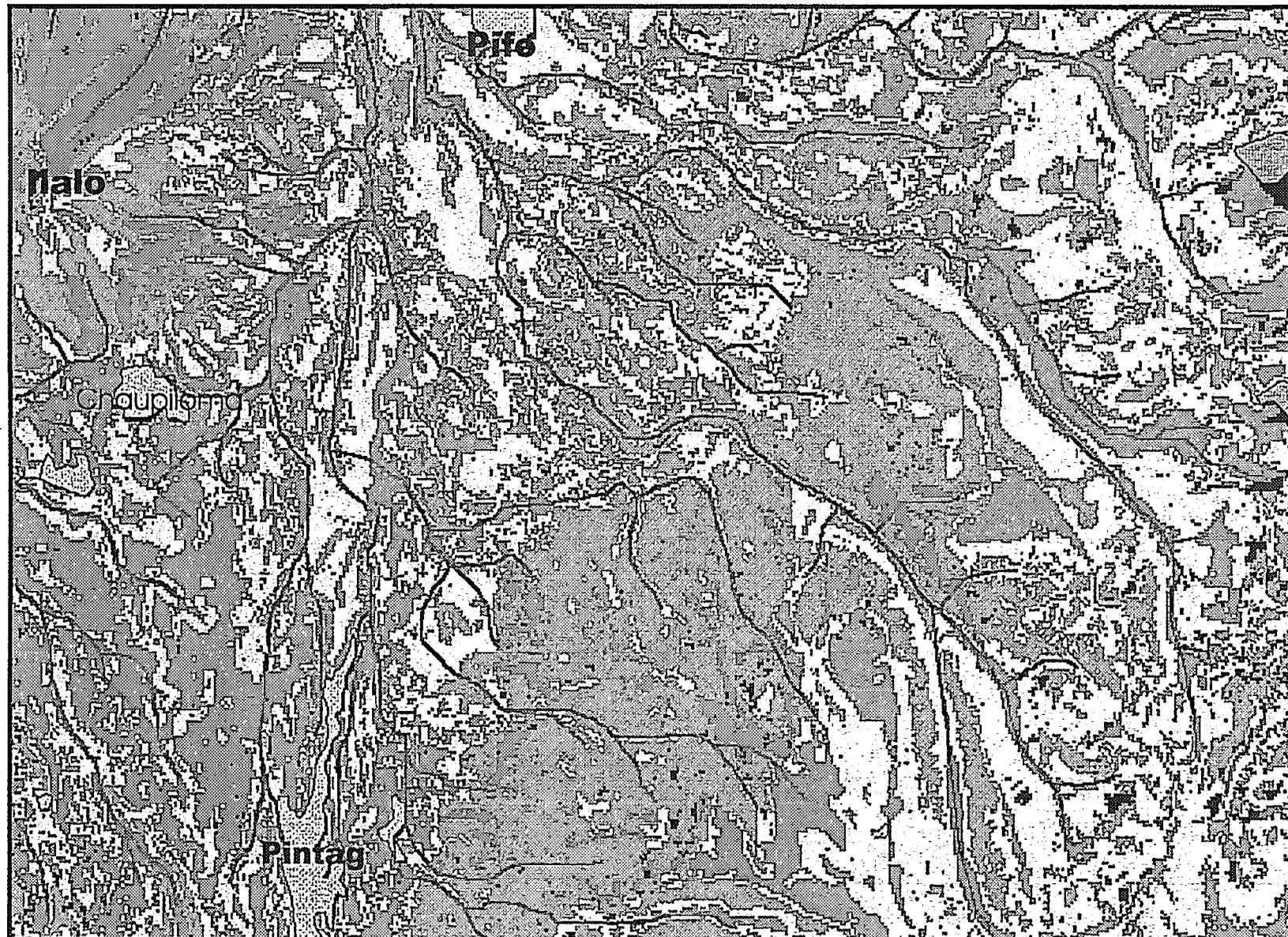
1 Km



Projection :
Universal Transversal Mercator,
Zone 17

787 000

9974 750



9958 000

811 600

4.2.) Résultats obtenus avec la méthode basée sur la logique floue

4.2.1.) résultats de l'optimisation sous contraintes

Le résultat de l'optimisation sous contraintes peut être apprécié par la lecture du tableau suivant :

Numéro de la situation	expertise	expertise traduite	Evaluation par agrégation
19	f	0,2	0,18
29	f	0,2	0,16
39	f-m	0,3	0,36
40	m	0,4	0,4
44	f-m	0,3	0,4
60	m	0,6	0,5
61	f	0,2	0,18
80	m	0,4	0,28
81	f-m	0,3	0,36
106	m	0,4	0,48
110	d	0,6	0,55
120	d	0,6	0,62
121	f	0,2	0,26
156	m-d	0,6	0,64
161	d	0,6	0,58
176	D	0,8	0,75
181	f	0,2	0,3
200	m	0,4	0,43
201	d	0,6	0,52
218	d-D	0,7	0,64
221	D	0,8	0,63
239	d	0,6	0,77
240	D	0,8	0,82

tableau 14 : Evaluation par l'agrégation des situations expertisées

On remarque, sur cet échantillon de 23 situations, que la méthode d'évaluation proposée fournit des valeurs très proches de celles fournies par les thématiciens lors de leur expertise (coefficient de corrélation de Pearson de 0,92 entre ces deux groupes de valeurs).

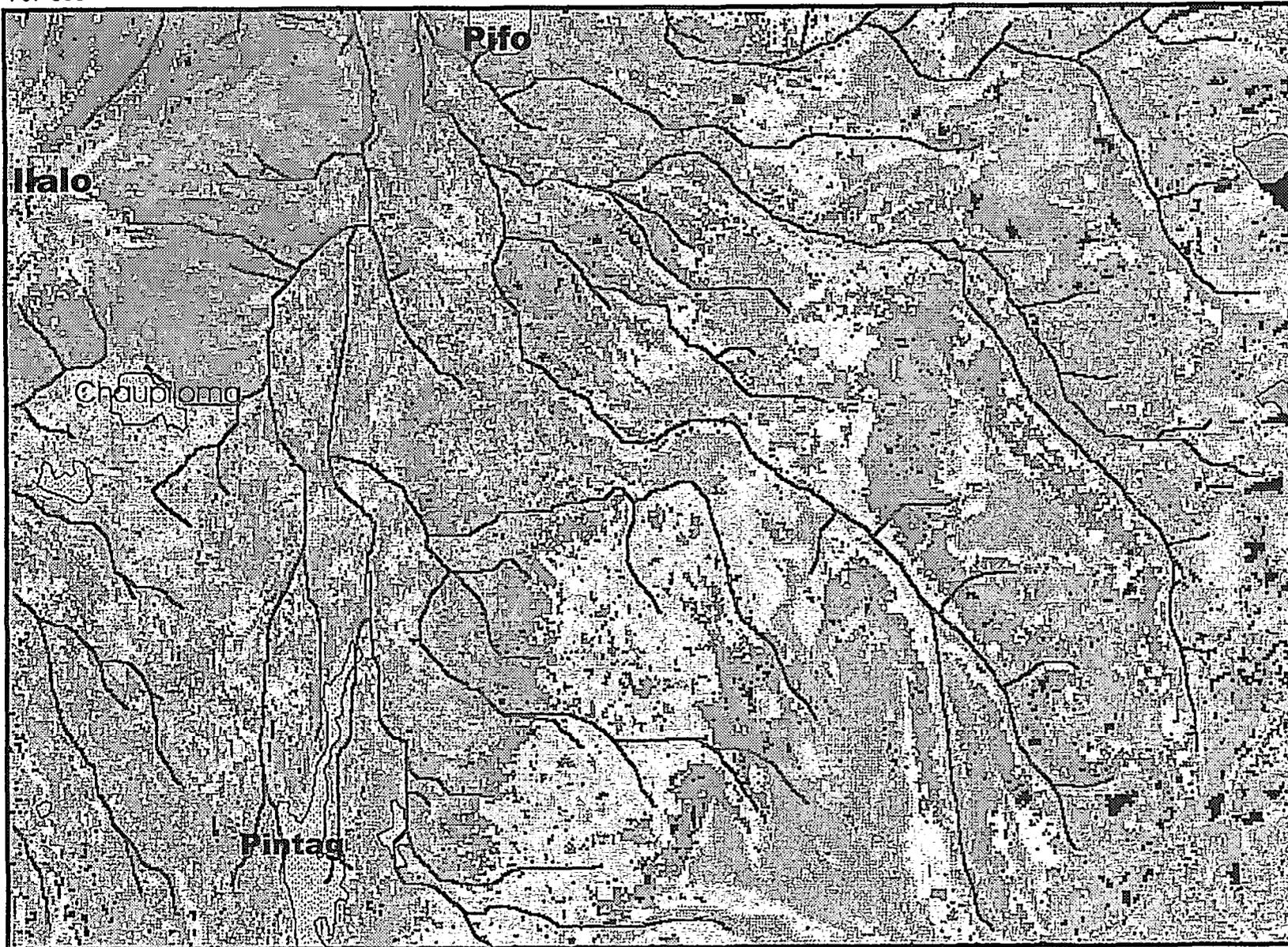
Ce qu'on présentait grâce à l'utilisation de l'algorithme d'optimisation se confirme par la lecture des résultats.

Il est facile de voir que cette optimisation peut être mise en oeuvre sans avoir recours à des outils informatiques perfectionnés, à l'aide d'un tableur ou d'un réseau de neurones.

Evaluation de l'aléa érosif par la méthode basée sur la logique floue sur la zone retenue

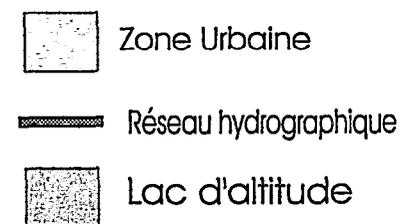
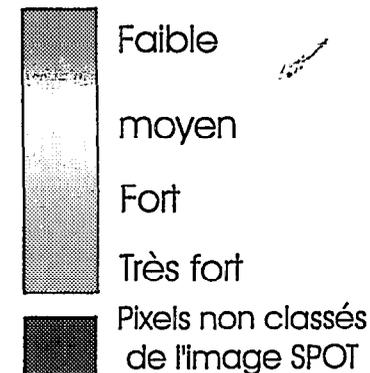
787 000

9974 750



Légende

Aléa érosif



Echelle:
1/100 000

1 Km



Projection :
Universal Transversal Mercator,
Zone 17

9958 000

811 600

4.2.2.) Carte d'aléa érosif

En raison du non fonctionnement du module de croisement des couches en mode raster du logiciel Alliance, un programme simple en C a permis d'effectuer les calculs en mode raster. Ce programme est fourni en annexe. Son algorithme, très simple, a permis de traiter les fichiers Bitmap windows (BMP non compressés).

