

États de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France

B. Ludwig (1), A.V. Auzet (2), J. Boiffin (1), F. Papy (3), D. King (4) et J. Chadœuf (5)

(1) : INRA - Unité d'Agronomie de Laon Péronne, rue Fernand Christ, F 02007 LAON cedex

(2) : CEREG - URA 95 CNRS, 3 rue de l'Argonne, F 67083 STRASBOURG cedex

(3) : INRA - SAD, F-78850 THIVERNAL-GRIGNON

(4) : INRA - Unité de Science du Sol, S.E.S.C.P.F., Avenue de la Pomme de Pin, F 45160 ARDON

(5) : INRA - Unité de Biométrie d'Avignon, Domaine St Paul, Site Agroparc, F 84914 AVIGNON Cedex 9

RÉSUMÉ

La variabilité de l'érosion en rigole issue d'un ruissellement concentré a été analysée en fonction des caractéristiques topographiques, pédologiques et agraires de 33 bassins versants élémentaires cultivés (BVE). D'une superficie comprise entre 3 et 95 ha, ces BVE ont été sélectionnés dans le Nord de la France et étudiés au cours de quatre périodes hivernales (de 1988/89 à 1991/92). La variation des taux d'érosion, c'est-à-dire du volume des rigoles rapporté à la surface du BVE, est forte (0 à 11.7 m³/ha) et est corrélée à l'aire des zones présentant un état structural superficiel propice au ruissellement. Ces zones sont identifiées d'après le stade d'évolution des croûtes de battance, l'importance des traces de roue et la rugosité. Les coefficients de ruissellement mesurés à l'exutoire de trois bassins versants sont également corrélés à la proportion du BVE occupée par ces zones.

Pour une meilleure compréhension de l'érosion en rigole, une analyse de la structure hydrographique des BVE a été réalisée. Cette structure hydrographique se compose d'un réseau de collecteurs du ruissellement qui est constitué par des motifs linéaires topographiques ou agraires. Ce réseau est découpé en segments, caractérisés par leur longueur, leur pente, la sensibilité du sol à l'incision et l'aire contributive au ruissellement connectée au segment. La fréquence de présence d'une incision le long d'un segment est fortement corrélée à la pente et à l'aire contributive au ruissellement. Pour les segments présentant une incision, la section incisée de la rigole est corrélée à l'aire contributive au ruissellement, à la pente et à la sensibilité du sol à l'incision. Le taux d'érosion en rigole estimé au niveau du BVE, en tenant compte de cette structure hydrographique, est étroitement corrélé avec les taux d'érosion mesurés. On montre ainsi que la position spatiale relative des aires contributives au ruissellement et du réseau des collecteurs est déterminante vis à vis des risques d'érosion en rigole. La modélisation de ce type d'érosion devrait intégrer un sous-modèle décrivant cette structure hydrographique, ainsi que son évolution au cours du temps sous l'effet du climat et des pratiques agricoles.

Mots clés

Erosion, rigole, ruissellement concentré, bassin versant cultivé, état de surface, collecteur du ruissellement, structure hydrographique.

SUMMARY

SOIL SURFACE STATE, HYDROGRAPHIC STRUCTURE AND RILL EROSION IN CULTIVATED CATCHMENTS IN THE NORTH OF FRANCE

This study analyses the rill erosion caused by concentrated runoff as a function of the topographical, pedological and land use characteristics of cultivated catchments. 33 elementary catchments in Northern France (figure 1), from 3 to 95 ha, were studied for four winters seasons (1988/89 to 1991/92). The between-catchment differences in erosion rates were very large (0 to 11.7 m³/ha) (figure 2), and could not be explained by the differences in rainfall (table 1). The size of the runoff contributing area was defined by combining the development of soil crust, the extension of wheel tracks, the surface roughness and took into account the effect of rainfall, soil texture and land use (figures 3 and 4, table 4). The size of the runoff contributing area was the main factor accounting for erosion rates (figure 5, table 5). The runoff coefficients recorded at the outlet of three catchments were correlated with the proportion of area having such characteristics (figure 6).

A better explanation of the erosion rate was obtained by taking into account the hydrographic structure of each catchment. A model of the runoff collector network was built from topographical and agricultural information. 80 - 95 % of the rill volumes were located on a predefined linear features (table 2). Most of the rills in the upslope part of the catchment were associated with agricultural linear features (table 3). This runoff collector network was split into uniform segments. The length, slope gradient, soil susceptibility to scouring and size of upslope runoff contributing areas connected to the segment (figure 8) were determined for each segment. The frequency of rill occurrence was highly correlated with the slope gradient and the runoff contributing area (table 6). The rill cross-sectional areas of eroded channels were correlated with the runoff contributing area, the slope gradient and the soil susceptibility to scouring. Catchment erosion rates were estimated by adding predicted rill volumes for each segment within the catchment. These estimations were closely correlated with observed erosion rates (figure 9), while observed erosion rates were poorly correlated with the catchment global attributes. The relative spatial positions of runoff contributing areas and runoff collectors must be taken into account when examining the damage caused by concentrated flow erosion. Models of concentrated flow erosion in cultivated catchments should incorporate submodels describing the hydrological structure of the catchment, and how it changes with time under the effect of weather and agricultural management.

Key-words

Erosion, rill/concentrated runoff, cultivated catchment, soil surface state, runoff collectors, hydrographic structure.

RESUMEN

ESTADOS DE SUPERFICIE, ESTRUCTURA HIDROGRÁFICA Y EROSIÓN EN ZANJAS EN CUENCAS CULTIVADAS DEL NORTE DE FRANCIA

La variabilidad de la erosión en zanjás debido a un escurimiento concentrado fue analizada en función de la características topográficas, edafológicas y agrarias de 33 cuencas elementarias cultivadas (BVE). De una superficie de 3 a 95 has, estas BVE fueron seleccionadas en el norte de Francia y estudiadas durante cuatro periodos invernales (de 1988/89 a 1991/92). La variación de las tazas de erosión, es decir del volumen de las zanjás relacionado a la superficie de la BVE, es fuerte (0 a 11,7 m³/ha) y está correlada al área de las zonas que presentan un estado estructural superficial propicio al escurimiento. Estas zonas están identificadas según el estado de evolución de la costra de óbatidezó, la importancia de las trazas de ruedas y la rugosidad. Los coeficientes de escurimientos medidos al exutorio de tres cuencas están igualmente corelados a la proporción de la BVE ocupada por estas zonas.

Para una mejor comprensión de la erosión en zanjás, un análisis de la estructura hidrográficas de las BVE fue realizado. Esta estructura hidrográfica se compone de una red de colectores del escurimiento que es constituida por motivos lineares topográficos o agrarios. Esta red esta cortada en segmentos, caracterizados por su longitud, su pendiente,

la sensibilidad del suelo a la incisión y el área contributiva al escurimiento conectada al segmento. La frecuencia de presencia de una incisión a lo largo del segmento es fuertemente corelada a la pendiente y al área que contribuye al escurimiento. Para los segmentos que presentan una incisión, la sección incidida de la zanja está corelada al área contributiva al escurimiento, a la pendiente y a la sensibilidad del suelo a la incisión. La taza de erosión en zanja estimada al nivel de la BVE, teniendo en cuenta esta estructura hidrográfica, está estrechamente corelada con las tazas de erosión medidas. Se muestra así que la posición espacial relativa de las áreas contributivas al escurimiento y de la red de colectores es determinante frente a los riesgos de erosión en zanjás. La modelización de este tipo de erosión tendrá que integrar un sub-modelo que describa esta estructura hidrográfica, así como su evolución con el tiempo bajo efecto del clima y de las practicas agrícolas.

Palabras claves

Erosión, escurimiento concentrado, cuenca hidrográfica cultivada, estado de superficie, colector del escurimiento, estructura hidrográfica.

AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre du projet AGIR (Adaptation et Gestion des Intrants dans le Respect de l'Environnement) du programme AGROTECH de l'INRA. En accord avec le secrétariat de rédaction, cet article présente la synthèse en langue française de résultats dont la plus grande partie a fait l'objet de publications partielles en langue anglaise.

INTRODUCTION

Parmi les grands types d'érosion (De Ploey, 1989 ; Auzet et al., 1990 ; Boiffin et Monnier, 1994), l'érosion en rigole issue d'un ruissellement concentré est la plus caractéristique des régions à conditions pluviométriques et topographiques modérées, mises en valeur de façon intensive par des systèmes de culture à base de plantes annuelles (Monnier et Boiffin, 1986 ; Monnier et al., 1986 ; Boiffin et al., 1988). Ainsi, dans les zones de plateaux limoneux du Nord du Bassin Parisien, ce type d'érosion apparaît comme un phénomène chronique, notamment pendant la période hivernale. Dans certaines conditions, il peut même prendre un caractère catastrophique en raison des inondations boueuses qui lui sont associées à l'aval des bassins versants agricoles (Auzet, 1987 ; Boardman, 1988 ; Boardman, 1990). Papy et Douyer (1991) ont montré que ce type d'événement pouvait se produire lors d'épisodes pluvieux non exceptionnels, si les chenaux d'écoulement d'où proviennent les sédiments sont associés à des impluviums de grande taille et si l'état de surface de ces derniers est propice au ruissellement.

L'érosion par ruissellement concentré, à l'origine de rigoles, voire de ravines, résulte de la connexion hydrologique entre une aire génératrice de ruissellement, qui n'est pas nécessairement érodée, avec un collecteur linéaire, au niveau duquel les débits et vitesses tractrices des écoulements dépassent les seuils d'incision (Foster, 1990 ; Moore et Foster, 1990). La capacité d'infiltration et de stockage superficiel (hauteur d'eau maximale pouvant être stockée à la surface du sol avant le démarrage du ruissellement), qui déterminent l'aptitude du terrain à produire un ruissellement, dépendent étroitement de l'état structural et hydrique des couches superficielles du sol (Hillel, 1974 ; Boiffin et Monnier, 1986 ; Le Bissonnais, 1992). Cet état est lui-même très fortement influencé par les opérations culturales et par les événements climatiques, qui induisent une évolution complexe de l'infiltrabilité et du stockage superficiel, où alternent des phases d'évolution progressive et de modifications brutales (Monnier et Boiffin, 1986 ; Monnier et al., 1986 ; Boiffin et Papy, 1988 ; Imeson et Kwaad, 1990 ; Ouvry, 1990). Il en résulte une chronologie d'apparition et de développement des rigoles étroitement liée à l'histoire culturale et climatique des parcelles qui leur sont hydrologiquement connectées (Boiffin et al., 1988). Au niveau des collecteurs du

ruissellement, la sensibilité à l'incision du sol est contrôlée par la cohésion du sol, elle-même dépendante de la texture et de l'état hydrique du sol (Guérif, 1988 ; 1990), de la structure des horizons de surface (Lyle et Smerdon, 1965 ; Rauws et Auzet, 1989) et de la présence éventuelle d'une armature racinaire. Il y a donc là aussi une forte interaction des caractéristiques pédologiques, climatiques et agraires.

