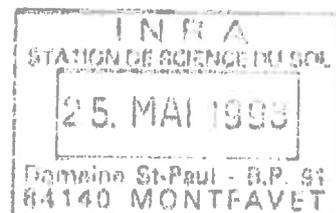


UNIVERSITE LOUIS PASTEUR – STRASBOURG I
UFR DE GEOGRAPHIE

**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**

Bruno LUDWIG



Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I
Mention : Géographie Physique

Jury

Jean BOIFFIN
Joël CHADOEUF
Jean-Claude FLAGEOLLET
Gérard MONNIER
Jean POESEN
Christian VALENTIN
Henri VOGT

Invité
Invité
Rapporteur Interne
Rapporteur Externe
Rapporteur Externe
Examinateur
Directeur de Thèse

7 décembre 1992

Centre d'Etudes
et de Recherches
Ecogéographiques
CEREG-URA95 CNRS

Station d'Agronomie
de Laon-Péronne
INRA

Avant-propos

*A mes parents
A Sandrine*

Ce travail a été mené dans le cadre du projet AGIR (Adaptation et Gestion des Intrants dans le Respect de l'Environnement) du programme AGROTECH de l'INRA qui a fourni les moyens financiers et matériels à sa réalisation. Il a été effectué au Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques (CEREG - URA 95 du CNRS), dirigé par Jean-Luc MERCIER, à l'Université Louis Pasteur - Strasbourg I et en collaboration étroite avec la Station d'Agronomie de Laon - INRA, dirigé par Jean BOIFFIN. Pour effectuer cette thèse, j'ai bénéficié d'une allocation de recherche du Ministère de la Recherche et de l'Espace : ce statut de salarié étant essentiel pour moi.

Au terme de ces années d'étude, je tiens à présenter ma gratitude aux nombreuses personnes qui sont intervenues, à des titres et degrés divers, dans l'élaboration de ce travail.

En premier lieu, c'est à M. Henri VOGT, mon Directeur de thèse, que va ma reconnaissance, car il m'a accordé toute sa confiance lorsqu'il a été question de permettre à un étudiant de réaliser ce travail avec l'INRA.

Je tiens à remercier M. Jean BOIFFIN, Directeur de Recherche à l'INRA, qui a durant toutes ces années dirigé et encadré mes recherches, ne ménageant ni son temps, ni sa peine, jusqu'aux derniers instants par FAX interposé, tant dans l'élaboration de la démarche que lors de la rédaction. Je lui dois en grande partie ma formation à la recherche et mon initiation à l'Agronomie.

Je tiens également à remercier Véronique AUZET, chargée de Recherche CNRS au CEREG, grâce à qui ce sujet de recherche me fut proposé, qui a co-encadré mes recherches et contribué à tous les niveaux de ce travail, que ce soit sur le terrain, ou lors de la réflexion, et jusqu'à l'aboutissement de ce mémoire.

Que Joël CHADOEUF de la Station de Biométrie de l'INRA à Avignon, soit remercié pour sa contribution à l'utilisation judicieuse des outils statistiques, ainsi que François PAPY, Directeur de Recherche à l'Unité "Systèmes Agraires et Développement" de l'INRA, Thiverval - Grignon, pour les discussions fructueuses et le temps qu'il m'a consacré.

Je tiens également à évoquer ici les discussions et les échanges fructueux avec les membres de l'équipe du laboratoire de Géomorphologie Expérimentale de Leuven (Belgique), dirigé jusqu'à son décès brutal par Jan DE PLOEY.

Je remercie tout particulièrement Alain MASCLÉ, Ingénieur d'étude à la Station d'Agronomie de Laon, grâce à qui l'enregistrement des précipitations a pu être assuré au cours de ces années, avec qui j'ai partagé de longs et agréables moments, lors de nos nombreuses tournées de terrain, n'hésitant jamais à affronter les rigueurs du climat ; sans lui je n'aurais pu faire l'ensemble des mesures de terrain qu'il m'a été donné de réaliser.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres de la Station d'Agronomie de Laon, mon second laboratoire d'accueil, dirigé jusqu'à ce mois par Jean BOIFFIN, qui par son action, m'a souvent réservé la priorité pour l'utilisation des moyens techniques de la station, et particulièrement Pascal DUBRULLE, André MARIN-LAFLECHE, Jean MAUCORPS (SESCPF - Antenne Nord) pour leurs conseils et leurs aides.

Je n'oublierai pas Messieurs SARRAZIN et LINDOR (SESCPF - Antenne Nord) pour leur précieux concours lors du relevé de terrain.

Ma reconnaissance va également à Jean-François OUVRY de l'AREAS (Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols, Seine - Maritime) qui a facilité mes contacts avec les agriculteurs et à ceux-ci pour avoir accepté avec gentillesse de répondre à mes questions et de me laisser "piétiner" leurs champs.

Mes remerciements sont aussi destinés à M. Gérard MONNIER, Directeur de Recherche honoraire à l'INRA, à l'origine du programme de recherche, qui à plusieurs occasions a permis de faire avancer ma réflexion, et également d'avoir accepté d'être un de mes rapporteurs.

Je voudrais remercier M. Jean-Claude FLAGEOLLET, de l'Université Louis Pasteur - Strasbourg I, et M. Jean POESEN, Directeur de Recherche au Fonds National de la Recherche Scientifique de Belgique - Université de Leuven, ayant tout deux accepté la charge bien ingrate de rapporteurs.

Je tiens également à remercier M. Christian VALENTIN, Directeur de Recherche à l'ORSTOM, Niger, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse alors même que ses séjours en Europe sont rares et comptés.

Que les professeurs, chercheurs, ingénieurs, techniciens, et doctorants du CEREG, soient ici remerciés pour leur disponibilité, et particulièrement mes camarades Caroline, Jocelyne, Pilar, Muriel, Brahim, Jean-Louis, Jérôme, Philippe et les autres.

Je voudrais remercier le personnel de l'Atelier de Cartographie et de Publication Assistées du CEREG, dirigé par Claire BELLER, pour la qualité des travaux graphiques réalisés.

Enfin, un grand merci à tous ceux et celles que par oubli fort regrettable je n'aurai pas cités.

Résumé

L'objectif de ce travail était d'aboutir à une méthode d'évaluation et de classement de la sensibilité de sites à l'érosion par ruissellement concentré, fréquente en hiver dans le contexte des zones d'agriculture intensive du Nord du Bassin Parisien. La démarche adoptée est basée sur l'observation des symptômes in situ et l'analyse de leur variabilité.

L'unité spatiale d'étude retenue est le Bassin Versant Élémentaire (BVE), qui permet de prendre en compte non seulement les processus de formation du ruissellement, mais également ceux responsables de sa concentration.

Quatre groupes de caractéristiques du BVE ont été considérées :

- les états de surface et leur aptitude à la production de ruissellement ;
- les pentes ;
- la forme du BVE et la densité des collecteurs du ruissellement ;
- la sensibilité à l'incision du sol.

Une première étude de la variabilité des volumes de rigoles a été réalisée à l'échelle du BVE, à partir de mesures effectuées en fin d'hiver lors de trois années successives sur un échantillon de 20 BVE et lors d'une quatrième année sur un second échantillon de 15 BVE. Elle met en évidence le rôle déterminant de l'aire des surfaces considérées comme aptes à produire un ruissellement. Il s'agit des secteurs dont l'évolution de l'état de surface du sol est à l'origine d'une croûte de battance, caractérisée par une infiltrabilité réduite. Ce résultat confirme l'importance des processus de dégradation de la structure de surface vis-à-vis de l'érosion. Il subsiste tout de même une part importante de la variabilité non expliquée, qui correspond à une mauvaise prise en compte de la variabilité des longueurs incisées.

L'étude à l'échelle de sous-unités hydrologiques rattachées à des segments du réseau des collecteurs du ruissellement permet de tenir compte des longueurs incisables, par l'analyse séparée des deux composantes du volume des rigoles (section et longueur incisées). L'analyse de la variabilité des sections d'incision de chaque segment fait appel à deux modèles concernant respectivement :

- la probabilité qu'un segment ne soit pas incisé ;
- l'estimation de la section incisée pour les segments reconnus comme ayant une incision.

Ces deux variables sont déterminées d'après les aires variables d'alimentation, la pente et la sensibilité du sol à l'incision. Ceci nous permet de reconstituer le volume des rigoles pour chaque segment et, par sommation, pour chaque BVE. Dans ce cas les volumes reconstitués présentent une excellente corrélation avec les valeurs mesurées.

Cette seconde démarche, rendant mieux compte de la variabilité de l'érosion en rigoles que celle effectuée à l'échelle globale du BVE, confirme le bien fondé de la prise en compte des structures hydrologiques et agraires des BVE, ainsi que de la localisation des surfaces émettrices d'un ruissellement par rapport aux longueurs incisables.

Mots-clés : aptitude au ruissellement ; bassin versant élémentaire ; érosion ; état de surface ; réseau ; rigole ; ruissellement concentré ; terres agricoles.

Summary

A method has been developed to assess the susceptibility of sites to runoff concentrated erosion and to classify these sites. The spatial unit used for the study was the elementary catchment (EC). The approach is based on a systematic survey of erosion features and analysis of their variations in relation to such characteristics as the structural state of soil surface, the slope, the catchment shape, the density of runoff collectors and the soil susceptibility to scouring.

The variation of the rill volumes was first analysed on the scale of the EC. The main factor accounting for these variations was found to be the size of the area considered to be able to produce runoff. This result confirms the importance of crusting processes in promoting erosion.

The two components of the rill volume (cross-sectional area and rill length) were then analysed separately on the scale of hydrological sub-units connected to segments of the runoff collector network. Two models were used to study the variation of the rill section on each segment:

- probability of non-incision;
- estimation of the rill cross-section.

The first model gave the probability of no scouring. Knowing this probability, the presence or absence of a rill was determined by random selection. When the presence of a rill was predicted, its cross-sectional area was determined using the second model. The total rill volume of each catchment was predicted by adding together the rill volume predicted for each individual segment. This provided evaluation of rill volumes which were strongly correlated with the measured data.

This analysis of the runoff collector network accounted for the variability in rill erosion better than did the first on the overall scale of the EC. It confirms the importance of the hydrological and agricultural structures of the catchment, and the location of the runoff contributing areas in relation to the runoff collector network.

Key words: agricultural land use; runoff collector network; concentrated runoff; elementary catchment; erosion; rills; structure state of the soil surface.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	15
-----------------------------------	-----------

Première partie

EROSION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE : BILAN DES CONNAISSANCES DISPONIBLES	19
--	-----------

Chapitre 1 PROCESSUS ET FACTEURS DE RISQUE D'EROSION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE.....	23
---	-----------

1.1. Effet érosif du ruissellement.....	23
1.2. Processus et facteurs intervenant dans genèse du ruissellement.....	23
1.2.1. <i>Evolution des états de surface du sol</i>	24
1.2.2. <i>Processus et facteurs contrôlant l'évolution des états de surface</i>	25
1.3. Processus et facteurs intervenant dans la concentration du ruissellement	25
1.4. Processus et facteurs intervenant dans la sensibilité du terrain à l'incision.....	26
1.5. Etude intégrée du rôle des différents facteurs sur l'érosion par ruissellement concentré	26

Chapitre 2 INADEQUATION DES METHODES D'ANALYSE ET DE PREVISION DE L'EROSION A L'ETUDE DE L'EROSION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE	29
--	-----------

2.1. Problème de l'échelle spatiale d'appréhension	29
2.2. Le cas de l' U S L E.....	29
2.3. Démarches actuelles de modélisation déterministe	30
2.4. Conséquences sur le choix de la démarche adoptée.....	31

Deuxième partie

METHODES, DISPOSITIFS ET PROTOCOLES DE TRAVAIL.....	33
Chapitre 3 DEFINITION ET CARACTERISATION DES UNITES SPATIALES.....	37
3.1. Choix et définition des unités spatiales.....	37
3.1.1. Identification des BVE.....	37
3.1.2. Procédure de délimitation des BVE.....	39
3.1.3. Identification du thalweg.....	39
3.2. Caractéristiques morphologiques.....	40
3.2.1. Surface totale du BVE.....	40
3.2.2. Forme.....	41
3.2.3. Pentes.....	41
3.2.4. Forme et densité des collecteurs de ruissellement.....	43
3.3. Caractéristiques pédologiques.....	44
3.4. Caractéristiques agraires.....	47
3.4.1. Types d'occupation du sol.....	47
3.4.2. Collecteurs du ruissellement d'origine agraire.....	48
3.5. Etat de surface.....	48
Chapitre 4 PRESENTATION DES ECHANTILLONS DE BVE.....	53
4.1. Constitution des échantillons.....	53
4.1.1. Choix et localisation des BVE.....	53
4.1.2. Cadre physique et agraire.....	56
4.2. Variabilité des caractéristiques.....	57
4.2.1. Caractéristiques permanentes des BVE.....	57
4.2.2. Caractéristiques agraires des BVE.....	58
Chapitre 5 CONTEXTE CLIMATIQUE.....	61
5.1. Enregistrements réalisés.....	61
5.2. Caractéristiques des campagnes étudiées.....	61
Chapitre 6 CARACTERISTIQUES DES RIGOLES.....	65

Troisième partie

**ANALYSE DE LA VARIABILITE DES SYMPTOMES D'EROSION
A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT ELEMENTAIRE69**

**Chapitre 7 PRESENTATION ET DESCRIPTION
DES SYMPTOMES D'EROSION 73**

- 7.1. Variabilité des volumes des rigoles 73
- 7.2. Distribution spatiale des rigoles 76
- 7.2.1. Répartition par schéma d'incision 76
- 7.2.2. Répartition des rigoles selon le motif linéaire préexistant 77
- 7.2.3. Répartition spatiale des rigoles localisées sur un motif linéaire 78

Chapitre 8 LES ETATS DE SURFACE DU SOL81

- 8.1. Variabilité des états de surface du sol 81
- 8.2. Facteurs déterminant la variabilité des états de surface du sol 83
- 8.2.1. Rôle de l'occupation du sol 83
- 8.2.2. Rôle de la texture du sol 84
- 8.2.3. Relation entre les surfaces répondant à l'un des critères SR et les pluies 85
- 8.3. Choix des observations des états de surface à mettre en relation
avec le volume des rigoles 88

**Chapitre 9 ANALYSE DE LA RELATION ENTRE LE VOLUME
DES RIGOLES ET LES SURFACES APTES
A PRODUIRE UN RUISSELLEMENT89**

- 9.1. Mise en relation du volume des rigoles avec les surfaces aptes
à produire un ruissellement 89
- 9.2. Analyse de la variabilité résiduelle 92
- 9.3. Tentative de validation avec les BVE du second échantillon 96

Quatrième partie

	ETUDE DU RESEAU DES RIGOLES AU SEIN DES BVE	101
Chapitre 10	DEMARCHE	105
10.1.	Principe de la démarche	105
10.2.	Procédures	105
10.2.1.	<i>Construction du réseau des collecteurs du ruissellement</i>	<i>105</i>
10.2.2.	<i>Segmentation du réseau</i>	<i>111</i>
10.2.3.	<i>Caractérisation des variables propres à chaque segment</i>	<i>111</i>
Chapitre 11	ANALYSE ET MODELISATION DES RESEAUX DE RIGOLES SUR LE 1^{er} ECHANTILLON DE BVE	117
11.1.	Présentation de l'échantillon de segments.....	117
11.2.	Estimation de la probabilité de non incision.....	118
11.2.1.	<i>Présentation des données de base, allure de la variation</i>	<i>118</i>
11.2.2.	<i>Ajustement de la fonction f</i>	<i>119</i>
11.3.	Estimation des sections incisées.....	122
11.3.1.	<i>Choix de la forme d'ajustement.....</i>	<i>122</i>
11.3.2.	<i>Ajustement de la fonction g.....</i>	<i>123</i>
11.4.	Reconstitution des volumes de rigoles.....	128
11.4.1.	<i>Probabilité qu'un segment ne soit pas incisé</i>	<i>128</i>
11.4.2.	<i>Détermination si un segment est incisé ou non</i>	<i>128</i>
11.4.3.	<i>Estimation de la section incisée.....</i>	<i>129</i>
11.4.4.	<i>Reconstitution du volume incisé par segment.....</i>	<i>129</i>
11.4.5.	<i>Reconstitution du volume incisé par BVE</i>	<i>131</i>
Chapitre 12	APPLICATION DE LA DEMARCHE AU SECOND ECHANTILLON DE BVE	135
12.1.	Démarche adoptée et présentation des données	135
12.2.	Résultats et discussions.....	137
12.2.1.	<i>Estimation de la section incisée des segments</i>	<i>137</i>
12.2.2.	<i>Reconstitution du volume incisé par segment.....</i>	<i>137</i>
12.2.3.	<i>Reconstitution du volume incisé par BVE</i>	<i>137</i>
12.2.4.	<i>Reconstitution du volume incisé par BVE d'après la fonction g^3</i>	<i>139</i>
	CONCLUSION GENERALE.....	143
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	149
	ANNEXES.....	157