Une première constatation, à la lecture de la carte, peut être faite : le caractère continu des modalités d'aléa en font un document plus détaillé que celui généré par SIRIS. Cette qualité provient de la souplesse d'interprétation des résultats de la méthode. Cependant, on peut au besoin découper l'évaluation de l'aléa en classes distinctes si cela en simplifie la lecture.

Deuxièmement, la répartition de l'aléa érosif satisfait dans une mesure plus importante que la méthode SIRIS les observations de terrain des thématiciens. Le cas de la zone Est de Pintag, soulevée dans la discussion sur SIRIS (paragraphe 413) ne se retrouve plus dans la carte générée par la méthode utilisant la logique floue. On confirme une nouvelle fois l'adaptation du comportement d'évaluation aux mécanisme du phénomène érosion.

Par conséquent, les thématiciens se sont penchés préférentiellement sur cette carte pour générer le diagnostic nécessaire à la lutte anti-érosive.

Conclusion du chapitre III

Après validation des résultats sur le bassin de Quito, la méthode SIRIS se révèle satisfaisante. Par contre, cette méthode nécessite un logiciel spécifique pour le calcul des rangs. De plus, elle reste peu flexible et le découpage des rangs SIRIS en classes reste une opération délicate, très subjective, qui peut introduire des erreurs d'évaluation qu'on remarque à la lecture des cartes d'aléa.

On a pu, par ailleurs, observer sur un cas concret le bon comportement d'une méthode basée sur la logique floue et l'opération de moyenne. L'ajustement numérique des variables d'entrée aux expertises permet de donner des résultats plus proches de la réalité retranscrite par les thématiciens que la méthode SIRIS (ceci peut être confirmé par le calcul du coefficient de corrélation de rang de Spearman : 0.71 entre SIRIS et l'expertise, contre 0,90 entre l'autre méthode et cette même expertise). De plus, l'optimisation sous contrainte enlève une grosse part de subjectivité qui est souvent reprochée aux méthodes utilisant des pondérations. Une réflexion reste cependant à effectuer sur les modalités d'aléa, dans la mesure où rien ne prouve que ceux-ci se distribuent linéairement sur l'intervalle [0,1], comme nous l'avons admis dans le cadre de cette étude.

Enfin, cette méthode présente l'avantage d'être relativement simple à mettre en œuvre, à l'aide de logiciels de cartographie classiques.

CONCLUSIONS GENERALES

L'objectif que nous nous étions fixé dans cette étude était de fournir un diagnostic, sous forme cartographique, de l'importance de l'érosion hydrique dans le sillon inter-andin de l'Equateur. Cet objectif nous a conduit à effectuer une **analyse thématique** qui a mis en évidence les mécanismes et les facteurs de l'érosion tant dans le cas général que dans le cas spécifique de l'Equateur. A partir des résultats de cette analyse, il nous a été possible de déterminer deux **méthodes d'évaluation qualitatives de l'aléa érosif** basées sur la formalisation de la connaissance des thématiciens. Enfin, à l'aide de ces méthodes, il nous a été possible de **générer les documents cartographiques souhaités** sur une zone représentative de la région étudiée (zone du bassin de Quito).

Nous pouvons à présent dresser un bilan de cette étude et en tirer certaines perspectives.

➤ **Un bilan peut d'abord être tiré des aspects thématiques, méthodologiques et cartographiques de l'étude :**

En effet, **l'analyse thématique**, effectuée avec les thématiciens, a permis d'aboutir à deux conclusions principales. La première conclusion est qu'il existe, en général, quatre grands types de facteurs de l'érosion hydrique : **la topographie, l'occupation du sol, le sol et le climat**. Ces facteurs **interagissent** entre eux. La seconde est qu'en Equateur, **l'érosion hydrique linéaire est le phénomène dominant, ce qui permet de préciser et de hiérarchiser** les 4 grands types de facteur, comme suit :

- i) le facteur « inclinaison de la pente » (topographique) ;
- ii) le facteur « présence de couverture végétale » (occupation du sol) ;
- iii) le facteur « stabilité structurale du sol » (sol) ;
- iv) le facteur « agressivité des pluies » (climat).

Par ailleurs, **la recherche méthodologique** conduit à deux conclusions. Premièrement, l'importance de l'aléa érosif peut être évalué par une combinaison des **facteurs** définis ci-dessus, qui doit prendre en compte leur hiérarchie et leur interaction. Deuxièmement, deux méthodes répondent théoriquement à cette conception d'évaluation de l'aléa érosif :

- **la méthode de rang SIRIS**. Cependant, le caractère non explicite et peu flexible de cette méthode justifie la recherche d'une méthode plus satisfaisante sur le plan mathématique ;
- **une méthode de pondération basée sur la logique floue** et sur une agrégation de sous-ensembles flous par un opérateur de moyenne. Cette méthode est plus explicite mathématiquement. Elle est, par ailleurs, plus flexible grâce à la possibilité d'ajuster, à l'aide de résultats d'expertise des thématiciens, ses paramètres à la hiérarchie et à l'interaction des facteurs de l'érosion.

Enfin, **la cartographie de l'aléa érosif** sur une zone de l'Equateur nous permet d'aboutir à deux constats. Le premier constat est que les deux méthodes testées sont opérationnelles sur ce cas concret. Le second est que la méthode par pondération fournit un résultat plus proche de l'avis des thématiciens que la méthode de rang.

➤ **Un certain nombre de perspectives méthodologiques, pratiques et générales se dégagent ensuite :**

Sur le plan **méthodologique**, **trois perspectives** sont envisageables. Il s'agirait d'abord de poursuivre la réflexion en ce qui concerne le compromis de Zimmerman, afin de bien fixer le rôle des paramètres ω et γ . Par ailleurs, on pourrait tester d'autres opérateurs d'agrégation de sous-ensembles flous tels que les sommes symétriques. Enfin, il serait très enrichissant de développer un module de réseau de neurones pour améliorer l'optimisation des valeurs numériques.

Sur le plan **pratique**, on peut envisager **plusieurs perspectives en matière de cartographie de l'aléa érosif**. Pour un certain nombre de points, ce travail pourrait être approfondi, soit pour améliorer et préciser la modélisation en tenant compte de nouveaux paramètres, soit pour lever certaines incertitudes dans les résultats. Ces points sont les suivants :

- prendre en compte le type de culture par une classification de l'image SPOT à l'échelle de la parcelle ;
- enrichir la couche de répartition spatiale des intensités maximales en 30 minutes ;
- tenir compte de la micro topographie (concavité, convexité de la pente ou de la longueur de pente) ;
- améliorer la qualité des couches d'information.

Par ailleurs, il est possible à partir des résultats obtenus, de continuer l'étude selon différents axes :

- appliquer le modèle à une plus grande échelle en confirmant la vérité des modalités d'état des facteurs pour l'ensemble du sillon inter andin ;
- faire des simulations sur l'influence de couverture du sol ou même de topographie (construction de terrasses) et ainsi, proposer des aménagements de lutte anti-érosive ;
- générer la carte des aléas de l'érosion en nappe et de l'érosion en masse.

Enfin, on peut dégager **deux perspectives générales**. Il serait, d'une part, intéressant de disposer, à l'avenir, d'informations sur les **facteurs humains du risque d'érosion**, c'est à dire sur la dimension "vulnérabilité" de ce risque. Ceci permettrait d'aboutir à une **véritable cartographie du risque d'érosion**. D'autre part, il est important de remarquer que la méthode par pondération basée sur la logique floue peut s'appliquer à tous types d'aléa, et de manière générale à toute évaluation d'un phénomène dépendant de plusieurs facteurs. **Par conséquent, cette méthode pourrait être employée pour évaluer différents types d'aléa et de vulnérabilité, et donc différents types de risque.**

BIBLIOGRAPHIE

Almeida, G., G. De Noni, 1984 Las principales procesos erosivos en Ecuador. ORSTOM, Quito, pp. 31.

Aurousseau, P., C. Gascuel-Oudou, H. Squividant, 1995 Méthode d'évaluation d'un risque parcellaire pour la contamination des eaux superficielles par les pesticides <http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/publica/risque/pest-2.htm>.

Auzet, V., 1987 L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grandes cultures. Organisation environnement, pp. 60.

Bolline, A., 1982 Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse Dr.-Univ., Liège.

Brugnot, G., 1998 Compte rendu du conseil scientifique et technique. *In*: Cemagref (ed.). pp. 23.

Chatelin, et alter, 1995 SIG et évaluation des risques naturels : application aux risques sismiques de Quito Mappemonde, vol. 3. pp. 17-22.

Colmet Daage, alter, 1979 et 1980 Mapas de suelos de la sierra Equatoriana. MAG-ORSTOM, quito.

De Noni, B., G. De Noni, M. Viennot, 1990 Le poids de l'histoire sur la morphogenèse agricole des andes de l'Equateur, Nouvelle série ed, vol. 32, Clermont-Ferrand.

De Noni, G., M. Viennot, J. Asseline, G. Trujillo, 1997 L'homme, la montagne et l'érosion des sols cultivés. Le cas des Andes Equatoriennes (Amérique du Sud). à paraître, pp. plus de 300.

De Noni, G., M. Viennot, G. Trujillo, 1988 Mesure de l'érosion dans les Andes de l'Equateur, vol. XXV, Paris, pp. 183-196.

De Ploey, J., J. Savat, 1968 Contribution à l'étude de l'érosion par le splash. Z. Geomorphol., pp. 174-193.

Depraetere, C., 1992 Demiurge 2.0, Chaîne de production et de traitement de modèle numérique de terrain, Edition ORSTOM ed, Paris, pp. 4-5.

Dubois, D., H. Prade, 1987 Théorie des possibilités. Masson, pp. 84-95.

Ellison, W.D., 1944 Studies of raindrop erosion. Agric. Eng. **25**: 131-181.

Fauck, R., 1956 Erosion et mécanisation agricole. Bureau des sols en Afrique occidentale: 24.

Faure, J.F., 1996 L'érosion des sols dans le bassin inter-andin de l'Equateur: Spatialisation et cartographie des affleurements de "Cangahua" par télédétection. Rapport de DESS-Univ. P. Valéry, Montpellier.

Heush, B., 1970 L'érosion du Pré Rif. Annales Rech. Forestière MAroc. Rabat: 9-176.

Hjulström, F., 1935 Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries. Bull. Geo. Inst. Univ. Uppsala. 25: 293-305 et 442-452.

King, D., Y. Le Bissonais, 1992 Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux. C.R. Acad. Agric Fr. 78: 91-105.