Pour évaluer les risques d'érosion dans un tel contexte, et définir les mesures de prévention ou de protection appropriées, les références classiques, comme l'Équation Universelle des Pertes en Terre ou USLE (Wischmeier et Smith, 1978) et ses dérivées, sont inadéquates car elles concernent les érosions de type diffus ou du type rigole - interrigoles (Wischmeier, 1976). Par rapport à l'érosion par ruissellement concentré, ces deux types d'érosion se caractérisent par la forte influence de l'impact des gouttes de pluie comme facteur de détachement de particules solides, et par le fait que le ruissellement et les sédiments sont émis par les mêmes surfaces (Foster, 1990). Cela rend possible une approche globale et non spatialisée du rôle des différents facteurs jouant sur l'érosion, sans distinguer les processus de genèse du ruissellement, de détachement et de transport des particules solides. Une telle démarche n'est plus envisageable lorsque les zones émettrices de ruissellement et celles productrices de sédiments sont disjointes (et dans certains cas très éloignées les unes des autres). Les unités spatiales à étudier ne sont alors plus des portions de versant homogènes et isolées hydrauliquement mais des bassins versants. Ces exigences méthodologiques, s'ajoutant à la complexité précédemment évoquée, expliquent sans doute pourquoi l'érosion par ruissellement concentré a été jusqu'à présent moins étudiée que les autres types d'érosion. Elle fait actuellement l'objet d'un intérêt croissant, en relation avec la montée des préoccupations environnementales, et en particulier de celles relatives à la pollution des eaux superficielles.

L'étude présentée dans cet article a pour objectif d'identifier les facteurs les plus importants à considérer pour prévoir l'intensité du phénomène d'érosion par ruissellement concentré et évaluer les risques en un site donné. Préliminaire et complémentaire d'une approche de modélisation mécaniste, ce travail est basé sur l'analyse de la variabilité des symptômes d'érosion observés au cours de plusieurs hivers successifs, dans un ensemble de bassins versants agricoles. Ceux-ci ont été sélectionnés de façon à obtenir une gamme de variations aussi importante que possible des caractéristiques topographiques, pédologiques et agraires susceptibles d'influencer l'érosion. La démarche consiste à mettre en relation, par voie statistique, les volumes de rigoles, mesurés sur chaque bassin versant, avec les caractéristiques de celui-ci. Dans un premier temps, l'unité spatiale étudiée est le bassin versant. Dans un second temps, l'étude est faite en tenant compte de la structure hydrographique du bassin versant, c'est-à-dire la répartition spatiale des surfaces émettrices de ruissellement et des collecteurs, ainsi

que les connexions entre ces deux éléments. Des données complémentaires sur les débits du ruissellement, mesurés à l'exutoire de trois des bassins versants étudiés, permettent de tester certaines hypothèses émises quant à la relation état de surface - ruissellement.

MÉTHODES, DISPOSITIFS ET PROTOCOLES DE TRAVAIL

Définition et caractérisation des unités spatiales

Les unités spatiales au niveau desquelles sont décrites et mises en relation d'une part l'érosion, d'autre part des caractéristiques pluviométriques, topographiques, pédologiques et agraires, sont des bassins versants délimités selon une procédure conventionnelle (détaillée par Ludwig, 1992 ; Auzet et al., 1993) qui vise à en minimiser la complexité. Ils correspondent à la ramification ultime, vers l'amont, du réseau des vallons

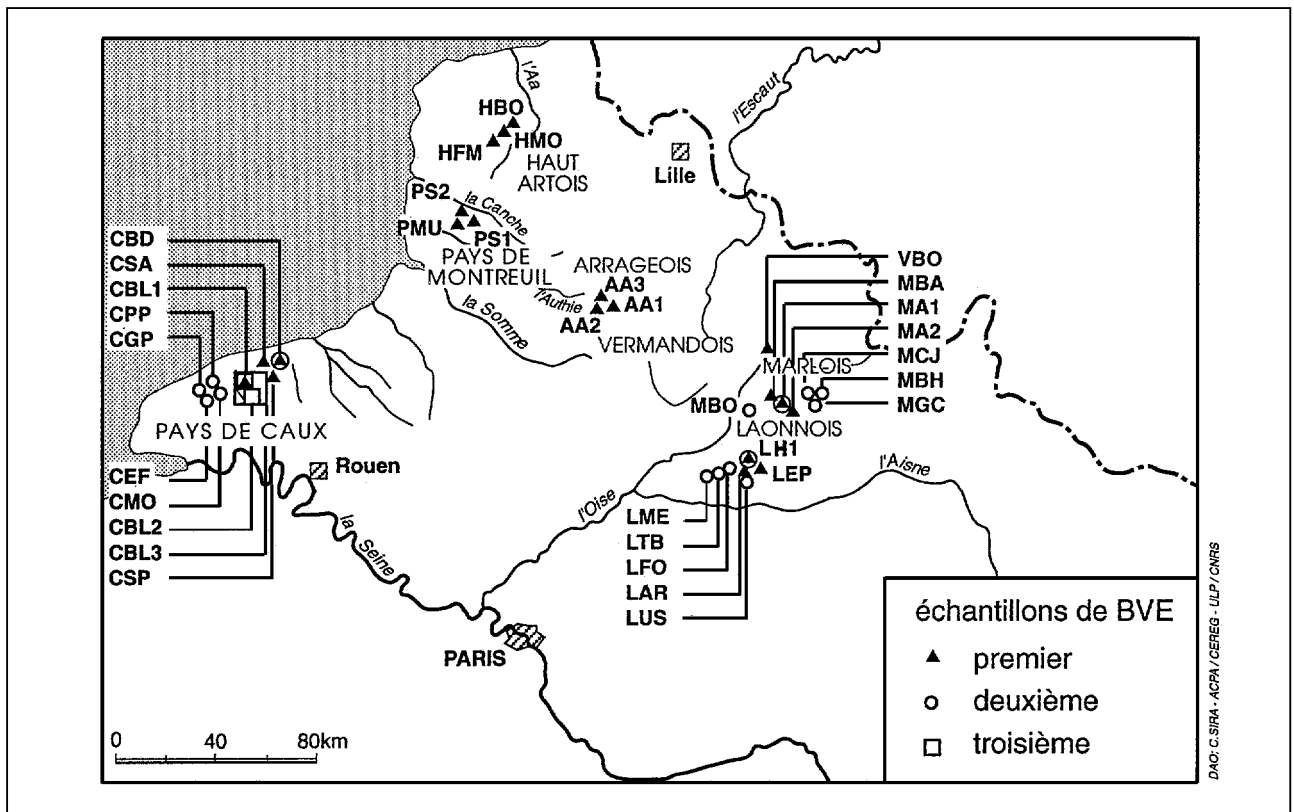
secs, avec un seul axe de concentration principale (le thalweg) d'une longueur minimale fixée par convention à 250 m. Les unités spatiales ainsi définies, dénommées Bassins Versants Élémentaires (BVE), ont des surfaces comprises entre 3 et 95 hectares, avec une moyenne de 32 ha.

L'étude est réalisée sur 33 BVE choisis dans 7 petites régions agricoles du Nord de la France (figure 1) de manière à étendre la gamme de variations des caractéristiques topographiques, pédologiques et agraires. Pour chaque bassin versant, les cartes suivantes ont été établies, à l'échelle de 1/5 000 :

- une carte topographique faisant apparaître la ligne de partage des eaux, la localisation des lignes en dépression, dont le thalweg, et les limites de classes de pente ;
- une carte des textures superficielles en se référant à la classification de Jamagne (1967) ;
- une carte agraire, donnant le tracé des limites de parcelles et indiquant pour chacune d'elles l'occupation du sol, la direction du travail et la localisation des fourrières et dérayures.

Figure 1 - Localisation des bassins versants agricoles étudiés (BVE)

Figure 1 - Location of the agricultural catchments studied



Les BVE sélectionnés sont répartis en trois échantillons. Le premier comprend 20 BVE et a fait l'objet de trois campagnes d'observation hivernales (1988/89, 1989/90, 1990/91). Le second comprend 15 BVE, dont trois communs avec le précédent et a fait l'objet d'une seule campagne d'observation au cours de l'automne - hiver 1991/92 pour vérifier les résultats obtenus avec le premier échantillon. Le troisième échantillon se compose de 2 BVE contigus du Pays de Caux et d'un bassin versant (indiqué "CBL3" sur la figure 1) d'ordre supérieur (375 ha) incluant les deux premiers ("CBL1" et "CBL2"). Ils ont fait l'objet d'un suivi d'octobre 1988 à mars 1991, dont des mesures en continu du ruissellement à l'exutoire des bassins versants.

Une description détaillée de la variabilité des caractéristiques des BVE est donnée par Ludwig (1992) et Auzet et al. (1993). Les pentes sont modérées, avec des gradients égaux ou supérieurs à 5 % pour en moyenne 34 % de la surface totale des BVE (gamme de variations de 0 à 72 %). En moyenne, 53 % de la surface du BVE (gamme de variations de 8 à 100 %) se caractérise par des sols à texture de surface ayant moins de 17.5 % d'argile, texture reconnue comme sensible à la battance (Guérif, 1988 ; Le Bissonnais, 1988 ; Ludwig, 1992). Les cultures d'hiver (céréales, colza) occupent chaque année la moitié des surfaces, les prairies et forêts ne couvrant en moyenne qu'un dixième du BVE, tout en étant absentes dans 17 des 33 BVE. Le tiers des surfaces restantes est occupé par des parcelles en interculture. Ces intercultures se répartissent en deux catégories d'états de surface très

contrastés selon qu'elles ont fait ou non l'objet d'un travail du sol depuis la récolte de la culture précédente : les intercultures non travaillées correspondent généralement à un terrain aplani et compacté par les engins de récolte, alors que les intercultures travaillées présentent un sol meuble et à surface en général beaucoup plus rugueuse.

Contexte pluviométrique

Les hauteurs et les intensités pluviales ont été enregistrées en continu au moyen de pluviomètres à enregistreur automatique. La résolution des enregistrements est de 1 mn et de 0.1 mm. Les pluviomètres ont été répartis de manière à ce qu'aucun bassin versant ne soit à une distance supérieure à 2 km d'un point de mesure.

