

Contribution de données multitemporelles Spot à l'identification des risques d'érosion

L'exemple des sols limoneux du nord de la France *

Renaud MATHIEU (1), Christine KING (2), Yves LE BISSONNAIS (3)

(1) Orstom-Chili, Casilla 53390, Santiago 1, Chili.

(2) BRGM-Département géophysique et imagerie géologique, Direction de la recherche, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France.

(3) Inra-Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, Ardon, 45160 Olivet, France.

RÉSUMÉ

Dans les régions du nord de l'Europe, les sols limoneux, sensibles à la dégradation structurale, sont fréquemment exposés à une érosion par ruissellement concentré. Cette érosion génère des écoulements boueux, parfois très importants, qui occasionnent des dégâts substantiels aux infrastructures et aux équipements collectifs.

Une méthode est proposée afin, d'une part, de cartographier les surfaces potentiellement ruisselantes à partir d'images Spot et, d'autre part, d'évaluer à l'échelle de bassins versants élémentaires (BVE) la pertinence de ces bilans vis-à-vis de l'érosion effective.

Trois campagnes de terrain ont été effectuées pendant l'hiver 1991-1992 afin de mesurer un indice de dégradation structurale de surface sur une soixantaine de parcelles réparties sur un site test de 4 500 ha. La combinaison de ces indices avec l'information radiométrique extraite des images Spot (KJ 37-248 du 22/01, 04/03 et 14/05) permet de mettre en œuvre les classifications des sols nus selon leur susceptibilité à ruisseler. Au cours du même hiver, une cartographie exhaustive des signes d'érosion qui sert de base à l'évaluation des volumes de perte en terre a aussi été réalisée. Ces deux informations sont intégrées au niveau des BVE qui contrôlent le ruissellement potentiel maximal et sont issues du traitement d'un modèle numérique de terrain. Elles sont alors combinées afin d'étudier les relations qui peuvent exister entre les surfaces potentiellement ruisselantes et l'intensité de l'érosion observée.

À la lumière des résultats obtenus lors de ces premiers traitements, la méthode d'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes par imagerie satellitaire s'est avérée tout à fait pertinente pour les milieux de sols limoneux. Les corrélations obtenues entre ces surfaces et l'érosion effective demeurent faibles ($R=0,48$). Néanmoins, comparées avec d'autres méthodes, elles confirment l'intérêt d'utiliser une source d'information satellitaire. Enfin, il apparaît d'une part que les faibles conditions d'érosivité durant la période de notre étude constituent un handicap pour valider notre méthode et d'autre part que le choix de la date optimale d'observation pose problème à partir du moment où elle peut varier selon la répartition des pluies au cours de l'hiver.

MOTS CLÉS : Télédétection — Spot — Érosion — Ruissellement — Modèles spatiaux.

* Note d'auteur : cet article a été soumis en version anglaise à la revue *Soil Technology*.

ABSTRACT

CONTRIBUTION OF MULTITEMPORAL SPOT DATA FOR EROSION HAZARD ASSESSMENT :
EXAMPLE OF LOAMY SOIL OF NORTHERN FRANCE

The loamy soils of the Northern European loess belt are quite sensitive to soil-structure degradation, and commonly are exposed to erosion caused by concentrated runoff, in particular during winter (AUZET, 1987 ; POESEN, 1989 ; BOARDMAN, 1990). Successive rainfall events, usually of low intensity, cause crusting at the scale of individual plots. This reduces the infiltration capacity of the soil and generates potential runoff from the soil. Notwithstanding the generally low relief, this potential runoff transforms itself in an actual runoff which progressively concentrates in downstream thalwegs and artificial depressions. This concentration lead to rills and gullies and may create mud flows that, when strong, can create major problems because of the damage they cause to infrastructures and other installations vital to Man (MONNIER et BOIFFIN, 1986 ; DE PLOEY, 1989).

In a such context, a previous evaluation of the erosion risk at a medium scale (1:50,000 — 1:250,000) and over large surfaces is indispensable to define a regional strategy of soil conservation. The spatial models which are now developed are generally limited by the volume of raw data that they request for expressing the spatial variability of the input parameters (KING et al., 1992). Remote sensing is a new tool for obtaining the spatial and temporal distributions of certain parameters of the earth's surface, covering large areas, at relatively low cost and with a cartographic precision compatible with map scales of 1:25,000 to 1:50,000 (HELLDEN et OLSSON, 1986 ; BOCCO et VALENZUELA, 1988). Since the spatial resolution now available does not allow direct observation of small-scale erosion phenomena, such as rills and gullies (EVANS, 1990), it is necessary to study indirect phenomena that are related to erosion, such as soil truncation or changes in vegetation cover (FRAZIER et CHENG, 1989 ; DE VLEGHER, 1990 ; KING et DELPONT, 1993). In the case of the loamy soil of Northern France, such criteria correspond to structural degradation of the soil surface called crusting (COURAULT, 1989 ; KING et al., 1989).

Our work had a double aim : i) using multitemporal Spot data for a test area, we mapped the variations in surface conditions or "states" that can range from rough ploughing to crusting, ii) at the level of a spatial unit of erosion (Elementary Watershed), the surfaces that potentially are affected by runoff were compared with estimated soil loss according to a model developed by AUZET et al. (1993). Our method proceeded in three steps : 1) extraction, 2) integration and 3) comparison of data (Fig. 2).

Two maps of bare-soil surfaces with three levels of structural degradation of soil surface (level 1 = no degradation — F0, level 2 = medium degradation — F0-F1 and F1, level 3 = strong degradation — F1-F2 and F2) were generated from the automatic interpretation of two satellite images (22 January and 4 March). At the same time as recording the two sets of Spot data, two series of about 70 plots were surveyed and the structural degradation states were described (Tab. I). For each of the reference plots and dates, the radiometric data from Spot images were combined with the structural degradation level measured in the field. In both cases a good relationship was found (Fig. 3). This relationship was used to carry out two statistically validated classifications according to the algorithm of maximum similarity (Tab. 3).

Each linear erosion shape (rills, gullies) observed on the test site was mapped in late March 1992 (Fig. 1) and dissected into several portions of homogeneous cross-section, for which the width and average depth were measured (AUZET et al., 1993). Those data were integrated in a Geographic Information System and used to work out a precise evaluation of soil loss during the winter of 1991-1992.

The elementary watersheds (EW) of the test site (Fig. 1) were determined automatically with a digital elevation model (DEM) that was generated from the interpolation of contours of an IGN topographical map at scale 1:25,000 (CHERY et al., 1992). The EW is defined as the impluvium of the last branch of a temporary drainage network (BOIFFIN et al., 1988). Because of the spatial discontinuity of runoff (impluvium) and incisions (drainage network) it is considered as the basic spatial unit to assess erosion risk (AUZET et al., 1990).

In order to compare surfaces with potential runoff with soil loss, the classifications and the map of erosion features were integrated at the scale of the EWs thanks to GIS technics. A new set of variables was generated (Tab. IV) and correlation analysis were performed to study the relationships that might exist between the proportion of degraded soil and the intensity of erosion, as well as the effect that the period of satellite-image acquisition has on such relationships.

This work has shown that the remote sensing method for mapping and estimating surfaces potentially affected by runoff, is quite reliable for areas underlain by loamy soil (Fig. 3, Tab. III). This method which does not rely on hypothesis or empirical relationships between the climate/soil/vegetation/slope parameters and soil loss should be quite easily applicable to other environments. However, the correlation between such surfaces and effective erosion

remains low ($R=0.48$), even though it confirms the interest of using satellite data rather than other sources of information (Tab. IV, V). It became clear that the conditions of low erodibility during the period of our study were a handicap to validate our method ; another problem is caused by the choice of the optimum observation period, which can vary as a result of winter rainfall events. In a second step other important criteria which act on the runoff concentration stage such as the shape of the EWs, the spatial organization of surface states within the EW or the potential incisable length (AUZET et al., 1993 ; DE ROO, 1993) should be introduced in the model. Indexes could be developed (eg. catchment compacity index) to weight the effect of the surfaces with potential runoff on soil loss at the level of the EWs.