Klir, G., A. Folger, 1988 Fuzzy sets, uncertainty, uninformation. Prentice hall, Angelwood cleef New Jersay, pp. 355.

Ladson, A., S. Smith, 1992 Solving Sparse Nonlinear Programs Using GRG. ORSA Journal on Computing. 4: 2-15.

Ladson, L.S., A. Waren, A. Jain, R. M., 1978 Disign and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programs. ACM Transactions on Mathematical Software. 4: 34-50.

Le Bissonais, Y., C. Montier, J. Daroussin, D. King, 1998 Cartographie de l'aléa "Erosion des sols" en France. I.F.E.N. 18.

Leneuf, N., 1959 L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière : les sols en sont dérivés. Thèse-Fac. Sci., Paris.

Morgan, C., 1986 The relativesignificance of splash, rainwash and wash as processes of siol erosion, pp. 329-337.

Mosimann, T., 1991 Lutte contre l'érosion des sols cultivés. : 187.

Neboit, R., 1991 L'homme et l'érosion. L'érosion des sols dans le monde, vol. 34. Association des Publications de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de Clermont -Ferrand (France), pp. 266.

Poesen, J., 1987 Transport of rock fragments by rill flow. A field study. Catena. suppl. 8: 35-54.

Roose, E., 1973 Dix-sept années de mesure de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse Doct.-Ing. Fac. sci., Abidjan.

Roose, E., 1994 Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), vol. 70. FAO, Rome, pp. 419.

Saint-Joan, D., 1996 Raisonement incertain et flou pour l'aide à la décision dans les Systèmes d'Information Géographique. INFORSID96.

Savat, J., J. De Ploey, 1982 Sheetwash and rill development by surfave flow. *In*: R. B. Bryan and A. Yair (eds.) Badland geomorphomogy and piping. pp. 113-126.

Simon, F., 1995 Analyse des facteurs de risque de transferts des pesticides dans les paysages. Etablissement d'une hiérarchie de ces risques. Application a des bassins versants. Mémoire-ENSAR.

Stocking, M., 1978 A dilemma for soil conservation. *AREA*. **10**: 306-308.

Terry, J.P., 1998 A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. *Soil Res*. **36**: 525-542.

USDA SCSC, 1975 Soil Taxonomy, vol. 436. Agricultural Handbook, pp. 754.

Vaillant, M., J.M. Jouany, J. Devillers, 1965 A Multicriteria Estimation of the Environmental Risk of Chemicals with the SIRIS Method. *Toxicology Madeling*. **1**: 57-72.

Valentin, C., 1978 Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques et interprétation agronomique. Côte d'Ivoire, Abidjan, pp. 141.

Wischemeier, D.A., D.D. Smith, 1960 A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning 7th congrès AISS, vol. 1. pp. 418-425.

Yoeli, P., 1986 Computer executed production of a regular grid of hieght points from digital contours. *The american cartographer*, vol. 13. pp. 219-229.

Zadeh, L.A., 1993 Fuzzy sets. *In*: D. Dubois, H. Prade and R. Yager (eds.) Readings in fuzzy sets for intelligent systems. Morgan Kaufman Publishers Inc. pp. 27-65.

Zymmerman, Zysno, 1983 Decison and aggregation by hierarchical aggregation of information. *Fuzzy sets and system*. **10**: 243-260.

TABLE DES MATIERES

Chapitre I LES FACTEURS DE L'EROSION HYDRIQUE DES SOLS : Cas particulier du sillon inter-andin. 1

1°) L'érosion, un phénomène complexe...	1
1.1.) La notion d'Erosion	1
1.1.1.) Définitions-généralités	1
1.1.2.) Principe	1
1.2.) L'érosion en nappe	2
1.2.1.) Le processus : une érosion discrète mais active.	2
1.2.2.) Facteurs principaux	2
1.3.) L'érosion linéaire	3
1.3.1.) Le processus : une érosion remarquée	3
1.3.2.) Facteurs du ruissellement	3
a) Facteurs intervenant sur le volume d'eau ruisselée	3
b) Facteurs intervenant sur la vitesse de l'eau	4
c) Autres facteurs	5
2°) L'érosion dans le sillon inter-andin (Equateur)	6
2.1.) Situation générale du pays et de l'érosion	6
2.2.) Les principaux facteurs de l'érosion dans le sillon inter-andin	8
2.2.1.) Une topographie contrastée	8
2.2.2.) un climat équatorial de montagne	8
2.2.3.) Les sols	9
2.2.4.) Végétation naturelle et agriculture	10
Conclusion du chapitre I	11

Chapitre II ETUDE DE METHODES COMBINATOIRES DES FACTEURS DE L'ALEA EROSIF 13

1°) Conceptualisation de la notion d'Evaluation d'aléa	14
1.1.) Importance et état d'un facteur	14
1.2.) Contraintes de l'évaluation de l'aléa	14
2°) Utilisation du concept dans la méthode SIRIS (Vaillant et al., 1995)	14
2.1.) Principe	15
2.2.) Mise en œuvre : le système d'auto pénalisation	15
3°) Utilisation du concept dans des méthodes basées sur la logique floue	16
3.1.) Les outils mathématiques de l'évaluation du risque	16
3.1.1.) De l'aléa aux concepts mathématiques	16
3.1.2.) Agrégation de critères d'importance inégale	16
3.1.3.) Les sous-ensembles flous (Zadeh, 1993))	17
3.1.4.) Principes déduits	18
3.2.) Les opérateurs d'agrégation des facteurs.	18
3.2.1.) Attitudes face à la décision et choix des opérateurs	18
3.2.2.) Les opérateurs hybrides	19
3.2.3.) Les opérateurs de moyenne	20
3.3.) Discussions sur les méthodes exposées	21
3.3.1.) Analyse du comportement des opérateurs en fonction de α , ω et γ	21
a) valeurs de α de m_α (opérations de moyenne)	21
b) valeurs de ω et γ (« compromis »)	22
3.3.2.) Discussion sur l'attribution de valeurs numériques dans le cas de l'opération de moyenne	22
4°) Etude des méthodes sur un cas théorique	24
4.1.) Description du contexte du test	24

4.2.) Méthode SIRIS	25
4.3.) Méthode basée sur la logique floue (moyenne)	26
4.3.1.) L'évaluation des situations	26
4.3.2.) Flexibilité de cette méthode et arguments mathématiques	27
5°) Récapitulation de la démarche des méthodes basées sur la logique floue	27
Conclusion du chapitre II	28
Chapitre III APPLICATION DES METHODES RETENUES : cartographie de l'aléa érosif sur une partie du bassin de Quito	29
1°) La zone d'étude	29
2°) Etapes communes aux deux méthodes	29
2.1.) Acquisition des différentes couches	29
2.1.1.) La pente, variable dérivée du MNT	30
a) Le MNT	30
b) Calcul de la pente	30
2.1.2.) Occupation du sol, classification de l'image SPOT multi-spectrale	30
2.1.3.) Types de sols (érodibilité)	33
2.1.4.) Le climat (érosivité)	33
2.2.) Hiérarchisation des facteurs	34
2.3.) Découpage des facteurs en « modalités d'état »	34
2.3.1.) La pente	34
2.3.2.) Pourcentage de couverture	34
2.3.3.) Type de sols (érodibilité).	35
2.3.4.) Le climat (érosivité)	36
3°) Etapes spécifiques à la méthode basée sur la logique floue	36
3.1.) Résumé des étapes	36
3.2.) Mise en œuvre des étapes	37
3.2.1.) Pré-attribution de valeurs numériques	37
3.2.2.) Optimisation sous contraintes	37
a) Valeurs des pondérations p_i et de α	38
b) Fonctions d'appartenance	39
4°) Résultats – Discussion	40
4.1.) Résultats obtenus avec la méthode SIRIS	40
4.1.1.) Obtention des rangs SIRIS	40
4.1.2.) Détermination des classes de rang SIRIS	40
4.1.3.) Carte d'aléa érosif	41
4.2.) Résultats obtenus avec la méthode basée sur la logique floue	43
4.2.1.) résultats de l'optimisation sous contraintes	43
4.2.2.) Carte d'aléa érosif	45
Conclusion du chapitre III	45
CONCLUSIONS GENERALES	46
BIBLIOGRAPHIE	48
TABLE DES MATIERES	51
TABLE DES ILLUSTRATIONS	53

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLES DES CARTES

<i>carte 1 : Situation générale et principaux ensembles topographiques de l'Equateur</i>	6
<i>carte 2 : Carte des principales manifestation de l'érosion en Equateur</i>	7
<i>Carte 3 : Carte de l'aléa érosif sur la zone générée par la méthode SIRIS</i>	42
<i>Carte 4 : Carte de l'aléa érosif de la zone générée par la méthode basé sur la logique floue</i>	44

TABLE DES GRAPHIQUES

<i>graphique 1 : Exemples de fonctions d'appartenance de la pente et des types de sol aux sous-ensembles flous "état défavorable".</i>	17
<i>graphique 2 : Rang SIRIS des situations décrites comme l'explique le 4.2</i>	25
<i>graphique 3 : Evaluation de l'aléa selon les situations par opération de moyenne. Optimisation des valeur sous contraintes</i>	26
<i>graphique 4 : Signatures spectrales des thèmes retenus dans l'espace PIR x R</i>	32
<i>graphique 5 : fonction d'appartenance de la pente à l'ensemble flou « exposition défavorable »</i>	40

TABLES DES TABLEAUX

<i>tableau 1 :Principe du système d'auto-pénalisation . Comité de liaison (1995).</i>	15
<i>tableau 2 : Valeurs caractéristiques de α de m_α</i>	21
<i>tableau 3 :description des facteurs du test</i>	24
<i>tableau 4 : matrice de confusion en fin de classification</i>	31
<i>tableau 5 : hiérarchie des facteurs de l'aléa érosif</i>	34
<i>tableau 6 : Classes d'état de la pente</i>	34
<i>tableau 7 modalités d'état du facteur couverture végétale</i>	35
<i>tableau 8 : modalités d'état du facteur « type de sols »</i>	35
<i>tableau 9 : modalités d'état du facteur « type de pédo-climat »</i>	36
<i>tableau 10 : modalités d'aléa</i>	37
<i>tableau 11 : Liste des situations expertisées</i>	38
<i>tableau 12 : Valeurs numériques finales des modalités d'état des facteurs</i>	39
<i>tableau 13 : Classes de rangs SIRIS en fonction des modalités d'aléa érosif</i>	40
<i>tableau 14 : Evaluation par l'agrégation des situations expertisées</i>	43