Les caractéristiques pluviométriques des campagnes d'observation réalisées sont présentées dans le tableau 1, établi à partir des enregistrements effectués aux extrémités Est et Ouest de la zone d'étude. Pour les quatre campagnes considérées, les écarts de hauteur de pluie reçue entre les bassins versants sont importants et correspondent à un gradient négatif Ouest-Est, lié à la distance au littoral. En revanche, la répartition dans le temps des événements pluvieux varie peu d'une région à l'autre, car en automne - hiver les dépressions génératrices de précipitations concernent généralement l'ensemble du Bassin Parisien. Par contre, la répartition des pluies au cours de la saison est très différente d'une année à l'autre. Les précipitations importantes ont eu lieu en milieu de saison en 1988/89, en fin de saison en 1989/90,

Tableau 1 - Caractéristiques pluviométriques du 1er octobre au 28 février des 4 campagnes d'observation hivernales de 1988/89 à 1991/92

Table 1 - Rainfall from 1 October to 28 February in the four winter seasons 1988/89 to 1991/92 (total cumulated rainfall (mm) and cumulated rainfall at intensities > 10 mm/h (mm))

Période	Région et campagne d'observation							
	PAYS DE CAUX				MARLOIS			
	88/89	89/90	90/91	91/92	88/89	89/90	90/91	91/92
1er oct.-	91.0	134.3	170.6	158.7	65.6	67.0	81.7	58.7
15 nov.	18.2	31.9	58.6	29.8	11.8	10.2	9.3	7.5
16 nov.-	193.9	64.1	274.5	115.1	133.3	54.1	117.2	60.9
15 janv.	42.3	4.3	23.7	61.0	5.2	4.7	7.8	2.1
16 janv.-	69.8	210.4	37.2	44.6	46.8	96.3	10.3	15.2
28 févr.	3.9	23.7	0.2	0.6	1.2	17.0	0.6	0.2
1er oct.-	354.7	408.8	482.3	318.4	243.7	217.4	209.2	134.8
28 févr.	64.5	59.9	82.5	91.4	18.2	31.9	17.7	9.8

Hauteurs cumulées (en mm) et hauteurs cumulées (en mm) d'intensité supérieure à 10 mm/h au pas de temps de la minute

en début et milieu de saison en 1990/91 et en 1991/92.

Caractérisation des états de surface du sol

Les notations d'état de surface réalisées (Ludwig, 1992, pour une présentation détaillée) ont pour objet de caractériser de façon qualitative et rapide l'aptitude du terrain à émettre du ruissellement. Chaque portion de parcelle dont la texture de surface appartient à la même classe texturale a fait l'objet d'une observation. On note ainsi le stade de développement des croûtes de battance (Boiffin, 1984 ; Boiffin et al., 1988 ; Bresson et Boiffin, 1990), la proportion de surface recouverte par des traces de roue et la rugosité de la surface du sol. Cette dernière est estimée d'après le dénivelé entre le fond des micro-dépressions et le point de débordement des flaques. Quatre à cinq tournées d'observation ont eu lieu au cours de chaque campagne pour l'ensemble des 33 BVE, sauf en 1988/89 qui a fait l'objet d'une seule tournée en fin d'hiver.

Selon la notation retenue, les unités spatiales supposées émettre un ruissellement se caractérisent par une très faible rugosité dans le sens du travail du sol, inférieure à 1 cm, combinée à un sol recouvert soit à plus de 90 % par une croûte sédimentaire, soit à plus de 60 % par des traces de roue.

Caractéristiques des rigoles

Lors de chaque campagne d'observation, toutes les incisions ont été cartographiées et mesurées en fin d'hiver, avant que des travaux de printemps n'effacent certaines rigoles. Chaque rigole ou tronçon de rigole a été caractérisé du point de vue de sa position sur un motif linéaire en dépression d'origine topographique (thalweg ou ligne en dépression d'un versant) ou agraire (fourrière, dérayure, trace de roue, limite de parcelle). La largeur et la profondeur des incisions ont été mesurées tous les 10 à 30 m le long de la rigole ainsi qu'avant et après les changements de section incisée, en particulier aux intersections de rigoles. En calculant puis en sommant les volumes de chaque rigole on obtient pour chaque bassin versant le volume total des rigoles ainsi qu'un taux d'érosion en rigole (TE, m³/ha) correspondant au volume incisé total rapporté à la surface totale du BVE.

Mesure des débits de ruissellement à l'exutoire

Des stations limnigraphiques implantées et gérées par le SRAE de Haute-Normandie ont enregistré les débits de ruissellement, au pas de temps de 3 mn à l'exutoire des 2 BVE du troisième échantillon ("CBL1" et "CBL2") et à l'exutoire du bas-

sin versant d'ordre supérieur ("CBL3"). Les données ont été traitées au pas de temps journalier.

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ DE L'ÉROSION EN RIGOLE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT ÉLÉMENTAIRE : INFLUENCE DES ÉTATS DE SURFACE

Distribution spatio-temporelle de l'érosion

L'érosion en rigole mesurée sur les BVE du premier échantillon varie selon les années et selon les bassins versants (figure 2). Les plus fortes valeurs concernent surtout les bassins versants du Pays de Caux (à l'Ouest), les plus faibles ceux de l'Arrageois et du Marlois (à l'Est). Cette tendance peut être rapprochée du gradient pluviométrique précédemment mentionné, auquel s'ajoute un gradient textural, avec une plus forte proportion de sols à texture limoneuse dans les bassins de la zone littorale. Cependant, cela ne suffit pas à expliquer toute la gamme de variations. Les écarts du taux d'érosion en rigole entre les BVE d'une même région, en particulier pour ceux du Pays de Caux, sont du même ordre de grandeur que pour l'ensemble des BVE de l'échantillon. De plus, certains bassins versants se classent très différemment selon les campagnes d'observation (cas de PMU, LH1).

La distribution des volumes des rigoles en fonction de leur localisation (tableau 2) montre que la majeure partie (80 à 95 %) du volume des rigoles relevées dans les bassins versants correspond à des incisions localisées sur un motif linéaire en dépression préexistant. Lors de chaque saison d'automne - hiver, près de trois quarts du volume de ces rigoles sont associés à des motifs linéaires d'origine topographique, soit isolés, soit combinés à des motifs d'origine agraire (ce dernier cas correspondant à un quart du volume érodé). Le quart restant est associé à des motifs d'origine exclusivement agraire, c'est-à-dire à des fourrières, des traces de roues ou des dérayures. Les cas associant une localisation d'origine topographique et agraire sont quasi-exclusivement des rigoles de thalweg (tableau 3), où le rôle des motifs linéaires d'origine agraire est secondaire vis-à-vis du poids du facteur topographique. Le rôle des motifs linéaires d'origine agraire est croissant d'aval en amont, pour atteindre 90 à 100 % du volume des rigoles pour la zone amont de pente inférieure à 2 % (tableau 3). Ainsi, dans les zones amont, le travail du sol génère des motifs linéaires selon une direction et une localisation prédéfinies par le parcellaire, motifs linéaires qui vont avoir un rôle important dans la circulation du ruissellement et sur la localisation des rigoles. La structure hydrographique des bassins versants agricoles doit inclure ces motifs linéaires d'origine

Figure 2 - Taux d'érosion en rigole (TE en m³/ha) mesurés dans les 20 BVE du 1^{er} échantillon au cours des 3 campagnes hivernales 1988/89, 1989/90 et 1990/91.

Figure 2 - Rill erosion rates (TE, m³/ha) in the 20 catchments from the first catchment sample at the end of 3 winter seasons 1988/89, 1989/90 and 1990/91.

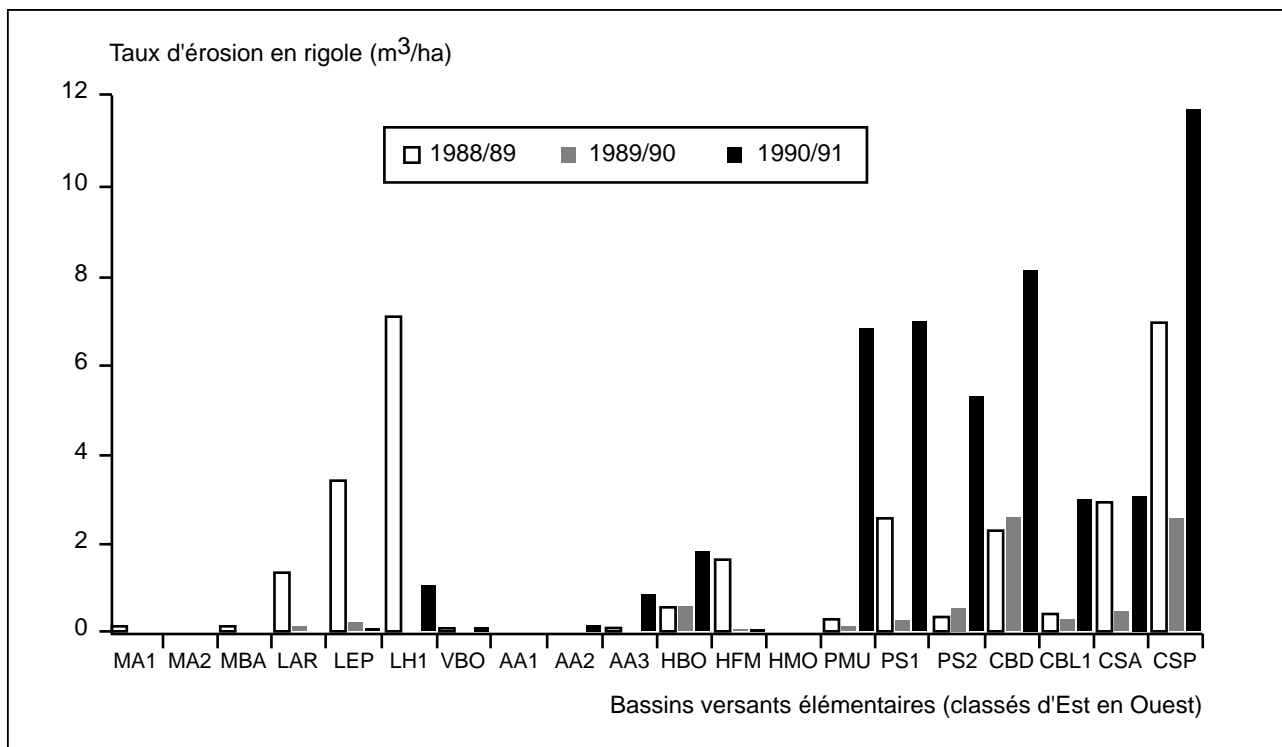


Tableau 2 - Répartition du volume des rigoles localisées sur des motifs linéaires en dépression par type de motif.

Table 2 - Distribution of rill volumes in the various linear features.