Liste des figures

Fig. 3.1. :	procédure d'identification du BVE, algorithme	36
Fig. 3.2. :	procédure d'identification du BVE, schéma	36
Fig. 3.3. :	tracé de la ligne de partage des eaux du BVE	38
Fig. 3.4. :	angle d'ouverture du fond de vallon :	
a. :	mode d'obtention	38
b. :	courbe des angles d'ouverture.....	38
Fig. 3.5. :	position du thalweg sur la ligne de concentration morphologique majeure ayant permise d'identifier le BVE	40
Fig. 3.6. :	cartes des pentes :	
a. :	carte brute des fonds de cartes topographiques.....	42
b. :	carte lissée.....	42
c. :	carte définitive après correction d'après les mesures de terrain	42
Fig. 3.7. :	triangle des textures de l'Aisne.....	45
Fig. 3.8. :	triangle des textures selon leur sensibilité à la battance	46
Fig. 3.9. :	procédure de mesure de la rugosité.....	50
Fig. 4.1. :	carte de localisation des BVE	54
Fig. 6.1. :	types de schéma d'incision des rigoles	64
Fig. 6.2. :	procédure de mesure d'une rigole	64
Fig. 6.3. :	procédure de mesure d'une section d'incision d'une rigole	66
Fig. 7.1. :	variation du taux d'érosion (en m ³ /ha) des BVE du premier échantillon, en fin d'hiver :	
a. :	en 1988/1989	72
b. :	en 1989/1990	72
c. :	en 1990/1991	72
Fig. 7.2. :	taux d'érosion (en m ³ /ha) des BVE du second échantillon, en janvier 1992.....	74
Fig. 7.3. :	évolution du taux d'érosion (en m ³ /ha) de 5 BVE du second échantillon au cours de saison d'automne hiver 1991/1992.....	74
Fig. 8.1. :	variabilité des proportions de surface (en %) répondant respectivement au critère SR2, SR3 et SR4, des BVE du premier échantillon :	
a. :	en janvier 1990	80
b. :	en janvier 1991	80
Fig. 8.2. :	évolution des états de surface au cours de la campagne d'observation de 1991/1992, pour les BVE du second échantillon :	
a. :	évolution de PR2.....	82
b. :	évolution de PR4.....	82
Fig. 8.3. :	relation entre l'atteinte du facies F2 par la surface d'un sol d'une culture d'hiver et les précipitations cumulées à partir de la date du semis.....	84

Fig. 8.4. :	évolution des proportions de surfaces (en %) répondant au critère SR , en fonction des précipitations cumulées à partir du 1 ^{er} octobre :	
a. :	critère SR2	85
b. :	critère SR4	86
c. :	critère SR3	86
Fig. 8.5. :	évolution de PR4 (en %) en fonction des précipitations cumulées d'intensité supérieure à 10 mm/h, à partir du 1 ^{er} octobre	87
Fig. 9.1. :	variabilité du taux d'érosion (en m ³ /ha) en fonction de PR2 (en %), pour les trois années réunies (sauf 1988/1989 : PR4 reconstitué).....	90
Fig. 9.2. :	variabilité du taux d'érosion (en m ³ /ha) en fonction de PR4 (en %), pour les trois années réunies.....	90
Fig. 9.3. :	variabilité du taux d'érosion (en m ³ /ha) en fonction de PR4 (en %), uniquement pour les BVE du Pays de Caux, les trois années réunies	93
Fig. 9.4. :	relation entre le taux d'érosion par BVE (en m ³ /ha) et la densité des rigoles par BVE (en m/ha)	95
Fig. 9.5. :	relation entre le taux d'érosion par BVE (en m ³ /ha) et la proportion des surfaces aptes à produire un ruissellement : PR4 (en %)	95
Fig. 9.6. :	variabilité du taux d'érosion (en m ³ /ha) en fonction de PR4 (en %), pour les quatre mois de mesures en 1991/1992 du deuxième échantillon de BVE.....	96
Fig. 10.1. :	localisation des rigoles en fin d'hiver sur les trois BVE du Pays de Montreuil, en 1988/1989, 1989/1990 et 1990/1991.....	102
Fig. 10.2. :	zone amont à pente inférieure à 2% exclue de l'aire de construction du réseau des collecteurs, localisation des lignes de concentration morphologiques, des chemins, des fourrières et dérayures sur le BVE de HBO en 1990/1991	106
Fig. 10.3. :	identification des tronçons pérennes du réseau de HBO en 1990/1991	106
Fig. 10.4. :	identification des tronçons liés aux motifs d'origine agraire du réseau de HBO en 1990/1991	108
Fig. 10.5. :	tracé définitif du réseau des collecteurs par le raccordement des tronçons isolés et des points de débordement des chemins au reste du réseau des collecteurs de HBO en 1990/1991	108
Fig. 10.6. :	procédure de raccordement des tronçons en aval d'un point de diffluence	109
Fig. 10.7. :	procédure de segmentation du réseau des collecteurs du ruissellement.....	110
Fig. 10.8. :	segmentation et identification des raccordements aux points de diffluence du réseau des collecteurs de HBO en 1990/1991.....	110
Fig. 10.9. :	surface d'alimentation du segment "A" :	
a. :	potentielle.....	112
b. :	réelle.....	112
Fig. 10.10. :	procédure d'obtention de la section d'incision moyenne d'un segment	115
Fig. 11.1. :	probabilité estimée qu'un segment ne soit pas incisé (en %), en fonction de sr4 (en ha), par classe de pt (en %), les courbes sont renseignées par la valeur moyenne de chaque classe de pt	120
Fig. 11.2. :	probabilité estimée qu'un segment ne soit pas incisé (en %), en fonction de pt (en %), par classe de sr4 (en ha), les courbes sont renseignées par la valeur moyenne de chaque classe sr4	120
Fig. 11.3. :	relation entre les sections incisées mesurées et sr4 pour les deux années réunies	123
Fig. 11.4. :	relation entre les sections incisées mesurées et les sections incisées estimées par l'équation n°4.....	125

Fig. 11.5. :	relation entre les résidus et les sections incisées estimées par l'équation n°4	126
Fig. 11.6. :	variabilité des résidus des valeurs des sections mesurées et estimées (en cm ²) par l'équation n°4, par BVE :	
a. :	en 1989/1990	127
b. :	en 1990/1991	127
Fig. 11.7. :	volume incisé mesuré et reconstitué (en m ³), correspondant à la moyenne des dix volumes reconstitués, par segment.....	130
Fig. 11.8. :	relation entre la longueur incisée du segment (LI) et la longueur du segment (lgi), en mètres.....	130
Fig. 11.9. :	taux d'érosion (en m ³ /ha) en rigoles mesuré (Vmes) et reconstitué (Vrec) par BVE : taux d'érosion reconstitué moyen (carré), maximum et minimum obtenus pour les dix reconstitutions des volumes incisés	131
Fig. 11.10. :	taux d'érosion (en m ³ /ha) en rigoles mesuré et estimé pour la relation établie à l'échelle globale du BVE.....	132
Fig. 12.1. :	relation entre les sections incisées (en cm ²) mesurées en fin d'hiver 1991/1992 et les sections incisées estimées d'après l'équation n°4, des segments du deuxième échantillon	134
Fig. 12.2. :	volume incisé par segment, mesuré (en m ³) et reconstitué moyen (en m ³) obtenus à l'aide de l'équation n°4	136
Fig. 12.3. :	taux d'érosion du BVE (en m ³ /ha) mesuré (Vmes) et reconstitué (Vrec) d'après l'équation n°4 d'estimation des sections incisées par segment : taux d'érosion reconstitué moyen (carré), maximum et minimum obtenus pour les dix reconstitutions des volumes incisés.....	136
Fig. 12.4. :	comparaison entre les taux d'érosion reconstitués moyens du second échantillon de BVE (en m ³ /ha), obtenus à l'aide de l'équation n°4, avec ceux du premier échantillon.....	138
Fig. 12.5. :	comparaison entre les taux d'érosion reconstitués moyens du second échantillon de BVE (en m ³ /ha), obtenus à l'aide de l'équation n°7, avec ceux du premier échantillon.....	138

Liste des tableaux

Tabl. 3.1. :	notation du stade de développement des croûtes de battance.....	49
Tabl. 3.2. :	signification des notations de rugosité utilisées.....	51
Tabl. 3.3. :	devenir de l'eau de pluie arrivant à la surface du sol	51
Tabl. 3.4. :	notations de l'aptitude au ruissellement par la surface du sol	52
Tabl. 4.1. :	liste des BVE.....	55
Tabl. 4.2. :	variabilité des caractéristiques morpho-pédologiques.....	57
Tabl. 4.3. :	variabilité des occupations du sol par année	59
Tabl. 5.1. :	caractéristiques pluviométriques pour les trois périodes d'automne hiver étudiées, sur deux sites : Blossesville ou Fongueusemare (à l'Ouest) et Orlon (à l'Est).....	60
Tabl. 5.2. :	pluies de faibles intensités pour les trois périodes d'automne hiver étudiées, sur deux sites : Blossesville ou Fongueusemare (à l'Ouest) et Orlon (à l'Est)	62
Tabl. 5.3. :	intensité moyenne durant 30 mn de huit épisodes pluvieux particulièrement importants.....	63
Tabl. 6.1. :	estimation de l'erreur sur le volume incisé due à la procédure de reconstitution.....	67
Tabl. 7.1. :	taux d'érosion moyen et précipitations cumulées pour les BVE de deux régions au cours des quatre années d'étude.....	75
Tabl. 7.2. :	évolution du taux d'érosion moyen et des précipitations cumulées au cours de la campagne d'étude de 1991/1992, pour les BVE du Pays de Caux.....	75
Tabl. 7.3. :	répartition du volume des rigoles selon leur schéma d'incision	76
Tabl. 7.4. :	répartition du volume des rigoles selon le type de motif linéaire, par campagne d'observation.....	77
Tabl. 7.5. :	répartition spatiale du volume des rigoles localisées sur un motif linéaire préexistant par schéma d'incision	78
Tabl. 7.6. :	répartition spatiale du volume des rigoles par type de motif linéaire préexistant.....	79
Tabl. 8.1. :	caractéristiques des parcelles dont l'état de surface répond au critère SR4	82
Tabl. 9.1. :	ajustement des taux d'érosion (TE, en m ³ /ha) en fonction des proportions des surfaces (en %) répondant respectivement au critère SR2 et SR4 , par année d'étude.....	91
Tabl. 9.2. :	caractéristiques morphologiques des BVE du Pays de Caux.....	94
Tabl. 10.1. :	sensibilité d'un sol à l'incision selon les caractéristiques agraires.....	114
Tabl. 10.2. :	modification du risque d'incision en fonction de la texture du sol.....	114
Tabl. 11.1. :	variabilité des sections incisées des segments du premier échantillon de BVE, pour les deux années d'étude	116
Tabl. 11.2. :	variabilité des caractéristiques attribuées aux segments des réseaux	118
Tabl. 11.3. :	fréquence (en %) de segments non incisés selon leur surface apte à produire un ruissellement répondant au critère SR4 (sr4) et leur pente moyenne (pt).....	119
Tabl. 11.4. :	résultats de l'ajustement des fonctions g	124
Tabl. 12.1. :	caractéristiques des segments du second échantillon de BVE.....	134

Liste des annexes

Annexe 1 : liste des variables morphologiques , pédologiques et agraires	158
Annexe 2 : formation des croûtes sédimentaires en fonction de la texture à la surface du sol et des caractéristiques des pluies pour les semis d'automne	159
Annexe 3 : analyse factorielle des principales caractéristiques morphologiques et pédologiques des BVE du 1 ^{er} échantillon.....	165
Annexe 4 : données pluviométriques.....	171
Annexe 5 : date de prise en compte des observations des états de surface.....	175
Annexe 6 : analyse de la variabilité de l'érosion en rigoles à l'échelle du BVE.....	176
Annexe 7 : analyse et modélisation du volume des rigoles localisées sur le réseau des collecteurs du ruissellement.....	185
Annexe 8 : photos.....	199

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

Les recherches menées sur l'érosion des sols ont débuté pour les régions ayant des pluies à fortes intensités, appartenant au domaine tropical, méditerranéen ou continental (FOURNIER, 1960 ; HUDSON, 1961 ; MORGAN, 1974 ; ROOSE, 1981 ; NEBOIT, 1983 ; VOGT et AUZET, 1989) ainsi que pour les régions ayant des versants à fortes pentes (HENIN et GOBILLOT, 1950 ; AUZET, 1987a). D'une manière générale, les déplacements de matières solides, qu'il s'agisse d'érosion hydrique stricto sensu ou de mouvements de masse, sont particulièrement spectaculaires et préjudiciables dans ces régions.

L'érosion des terres agricoles du Nord Ouest de l'Europe n'a commencé à faire l'objet d'études que récemment. La réelle prise de conscience du problème par le monde scientifique peut être située vers les années 1970 (VOGT et VOGT eds, 1979).

L'érosion des sols de ces régions n'est cependant pas propre au vingtième siècle. Des périodes à forte érosion des sols se sont succédées dès le Moyen Age (BORK, 1989), voire probablement depuis les premières mises en culture des sols. Cependant, de nombreux auteurs s'accordent à donner aux phénomènes d'érosion des terres limoneuses cultivées une importance croissante à partir de la fin des années 1950 dans le Nord du Bassin Parisien (LEFEVRE, 1958 ; MAUCORPS, 1982 ; MONNIER et al, 1986 ; LHENAFF, 1986 ; MASSON, 1987), en Belgique (BOLLINNE, 1982 ; DE PLOEY, 1986), en Grande-Bretagne (BOARDMAN, 1983, 1985 et 1990 ; EVANS, 1990) et plus généralement dans toute l'Europe de l'Ouest (DE PLOEY, 1989), ceci malgré des conditions topographiques et climatiques souvent modérées (PIHAN, 1979 ; GABRIELS, 1988).

De nos jours, cette érosion est préoccupante par sa fréquence et par les nuisances qui lui sont associées. Ces dernières sont fortement ressenties, principalement du fait des nuisances en aval:

- inondations boueuses pouvant occasionner de lourdes charges aux collectivités locales (AUZET, 1987b ; LILIN et PAULET, 1987b ; ROBINSON et BLACKMAN, 1990) ;
- envasement des étangs et des retenues (AUZET, 1987 ; DUCK et McMANUS, 1990 ; HEATHWAITE et al, 1990) ;
- pollution des cours d'eau par l'apport de matières en suspension et de pesticides.

En revanche, les agriculteurs sont moins sensibles aux pertes en terres en elles-mêmes, qu'aux autres nuisances qui leur sont associées : destruction de semis, ensevelissement des cultures, gênes apportées à la circulation dans les parcelles par la présence de ravines (PAPY et BOIFFIN, 1988).

Dans le Nord du Bassin Parisien, l'hiver et le printemps sont particulièrement propices à l'érosion. Les érosions **diffuse** et en **rigole - interrigoles** prédominent lors des orages de printemps (LUDWIG et al, 1992), tandis que l'érosion par **ruissellement concentré** se manifeste typiquement et régulièrement en hiver, en condition de pluies longues et peu intenses. Les symptômes d'érosion qui lui sont associés se matérialisent par la présence de rigoles et de ravines sur des zones ayant permis la concentration du ruissellement, en particulier les fonds des vallons secs sans chenal permanent (OUVRY, 1982 ; BOIFFIN et al, 1988).

Cette érosion par ruissellement concentré apparaît comme préoccupante, du fait de son caractère chronique (MONNIER et al, 1986 ; BOIFFIN et al, 1988) et des dégâts qui lui sont associés (BOARDMAN, 1990 ; GOVERS, 1991); elle semble ici spécifique par comparaison à d'autres contextes géographiques et climatiques, où prédominent d'autres formes d'érosion. Elle peut être à l'origine d'importants dégâts, pouvant prendre un caractère catastrophique même pour des pluies d'intensités modérées (PAPY et DOUYER, 1991).

L'objet de ce travail se situe dans la perspective générale de l'élaboration d'une méthode d'évaluation et de classement de la sensibilité des sites à l'érosion par ruissellement concentré, dans le contexte des zones d'agriculture intensive du Nord du Bassin Parisien. Cette méthode doit permettre de prendre en compte le rôle des systèmes agraires, et d'orienter le choix des évolutions possibles dans la gestion agronomique de l'espace. Dans ce cadre, l'objectif de l'étude entreprise est d'établir une relation explicative entre les symptômes d'érosion rencontrés et les caractéristiques morphologiques, pédologiques et agraires des sites, et d'en tirer des conclusions pour formuler les bases d'un système de classement des sites du point de vue de leur sensibilité à l'érosion.

Cette démarche est rendue nécessaire, car l'objectif fixé n'est pas encore réalisable à l'aide de modèles de prédiction de l'érosion des sols actuellement disponibles. Ceux-ci n'ont pour l'instant pas encore abouti à un système opérationnel d'évaluation des pertes en terre par ruissellement concentré, ni même été validés au contexte géographique dans lequel nous nous situons. On est donc amené à adopter une approche empirique visant à identifier et hiérarchiser les facteurs de risque, et par là à déterminer leur contribution en fonction de la variabilité des symptômes d'érosion.

Le mémoire comporte quatre parties.

La première est consacrée à une présentation succincte des processus liés à l'érosion par ruissellement concentré et à une courte discussion de l'inadéquation à notre objectif des modèles de prévision actuellement disponibles.

La seconde présente les sites d'étude et leurs caractéristiques.

La troisième comporte une analyse de la variabilité de l'érosion en rigoles à l'échelle globale du bassin versant, en mettant en relation des caractéristiques des sites et les volumes cumulés des rigoles.

La quatrième partie, comme la troisième, traite de la variabilité de l'érosion en rigoles, mais sur la base du réseau des collecteurs du ruissellement concentré de chaque bassin versant, et présente une tentative de modélisation semi-empirique prenant en compte les composantes du volume incisé : le trajet des écoulements concentrés et les sections incisées.

Première partie

**EROSION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE :
BILAN DES CONNAISSANCES DISPONIBLES**

EROSION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE : BILAN DES CONNAISSANCES DISPONIBLES

Introduction

L'érosion des sols par l'eau résulte du détachement des particules du sol sous l'action des gouttes de pluie et/ou du ruissellement, et de leur transport qui n'est assuré sur des distances appréciables que par le ruissellement. Les formes d'érosion ainsi engendrées se distinguent suivant (AUZET et al., 1990) :

- le caractère diffus ou concentré des départs de terre ;
- la densité des incisions, dont l'espacement peut être d'ordre métrique à hectométrique ;
- leur date d'apparition ; dans le Nord du Bassin Parisien on distingue deux périodes principales, l'une en fin d'automne début d'hiver, l'autre au cours du printemps (OUVRY, 1987 ; BOIFFIN et al., 1988 ; PAPY et DOUYER, 1991).