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : TYPOLOGIE DES PRINCIPALES CLASSES DE PENTE

ANNEXE 2 : PRINCIPE DE REMPLISSAGE DE LA GRILLE DE
PENALITES DE LA METHODE
S.I.R.I.S

ANNEXE 3 : COMPORTEMENT DE LA MOYENNE EN FONCTION
DE ALPHA

ANNEXE 4 : LISTES DES SITUATIONS DU CAS FICTIF

ANNEXE 5 : TABLEAU DES RANGS SIRIS ET RESULTAT DE LA
MOYENNE SUR CAS FICTIF

ANNEXE 6 : METHODE DE CLASSIFICATION

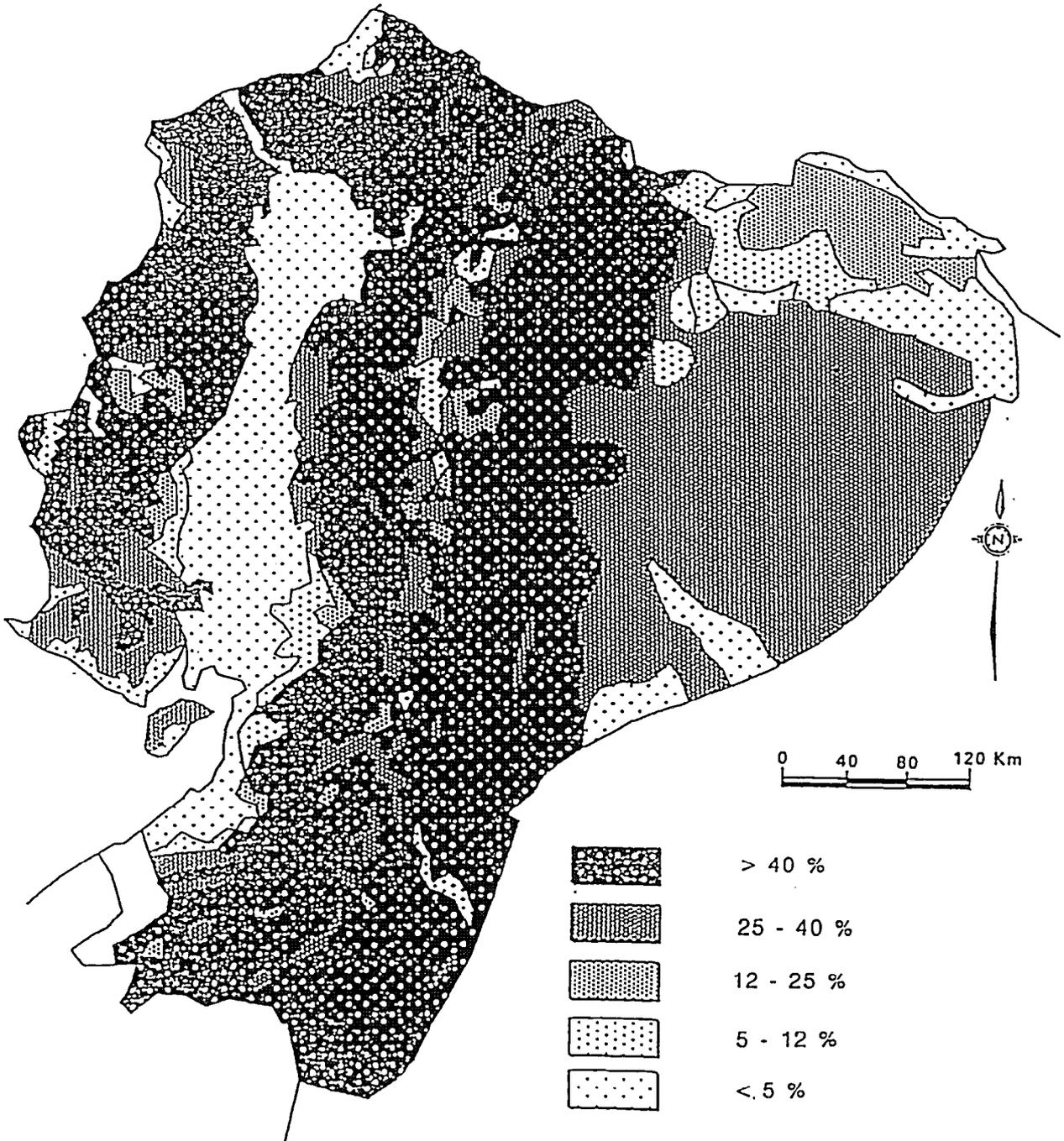
ANNEXE 7 : TABLEAU DES SITUATIONS DU CAS DU BASSIN DE
QUITO ; RANGS SIRIS ET RESULTAT D'EVALUATION DE LA
MOYENNE

ANNEXE 8 : PROGRAMME EN C DE GENERATION DES CARTES
D'ALEA EROSIF

ANNEXE 9 : POSTER GRAND PUBLIC

ANNEXE 1

Typologie des principales classes de pente



ANNEXE 2

PRINCIPE DE REMPLISSAGE DE LA GRILLE DE PENALITES DE LA METHODE S.I.R.I.S

La première règle est la règle d'interaction. Les valeurs des pénalités attribuées aux différentes modalités (sauf pour 'o' qui se voit toujours attribuer la pénalité nulle) dépendent de la situation dans les classes précédentes. En effet, lorsque la situation s'aggrave dans la classe (n), la pénalité attribuée dans la classe (n+1) augmente. En conséquence, les variables de la première classe ont des pénalités invariables.

La deuxième règle est la règle de dissymétrie. Cela concerne l'attribution de la pénalité attribuée à la modalité "m". On a $m = E(d/2)$ donc, $m = d/2$ si d est pair et $m = (d-1)/2$ si d est impair. Cette dissymétrie a une limitation : la pénalité attribuée à "m" doit rester supérieure à la plus haute pénalité attribuée à "m" dans les classes suivantes.

Les modalités sont toujours classées dans le même ordre : « o », « m », « d », « md » et « 2d » (les deux dernières n'étant à considérer que si l'on a deux variables (chacune à trois modalités) dans une même classe d'importance).

On commence par attribuer la pénalité 2 à la modalité « d » du premier bloc de la dernière classe. (On appelle bloc une colonne contenant la succession des différents niveaux d'une variable).

Puis, lorsque dans la classe précédente, la modalité passe de « o » à « d », on incrémente la pénalité attribuée à "d" dans la dernière classe d'une unité etc. On a donc une première série d'incrémentations due à l'avant dernière classe.

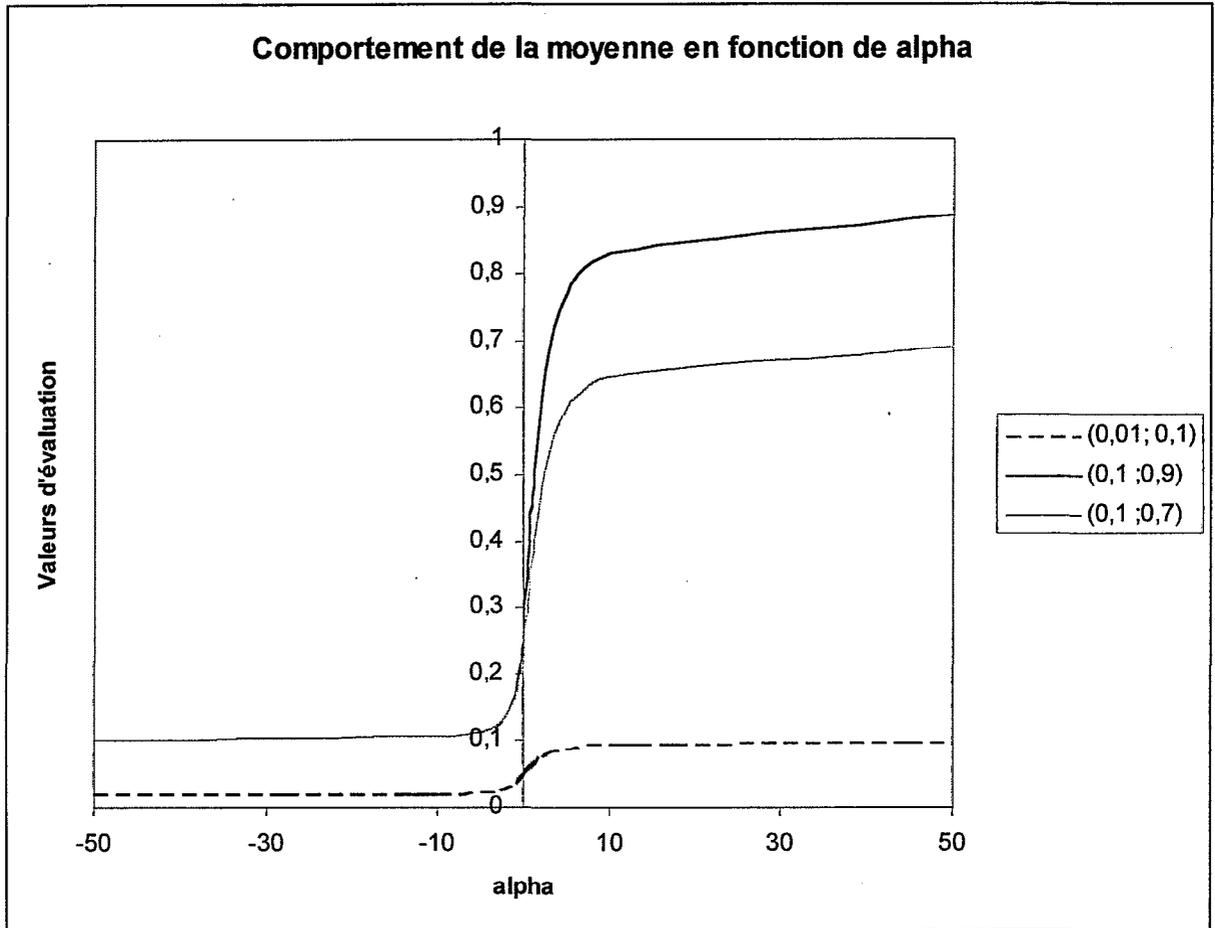
Par ailleurs, lorsque l'on change de modalité dans la pénultième classe, on incrémente la pénalité attribuée à « d » dans la dernière classe d'une unité. Il s'agit de la deuxième série d'incrémentations. Ces procédés sont illustrés dans le tableau suivant:

Classe 1	Classe 2	Classe 3
o	o	o = 0
	d	d = 2
m	o	o = 0
	d	d = 3
d	o	o = 0
	d	d = 4
md	o	o = 0
	d	d = 5
2d	o	o = 0
	d	d = 6
		o = 0
		d = 7

Enfin, pour passer d'une classe à l'autre, la méthode utilisée est celle présentée ci dessous :