	Campagne d'observation		
	1988/89	1989/90	1990/91
Volume total des rigoles	1198 m ³	353 m ³	2185 m ³
Volume des rigoles localisées sur un motif linéaire préexistant (% rapporté au volume total)	1138 m ³ (95 %)	337 m ³ (95 %)	1746 m ³ (80 %)
Répartition par type de motif linéaire			
topographique	61 %	58 %	52 %
topographique et agraire	12 %	21 %	28 %
agraire	27 %	21 %	20 %

Tableau 3 - Distribution du volume des rigoles localisées sur un motif linéaire préexistant, selon le type de motif linéaire, et en fonction de leur localisation dans le bassin versant (isoligne 2 % de pente correspondant à la limite entre les zones amont et aval des versants)

Table 3 - Distribution of the volume of rills located on linear features as a function of the type of feature : topographical, topographical

Versant amont			Versant a			Thalweg			Motif linéaire d'origine (en %)
88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91	
10	0	10	47	62	62	77	40	47	topographique
0	0	0	1	5	6	23	60	53	topographique et agraire
90	100	90	52	32	31	0	0	0	agraire
30	16	110	552	169	823	557	152	812	Volume incisé total (m ³)

Tableau 4 - Proportion d'unités spatiales présentant un état de surface propice à l'émission de ruissellement, en fonction de l'occupation du sol, de la texture et de la date d'observation pour la campagne 1990/91

Table 4 - Influence of land occupation, topsoil texture and observation time on the proportion of cultivated fields with a surface state likely to generate runoff (t₁, late November 1990 ; t₂, mid-January 1991. n is the total number of observed fields for a given land occupation and texture class)

Caractéristique de l'horizon de labour vaillée		Occupation du sol et date d'observation								
		culture d'hiver			interculture non-travaillée			interculture tra		
Classe texturale	Argile (%)	t ₁	t ₂	n	t ₁	t ₂	n	t ₁	t ₂	n
Argile et argile limoneuse	> 30	4	4	24	50	*	0	0	0	9
Limon argileux à sable argileux	> 17.5 et < 30	2	14	128	30	100	5	0	4	48
Limon moyen	< 17.5	17	61	115	0	100	5	0	9	44
Limon moyen sableux à sable limoneux	< 17.5	41	71	48	59	100	19	5	39	39
Total		12	39	315	54	100	29	3	15	140

*: toutes les parcelles correspondantes ont été travaillées entre la date t₁ et t₂

t₁ : % d'unités spatiales fin novembre 1990

t₂ : % d'unités spatiales mi-janvier 1991

n : nombre total d'unités spatiales

agraire.

États de surface du sol

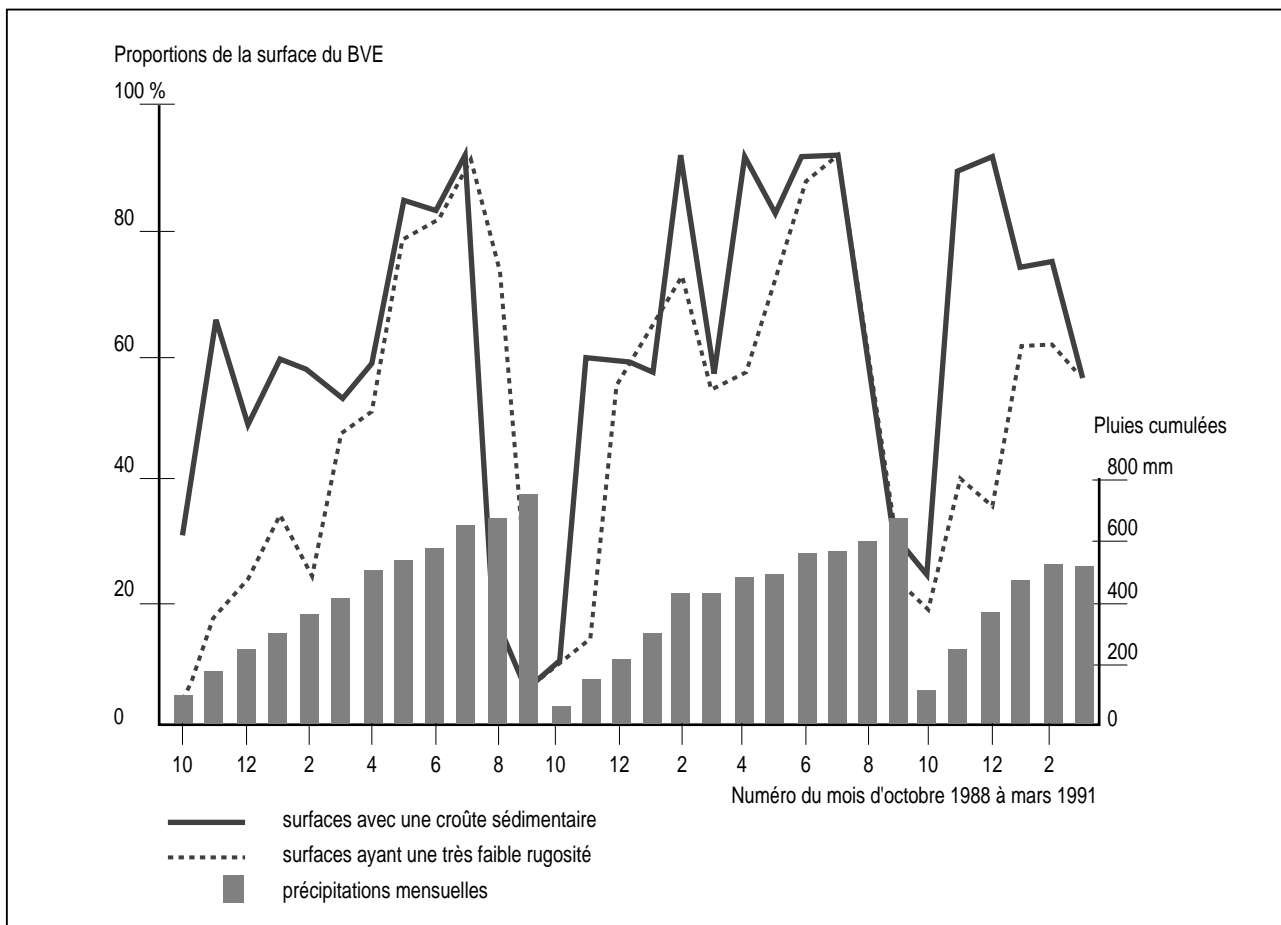
Le tableau 4 présente, pour deux dates de la campagne d'observation 1990/91, la proportion d'unités spatiales au sein des 15 BVE du premier échantillon dont la surface est supposée émettre un ruissellement au vu des critères d'état de surface définis précédemment, en fonction de la texture et de l'occupation du sol. Fin novembre, seules les intercultures non travaillées sont déjà très dégradées, en raison des nombreuses traces de roue imprimées par les engins agricoles lors des récoltes. A la mi-janvier, le développement des croûtes de battance sur les parcelles en cultures d'hiver et à textures limoneuse, limono-sableuse et sablo-limoneuse se traduit par une

forte progression de la proportion d'unités présumées aptes au ruissellement. Inversement, quelle que soit la texture, la rugosité reste élevée pour les intercultures travaillées, ce qui explique la faible proportion d'unités aptes à produire du ruissellement même en fin d'hiver. On confirme donc les résultats de travaux antérieurs (Boiffin et al., 1988 ; Ouvry, 1990) montrant que les surfaces aptes à produire un ruissellement dépendent à la fois des pluies, de l'occupation du sol et de la texture superficielle.

La figure 3, établie d'après les observations relevées sur le bassin versant CBL1, montre que les proportions de surface du BVE d'une part recouverte par des croûtes sédimentaires et d'autre part ayant une faible rugosité, évoluent de façon conco-

Figure 3 - Évolution mensuelle de la proportion des surfaces ayant une croûte sédimentaire et de la proportion des surfaces à très faible rugosité du BVE de Blossesville (CBL1) en fonction des précipitations cumulées d'octobre 1988 à mars 1991

Figure 3 - Monthly changes in the proportion of the "CBL1" catchment covered by sedimentary crust or having very low roughness as a function of the rainfall from October 1988 to March 1991



mitante, avec un certain retard pour le développement des surfaces à faible rugosité. Un minimum très marqué est atteint en septembre-octobre, correspondant à une période de travail du sol (déchaumages, travaux et semis pour les cultures d'automne, labours d'hiver). Un minimum moins marqué apparaît en mars-avril, en relation avec les travaux du sol préparatoires à l'implantation des cultures de printemps. Inversement, les pics s'observent en janvier-février (développement des croûtes de battance sur les cultures d'hiver et sur certaines intercultures travaillées et fortement aplanies), et surtout en juin-juillet (présence de croûtes de battance sur toutes les cultures, qu'elles soient d'hiver ou de printemps, et absence d'intercultures travaillées à forte rugosité).

La vitesse de développement des surfaces susceptibles de produire un ruissellement dépend des pluies, mais comme le montre la figure 4 cette dépendance n'est pas simple. En effet,

les différences notées entre les deux campagnes d'observation pour deux groupes de bassins versants à sol très limoneux, s'expliquent par la persistance en fin d'hiver 1989/90 d'une rugosité assez forte sur les parcelles semées à l'automne aboutissant à un développement très limité des surfaces supposées aptes à produire du ruissellement. L'occurrence d'une longue séquence sans pluie en novembre et décembre 1989 peut être un élément d'explication, du fait d'un renforcement de la stabilité des agrégats de surface (Sebillotte, 1968 ; Monnier et Konan, 1968 ; Boiffin, 1976), de la formation de fentes de dessiccation, de l'action du gel et du développement d'un couvert végétal (atteignant 40 % fin décembre 1989 pour les céréales d'hiver). Le rôle des périodes sans précipitation dans la réduction de la vitesse de dégradation de l'état de surface par rapport à une situation humide a été démontré en laboratoire sous simulateur de pluie (Le Bissonnais et al., 1995). En tout

Figure 4 - Evolution de la proportion des surfaces aptes à produire du ruissellement en fonction des hauteurs de pluies cumulées au cours des campagnes hivernales 1989/90 et 1990/91

Figure 4 - Development of runoff contributing areas as a function of cumulated rainfall during the winter seasons 1989/90 and 1990/91

