

Enregistrement scientifique n°: 632
Symposium n°: 31
Présentation: poster

Water erosion mapping from SPOT data. Example in the coastal range of central Chile.

Cartographie de l'érosion hydrique à partir de données SPOT. L'exemple de la Cordillère Côtière du Chili central.

MATHIEU Renaud (1,2), **POUGET Marcel** (2), **CERVELLE Bernard** (1), **CAVIEDES Eugénio** (3), **RÉMY Dominique** (2)

(1) Univ. Marne la Vallée, IFI, 5 Bd Descartes, 77454 Marne la Vallée cedex 2, France
(2) ORSTOM, 32 av. H. Varagnat, 93143 Bondy cedex, France
(3) Université du Chili, Fac. Cs. Agr. y Forestales, Casilla 1004, Santiago, Chili

Uncontrolled land clearing in the coastal range of central Chile led to widespread sheet and gully erosion. Our objective was to define a method to evaluate the distribution and intensity of such process using spatial imagery. Gradual stripping of soil top layers and frequent linear incisions infer substantial surface changes that may be monitored from satellite data. First, a field study was carried out and showed that soil color changes and superficial accumulation of coarse material are important indicators of soil erosion occurrence. Simulated SPOT reflectance data were acquired in the field from eroded toposequences. It is concluded that simple radiometric indices, i.e. Redness Index and Brightness Index, are well correlated with both indicators and hence have a good potential to discriminate some classes of soil erosion intensity. The application of these radiometric indices to SPOT images led to a 1:50 000 map presenting the main soil erosion levels. This new information, produced at a scale between field size and regional synthesis, is well-suited to defining priorities in soil conservation and landuse planning.

Keywords : water erosion, Chile, cartography, remote sensing, SPOT, soil color
Mots clés: érosion hydrique, Chili, cartographie, télédétection, SPOT, couleur du sol

Enregistrement scientifique n°: 632
Symposium n°: 31
Présentation: poster

Water erosion mapping from SPOT data. Example in the coastal range of central Chile.

Cartographie de l'érosion hydrique à partir de données SPOT. L'exemple de la Cordillère Côtière du Chili central.

MATHIEU Renaud (1,2), **POUGET Marcel** (2), **CERVILLE Bernard** (1), **CAVIEDES Eugénio** (3), **RÉMY Dominique** (2)

(1) Univ. Marne la Vallée, IFI, 5 Bd Descartes, 77454 Marne la Vallée cedex 2, France

(2) ORSTOM, 32 av. H. Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

(3) Université du Chili, Fac. Cs. Agr. y Forestales, Casilla 1004, Santiago, Chili

I. Introduction

La Cordillère Côtière du Chili central connaît d'importants problèmes de conservation des sols. En 1965, 60% de sa surface étaient déjà reconnus comme modérément à très sévèrement érodés, i.e. 2,75 millions d'ha (IREN, 1965). La gestion durable de cet espace passe par le développement de mesures de conservation du sol et d'activités mieux adaptées au milieu. Sa mise en oeuvre doit s'appuyer sur une connaissance de la distribution et de l'intensité de l'érosion à une échelle moyenne. Selon son mode d'action, l'érosion se traduit par des tronçatures, des incisions ou des encroûtements qui modifient, sur des plages plus ou moins étendues, certaines caractéristiques de la surface du sol, e.g. composition organique et minéralogique, rugosité (Latz *et al.*, 1984; Mathieu *et al.*, 1997). Ces transformations jouent le rôle d'indicateurs de l'érosion. A diverses échelles, de nombreux travaux ont démontré l'existence de relations, parfois étroites, entre les propriétés spectrales des sols et certaines caractéristiques physico-chimiques, e.g. couleur, matière organique, ou certains paramètres conjoncturels, e.g. rugosité, teneur en eau (Baumgardner *et al.*, 1985). En milieu aride et semi-aride, la végétation, peu couvrante, possède une activité saisonnière marquée. La réflectance des surfaces naturelles est donc largement influencée par la couverture minérale;. Certains des indicateurs de l'érosion sont donc susceptibles d'être visibles sur des images satellitaires de haute résolution. Notre objectif consiste à déterminer le potentiel de l'imagerie SPOT pour fournir un inventaire cartographique de l'état actuel de la dégradation des sols par érosion hydrique. Nous avons tenté de répondre aux deux questions suivantes:

