

**GROUPEMENT POUR LE DEVELOPPEMENT
DE LA TELEDETECTION AEROSPATIALE**

ECOLE NATIONALE DES SCIENCES GEOGRAPHIQUES

CETEL 1996 - 1997

**TELEDETECTION ET RISQUES D'EROSION HYDRIQUE
EN CONDITIONS CLIMATIQUES ET TOPOGRAPHIQUES MODEREES**

**Application sur la région centrale de la province de Buenos Aires
Argentine**

Mémoire présenté par

Raul Eduardo RIVAS

pour l'obtention du

**DIPLOME D'ETUDES SUPERIEURES SPECIALISEES
DE TELEDETECTION, METHODES ET APPLICATIONS**

Copyright GDTA 1997
tous droits réservés

Fonds Documentaire ORSTOM



010014020

uniqua
Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : A*14020 Ex: *14*

Mémoire présenté les 8 & 9 juillet 1997 à l'

ECOLE NATIONALE DES SCIENCES GEOGRAPHIQUES

par

Raul Eduardo RIVAS

à l'issue d'un stage d'application au

Laboratoire d'études du Comportement des Sols Cultivés de l'

ORSTOM Montpellier

Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération

devant le Jury d'examen composé de :

Président :	M.	J.	CHOROWICZ	UNIVERSITE PARIS VI
	M.	G.	FLOUZAT	TOULOUSE III
	M.	J-M	BRUSTET	TOULOUSE III
	M.	E.	BEAUVILLAN	E.N.S.G.
	M.	J-P	RUDANT	UNIVERSITE MARNE-LA-VALLEE
	M.	T.	ROUSSELIN	C.T.M.E.
	M.	M.	BERNARD	G.D.T.A.
Rapporteur :	Mme	R.	CHAUME	ORSTOM

Ce mémoire est un rapport personnel de stage ;
en conséquence, il n'engage que le rédacteur à l'exclusion
du GDTA, du laboratoire d'accueil ou du Jury d'examen.

SOMMAIRE

	Page
REMERCIEMENTS	1
RESUMES français, espagnol, anglais	2
INTRODUCTION	3
MATERIELS	5
1- Localisation et contexte agricole de la zone d'étude	5
2- Données satellitales	8
3- Données de terrain	8
METHODOLOGIE	11
1- Rectification géométrique	13
2- Extraction d'informations des données satellitales	13
3- Calcul de réflectance	13
4- Indice de végétation normalisé	14
5- Masques	14
6- Classification multibande	14
7- MNT, carte des pentes et bassin versant	14
ANALYSE DES RESULTATS	15
1- Transformation en réflectance des sols nus	15
2- Valeurs d'IVN	16
3- Classification dirigée	17
4- Carte des pentes et bassin versant	17
DISCUSSION - CONCLUSION	23
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	25

TABLE DES ILLUSTRATIONS

	Page
Figures :	
1 Le bassin versant d'Azul dans la province de Buenos Aires en Argentine	4
2 Localisation de la zone d'étude dans le bassin versant d'Azul	6
3 La zone d'étude	7
4 Relevé de terrain	10
5 Modèle numérique de terrain	12
6 Organigramme de la méthodologie utilisée	13
7 Relation spatiale et altitudinale	15
8 Indice de végétation normalisé	19
9 Classification dirigée	20
10 Carte de pente	21
11 Bassin versant	22
 Graphiques :	
1 Pluviométrie mensuelle moyenne, Azul 1901 - 1996	5
2 Spectres de réflectance des sols du visible au proche infrarouge	11
3 Réflectance dans les canaux en 1986 et 1996	16
4 Réflectance des sols avec pente et sans pente dans le rouge et proche infrarouge	16
5 Radiométrie moyenne de chaque thème dans les canaux (1996)	17
6 Répartition des surfaces en fonction du risque d'érosion	18
 Schéma	
Représentation schématique de la topographie du bassin versant et éléments du profil pédologique des sols caractéristiques de la région.	9

REMERCIEMENTS

La réalisation et la conclusion du travail présenté dans le mémoire suivant ne seraient pas possible sans la contribution de toutes les personnes citées ci-dessous. Je remercie très sincèrement :

Monsieur Usunoff, pour m'avoir permis d'entrer dans le monde de la télédétection et pour m'avoir donné la possibilité de formation au GDTA.

Mes collègues de l'Institut Hydrologique d'Azul, Pablo Weinzettel et Ilda Entraigas pour leur aimable collaboration.

Madame Régine Chaume, pour son accueil chaleureux au Centre ORSTOM de Montpellier, son encadrement technique et ses constants encouragements.

Monsieur Georges De Noni et tous les chercheurs, thésards et autres personnels du Laboratoire d'Etudes du Comportement des Sols Cultivés de l'ORSTOM de Montpellier, pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Messieurs Barthès et Viennot du Laboratoire des sols, pour leur sympathie et pour m'avoir aidé à corriger le texte de mon rapport.

Monsieur Gérard Bonne, pour toute l'aide apportée pendant la durée du CETEL.

Tout le personnel du GDTA, pour sa disponibilité et sa compétence.

Tous mes collègues du CETEL pour les bons moments passés ensemble.

Raymonde, pour l'aide quotidienne apportée, car les corrections faites à mes écrits ont été pour moi d'un grand secours.

Enfin, je remercie Maru, ma fiancée, pour sa patience et pour m'avoir soutenu constamment tout au long de mon travail.

RESUME

Dans la région centrale de la province de Buenos Aires en Argentine, les sols argileux sont sensibles à l'érosion hydrique, dans le secteur sud où l'on rencontre du relief. Cette érosion génère des pertes de terre importantes.

Une méthode est proposée afin d'une part, d'identifier les surfaces dégradées à partir d'images SPOT et d'autre part, d'évaluer les risques d'érosion sur les bassins versants à partir d'un modèle numérique de terrain.

La combinaison des données relevées sur le terrain (hiver 1996) avec l'information radiométrique extraite des images SPOT (KJ 697-424 des 06/06/86 et 12/07/96) permet d'utiliser des critères indirects révélant en surface la présence de phénomènes érosifs ou associés à l'érosion. Afin de déterminer les risques de ruissellement potentiel maximal, un modèle numérique de terrain a été réalisé ainsi qu'une carte des pentes et une carte de répartition des eaux dans la zone de relief étudiée, mettant en évidence des secteurs plus sensibles.

A la lumière des résultats obtenus, la méthode s'est avérée tout à fait pertinente pour les milieux des sols argileux. En effet, elle permet l'identification, sur les images, de variation d'érodabilité. D'autre part, elle révèle qu'il existe un risque d'érosion sur plus de 1000 hectares.

Mots clés : Erosion - Risques - SPOT - Télédétection.

RESUMEN

En la región central de la provincia de Buenos Aires en Argentina, los suelos arcillosos desarrollados en torno a sierras son sensibles a la erosión hídrica. Esta erosión genera pérdidas de tierra importantes.

Un método es propuesto a fin de una parte, identificar las superficies degradadas a partir de imágenes SPOT y, de otra, evaluar los riesgos de erosión sobre las cuencas a partir de un modelo numérico de terreno (MNT).

La combinación de datos de campo (invierno 1996) con la información radiométrica aportada por las imágenes SPOT (KJ 697-424 des 06/06/86 et 12/07/96) permite de utilizar criterios indirectos que revelan los fenómenos erosivos o asociados a la erosión. Con el fin de determinar los riesgos de erosión superficial máxima, un MNT a sido realizado, y asociado a este una carte de pendientes y de repartición de las aguas en las sub-cuencas convergentes sobre la zona de relieve ponen en evidencia los sectores más sensibles.

A la luz de los resultados obtenidos, la metodología de trabajo es considerada adecuada para medios con suelos arcillosos. En efecto, ella permite la identificación, sobre las imágenes, de variación de superficies erosivas. De otra parte, se identifica que existe un riesgo de erosión sobre más de 1000 hectáreas.

Palabras claves : Erosión, riesgos, SPOT, Teledetección

ABSTRACT

In the central region of Buenos Aires' province in Argentina, clayey soils are sensitive to hydric erosion, in south sector with relief. This erosion generates important loss of soils.

A method is proposed, first of all to identify degraded area with SPOT data and also to measure erosion risks over watersheds using a digital elevation model.

Field data combined with radiometric SPOT data make it possible to use indirect criteria showing erosive phenomena and/or associated to erosion. In order to determine maximal runoff risks, a digital elevation model was made, as well as a slope map and a water distribution map over the studied relief area, highlighting more sensitive parts.