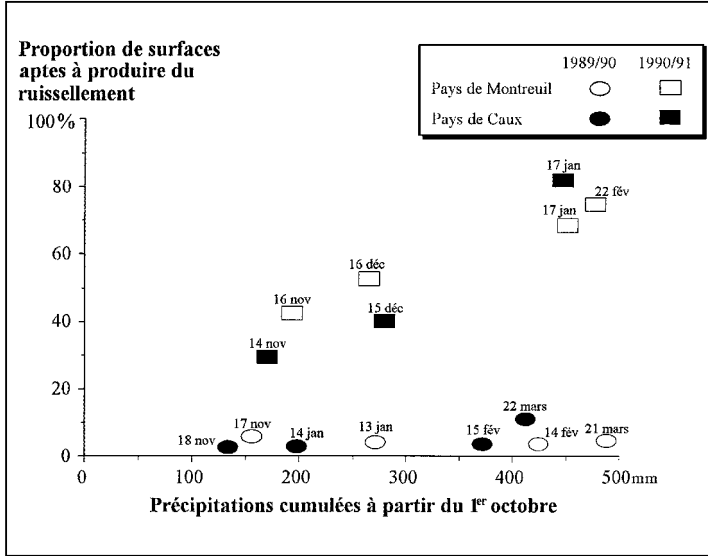
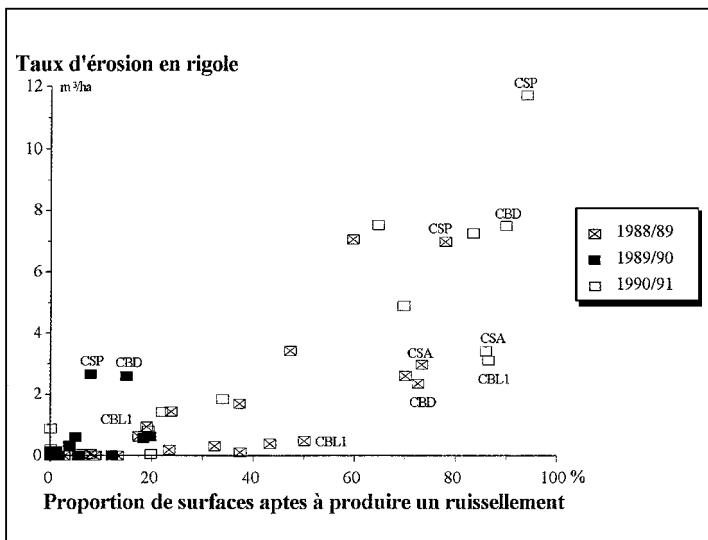


Figure 5 - Relation entre le taux d'érosion en rigole (TE en m³/ha) et la proportion de surfaces aptes à produire du ruissellement (PR en %). Certains points ont été identifiés par le code du bassin versant : CBL1, CSP et CSA

Figure 5 - Relationship between rill erosion rate (TE, m³/ha) and potential runoff contributing area (PR, percentage of the total catchment area). Some points were identified by their catchment code : CBL1, CSP and CSA



état de cause, cette variation inter -annuelle de l'évolution des états de surface est associée à une variation, dans le même sens, des taux d'érosion : ces derniers sont particulièrement faibles en 1989/90 et très élevés en 1990/91.

Analyse des relations entre l'érosion en rigole et les surfaces aptes à produire du ruissellement

La figure 5 présente la relation entre l'érosion en rigole, exprimée par un taux d'érosion correspondant au volume incisé des rigoles par hectare de BVE (TE, m³/ha), et les proportions de surfaces aptes à produire du ruissellement (PR, %), mesurés sur les 15 BVE du premier échantillon. Cette relation peut être représentée par un ajustement de la forme suivante :

$$TE = a PR b$$

où a et b sont des paramètres d'ajustement.

Les résultats de l'ajustement pour chacune des trois campagnes d'observation sont présentés dans le tableau 5 par les équations 1, 2 et 3. Plus de la moitié de la variabilité totale de TE est expliquée par le critère PR en 1988/89 et 1990/91. La faiblesse du coefficient de détermination R² en 1989/90 peut être attribuée à la faible amplitude de variation de TE et de PR, qui n'atteignent que des valeurs très faibles, les points expérimentaux étant groupés près de l'origine des axes. Les résultats obtenus en 1989/90 ne contredisent donc pas les résultats obtenus les autres hivers, ce qui autorise un ajustement unique sans distinction des années (tableau 5, équation 4). On a vérifié que les résidus de cette dernière régression ne sont pas dépendants de l'année, ce qui signifie que la variable PR rend largement compte de l'effet année. En d'autres termes, cet effet année tient essentiellement à la manière dont les états de surface évoluent, elle-même liée de façon complexe, comme on vient de le voir, à la répartition chronologique des épisodes pluvieux.

L'hypothèse d'une influence de la variabilité de PR sur les débits de ruissellement a pu être contrôlée grâce aux mesures de débit à l'exutoire effectuées sur les BVE du troisième échantillon. 74 jours avec ruissellement ont été enregistrés, pour 267 jours de pluie supérieure à 1 mm au cours de la période d'étude (octobre 1988 à mars 1991). L'absence d'écoulement hypodermique et de nappes d'eau souterraine, ainsi que le caractère brutal des crues et leur relation temporelle étroite avec les pluies, confirment que le ruissellement mesuré à l'exutoire des bassins versants est issu d'un ruissellement de surface. La figure 6 présente la distribution des coefficients de ruissellement

en fonction de la proportion des surfaces supposées aptes à produire un ruissellement et du cumul des pluies des 10 jours précédents le jour du ruissellement. Les coefficients de ruissellement ont atteint des valeurs supérieures à 1 % si au moins 40 % du bassin versant présentait un état de surface dégradé. Par ailleurs, des coefficients de ruissellement supérieurs à 1 % ont été relevés 36 fois sur les 72 cas avec un PR d'au moins 55 %, cette condition étant associée à des précipitations pour les 10 jours précédents d'au moins 30 mm. Des coefficients de ruissellement supérieurs à 4 % ont été enregistrés 12 fois sur les 17 cas avec au moins un PR de 75 % et un cumul des pluies lors des 10 jours précédents de 50 mm. Ces résultats suggèrent qu'en dessous d'une certaine proportion de surfaces aptes à produire du ruissellement, la continuité de la collecte et de la concentration du ruissellement jusqu'à l'exutoire des bassins n'est pas assurée. En outre, le ruissellement est favorisé par une histoire climatique pluvieuse avant le jour d'enregistrement du ruissellement. Le rôle de ces pluies consiste d'une part à atténuer les gradients de succion qui favorisent l'infiltration, et d'autre part à saturer partiellement la capacité de stockage superficiel (flaques persistantes).

Malgré sa pertinence, le critère PR est loin d'expliquer à lui seul toute la variabilité des taux d'érosion : une variabilité résiduelle de près de 30 % de la variabilité initiale de TE subsiste autour de l'équation n°4 (tableau 5). Un examen détaillé de la figure 5 permet de noter une augmentation de la variabilité résiduelle corrélée à l'augmentation de la valeur prise par PR. Il semble donc que cette variable détermine un seuil maximum croissant de risque d'érosion en rigole, tandis que d'autres facteurs vont contrôler la valeur effectivement prise par l'érosion en rigole dans la limite fixée par PR. La variabilité résiduelle non expliquée par

Figure 6 - Distribution des coefficients de ruissellement en fonction de la proportion de surfaces ayant une croûte sédimentaire et des précipitations cumulées des 10 jours précédant le ruissellement, pour les 3 bassins versants du 3^e échantillon (Pays de Caux)

Figure 6 - Changes in the runoff coefficient as a function of the proportion of the catchment covered by a sedimentary crust and the cumulated rainfalls 10 days before the start of runoff, for the 3 catchments from the third catchment sample (Pays de Caux)

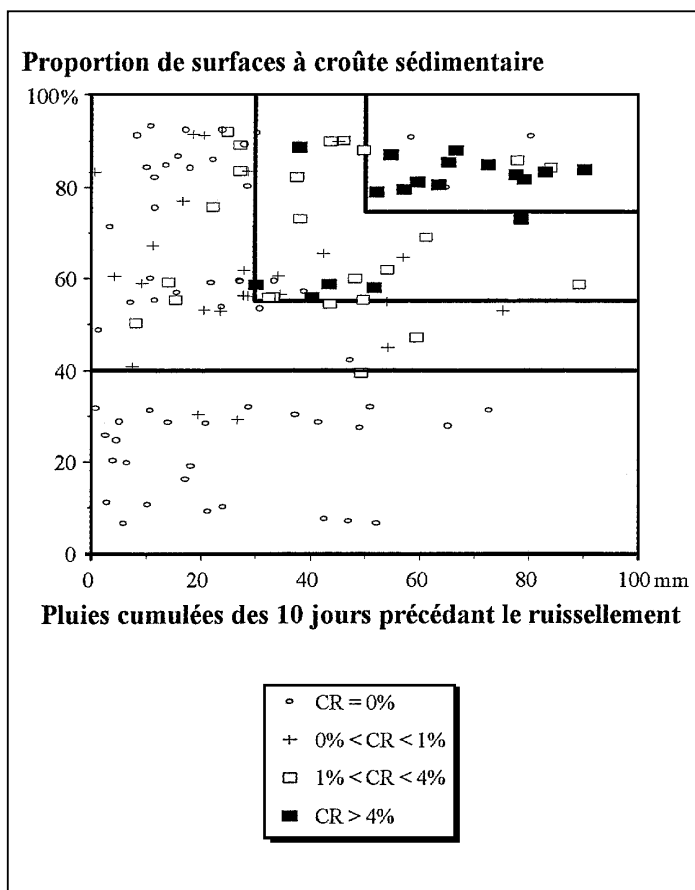


Tableau 5 - Ajustement de la relation taux d'érosion - proportion de surfaces aptes à produire un ruissellement lors des 3 premières campagnes d'observation et des 3 campagnes réunies

Table 5 - Relationship between rill erosion rate and the proportion of potential runoff contributing area for the three first winter seasons and for all three winter seasons

Equation	Campagne d'observation	Coefficients		R2	Ecart-type résiduel (en m ³ /ha)
		a	b		
1	1988/89	0.0015	1.85	0.56 *	1.43
2	1989/90	0.103	0.90	0.38 *	0.66
3	1990/91	0.0092	1.51	0.83 *	1.67
4	3 hivers	0.0014	1.92	0.74 *	1.38

* : test F significativement différent de zéro avec une probabilité de 1 %

PR s'exprime entre bassins versants d'une même région : c'est le cas par exemple pour CBD, CBL1 et CSP (points indicés sur la figure 5), situés dans le Pays de Caux. Leur localisation très proche et leurs caractéristiques texturales identiques interdisent d'attribuer aux pluies ou à la nature des sols l'origine de cette variabilité résiduelle. Par contre, l'examen des caractéristiques morphologiques et topographiques de ces bassins suggère qu'un certain nombre de facteurs non pris en compte dans la variable PR peuvent jouer un rôle. Ainsi, les bassins respectivement le plus (CSP) et le moins (CBL) érodés de ce groupe sont aussi le plus et le moins pentus, et ceux dont la longueur de thalweg est respectivement la plus grande et la plus courte. Ce dernier point suggère que la longueur des collecteurs de ruissellement et leur localisation par rapport aux surfaces émettrices peuvent en partie contrôler le volume global érodé. On est alors conduit à analyser la relation entre érosion et caractéristiques topographiques, pédologiques et agraires, non plus à l'échelle globale du BVE, mais en tenant compte de la structure hydrographique, c'est-à-dire de la distribution spatiale relative des surfaces contributives au ruissellement et des collecteurs ainsi que de leurs connexions. Cela revient à décomposer chaque bassin versant en une série de sous bassins versants emboîtés, dont le plus petit élément est la portion de parcelle avec une texture de surface appartenant à la même classe texturale. Ces sous bassins versants alimentent en ruissellement une portion déterminée du réseau des collecteurs.