KEYWORDS : Remote sensing — Spot — Erosion — Runoff — Spatial models.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, les changements intervenus dans les systèmes de production agricole, comme la modification des rotations et des pratiques culturales, ont conduit à une multiplication des observations d'érosion hydrique des sols dans le nord de la France (LEFEVRE, 1958 ; DOUAY *et al.*, 1980 ; AUZET, 1987) ainsi que plus généralement sur l'ensemble de la ceinture loessique du nord-ouest de l'Europe (POESEN, 1989 ; BOARDMAN, 1990).

Les plateaux limoneux du nord-ouest de la France, caractérisés par des sols à faible stabilité structurale, sont soumis à une érosion fréquente par ruissellement concentré, principalement active pendant la période hivernale. La succession d'événements pluvieux généralement de faible intensité induit à l'échelle parcellaire l'apparition d'une croûte de battance qui, réduisant les capacités d'infiltration du sol, génère un volume de ruissellement potentiel. Malgré un relief modéré, les eaux accumulées à la surface des zones qui contribuent au ruissellement se concentrent alors progressivement en aval au sein du réseau de drainage naturel (talweg) et artificiel (traces d'engins agricoles) où de nombreuses incisions se développent (rigoles, ravines). Ce phénomène a été largement décrit par de nombreux auteurs (MONNIER et BOIFFIN, 1986 ; AUZET, 1987 ; DE PLOEY, 1989).

Dans ce contexte, certains travaux de recherche se sont orientés vers deux types d'études complémentaires. Le premier type aborde la compréhension des mécanismes à diverses échelles, de la « placette » expérimentale de quelques centaines de cm^2 sous pluie simulée ou de la parcelle cultivée (BOIFFIN, 1984 ; FARRES, 1987 ; LE BISSONNAIS *et al.*, 1989 ; OUVRY, 1989 ; EIMBERCK, 1989) jusqu'aux bassins versants (DUCK et McMANUS, 1990 ; AUZET *et al.*, 1993). Ces travaux s'intéressent principalement à l'identification des facteurs intervenant sur l'ensemble du processus érosif ainsi qu'à leur classification au sein d'un système hiérarchique. Encore à un stade beaucoup moins avancé, le second type s'appuie sur les connaissances déterministes acquises lors des étapes précédentes pour dé-

velopper des modèles spatiaux d'évaluation des risques d'érosion à des échelles moyennes (1/50 000-1/250 000) et sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km^2 (KING et LE BISSONNAIS, 1992).

La mise au point de tels modèles se heurte à la nécessité de disposer de données exprimant la variation spatiale des paramètres d'entrée qu'ils requièrent. La télédétection spatiale, au travers des satellites dédiés aux ressources terrestres tels que les séries Landsat TM 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 et à un coût relativement faible (HELLEN et OLSSON, 1986 ; BOCCO et VALENZUELA, 1988). Par ailleurs, la capacité de visite fréquente et régulière des sites étudiés par les plates-formes satellitaires facilite l'introduction de variables temporelles et les résolutions spatiales aujourd'hui utilisées peuvent atteindre une précision cartographique considérée comme compatible avec des échelles de 1/25 000-1/50 000. (KING C. *et al.*, 1989 ; CYR *et al.*, 1991). Néanmoins 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). Ainsi, comme l'ont résumé KING (C.) et DELPONT (1993), 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 « troncature » (FRAZIER et CHENG, 1989 ; DUBUCQ *et al.*, 1991) ou la modification des couvertures végétales (DE VLEGHER, 1990). Dans le cas des sols limoneux du Nord-Pas-de-Calais, ces critères indirects correspondent par exemple à la dégradation structurale de la surface des sols (croûte de battance). Cette dernière peut affecter des superficies très importantes qui favorisent le ruissellement puis l'érosion.

Dans l'étude qui suit, nous proposons sur une zone test :

— de cartographier les variations de la dégradation structurale de l'état de surface, du labour grossier à la battance, à partir de données multitemporelles Spot ;

— d'évaluer, au niveau d'une unité spatiale de fonctionnement de l'érosion, la pertinence du bilan des surfaces potentiellement ruisselantes issu de la télédétection vis-à-vis de l'érosion effective (perte en terre) selon le modèle développé par AUZET *et al.* (1993).

Pour cela, nous nous baserons sur certains travaux (KING C., 1985 ; KING C. *et al.*, 1989 ; COURAULT, 1989) qui ont montré l'existence d'un gradient de réflectance croissant dans le domaine proche infrarouge lié à la diminution de la rugosité de surface, elle-même en relation avec la fermeture de l'état de surface et la battance.

MATÉRIELS

Localisation et contexte agro-écologique de la zone d'étude

La zone d'étude, située dans le département du Pas-de-Calais, dans le nord de la France, appartient à un bassin sédimentaire dont le substrat est composé de roches calcaires recouvertes d'une épaisse couche de limons loessiques (jusqu'à 5-6 m). Le paysage géomorphologique se caractérise par une succession de plateaux sub-horizontaux à légèrement ondulés, accompagnés de pentes longues faibles à modérées (1 à 4 % sur les sommets, 8 à 10 % sur les versants), entrecoupés d'étroites vallées. L'horizon pédologique est principalement représenté par des luvisols (FAO) fortement sensibles à la dégradation structurale sous l'effet des pluies (sols limoneux à faible taux de matière organique) dont la hauteur annuelle oscille entre 750 et 1 100 mm. La plupart des événements pluvieux se concentrent de septembre à mars et sont généralement de faible intensité : temps de retour de deux ans d'une pluie de 20 mm/2 h et de 10 ans d'une pluie de 30 mm/2 h (PINGUET, 1985). Le paysage agraire de type *openfield* est dominé par la grande culture (blé, orge, pommes de terre, lin, pois).

Le site test étudié, Campagne-les-Hesdin (4 500 ha), est l'un des quatre sites pilotes sélectionnés par l'Inra comme représentatif de l'ensemble de la région. Il fait l'objet d'un suivi agronomique, pédologique et climatique depuis plusieurs années pour l'étude des phénomènes d'érosion (KING D. *et al.*, 1992). Une base de données géographiques détaillée décrit ce site sous le système ARC/ Info : parcellaire, morphologie, bassin versant élémentaire (BVE), carte géologique et pédologique au 1/10 000, occupation annuelle du sol.

Données satellitaires

Trois images du satellite Spot couvrant la frange côtière de la Manche, de Cayeux-sur-Mer à Boulogne (KJ 37-248), ont été acquises en janvier (22/01), mars (04/03) et mai (14/05) de l'année 1992. Chacune des images est disponible dans un format multispectral (3 bandes spectrales : vert, rouge, proche infrarouge) et digital. La capacité de

programmation de la plate-forme Spot a permis d'obtenir des scènes exemptes de couverture nuageuse malgré la période hivernale et bien réparties sur la période la plus active au regard des phénomènes d'érosion.