By looking at the results, the method has proved relevant to clayey soils environments. It allows indeed to (point out/highlight/identify) variation of the ability to erosion on the images. Moreover, it shows an erosion risk on more than 1000 hectares.

Key words : Erosion, Risks, SPOT data, Remote Sensing.

INTRODUCTION

Les récents changements du prix des céréales au niveau mondial ont conduit à l'augmentation de la surface agricole exploitée en Argentine, en particuliers dans la région du bassin versant d'Azul, situé dans le centre de la province de Buenos Aires. Ce bassin versant, comporte une zone de forte production agricole, où l'on rencontre un relief montagneux.

Les observations de terrain montrent qu'il existe un risque potentiel d'érosion.

Connaître l'évolution de l'érosion hydrique dans la région montagneuse contribuera à une meilleure gestion du milieu.

Développer une méthodologie d'identification et d'évolution du milieu, permettra de prendre des mesures correctives d'intervention.

La télédétection spatiale, au travers des satellites dédiés aux ressources terrestres tels que les séries Landsat ou Spot, est un outil de nouvelle génération qui permet d'obtenir la distribution spatiale de certains paramètres de la surface terrestre à un moment donné, sur une large zone (Hellden et Olsson, 1986; Bocco et Valenzuela, 1988). De plus, la possibilité de passages fréquents et réguliers sur les sites étudiés par les plates formes satellitales facilite l'introduction de variables temporelles et les résolutions spatiales utilisées aujourd'hui peuvent atteindre une précision cartographique considérée comme compatible avec les grandes échelles (King et al., 1989; Cyr et al., 1991).

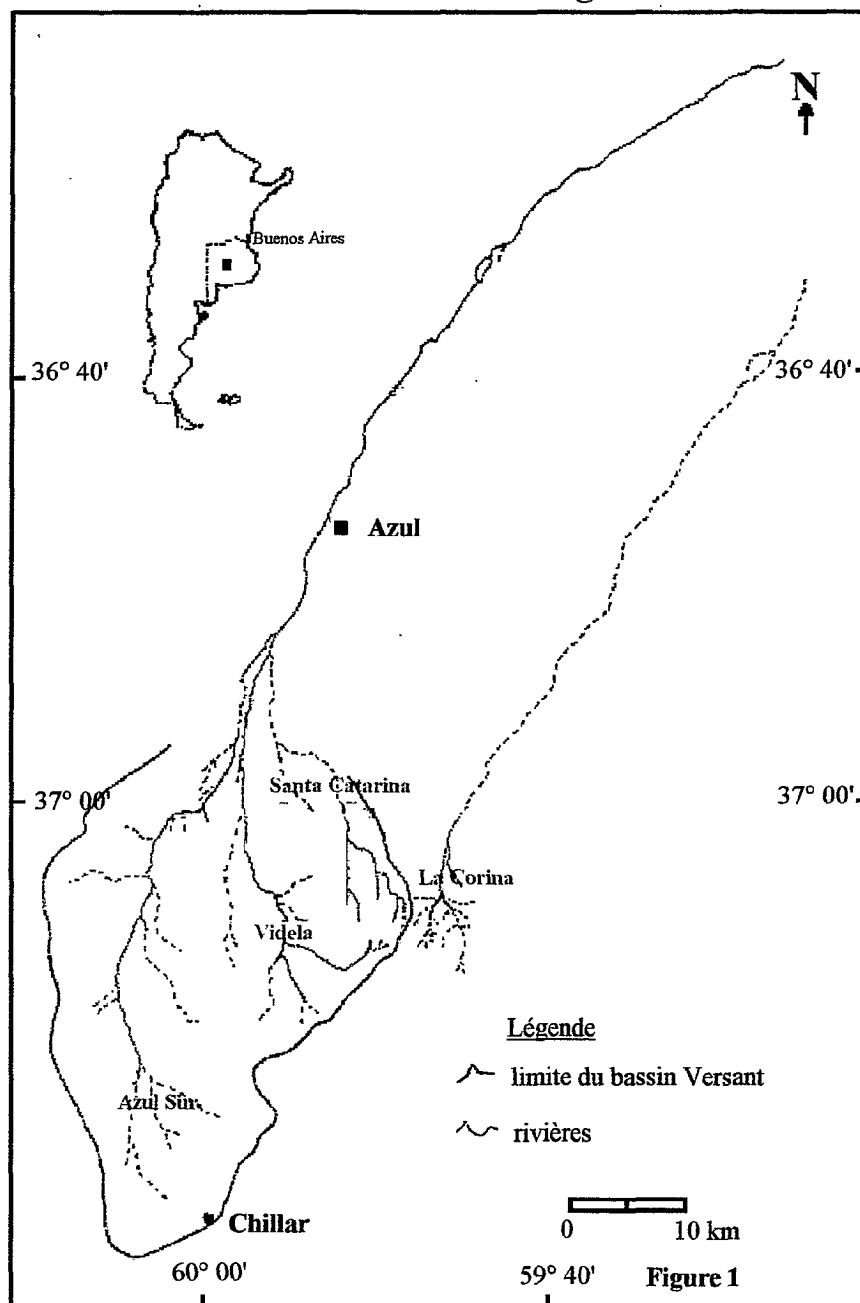
Etant donné que la gamme de résolution actuellement disponible ne permet pas encore d'envisager une cartographie directe des signes d'érosion tels que les rigoles ou même les ravines (Evans, 1990), il est nécessaire d'étudier des critères indirects révélant en surface la présence de phénomènes érosifs ou associés à l'érosion tels que, par exemple, la mise à nu des horizons sous-jacents des sols communément appelée « sols tronqués » (Fraziers et Cheng, 1989 ; Dubucq et al., 1991) ou la modification des couvertures végétales (De Vliegheer, 1990).

Dans ce cas d'étude, on propose sur une zone test :

- d'identifier les sols nus à différents états de dégradation à partir de 2 scènes SPOT multibande (07/96-06/86) ;

- et d'obtenir une carte de ruissellement potentiel maximal.

Le bassin versant d'Azul dans la province de Buenos Aires en Argentine



D'après Sala, 1985

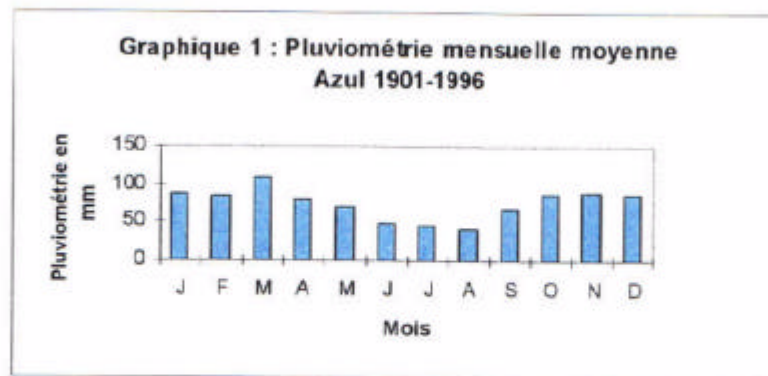
MATERIELS

1- Localisation et contexte agricole de la zone d'étude

La zone d'étude (100 km²) est située dans le bassin versant (BV) d'Azul, province de Buenos Aires en Argentine (*figures 1 et 2*). Au sud du BV, le paysage géomorphologique se caractérise par un relief de faible altitude : de 280 msnm¹ à un maximum de 378 msnm. Ce relief est marqué par les Monts "La Crespa"(378 mètres), "La Armonia" (359 mètres) et "Siempre Amigos" (283 mètres) (Marchionni, 1995), où affleure une roche de type migmatite, entourée d'une zone de dépôts alluvionnaires du quaternaire (*figure 3*). C'est là que trois ruisseaux prennent leur source : La Corina, orientée nord/est, Videla et Santa Catarina, à l'ouest, composant une partie du réseau hydrographique du bassin versant d'Azul.

Dans ce secteur, on rencontre 3 unités géomorphologiques avec un relief ondulé en piémont, plus ou moins en pente en périphérie des "montagnes" et accidenté aux sommets, où l'érosion hydrique peut être importante selon l'intensité de la pluviométrie.

La hauteur de pluie annuelle oscille entre 600 et 1400 mm (Usunoff et Varni, 1995). La plupart des événements pluvieux se concentrent de mars à mai et d'octobre à novembre (*graphique 1*).