AUZET et al. (1990) soulignent que ces formes d'érosion expriment différentes modalités de combinaison des processus élémentaires de détachement et de déplacement des particules solides. Leur apparition, dans un contexte donné, et leur position dans l'espace soulignent les différences fonctionnelles entre les aires de production du ruissellement et les aires sources de sédiments. Ainsi les formes d'érosion classiquement distinguées peuvent être décrites comme les résultantes d'une combinaison particulière de processus élémentaires ayant un rôle dans la genèse du ruissellement et/ou l'arrachement et le transport des sédiments.

Dans le cas de l'**érosion diffuse** (ELLISON, 1945), le détachement est assuré par l'action des gouttes d'eau sur le sol, et les particules ainsi mobilisées peuvent être prises en charge par un ruissellement à caractère diffus, incapable d'inciser le sol.

L'**érosion en rigole – interrigo**, décrite notamment par THORNES (1980), se distingue de la première forme par le fait que le ruissellement exerce une force tractrice suffisante pour arracher les sédiments sur des lignes d'écoulement qui peuvent être très denses. Une érosion de type diffus intervient au niveau des zones d'interrigo.

Dans le cas de l'**érosion par ruissellement concentré**, le ruissellement n'acquiert cette force tractrice que lorsqu'il se concentre sur des lignes en dépression (FOSTER et al., 1985 ; SPOMER et HJELMFELT, 1986), tout particulièrement les thalwegs. Une fois formées, les incisions évoluent également du fait des mouvements de masse qui affectent leurs parois.

Dans le Nord du Bassin Parisien, plusieurs publications (OUVRY, 1982 ; MONNIER et al., 1986 ; AUZET, 1987b ; BOIFFIN et al., 1988) et les résultats obtenus dans le cadre d'une étude préliminaire (LUDWIG, 1989 ; AUZET et al., 1992) soulignent qu'en automne hiver :

- les formes d'érosion liées à la concentration du ruissellement, soit du fait de la morphologie (lignes en dépression), soit du fait de motifs linéaires liés aux systèmes de cultures (traces de roue, dérayures), occupent une place très importante ;
- ces incisions peuvent se développer dans des conditions de pente très modérées, de l'ordre de 4 à 5% (SAVAT et DE PLOEY, 1982 ; GOVERS, 1985), voire 2% d'après nos mesures ;
- elles sont associées à la présence d'une surface d'alimentation qui, si elle est importante, est susceptible de générer un ruissellement érosif même lors des pluies de faible intensité (BOIFFIN et al., 1988), fréquentes au cours de la période hivernale.

La genèse du ruissellement fonctionne selon le modèle hortonien (HORTON, 1933), c'est-à-dire que l'eau disponible pour le ruissellement résulte de la saturation du profil "par le haut", dès que l'intensité de la pluie dépasse l'infiltrabilité de l'horizon superficiel du sol. En revanche, le processus de saturation "par le bas" jusqu'à la surface du sol de tout ou une partie importante du profil (CAPPUS, 1960) a peu de chance de survenir en conditions de pluviométrie modérée et de sols correctement drainés. Dans le contexte géographique étudié, BOIFFIN et al. (1988) ont mis en évidence une relation étroite entre le risque d'érosion en rigoles et les états de surface du sol fortement dégradés susceptibles de générer un ruissellement selon le modèle hortonien.

L'objet de cette première partie est de reprendre brièvement dans la bibliographie un certain nombre de connaissances et de réflexions qui éclaireront les choix de la démarche adoptée. Ainsi, le premier chapitre fait le point sur les processus et les facteurs de l'érosion par ruissellement concentré. Nous discuterons, dans un second chapitre, de l'adéquation des méthodes de prédiction des pertes en terre à cette forme d'érosion.

Chapitre 1

PROCESSUS ET FACTEURS DE RISQUE D'EROSION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE

1.1. Effet érosif du ruissellement

L'arrachement de particules solides par le ruissellement est lié à la force tractrice τ_r , exercée par l'écoulement sur son lit. TORRI et al. (1987) proposent la formulation suivante :

$$\tau_r = \rho_w U^2 \quad (\text{en Pa})$$

avec, ρ_w : la masse volumique (kg m^{-3}) ; U : la vitesse de frottement appliquée par le ruissellement sur le sol (m s^{-1}), également appelée la vitesse tractrice, qui peut elle-même s'écrire

$$U = \sqrt{gRS} \quad (\text{en m s}^{-1})$$

avec, g : la constante de gravité (m s^{-2}) ; R : le rayon hydraulique (m) ; S : la pente (sinus de l'angle). Le rayon hydraulique correspond au rapport de la section mouillée (m^2) au périmètre mouillé (m). Dans le cas d'un écoulement beaucoup plus large que profond, le rayon hydraulique peut être estimée par l'épaisseur de la lame d'eau.

En fait cette vitesse devient critique pour l'incision des rigoles, c'est-à-dire permet au ruissellement d'arracher des sédiments, dès lors qu'elle dépasse un seuil, noté U^* (GOVERS, 1985). Ce seuil critique est fixé par les caractéristiques du lit de l'écoulement, en particulier sa cohésion apparente (SAVAT, 1979 ; SAVAT et DE PLOEY, 1982) et sa rugosité (RAUWS et GOVERS, 1988).

Ainsi, l'effet érosif du ruissellement est influencé principalement par trois paramètres :

- la rayon hydraulique, qui varie avec le débit de ruissellement et la forme du chenal d'écoulement ;
- la pente ;
- la sensibilité du terrain à l'incision, déterminant le seuil critique U^* .

1.2. Processus et facteurs intervenant dans la genèse du ruissellement

L'excès d'eau qui se forme à la surface du sol dépend :

- des hauteurs et des intensités des pluies ;
- des gradients de potentiel dans le sol et de leur évolution ;
- de la conductivité hydraulique des couches superficielles.

Pour un sol homogène initialement non saturé, la surface du sol présente une certaine infiltrabilité, définie par HILLEL (1974) comme le flux maximum qu'elle peut absorber lorsqu'elle est maintenue en contact avec de l'eau à la pression atmosphérique. Au cours du temps, cette infiltrabilité baisse et tend vers sa conductivité hydraulique en régime saturé K_s , au fur et à mesure que diminuent les gradients de succion.

Cette conductivité hydraulique K_s dépend elle-même essentiellement de deux groupes de facteurs :

- l'état structural du sol, et plus précisément le volume de macropores efficaces pour assurer un drainage vertical ;
- la texture du sol, qui joue essentiellement sur la valeur minimale de K_s atteinte lorsque le sol est continu, c'est-à-dire lorsque la porosité structurale est nulle. Dans ce cas, K_s est d'autant plus élevé que la porosité texturale est forte, c'est-à-dire que la teneur en argile est faible (FIES et STENGEL, 1981)

Dans le contexte d'un sol cultivé, les variations de l'infiltrabilité seront donc contrôlées de façon prépondérante par celles de l'état structural des couches situées à proximité immédiate de la surface du sol, qui sont aussi celles le plus fréquemment et intensément soumises aux perturbations d'origine anthropique ou climatique. Ainsi, à partir d'un état initial conféré à la surface du sol par la dernière opération culturale, l'action des gouttes de pluie sur le sol peut permettre la formation d'une croûte de battance dont la conductivité hydraulique est beaucoup plus faible que celle des horizons sous-jacentes. Cependant, l'état initial de la surface du sol varie selon l'opération culturale réalisée. Ainsi, la porosité structurale du sol peut être très élevée suite à un travail du sol, ou au contraire très limitée par le compactage du sol dû au passage des engins agricoles.

L'eau non infiltrée ne peut ruisseler qu'à condition que la capacité de rétention superficielle soit dépassée (BOIFFIN et al., 1988). La rétention superficielle se fait sous forme de flaques dans des micro-dépressions, dont la capacité de stockage est classiquement liée à la rugosité. On vérifie que pour une pluie donnée, la quantité d'eau ruisselée diminue effectivement de manière sensible avec l'augmentation de la rugosité du sol (ONSTAD, 1984 ; ROTH et HELMING, 1992)

Au total, les principaux facteurs intervenant dans la genèse du ruissellement sont :

- la pluie ;
- le degré de développement (épaisseur et extension) des croûtes de battance ;
- la présence dès la surface du sol d'horizons continus issus du compactage par les engins agricoles ;
- la rugosité de surface du sol.

1.2.1. Evolution des états de surface du sol

Les caractéristiques physiques et hydrauliques de la surface du sol changent sous l'action des gouttes de pluies. A partir d'un état initial fragmentaire, poreux et meuble, créé par la dernière opération de travail du sol, conférant à la surface du sol une capacité d'infiltration de l'ordre de 30 à 60 mm/h et une capacité de rétention superficielle en eau dépendant de la rugosité de surface créée par le travail du sol, deux phases de dégradation de l'état de surface, appelées croûtes de battance, se succèdent (BOIFFIN, 1984, BRESSON et BOIFFIN, 1990) :

- une première phase (notée F1) correspond à la fermeture de la surface du sol par une croûte structurale de quelques millimètres d'épaisseur. Le colmatage progressif des interstices par des particules fines détachées des mottes et le compactage de l'ensemble sous l'impact des gouttes de pluie font que la capacité d'infiltration initiale baisse jusqu'à des valeurs comprises entre de 6 à 2 mm/h (BOIFFIN et MONNIER, 1986) ;
- une seconde phase (noté F2) apparaît dès qu'un excès d'eau se forme à la surface du sol. Les particules détachées des mottes se déposent en phase liquide, d'où séparation et tri des constituants granulométriques élémentaires, et la formation de micro-strates quasi-imperméables. La capacité d'infiltration peut ainsi passer à moins de 1 mm/h (cas d'un sol limoneux).

Ces deux phases s'accompagnent également d'une baisse de la rugosité de la surface du sol.

Des facteurs naturels peuvent à nouveau augmenter l'infiltrabilité des croûtes de battance, soit par la fissuration des croûtes sédimentaires lors du gel ou de la dessiccation (GOVERS, 1991a), soit grâce aux trous formés par les vers de terre (ROTH et JOSCHKO, 1991).

1.2.2. Processus et facteurs contrôlant l'évolution des états de surface

La vitesse d'extension des croûtes structurales et les sédiments disponibles pour la formation des croûtes sédimentaires dépend de la quantité de particules fines mobilisées à la surface du sol sous l'action des gouttes de pluies. Deux principaux processus de désagrégation sont à l'origine des particules fines libérées (LE BISSONNAIS, 1988) :

- la désagrégation par éclatement : elle se produit au cours d'une phase d'humectation importante et rapide d'un agrégat initialement sec. L'éclatement de l'agrégat résulte de la baisse de la cohésion lors de l'imbibition et surtout de la compression de l'air piégé dans l'agrégat ;
- la désagrégation sans éclatement : des particules fines à la surface de l'agrégat sont détachées sous l'impact des gouttes de pluie.

Le processus d'éclatement est contrôlé par l'état hydrique de l'agrégat. En effet, l'intensité de ce processus croît avec le volume d'air piégé (BOIFFIN, 1984 ; LE BISSONNAIS, 1988). L'intensité de désagrégation sans éclatement est quant à elle croissante avec l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

La matière organique contribue à augmenter la stabilité structurale de l'agrégat non saturé. Elle intervient de façon décelable au-delà d'une teneur seuil correspondant à peu près au rapport : (Matière Organique (%) / Argile (%)) = 0.07, soit, par exemple, 1.4% pour un sol à 20% d'argile, ou 2.1% pour 30% d'argile (MONNIER, STENGEL, 1982). DE PLOEY et POESEN (1985) fixent ce seuil à 2%, d'après leurs mesures et celles de KEMPER et KOCH (1966). Cependant, l'effet de la matière organique sur la stabilité structurale de l'agrégat varie selon son histoire hydrique. Ainsi, une longue période de dessiccation du sol entraîne une augmentation de la stabilité structurale, par la réduction de la mouillabilité de la fraction liée de la matière organique au cours de la dessiccation de l'agrégat (MONNIER et KONAN, 1968 ; SEBILLOTTE, 1968 ; BOIFFIN, 1976).

Par contre en condition humide, la teneur en argile est le principal facteur contrôlant la stabilité structurale de l'agrégat. Ceci est dû à l'augmentation de la cohésion de l'agrégat avec son taux d'argile (GUERIF, 1988).

Ainsi, la dégradation de l'état de surface du sol est fonction des caractéristiques des agrégats suivantes :

- leur composition granulométrique ;
- leur teneur en matière organique ;
- leur état et histoire hydriques.

1.3. Processus et facteurs intervenant dans la concentration du ruissellement

De par la force de gravité exercée sur l'eau, le ruissellement diffus tend à prendre la direction de la plus grande pente, pour in fine se concentrer sur les collecteurs principaux marqués dans la topographie (MOORE et al., 1988 ; THORNE et ZEVENBERGEN, 1990 ; FLACKE et al., 1990). En fait, en terres cultivées, une première concentration se fait au niveau de collecteurs secondaires, formés principalement par les traces de roue imprimées à la surface du sol par le passage des engins agricoles (VOORHEES et al., 1979 ; FULLEN, 1985 ; BOIFFIN et PAPY, 1988 ; BOIFFIN et al., 1988).

Ces motifs en dépression influent, selon leur disposition et leur forme, sur les délais de concentration des écoulements vers les collecteurs principaux, et sur le rayon hydraulique de ces écoulements.

Ainsi, plusieurs facteurs contribuent à la concentration du ruissellement sur des collecteurs :

- la pente ;
- les directions de la plus grande pente et du travail du sol ;
- les réseaux de motifs linéaires d'origine topographique ou agraire, susceptibles de collecter et de concentrer le ruissellement.

1.4. Processus et facteurs intervenant dans la sensibilité du terrain à l'incision

La sensibilité de sol à l'incision est principalement liée à sa cohésion apparente (RAUWS et GOVERS, 1988). Celle-ci dépend des caractéristiques texturales, de la compacité et de l'état hydrique. Elle croît avec la teneur en argile, du fait du rôle de ciment joué par les particules argileuses (GUERIF, 1990). Par contre, pour des sols meubles, à faible teneur en argile, RAUWS (1987) conclut que la texture n'affecte pas de manière très significative le seuil critique d'incision du sol.

La compacité du sol a un effet net d'augmentation de la résistance à l'incision (RAUWS et AUZET, 1989), et apparaît comme son principal facteur de variation (LYLE et SMERDON, 1965).

Une forte teneur en eau peut au contraire être considérée comme un facteur de sensibilisation, évoqué par plusieurs auteurs comme un facteur explicatif de la localisation d'incision dans des zones de concentration ayant tendance à être saturées (MOORE et al., 1988 ; THORNE et ZEVENBERGEN, 1990). En effet, la résistance des agrégats à la traction décroît rapidement avec l'augmentation de sa teneur en eau (GUERIF, 1988).

La cohésion interagrégats peut être renforcée par une armature racinaire formant un lien mécanique entre les agrégats. Le développement racinaire dépend de la densité du peuplement végétal, de sa nature et de son stade de développement.

Ainsi, la sensibilité du sol est contrôlée par :

- sa composition granulométrique ;
- son degré de compactage ;
- son état hydrique ;
- la présence d'une armature racinaire.

1.5. Etude intégrée du rôle des différents facteurs sur l'érosion par ruissellement concentré

L'ensemble des facteurs évoqués précédemment varient dans l'espace, lui conférant de ce fait une certaine structure fonctionnelle du point de vue de l'érosion par ruissellement concentré. En outre, les facteurs influencés par l'activité agraire et par la chronologie des pluies ont un caractère dynamique marqué.

Les facteurs liés à la topographie et à la couverture pédologique fixent un cadre physique permanent. Les premiers contribuent à déterminer la direction, la vitesse et la concentration du ruissellement, tandis que les seconds contribuent à la variabilité des états de surface et de la sensibilité à l'incision du sol.

L'activité agricole et la chronologie des pluies contribuent à la dynamique des facteurs suivants :

- l'état de surface du sol ;
- la rugosité ;
- la compacité du sol ;
- l'état et l'histoire hydrique du sol ;
- la localisation et la densité de motifs imprimés à la surface du sol par le passage des engins agricole.

L'évolution de l'état de surface du sol est, toutes conditions égales par ailleurs, déterminée par la date des opérations de fragmentation (travail du sol, semis), qui positionne le démarrage de la dégradation superficielle dans la chronologie des pluies (PAPY et BOIFFIN, 1988).

La valeur de la rugosité initiale, qui détermine la capacité de rétention superficielle, est directement déterminée par la nature des travaux agraires effectués. Ainsi, la rétention superficielle peut être nulle pour un chantier de récolte très aplani et supérieur à 6 mm pour un labour récent (ONSTAD, 1984).

Le tassement par les roues des engins agricoles diminue brutalement l'infiltrabilité du sol, mais en augmente la cohésion (MONNIER et al., 1986). La surface couverte par des empreintes de roues varie fortement selon les opérations culturales réalisées (de 0 à 80%) (BOIFFIN et PAPY, 1988). Ceci contribue à la fois à modifier les modalités et les temps de concentration du ruissellement et à limiter la sensibilité à l'incision du sol.

Cette forte variabilité spatiale et dans le temps de l'action des facteurs d'ordre agraire a un rôle déterminant sur la localisation et la date de formation des rigoles issues de l'érosion par ruissellement concentré. Les travaux menés dans le Pays de Caux (BOIFFIN et al., 1988), ont mis en évidence une forte corrélation entre l'évolution des états de surface et la date de mise en place des rigoles. Ces dernières apparaissent lors d'un épisode pluvieux pas nécessairement de forte intensité, à condition qu'une surface localisée en amont présente un état de surface permettant le ruissellement. Cette surface peut être très éloignée de la rigole ainsi formée, le ruissellement ayant été acheminé par un réseau de collecte et de concentration du ruissellement, auquel les traces de roue contribuent fortement.

Ainsi, la variabilité de l'érosion par ruissellement concentré est fortement tributaire des facteurs d'ordre agraire, eux-mêmes variables dans le temps et l'espace, se traduisant par une grande difficulté de prévision de cette forme d'érosion (BOIFFIN et PAPY, 1988).