INFLUENCE DE LA STRUCTURE HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT SUR L'ÉROSION EN RIGOLE

Une présentation détaillée de la démarche suivie est donnée par Ludwig (1992) et Ludwig et al. (1995). Elle consiste, dans son principe, à analyser de manière distincte les deux composantes du volume des rigoles : la longueur et la section incisées. La longueur incisée doit être mise en relation avec la longueur des collecteurs et leur position par rapport à celle des aires aptes à produire un ruissellement. La section d'un tronçon de rigole est, elle, contrôlée d'une part par le débit et

la vitesse des écoulements, qui dépendent de la pente et de l'aire des surfaces émettrices qui alimentent ce tronçon, et d'autre part par la sensibilité à l'incision des couches superficielles du sol sur le trajet des écoulements (Govers, 1985 ; Torri et al., 1987 ; De Ploey, 1990 ; Foster, 1990).

Caractérisation de la structure hydrographique des BVE

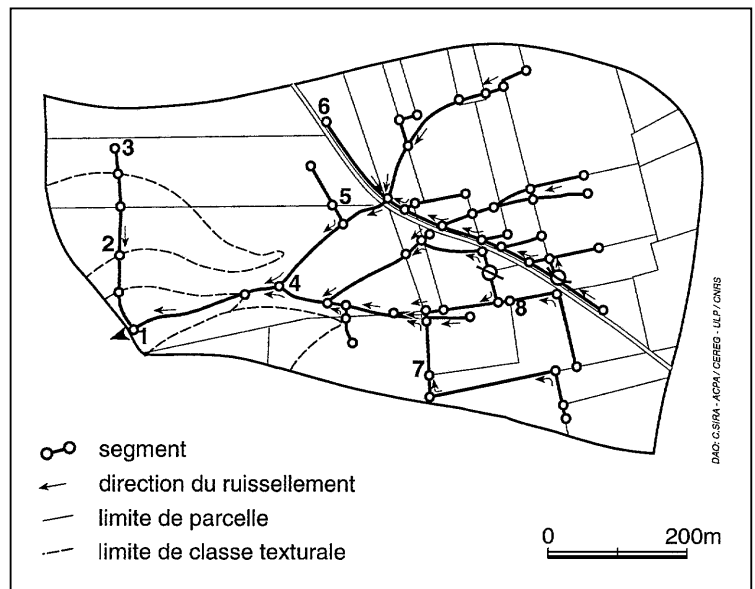
On procède tout d'abord à l'identification du réseau des collecteurs de ruissellement. Cette étape est réalisée à l'aide des cartes topographiques et agraires, ainsi que d'observations de terrain faites lors de la première tournée en début d'automne, indépendamment de l'observation des rigoles faite en fin d'hiver. En excluant les zones amont à pente inférieure à 2 %, qui concernent moins de 5 % de l'érosion en rigole des BVE, le tracé du réseau des collecteurs correspond aux lignes marquant le fond des dépressions principales (thalweg) ou secondaires (sur les versants), ainsi que les fourrières et dérayures correspondant à des limites aval de parcelles. Le réseau obtenu est découpé en segments homogènes du point de vue pédologique et agraire. Les extrémités des segments sont positionnées à l'intersection d'une branche du réseau avec une limite de parcelle, une limite de classe texturale ou une autre branche du réseau (figure 7). On obtient ainsi 2 à 55 segments selon les BVE.

Chaque segment est caractérisé par quatre variables :

- sa longueur (LG, en m), mesurée sur la carte du réseau des collecteurs ;
- sa pente (PT, en %), mesurée sur le terrain au niveau d'Abney ;
- la sensibilité du sol à l'incision appréciée par une note (SI, en classes ordonnées de 1 à 5), obtenue en combinant les informations sur la couverture du sol, la texture de l'horizon de surface et la structure de ce dernier, déduites

Figure 7 - Tracé et segmentation du réseau des collecteurs du ruissellement du BVE des Muroles (PMU)

Figure 7 - Drawing and segmentation of the runoff collector network from Muroles catchment (PMU)



de son histoire culturelle récente ;

- l'aire contributive au ruissellement connectée au segment (AR, en ha), estimée en combinant les informations sur la topographie, le travail du sol et l'état de surface. La topographie et la direction du travail du sol permettent de délimiter pour chaque segment une aire contributive potentielle (figure 8a). Seule la part de cette aire, répondant aux critères d'aptitude au ruissellement et étant effectivement hydrologiquement connectée au segment, est prise en compte (figure 8b).

Analyse des relations entre caractéristiques des collecteurs et caractéristiques des rigoles

Pour les deux campagnes d'observation 1989/90 et

1990/91 réalisées sur les 20 BVE du premier échantillon, plus de 90 % du volume incisé correspondent à des rigoles localisées sur le réseau de collecte identifié selon la procédure exposée ci-dessus. Inversement, de très nombreux segments ne sont pas incisés. Une première analyse a donc porté sur la détermination de la présence ou de l'absence d'incision le long d'un segment. Les 1053 segments composant le réseau des collecteurs des 20 bassins versants ont été répartis en 37 sous-groupes par classes d'aires contributives au ruissellement (AR) et de pentes (PT) (tableau 6). La fréquence de segments sans incision a été calculée pour chaque sous-groupe. Ainsi, par exemple, parmi les 67 segments avec $AR = 0$ et $PT < 2\%$, 93 % n'ont pas d'incision. Les valeurs du tableau 6 ont permis d'établir l'équation suivante qui estime la probabilité de non

Figure 8 - Les deux étapes de la procédure d'identification de l'aire contributive au ruissellement connectée à un segment (segment A)

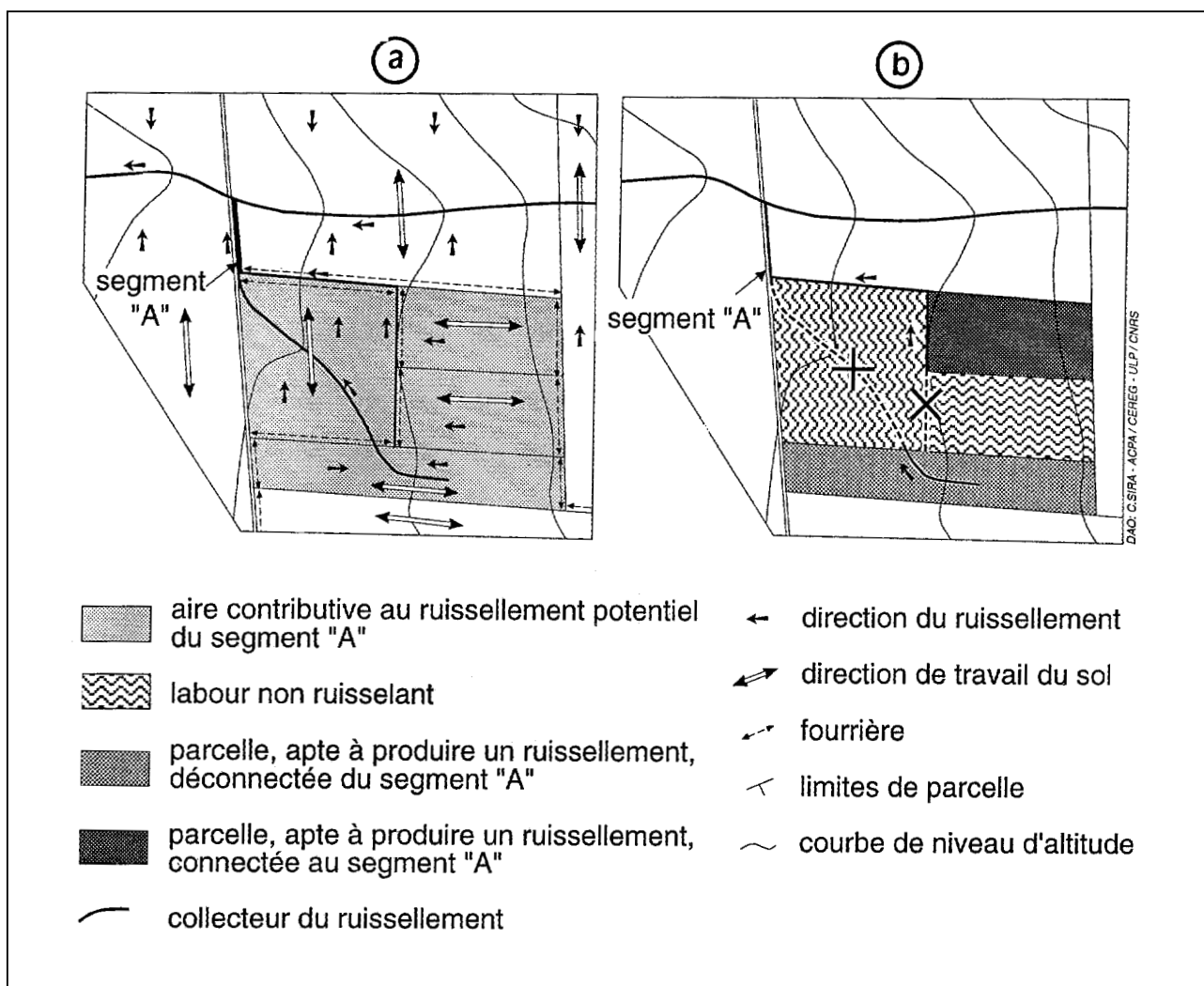


Tableau 6 - Fréquence de segments sans incision en fonction de leur aire contributive au ruissellement (AR) et de leur pente (PT)
 Table 6 - Proportion of non-eroded segments according to runoff contributing area (AR) and segment slope gradient (PT) (n number of observed segments)

AR (ha)	PT (%)								
	[0 ; 2 [	[2 ; 3 [	[3 ; 4 [	[4 ; 5 [	[5 ; 6 [	[6 ; 8 [	[8 ; 10 [	[10 ; 15 [	[15 ; 35 [
0	0.93	0.92	0.90	0.87	0.94	0.82	0.94	0.98	1.00
n	67	103	129	76	77	60	34	40	12
]0 ; 0.5 [	0.75	0.81	0.81	0.70	0.68	0.88	0.64		
n	28	16	21	21	27	16	14		
[0.5 ; 1 [	0.82	0.89	0.76	0.56	0.59		0.50		
n	11	18	17	18	17		10		
[1 ; 2 [	0.53	0.71	0.67	0.62	0.27		0.25		
n	19	17	15	13	11		4		
[2 ; 7 [	0.40	0.20	0.29	0.22	0.10		0.10		
n	20	20	7	9	21		10		
[7 ; 50 [	0.30	0.24	0.17						
n	10	17	24						

n : nombre de segments observés

incision d'un segment donné i ($P_i(s=0)$) :

$$P_i(s=0) = (0.06 \text{ AR} + 0.92) / ((0.09 \text{ PT} + 0.28) \text{ AR} + 1) \quad \text{Equ. 5}$$

avec respectivement $P_i(s=0)$ en fréquence de 0 à 1 du segment i , AR en ha et PT en %. La variance résiduelle est de 0.09, pour une variance initiale de 0.83.