Données de terrain

COLLECTE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE POUR L'INTERPRÉTATION DES IMAGES

Simultanément à l'acquisition des images, trois séries de soixante-dix parcelles ont été enquêtées afin de fournir des références de terrain pour l'interprétation automatique des données satellitaires. Deux groupes de parcelles ont été distingués en fonction du taux de recouvrement des cultures estimé visuellement : taux supérieur à 30 % et taux inférieur à 30 %. Au-delà d'un seuil de 30 % de couverture végétale, le signal radiométrique enregistré par les systèmes de télédétection opérant dans les domaines visible et proche infrarouge n'est plus influencé de façon significative par le sol sous-jacent. En conséquence, les caractéristiques de la surface du sol ne peuvent être observées. Dans ce cas, le type de culture a été noté pour permettre la discrimination des zones en végétation. Inversement les parcelles du second groupe sont assimilées à des « sols nus », un indice de dégradation de l'état de surface a été relevé. Cet indice exprime le degré de fermeture de l'état de surface à un moment donné et concerne donc une dégradation structurale de la couche superficielle du sol. Cinq classes ont été considérées afin de couvrir l'ensemble des variations rencontrées sur le terrain (tabl. I). Elles décrivent les étapes successives de la dégradation structurale de l'état de surface du sol : l'état fragmentaire initial poreux qui fait suite à un travail du sol et où toutes les mottes et agrégats sont distincts (F0), la fermeture de la surface et la formation de croûtes structurales (F1) et enfin la formation de croûtes sédimentaires ou battance. Cette classification a été inspirée du système de classification conceptuel et descriptif de BOIFFIN (1984), basé sur une description de l'aspect de la surface du sol. Des problèmes de « subjectivité » liés à l'interprétation sont difficilement évitables. Le choix des parcelles enquêtées a d'abord été réalisé à partir de l'analyse des compositions colorées des images puis confirmé sur le terrain. Cette démarche a retenu des champs aisément identifiables sur les images, de grande taille (minimum d'environ 2 ha), en situation morphologique plane et caractéristiques d'un état de surface homogène. Chaque parcelle échantillonnée a fait l'objet de trois ou quatre notations ponctuelles de l'indice de dégradation de l'état de surface basées sur l'évaluation du degré de fermeture de la porosité, de la disparition des angles vifs sur les agrégats ainsi que de la proportion et de l'épaisseur des micro-croûtes sédimentaires.

En dernier lieu, il est nécessaire de souligner que la principale difficulté liée à ce travail de terrain résidait dans l'absolue nécessité de minimiser le laps de temps entre la

collecte des données sur le terrain et la prise de vue satellitaire afin d'éviter d'intégrer des modifications rapides pouvant intervenir à la surface des sols sous l'effet des pluies (changement de stade de dégradation) ou de travaux cultureux (rupture de la croûte de battance). La difficulté matérielle de respecter strictement cette règle dans le cas de l'image de mai a, en partie, contribué à l'impossibilité de son interprétation.

TABLEAU I

Système de classification des états de dégradation structurale de la surface des sols (d'après BOIFFIN, 1984)

Classification system of soil surface structural degradation (After BOIFFIN, 1984)

Code	Description de l'état de surface
F0	état fragmentaire initial poreux, travail du sol récent
F0-F1	état intermédiaire
F1	apparition de croûtes structurales
F1-F2	état intermédiaire
F2	apparition de croûtes sédimentaires, battance

ESTIMATION DES PERTES EN TERRE

Les signes d'érosion linéaires (griffes, rigoles, ravines), observés exhaustivement sur le site test de Campagne-les-Hesdin, ont été cartographiés à la fin du mois de mars, juste avant les travaux cultureux de printemps qui sont susceptibles d'effacer une grande partie des incisions. Dans la zone agro-écologique étudiée, la pratique courante du labour d'automne a pour conséquence la disparition de la plupart des manifestations d'érosion apparues au cours de l'hiver précédent. Ainsi la carte réalisée, représentative du réseau d'incision formé au cours de l'hiver 1992 (fig. 1), permet d'estimer des volumes annuels de perte en terre. Ces derniers seront utilisés comme élément de validation des bilans des surfaces potentiellement ruisselantes issus de la télédétection. Les pertes en terre provenant d'une érosion diffuse ou en nappe sont sur ce type de milieu considérées comme très faible au regard des pertes occasionnées par l'érosion par ruissellement concentré (MONNIER *et al.*, 1986 ; EIMBERCK, 1989). Contrairement à l'équation universelle des pertes en terre (USLE) de

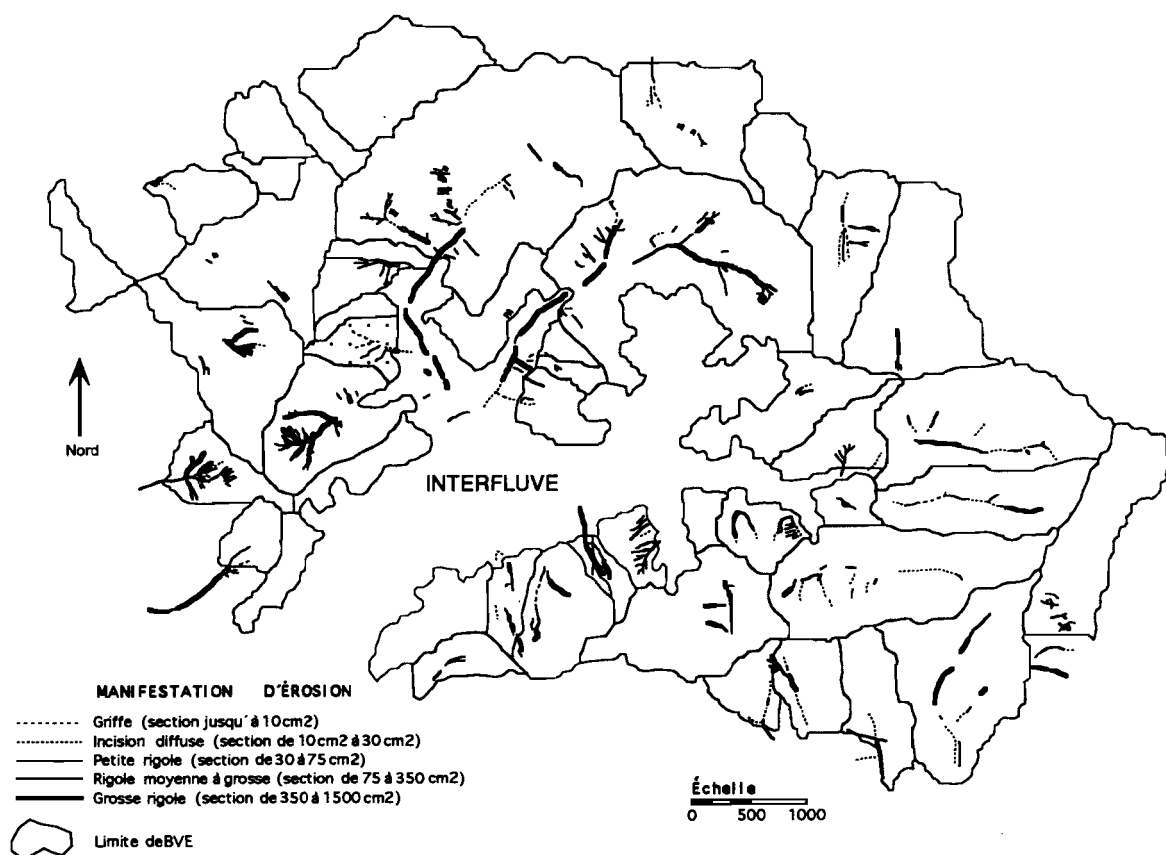


FIG. 1. — Carte des BVE et des signes d'érosion observés en mars 1992 (site expérimental de l'Inra — Campagne-les-Hesdin).
Map of the Ews and of the erosion traces observed in March 1992 (experimental site of Inra — Campagne-les-Hesdin).

WISCHMEIER et SCHMITH (1978), cette estimation découle directement des manifestations d'érosion observées sur le terrain et non d'un modèle empirique basé sur une pondération des principaux paramètres intervenant en amont du processus érosif.