- *Quels sont les principaux critères de la surface du sol qui permettent de reconnaître et de discriminer sur le terrain une séquence de dégradation par érosion hydrique ?*

- Dans quelle mesure ces indicateurs de l'érosion influencent-ils la radiométrie enregistrée par les satellites et peuvent-ils être utilisés pour cartographier l'érosion ?

II. Matériel et méthodes

II.1. Le milieu étudié

Deux zones d'étude d'environ 20 x 20 km ont été choisies le long du gradient pluviométrique Nord-Sud de la Cordillère: MELI (33°34'S-71°22'W) et PARE (34°30'S-71°48'W). Le régime climatique, typiquement méditerranéen, se caractérise par des pluies hivernales (350 à 600 mm, mai à septembre) et une saison sèche de 6 à 7 mois. Le modelé géomorphologique s'apparente à un cordon de moyenne montagne (alt. 800 à 1200 m), associé à des chaînons de collines convexes et escarpées (20-50 % de pente). La formation géologique dominante correspond à un massif de roches granitiques profondément altérées du Paléozoïque supérieur. Des micaschistes du socle cristallin Précambrien sont également bien représentés. La couverture pédologique est constituée d'Haploxeralfs ultiques associés à des Rhodoxeralfs ou des Luvisols chromiques, parfois orthiques ou ferriques. L'exploitation agricole est basée sur une rotation de céréales et de prairies naturelles. Une part importante du territoire est occupée par un maquis d'épineux, peu denses et dégradés (anciennes cultures, bois de feux, parcours).

II.2. Données de terrain

Une étude détaillée de 3 toposéquences, représentatives de la diversité du paysage, a été mise en oeuvre afin d'identifier des indicateurs pédologiques de l'érosion. Chaque toposéquence est découpée en segments homogènes du point de vue de l'érosion et des états de surface (ES). Les ES sont décrits en suivant la méthode semi-quantitative développée en milieu aride par Escadafal (1989): description détaillée de la couverture minérale et végétale, de la rugosité de surface, des signes d'érosion, mesure de la couleur Munsell (Hue, Value, Chroma), calcul de l'Indice de Rougeur Munsell, i.e. $IR(MUN)=(15-H)*C/V$, de Torrent *et al.*, (1983). La description de profils et certaines analyses physico-chimiques (matière organique, texture) complètent ces données.

Les ES ont également été décrits pour une centaine de sites de référence. Chaque site, de 0.5 à 2 ha, est choisi par l'étude conjointe de la variabilité de certains critères du paysage (érosion, géomorphologie, géologie, occupation du sol) et de l'information spectrale contenue dans les images SPOT (composition colorée, classification non supervisée). Ces données sont utilisées pour d'une part vérifier la pertinence des indicateurs de l'érosion sur un échantillon statistique conséquent et d'autre part pour définir un indice d'érosion (Tab. 1). Cet indice, IE, permet d'attribuer à chaque site un niveau synthétique et qualitatif de dégradation par érosion. Les travaux de terrain ont été réalisés de février à mai, au moment où les sols sont secs et les plus visibles (activité végétale réduite, labour).

II.3. Données radiométriques

Des données radiométriques ont été acquises à trois niveaux. Des mesures de réflectance ont été réalisées sur un profil pédologique de référence, caractérisé par un faible niveau d'érosion (IE1, Haploxeralfs ultique, granodiorite). La variation des conditions d'illumination sur la paroi du profil rend difficile les mesures de réflectance directement dans la fosse. Nous avons extrait un monolithe du volume pédologique sur 1,2 m de profondeur à l'aide d'un moule d'acier. Le monolithe est placé en position horizontale en dehors de la fosse et des spectres de réflectance sont acquis avec un spectroradiomètre portable (PSII-ASD, 400-1100 nm), sous lumière naturelle et selon un pas d'échantillonnage régulier de 5 cm.