La fréquence et l'intensité pluviométrique horaire peut atteindre des maximums d'octobre à mai (Sala et al., 1987).

Maximums des précipitations enregistrés sur une période de 64 ans, selon la durée de la pluie :

Durée	Précipitations en mm
5 minutes	12
15 minutes	28
30 minutes	41
1 heure	59
3 heures	66
6 heures	105
12 heures	108
24 heures	199

¹ mètres sur le niveau de la mer

Localisation de la zone d'étude
dans le bassin versant d'Azul

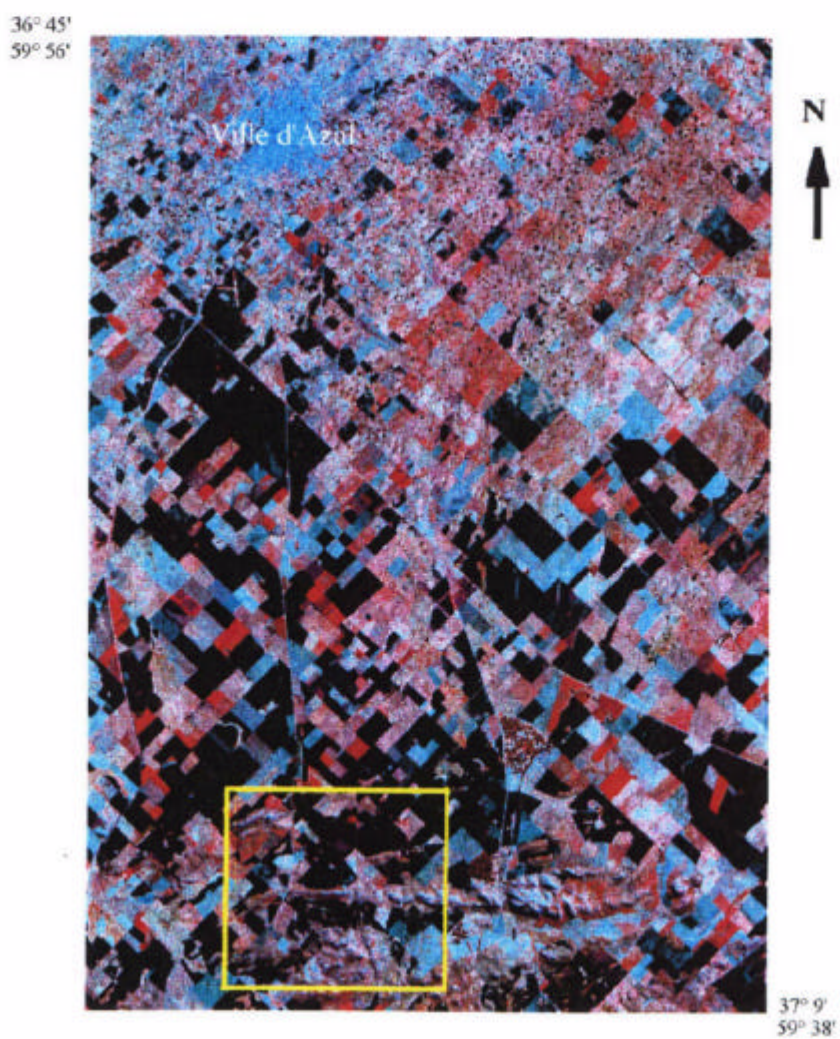
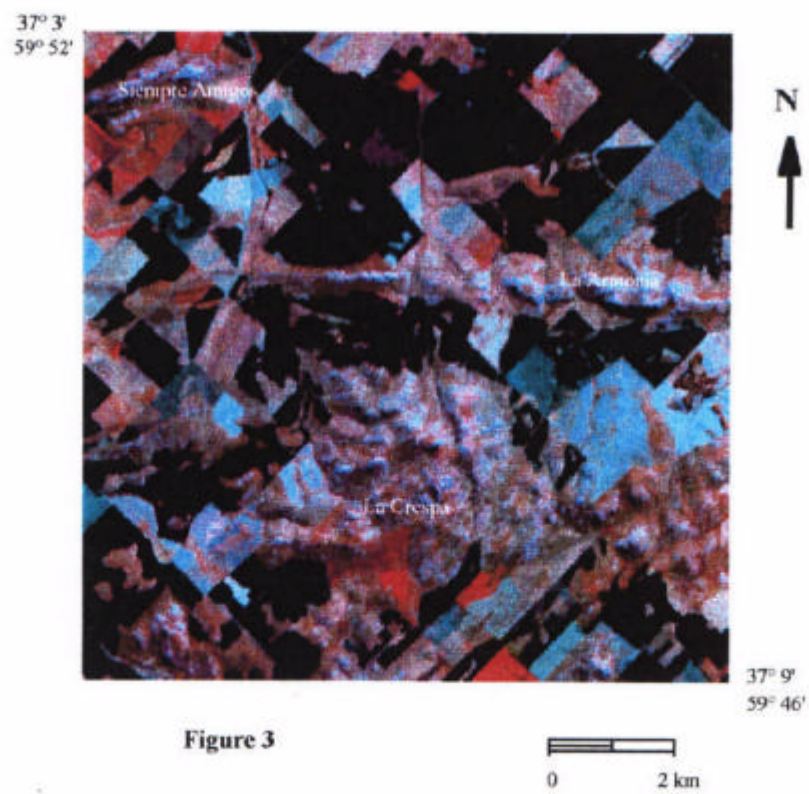


Figure 2

0 5 km

Zone d'étude



Les sols présents dans cette région sont, selon la classification "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1975) des Etats-Unis : des hapludols, des argiudols et localement des aquidols, développés sur une faible profondeur, (*voir schéma page 9*) (Piscitelli, 1993). Il est important de remarquer que c'est dans les argiudols que l'infiltration est la plus faible et la saturation du sol la plus rapide, où le ruissellement correspond à la quantité d'eau qui tombe, entraînant des pertes en terre non négligeables.

Le paysage agricole de type ouvert est dominé par la grande culture : blé, maïs, tournesol,... et par les pâturages (prairies cultivées). La majorité des parcelles sont de taille moyenne pour la zone, soit 80 à 100 hectares. Ceci n'est pas sans conséquence dans les zones de pente, pour l'accélération du ruissellement ; d'autant plus que les façons culturales (labour, hersage, semis) se font dans le sens de la pente.

Une base de données géographiques détaillée décrit ce site sous le système Alliance² : bassin versant, géologie, courbes de niveau topographiques et courbes de niveau phréatiques.

2- Données satellitales

Deux scènes du satellite Spot, couvrant la zone de relief (KJ 697-424), ont été acquises le 6 juin 1986 et le 12 juillet 1996. Chacune des images est disponible dans un format multibande (3 bandes : vert, rouge et proche infrarouge) et numérique.

3- Données de terrain

Collecte de données de référence :

Simultanément à l'acquisition de l'image du 12 juillet 1996, afin de fournir des références de terrain pour l'interprétation des données satellitales, un relevé de terrain, le long des axes principaux, a permis d'identifier l'occupation du sol sur plus de 70 parcelles (*figure 4*). Trois groupes de parcelles ont été distingués en fonction des cultures : fort recouvrement (prairies), moyen (parcours, chaume) et faible recouvrement (sol nu, sol avec blé au stade levée).

Pour les sols de forte et moyenne couverture végétale, le signal radiométrique enregistré par les systèmes de télédétection, opérant dans les domaines visible et proche infrarouge, n'est pas influencé de façon significative par le sol. Cependant, le type de culture a été noté pour permettre la discrimination des zones en végétation. Par contre, les parcelles du troisième groupe sont assimilées à **des sols nus**.