Pour déterminer les volumes de perte en terre, les formes d'érosion linéaires observées ont été segmentées en plusieurs portions de section homogène pour lesquelles ont été relevées la largeur et la profondeur moyenne (AUZET *et al.*, 1993). Les parties graphique et sémantique (attribut) de chacun de ces éléments ont été numérisées et intégrées au sein du système ARC/Info. Les 3 paramètres longueur, largeur et profondeur qui caractérisent les tronçons d'érosion ont permis de dériver un nouvel attribut : le volume en creux de perte en terre. Les techniques de croisement automatique de données géoréférencées communes des systèmes d'information géographique (SIG) facilitent alors l'expression des volumes de pertes en fonction d'une ou plusieurs unités géographiques prédéfinies (bassins versant, communes).

Le MNT et la carte dérivée des bassins versant élémentaires (BVE)

Le BVE est défini comme un bassin hydrologique de premier ordre correspondant à l'impluvium de la branche ultime du réseau de drainage temporaire (BOIFFIN *et al.*, 1988). Il est caractérisé par un talweg d'une longueur mi-

nimum de 300 m, un exutoire unique, et est considéré comme l'unité spatiale de base de fonctionnement de l'érosion où sont observés ruissellement et incision.

Sur la zone test, la délimitation des BVE a été réalisée grâce au traitement automatique d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Un MNT est une représentation digitale et simplifiée du relief qui est reproduit par le codage des altitudes en chaque point d'une matrice. Le degré de fidélité des produits qui en sont dérivés dépend de la résolution spatiale de la grille d'échantillonnage et de la précision des altitudes qui sont ici respectivement de 50x50 m et de 1 m. Le MNT utilisé a été généré à partir de l'interpolation de courbes de niveau extraites d'une carte topographique IGN au 1/25 000 (CHERY *et al.*, 1992).

MÉTHODE

La méthode utilisée procède en trois étapes (1 - extraction, 2 - intégration, 3 - comparaison) agencées selon l'organigramme de la figure 2. À partir des données satellitaires sont extraites les surfaces de sols nus à différents états de dégradation et à partir du MNT sont extraits les BVE qui contrôlent le ruissellement potentiel maximal. Ces deux informations sont alors combinées et confrontées aux bilans d'incision et perte en terre intégrés sur ces mêmes bassins versants.

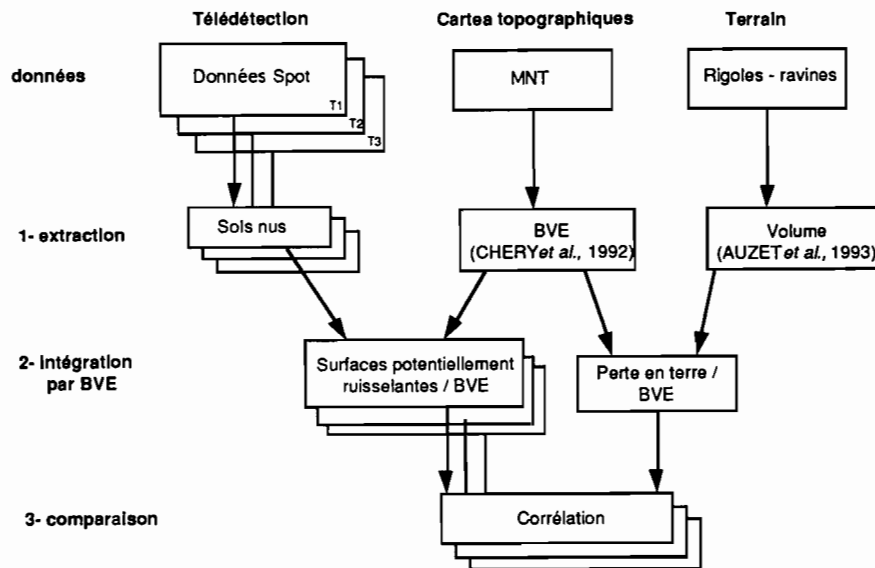


FIG. 2. — Méthodologie.
Methodology.

Extraction d'information des données Spot

L'exploitation des données satellitaires Spot a pour objectif de produire des cartes qui expriment à un moment

donné la distribution spatiale de différents niveaux de dégradation structurale de l'état de surface des sols.

La méthode utilisée combine deux techniques classiques de traitement d'image : les masques supervisés pour éli-

miner les surfaces en végétation ou pour annuler les surfaces urbanisées, et les techniques de classification multispectrale selon l'algorithme du maximum de vraisemblance pour classer les états de surface des sols nus. Ces dernières méthodes s'appuient sur des parcelles de référence dont les caractéristiques radiométriques permettent d'identifier et de sélectionner des populations de pixels similaires en termes statistiques. Le traitement de chacune des images a été réalisé individuellement.

SÉLECTION DES PARCELLES DE RÉFÉRENCE

Pour chacune des parcelles de référence, l'information radiométrique des images Spot a été mise en relation avec les variables relevées sur le terrain (indice de dégradation structurale, type de culture). La digitalisation à l'écran de chaque parcelle de référence sur la base de compositions fausse couleur a permis d'extraire les statistiques de base (moyenne et écart type) des valeurs radiométriques pour chacun des trois canaux originaux (vert, rouge, proche infrarouge) et deux nouveaux canaux composites : l'indice de végétation normalisé (NDVI) et l'indice de brillance (IB).

$$NDVI = 128 \left(\left[\frac{PIR - \text{rouge}}{PIR + \text{rouge}} \right] + 1 \right)$$

$$IB = \sqrt{\text{rouge}^2 + PIR^2}$$

MASQUES

Avant de réaliser les classifications, la population des sols nus de chaque image a été isolée. Les objets suivants ont été éliminés de l'étude grâce à l'utilisation des techniques de masquage basées sur des images binaires :

- les zones comprenant un taux de couverture végétal supérieur à 30 % : dans ce cas la composante du signal électromagnétique réfléchi provenant de la couverture pédologique est trop faible pour être caractérisée. Le masque a été généré à partir du seuillage du canal NDVI, choix du seuil résultant de l'analyse du comportement radiométrique de la végétation ;

- les affleurements calcaires sont généralement caractérisés par une forte réflectance dans les domaines spectraux étudiés et peuvent introduire des confusions avec les sols battants. Or, à l'inverse de ces dernières, les plages calcaires sont peu sensibles à la dégradation structurale et donc au ruissellement. L'approche multitemporelle a montré que l'évolution relative des réponses spectrales de ces deux surfaces au cours de l'hiver permet de les discriminer. Contrairement aux confusions observées en janvier, l'IB des plages calcaires en mars est beaucoup plus élevé que celui des zones battantes. Le canal IB de mars a été seuillé pour isoler les affleurements calcaires et le masque

résultant appliqué aux images de janvier et mai en raison du caractère permanent de ces unités dans le paysage ;

- les zones urbaines qui ont été délimitées à partir de l'interprétation visuelle d'une composition fausse couleur.

CLASSIFICATION MULTISPECTRALE

La méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée pour classer les sols nus selon trois nouveaux groupes d'états de surface : (1) état de surface non dégradé, (2) état de surface à dégradation intermédiaire et (3) état de surface dégradé. L'information radiométrique extraite des parcelles de référence permet de décrire statistiquement les caractéristiques spectrales de chaque classe au moyen de son vecteur moyenne et de la matrice de covariance. L'algorithme du maximum de vraisemblance calcule alors pour chaque pixel sa probabilité d'appartenance à chaque classe et lui attribue la classe de plus forte probabilité.

Intégration par bassin versant élémentaire

Du fait de la disjonction spatiale des phénomènes de ruissellement (impluvium) et d'incision (réseau de collecte des eaux) au sein d'un BVE, il est nécessaire, pour confronter les données acquises par voie satellitaire aux manifestations d'érosion relevées sur le terrain, de se situer à l'échelle des BVE et donc d'intégrer chacun de ces paramètres à cette échelle. D'autre part, la généralisation des variables au niveau des BVE permet de limiter le nombre de données à manipuler ce qui est une étape fondamentale pour envisager la transposition de cette étude pilote à une échelle régionale. Cette intégration est facilitée par les techniques de traitement digital de données géoréférencées propres aux systèmes d'information géographique et décrites par KING (D.) *et al.* (1992).