Tab. 1. L'Indice d'Érosion (IE) utilisé pour décrire les différents stades d'érosion.

Indice d'érosion	Type d'érosion
IE 1	Sans à en nappe légère
IE 2	En nappe modérée
IE 3	En nappe sévère à très sévère
IE 4	Griffes fréquentes ou très fréquentes, rigoles fréquentes
IE 5	Rigoles très fréquentes ou petites ravines fréquentes
IE 6	Petites ravines très fréquentes ou grandes ravines fréquentes
IE 7	Grandes ravines sur une surface continue

Griffe: tracé discontinu, 0.0025 m² section moy.; rigole: continue, 0.025 m²; petite ravine: continu, 0.25 m²; grande ravine: continu, 1 m²; fréquent: 20 à 60 % de la surface; très fréquent, plus de 60 %.

Nous avons ensuite caractérisé spectralement les ES des segments des toposéquences. Les mesures radiométriques sont obtenues sur une surface représentative d'environ 1 m² avec un radiomètre CIMEL. L'ES d'un site peut être décomposé en plusieurs États de Surface Élémentaire (ESE) (Escadafal, 1989), e.g. plage de sol nu encroûté, tapis de gravillons, plage d'herbacées peu dense. La réflectance global d'un site est calculée en pondérant celle de chaque ESE en fonction de l'espace qu'il occupe.

Enfin, une image SPOT XS a été sélectionnée pour chaque zone d'étude: image de MELI - 23/03/93 (KJ 671-417) et image de PARE - 01/04/88 (KJ 670/419). Ces deux images sont acquises à l'époque où le sol est sec et la couverture minérale est la plus visible. Elles ont été géoréférencées sur un Modèle Numérique de Terrain et intégrées dans un SIG. Pour comparer les deux images, les comptes numériques SPOT sont convertis en réflectance exo-atmosphérique (Guyot *et al.*, 1996). Un facteur de correction C des effets de variations de l'illumination liées au relief est également introduit (Meyer *et al.*, 1993). L'absence de données fiables n'a pas permis d'entreprendre une correction des effets atmosphériques. A chaque niveau, des indices radiométriques, adaptés aux bandes spectrales SPOT (XS1, vert; XS2, rouge; XS3, proche infrarouge), ont été calculés.

$$\text{- Indice de Brilliance, IB(XS), } IB(XS) = \sqrt{\frac{XS1^2 + XS2^2}{2}}$$

III. Principaux résultats

III.1. Identification des indicateurs de terrain

L'examen d'un profil de référence peu érodé (IE1, Haploxerafals ultique, granodiorite) aide à comprendre l'évolution de certaines caractéristiques de la surface du sol de terrains soumis à une érosion d'intensité croissante (Figure 1). Les caractères de différenciation de ce profil permettent de retenir deux indicateurs importants de l'érosion: l'Indice de Rougeur Munsell, IR(MUN), et le pourcentage d'éléments grossiers (> 2mm). Le premier présente un pic maximum marqué au niveau des horizons Bt. Celui ci résulte de l'illuviation des oxydes de fer (goéthite et hématite) lors de la pédogenèse et se traduit également par une Hue plus rouge et une augmentation du Chroma. Le second augmente graduellement le long du profil avec la Value. Les éléments grossiers sont constitués par des gravillons de quartz et de feldspaths, clairs et brillants, hérités de l'arène granitique.