Chapitre 2

INADEQUATION DES METHODES D'ANALYSE ET DE PREVISION DE L'EROSION A L'ETUDE DE L'EROSION PAR RUISSELLEMENT CONCENTRE

2.1. Problème de l'échelle spatiale d'appréhension

Le plus souvent, les problèmes d'érosion des terres agricoles ont été étudiés à l'échelle de parcelles de mesure, de dimensions réduites (quelques dizaines de mètres de long sur quelques mètres de large), et surtout de formes en plan régulières. C'est le cas de celles de type Wischmeier, largement utilisées (WISCHMEIER & SMITH, 1978; ROOSE, 1981 ; BOLLINNE et LAURANT, 1983 ; KWAAD, 1991). Des parcelles de dimensions supérieures sont actuellement utilisées pour l'acquisition des données nécessaires au calibrage des modèles déterministes (QUINTON et al., 1992). Ces "plans inclinés" ont le mérite de pouvoir être facilement isolés hydrauliquement et de permettre sans trop de difficultés une mesure des entrées et sorties. Mais en général ils sont trop courts pour rendre compte de la complexité d'un versant et en aucun cas, leur forme ne permet la concentration du ruissellement sur un axe au sein de la parcelle expérimentale et, ainsi, la prise en compte de son effet érosif.

L'étude de l'ensemble d'un versant permet de rendre compte des variations spatiales (GOVERS, 1987), mais peut sous-estimer l'importance de l'érosion par ruissellement concentré, dont les formes majeures sont observées dans les fonds de vallons secs, dits d'ordre zéro parce qu'ils ne sont pas occupés de manière permanente par un chenal raccordé au réseau hydrologique.

C'est pourquoi, dans les régions où l'érosion par ruissellement concentré apparaît comme une forme majeure, le bassin versant s'impose comme échelle spatiale d'appréhension.

2.2. Le cas de l' U S L E

L'équation universelle des pertes en sol ("USLE", WISCHMEIER & SMITH, 1978) est le premier modèle de prévision de l'érosion, développé par l'USDA (United States Department of Agriculture, Colorado, USA) à partir des années 1950. A base empirique, ce modèle a été jusqu'à présent le plus largement utilisé. Cette équation décrit la perte en sol moyenne annuelle sous la forme d'un produit dont les termes représentent les principaux facteurs de l'érosion (érosivité des pluies, topographie, érodibilité du sol, occupation du sol et pratiques culturales). Le nombre important de données ayant servi au calibrage de ce modèle empirique fait qu'il paraît bien validé pour les domaines auxquels il s'applique: l'érosion diffuse et en rigole – interrigoles sur des versants à profil simple (FOSTER, 1990), pour des régions subissant des pluies d'intensité élevée, tel le Middle West des Etats-Unis.

Les principales limites de l'USLE sont bien connues:

- les facteurs sont pris en compte de façon globale et relativement statique, ce qui ne permet guère de tenir compte de la diversité de leur influence sur les différents processus intervenant dans l'érosion par ruissellement concentré. Ainsi, par exemple, le facteur C "système de culture" ne tient pas compte de l'ambivalence du tassement du sol selon le secteur et les processus concernés ;
- le facteur R d'érosivité des pluies fait intervenir l'énergie cinétique des gouttes de pluie, or dans notre cas c'est l'intensité des pluies qui est déterminante, sans qu'il soit nécessaire de tenir compte d'un éventuel seuil, puisque la genèse du ruissellement est fonction de l'état de surface du sol, caractérisé par une infiltrabilité et une détention superficielle, tous deux variables au cours du temps, déterminant un seuil de démarrage du ruissellement ;
- l'effet du ruissellement n'est pas explicitement pris en compte et distingué de celui de l'impact des gouttes de pluie (DE PLOEY, 1986; FOSTER, 1990) ;
- elle ne s'applique pas à l'érosion par ruissellement concentré (WISCHMEIER, 1976), l'hypothèse de base étant que le ruissellement est réparti de façon régulière sur toute la surface concernée.

Plusieurs modifications de l'USLE ont été proposées pour tenir compte des profils de versants (FOSTER et WISCHMEIER, 1974) ou des topographies complexes par l'utilisation de modèles numériques de terrain (FLACKE et al., 1990), sans pour autant en changer le principe, et donc les limitations. Parmi ces modifications, MUSLE77 (FOSTER et al., 1977) a un facteur R d'érosivité des pluies qui tient compte séparément de l'action érosive des gouttes de pluies et de celle du ruissellement. Une autre version modifiée de l'USLE, MUSLE87 (BORK et HENSEL, 1987 ; HENSEL et BORK, 1987 a et b) a été réalisée afin d'adapter le modèle américain aux conditions de l'Europe Centrale. En particulier, le facteur L (longueur de pente) est remplacé par l'aire d'alimentation en eau de ruissellement de chaque surface unitaire obtenue par "rasterisation".

Le risque d'érosion dans le contexte du Nord du Bassin Parisien est fortement dépendant de l'état de surface du sol, ayant une très forte variabilité dans le temps dépendante à la fois des travaux agraires réalisés et de la chronologie des pluies. Que ce soit l'USLE ou les versions modifiées, le pas de temps est annuel, ce qui ne permet pas de prendre en compte la dynamique de l'évolution des états de surface, qui peuvent au cours d'une année, pour un même site, prendre toute la gamme de variation possible.

2.3. Démarches actuelles de modélisation déterministe

A partir des années 1970, des modèles plus déterministes, fondés sur les processus hydrologiques et érosifs, utilisant des relations mathématiques à base physique, ont été développés.

CREAMS (KNISEL, 1980) faisant partie de ces premiers modèles à base déterministe, présente tout de même des composantes empiriques issues de l'USLE et en a, de ce fait, partiellement les limitations (FOSTER, 1990). Ce modèle comporte trois modules principaux : infiltration, ruissellement de surface, érosion. Un des inconvénients majeur de CREAMS est de ne pas tenir compte de la variabilité temporelle de l'évolution de l'infiltrabilité de la surface du sol (BORK, 1988), ce qui du point de vue de la genèse du ruissellement est primordial en conditions hivernales pour les terres agricoles du Nord du Bassin Parisien. De plus, cette région se caractérise en hiver par une érosion par ruissellement concentré importante, d'où la nécessité d'avoir un modèle spatialisé. Or, CREAMS est modèle unidimensionnel, c'est-à-dire pour une parcelle, un sol.

L'absence de prise en compte de la concentration du ruissellement sur un axe d'écoulement des eaux rend également les modèles EPIC (WILLIAMS, 1985a, b) et OPUS (FOSTER et SMITH, 1985) inadéquats à l'estimation de l'érosion par ruissellement concentré.

USLE, CREAMS, EPIC et OPUS ne sont valables que pour la simulation des pertes en terre, pour une occupation du sol et pour un profil de sol représentatif d'une parcelle. Cette limitation a été à l'origine d'un effort de développement de modèles d'érosion spatialisés.

Le modèle ANSWERS (BEASLEY et al., 1980) correspond à une version spatialisée de l'USLE, seuls les modules hydrologiques ont une base physique : détention superficielle, infiltrabilité, drainage. La discrétisation spatiale est réalisée selon une trame régulière permettant de prendre en compte l'écoulement et la concentration du ruissellement. Cependant, ce découpage ne tient pas compte des principaux facteurs responsables de la variabilité de l'émission du ruissellement en condition de pluies d'intensité modérée, c'est-à-dire de la date et de la nature des travaux agraires réalisés, de la sensibilité de la surface du sol à la battance et de la chronologie des pluies. En particulier, le développement des croûtes de battance est très mal pris en compte par ANSWERS (DE ROO et al., 1989).

Le groupe de recherche en hydro-écosystème de l'USDA (United States Department of Agriculture, Colorado, USA) développa sur la base d'OPUS le modèle spatial SWAM (ALONSO, 1985a, b ; ALONSO et DECOURSEY, 1985). Cependant, SWAM et OPUS sont des modèles de recherche et non des outils de prédiction des pertes en terre, avec un temps de calcul très élevé et nécessitant une coûteuse paramétrisation (BORK, 1988). La multitude et la précision des paramètres nécessaires pour faire tourner ces modèles les rendent difficilement accessibles et sans doute peu utilisables de manière généralisée. Malgré les développements considérables des modèles numériques de terrain et plus généralement des systèmes d'informations géographiques, les données expérimentales nécessaires ne seront pas disponibles, probablement avant longtemps, pour pouvoir valider et généraliser de tels modèles.

Cependant, pour répondre à la demande pressante d'avoir un outil de prévision des risques d'érosion, l'USDA a conçu le modèle WEPP (FOSTER et LANE, 1987) utilisable avec un micro-ordinateur. Il comporte deux versions, l'une à l'échelle du versant, l'autre à celle du bassin versant (soit selon une grille, soit selon une surface d'alimentation délimitée par une ligne de partage des eaux). Cependant, quelle que soit la version utilisée, l'unité spatiale étudiée par ce modèle est la parcelle d'exploitation. Celle-ci peut être d'une structure complexe, c'est-à-dire intégrant plusieurs collecteurs du ruissellement. Ce modèle ne peut convenir à estimer le risque d'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du Nord du Bassin Parisien. En effet, il ne prend pas en compte deux facteurs essentiels :

- l'évolution de l'état de surface du sol ;
- les connexions hydrologiques entre les zones sources du ruissellement et les zones érodées, pouvant être spatialement disjointes.

Les connaissances concernant la variabilité spatiale de certains processus, liée à la structure des bassins versants (notamment les interactions entre structures hydrologique et agraire) restent encore très limitées. En fait, on ne dispose pas, à l'heure actuelle, de méthodes d'évaluation des risques aval réellement opérationnelles à l'échelle du BVE, lesquelles pourraient être utilisées pour la prévision des risques.

2.4. Conséquences sur le choix de la démarche adoptée

L'échelle spatiale d'appréhension qui s'impose est à l'évidence le bassin versant. L'objectif étant in fine de contribuer à l'élaboration d'une méthode d'évaluation et de classement de la sensibilité de sites à l'érosion ne nécessitant pas a priori une multitude de paramètres difficilement accessibles, la démarche retenue vise à établir en quelque sorte une typologie fondée sur une hiérarchie de facteurs: dès lors, le choix d'étudier un échantillon de bassins aux caractéristiques variables plutôt qu'un bassin unique s'impose.

La sélection d'un échantillon de sites d'étude est réalisée, de manière à avoir des sites présentant une gamme de variabilité aussi étendue que possible des caractéristiques morphologiques, pédologiques et agraires.

Pour certaines de ces caractéristiques, la variabilité spatiale et la dynamique est telle qu'elle nécessite de choisir des méthodes de caractérisation qui privilégieront l'exhaustivité plutôt que la précision locale. Des méthodes simples de caractérisation et de relevé des symptômes d'érosion hydrique seront retenues pour permettre de couvrir la totalité de la surface dans chacun des bassins, lors de plusieurs campagnes d'automne-hiver, à partir des dates de semis d'automne (généralement en octobre) jusqu'aux reprises du sol de printemps (fin février à début mars).

Ainsi, les caractéristiques retenues, exprimées sous forme de variables, si possible quantitatives, pourront être mises en relation avec l'érosion mesurée, ceci à différentes échelles d'espace et de temps. L'analyse pourra être faite dans un premier temps, à l'échelle globale du bassin versant. Mais, l'exhaustivité des levés permettra, dans un second temps, de caractériser les portions du parcours des écoulements concentrés et de réaliser l'analyse en tenant compte de la structure hydrologique et agraire des bassins versants.

Deuxième partie

METHODES, DISPOSITIFS ET PROTOCOLES DE TRAVAIL

METHODES, DISPOSITIFS ET PROTOCOLES DE TRAVAIL

Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter les procédures nous ayant permis d'obtenir les différentes données nécessaires pour l'analyse de la variabilité des volumes de rigoles. Les facteurs, contrôlant les processus liés à l'érosion par ruissellement concentré mis en évidence dans le premier chapitre, ont guidé le choix des variables susceptibles d'expliquer cette forme d'érosion.

Après avoir défini l'unité spatiale d'étude, nous présenterons l'échantillon de sites d'étude, les campagnes d'observation, puis les procédures de caractérisation de ces sites et celles de mesure des rigoles.

Fig. 3.1. : procédure d'identification du BVE, algorithme.

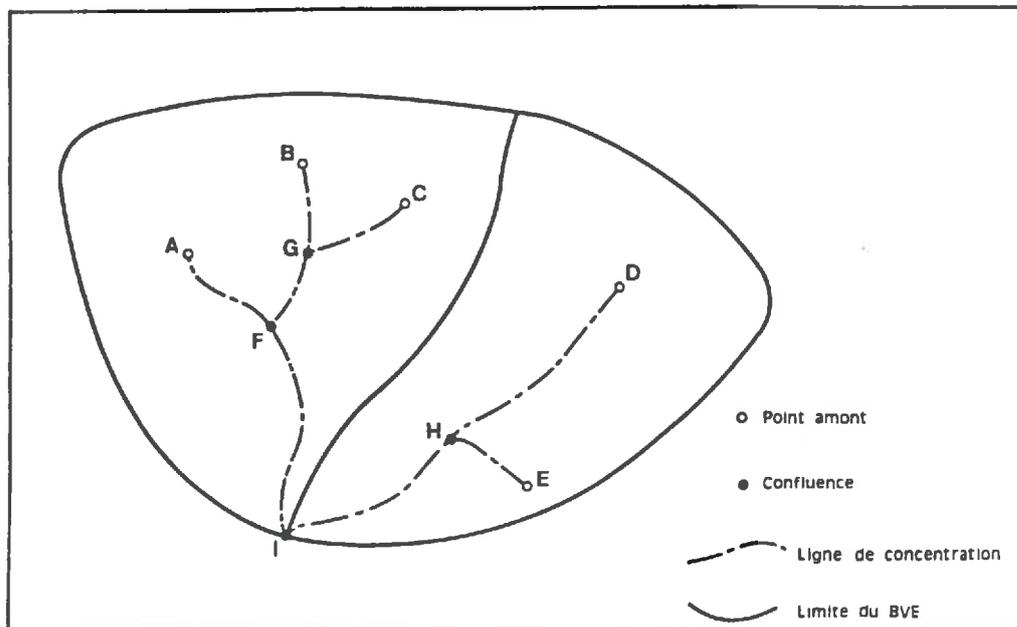
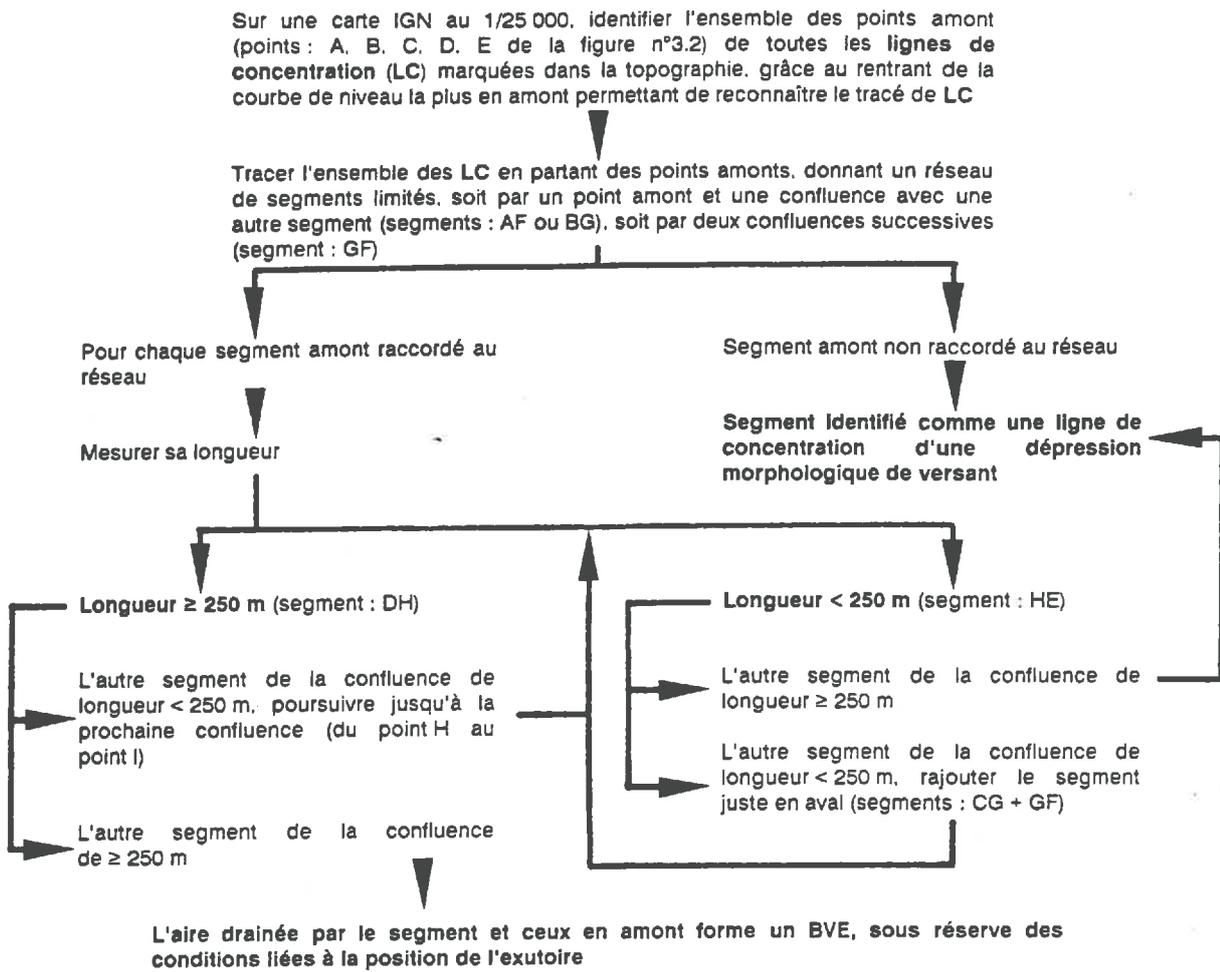


Fig. 3.2. : procédure d'identification du BVE, schéma.