VARIABLES

Quatre types de données ont été intégrés par BVE :

- les cartes de dégradation d'état de surface ;
- la carte des signes d'érosion (réseau linéaire de rigoles et ravines) ;
- la carte du parcellaire agricole afin de décrire le découpage de l'espace agraire ;
- la carte des zones urbanisées.

Deux types de nouvelles variables ont ainsi été créés (tabl. II) :

- les pourcentages de surface occupés par chaque classe d'état de surface au sein de chaque BVE et pour chacune des dates (variables 1, 2, 3, 2-3) ;
- une estimation des pertes en terre (m³/ha) par BVE calculée à partir de l'intégration de la carte des signes d'érosion (variables SL).

À ces variables principales, il faut ajouter le pourcentage de zone urbanisée ainsi que le nombre de champs et la taille moyenne du parcellaire par BVE.

TABLEAU II
Variables obtenues suite à l'intégration par BVE
Variables generated from the integration process by BVE

Nom Variables	Description	Indice de date		
1	sols non dégradés (%). F0	Janvier	Mars	Mai
2	sols en transition (%). F0-F1, F1	Janvier	Mars	/
3	sols dégradés (%). F1-F2, F2	Janvier	Mars	/
2-3	Σ des variables 2 et 3 (%). F0-F1 à F2	Janvier	Mars	/
SL	perte en terre (m ³ /ha)	hiver entier		

/ : données non disponibles

% : pourcentage de surface par BVE

SÉLECTION DE BVE

Dix-neuf BVE sur les trente-sept initialement disponibles ont été préalablement sélectionnés. Le processus de sélection a considéré pour chacun des BVE un ou plusieurs des critères suivants : une proportion de zone urbanisée maximum (70 %), une surface totale minimum (25 ha), une proportion minimum d'état de surface dégradé (25 %) et une taille minimum de la moyenne parcellaire (0,5 ha). Bien que le choix des seuils reste la principale difficulté d'une telle sélection, ils ont été déterminés afin d'éliminer les BVE les moins représentatifs qui ont une caractéristique susceptible de fortement modifier le processus érosif rencontré dans ces milieux. D'autre part, si seulement 50 % des BVE du nombre ont été conservés, ils représentent 80 % de la surface initialement étudiée.

Analyse des corrélations

Des analyses de corrélation ont été réalisées afin d'étudier les relations qui peuvent exister entre la proportion des surfaces dégradées (variables 2, 3 et 2-3) et l'intensité de l'érosion (variable SL). D'autre part, l'influence de la période d'acquisition des images satellitaire sur ces relations a pu être abordée grâce à l'approche multitemporelle. L'hypothèse de travail suppose qu'à l'échelle du BVE une augmentation de la proportion d'état de surface dégradé induit une augmentation des pertes en terre. On se situe donc dans le cadre d'un modèle probabiliste où, par exemple, l'organisation spatiale des états de surface au sein du BVE n'est pas prise en compte. Cette approche implique aussi que le niveau de fermeture de l'état de surface est le paramètre prépondérant déterminant l'intensité de l'érosion (AUZET *et al.*, 1993).

RÉSULTATS

Les résultats peuvent être divisés en trois catégories.

Comportement radiométrique de la dégradation structurale de surface

Les cinq classes d'état de surface décrites sur le terrain se répartissent en trois groupes de comportement radiométrique distinct. Le « scattergramme » proche infrarouge (PIR) — rouge des données de janvier (fig. 3) résume ce résultat. Ces trois groupes sont organisés le long du très classique « axe des sols » de la manière suivante :

- groupe 1 : état de surface non dégradé, F0 ;
- groupe 2 : état de surface à dégradation intermédiaire, F0-F1, F1 ;
- groupe 3 : état de surface dégradé, F1-F2, F2.

Extraction d'information des données Spot

En concordance avec le schéma précédent, une classification automatique, validée par des méthodes statistiques sur les trois canaux originaux de Spot (vert, rouge, PIR), a été réalisée pour chacune des dates de janvier et de mars où des résultats similaires ont été trouvés.

Cette analyse radiométrique confirme la relation existant entre la réflectance PIR enregistrée par Spot et le degré de fermeture de l'état de surface, lui-même lié à la rugosité du sol (KING, 1985 ; COURAULT, 1989).

Les confusions interclasses au sein des groupes ont montré clairement les limites existantes pour aller plus loin dans la discrimination radiométrique des états de surface étudiés selon la méthode qui a été suivie. Certains points peuvent être mis en avant pour expliquer cette limitation :

- l'interaction d'autres paramètres édaphiques sur le signal radiométrique enregistré par Spot tels que l'humidité, la texture ou le taux de matière organique, etc.
- l'utilisation d'indices de dégradation structurale descriptifs qui peut conduire à une certaine subjectivité ;
- la difficulté de totalement intégrer les variations intraparcélaires de l'état de surface dans le système de collecte des références de terrain ; un relevé sur le terrain est assimilé à une valeur moyenne de réflectance d'un large groupe de pixels.

Classification des états de surface des sols nus

Malgré des confusions certaines aux bornes de chaque groupe défini, le comportement radiométrique des sols nus sert de base à la mise en œuvre d'une classification multispectrale sur l'ensemble du site test. Les performances de cette classification sont très bonnes pour les données de janvier 1992 (tabl. III). Celles-ci sont évaluées principalement par rapport à la précision du producteur et à la précision de l'utilisateur qui correspondent respectivement à la proportion de pixels bien classés dans une classe par rapport au nombre de pixels identifiés sur le terrain dans

cette classe et à la proportion de pixels bien classés dans une classe par rapport à l'ensemble des pixels classés dans cette classe.

Ces performances sont très similaires pour les données acquises en mars : classe 1, 98,4 % de précision producteur et 82,2 % de précision utilisateur ; classe 2, 79,9 % et 88,4 % et classe 3, 88,5 % et 97,2 %. En revanche au mois de mai, les sols nus sont pratiquement tous au même stade de semis de printemps, avec très peu de parcelle encroûtée. D'autre part une proportion très importante de la surface étudiée est sous végétation. Aucune cartographie des stades de dégradation n'a donc pu être tentée.