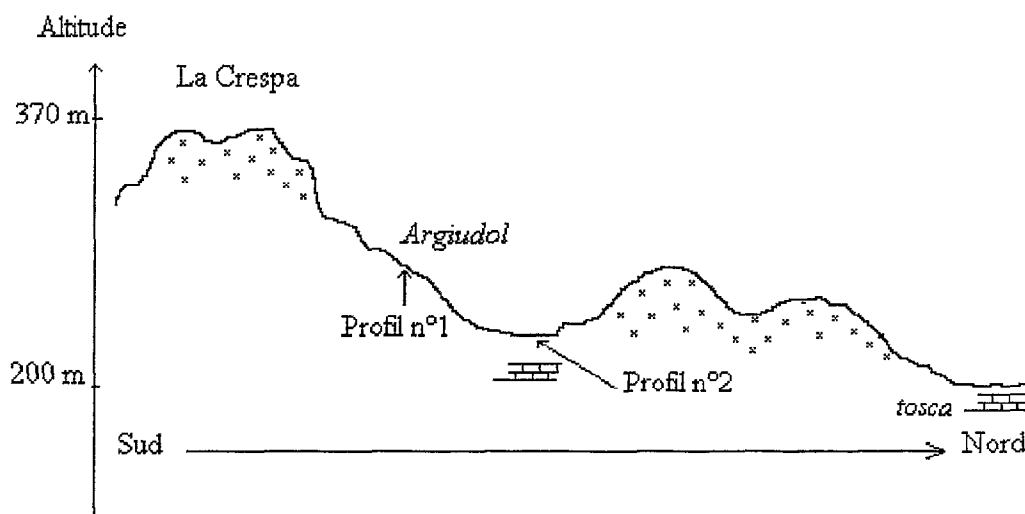
Les sols de la région sont composés principalement d'argile de type illite et montmorillonite (30% argile, 30% limons) avec 6% de matière organique, ce qui leur confère une couleur très brune (10YR 2/2 en sol humide et 10YR 4/1 en sol sec³).

Globalement, la réflectance des sols varie beaucoup en amplitude moyenne. En effet, il existe toute la gamme de situations entre les sols très clairs qui réfléchissent fortement le rayonnement solaire (très sableux, très calcaires, ou encore gypseux...) et les sols très foncés

² Alliance : logiciel SIG développé par la société ICARE INTERNATIONAL.

³ Classification du code Munsell (1985)

Représentation schématique de la topographie du bassin versant et éléments du profil pédologique des sols caractéristiques de la région



Source : Carte des sols - Feuille 3760-16 Azul. INTA Argentine.

Profil n°1 :

Epaisseur	Couleur (selon Code Munsell)	Taux de M.O.
0 - 15 cm	10 YR 2/1 (Noir)	7,7 %
16 - 20 cm	10 YR 2/1 (Noir)	7,7 %
21 - 29 cm	10 YR 2/1 (Noir)	3,4 %
30 - 63 cm	7,5 YR 3/2 (Foncé)	0,5 %
64 - 88 cm	7,5 YR 4/4 (Foncé)	0,3 %

Profil n°2 :

Epaisseur	Couleur (selon Code Munsell)	Taux de M.O.
0 - 23 cm	10 YR 4/1 (Gris foncé sec)	7%
	10 YR 2/1 (Noir humide)	
24 - 31 cm	10 YR 3/2 (Gris très foncé)	4,5 %
	10 YR 2/2 (Foncé humide)	
32 - 54 cm	7,5 YR 5/4 (Foncé)	2%
	7,5 YR 3/2 (Foncé)	
55 - 70 cm	7,5 YR 5/4 (Foncé)	1%
	7,5 YR 4/4 (Foncé)	
plus de 70 cm	Tosca (niveau calcaire)	

Relevé de terrain
 (20/07-05/08/1996)
 D'après Ilda Entraigas

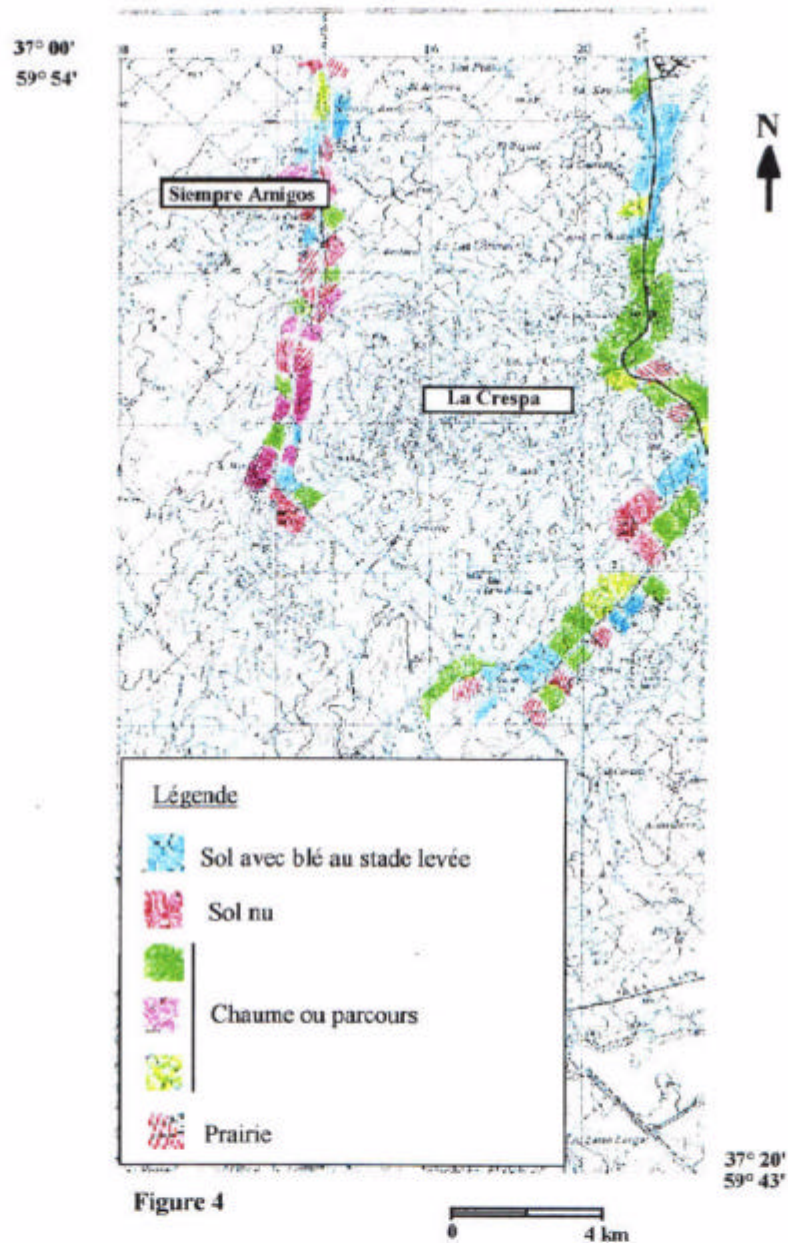
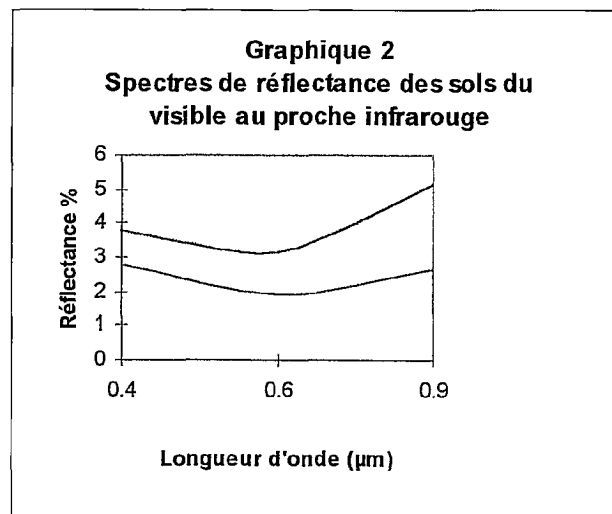


Figure 4

qui absorbent la majorité du rayonnement (très argileux, riches en matières organiques) (Bonn, Escadafal, 1996 ; Rondeaux, 1996).

Le graphique 2 illustre le type de courbe de réflectance observée dans le visible, proche infrarouge pour les sols argileux de la région.



L'allure concave du spectre se retrouve quel que soit le taux d'humidité des sols (la courbe inférieure représente le spectre d'un sol plus humide que celui de la courbe supérieure).

Dans leurs travaux sur le BV d'Azul, M. Piscitelli et A. Sfeir (1993) ont pu identifier des zones où l'érosion hydrique est marquée. A partir des résultats de ces travaux, des parcelles ont été choisies pour servir de support à une classification dirigée.

Le modèle numérique de terrain, la carte des pentes et le bassin versant

Le modèle numérique de terrain (MNT) a été réalisé à partir des courbes de niveau numérisées de la carte topographique au 1:50 000 avec le logiciel Alliance (*figure 5*).