Classe 1	Classe 2	Classe 3	Rang
o = 0	o = 0	o = 0 d = 2	0 2
	d = 4	o = 0 d = 3	4 7
m = 4	o = 0	o = 0 d = 3	4 7
	d = 4	o = 0 d = 4	9 13
d = 9	o = 0	o = 0 d = 4	9 13
	d = 5	o = 0 d = 5	15 20
md = 13	o = 0	o = 0 d = 5	13 18
	d = 7	o = 0 d = 6	20 26
2d = 18	o = 0	o = 0 d = 6	18 24
	d = 8	o = 0 d = 7	26 33

ANNEXE 3



Des couples de valeurs ont été évalués par la fonction de moyenne pour différentes valeurs de alpha. Le graphique ci dessus en est le résultat

ANNEXE 4

Listes des situations du cas fictifs et description des modalités d'état

Situations	Pente	p1	μ	couvert	p2	μ	Pedo	p3	μ	Pluie	p4	μ
1	Cl O 0	17	0,01	C2 o 0	17	0,1	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
2		17	0,01		17	0,1		12	0,1	C4 m 1	8	0,3
3		17	0,01		17	0,1		12	0,1	C4 d 2	8	0,9
4		17	0,01		17	0,1	C3 m 3	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
5		17	0,01		17	0,1		12	0,3	C4 m 1	8	0,3
6		17	0,01		17	0,1		12	0,3	C4 d 3	8	0,9
7		17	0,01		17	0,1	C3 d 6	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
8		17	0,01		17	0,1		12	0,6	C4 m 2	8	0,3
9		17	0,01		17	0,1		12	0,6	C4 d 4	8	0,9
10		17	0,01		17	0,1	C3 a 9	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
11		17	0,01		17	0,1		12	0,9	C4 m 2	8	0,3
12		17	0,01		17	0,1		12	0,9	C4 d 5	8	0,9
13		17	0,01	C2 m 4	17	0,5	C3 o 0	12	0,1	C4 O 0	8	0,1
14		17	0,01		17	0,5		12	0,1	C4 m 1	8	0,3
15		17	0,01		17	0,5		12	0,1	C4 d 3	8	0,9
16		17	0,01		17	0,5	C3 m 3	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
17		17	0,01		17	0,5		12	0,3	C4 m 2	8	0,3
18		17	0,01		17	0,5		12	0,3	C4 d 4	8	0,9
19		17	0,01		17	0,5	C3 d 7	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
20		17	0,01		17	0,5		12	0,6	C4 m 2	8	0,3
21		17	0,01		17	0,5		12	0,6	C4 d 5	8	0,9
22		17	0,01		17	0,5	C3 a 1	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
23		17	0,01		17	0,5		12	0,9	C4 m 3	8	0,3
24		17	0,01		17	0,5		12	0,9	C4 d 6	8	0,9
25		17	0,01	C2 d 9	17	0,9	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
26		17	0,01		17	0,9		12	0,1	C4 m 2	8	0,3
27		17	0,01		17	0,9		12	0,1	C4 d 4	8	0,9
28		17	0,01		17	0,9	C3 m 4	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
29		17	0,01		17	0,9		12	0,3	C4 m 2	8	0,3
30		17	0,01		17	0,9		12	0,3	C4 d 5	8	0,9
31		17	0,01		17	0,9	C3 d 8	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
32		17	0,01		17	0,9		12	0,6	C4 m 3	8	0,3
33		17	0,01		17	0,9		12	0,6	C4 d 6	8	0,9
34		17	0,01		17	0,9	C3 a 1	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
35		17	0,01		17	0,9		12	0,9	C4 m 3	8	0,3
36		17	0,01		17	0,9		12	0,9	C4 d 7	8	0,9
37	cl m 9	17	0,4	C2 o 0	17	0,1	C3 O 0	12	0,1	C4 O 0	8	0,1
38		17	0,4		17	0,1		12	0,1	C4 m 2	8	0,3
39		17	0,4		17	0,1		12	0,1	C4 d 5	8	0,9
40		17	0,4		17	0,1	C3 m 4	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
41		17	0,4		17	0,1		12	0,3	C4 m 3	8	0,3
42		17	0,4		17	0,1		12	0,3	C4 d 6	8	0,9
43		17	0,4		17	0,1	C3 d 9	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
44		17	0,4		17	0,1		12	0,6	C4 m 3	8	0,3
45		17	0,4		17	0,1		12	0,6	C4 d 7	8	0,9
46		17	0,4		17	0,1	C3 a 1	12	0,9	C4 o 0	8	0,1

47		17	0,4		17	0,1		12	0,9	C4 m 4	8	0,3
48		17	0,4		17	0,1		12	0,9	C4 d 8	8	0,9
49		17	0,4	c2 m 6	17	0,5	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
50		17	0,4		17	0,5		12	0,1	C4 m 3	8	0,3
51		17	0,4		17	0,5		12	0,1	C4 d 6	8	0,9
52		17	0,4		17	0,5	C3 m 5	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
53		17	0,4		17	0,5		12	0,3	C4 m 3	8	0,3
54		17	0,4		17	0,5		12	0,3	C4 d 7	8	0,9
55		17	0,4		17	0,5	C3 d 10	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
56		17	0,4		17	0,5		12	0,6	C4 m 4	8	0,3
57		17	0,4		17	0,5		12	0,6	C4 d 8	8	0,9
58		17	0,4		17	0,5	C3 a 15	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
59		17	0,4		17	0,5		12	0,9	C4 m 4	8	0,3
60		17	0,4		17	0,5		12	0,9	C4 d 9	8	0,9
61		17	0,4	C2 d 12	17	0,9	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
62		17	0,4		17	0,9		12	0,1	C4 m 3	8	0,3
63		17	0,4		17	0,9		12	0,1	C4 d 7	8	0,9
64		17	0,4		17	0,9	C3 m 5	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
65		17	0,4		17	0,9		12	0,3	C4 m 4	8	0,3
66		17	0,4		17	0,9		12	0,3	C4 d 8	8	0,9
67		17	0,4		17	0,9	C3 d 11	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
68		17	0,4		17	0,9		12	0,6	C4 m 4	8	0,3
69		17	0,4		17	0,9		12	0,6	C4 d 9	8	0,9
70		17	0,4		17	0,9	C3 e 16	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
71		17	0,4		17	0,9		12	0,9	C4 m 5	8	0,3
72		17	0,4		17	0,9		12	0,9	C4 d 10	8	0,9
73	Cl d 19	17	0,7	C2 o 0	17	0,1	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
74		17	0,7		17	0,1		12	0,1	C4 m 4	8	0,3
75		17	0,7		17	0,1		12	0,1	C4 d 8	8	0,9
76		17	0,7		17	0,1	C3 m 6	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
77		17	0,7		17	0,1		12	0,3	C4 m 4	8	0,3
78		17	0,7		17	0,1		12	0,3	C4 d 9	8	0,9
79		17	0,7		17	0,1	C3 d 12	12	0,6	C4 a 0	8	0,1
80		17	0,7		17	0,1		12	0,6	C4 m 5	8	0,3
81		17	0,7		17	0,1		12	0,6	C4 d 10	8	0,9
82		17	0,7		17	0,1	C3 e 18	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
83		17	0,7		17	0,1		12	0,9	C4 m 5	8	0,3
84		17	0,7		17	0,1		12	0,9	C4 d 11	8	0,9
85		17	0,7	C2 m 7	17	0,5	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
86		17	0,7		17	0,5		12	0,1	C4 m 4	8	0,3
87		17	0,7		17	0,5		12	0,1	C4 d 9	8	0,9
88		17	0,7		17	0,5	C3 m 6	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
89		17	0,7		17	0,5		12	0,3	C4 m 5	8	0,3
90		17	0,7		17	0,5		12	0,3	C4 d 10	8	0,9
91		17	0,7		17	0,5	C3 d 13	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
92		17	0,7		17	0,5		12	0,6	C4 m 5	8	0,3
93		17	0,7		17	0,5		12	0,6	C4 d 11	8	0,9
94		17	0,7		17	0,5	C3 a 19	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
95		17	0,7		17	0,5		12	0,9	C4 m 6	8	0,3
96		17	0,7		17	0,5		12	0,9	C4 d 12	8	0,9
97		17	0,7	C2 d 15	17	0,9	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
98		17	0,7		17	0,9		12	0,1	C4 m 5	8	0,3
99		17	0,7		17	0,9		12	0,1	C4 d 10	8	0,9
100		17	0,7		17	0,9	C3 m 7	12	0,3	C4 o 0	8	0,1

101		17	0,7		17	0,9		12	0,3	C4 m 5	8	0,3
102		17	0,7		17	0,9		12	0,3	C4 d 11	8	0,9
103		17	0,7		17	0,9	C3 d 14	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
104		17	0,7		17	0,9		12	0,6	C4 m 6	8	0,3
105		17	0,7		17	0,9		12	0,6	C4 d 12	8	0,9
106		17	0,7		17	0,9	C3 a 21	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
107		17	0,7		17	0,9		12	0,9	C4 m 6	8	0,3
108		17	0,7		17	0,9		12	0,9	C4 d 13	8	0,9
109	Cla 28	17	0,9	C2 o 0	17	0,1	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
110		17	0,9		17	0,1		12	0,1	C4 m 5	8	0,3
111		17	0,9		17	0,1		12	0,1	C4 d 11	8	0,9
112		17	0,9		17	0,1	C3 m 7	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
113		17	0,9		17	0,1		12	0,3	C4 m 6	8	0,3
114		17	0,9		17	0,1		12	0,3	C4 d 12	8	0,9
115		17	0,9		17	0,1	C3 d 15	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
116		17	0,9		17	0,1		12	0,6	C4 m 6	8	0,3
117		17	0,9		17	0,1		12	0,6	C4 d 13	8	0,9
118		17	0,9		17	0,1	C3 e 22	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
119		17	0,9		17	0,1		12	0,9	C4 m 7	8	0,3
120		17	0,9		17	0,1		12	0,9	C4 d 14	8	0,9
121		17	0,9	C2 m 9	17	0,5	C3 o 0	12	0,1	C4 o 0	8	0,1
122		17	0,9		17	0,5		12	0,1	C4 m 6	8	0,3
123		17	0,9		17	0,5		12	0,1	C4 d 12	8	0,9
124		17	0,9		17	0,5	C3 m 8	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
125		17	0,9		17	0,5		12	0,3	C4 m 6	8	0,3
126		17	0,9		17	0,5		12	0,3	C4 d 13	8	0,9
127		17	0,9		17	0,5	C3 d 16	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
128		17	0,9		17	0,5		12	0,6	C4 m 7	8	0,3
129		17	0,9		17	0,5		12	0,6	C4 d 14	8	0,9
130		17	0,9		17	0,5	C3 a 24	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
131		17	0,9		17	0,5		12	0,9	C4 m 7	8	0,3
132		17	0,9		17	0,5		12	0,9	C4 d 15	8	0,9
133		17	0,9	C2 d 18	17	0,9	C3 O 0	12	0,1	C4 0	8	0,1
134		17	0,9		17	0,9		12	0,1	C4 m 6	8	0,3
135		17	0,9		17	0,9		12	0,1	C4 d 13	8	0,9
136		17	0,9		17	0,9	C3 m 8	12	0,3	C4 o 0	8	0,1
137		17	0,9		17	0,9		12	0,3	C4 m 7	8	0,3
138		17	0,9		17	0,9		12	0,3	C4 d 14	8	0,9
139		17	0,9		17	0,9	C3 d 17	12	0,6	C4 o 0	8	0,1
140		17	0,9		17	0,9		12	0,6	C4 m 7	8	0,3
141		17	0,9		17	0,9		12	0,6	C4 d 15	8	0,9
142		17	0,9		17	0,9	C3 e 25	12	0,9	C4 o 0	8	0,1
143		17	0,9		17	0,9		12	0,9	C4 m 8	8	0,3
144		17	0,9		17	0,9		12	0,9	C4 d 16	8	0,9