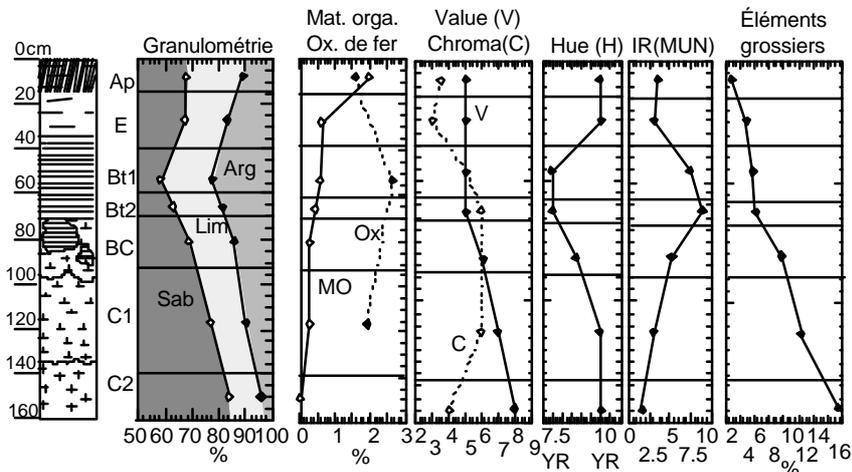
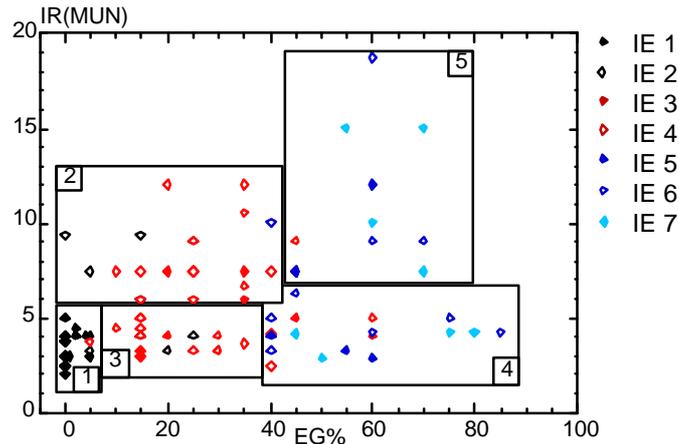


Figure 1. Représentation schématique et variations de quelques critères pédologiques d'un profil de référence peu érodé (IE1, Haploxerafals ultiques, granodiorite, Série Lo Vasquez).

L'IR(MUN) et le pourcentage de recouvrement en éléments grossiers (EG%) ont été mesurés pour les états de surface des 100 sites de MELI et PARE. Ils sont comparés à l'Indice d'Érosion (Figure 2). Un groupe isolé concerne les sites peu érodés (groupe 1, IE1), peu rouge (10 YR, Chroma 2 à 4) et sans éléments grossiers en surface. La mise à nu de l'horizon Bt par une érosion en nappe dominante provoque un rougissement de la surface du sol (groupe 2, IE2 à 4), mais qui n'est pas systématique (groupe 3, IE2 à 4), principalement en raison de la variabilité spatiale de la couverture pédologique. La teneur en oxydes de fer ou la rougeur varie avec la position topographique ou certaines différences locales de la composition de la roche mère. Les éléments grossiers, peu déplacés, s'accumulent en surface et forme un tapis de gravillons de plus en plus dense susceptible d'augmenter la réflectance globale. Les niveaux d'érosion les plus sévères (IE 5 à 7), qui présentent une érosion linéaire plus ou moins avancée, ont un comportement différent selon le substrat géologique. Le groupe 4 concerne des sites sur granodiorite et le groupe 5 des sites sur micaschistes. Les micaschistes, plus riches en biotite, fournissent une quantité plus importante d'oxydes de fer et sont plus rouges (5 YR).



1- surfaces pas ou peu érodées, 2- érodées rouges, 3- érodées peu rouges, 4- sévèrement érodées, granodiorites, 5- sévèrement érodées, micaschistes
 Figure 2. Variation des indicateurs de l'érosion, IR(MUN) et EG%, notés sur les 100 sites échantillonnés de MELI et PARE en fonction de l'IE.