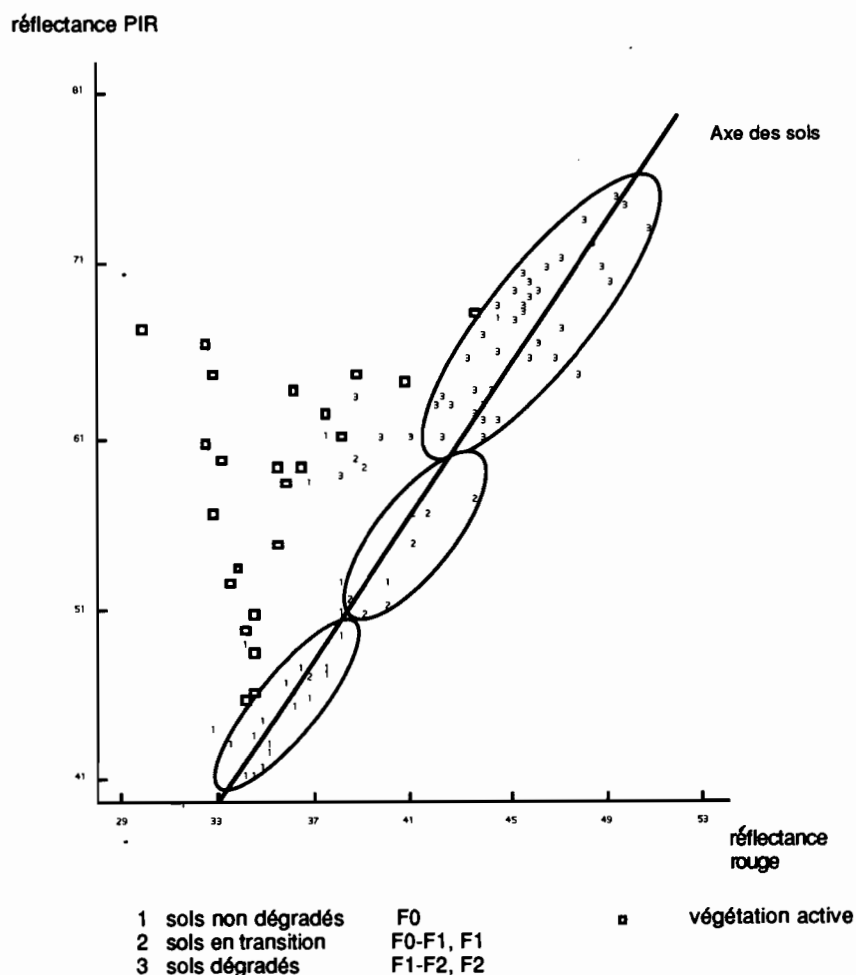


FIG. 3. — Scattergramme PIR sur rouge : comportement radiométrique des différents états de dégradation de l'état de surface du sol (données de janvier).

Scattergram NIR versus red reflectance : radiometric behaviour of the different soil surface degradation levels (January date).

TABLEAU III

Performances de la classification de l'image Spot de janvier (22/01/1992) : matrice de confusion
Quality of the classification of the January Spot image (22/01/1992) : confusion matrix

Classification Image	Classe 1	Classe 2	Classe 3	PP (%)	Total Moyenne*
Classification Terrain					
Classe 1	896	287	0	75,7	1183
Classe 2	139	680	100	74,0	919
Classe 3	44	17	667	91,2	728
PU (%)	83,0	69,1	87,0	/	79,7*
Total - Moyenne*	1079	984	767	80,3*	2830

Classe 1 F0
 Classe 2 F0-F1, F1
 Classe 3 F1-F2, F2

PU Précision Utilisateur
 PP Précision Producteur

Cette analyse des classifications montre comment s'établit un bilan cartographique des sols nus à trois stades de dégradation en janvier (Pl. 1) comme en mars. Ce bilan sert de support à l'intégration par bassin versant.

Corrélation état de surface – pertes en terre

Pour rechercher des corrélations significatives entre les faits observés et les indices détectés par voie satellitaire, nous avons testé plusieurs hypothèses :

1 — Seules les surfaces dégradées (variable 3) influent sur le ruissellement de chaque BVE ;

2 — Les surfaces dégradées (variable 3) et les surfaces dites de transition (variable 2) contribuent simultanément au ruissellement (variable 2-3).

Les corrélations entre ces différentes variables et les pertes en terre (SL) sont faites d'une part séparément à chaque date d'observation, puis en recherchant un effet cumulé des surfaces contributives de mars sur janvier. La variable correspondante Σ intègre les surfaces de la classe 2-3 de janvier et les nouvelles surfaces apparues en classe 2 ou 3 entre janvier et mars. Cette variable est obtenue par une combinaison logique des deux images classées. On note une augmentation significative des zones contribuant au ruissellement avec en moyenne 23 % de surface en plus et une variation totale selon les BVE de 0 à 49 %.

Une seule relation significative a été identifiée entre l'importance des surfaces potentiellement ruisselantes et les pertes en terre (tabl. IV). Elle concerne les surfaces dégradées avant la fin du mois de janvier. Il apparaît que les surfaces observées dégradées en mars ne sont pas liées au volume de perte en terre. D'autre part, en dépit de l'augmentation des surfaces contributives au ruissellement entre janvier et mars, Σ -SL n'a donné aucun résultat probant ($R = 0,39$). Ce résultat semble confirmer l'influence prépondérante des surfaces dégradées avant janvier sur le développement des incisions.

TABLEAU IV

Coefficients de corrélation (R) entre les surfaces battantes et les pertes en terre

Correlation coefficients (R) between crusting areas and soil loss

Variable	2 (F0-F1, F1)	3 (F1-F2, F2)	2-3 (F0-F1 à F2)
Date			
Janvier	0,29 *	0,4 *	0,48 **
Mars	0,29 *	-0,06 *	-0,39 *
Σ	/	/	0,39 *

(*) Non significatif (**) $P < 0,05$

DISCUSSION

À la lumière des résultats obtenus lors de cette expérimentation, trois questions doivent être discutées et approfondies :

1 — Quelle est la qualité de l'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes (SPR) par voie satellitaire ?

2 — Cette estimation est-elle suffisante pour être utilisée comme un indicateur prédictif de l'érosion compte tenu des conditions climatiques de l'hiver 1991-1992 ?

3 — Quelles sont les implications d'une érosion « conjoncturelle » sur le choix des données satellitaires pertinentes ?

La méthode d'estimation des SPR par imagerie satellitaire s'est appuyée sur les relations entre la rugosité des sols et la réflectance visible — PIR (COURAULT, 1989). Elle s'est avérée tout à fait pertinente pour les milieux de sols limoneux (fig. 3 et tabl. III). Avec cette approche s'ouvrent ainsi les possibilités d'une acquisition de paramètres spatialisés de même nature que ceux mis en relation avec l'érosion par AUZET *et al.* (1993) : les états de surface. Les travaux de recherche actuels s'appuient sur ces relations pour développer une approche prédictive de