ANNEXE 5

Tableau des rangs SIRIS et résultats d'évaluation de la méthode basée sur la logique floue. (Cas fictif)

Situations	Rang SIRIS	moyenne	Valeurs voutées	Situations	Rang SIRIS	moyenne	Valeurs voutées
1	0	0,06		52	20	0,34	
2	1	0,07		53	23	0,39	
3	2	0,09		54	27	0,46	
4	3	0,08		55	25	0,40	
5	4	0,10		56	29	0,45	
6	6	0,12		57	33	0,54	
7	6	0,10		58	30	0,45	
8	8	0,12		59	34	0,50	
9	10	0,15		60	39	0,59	
10	9	0,12		61	21	0,35	0,4
11	11	0,14		62	24	0,40	
12	14	0,18		63	28	0,47	
13	4	0,11	0,15	64	26	0,42	
14	5	0,14		65	30	0,48	
15	7	0,17		66	34	0,56	
16	7	0,15		67	32	0,49	
17	9	0,18		68	36	0,55	
18	11	0,22		69	41	0,65	
19	11	0,18	0,2	70	37	0,55	
20	13	0,21		71	42	0,61	
21	16	0,26		72	47	0,71	0,65
22	14	0,21		73	19	0,21	0,2
23	17	0,24		74	23	0,24	
24	20	0,30		75	27	0,30	
25	9	0,15	0,15	76	25	0,26	
26	11	0,18		77	29	0,30	
27	13	0,22		78	34	0,36	
28	13	0,20		79	31	0,31	
29	15	0,23		80	36	0,36	
30	18	0,28		81	41	0,43	
31	17	0,24		82	37	0,35	
32	20	0,27		83	42	0,40	
33	23	0,33		84	48	0,47	
34	21	0,27		85	26	0,34	
35	24	0,31		86	30	0,39	
36	28	0,37		87	35	0,46	
37	9	0,17	0,2	88	32	0,41	
38	11	0,19		89	37	0,47	
39	14	0,24		90	42	0,55	
40	13	0,21		91	39	0,48	
41	16	0,24		92	44	0,54	
42	19	0,30		93	50	0,64	
43	18	0,25		94	45	0,53	
44	21	0,29		95	51	0,60	
45	25	0,35		96	57	0,70	

46	22	0,29		97	34	0,42	0,5
47	26	0,33		98	39	0,48	
48	30	0,39		99	44	0,57	
49	15	0,28	0,3	100	41	0,51	
50	18	0,32		101	46	0,57	
51	21	0,38		102	52	0,67	
109	28	0,24	0,3	103	48	0,59	
110	33	0,27		104	54	0,66	
111	39	0,33		105	60	0,76	
112	35	0,29		106	55	0,65	
113	41	0,34		107	61	0,72	
114	47	0,40		108	68	0,83	0,84
115	43	0,35					
116	49	0,39					
117	56	0,47					
118	50	0,39					
119	57	0,44					
120	64	0,52					
121	37	0,38					
122	43	0,43					
123	49	0,51					
124	45	0,46					
125	51	0,51					
126	58	0,60	0,62				
127	53	0,53					
128	60	0,59					
129	67	0,69	0,7				
130	61	0,58					
131	68	0,65					
132	76	0,76					
133	46	0,47	0,5				
134	52	0,53					
135	59	0,62					
136	54	0,56					
137	61	0,62					
138	68	0,73					
139	63	0,64					
140	70	0,71					
141	78	0,83					
142	71	0,70					
143	79	0,78	0,7				
144	87	0,90					

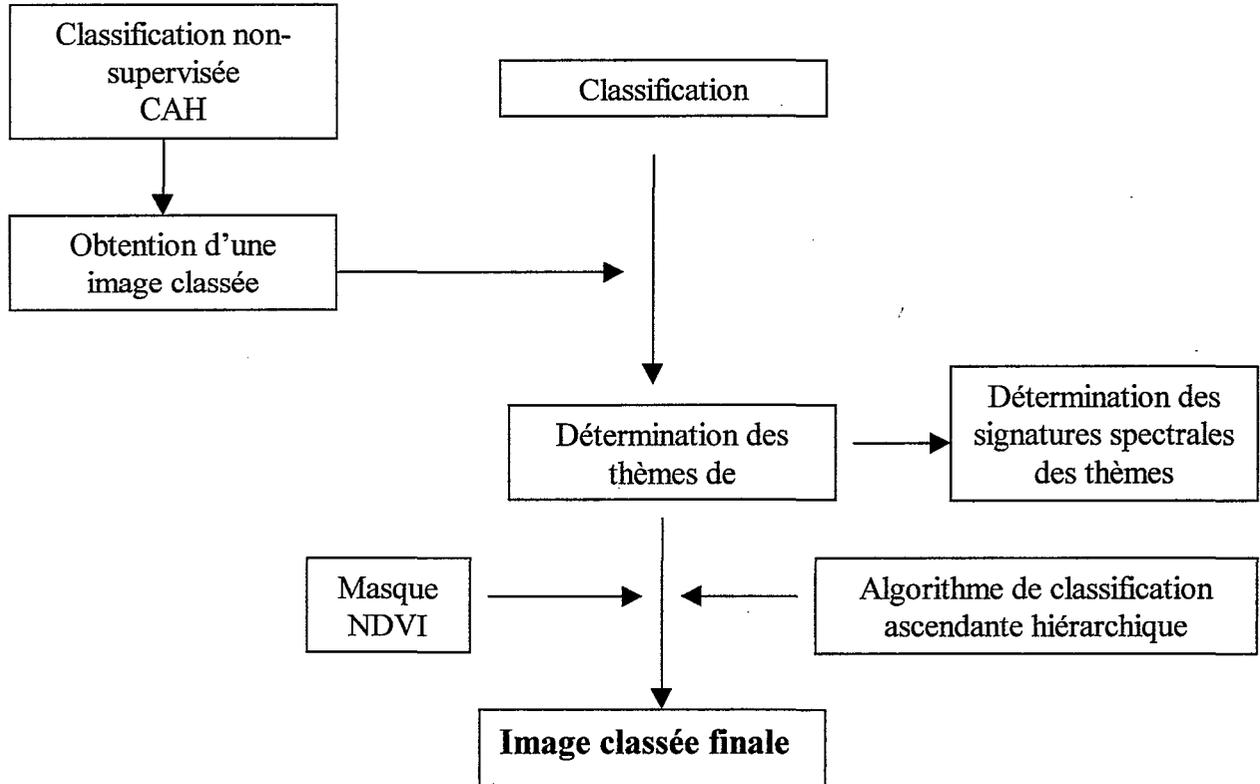
ANNEXE 6

Lorsqu'on effectue une classification supervisée classique, il est courant d'aller sur le terrain pour reconnaître les zones d'apprentissage. Dans notre cas, la partie terrain est impossible. Une solution consiste alors à mettre en oeuvre dans un premier temps une classification non-supervisée de l'image afin de déterminer approximativement les thèmes. On intègre ensuite les thèmes trouvés à une classification supervisée.

Une classification ascendante hiérarchique a été entreprise sur la zone retenue de l'image SPOT multispectrale. L'intérêt du choix d'une telle méthode se situe dans la convergence de l'algorithme utilisé pour un nombre optimal thèmes distincts. Il s'est avéré ici d'être de 10. On obtient une image classée où des polygones d'apprentissage peuvent être déterminés sur les zones les plus homogènes. Ainsi, les signatures spectrales des thèmes supervisés sont déterminées sur des zones de l'image que la classification non-supervisée a classées de façon identique. On resserre alors la limite spectrale de chaque classe.

Cependant, la confusion entre les thèmes était encore importante. On a donc mis en place un algorithme de classification ascendante hiérarchique sur les thèmes de l'apprentissage. Grâce au masque du NDVI, on classe les thèmes végétations puis on classe les autres thèmes. La classification supervisée utilisée pour l'algorithme est une classification barycentrique.

La méthode peut se résumer sur le schéma suivant :



ANNEXE 7

**Tableau des situations du cas de la zone du Bassin de Quito
Classes de rangs SIRIS et résultats d'évaluations après optimisation**

1	C1 o 0	C2 o 0	C3 o 0	C4 o 0	0	0,11
2				C4 m 1	1	0,12
3				C4 d 2	2	0,12
4				C4 e 3	3	0,14
5			C3 m 3	C4 o 0	3	0,12
6				C4 m 1	4	0,13
7				C4 d 3	6	0,13
8				C4 e 4	7	0,15
9			C3 d 7	C4 o 0	7	0,16
10				C4 m 2	9	0,16
11				C4 d 4	11	0,17
12				C4 e 6	13	0,19
13			C3 e 10	C4 o 0	10	0,16
14				C4 m 2	12	0,17
15				C4 d 5	15	0,17
16				C4 e 7	17	0,20
17			C3 f 14	C4 o 0	14	0,17
18				C4 m 3	17	0,17
19				C4 d 6	20	0,18
20				C4 e 9	23	0,20
21		C2 m 5	C3 o 0	C4 o 0	5	0,27
22				C4 m 1	6	0,28
23				C4 d 3	8	0,29
24				C4 e 4	9	0,32
25			C3 m 4	C4 o 0	9	0,28
26				C4 m 2	11	0,29
27				C4 d 4	13	0,30
28				C4 e 6	15	0,33
29			C3 d 8	C4 o 0	13	0,33
30				C4 m 2	15	0,34
31				C4 d 5	18	0,35
32				C4 e 7	20	0,39
33			C3 e 12	C4 o 0	17	0,34
34				C4 m 3	20	0,35
35				C4 d 6	23	0,36
36				C4 e 9	26	0,39
37			C3 f 16	C4 o 0	21	0,35
38				C4 m 3	24	0,36
39				C4 d 7	28	0,36
40				C4 e 10	31	0,40
41		C2 d 10	C3 o 0	C4 o 0	10	0,35
42				C4 m 2	12	0,36
43				C4 d 4	14	0,37
44				C4 e 6	16	0,40
45			C3 m 4	C4 o 0	14	0,36