Chapitre 3

DEFINITION ET CARACTERISATION DES UNITES SPATIALES

3.1. Choix et définition des unités spatiales

Le constat fait dans la précédente partie concernant l'appréhension des différentes formes d'érosion liées au ruissellement, en particulier l'érosion par ruissellement concentré, conduit à considérer le bassin versant comme unité spatiale adéquate. Il permet en effet de prendre en compte les processus de formation du ruissellement et ceux responsables de l'incision des rigoles. Il comporte à la fois des zones émettrices d'un ruissellement et des zones érodées, susceptibles d'être spatialement distinctes. Cependant, on cherche à limiter ici l'étude à des situations assez simples et à éviter d'avoir à prendre en compte des phénomènes tels une sédimentation trop importante ou la prise en charge des matériaux mobilisés par les cours d'eau.

L'unité spatiale retenue doit comporter :

- un axe unique, non occupé par un cours d'eau permanent, bien marqué dans la topographie, permettant la concentration du ruissellement et éventuellement l'incision du sol ;
- une limite stable, non remise en cause lors des opérations culturales.

En revanche, les phénomènes des dépôts massifs doivent en être exclus.

Ces exigences nous conduisent à définir conventionnellement une unité spatiale appelée **bassin versant élémentaire (BVE)**. Il s'agit d'une ramification ultime de l'amont du réseau de vallons secs. Dès lors que l'on se situe en amont du réseau hydrologique pérenne, il n'y a pas de discontinuité morphologique évidente entre un fond de vallon, un axe en dépression sur un versant, et à la limite une trace de roue. Or, dans le contexte topographique du Nord du Bassin Parisien, l'aire drainée par un axe en dépression d'un versant ne répond pas à l'exigence de stabilité de sa ligne de partage des eaux. Ceci nous amène à recourir à une convention permettant d'identifier le BVE d'une surface d'alimentation instable.

3.1.1. Identification des BVE

Nous avons fixé la convention pour identifier le BVE essentiellement au regard de la stabilité de la limite du BVE : plus une ligne de concentration morphologique est marquée dans la topographie, plus la limite de son impluvium est bien définie. La morphologie des collines et plateaux du Nord du Bassin Parisien est somme toute relativement homogène, et nous permet de fixer par convention une longueur minimale de la ligne de concentration morphologique intégrant l'encaissement du vallon pour définir le BVE.

Dans le contexte géographique étudié, une réflexion menée à la fois sur le terrain et à l'aide des cartes topographiques (IGN, 1/25 000), nous a conduit à fixer cette longueur minimum à 250 m. La mesure de la longueur des lignes de concentration morphologiques est réalisée sur les cartes topographiques, où elles sont identifiées par les "rentrants" successifs des courbes de niveau. L'algorithme, présenté par la figure n°3.1 et illustré par la figure n°3.2, donne les étapes de la procédure d'identification du BVE.

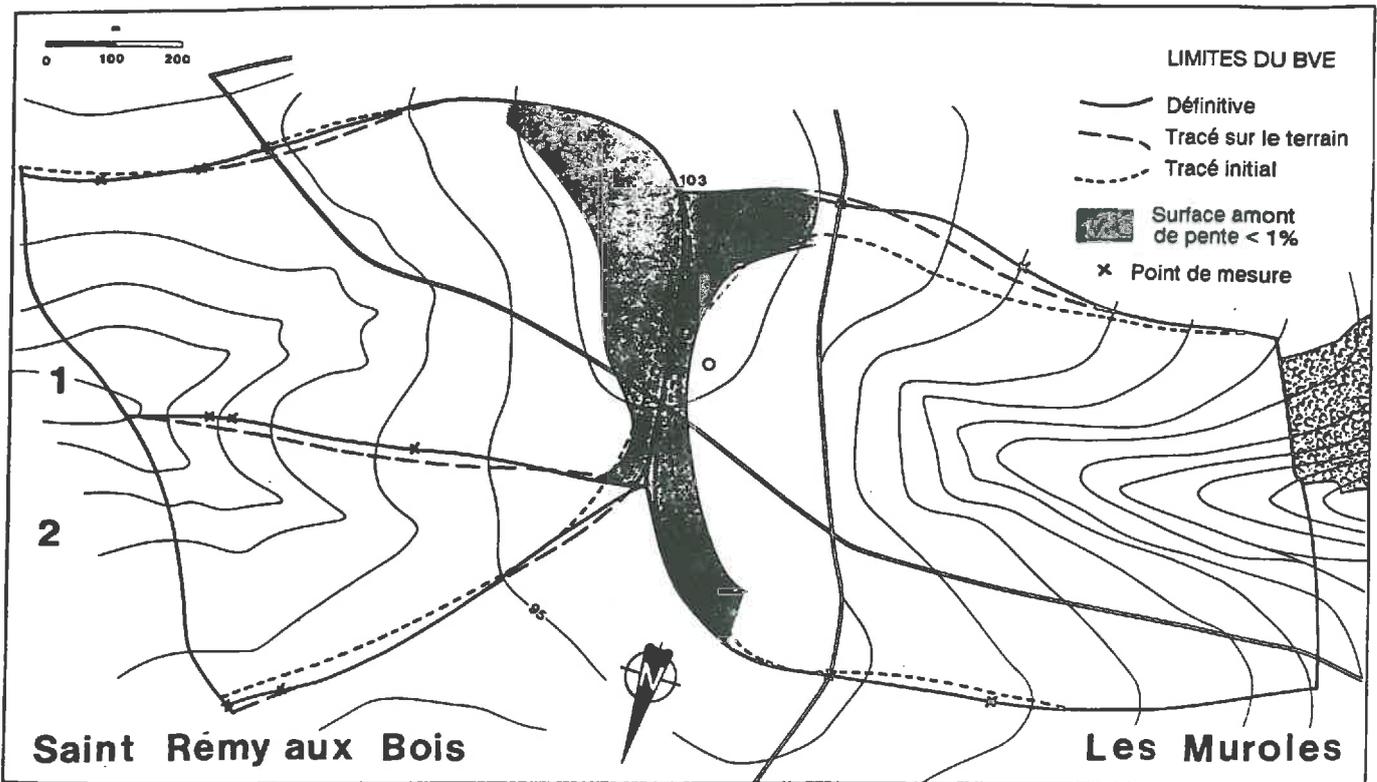


Fig 3.3. : tracé de la ligne de partage des eaux du BVE

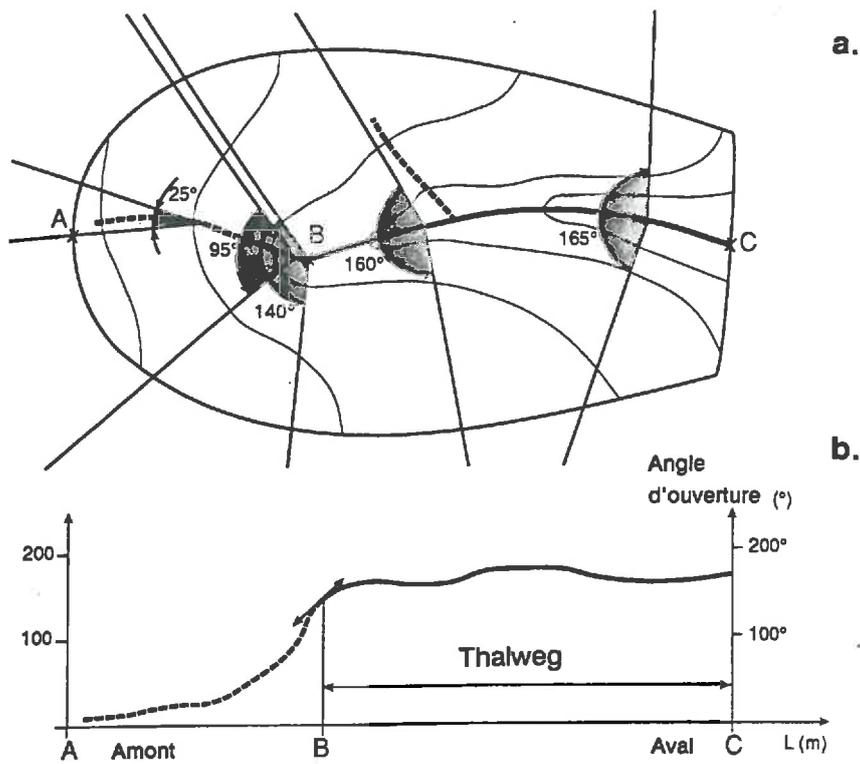


Fig. 3.4. : angle d'ouverture du fond de vallon
 a. : mode d'obtention
 b. : courbe des angles d'ouverture

Une seconde convention porte sur la position de l'exutoire. Elle a pour objectif d'exclure les zones subissant des changements radicaux des modalités de ruissellement et/ou de transport de matières solides.

L'exutoire est ainsi choisi à l'amont :

- d'un cours d'eau permanent ;
- d'une zone d'habitation, d'une prairie ou d'une forêt importante ;
- d'une zone de dépôt permanent (zone quasi plane).

Si aucune de ces trois situations n'est rencontrée, l'exutoire du BVE est fixé à la confluence avec un autre bassin versant, afin de garder au BVE son caractère élémentaire (axe de concentration morphologique majeur unique).

3.1.2. Procédure de délimitation des BVE

Un premier tracé est réalisé, sur des fonds topographiques au 1/5 000 (agrandissements des cartes IGN au 1/25 000), d'après l'allure des courbes de niveau. Ce tracé traduit imparfaitement la limite réelle du BVE, surtout dans les secteurs de plateau, caractérisés par de très faibles pentes (souvent inférieures à 2%).

La vérification et la correction éventuelle de ce premier tracé sont donc indispensables. La localisation de la ligne de partage des eaux est contrôlée visuellement sur le terrain par rapport à des repères fixes (chemins, haies, limites de parcelles, etc.). Cependant, sa position exacte est d'autant plus difficile à définir que le secteur correspond à une portion de plateau. En faisant l'hypothèse que l'extension des surfaces amont à pentes inférieures à 1% permet de se faire une idée du risque d'erreur ainsi encouru (figure n°3.3), celle-ci peut entraîner une erreur de 5 à 40% sur l'évaluation de la surface totale des BVE étudiés.

Ceci nous a conduit à rechercher la position de la ligne de partage des eaux de manière plus précise, c'est-à-dire à l'aide de mesures de pente réalisées le long de parcours recoupant la position définie visuellement. Le nombre de points de contrôle de la position de la limite du BVE nécessaires varie de 5 à 15, selon la taille et la morphologie du BVE.

Les procédures d'identification et de délimitation conduisent à des BVE d'une taille comprise entre quelques hectares et une centaine d'hectares.

3.1.3. Identification du thalweg

Lors de l'analyse de la variabilité de l'érosion en rigoles qui suit (3^{ème} partie), il conviendra de distinguer les rigoles localisées sur l'axe de concentration majeur du BVE, appelé thalweg, des autres lignes de concentration du ruissellement.

En l'absence de chenal pérenne, il est difficile de localiser l'extrémité amont du thalweg. Le recours à une convention, permettant d'identifier de manière systématique le thalweg, et plus particulièrement son point d'origine, est donc indispensable.

L'extrémité amont du thalweg est déterminée d'après l'angle formé par deux demi-droites suivant la direction de la plus grande pente des versants se recoupant sur l'axe du fond de vallon (appelé angle d'ouverture, B. LUDWIG, 1989). En progressant d'aval vers l'amont (de C vers A, figure n°3.4a), les angles d'ouverture restent d'abord très ouverts (entre 120° et 200°), puis, le paysage se referme progressivement, formant un vaste hémicycle; simultanément, les angles d'ouverture décroissent rapidement.

La courbe type d'évolution des angles d'ouverture ainsi obtenue (figure n°3.4b), se compose de deux parties : une première (entre A et B) à accroissement exponentiel d'amont vers l'aval des valeurs d'angle d'ouverture ; une seconde (entre B et C) à faible variation des valeurs d'angle d'ouverture. Le point de raccord entre ces deux segments de courbe (point B), correspondant au plus petit rayon de courbure, marque l'extrémité amont du thalweg. En effet, en amont du point ainsi identifié, le ruissellement a tendance à converger vers celui-ci, tandis, qu'en aval, l'alimentation du thalweg se fait de manière progressive.

L'extrémité amont du thalweg obtenue par cette convention est proche, à une dizaine de mètres près pour la plupart des BVE, de celle localisée empiriquement sur le terrain.

Ainsi, nous définissons le thalweg comme étant la portion de la ligne de concentration majeure située en aval du point d'origine, obtenue selon la procédure décrite, et jusqu'à l'exutoire du BVE. La longueur du thalweg peut ainsi être inférieure aux 250 mètres nécessaires pour identifier un BVE (figure n°3.5), ces deux procédures étant indépendantes.

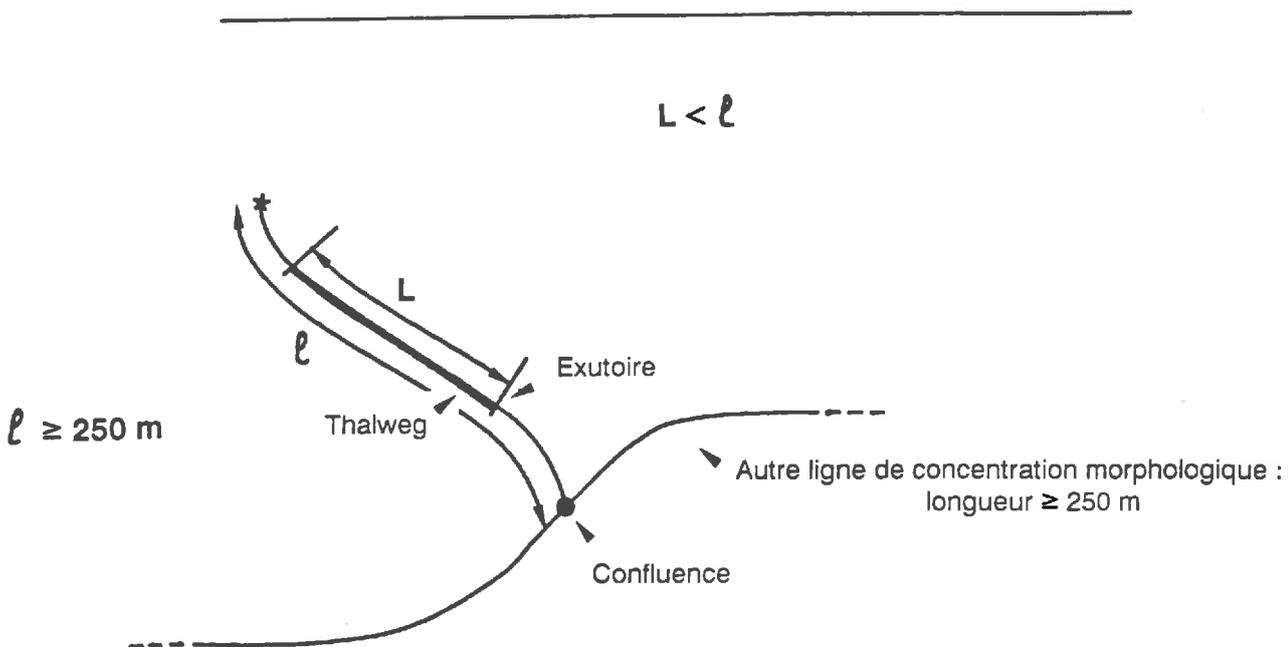


Fig. 3.5. : position du thalweg sur la ligne de concentration morphologique majeure ayant permis d'identifier le BVE

3.2. Caractéristiques morphologiques

Quatre groupes de caractéristiques morphologiques doivent être considérées :

- la surface totale du BVE ;
- la forme, qui influence les temps de concentration ;
- la pente, qui accroît la vitesse des écoulements ;
- la densité des collecteurs du ruissellement, qui influe sur les temps de concentration, et donc sur le rayon hydraulique et la vitesse des écoulements.

3.2.1. Surface totale du BVE

La procédure de délimitation du BVE adoptée (Cf. § 3.1.2.) nous permet de tracer la limite du BVE sur un fond de carte, et d'en mesurer la surface (ST, en ha). Cette dernière correspond à l'aire d'alimentation maximale du thalweg.

3.2.2. Forme

Les variables exprimant la forme du BVE sont :

- un indice de compacité ;
- la proportion de surface en amont du thalweg.

Les analyses hydrologiques classiques, s'appliquant au réseau hydrographique pérenne, utilisent généralement des indices de compacité, considérant que plus la forme du bassin est allongée, plus le temps de concentration du ruissellement est long.

L'indice de compacité retenu est l'indice K de Gravélius (ROCHE, 1963), égal au rapport entre le périmètre du BVE et celui d'un cercle de même surface. Le temps de concentration du ruissellement à l'exutoire est d'autant plus bref que la valeur de l'indice est proche de 1. Cet indice croît avec l'allongement du BVE (maximum de 1.6 pour notre échantillon de BVE).

La proportion de la surface du BVE connectée à l'extrémité amont du thalweg (**Pat**, en %) exprime en quelque sorte également la compacité d'un BVE. Plus celle-ci est importante, plus le thalweg a des chances d'être incisé sur toute sa longueur. Cette surface est directement mesurée sur carte.

3.2.3. Pentés

Les variables retenues sont :

- la pente maximale du BVE (**Pmx**, en %) ;
- la pente globale du BVE (**Pg**, en %) ;
- la pente moyenne du thalweg (**Ptw**, en %) ;
- les surfaces ou les proportions de surfaces par classe de pente (**Spx**, en ha, ou **Ppx**, en %) ;
- les surfaces ou les proportions de surfaces en position amont à faibles pentes (**Sapf**, en ha, ou **Papf**, en %).