III.2. Discrimination spectrale des niveaux de dégradation par érosion hydrique

Les données acquises sur le profil de référence montrent que les indices radiométriques calculés, IR3(XS) et IB(XS), suivent assez fidèlement les variations verticales de l'IR(MUN) et de EG% (Figure 4). La Figure 5 illustre, dans l'espace bidimensionnel de l'IR3(XS) et de l'IB(XS), l'évolution théorique de la réponse spectrale d'une dégradation d'intensité croissante. Cet exemple se rapporte à un substrat granitique. L'augmentation de l'IR3(XS) permet de distinguer aisément les horizons superficiels Ap-E et les horizons subsuperficiels Bt1-Bt2. En revanche, le contraste spectral au sein de ces deux ensembles ne semble pas suffisamment prononcé pour espérer une discrimination plus fine. Les horizons plus profonds (BC, C1) s'individualisent nettement grâce à la l'augmentation de l'IB(XS) qui est liée à la concentration croissante d'éléments grossiers.

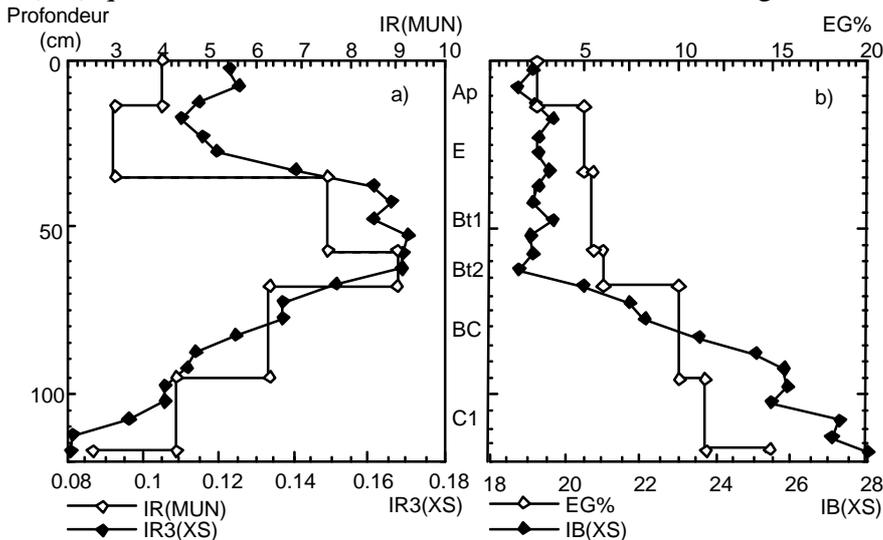


Figure 3. Relation entre les indices radiométriques et les indicateurs de l'érosion le long du profil de référence, a) IR(MUN) - IR3(XS), b) EG% - IB(XS).

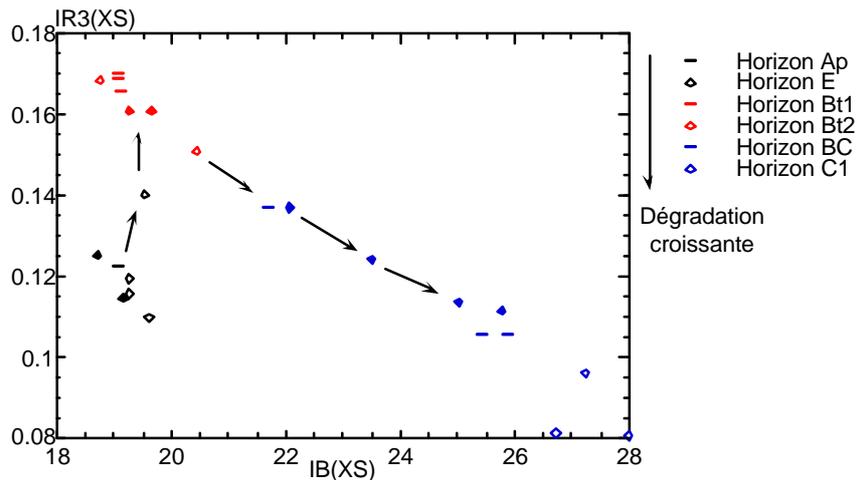


Figure 4. Évolution théorique d'IR3(XS) et d'IB(XS), selon le niveau de dégradation par érosion (données du profil de référence, Figure 3).