La section incisée moyenne (S_i) de la portion de rigole associée à un segment est obtenue en divisant le volume de la rigole par sa longueur. La relation entre cette section incisée et les caractéristiques des segments a été étudiée uniquement pour les segments effectivement incisés composant le réseau des collecteurs des 20 bassins versants du premier échantillon, soit 75 segments en 1989/1990 et 187 en 1990/1991. Cette relation est ajustée par l'équation suivante :

$$S_i = 1.93 (\text{AR}^{0.65} \cdot \text{PT}^{0.78} \cdot \text{SI}^{1.04}) + \varepsilon \quad \text{Equ. 6}$$

avec respectivement S_i en cm^2 , AR en $\text{ha} \cdot 10^{-2}$, PT en % et SI sans dimension. Le coefficient de détermination de cette équation est $R^2 = 0.44$, avec un écart-type $\sigma_\varepsilon = 808 \text{ cm}^2$.

Ces deux équations tiennent compte des principaux facteurs contrôlant l'érosion en rigole. La probabilité d'atteinte de la vitesse critique du ruissellement correspondant au déclenchement d'une incision est en effet d'autant plus importante que l'aire des surfaces contributives au ruissellement (AR) et la pente locale (PT) sont élevées. L'écriture de la vitesse tractrice critique du ruissellement présentée par Govers (1985) intègre

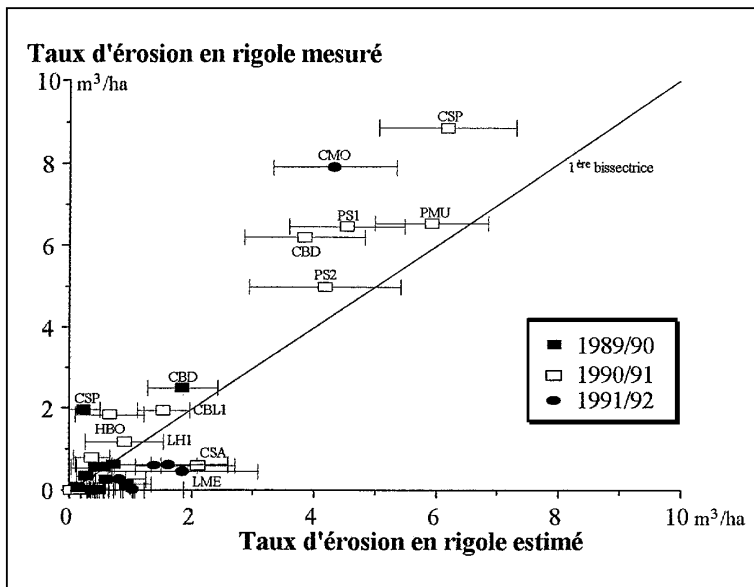
directement la pente et comporte une seconde variable qui est le rayon hydraulique. Ce dernier dépend étroitement du débit et donc de l'aire des surfaces émettrices d'un ruissellement pour une pluie d'intensité donnée. Cependant, d'autres facteurs, interviennent également dans les processus de genèse d'une incision : la charge en sédiment du ruissellement et la cohésion du sol (Foster, 1990). Seul ce dernier est pris en compte par la seconde équation (variable SI)..

Reconstitution du volume incisé à l'échelle du bassin versant élémentaire : confrontation avec les données observées

Le volume total des rigoles formées au sein de chaque bassin versant est obtenu en additionnant le volume correspondant à chaque segment incisé du réseau des collecteurs, lui-même estimé en multipliant la longueur du segment par la section d'incision estimée. Cette dernière est déterminée d'après l'aire contributive au ruissellement, la pente et la sensibilité du sol à l'incision du segment, en utilisant les équations 5 et 6. L'équation 5 donne la probabilité de non incision le long d'un segment i ($P_i(s=0)$). Connaissant cette probabilité, la présence ou l'absence d'une incision est déterminée en confrontant cette probabilité calculée à la valeur p comprise entre 0 et 1 obtenue par tirage au hasard suivant une loi uniforme. Si la présence d'une rigole est prédite (cas où $p > P_i$

Figure 9 - Comparaison du taux d'érosion mesuré avec le taux d'érosion moyen, plus ou moins 1 écart-type, obtenu à partir des estimations du volume incisé faites pour chaque segment du réseau des collecteurs

Figure 9 - Comparison of observed rill erosion rates (m^3/ha) at the catchment scale with rill erosion rates obtained by adding the rill volumes estimated for each segment of the catchment collector network



($s = 0$)), sa section incisée est déterminée par l'équation 6. La variable résiduelle ε est obtenue par tirage au hasard suivant une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type égal à $\sigma\varepsilon$.

En répétant cette procédure stochastique 50 fois, on obtient une distribution des volumes érodés estimés et on peut calculer la moyenne et l'écart-type de ces estimations. La figure 9 met en relation le volume total des rigoles mesurées en fin d'hiver, exprimé en taux d'érosion en rigole (TEmes, en $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) avec le volume total moyen estimé (TEest, en $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$). Pour les deux campagnes 1989/90 et 1990/91 relatives au premier échantillon (soit 40 résultats), la relation entre TEmes et TEest est exprimée par la régression suivante :

$$\text{TEmes} = -0.13 + 1.28 \text{TEest} \quad \text{Equ. 7}$$

avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.90$ et un écart-type résiduel de $0.72 \text{m}^3.\text{ha}^{-1}$.

L'ordonnée à l'origine n'est pas significativement différente de zéro ($P > 0.05$) ; par contre la pente 1.28 est significativement différente de 1 ($P < 0.01$), indiquant une sous-estimation systématique de l'érosion par la procédure utilisée.

A titre de tentative de validation, la procédure d'estimation du volume incisé des rigoles présentée ci-dessus a été appliquée aux 15 bassins versants élémentaires du second échantillon pour estimer le volume incisé des rigoles formées au cours de l'hiver 1991/1992. Les équations 5 et 6 ont été utilisées sans réajuster les coefficients obtenus sur les bassins versants du premier échantillon. Malheureusement, la distribution du volume total incisé des rigoles

mesurées en fin d'hiver 1991/1992 ne permet pas une réelle validation du modèle, car seul un bassin versant présente une forte érosion. Néanmoins, les points expérimentaux (TEmes, TEest) représentatifs des bassins versants du second échantillon (représentés sur la figure 9 par un rond plein) sont distribués au sein du nuage de points obtenus pour les bassins versants du premier échantillon. A défaut de validation réelle, il n'y a donc pas de contradiction entre les données du premier et du second échantillon.

La comparaison des coefficients de détermination des équations 4 et 7 montre que la prise en compte de la structure hydrographique du BVE, via la démarche d'identification, de segmentation et de caractérisation des collecteurs du ruissellement exposée ci-dessus, apporte un progrès dans l'analyse de la variabilité des symptômes d'érosion, par rapport à une approche corrélative globale à l'échelle du bassin versant. Le progrès enregistré tient à ce que certaines variables explicatives (longueur, pente et sensibilité à l'incision des collecteurs) ont pu être introduites dans l'analyse en tenant compte de leurs interactions spatiales avec les surfaces émettrices de ruissellement, ce qui n'était pas possible à l'échelle globale du BVE. Cependant, les erreurs qui subsistent dans l'estimation des volumes incisés à l'échelle du BVE traduisent les limites de l'approche qui a été proposée.

Un premier type d'écarts entre volumes d'érosion prévus et observés correspond à la sous-estimation systématique des volumes d'érosion des rigoles les plus importantes. Ce biais est imputable d'une part à la non prise en compte de la sinuosité de leur tracé qui engendre une sous-estimation des longueurs, et d'autre part surtout à une sous-estimation de la section incisée des ravines de thalweg. Ces ravines ont souvent une longueur importante et représentent environ la moitié des volumes totaux de rigoles. Cette sous-estimation peut être due à la non prise en compte de la faible cohésion des matériaux de remblai de ces ravines, qui sont incisées et rebouchées chaque année, la persistance d'une humidité dans les fonds de vallons maintenant ainsi une cohésion plus faible toutes choses égales par ailleurs, et par la succession de plusieurs épisodes de ruissellement agrandissant à chaque fois la section incisée.

Un deuxième type d'écarts prévision-observation correspond à la forte variabilité résiduelle qui subsis-

te autour de l'équation 6 de prédiction des sections incisées. Parmi les nombreuses sources d'erreur qui peuvent en être à l'origine, on soulignera :

- une forte imprécision sur les variables d'entrée. Cette imperfection tient en grande partie à la façon arbitraire dont sont fixés les niveaux des variables AR et SI. En particulier, une source d'erreur évidente réside dans le fait de caractériser l'aptitude au ruissellement selon un critère en "tout ou rien", alors que l'émission de ruissellement dépend, pour un état de surface donné, de l'intensité pluviale. Ainsi, il est fort probable que certaines surfaces présentant un état de surface ne répondant pas au critère d'attribution d'une aptitude à l'émission d'un ruissellement ont pu tout de même contribuer à un ruissellement lors des épisodes pluvieux les plus intenses ;

- la non prise en compte de certains facteurs qui ont très probablement une influence sur la variabilité des débits d'écoulement et donc des sections des rigoles. Le cas le plus flagrant à cet égard est celui de l'intensité pluviale, qui est ignorée dans les équations 5 et 6, faute d'une connaissance exacte de la chronologie de développement des rigoles.

Au total, la limite fondamentale de l'approche présentée ci-dessus consiste à englober l'émission de ruissellement et l'incision dans une relation empirique de type "boîte noire".