La pente maximale du BVE est mesurée sur la carte topographique au 1/25 000 de l'IGN. Il s'agit de la valeur maximale mesurée entre deux courbes de niveau. Les mesures effectuées sur le terrain n'ont pu être utilisées, car elles n'ont pas été réalisées avec l'objectif d'obtenir la pente maximale du BVE.

La pente globale du BVE correspond à la pente entre le point culminant du bassin et son exutoire. Cette pente est calculée en rapportant le dénivelé à la distance entre ces deux points.

La pente moyenne du thalweg est obtenue d'après les mesures de pente effectuées le long du thalweg. Il s'agit de la moyenne des valeurs de pente mesurées le long du thalweg, pondérées par la longueur de la portion du thalweg qu'elles caractérisent.

En ce qui concerne les classes de pente, leurs limites ont été choisies de manière à rendre compte au mieux de la morphologie des BVE. Ainsi, les limites de classes suivantes ont été retenues : 1, 2, 5 et 10%. Ces valeurs n'ont pas de justification fonctionnelle particulière. Elles ont été choisies afin de caractériser au mieux la variabilité topographique des BVE. Notons tout de même que la pente minimale mesurée lors de nos quatre campagnes au niveau des têtes d'incision des rigoles est de 2%, tandis qu'elle est de 4 à 5% pour des sols limoneux selon la littérature (SAVAT et DE PLOEY, 1982 ; GOVERS, 1985).

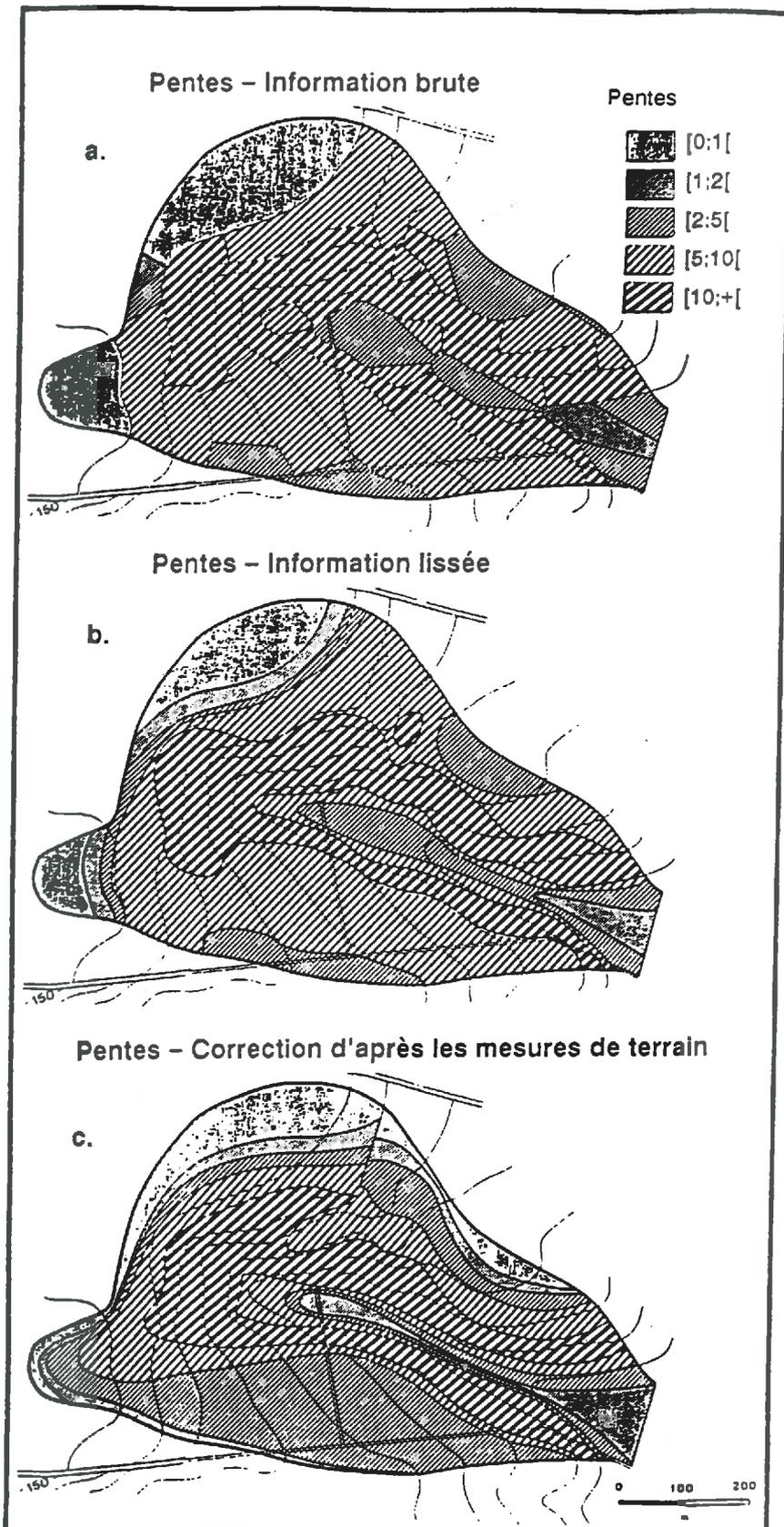


Fig. 3.6. : cartes des pentes

a. : carte brute des fonds de cartes topographiques

b. : carte lissée

c. : carte définitive après correction d'après les mesures de terrain

Les surfaces par classe de pente de chaque BVE sont mesurées sur une carte, dont les limites de classe ont été établies selon une procédure en trois étapes :

- construction d'une carte des pentes d'après la méthode des aires (BRUNET, 1963), sur le fond topographique de la carte IGN au 1/25 000 : figure n°3.6a ;
- extrapolation des classes de pente manquantes et lissage cartographique des limites de classe, en les faisant généralement passer au milieu des traits de construction de la première carte : figure n°3.6b ;
- correction de la carte des pentes lissée à l'aide des valeurs de pente mesurées sur le terrain le long de transects, en tenant compte des ruptures de pente et des talus : figure n°3.6c.

Le recours à des mesures de pente réalisées sur le terrain est justifié par les erreurs que comporte le tracé d'une carte des pentes à partir d'un fond topographique. Ces erreurs peuvent être de trois types :

- manque de précision du tracé des courbes de niveau ;
- rupture de pente coïncidant rarement avec le tracé d'une courbe de niveau ;
- erreur de mesure de la distance entre deux courbes de niveau.

Bien que ces cartes manquent de précision, elles nous informent sur l'allure générale de la variabilité des pentes au sein du BVE. Cette première information est enrichie par les mesures des pentes effectuées sur le terrain. Ces dernières ont été réalisées à l'aide d'un niveau d'Abney et d'une mire, le long de transects choisis en fonction de la variabilité du modelé :

- un transect le long de la ligne de concentration principale du BVE ;
- un à trois transects perpendiculaires à l'axe du vallon, d'une limite à l'autre du BVE ;
- un transect le long des lignes de concentration secondaires les plus importantes.

Le nombre total de transects par BVE varie de 2 à 5.

L'écartement entre le point de visée et la mire, toujours de 10 mètres, permet d'obtenir des valeurs proches des pentes locales réelles. L'erreur relative entre deux mesures a été testée, elle est de l'ordre de 0.5% de pente. L'intervalle entre deux points de mesure successifs est choisi en fonction de la variation de pente le long du parcours. Il est compris entre 5 et 100 mètres, mais est en général de 20 à 30 mètres.

Les ruptures de pente, qu'elles soient concaves ou convexes, et les talus, sont cartographiés après avoir été reconnus visuellement sur le terrain. Leur localisation est effectuée par rapport à des repères fixes (chemins, limites de parcelle, etc...) et d'après les mesures de pente réalisées le long de transects, si ces derniers recoupent ces éléments morphologiques. Ceux-ci se caractérisent par un changement de valeur de la pente, pouvant correspondre au passage d'une classe de pentes à une autre. Ainsi, le tracé d'une rupture de pente ou d'un talus peut être confondu avec celui d'une limite de classe des pentes.

3.2.4. Forme et densité des collecteurs de ruissellement

Le modelé des BVE favorise la concentration du ruissellement sur certains axes. En effet, au sein des BVE, il existe, en plus du thalweg, des axes susceptibles de concentrer le ruissellement. Ces lignes en dépression, marquées dans la topographie, sont appelées lignes de concentration morphologiques. Elles permettent de caractériser une densité de drainage superficiel des eaux, d'origine morphologique.

Les variables retenues sont :

- les longueurs (Llcw ou Llc, en mètres) ou la densité (Dlcw ou Dlc, en m/ha) des lignes de concentration morphologiques, avec ou sans le thalweg (si le thalweg est pris en compte, un "w" termine le code de la variable) ;
- la longueur (Ltw, en mètres) ou la densité (Dtw, en m/ha) du thalweg.

Ces variables sont mesurées sur la carte morphologique comportant les tracés :

- de la ligne de partage des eaux du BVE ;
- des lignes de concentration morphologiques ;
- du thalweg.

Les procédures adoptées pour tracer la ligne de partage des eaux du BVE et pour identifier le thalweg, ont déjà été présentées (Cf. § 3.1.2.). Les autres lignes de concentration morphologiques sont repérées visuellement sur le terrain.

Les lignes de concentration morphologiques repérées visuellement sont localisées et cartographiées d'après :

- des repères fixes, tels les limites de parcelle, les chemins, les talus, les haies ;
- les mesures de pente réalisées le long des transects recoupant ces lignes.

Dans le cas de lignes de concentration morphologiques sinueuses, leur tracé est contrôlé sur photographies aériennes et éventuellement corrigé d'après l'allure du tracé de ravines, de colluvions plus sombres ou plus humides repérables sur ces documents.

3.3. Caractéristiques pédologiques

La couverture pédologique intervient à deux niveaux :

- sur les processus de formation du ruissellement, essentiellement du fait de l'influence exercée par les caractéristiques du sol sur l'évolution des capacités d'infiltration et de rétention de la surface du sol ;
- sur les processus d'arrachement, du fait de la plus ou moins grande cohésion du sol opposant une résistance aux forces exercées par le ruissellement concentré.

Les caractéristiques du sol intervenant dans les processus de formation du ruissellement sont la composition granulométrique, le taux de matière organique ainsi que l'état et l'histoire hydriques du sol. En hiver, l'histoire hydrique est marquée par la quasi permanence de valeurs d'humidité élevées au niveau de la surface du sol. Dans ce cas, on peut raisonnablement admettre que la composition granulométrique du sol est le principal facteur contrôlant la dégradation structurale du sol et, de ce fait, les capacités d'infiltration et de rétention superficielles, et la cohésion du sol. De plus, il est exclu que la matière organique contribue à une forte variabilité à la dégradation structurale étant donné les faibles teneurs en matière organique des échantillons de sol analysés et leur faible variabilité (1.5 à 2%).

Les processus d'arrachement sont, quant à eux, dépendants de la cohésion du sol, elle-même en partie liée à la composition granulométrique, principalement au taux d'argile. Comme la grande majorité des rigoles rencontrées ne dépasse pas le fond du labour, on s'est contenté de caractériser la texture de la couche superficielle du sol.

L'obtention de critères synthétiques nécessite des regroupements de classes de texture selon leur sensibilité à la battance ou leur rôle sur la cohésion du sol.

Textures

Les variables retenues sont les surfaces (en ha) ou les proportions de surface (en % par rapport à la surface totale du BVE), par classe texturale permettant de caractériser la variabilité de la couverture pédologique de chaque BVE. Celles-ci sont mesurées sur une carte des textures de surface établie pour chaque BVE.

Le triangle de texture, qui a servi de référence au découpage en classes texturales, est le triangle des textures de l'Aisne (figure n°3.7), mis au point et utilisé pour l'établissement des cartes pédologiques de l'Aisne, assez bien adapté à la gamme des textures des sols du Nord Bassin Parisien.

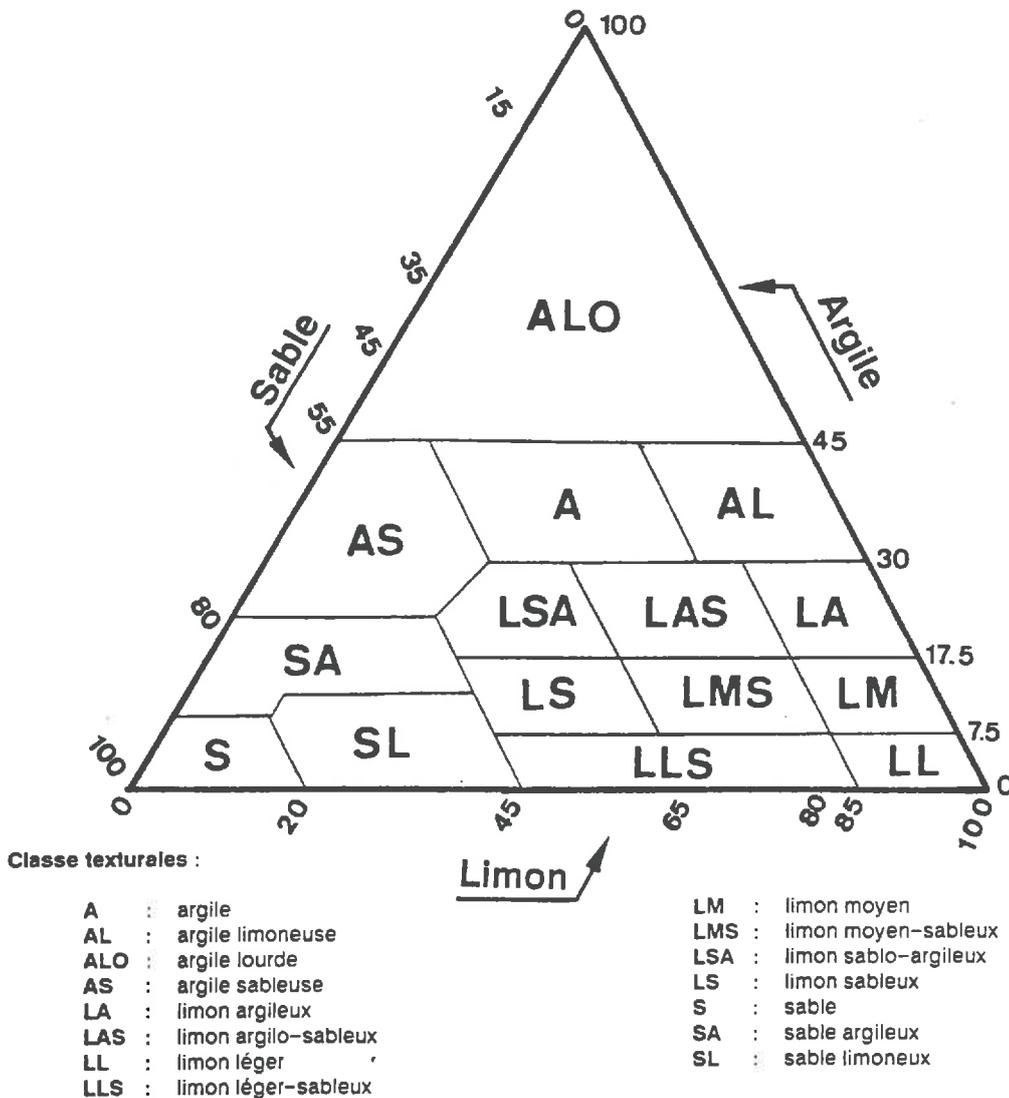


Fig. 3.7. : triangle des textures de l'Aisne

La carte des textures est réalisée pour chaque BVE, d'après les informations suivantes :

- les tests tactiles effectués sur le terrain, corrigés d'après les résultats des analyses granulométriques d'échantillons de sol (de 3 à 7 échantillons par BVE) ;
- les limites des classes texturales tracées sur la carte lors de la prospection de terrain ;
- les photographies aériennes, où des plages plus ou moins sombres peuvent être associées à une texture donnée ;
- des minutes de la carte des sols de l'Aisne (uniquement pour les BVE de Laonnois, du Marlois et du Vermandois, figure n°4.1.).

La densité des tests est d'autant plus importante que :

- le taux de la couverture végétale est élevé, masquant ainsi le sol ;
- la pente augmente, la variabilité texturale augmentant alors généralement sur de courtes distances.

Certaines limites peuvent être directement tracées sur les minutes de terrain, grâce aux variations de couleur du sol ou aux ruptures de pente. Sinon, les conventions suivantes sont adoptées :

- le long d'un transect, la limite d'une classe texturale passe à mi-distance entre deux points de textures différentes ;
- entre deux transects contigus, s'il y a correspondance entre les textures, la limite suit le tracé des courbes de niveau ; s'il n'y a pas de correspondance, les photographies aériennes et, éventuellement, la carte des sols de l'Aisne complètent l'information manquante.

Les cartes, ainsi obtenues, constituent le document de base. Celles du premier échantillon de BVE (Cf. § 4.1.1.) ont été établies par Patricia BEUVE (1989).

Certaines variables, plus synthétiques, sont obtenues en regroupant des classes texturales. Le regroupement qui sera principalement utilisé par la suite vise à déterminer la sensibilité à la battance du sol. Une étude portant sur la formation de croûtes sédimentaires en fonction des pluies reçues (Cf. annexe 2) a permis de définir trois classes de sensibilité à la battance (figure n°3.8) :

- les textures de surface à fort taux d'argile : A ou AL, à risque faible ;
- les textures de surface limoneuses ou/et sableuses : LM, LMS, LS, SL et S, à risque élevé ;
- les textures de surface intermédiaires : LA, LAS, LSA et SA, à risque moyen.