46				C4 m 2	16	0,37
47				C4 d 5	19	0,38
48				C4 e 7	21	0,42
49			C3 d 9	C4 o 0	19	0,42
50				C4 m 3	22	0,43
51				C4 d 6	25	0,44
52				C4 e 9	28	0,48
53			C3 e 13	C4 o 0	23	0,43
54				C4 m 3	26	0,44
55				C4 d 7	30	0,45
56				C4 e 10	33	0,49
57			C3 f 18	C4 o 0	28	0,44
58				C4 m 4	32	0,45
59				C4 d 8	36	0,46
60				C4 e 12	40	0,50
61	C1 m 10	C2 o 0	C3 o 0	C4 o 0	10	0,18
62				C4 m 2	12	0,19
63				C4 d 5	15	0,19
64				C4 e 7	17	0,22
65			C3 m 5	C4 o 0	15	0,19
66				C4 m 3	18	0,20
67				C4 d 6	21	0,20
68				C4 e 9	24	0,23
69			C3 d 10	C4 o 0	20	0,23
70				C4 m 3	23	0,24
71				C4 d 7	27	0,25
72				C4 e 10	30	0,28
73			C3 e 15	C4 o 0	25	0,24
74				C4 m 4	29	0,25
75				C4 d 8	33	0,25
76				C4 e 12	37	0,28
77			C3 f 20	C4 o 0	30	0,24
78				C4 m 4	34	0,25
79				C4 d 9	39	0,26
80				C4 e 13	43	0,29
81		C2 m 6	C3 o 0	C4 o 0	16	0,36
82				C4 m 3	19	0,37
83				C4 d 6	22	0,38
84				C4 e 9	25	0,42
85			C3 m 5	C4 o 0	21	0,38
86				C4 m 3	24	0,39
87				C4 d 7	28	0,40
88				C4 e 10	31	0,44
89			C3 d 11	C4 o 0	27	0,44
90				C4 m 4	31	0,45
91				C4 d 8	35	0,46
92				C4 e 12	39	0,50
93			C3 e 16	C4 o 0	32	0,45
94				C4 m 4	36	0,46
95				C4 d 9	41	0,47
96				C4 e 13	45	0,50
97			C3 f 22	C4 o 0	38	0,45
98				C4 m 5	43	0,46

99				C4 d 10	48	0,47
100				C4 e 15	53	0,51
101		C2 d 13	C3 o 0	C4 o 0	23	0,46
102				C4 m 3	26	0,47
103				C4 d 7	30	0,48
104				C4 e 10	33	0,52
105			C3 m 6	C4 o 0	29	0,47
106				C4 m 4	33	0,48
107				C4 d 8	37	0,49
108				C4 e 12	41	0,53
109			C3 d 12	C4 o 0	35	0,54
110				C4 m 4	39	0,55
111				C4 d 9	44	0,56
112				C4 e 13	48	0,60
113			C3 e 18	C4 o 0	41	0,55
114				C4 m 5	46	0,56
115				C4 d 10	51	0,57
116				C4 e 15	56	0,61
117			C3 f 24	C4 o 0	47	0,55
118				C4 m 5	52	0,57
119				C4 d 11	58	0,58
120				C4 e 16	63	0,62
121	C1 d 20	C2 o 0	C3 o 0	C4 o 0	20	0,26
122				C4 m 4	24	0,27
123				C4 d 8	28	0,28
124				C4 e 12	32	0,31
125			C3 m 6	C4 o 0	26	0,27
126				C4 m 4	30	0,28
127				C4 d 9	35	0,29
128				C4 e 13	39	0,32
129			C3 d 13	C4 o 0	33	0,32
130				C4 m 5	38	0,33
131				C4 d 10	43	0,34
132				C4 e 15	48	0,38
133			C3 e 19	C4 o 0	39	0,33
134				C4 m 5	44	0,34
135				C4 d 11	50	0,35
136				C4 e 16	55	0,38
137			C3 f 26	C4 o 0	46	0,34
138				C4 m 6	52	0,35
139				C4 d 12	58	0,36
140				C4 e 18	64	0,39
141		C2 m 8	C3 o 0	C4 o 0	28	0,48
142				C4 m 4	32	0,49
143				C4 d 9	37	0,50
144				C4 e 13	41	0,54
145			C3 m 7	C4 o 0	35	0,49
146				C4 m 5	40	0,51
147				C4 d 10	45	0,52
148				C4 e 15	50	0,56
149			C3 d 14	C4 o 0	42	0,56
150				C4 m 5	47	0,57
151				C4 d 11	53	0,58

152				C4 e 16	58	0,63
153			C3 e 21	C4 o 0	49	0,57
154				C4 m 6	55	0,58
155				C4 d 12	61	0,59
156				C4 e 18	67	0,64
157			C3 f 28	C4 o 0	56	0,58
158				C4 m 6	62	0,59
159				C4 d 13	69	0,60
160				C4 e 19	75	0,64
161		C2 d 16	C3 o 0	C4 o 0	36	0,58
162				C4 m 5	41	0,59
163				C4 d 10	46	0,60
164				C4 e 15	51	0,65
165			C3 m 7	C4 o 0	43	0,60
166				C4 m 5	48	0,61
167				C4 d 11	54	0,62
168				C4 e 16	59	0,67
169			C3 d 15	C4 o 0	51	0,67
170				C4 m 6	57	0,68
171				C4 d 12	63	0,70
172				C4 e 18	69	0,74
173			C3 e 22	C4 o 0	58	0,68
174				C4 m 6	64	0,69
175				C4 d 13	71	0,71
176				C4 e 19	77	0,75
177			C3 f 30	C4 o 0	66	0,69
178				C4 m 7	73	0,70
179				C4 d 14	80	0,72
180				C4 e 21	87	0,76
181	C1 e 30	C2 o 0	C3 o 0	C4 o 0	30	0,30
182				C4 m 5	35	0,31
183				C4 d 11	41	0,31
184				C4 e 16	46	0,35
185			C3 m 8	C4 o 0	38	0,31
186				C4 m 6	44	0,32
187				C4 d 12	50	0,33
188				C4 e 18	56	0,36
189			C3 d 16	C4 o 0	46	0,36
190				C4 m 6	52	0,37
191				C4 d 13	59	0,38
192				C4 e 19	65	0,42
193			C3 e 24	C4 o 0	54	0,37
194				C4 m 7	61	0,38
195				C4 d 14	68	0,39
196				C4 e 21	75	0,42
197			C3 f 32	C4 o 0	62	0,38
198				C4 m 7	69	0,39
199				C4 d 15	77	0,40
200				C4 e 22	84	0,43
201		C2 m 9	C3 o 0	C4 o 0	39	0,52
202				C4 m 6	45	0,54
203				C4 d 12	51	0,55
204				C4 e 18	57	0,59

205			C3 m 8	C4 o 0	47	0,54
206				C4 m 6	53	0,55
207				C4 d 13	60	0,57
208				C4 e 19	66	0,61
209			C3 d 17	C4 o 0	56	0,61
210				C4 m 7	63	0,62
211				C4 d 14	70	0,63
212				C4 e 21	77	0,68
213			C3 e 25	C4 o 0	64	0,62
214				C4 m 7	71	0,63
215				C4 d 15	79	0,64
216				C4 e 22	86	0,69
217			C3 f 34	C4 o 0	73	0,63
218				C4 m 8	81	0,64
219				C4 d 16	89	0,65
220				C4 e 24	97	0,70
221		C2 d 19	C3 o 0	C4 o 0	49	0,63
222				C4 m 6	55	0,64
223				C4 d 13	62	0,66
224				C4 e 19	68	0,70
225			C3 m 9	C4 o 0	58	0,65
226				C4 m 7	65	0,67
227				C4 d 14	72	0,68
228				C4 e 21	79	0,72
229			C3 d 18	C4 o 0	67	0,73
230				C4 m 7	74	0,74
231				C4 d 15	82	0,75
232				C4 e 22	89	0,80
233			C3 e 27	C4 o 0	76	0,74
234				C4 m 8	84	0,75
235				C4 d 16	92	0,76
236				C4 e 24	100	0,81
237			C3 f 36	C4 o 0	85	0,75
238				C4 m 8	93	0,76
239				C4 d 17	102	0,77
240				C4 e 25	110	0,82

ANNEXE 8

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
```

```
/*
    Programme de calcul du risque d'érosion par la
    méthode basée sur la logique floue utilisant l'opération
    de moyenne
    paramètre : le nombre de couches et la pondération réduite
    associée
    Ecriture du resultat en char (8 bits)
*/
```

```
/*
    Définition des types
*/
```

```
typedef unsigned char Pixel ;
```

```
typedef struct tab_layer{
    char filename[20] ;
    short entete ;
    float grav /* la gravite reduite */
    Pixel *couche ;
} TAB_LAYER ;
```

```
/*
    Procedure de saisie des parametres
*/
```

```
void saisie(TAB_LAYER *tableau, short nombre){
```

```
short i ;
```

```
for (i=0;i<nombre+1;i++){
```

```
    printf("\nsaisie de la couche %d (Derniere= resultat)",i+1) ;
```

```
    printf ("\nnom du fichier (se mettre dans le bon repertoire) :") ;
    scanf ("%s",tableau[i].filename) ;
```

```
    printf ("\nnombre d'octet de l'entete du fichier :) ;
    scanf ("%hd", &tableau[i].entete) ;
```

```
printf ("\nla gravite reduite associee a la couche :");
scanf ("%f",&tableau[i].grav) ;
```

```
}
```

```
}
```

```
/**************************************************************************
```

```
Procedure ecriture du fichier a partir de la matrice
renvoie le nombre d'objets ecrits
```

```
**************************************************************************/
```

```
void ecriture(Pixel *mnt, short nb_cols, short nb_lg,
              char *file_arrivee){
```

```
FILE *farrivee ;
short i, j, k;
```

```
/* ecriture sur fichier */
printf("Ecriture...") ;
```

```
/* ouverture fichier fin */
farrivee = fopen (file_arrivee, "wb") ;
```

```
if (!farrivee) {
    printf ("Ouverture impossible\n") ;
    return ;
```

```
}else
    printf ("Ouverture OK\n") ;
```

```
fwrite ( mnt, sizeof(Pixel), nb_lg *nb_cols , farrivee) ;
fclose(farrivee) ;
printf("fichier ferme \n") ;
```