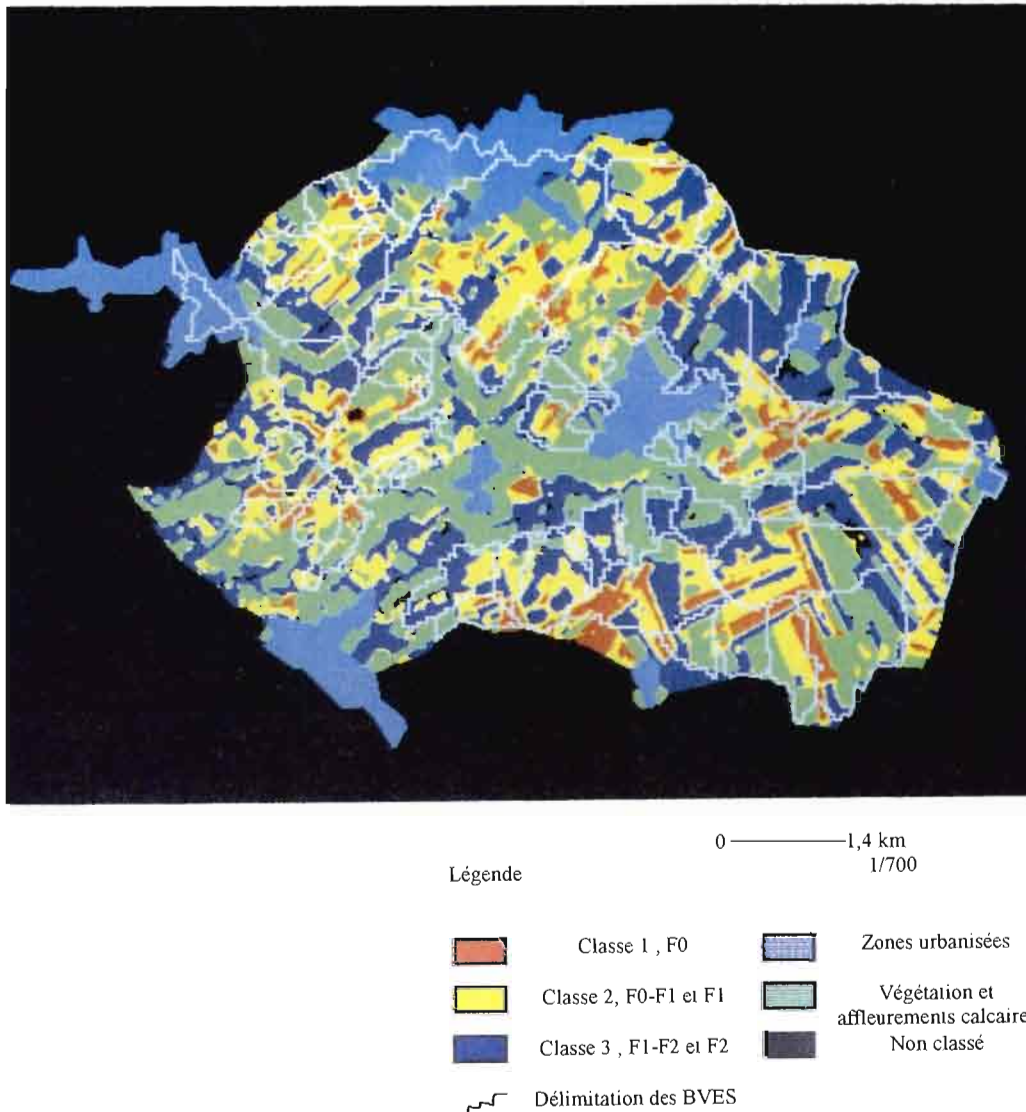


PLANCHE 1. — Classification de l'image Spot de janvier (22/01/92) sur le site test de Campagne-les-Hesdin avec incrustation des Bassins versants Élémentaires.

Classification of the January Spot image (22/01/92) focusing on the INRA's test site of Campagne-les-Hesdin with incrustation of the elementary watersheds.

l'érosion (KING D. et LE BISSENNAS, 1992). Dans cette perspective, la question est de savoir si les estimations des SPR fournies par télédétection de façon spatialisée peuvent s'utiliser comme des indicateurs prédictifs.

Pour valider cette hypothèse, nous avons proposé dans cette étude une méthode qui s'appuie sur les résultats de mesure de l'érosion effective. Les résultats obtenus sont à restituer dans le cadre des conditions d'établissement des relations entre surfaces contributives et terres exportées (AUZET *et al.*, 1993). Celles-ci ont été établies à partir de données collectées sur vingt bassins versants pendant

trois hivers successifs (soixante points). Elles ont donné un coefficient de corrélation de 0,73. Parallèlement, les auteurs montrent que la variabilité interannuelle est forte puisque, pour chaque hiver pris individuellement, les résultats varient de 0,37 à 0,82. D'autre part, on constate que les corrélations s'améliorent avec l'augmentation de l'intensité érosive annuelle moyenne caractérisée par une augmentation des pertes en terre. Ainsi l'hiver 1990-1991 ($R^2 = 0,82$) est caractérisé par une production de sédiments comprise entre 0 et 12 m³/ha alors que l'année 1989-1990 ($R^2 = 0,37$) n'enregistre qu'une variation de 0 à 3 m³/ha.

Dans notre cas, la variation des pertes en terre observée varie de 0 à 1,8 m³/ha, ce qui est encore inférieur aux situations analysées ci-dessus. Les conditions d'érosivité très faibles durant notre étude constituent donc un handicap pour le type de validation que nous avons préconisé et peuvent expliquer en bonne part la faiblesse des corrélations obtenues. En revanche, ces résultats sont du même ordre que ceux obtenus sur le même site par LE BISSONNAIS et CHERY (*à paraître*) selon une autre méthode. L'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes est obtenue par la combinaison spatiale de deux informations collectées systématiquement sur le secteur de Campagnes-Hesdin : la texture des sols dérivée d'une carte pédologique au 1/10 000 et l'occupation du sol de l'hiver considéré selon le parcellaire cadastral. Les textures sont

reclassées en fonction de leur sensibilité à la dégradation structurale et l'occupation du sol est décrite selon quatre groupes de cultures organisés en fonction de leur susceptibilité à favoriser ou à limiter la battance : cultures d'hiver, prairies, cultures de printemps précoces et tardives. Le croisement de ces deux couches de données selon un système de poids permet alors d'obtenir par BVE des pourcentages de SPR. La corrélation entre ces estimations et l'érosion effective est comparée à nos résultats (tabl. V). L'estimation par voie satellitaire obtenue le même hiver sur le même site semble mieux identifier la part des surfaces contributives du ruissellement puisque l'on observe une corrélation plus élevée dans ce dernier cas. Cela confirme l'intérêt d'user de cette source d'informations spatialisées.

TABLEAU V
Comparaison de deux méthodes d'évaluation spatiale
des risques d'érosion
Comparison of two methods of spatial assessment of erosion risk

Méthode	Combinaison spatiale « texture/occupation du sol »			États de surface images de Spot
	1989-1990	1990-1991	1991-1992	1991-1992
Hiver				
R	0,37	0,45	0,30	0,48

R : coefficient de corrélation calculé entre les Surfaces Potentiellement Ruisselantes (SPR) et les pertes en terre par BVE.

Notre approche multitemporelle visait à extraire un bilan cumulé des surfaces potentiellement ruisselantes au cours des saisons sensibles (hiver et printemps). Les résultats ont montré que seule l'image de janvier est pertinente (tabl. IV). Ceci souligne les difficultés d'une approche multitemporelle, lorsque la définition de la date optimale d'observation n'est pas connue *a priori* et surtout peut varier selon les conditions pluviométriques de l'hiver. Dans notre étude, l'année 1991-1992 est caractérisée par une forte concentration des pluies d'automne. Sur une moyenne de 380 mm de pluies d'octobre à février, 78 % sont tombés en automne, dont un pic de 54 % pour le seul mois de novembre. Les pluies se sont donc concentrées avant le 22 janvier, date de prise de vue de la première image. Seules les parcelles ensemencées se sont encroûtées dès les premières pluies d'automne et ont généré un fort ruissellement. Les incisions n'ayant été observées que dans les parcelles de semis les plus précoces, on peut penser qu'une image acquise antérieurement aurait permis de cerner avec une plus grande exactitude l'enveloppe des SPR. On se heurte alors à une autre difficulté technique générée par les couverts nuageux qui interdisent toute ac-

quisition d'image dans ces domaines de longueur d'onde. La faisabilité d'une détection précoce des SPR est alors à tenter grâce aux techniques radar (SOLBERG, 1992) qui mobilisent actuellement l'attention de plusieurs équipes.

Les SPR par BVE sont des mesures directes et objectives qui intègrent l'ensemble des paramètres déterminant le déclenchement de la première étape du processus érosif : la dégradation structurale de la surface du sol. Dans un deuxième temps, l'affinement des corrélations SPR — la perte en terre pourrait être envisagée par la prise en compte d'autres critères qui agissent sur l'écoulement et la concentration érosive du ruissellement tels que l'organisation spatiale intra-BVE des états de surface, la morphologie des BVE ou la longueur du réseau d'incision potentiel (AUZET *et al.*, 1993 ; DE ROO, 1993). Dans le milieu étudié, la pente n'influence pas significativement l'intensité de l'érosion. L'intégration de ces nouveaux critères pourrait être réalisée grâce au développement d'indices à l'échelle des BVE (indice de compacité des BVE, indice de contiguïté des états de surface, indice de longueur du réseau de drainage) qui seraient utilisés pour pondérer l'effet des SPR sur les pertes en terre.