La capacité des indices radiométriques à détecter la variation des indicateurs de l'érosion est confirmée sur les états de surface des toposéquences, observés dans des conditions naturelles de rugosité et de patine. Les mesures radiométriques réalisées sur les segments des toposéquences montrent qu'il existe des relations significatives entre l'IR(MUN), l'EG% et l'IR3(XS), l'IB(XS) respectivement (Tab. 2). La distribution des segments, dans l'espace bidimensionnel de l'IR3(XS) et de l'IB(XS), exhibe un comportement similaire à celui observé au niveau des indicateurs de terrain (Figure 5). Les incisions linéaires sont individuellement difficiles à repérer sur des images satellitaires dont la résolution est trop grossière. Néanmoins, en intervenant de manière répétée et en association avec une érosion en nappe sévère, les incisions modifient la réflectance globale d'un site. Cette modification est d'autant plus marquée que le contraste spectral des incisions, qui entaillent la roche mère, est fort. Dans le cas des granodiorites, les ravines, recouvertes d'arène granitique très claire, augmentent notablement l'IB(XS). Les micaschistes, plus compacts, s'altèrent en bloc et en cailloux, moins réfléchissant mais recouvert par une patine d'oxydation rougeâtre qui augmente l'IR3(XS).

Tab. 2. Coefficients r2 des régressions linéaires calculées entre les indicateurs d'érosion et les indices radiométriques mesurés pour les états de surface des toposéquences.

	IR(MUN)	EG%
IR3(XS)	0.71**	0.005
IB(XS)	0.02	0.81***

n=15, (**) significatif à 95% , (***) significatif à 99%

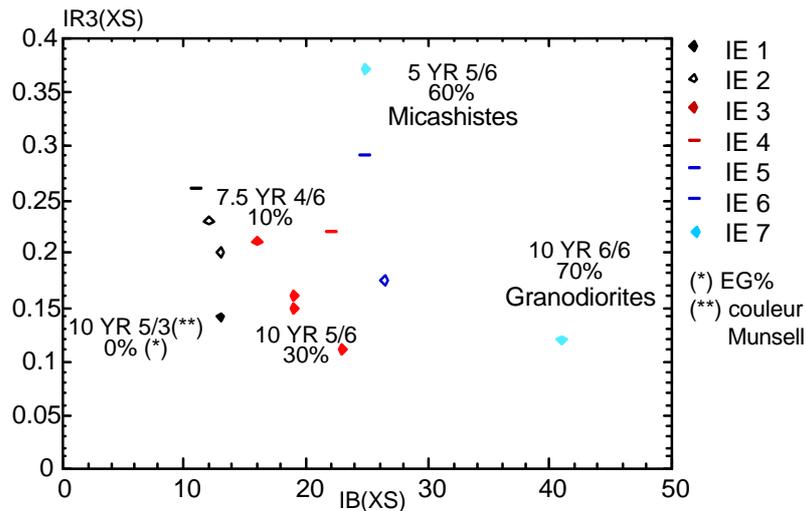


Figure 5. Variation des indices radiométriques, IR3(XS) et IB(XS), des états de surface des toposéquences en fonction de l'IE.

III.3. Cartographie de l'érosion hydrique à partir des images SPOT

L'IR3(XS) et l'IB(XS) ont été appliqués aux deux scènes SPOT de MELI et PARE et leurs valeurs ont été extraites pour les 100 sites échantillonnés. Elles sont représentées sur le diagramme de la Figure 6. La distribution des sites en fonction de leur IE est cohérente avec les résultats obtenus sur le terrain. Les variations observées pour un niveau donné de l'IE apparaissent, dans certains cas, relativement importantes, i.e. l'IB(XS) de l'IE1 varie de 5 à 9, soit presque la moitié de la dynamique totale. Ces variations rendent compte de l'hétérogénéité des états de surface notamment pour ce qui concerne la macrorugosité de la surface: labour récent ou ancien, croûte, micro-butte. Bien que la couverture végétale soit peu importante et non active à cette époque, elle diffère également selon les sites (% et type, effet d'ombrage d'arbustes). A titre d'exemple, on remarque que deux sites présentent à la fois un IE1 et un IB(XS) supérieur à 10. Il s'agit dans les deux cas de surfaces très brillantes, encroûtées observées après une récolte de céréales.