```
}
```

```

/*****
                                liberation memoire
*****/

```

```

void fri( TAB_LAYER *tab, short nb){
short i ;
for (i=0;i<nb+1;i++){

    free(tab[i].couche) ;
}
free(tab) ;
}

```

```

/*****
    Procedure lecture du fichier source : lecture du fichier et
    importation dans un tableau a nb_lignes, nb_cols
    Entrees : chemin fichier source, nombre de lignes
    et de colonnes du mnttaille del'entete
    de fichier
*****/

```

```

void lecture_couche(char *filename,short entete,short nb_lignes,
                    short nb_cols, Pixel *mnt ){

```

```

FILE *fdepart ;
Pixel element ;
short i,j,k ;
float nb_element = 0 ; /* nb elements lus par fread ou fwrite */

```

```

/*Ouverture du fichier */
if (!(fdepart = fopen(filename,"rb"))) {

    printf ("Impossible d'ouvrir %s", filename) ;
    exit (0) ;
}

```

```

/* positionnement du pointeur a la fin de l'entete */
if (entete) fseek(fdepart, ((entete) * sizeof(char)), SEEK_SET) ;
/* en octet */

```

```

/* pour toutes lignes et pour toutes les cols */
printf("\npourcent ") ;

```

```

for ( i=0 ; i<nb_lignes ; i++){

    if (i==(nb_lignes - 1)) printf("\nderniere ligne") ;
    if (!(i%100)) printf("\n    %d p100 ",(i*100)/nb_lignes) ;
}

```

```

for ( j=0 ; j<nb_cols ; j++ ) {
    /* lecture de l'element (i,j) */
    k = fread (&element, sizeof(char), 1, fdepart) ;

    /* conversion et archivage */
    *(mnt + (i*nb_cols) + j) = element ;

    /* incrementation du nombre d'elements traites*/
    nb_element += k ;

}
}

/* fermeture du fichier */
fclose (fdepart) ;

printf("\nnombre d'elements lus sur le fichier %f ",nb_element ) ;

}

/*****
    Procedure de calcul du risque d'erosion
*****/
void Calcul(TAB_LAYER *tab, short nb, short lg, short col){

short i,j,k,m ;
double expo,risk=0, alphaw=0,temp=0 ;
float w ;

printf("\nValeur de w :") ;
scanf("%f", &w) ;

    /*lecture des couches*/

for(i=0;i<nb;i++){

    printf("\nde part de la boucle de lecture") ;

    lecture_couche(tab[i].filename,tab[i].entete,
                    col,lg,tab[i].couche) ;

}

    /*calcul et remplissage des cellules */

for ( i=0 ; i<lg ; i++){

if (i==(lg - 1)) printf("\nderniere ligne") ;
if (!(i%100)) printf("\n    %d p100 ",(i*100)/lg) ;

```

```

for ( j=0 ; j<col ; j++ ) {

    for (k=0;k<nb;k++){

        /*lecture de l'exposition*/
        expo=(double)((*(tab[k].couche + (i*col) + j))) ;

        /*calcul de expo a la puissance w*/
        alphaw = pow(expo/100,((double)w)) ;
        /*alphaw = (exp(((double)w)*log(expo/100))) ;*/

        /* Somme des expos a la puissance w*/
        temp += (double)(tab[k].grav) * alphaw ;

    }

    /* calcul de la somme a la puissance (1/w) */
    risk=pow((double)temp,(double)(1/w)) ;

    /* conversion et archivage */
    m = (lg-1)-i ; /* changement d'origine Lower feft -> Up left */
    *(tab[nb].couche + (m*col) + j) =
        (Pixel)(100*(risk)) ;

    temp=0 ;

}
}
}

```

```

/*****

```

Programme principale

```

*****/

```

```

void main(){

TAB_LAYER *tab_layer ;
Pixel *pt_couche ;
char out[20] ;
short nb_couches, test, i, lignes, cols ;
float nb=0 ;

```

```

/*****/

```

```

/* saisie des paramètres */

```

```

printf("\nnombre de couches en entree :");
scanf("%hd", &nb_couches);

/* allocation du tableau de couches */
tab_layer = (TAB_LAYER *)malloc((nb_couches+1)*sizeof(TAB_LAYER));

printf("\nnombre de lignes :");
scanf("%hd", &lignes);

printf("\nnombre de colonnes :");
scanf ("%hd", &cols);

saisie (tab_layer,nb_couches);

        /* fin saisie*/

        /* allocation memoire des couches */
for (i=0 ; i<nb_couches+1; i++){

    tab_layer[i].couche=(Pixel *)malloc
                        (lignes*cols*sizeof(Pixel));

}

        /* Calcul du risque d'erosion*/

printf("\nCalcul...");
    Calcul(tab_layer,nb_couches,lignes,cols);

        /* ecriture du resultat */

/* continuer?*/
printf("\nEcriture?");
scanf("%hd",&test);
if (test) {
        fri(tab_layer,nb_couches);
        exit(1);
}

ecriture(tab_layer[nb_couches].couche, cols, lignes,
        tab_layer[nb_couches].filename);
printf("\nNombre d'elements écrits sur le fichier%f\n",nb);
}

```

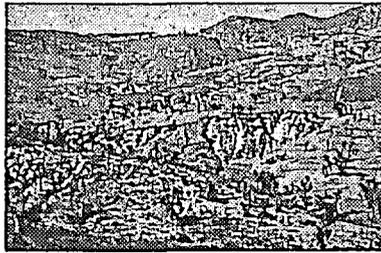
ANNEXE 9

Ce Poster grand public a été présenté au congrès mondial de Science du sol (organisé par l'AISS) qui s'est déroulé à Montpellier en août 1998.

Il résume quelques réflexions sur les méthodes d'évaluation du « risque » (Aléa érosif)

L'analyse spatiale des risques d'érosion

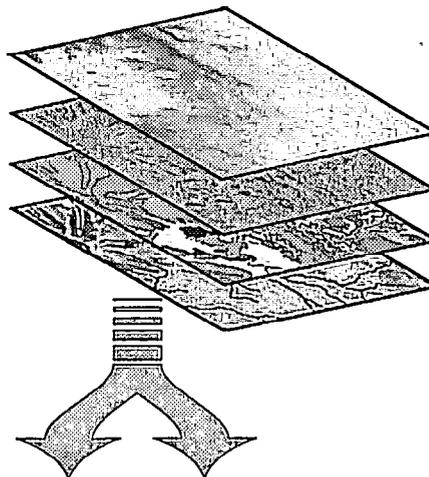
De nombreux pays en voie de développement sont confrontés à des risques d'érosion des sols.



En combinant les facteurs de l'érosion, l'analyse spatiale permet d'évaluer l'importance de ces risques

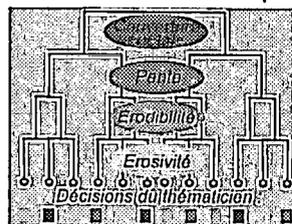
Acquisition et spatialisation des facteurs de l'érosion

Erosivité des pluies
Couverture végétale
Erodibilité des sols
Pente

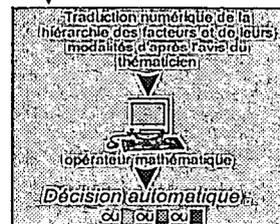


Chacun des facteurs de l'érosion (érosivité des pluies, occupation du sol, érodibilité des sols, topographie) constitue une couche d'information spatiale intégrée dans un système d'information géographique.

Combinaison des facteurs



ou

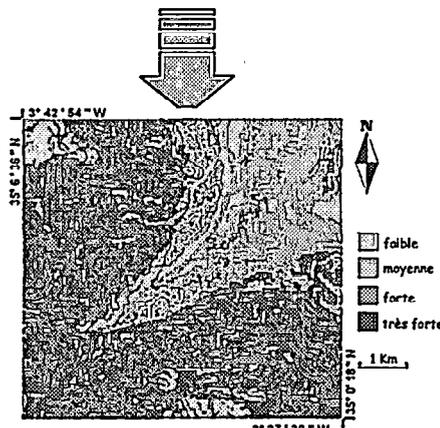


Un arbre de décisions décrit toutes les combinaisons possibles. Dans chaque cas, une décision est prise par le thématicien.

Une combinaison des facteurs à l'aide d'un opérateur mathématique fournit une décision automatique.

Après hiérarchisation et découpage en modalités des facteurs de l'érosion, ceux-ci sont combinés selon différentes méthodes.

Génération de documents cartographiques



Exemple de carte de sensibilité à l'érosion (Maroc, Rif central. Données : H. El Abassi)

On obtient des cartes offrant une aide à la décision pour la lutte anti-érosive : carte de sensibilité à l'érosion, carte de risque actuel ou de risque potentiel.

L'analyse spatiale des risques d'érosion offre une aide à la décision pour la lutte anti-érosive.

RESUME

En raison de l'importance de l'érosion des sols agricoles d'Equateur, la possibilité de disposer d'un diagnostic de cette dégradation sous forme cartographique permet de se doter d'un outil utile au maintien de la fertilité des terres arables. Pour cela, l'avis des thématiciens nous a permis de connaître à la fois le fonctionnement de la dynamique érosive puis de déterminer et de hiérarchiser les facteurs impliqués. Ces contraintes doivent ensuite s'intégrer dans une méthode d'évaluation qualitative de la gravité du phénomène (aléa érosif). Nous avons été amenés à utiliser une méthode déjà éprouvée (méthode de rang SIRIS). Parallèlement, une réflexion a été menée sur la notion d'évaluation de l'aléa érosif permettant de développer une méthode par pondération basée sur des concepts de la logique floue. Les facteurs sont interprétés en termes de sous-ensembles flous puis sont agrégés en un seul sous-ensemble flous représentant l'aléa. Cette méthode se révèle plus souple donc mieux adaptée au phénomène observé. Par la suite, intégrées à un SIG, ces méthodes fournissent le document cartographique désiré.

ABSTRACT

Due to the gravity of soil's erosion in Equator, the availability of a degradation diagnostic map provides a useful tool to preserve the fertility of the arable soils. For this, the expert's view allows us on one hand to know the process of the erosion dynamic and, on the other hand, to determine the erosion factors implicated and to prioritise them. These constraints must then be integrated into a qualitative evaluation method of the gravity of the phenomena (gravity). We used the proven SIRIS method (scoring method). Concurrently, we developed a weighting method based on fuzzy logic concepts. The factors are interpreted in terms of fuzzy subsets and then aggregated into one fuzzy subset representing the gravity. This method proved more flexible and therefor better adapted to the observed gravity phenomenon. These methods, once integrated in a GIS, produce the desired mapping document.