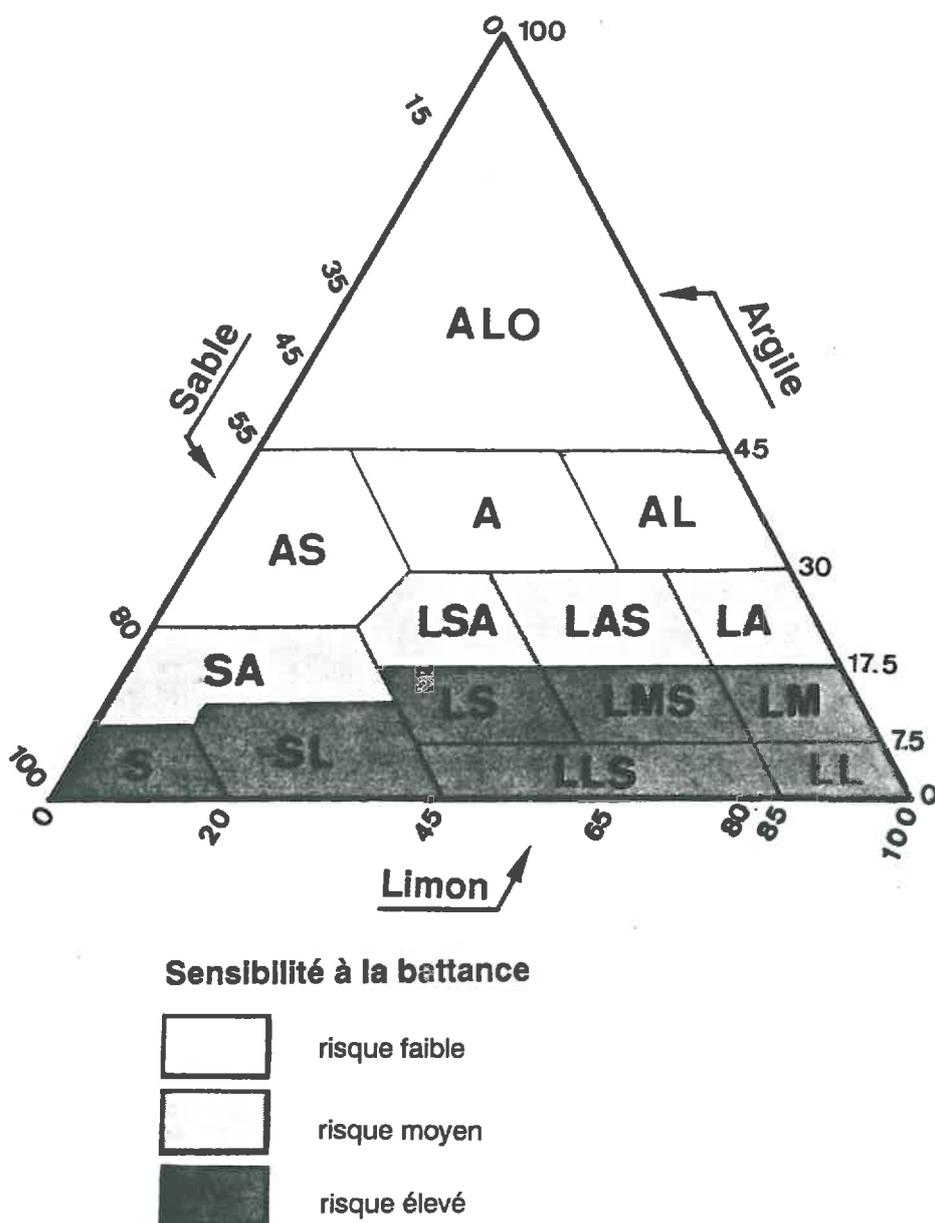


Fig. 3.8. : triangle des textures selon leur sensibilité à la battance

3.4. Caractéristiques agraires

Les modalités et les techniques culturales, réalisées sur une parcelle, déterminent :

- l'état structural de surface qui, lui-même, contrôle les capacités d'infiltration et de détention superficielle ;
- la cohésion de la couche travaillée, elle-même liée à la compacité des couches superficielles ;
- la nature et la densité du couvert végétal, ayant un rôle sur la cohésion du sol par le biais de l'armature racinaire et sur la dégradation de l'état de surface du sol en limitant l'impact des gouttes de pluie sur le sol ;
- la présence et la nature de motifs linéaires, susceptibles d'avoir un rôle dans la collecte et la concentration du ruissellement.

Ces quatre éléments sont essentiellement dépendants du type de culture et des dernières opérations culturales réalisées. Ainsi, le découpage du BVE en parcelles, c'est-à-dire en unités spatiales aux caractéristiques agraires propres, entraîne une forte variabilité spatiale et temporelle des facteurs intervenant dans les processus d'érosion par ruissellement concentré. Selon les périodes de l'année, les types d'occupations du sol et d'opérations culturales déterminent des états de surface du sol, la gamme de variabilité pour chacun étant restreinte. Ces caractéristiques agraires sont donc importantes à prendre en compte.

3.4.1. Types d'occupation du sol

Une carte de l'occupation du sol de chaque BVE est établie pour la période hivernale, permettant d'obtenir l'extension (ou la proportion de surface) de chaque type d'occupation du sol au cours de l'hiver.

Trois sources d'informations sont requises pour réaliser les cartes d'occupation du sol : les observations directes de terrain, les photographies aériennes et les enquêtes auprès des exploitants agricoles.

Le tracé du parcellaire, effectué sur une carte au 1/5 000 (agrandissement d'une carte IGN au 1/25 000), est réalisé en deux étapes :

- le repérage sur les photographies aériennes des limites de parcelle par rapport à des repères fixes, tels les chemins, les haies ;
- la localisation exacte des limites de parcelles réalisée sur le terrain, par la mesure des distances à des repères fixes, complétée par la mesure de la largeur et de la longueur de chaque parcelle.

Dans notre cas, l'utilisation du cadastre s'est avérée peu utile et a été abandonnée, les limites cadastrales apparaissant très différentes de celles des parcelles cultivées.

Pour chaque parcelle, les informations suivantes ont été recueillies sur le terrain lors de chaque passage ou par enquête auprès des agriculteurs :

- l'occupation du sol : culture, nature des travaux, taux de couverture ;
- le précédent cultural ;
- la date des travaux.

Parmi ces types d'occupation du sol, seules les cultures d'hiver et les chantiers de récolte non travaillés sont reconnus comme ayant une forte aptitude à produire un ruissellement en conditions climatiques hivernales. En effet, pour les cultures d'hiver, le faible taux de couverture végétale et l'ameublissement du lit de semence font qu'à la surface du sol le risque de formation d'une croûte sédimentaire sous l'action des pluies est élevé, et, de par leur forte fragmentation, une capacité de détention superficielle limitée. Quant aux chantiers de récolte non travaillés, le tassement du sol par le passage des engins agricoles, lors des récoltes, réduit fortement la capacité d'infiltration et de détention superficielle des sols. Or, les chantiers de récolte ont en général une densité de traces de roue couvrant plus de 50% de la surface totale de la parcelle.

C'est pourquoi nous avons regroupé les différentes occupations du sol en six catégories : forêts, prairies permanentes et temporaires (de plus d'un an), intercultures travaillées (labours, déchaumages, passages d'un canadien...), cultures d'hiver (céréales d'hiver, colza...), chantiers de récolte non travaillés (chaumes en place, chantiers de betterave, de carotte, de lin...), et, éventuellement, une septième catégorie, les cultures de printemps encore en place en début d'automne (betterave, maïs, carotte...) ou déjà implantées en fin d'hiver.

3.4.2. Collecteurs du ruissellement d'origine agraire

Les travaux agraires impriment à la surface du sol un certain nombre de motifs linéaires qui sont susceptibles de concentrer le ruissellement. Il s'agit des traces de roues imprimées à la surface du sol lors du passage des engins agricoles, et des dérayures. Leur forte densité, leur extension sur tout le BVE, jusqu'à la ligne de partage des eaux, contribuent à diminuer les temps de concentration du ruissellement vers les collecteurs principaux et permettent la mise en relation de surfaces assez éloignées avec ces derniers.

Les informations recueillies sur le terrain et reportées sur la carte des occupations du sol, concernent :

- le sens du travail du sol, et donc celui des traces de roues, dont l'espacement est connu ;
- la localisation des dérayures ;
- la localisation des fourrières ;

Ces dernières présentent en effet, la particularité d'être caractérisées par une direction perpendiculaire au sens général du travail sur la parcelle et généralement par l'existence de traces de roues et d'une dérayure susceptibles de concentrer le ruissellement issu de l'ensemble de la parcelle.

Ces caractéristiques permettent de connaître le sens du ruissellement, et donc les surfaces d'alimentation réelles des collecteurs principaux. Elles définissent également le tracé des motifs susceptibles de concentrer le ruissellement et d'être incisés.

3.5. Etat de surface

Les notations réalisées dans ce domaine ont pour but de caractériser et de classer l'aptitude de la surface du sol à émettre un ruissellement.

Les caractéristiques des états de surface relevées sont :

- le facies (BOIFFIN, 1984), qui correspond à une notation morphologique traduisant le stade de développement des croûtes de battance (structurale et sédimentaire), contrôlant la capacité d'infiltrabilité du sol ;
- la proportion de surfaces affectées par des traces de roue, dont le compactage du sol résultant du passage des engins agricoles limite fortement l'infiltrabilité ;
- la rugosité caractérisant la capacité de rétention en eau des microdépressions à la surface du sol.

Ces trois caractéristiques peuvent avoir une variabilité spatiale et temporelle importante par l'effet combiné des pluies, des caractéristiques du sol et des opérations culturales.

Cette variabilité extrême rend délicate, voire impossible, l'extrapolation d'observations faites sur une parcelle à une autre parcelle, et donc par là, la réalisation de mesures sur un échantillon de stations type. Il semble au contraire nécessaire de faire une observation la plus exhaustive possible de l'état de surface. Les trois caractéristiques précitées de l'état de surface semblent particulièrement peu variables dans l'espace au sein d'une unité spatiale élémentaire correspondant à une portion de parcelle (même caractéristiques agraires) dont le sol appartient à une même classe texturale. Nous avons vérifié qu'au sein de telles unités spatiales élémentaires, les états de surface relevés de manière indépendante par plusieurs observateurs étaient toujours homogènes. Par contre dès que l'on change de parcelle ou de date d'observation, la variabilité de l'état de surface peut être considérable. Pour tenir compte de cette structure de variabilité, nous avons opté pour une méthode consistant à faire une observation de l'état de surface dans chaque unité spatiale élémentaire lors de chaque passage sur le terrain.

Une telle procédure implique jusqu'à une centaine d'observations pour un seul BVE. Afin de pouvoir faire un suivi régulier au cours du temps, le recours à des méthodes de caractérisation rapides s'impose.

Pour chaque campagne (1989/1990, 1990/1991 et 1991/1992), quatre à cinq tournées ont été réalisées. En général, nous avons effectué une tournée par mois, mais cet intervalle entre deux tournées a été rallongé si la pluviométrie était faible (inférieure à 60 mm). Ce suivi exhaustif n'a pas été réalisé pour la campagne 1988/1989, où les états de surface ont été uniquement observés en fin d'hiver sur un tiers des unités spatiales élémentaires, par Patricia BEUVE (1989).

Le tableau n°3.1 présente les notations adoptées pour le facies. Le facies F0 correspond à l'état de surface initial d'un sol récemment travaillé, fragmentaire, poreux et meuble. Le facies F1 désigne le premier stade de dégradation de l'état de surface, caractérisé par la présence d'une croûte structurale développée simultanément sur toute la surface du sol. Les facies F1/2, F2-, F2 et F2+ se distinguent d'après l'extension des plages à croûtes sédimentaires, se formant en priorité au fond des microdépressions, pour s'étendre progressivement. Le facies F1/2 se caractérise par des croûtes sédimentaires réparties en plages circonscrites, couvrant moins de 50% de la surface totale de l'unité spatiale élémentaire. Ceci indique qu'il n'y a pas encore eu de ruissellement, mais uniquement formation de flaques les jours de pluie. Les facies F2-, F2 et F2+ représentent des états de surface dont les croûtes sédimentaires sont en contact à l'échelle décimétrique ou hectométrique, indiquant qu'il y a eu un ruissellement à cette même échelle.

Tableau 3.1. : notation du stade de développement des croûtes de battance.

Facies	Proportion de surface du sol couvert par	
	une croûte structurale	une croûte sédimentaire
F0	0%	0%
F1	100%	0%
F1/2	plus de 50%	moins de 50%
F2-	de 25 à 50%	de 50 à 75%
F2	de 10 à 25%	de 75 à 90%
F2+	de 0 à 10%	de 90 à 100%

La rugosité permet d'apprécier la capacité de rétention en eau de la surface du sol et la direction prise par le ruissellement. La rugosité mesurée correspond à la profondeur maximale théorique des flaques, avant que ne démarre un ruissellement selon une direction fixée (dans le sens du travail du sol ou perpendiculairement). On évalue la hauteur entre le fond des microdépressions, tapissées par une croûte sédimentaire, et le point de débordement théorique de chacune d'elles en faisant l'hypothèse que le ruissellement suit une direction donnée. Rares sont les situations où nous avons pu observer la formation d'un ruissellement. Nous avons cependant pu vérifier que le ruissellement peut prendre deux directions : soit il est guidé par l'alignement de microdépressions dans le sens de travail du sol, soit il suit la plus grande pente. Pour tenir compte de ces deux directions possibles, nous avons observé la rugosité dans le sens du travail du sol (rugosité parallèle) et perpendiculairement à celui-ci (rugosité perpendiculaire) (figure n°3.9).

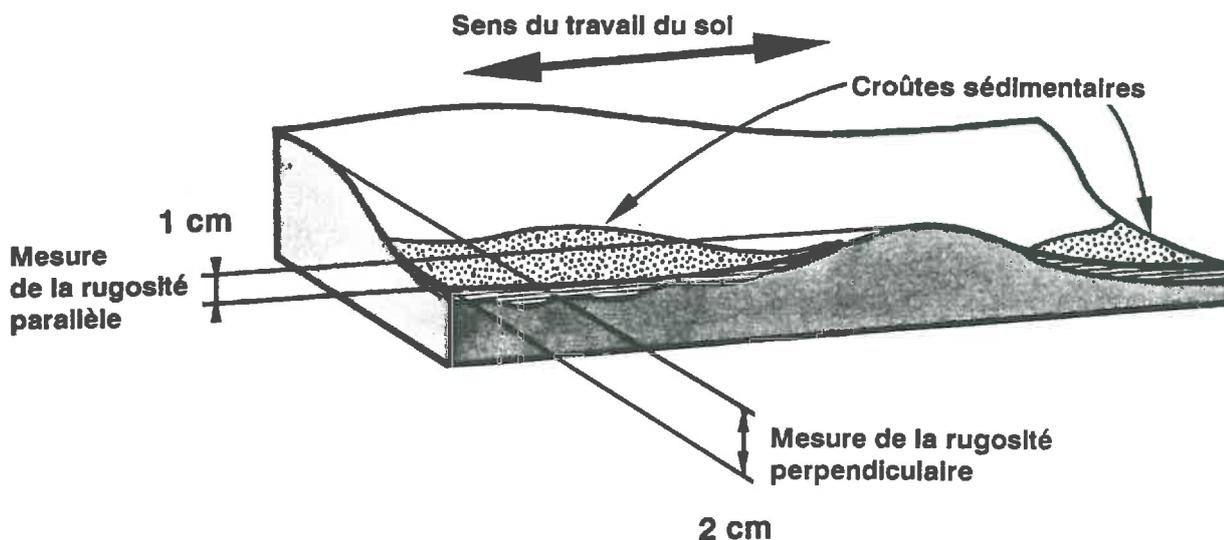


Fig. 3.9. : procédure de mesure de la rugosité

Si la rugosité parallèle est inférieure à la rugosité perpendiculaire, le ruissellement est supposé suivre le sens du travail du sol, sinon, il prend la direction de la plus grande pente. En revanche, dans les deux cas la rugosité parallèle détermine la capacité de rétention superficielle.

La rugosité est également estimée dans le cas d'un sol n'ayant pas encore de croûtes sédimentaires, donc de microdépressions bien circonscrites, tout en sachant que le risque d'erreur est plus important. Cependant, dans ce cas, une erreur sur la rugosité n'a que peu de conséquence sur l'estimation des surfaces susceptibles de contribuer au ruissellement, puisque l'infiltrabilité est encore suffisamment élevée pour que leur risque d'émission d'un ruissellement soit quasi-nul.

Le tableau n°3.2 présente les six classes de rugosité retenues, permettant de décrire toute la gamme de variabilité rencontrée.

Tableau 3.2. : signification des notations de rugosité utilisées.

Rugosité	Dénivelé	Exemple de situations caractéristiques
R0	de 0 à 1 cm	semis très battus chantiers de récolte très tassés
R1	de 1 à 2 cm	semis battus ou roulés lits de semences très affinés
R2	de 2 à 5 cm	semis motteux déchaumages sans résidus battus
R3	de 5 à 10 cm	déchaumages battus avec résidus
R4	de 10 à 20 cm	semis très motteux déchaumages frais labours fins
R5	plus de 20 cm	labours grossiers

Tableau 3.3. : devenir de l'eau arrivant à la surface du sol, au cours d'une pluie à faible intensité.

Rugosité parallèle	Facies					
	F0 ou F1		F1/2		F2	
R0	Infiltration		Infiltration		Infiltration	
R1	Infiltration		Infiltration		Ruissellement	Infiltration
R2	Infiltration		Infiltration	Flaquage	Ruissellement	Infiltration
R3	Infiltration		Infiltration	Flaquage	Flaquage	Infiltration
R4	Infiltration		Infiltration	Flaquage	Flaquage	Infiltration
R5	Infiltration		Infiltration	Flaquage	Flaquage	Infiltration

L'aptitude des surfaces à produire un ruissellement est appréciée en combinant la notation du faciès, la proportion de surface affectée par des traces de roue et la notation de la rugosité. Ainsi, on pourra évaluer la **surface apte à produire du ruissellement** (variable AR, en ha) ou la **proportion de surfaces** (variable PR, en % de la surface totale du BVE), c'est-à-dire dont les capacités d'infiltration et de rétention superficielle sont limitées. Le tableau n°3.3 présente le comportement supposé lors de pluies à faible intensité, très fréquentes en hiver (80 à 90% des pluies ont une intensité inférieure à 10 mm/h) en fonction du faciès et de la rugosité parallèle. Une question se pose quant à l'appréciation du degré de dégradation et de la faiblesse de la rugosité nécessaires pour qu'une surface génère effectivement un ruissellement dans ces conditions. Nous avons défini des critères correspondant à des niveaux de plus en plus propices à l'aptitude au ruissellement : SR2, SR3 et SR4, présentés dans le tableau n°3.4, c'est-à-dire avec une extension des croûtes sédimentaires de plus en plus grande et une rugosité parallèle de plus en plus faible. Dans le cas de parcelles à fort taux de surfaces couvertes par des traces de roue, seule la rugosité parallèle contrôle l'aptitude au ruissellement. Selon les observations des états de surface et leur report sur une carte, on peut donc mesurer les surfaces répondant respectivement à l'un de ces trois critères.