Les caractéristiques techniques du MNT sont pour la taille du pixel : 20 m et l'équidistance des courbes de niveau : 20 m.

La carte des pentes et le bassin versant ont été réalisés à partir des courbes de niveau extraites de la carte topographique et recalculés à équidistance 10 mètres (méthode d'interpolation minimum de courbature) avec une taille du pixel de 50 m et une équidistance des courbes de niveau de 10 m.

METHODOLOGIE

Les données numériques SPOT ont été traitées avec le logiciel TeraVue⁴ pour les travaux de corrections et d'analyse.

⁴ TeraVue : logiciel d'imagerie, télédétection et cartographie numérique. Editions de la Boyère

Modèle Numérique de Terrain

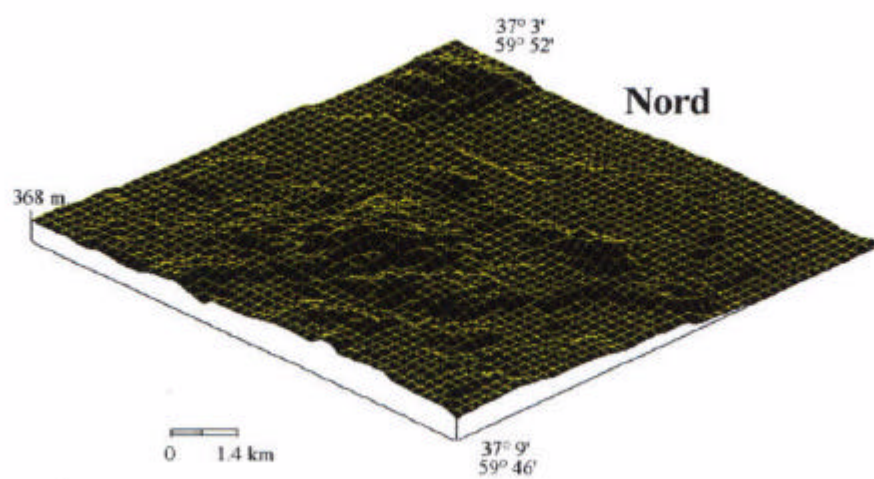


Figure 5

La méthode utilisée procède selon l'organigramme de la figure 6. A partir des données satellitales sont extraites les surfaces de sols nus et, parallèlement à partir du MNT sont extraites les cartes de ruissellement potentiel maximal.

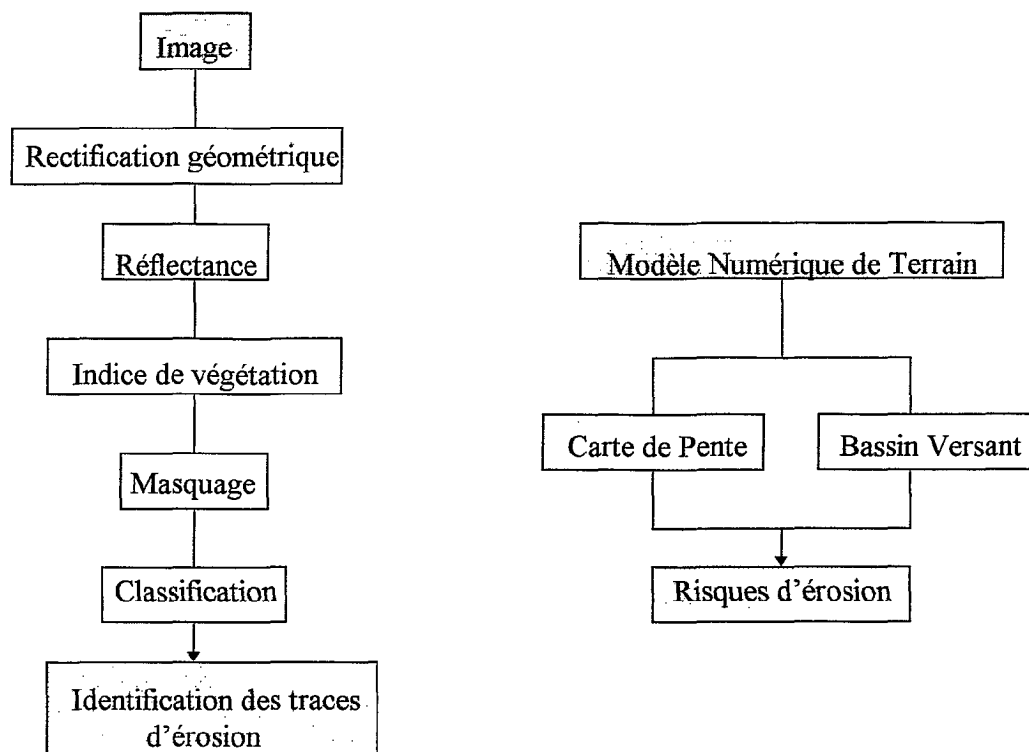


Figure 6

1- Rectification Géométrique

Elle vise à superposer directement et exactement l'image à une carte ou à une autre image.

Cette rectification a été faite image à image utilisant un modèle de déformation polynomiale de premier ordre. Les paramètres du modèle sont déterminés par une méthode de minimisation d'erreurs aux moindres carrés appliquée sur une liste de points d'appui mettant en correspondance l'image à corriger (celle de juillet 1996) et sa référence (celle de juin 1986, déjà corrigée au niveau 2B). Dans ce cas, sur 26 points d'amers la précision moyenne a été inférieure à 1 pixel avec un écart type de l'ordre de 0,9 pixel.

2- Extraction d'information de données satellitales

La méthodologie utilisée combine les techniques classiques de traitement d'images : les masques dirigés pour éliminer la surface en végétation, et les techniques de classification multibande selon l'algorithme de maximum de vraisemblance (règle de Bayes) pour classer les états de surface (de sols nus). Cette méthode s'appuie sur les caractéristiques radiométriques des parcelles de référence à partir desquelles on identifie et on sélectionne des populations de pixels similaires.

3- Calcul de réflectance

Les calculs de réflectance ont été effectués, selon Achard (1989), à partir de la formule suivante :

$$R_c = CN_k \cdot d^2 \cdot \pi / (\cos Z \cdot E_{sunk}) \cdot A_k$$

où R_c = réflectance corrigée dans le canal considéré

CN_k = mesure radiométrique (compte numérique)

Z = Angle solaire zénithal en degré

E_{sunk} = énergie incidente dans le canal considéré (luminance - $W \cdot m^{-2} / \mu m$)

A_k = coefficient d'étalonnage absolu ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

d = distance entre le soleil et la Terre (1 unité astronomique)

4- Indice de végétation normalisé (IVN)

Cet indice, proposé par Rouse et al (1973), est le rapport entre les canaux rouge et infrarouge.

Ce rapport nous donne la possibilité de quantifier l'activité chlorophyllienne et aussi la densité du couvert végétal (Crippen, 1990).

L'indice de végétation normalisé répond à la formule suivante :

$$IVN = (Pir-rouge) / (Pir+rouge)$$

5- Masques

Avant de réaliser les classifications, la population des sols nus de chaque image a été extraite selon des critères logiques. Les zones à forte couverture végétale, où la composante du signal électromagnétique réfléchi provenant de sol est supposée faible, ont été éliminées de l'étude grâce à l'utilisation des techniques logiques.

Le masque a été généré à partir des canaux XS3 et IVN.

6- Classification Multibande

La classification utilisée est de type dirigé basée sur la connaissance de la zone d'entraînement à travers des données de terrain. La méthode de maximum de vraisemblance (règle de Bayes) a été utilisée pour classer les images, quelle que soit la nature de l'occupation du sol dans un premier temps, et pour classer les sols nus dans un deuxième temps.

Cette seconde étape consiste à isoler les sols nus au moyen d'un masquage, tel que décrit précédemment. La classification dirigée intervient ensuite sur la composition colorée obtenue à partir des canaux masqués.

7- Modèle numérique de terrain, carte de pente et bassin versant

Ansault (1988) a étudié les liens qui existent entre les formes du relief et les écoulements de surface. Il a montré que la relation spatiale (S) et la relation altitudinale (A) (*figure 7*) traduisent la relation fonctionnelle entre un point du modelé et le réseau de drainage du bassin versant.

La méthodologie suivie pour établir le modèle numérique de terrain (MNT) s'appuie sur les fonctions disponibles dans le logiciel Alliance.