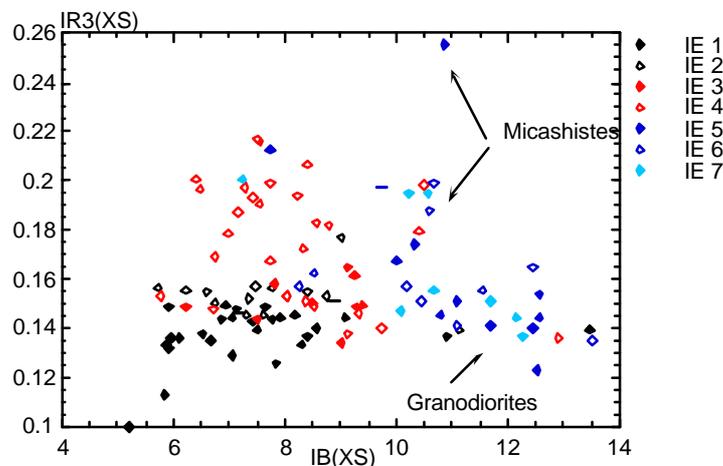


Figure 6. Variation des indices radiométriques extraits des images SPOT, IR3(XS) et IB(XS), pour les 100 sites échantillonnés de MELI et PARE en fonction de l'IE.

La stratification préalable de l'espace en fonction des deux principales formations géologiques, roches granitiques et micaschistes, a été utilisée pour lever certaines confusions spectrales. Les colluvions et les alluvions ont également été reconnues mais ne sont pas prises en considération pour la cartographie de l'érosion. Après masquage de la végétation toujours active (forêts, bas-fond), le seuillage des indices a permis d'obtenir un document présentant trois niveaux importants de dégradation du sol par érosion hydrique que l'on peut qualifier de la manière suivante: pas ou peu d'érosion, érosion moyenne à sévère en nappe, érosion sévère avec incisions linéaires.

V. Conclusions

Pour le milieu considéré, la couleur et la proportion d'éléments grossiers de la couverture minérale sont en relation avec le niveau de dégradation des sols induit par l'érosion hydrique. La détection de ces paramètres à partir de données SPOT, acquises au début de l'automne, donne des résultats satisfaisants. La variabilité des indicateurs proposés, d'abord thématique sur le terrain puis spectrale au niveau de l'image, ne permet de discriminer qu'un nombre limité de classes d'intensité d'érosion. Cette méthode s'avère intéressante pour acquérir une connaissance, synthétique, exhaustive et à moyenne échelle là où il n'existe pas d'autre information cartographique et pour fournir un état de référence pour le suivi de la dégradation. En revanche, dans l'état actuel des techniques, elle reste difficilement applicable pour établir un diagnostic fin et agronomique de l'érosion.

Baumgardner, M., Silva, L. F. et al., 1985. *Advances in Agronomy*, 38, 1-39.

Escadafal, R. 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Thèse de l'Univ. Paris 6, 265 p.

Escadafal, R., 1993. *Remote Sensing Reviews*, 7, 261-279.

Guyot, G., Gu, X. F. et al., 1996. *Photo-Interprétation*, 34(2), 119-142.

Latz, K., Weismiller, R. A. et al., 1984. *Soil Science Soc. American J.*, 48, 1130-1134.

IREN, 1965. *Informe 3*, Ministerio de Agricultura (IREN-CORFO, Chile).

Madeira, J., Bedidi, A. et al., 1997. *Int. J. of Remote Sensing*, 18(13), 2835-2852.

Mathieu, R., King, C. et al., 1997. *Soil Technology*, 10, 99-110.

Meyer, P., Itten, K. I. et al., 1993. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.*, 48(4), 17-28.

Torrent, J., Schwertmann, U. et al., 1983. *Soil Science*, 136(6), 354-358.

Keywords : water erosion, Chile, cartography, remote sensing, SPOT, soil color

Mots clés: érosion hydrique, Chili, cartographie, télédétection, SPOT, couleur du sol