CONCLUSION

Le premier intérêt de cette méthode est de proposer un moyen d'estimation fiable des surfaces potentiellement ruisselantes à une date donnée et de pouvoir en établir un bilan cartographique sur de vastes régions. Cette méthode devrait s'avérer relativement facile à transposer à d'autres milieux car elle n'est pas affectée par des hypothèses ou des relations empiriques entre le complexe climat/sol/végétation/pente et les pertes en terre. L'information fournie, les surfaces potentiellement ruisselantes, est une composante peu ou pas biaisée d'un modèle d'érosion qui, lui, dépendra de chaque milieu et contexte climatique.

Les limites de cette étude se sont ici heurtées aux conditions d'érosivité faible de cet hiver. Elles n'ont pas per-

mis de transposer les estimations réalisées par bassin versant en indicateur prédictif de l'érosion, mais les principes des corrélations à établir entre érosion effective et indicateurs satellitaires restent une voie incontournable pour envisager de mettre en place des méthodes prédictives de l'érosion sur des bases régionales.

REMERCIEMENTS

Cet article, publication scientifique N93029 du BRGM, a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche financée par le Programme national de télédétection spatiale (PNTS), le BRGM et l'Inra. Les auteurs souhaitent remercier le professeur J.C. Taylor, directeur du département de télédétection de Silsoe College (UK) pour sa participation à ce travail.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 30 janvier 1995.

BIBLIOGRAPHIE

- AUZET (A. V.), 1987. — L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de Géographie*, 537 : 529-556.
- AUZET (A. V.), BOIFFIN (J.), PAPY (F.), LUDWIG (B.), MAUCORPS (J.), 1993. — Rill erosion as a fonction of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *CATENA*, 20 : 41-62.
- BOARDMAN (J.), 1990. — « Soil erosion on the South Downs : a review ». In : Boardman (J.), Foster (I. D. L.) et Dearing (J. A.), éd. : *Soil Erosion on Agricultural Land*, Chichester, John Wiley and Sons : 87-106.
- BOCCO (G.), VALENZUELA (C. R.), 1988. — Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. *ITC Journal*, 14 : 309-313.
- BOIFFIN (J.), 1984. — *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse doct. ingénieur, Paris, Ina-PG, 320 p.
- BOIFFIN (J.), PAPY (F.), EIMBERCK (M.), 1988. — Influence des systèmes de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux. *Agronomie*, 8 (8) : 663-673.
- CHERY (P.), LE BISSONNAIS (Y.), KING (D.), DAROUSSIN (J.), 1992. — Définition et délimitation des Unités Spatiales de Fonctionnement (USF) du ruissellement et de l'érosion. In : Buche (P.), King (D.), Lardon (S.), éd. : *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, Paris, Inra : 133-147.
- COURAULT (D.), 1989. — *Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Analyses spectrales, spatiales et diacroniques*. Thèse doct. université Paris-VI, 214 p.
- CYR (L.), PERRAS (S.), BONN (F.), PESANT (A.), WILLM (T.), 1991. — « Évaluation 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 : 659-662.
- DE PLOEY (J.), 1989. — Erosional systems and perspectives for erosion control in European loess areas. *Soil Technology Series*, 1 : 93-102.
- DE ROO (H. B.), 1993. — Validation of the ANSWERS catchment model for runoff and soil erosion simulation in catchments in the Netherlands and United Kingdom. *Hydrogis* 93, I2AHS n° 211 : 465-474.
- DE Vlieghe (B. M.), 1990. — « Environmental degradation mapping in Euboia (Central Greece) using multisource satellite data ». In : *10th EARSel Symposium « New European Systems, sensors and application »*, Toulouse, France : 297-305.
- DOUAY (F.), MASSON (F.), PELLETIER (J. L.), 1980. — *Érosion des terres agricoles du Nord - Pas-de-Calais*. Report SRAE - université de Lille, 40 p.
- DUBUCQ (M.), DARTEYRE (J. P.), REVEL (J. C.), 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*, 2 : 70-76.
- DUCK (R. W.), McMANUS (J.), 1990. — Relationships between catchment characteristics, land use and sediment yield in the Midland Valley of Scotland. In : Boardman (J.), Foster (I. D. L.), Dearing (J. A.), éd. : *Soil Erosion on Agricultural Land*, Chichester, John Wiley and Sons : 87-106.
- EIMBERCK (M.), 1989. — Facteurs d'érodabilité des sols limonneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux. *Cah. Orstom, série Pédol.*, vol. XXV, n°s 1-2 : 81-94.
- EVANS (R.), 1990. — « Discrimination and monitoring of soils ». In : Steven (M. D.), Clark (J. A.), éd. : *Applications of Remote Sensing in Agriculture*, Butterworths : 75-95.
- FARRES (P. J.), 1987. — The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *CATENA*, 14 : 119-130.
- FRAZIER (B. E.), CHENG (Y.), 1989. — Remote sensing of soils in the Eastern Palouse region with Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28 : 317-325.
- HELLDEN (U.), OLSSON (L.), 1986. — « Soil erosion, fuelwood and land use assessment in Ethiopia, an approach to envi-

- ronmental monitoring and planning ». In : *20th Symposium International of Remote Sensing of Environment ERIM* : 220-234.
- KING (C.), 1985. — *Étude des sols et des formations superficielles par télédétection*. Thèse de doct. ingénieur, Paris, Ina-PG. Document BRGM n° 96, 174 p.
- KING (C.), MAUCORPS (J.), AUMONIER (F.), RENAUX (B.), LENOIRE (N.), 1989. — Détection d'indices d'érosion par Spot dans les sols limoneux du Nord - Pas-de-Calais, une étude multidate. *Bulletin SFPT*, 14 : 10-13.
- KING (C.), DELPONT (G.), 1993. — Spatial assessment of erosion : contribution of remote sensing, a review. *Remote Sensing Review*, vol. 7 : 223-232.
- KING (D.), LE BISSENNNAIS (Y.), 1992. — Rôle des sols et pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux : exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *C.R. Acad. Agriculture* : 91-105.
- KING (D.), LE BISSENNNAIS (Y.), HARDY (R.), EIMBERCK (M.), MAUCORPS (J.), KING (C.), 1992. — Spatialisation régionale de l'évaluation des risques de ruissellement. *Revue des Sciences de l'Information Géographique et de l'Analyse Spatiale*, 2 (2) : 229-246.
- LE BISSENNNAIS (Y.), BRUAND (A.), JAMAGNE (M.), 1989. — Laboratory experimental study of soil crusting : relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *CATENA*, 16 : 377-392.
- LEFÈVRE (P.), 1958. — Quelques phénomènes d'érosion en Picardie. *Annales Agronomiques*, 1 : 91-129.
- MONNIER (G.), BOIFFIN (J.), 1986. — Effects of the agricultural use of soils on water erosion : the case of cropping systems in Western Europe. In : Chisci (G.), Morgan (R. P. C.), éd. : *Soil Erosion in European Community : Impact of Changing Agriculture*, Balkema, Boston, Rotterdam : 210-217.
- MONNIER (G.), BOIFFIN (J.), PAPY (F.) 1986. — Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées. Cas de systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXII, n° 2 : 123-131.
- OUVRY (J. F.), 1989. — Effets des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré : expérience du Pays de Caux (France). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXV, n° 1-2 : 157-169.
- PINGUET (A.), 1985 — *Aperçu sur la pluviométrie en pays de Caux*. Doc. Interne, Bioclimatologie, Inra, Avignon.
- POESEN (J. W. A.), 1989. — Conditions for gully formation in the Belgian Loam Belt and some ways to control them. *Soil Technology Series*, 1 : 39-52.
- SOLBERG (R.), 1992. — « Monitoring soil erosion in agricultural fields by ERS-1 SAR ». In : *12th Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Houston, USA : 1356-1359.
- WISCHMEIER (W. H.), SCHMITH (D. D.), 1978. — « A universal soil loss equation to guide conservation farm planning ». In : *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci.* V1 : 418-425.