La réalisation de ce MNT a permis de mettre en évidence les formes du relief et d'en déduire les dynamiques d'écoulement des eaux sur la zone d'étude.

On considère que les interactions entre l'écoulement des eaux et la nature des matériaux superficiels sont les facteurs essentiels de la formation du modelé et de son évolution (générateurs d'érosion).

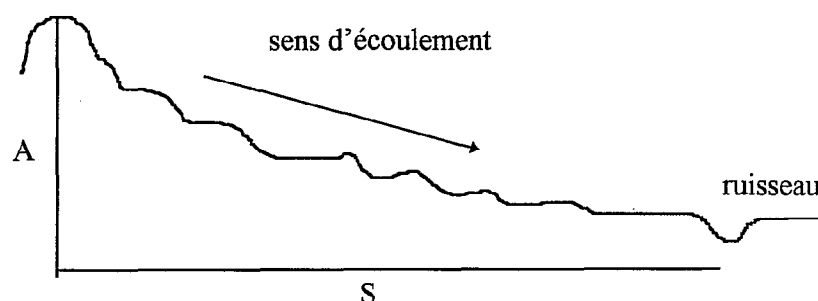


Figure 7 : Relation spatiale et altitudinale

Le calcul de pente et de bassin versant a été fait avec le logiciel Demiurge⁵.

Le calcul de la pente prend en compte la composante verticale du vecteur normal au plan de régression le plus proche des quatre points du MNT délimitant la maille (Steyn, 1976).

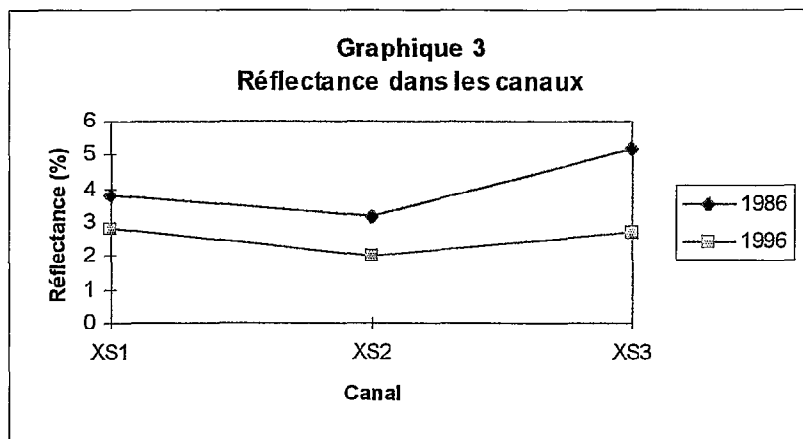
Le bassin versant est calculé à partir du modèle de drainage. Le modèle de drainage contient les directions de drainage entre la maille centrale et une de ses huit voisines en fonction du fichier dérivé des altitudes. La direction est déterminée selon le principe de la descendante maximale : le drainage se fait dans la direction de la maille voisine d'altitude inférieure la plus faible.

ANALYSE DES RESULTATS

1- Transformation en réflectance des sols nus

Les résultats de réflectance donnent les caractéristiques de la composition argileuse des sols et de sa forte sensibilité à l'humidité. Le graphique 3 présente des exemples de courbes de réflectance des sols de la région-test observés dans le domaine visible à proche infrarouge en 1986 et 1996.

⁵ Demiurge (Digital Elevation Model In Urgency) : logiciel édité par l'ORSTOM.

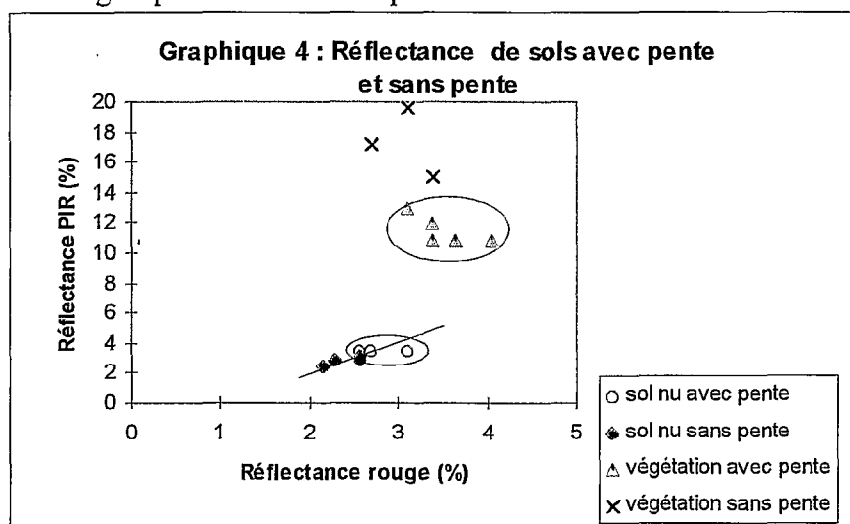


La pente des courbes de réflectance dans le visible est la même pour les deux années d'observation. On peut donc dire qu'il n'existe pas de variation forte sur la couleur des sols nus en fonction de l'humidité. Dans le proche infrarouge, le changement de pente est lié à l'humidité : pente forte pour les sols secs et pente faible pour les sols humides.

Effet de la topographie sur les comportements de réflectance :

Les trois classes d'état de surface relevée sur le terrain (sol nu, prairie, chaume et parcours) se repartissent en deux groupes de comportement de réflectance différent. Le graphique proche infrarouge (PIR) - rouge des données montre ce résultat (*graphique 4*). Les nuages de points sont proches de la droite des sols comme suit :

- groupe A : surface en pente (○)
- groupe B : surface sans pente



2- Valeurs d'IVN

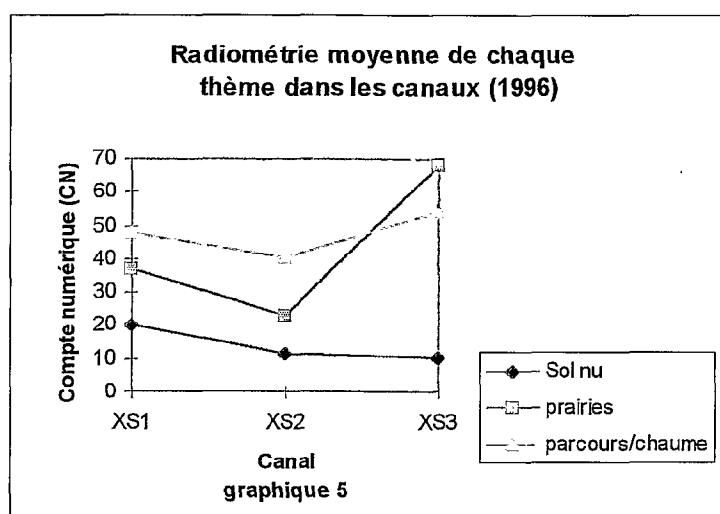
L'indice de végétation apporte une information significative par rapport à l'ensemble des informations fournies par les canaux bruts (*figure 8*). Il est possible de discriminer les sols nus

des autres thèmes. Les valeurs de IVN sont faibles car il existe une prédominance des sols nus. Rappelons que les prises de vue ont été réalisées à une époque de l'année (hiver) où l'activité chlorophyllienne est limitée.

3- Classification dirigée

Classification en fonction de l'utilisation des sols

Le résultat de cette classification (*figure 9*) a donné une bonne connaissance de la composition et de la distribution des types de couvert de la zone et la possibilité de bien délimiter les zones de sol nu (*graphique 5*).



Classification des surfaces des sols nus

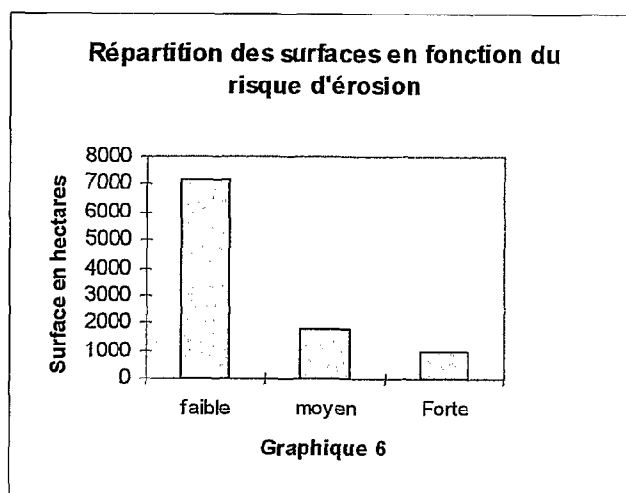
Les confusions entre classes ont montré clairement les limites de la discrimination radiométrique des états de surface des sols nus. Cette limitation peut être expliquée par :

- l'utilisation d'indices de dégradation descriptifs qui peut conduire à une certaine subjectivité ;
- l'importance d'autres paramètres édaphiques sur la radiométrie enregistrée tels que la texture, l'humidité, la matière organique, etc. ;
- la collecte des références de terrain.