CONCLUSION

Pour analyser les sources de variabilité de l'érosion par ruissellement concentré, nous avons défini conventionnellement une unité spatiale d'étude, dénommée Bassin Versant Élémentaire. Cette entité topographique et hydrographique est suffisamment grande pour comporter un réseau de collecteurs du ruissellement dont les principales branches sont stables. Inversement elle est délimitée de telle sorte que les phénomènes de dépôt y sont minimisés et qu'un axe de concentration finale unique y soit présent. Dans un paysage de plateaux ondulés tels que ceux du Nord du Bassin Parisien, c'est au niveau des BVE ainsi définis que se localise la plus grande partie des incisions, bien que les BVE ne représentent qu'un tiers à la moitié de la surface de la région, le reste étant constitué des fonds de vallées sèches ou drainées d'ordre supérieur et des portions de versants divergents qui sont directement raccordés aux vallées.

Le déterminant important de la variabilité de l'érosion en rigoles est la proportion de surfaces aptes à émettre du ruissellement. Lors d'un épisode pluvieux donné, cette aire contrôle le débit de ruissellement le long des lignes de concentration, paramètre qui est lui-même déterminant vis à vis des processus d'arrachement. Mais une analyse corrélative globale, à l'échelle du BVE n'explique qu'environ la moitié de la variance des volumes d'érosion, et ne prend pas en compte la diversité de l'organisation spatiale interne de ces unités. En effet, les

interactions entre caractéristiques pluviométriques, topographiques, pédologiques et agraires déterminent une structure hydrographique complexe et fluctuante dans le temps. Cette structure résulte de l'association de deux composantes : le réseau des collecteurs du ruissellement et la distribution spatiale des surfaces émettrices du ruissellement.

Le réseau de collecteurs comporte d'une part l'arborescence des lignes de concentration topographiques qui convergent vers le thalweg, d'autre part un maillage surimposé de motifs linéaires en dépression, d'origine agraire, qui sont associés aux limites de parcelles. Cette deuxième catégorie de collecteurs, constitués de dérayures et de fourrières, contribue à acheminer le ruissellement produit par les zones amont vers les collecteurs topographiques. La distribution spatiale des surfaces émettrices de ruissellement est particulièrement variable dans le temps, puisqu'elle résulte en grande partie de l'état structural de la surface du sol, lui-même sujet à des modifications importantes sous l'effet du climat et des interventions culturales. A un moment donné la répartition des surfaces émettrices dépend de la localisation des unités pédologiques et des cultures pratiquées, en interaction avec l'histoire climatique et la chronologie des opérations culturales. Dans les bassins versants avec des sols à texture limoneuse, et occupés en majorité par des cultures annuelles, ces interactions se traduisent globalement par une évolution d'allure cyclique de l'aptitude au ruissellement, avec un minimum en début d'automne lorsqu'une grande partie du BVE a été récemment travaillée. Ensuite, l'accroissement de cette aptitude est plus ou moins rapide selon la hauteur et l'intensité des précipitations qui se produisent au cours de l'automne et de l'hiver sur un sol nu ou à faible couverture protectrice. Les connexions entre surfaces émettrices et réseau des collecteurs sont déterminées par un système complexe de conditions méso et micro-topographiques locales, en partie déterminées, elles aussi, par les opérations culturales.

En dépit de cette complexité générale, il s'avère possible d'identifier et de caractériser la plus grande partie du réseau des collecteurs, des surfaces émettrices et de leurs connexions, à l'aide d'observations de terrain appropriées, et en procédant à un certain nombre de simplifications. Ces simplifications, comme la caractérisation en "tout ou rien" de l'aptitude du terrain à émettre du ruissellement, ont sans aucun doute introduit des erreurs dans l'analyse du phénomène. Cependant, elles ont aussi permis une description exhaustive des BVE observés, ce qui a posteriori apparaît comme un impératif méthodologique car des surfaces contributives de dimension restreinte peuvent suffire pour engendrer des rigoles importantes. En définitive, cette démarche, qui revient à subdiviser le bassin versant en un ensemble de sous-unités hydrologiques emboîtées, a permis d'analyser la variabilité des volumes érodés de façon plus fine que si l'on se contente d'une analyse à l'échelle globale du BVE. En effet, on met

alors en évidence, outre le rôle majeur de l'état structural de la surface du sol, l'influence limitante de la longueur incisable des segments du réseau des collecteurs, ainsi que le rôle de la pente locale et de la sensibilité du sol à l'incision, le long des collecteurs.

L'approche empirique qui a été développée ici trouve sa limite dans la non prise en compte des variables explicatives intermédiaires les plus importantes, à savoir les débits du ruissellement le long du réseau des collecteurs, lors des différents épisodes pluvieux. Pour progresser dans l'analyse des risques d'érosion, il est au stade actuel indispensable d'accéder à ces données, par mesure directe ou par simulation. En tout état de cause, les résultats obtenus suffisent à démontrer qu'il est à la fois nécessaire et possible, dans toute tentative de modélisation des transferts superficiels d'eau et de substances associées au sein des bassins versants cultivés, de prendre en compte la dynamique des états de surface, la structure hydrographique de ces bassins versants et les modifications introduites par les pratiques agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

- Auzet A.V., 1987 - L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Min Env/Min Agr, CEREG-URA 95 CNRS, Strasbourg (F), 60 p
- Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., Maucorps J., Ouvry J.F., 1990 - An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the Northern Paris Basin, France. In : Soil erosion on agricultural land (J Boardman, IDL Foster, JA Dearing, eds) John Wiley and Sons Ltd, Chichester (UK), 383-400
- Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., Ludwig B., Maucorps J., 1993 - Rill erosion as a function of characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena* 20, 41-62
- Auzet A.V., Boiffin J., Ludwig B., 1995 - Concentrated flow erosion in cultivated catchments : influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 759-767
- Boardman J., 1988 - Severe erosion on agricultural land in East Sussex, UK October 1987. *Soil Technology* 1, 333-348
- Boardman J., 1990 - Soil erosion on the South Downs : a review. In : Soil erosion on agricultural land (J Boardman, IDL Foster, JA Dearing, eds) John Wiley and Sons Ltd, Chichester (UK), 87-105
- Boiffin J., 1976 - Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann Agron* 27, 447-463
- Boiffin J., 1984 - La dégradation structurale des couches superficielles sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur, Paris INA-PG, 320 p
- Boiffin J., Monnier G., 1986 - Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. In : Assessment of soil surface sealing and crusting (D Gabriels, M De Boodt, eds), State University of Gent, Gent (B), 91-98
- Boiffin J., Papy F., 1988 - Prévision et maîtrise de l'érosion : influence des systèmes de culture. *Perspectives agricoles* 122, 210-217
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M., 1988 - Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion. *agronomie* 8 (8), 663-673
- Boiffin J., Monnier G., 1994 - Suppression du labour et érosion hydrique dans le contexte agricole français : bilan et possibilité d'application des références disponibles. In : Simplification du travail du sol (G Monnier, G Thevenet, B Lesaffre, eds) INRA, Les Colloques 65, Paris (F), 85-103
- Bresson L.M., Boiffin J., 1990 - Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma* 47, 301-325
- De Ploey J., 1989 - Erosion systems and perspectives for erosion control in European loess areas. *Soil Technology Series* 1, 93-102
- De Ploey J., 1990 - Threshold conditions for thalweg gullyng with special reference to loess areas. *Catena suppl* 17, 147-151
- Foster G.R., 1990 - Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In : Soil erosion on agricultural land (J Boardman, IDL Foster, JA Dearing, eds) John Wiley and Sons Ltd, Chichester (UK), 429-445
- Govers G., 1985 - Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Catena* 12, 35-49
- Guérif J., 1988 - Résistance en traction des agrégats terreux : influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. *agronomie* 8 (8), 379-386
- Guérif J., 1990 - Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In : La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur (J Boiffin, A Marin-Lafleche, eds) INRA, Les Colloques 53, Paris (F), 71-89
- Hillel D., 1974 - L'eau et le sol, principes et processus physiques. Vander Ltd, Leuven (B), 288 p
- Imeson A.C., Kwaad J.P.M., 1990 - The response of tilled soils to wetting by rainfall and the dynamic character of soil erodibility. In : Soil erosion on agricultural land (J Boardman, IDL Foster, JA Dearing, eds) John Wiley and Sons Ltd, Chichester (UK), 3-14
- Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann Agron hors série* 18, 142 p
- Le Bissonnais Y., 1988 - Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse doctorat d'université, Université d'Orléans, 225 p
- Le Bissonnais Y., Singer M.J., 1992 - Crusting, runoff and erosion response to soil water content and successive rainfalls. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1898-1903
- Le Bissonnais Y., Renaux B., Delouche H., 1995 - Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena* 25, 33-46
- Ludwig B., 1992 - L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse doctorat d'université, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 201 p
- Ludwig B., Boiffin J., Chadoeuf J., Auzet A.V., 1995 - Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchment. *Catena* 25, 227-252.
- Lyle W.M., Smerdon E.T., 1965 - Relation of compaction and other properties to resistance of soils. *Trans of the Amer Soc of Agric Engr* 8 (3), 419-422

- Monnier G., Konan L., 1968 - Influence des conditions de séchages des terres sur leur stabilité structurale. *Ann Agron* 19 (5), 541-551
- Monnier G., Boiffin J., 1986 - Effect of the agricultural use of soils on water erosion : the case of cropping systems in western Europe. In : *Soil erosion in the European Community* (G Chisci, RPC Morgan, eds) Balkema Ltd, Rotterdam (DK), 210-217
- Monnier G., Boiffin J., Papy F., 1986 - Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah ORSTOM, série Pédologie* 22 (2), 123-131

Moore I.D., Foster G.R., 1990 - Hydraulics and overland flow. In : Process studies in hillslope hydrology (MG Anderson, TP Burt, eds) John Wiley and Sons Ltd, Chichester (UK), 215-254

Ouvry J.F. (1990) Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré : expérience du Pays de Caux, France. Cah ORSTOM, série Pédologie 25 (1-2), 157-169

Papy F., Douyer C., 1991 - Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. agronomie 11, 201-215

Rauws G., Auzet A.V., 1989 - Laboratory experiments on the effects of simulated tractor wheelings on linear soil erosion. Soil and Tillage reasearch 13, 75-81

Sebillotte M., 1968 - Stabilité structurale et bilan hydrique du sol - Influence du climat et de la culture. Ann Agron 19 (4), 403-414

Torri D., Sfalanga M., Chisci G., 1987 - Threshold conditons for incipient rilling. Catena suppl 8, 97-105

Wischmeier W.H., 1976 - Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation. J Soil and Water Conserv 31 (1), 5-9

Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. USDA Handbook 537 (USA), 58 p.