4- Carte de pente et bassin versant

Carte de pente

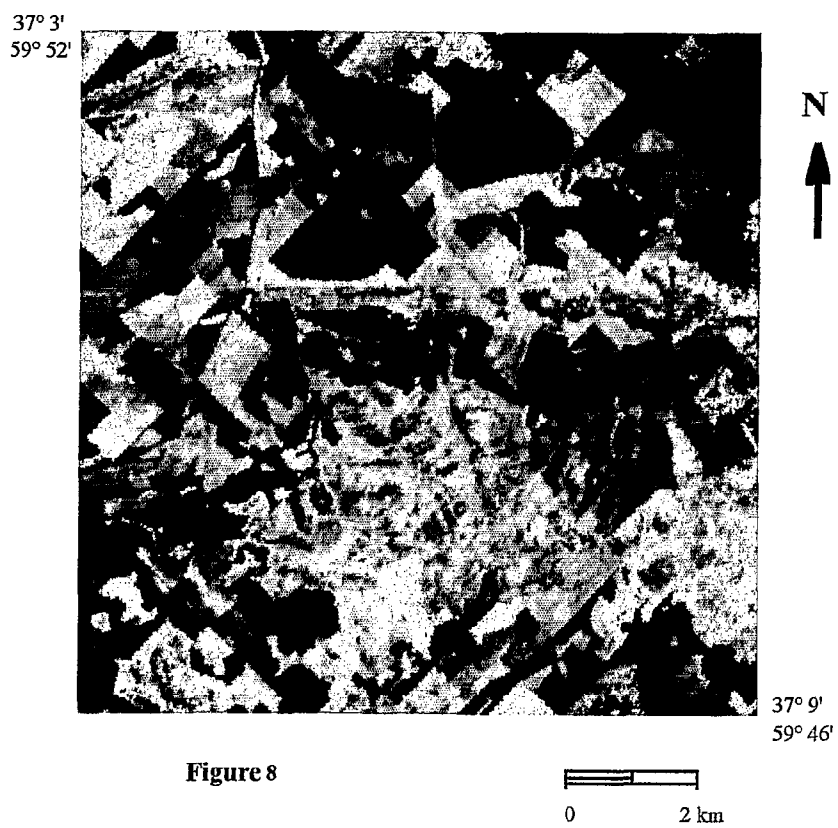
La répartition des sols dans la zone en fonction de leur pente (*figure 10*) montre qu'il y a une variation forte que l'on peut diviser en 3 classes : pente forte (>10%), moyenne (1-10%) et faible (<1%). La représentativité de chacune est précisée sur le graphique 6.



Bassin versant

De l'examen de ses caractéristiques, il ressort que c'est dans les sous-bassins versants (Videla, La Corina et Santa Catarina, voir figure 11) que les risques d'érosion sont les plus forts, car c'est là que l'on trouve le relief le plus marqué.

Indice de végétation normalisé



Classification dirigée

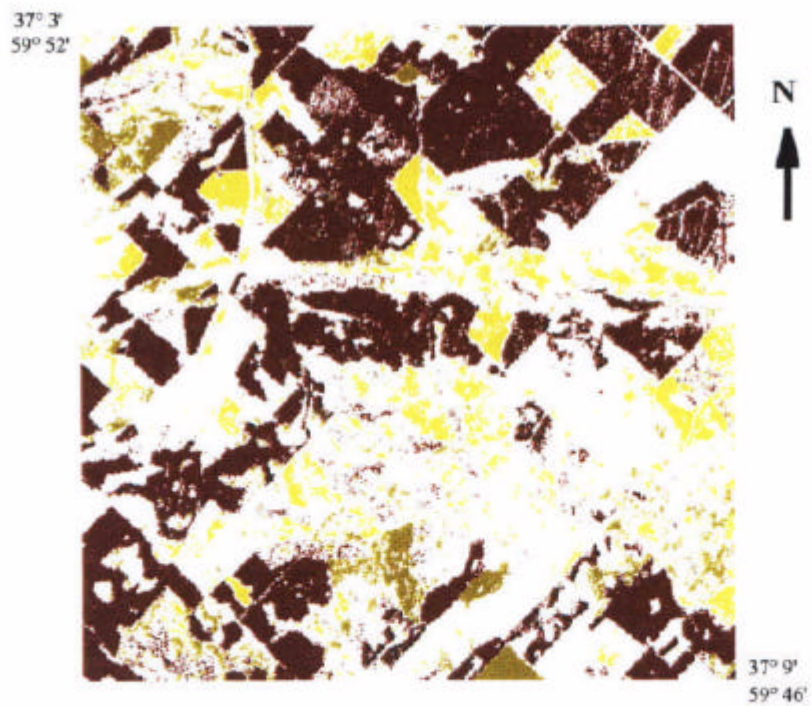


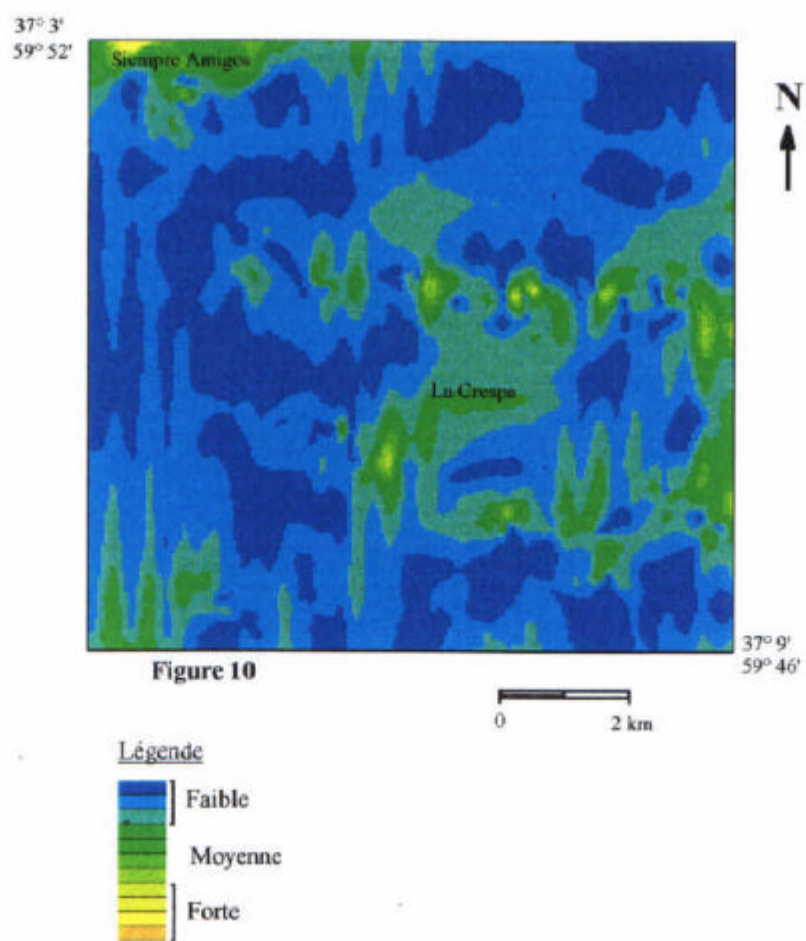
Figure 9

0 2 km

Légende

-  Sol nu
-  Chaume ou parcours
-  Prairie
-  Autres

Carte de pente



Bassin Versant

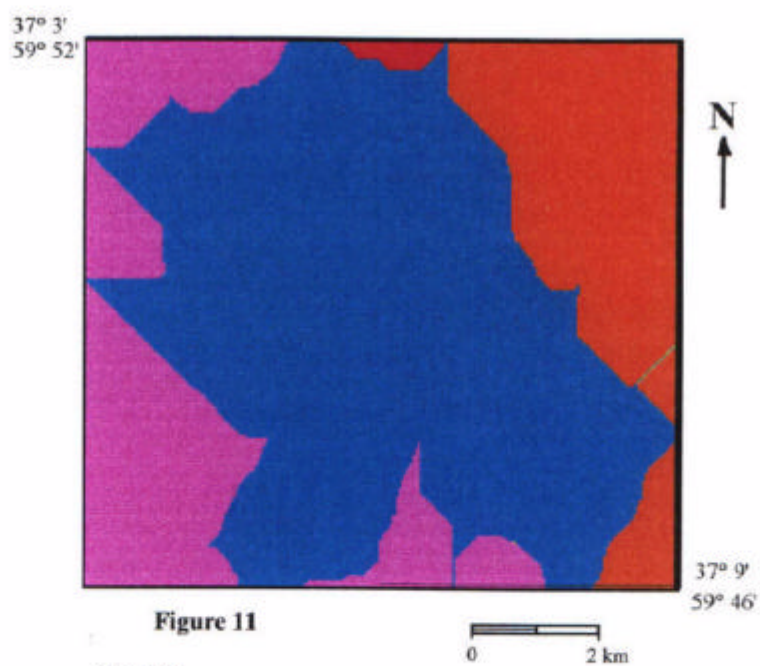


Figure 11

Légende

- Sous-bassin Videla
- Sous-bassin Santa Catarina
- Sous-bassin La Corina

DISCUSSION-CONCLUSION

On trouve une forte relation entre la réflectance et les caractéristiques de sol nu telles que la texture argileuse, la composition organique et l'humidité.

Dans le domaine du proche infrarouge (XS3), il est facile d'obtenir une discrimination des sols nus en raison des propriétés physiques des sols qui se traduisent par une faible réflectance.

Ce travail montre que la couleur des sols est une information non utilisable pour estimer la susceptibilité de l'érosion hydrique, dans les conditions de sols observées dans cette étude, à savoir :

- une réflectance caractérisée par une courbe concave;
- des couleurs des différents horizons peu différenciées (*voir schéma page 9*)

La bonne qualité des images optiques et les traitements réalisés ont permis d'identifier les principaux types de sols nus et de couverture végétale.

Il n'existe pas de confusion radiométrique de thème du fait de la taille des parcelles (80 -100 hectares en moyenne).

Les phénomènes érosifs étant étroitement associés aux conditions pluviométriques (fréquence et intensité des pluies), il est important que les dates de prise de vue soient déterminées en fonction des événements pluviométriques majeurs (*voir graphique 1*) et du calendrier cultural de la zone. En effet, les travaux culturaux après les pics pluviométriques peuvent effacer certaines traces d'érosion.

Il apparaît que les faibles conditions d'érosion pendant la période de notre étude conditionnent les indicateurs indirects.

La démarche de recherche utilisée dans cette étude est relativement facile à transposer à d'autres milieux où les relations climat/pente/composition de sol sont équivalentes, en l'occurrence sur la zone centrale de la province de Buenos Aires.

Cependant, il serait également intéressant, pour un futur travail de recherche :

- de développer une relation teneur en matière organique - réflectance comme indicateur indirect d'érosion sur parcelles test.

En effet, la composition organique des sols constitue un véritable critère de différenciation des sols, mesurable directement sur le terrain et observable par télédétection, ainsi que l'ont montré de nombreux auteurs tels que Courault (1988) ou Torrent, Prost et King cités dans ses travaux.

Ainsi, certaines longueurs d'onde étant liées plus spécifiquement aux constituants, ils ont pu mettre en évidence une relation de type hyperbolique entre la réflectance à 0,7 μm et la teneur en matière organique.

- de déterminer les spectres des sols sur le terrain au moyen d'un spectroradiomètre portable (0,4 - 2 μm) placé dans des conditions de mesure proches de celles des capteurs de la télédétection spatiale, comme le préconise Escadafal (1993).

La carte des pentes montre qu'il existe un fort risque d'érosion sur plus de 1000 hectares. Il est important de prendre des décisions pour éviter les pertes de terre. Un code de bonne conduite concernant les pratiques culturales pourrait être réalisé en collaboration avec les agriculteurs, de manière à valider avec eux les résultats de cette recherche et les impliquer à la conservation de leurs sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ansoult M. 1988.- Etude et modélisation des formes de la surface terrestre. Thèse de doctorat., UCL, Louvain la Neuve.

Achard F. 1989.- Etude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'ouest par télédétection spatiale. Thèse de Doctorat à L'Université Paul Sabatier, Toulouse, 243 pages.

Bonn F., Escadafal R. 1996.- La télédétection appliquée aux sols. In : Précis de télédétection, volume 2 : Applications Thématiques. Presses de l'université du Québec, 633 pages.

Bocco G. et Valenzuela C., 1988.- Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. ITC Journal, vol 14, pp. 309-313.

Courault D., Girard M-C. et Escadafal R., 1988. Modélisation de la couleur des sols par télédétection. In : Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing held at Aussois, France, 18-22 January 1988. (ESA SP-287, April 1988). pp 357-362.

Crippen R., 1990.- Calculating the vegetation index, Remote Sen. Environ. Vol 34, pp. 71-73.

Cyr L., Perras S., Bonn F., Pesant A., Willm T., 1991. Evaluation de la couverture du sol en milieu agricole par mesure in situ et images multitemporelles pour la modélisation de l'érosion hydrique. In : 5th International Colloque Physical Measurements and signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, pp. 659-662.

De Vliegheer B., 1990.- Environmental degradation mapping in Euboia (Central Greece) using multisource satellite data. In : 10 th EARSEL Symposium New European Systems, sensors and application, Toulouse France : pp. 297-305.

Dubucq M., Darteyre J. et Revel J., 1991.- Identification et cartographie de surface de l'érosion et de la battance des sols du Lauragais à partir de croisement de données SPOT et d'un MNT. ITC Journal, Vol. 2, pp. 70-76.

Escadafal R., Gouinaud C., Mathieu R. et Pouget M., 1993. Le spectroradiomètre de terrain : un outil de la télédétection et de la pédologie. In : Cahiers ORSTOM, série pédologie, volume XXVIII, n°1, 1993. pp 15-29

Evans R., 1990.- Discrimination and monitoring of soils. In : Steven M. , Clark J., éd. : Applications of Remote Sensing in Agriculture, Butterworths.

Frazier B. et Cheng Y., 1989.- Remote Sensing of soils in the Eastern Palouse region with Landsat Thematic Mapper. Remote Sensing of Environment, vol 28, pp. 317-325.

Hellden U. et Olson L., 1986.- Soil erosion, fuel wood and land use assessment in Ethiopia, an approach to environmental monitoring and planning. In : 20th Symposium International of Remote Sensing of Environment ERIM, pp.220-234.

King C., Maucorps J., Aumonier F., Renaux B. et Lenotre N., 1989.- Détection d'indices d'érosion par Spot dans les sols limoneux du nord Pas de Calais, une étude multitemporelle. Bulletin SFPT, vol. 14, pp. 10-13.

Marchionni D., 1995. Analisis de imagenes satelitares del Sistema de Tandilla (Argentina) - Aportes al conocimiento estructural y litológico. GDTA, Toulouse, Mémoire de DESS Télédétection, 60 pages.

Munsell Color Company, 1985. Munsell color chart. Baltimore, 7 pages.

Piscitelli M. et Sfeir A., 1993.- Descripción físico-geográfica del partido de Azul y de las principales limitantes para el uso y manejo de sus tierras. Universidad del Centro de la provincia de Buenos Aires. Cátedra de conservación y manejo de suelos., pp 1-11.

Rondeaux G., Steven M. et Baret F. 1996.- Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. Remote Sens. Environ. Vol 55, pp. 95-107.

Rouse J., Hass R., Schell J. et Deering D. 1973.- Monitoring vegetation systems in the great plains with ERST, III ERST Symposium, NASA, vol. 1, pp 309-317.

Sala J., Kruse E. et Agugliano R. 1987.- Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul. Impreso por la Comisión de Investigaciones científicas de Buenos Aires, informe n°37, 235 pages.

Soil Survey Staff, 1975.- Soil Taxonomy. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook, n° 436, Washington, EEUU, 754 pages.

Steyn D. 1976.- Computation of azimuths, slope angles and surface normals over a given topography. The South African Journal, vol. 58, n° 2.

Usunoff E. et Varni M. 1995. Hidrología de los sectores alto y medio de la cuenca del arroyo Azul. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul-Buenos Aires, 285 pages.