Tableau 3.4. : notations de l'aptitude au ruissellement par la surface du sol.

Critère	Faciès (% de croûte sédimentaire)	Traces de roue (taux de couverture)	Rugosité parallèle
SR2	F2- (60 à 75%) F2 (75 à 90%) F2+ (90 à 100%)		R0 à R1 R0 à R1 R0 à R1
		plus de 50%	R0 à R1
SR3	F2 (75 à 90%) F2+ (90 à 100%)		R0 R0 à R1
		plus de 50%	R0 à R1
SR4	F2+ (90 à 100%)		R0
		plus de 50%	R0

Chapitre 4

PRESENTATION DES ECHANTILLONS DE BVE

L'essentiel de l'analyse de la variabilité de l'érosion en rigoles sera réalisé sur un premier échantillon de BVE. Un second échantillon est destiné à tester la validité de l'approche définie.

4.1. Constitution des échantillons

Les BVE sont choisis de manière à présenter une variabilité aussi grande que possible des caractéristiques morphologiques, pédologiques et agraires. Pour tenter de décorrélérer les facteurs explicatifs de l'érosion en rigoles, on est conduits à chercher un nombre de BVE aussi grand que possible, limité par les possibilités matérielles d'observation. Les observations doivent en effet pouvoir être faites sur l'ensemble des BVE dans un délai raisonnable. Les BVE doivent être, autant que possible, groupés pour permettre un relevé rapide des symptômes d'érosion afin de réduire le risque d'avoir un évènement pluvieux important entre le début et la fin de la tournée. Les deux échantillons ont été constitués en tenant compte de ces contraintes, et sans prétendre à une quelconque représentativité de l'ensemble des combinaisons géomorphologiques présentes dans le Nord du Bassin Parisien. Ayant constaté que certaines caractéristiques du premier échantillon de BVE étaient corrélées, on s'est efforcé de choisir des BVE du second échantillon en tentant de modifier ces corrélations.

4.1.1. Choix et localisation des BVE

Une gamme de variation étendue n'a pu être obtenue sans sélectionner les BVE dans plusieurs petites régions.

Deux échantillons indépendants de BVE ont été constitués (tableau n°4.1) :

- un premier de 20 BVE (choisis avant ma contribution à l'étude), répartis entre sept petites régions, dont les symptômes d'érosion sont relevés lors des périodes d'automne-hiver 1988/1989, 1989/1990 et 1990/1991 ;
- un second de 15 BVE (dont 12 nouveaux), répartis en trois petites régions, aux caractéristiques pédologiques distinctes : limono-sableux (Pays de Caux) ; sablo-limono-argileux (Laonnois) ; limono-argileux (Marlois), dont les symptômes d'érosion ont uniquement été relevés durant l'automne-hiver 1991/1992.

La localisation des BVE (figure n°4.1) s'inscrit dans un triangle dont les côtés ont respectivement 204 km, 180 km et 160 km, avec pour références spatiales Laon à l'Est, Etretat à l'Ouest et St Omer au Nord.

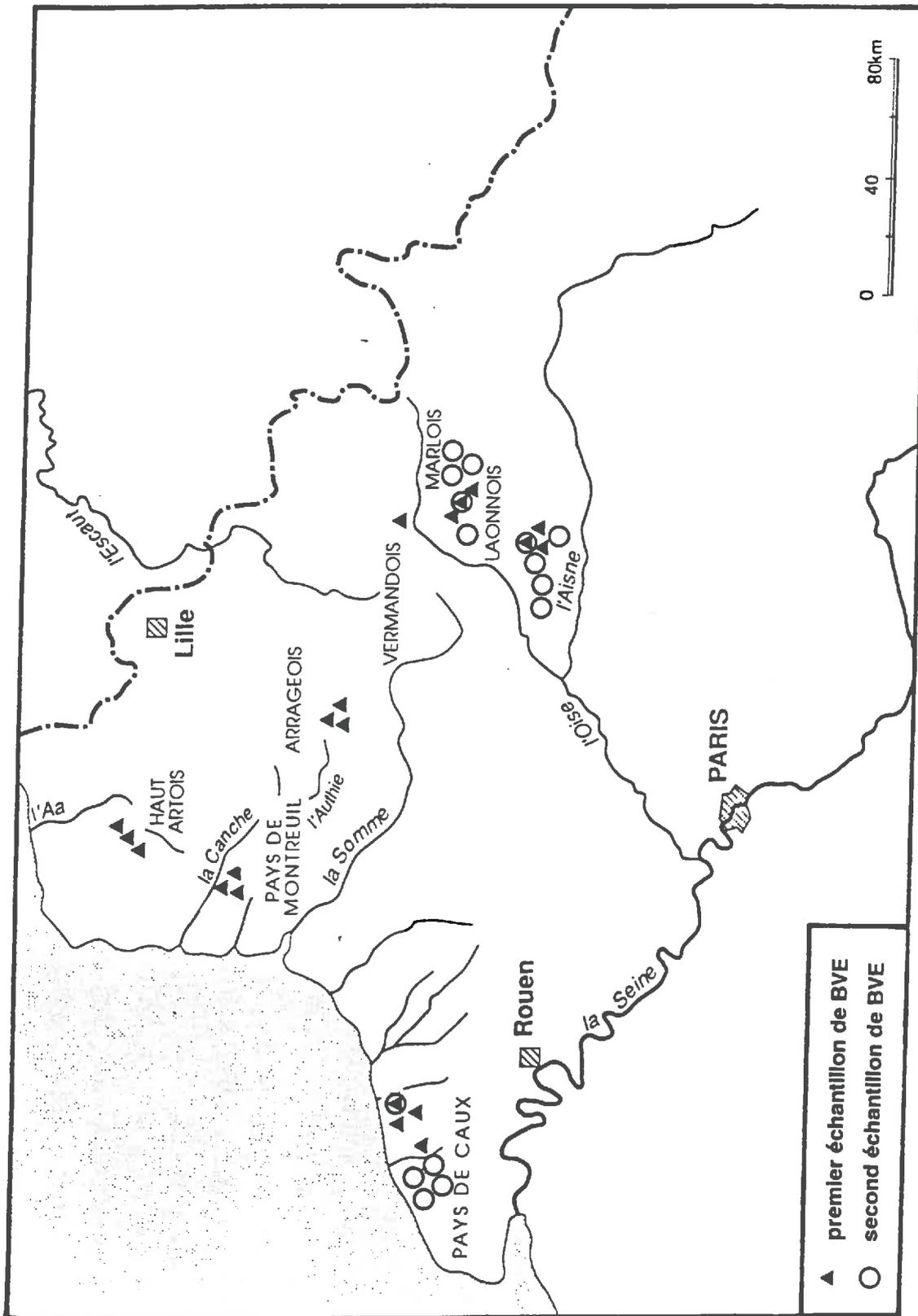


Fig 4.1. : carte de localisation des BVE

Tableau 4.1. : liste des BVE

Premier échantillon de BVE		
Région	BVE	Code *
Arrageois	Achiet-le-Grand 1	AA1
	Achiet-le-Grand 2	AA2
	Achiet-le-Grand 3	AA3
Pays de Caux	Bourg Dun	CBD
	Blosseville	CBL
	St Aubin	CSA
	St Pierre-le-Vieux	CSP
Haut Artois	Bouillards	HBO
	Fond Massette	HFM
	Mounivarts	HMO
Laonnois	Ardenne	LAR
	Epinettes	LEP
	Hutte à Beaunnot	LHB
Marlois	Arbre Robert 1	MA1
	Arbre Robert 2	MA2
	Battis	MBA
Pays de Montreuil	Muroles	PMU
	St Rémy-au-Bois 1	PS1
	St Rémy-au-Bois 2	PS2
Vermandois	Boukincamp	VBO
Second échantillon de BVE		
Région	BVE	Code *
Pays de Caux	Bourg Dun	CBD
	Epine Froidure	CEF
	Grand Piscat	CGP
	Moulin	CMO
	Petit Piscat	CPP
Laonnois	Forterelle	LFO
	Hutte à Beaunnot	LHB
	Messart	LME
	Tombelle	LTM
	Usages	LUS
Marlois	Arbre Robert 1	MA1
	Bois de la Haye	MBH
	Boqueteaux	MBO
	Chêne Jeannot	MCJ
	Grand Champs	MGC

* : la première lettre du code renvoie au nom de la petite région. les suivantes au nom du lieu-dit ou de la commune la plus proche. Un numéro permet de distinguer des BVE contigus portant le même nom.

4.1.2. Cadre physique et agraire

On distingue dans le Nord du Bassin Parisien deux grands ensembles géologiques (d'après les cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM) :

- le secteur à craie du Crétacé, à couverture limoneuse d'épaisseur croissante d'Est en Ouest (0 m. en Champagne, jusqu'à 30 m. en Pays de Caux (SOMME, 1977 ; LAUTRIDOU, 1985), reposant localement sur des formations argileuses à silex, issues de l'altération de la craie ;
- le secteur à substratum géologique tertiaire du Nord Bassin Parisien, limité au Nord par la côte de l'île de France.

Le premier grand ensemble régional est formé d'une succession de collines ou de plateaux, entrecoupés par de larges vallées drainées, à fond plat, auxquelles se raccordent de grands réseaux de vallons secs. Le limon originel a été conservé sur les sommets des collines et des plateaux. En revanche, à la faveur du décapage du limon, les formations argileuses, voire la craie, affleurent sur les versants et les rebords de plateaux. Les colluvions des fonds de vallon proviennent du remaniement du limon, voire également des formations argileuses (JAMAGNE, 1964).

Le second grand ensemble régional est constitué de grands plateaux et de buttes témoins, dont le calcaire du Lutétien forme l'ossature. Ces plateaux dominent de grandes plaines drainées. En bordure des plateaux affleurent des sables tertiaires à niveaux argileux, modelés en collines et vallons.

Le paysage agraire dominant du Nord Bassin Parisien est un openfield à grandes parcelles. Les cultures dominantes sont les céréales, le colza, la betterave sucrière, le maïs, le pois et les cultures légumières de plein champ comme la carotte. Les prairies et les forêts subsistent sur les terres impropres à la mise en culture : secteurs à pentes de plus de 30% , zones inondables , réserves foncières communales. Il existe quelques variantes, comme la culture du lin dans le Pays de Caux, ou l'élevage dans le Haut Artois associé à une plus forte densité de prairies permanentes ou temporaires (ray grass).

Au sein du premier ensemble régional précédemment évoqué, les petites régions géomorphologiques du premier groupe se distinguent selon le décapage plus ou moins important de la couverture limoneuse originelle, et une composition granulométrique des limons légèrement différente :

- couverture limoneuse épaisse, plus riche en sables fins, et dont les formations argileuses à silex sous-jacentes affleurent uniquement dans les rares zones à très fortes pentes (Pays de Caux) ;
- décapage plus important des limons qui fait apparaître sur les versants, même à faibles pentes, les formations sous-jacentes :
 - horizon B plus riches en argile (Pays de Montreuil, Arrageois, Marlois) ;
 - formations à silex (Haut Artois, Marlois) ;
 - craie (Marlois, Vermandois).

Notre zone d'étude ne comporte qu'une seule petite région appartenant au second groupe : le Laonnois, localisé en bordure de la dalle calcaire du Lutétien formant l'ossature du massif de St Gobain. L'assise géologique est composée des sables de Cuise, ou partiellement des Argiles à lignites du Sparnacien sous-jacentes, dont l'affleurement en bordure du massif est en générale souligné par de fortes pentes. Localement, des limons loessiques ou sableux recouvrent les sommets des versants.

4.2. Variabilité des caractéristiques

Les caractéristiques morphologiques et pédologiques peuvent être considérées comme constantes sur toute la durée de notre étude. En revanche, les caractéristiques agraires varient au cours d'une saison, et a fortiori d'une année à l'autre.

4.2.1. Caractéristiques permanentes des BVE

Le tableau n°4.2 présente la gamme de variabilité des principales caractéristiques morpho-pédologiques des BVE du premier échantillon.

Il existe une tendance régionale, pour les BVE du premier échantillon, particulièrement nette pour les caractéristiques pédologiques, qui par contre varient peu au sein d'une même petite région.

Les BVE du Laonnois s'individualisent par leur forte proportion de surfaces à sols contenant plus de 35% de sable. Cette proportion est nulle pour les autres BVE. Les BVE du Pays de Caux et du Pays de Montreuil se caractérisent par une très forte proportion de surface ayant des sols sensibles à la battance (entre 70 et 100%), tandis qu'elle est inférieure à 50% pour les autres BVE, sauf pour LHB, où elle est de 80%. Les sols des BVE du Marlois et de l'Arrageois ont un fort taux d'argile, particulièrement MBA dont 39% de la surface totale du BVE a un sol avec plus de 30% d'argile. Les BVE du Haut Artois ont à la fois les caractéristiques pédologiques des deux groupes précédents : des limons sur les plateaux, des limons argileux sur les versants. Enfin, VBO s'individualise par des limons très riches en calcaire total (30% de la surface totale).

Du point de vue des caractéristiques morphologiques des BVE, les tendances régionales sont a priori moins nettes.

On note une densité des lignes de concentration morphologique (thalweg compris) plus forte pour les BVE de l'Est (du Marlois, du Laonnois, du Vermandois, et de l'Arrageois) :

- une moyenne de 70 m/ha pour les BVE de l'Est ;
- une moyenne de 40 m/ha pour les BVE de l'Ouest.

Tableau 4.2. : variabilité des caractéristiques morpho-pédologiques.

Variables	moyenne	minimum	maximum	écart-type	unité
ST	32.3	3.4	92.2	23.3	ha
Pmx	22.1	6.3	66.7	17.5	%
Pg	4.1	1.9	7.9	1.8	%
Ptw	3.5	1.5	8.5	1.8	%
Pp5	35.4	0.3	73.8	19.6	%
Pp10	9.5	0.0	52.3	13.9	%
Papf	30.6	0.0	70.6	17.2	%
K	1.2	1.0	1.6	0.1	
Pat	41.4	2.0	94.1	20.5	%
Dlcw	55.4	22.9	112.3	23.2	m/ha
Dlc	36.8	3.3	88.2	20.9	m/ha
Dtw	18.6	2.3	58.7	12.3	m/ha
PC	53.2	8.5	100.0	34.6	%
Pal	3.5	0.0	38.6	9.0	%
Psa	14.7	0.0	100.0	35.9	%

(cf. annexe 1, liste des symboles des variables)

Il en est de même pour les pentes. Les BVE de l'Est ont des surfaces à pente supérieure à 5%, plus étendues que celles des BVE de l'Ouest, bien que les valeurs de pentes soient relativement faibles.

Les surfaces à pente supérieure à 5% couvrent :

- moins de 10% du BVE pour 14 d'entre-eux ;
- entre 10 et 20% du BVE pour 3 d'entre-eux ;
- plus de 20% du BVE pour 3 d'entre-eux, dont LAR avec 52%.

Les autres caractéristiques morphologiques retenues sont la longueur du thalweg et l'indice K de compacité de Gravélius : elles ne présentent aucune tendance régionale sur le premier échantillon de BVE.

Une analyse factorielle réalisée pour des caractéristiques morphologiques et pédologiques des BVE fait apparaître certains types de combinaison (cf. annexe 3). Elle a permis de mettre en évidence deux grands types de BVE :

- ceux localisés sur les plateaux limoneux, caractérisés par des sols sensibles à la battance, de faibles pentes, et pour certains un thalweg court ;
- ceux des rebords de plateau, caractérisés par un décapage des limons superficiels entraînant l'affleurement de formations argileuses sous-jacentes, et, pour certains, par un thalweg long et à forte pente.

4.2.2. Caractéristiques agraires des BVE

Le tableau n°4.3, présentant les proportions de surfaces par occupation du sol, permet de classer ces dernières selon leur importance décroissante :

- les cultures d'hiver (céréales, colza) ;
- les intercultures travaillées (labour, déchaumage) ;
- les prairies, les forêts ou les friches, regroupées sous le terme de divers ;
- les intercultures non travaillées, c'est-à-dire les chantiers de récolte non repris.

Aucune tendance régionale n'est apparue. Toutefois, la variabilité entre les BVE est très forte. Par exemple, le rapport cultures d'hiver - intercultures travaillées s'inverse d'une année à l'autre pour AA3, LHB et VBO.

On note, en revanche, une tendance régionale en ce qui concerne la taille moyenne des parcelles. Celles-ci sont relativement grandes (de 2 à 7 ha) pour les BVE du Marlois, du Vermandois, de l'Arrageois et du Pays de Caux, tandis qu'elles sont particulièrement petites (moyenne inférieure à 1 ha) pour les BVE du Haut Artois.

Tableau 4.3. : variabilité des occupations du sol par année

Caractéristiques agraires					
Occupation du sol	saison	Proportions de surface par BVE (en %)			écart-type
		moyenne	minimum	maximum	
Cultures d'hiver	88/89	51.8	29.7	99.2	19.0
	89/90	51.8	0.0	100.0	23.6
	90/91	49.0	0.0	99.3	27.2
Divers (prairies, forêt,...)	88/89	8.3	0.0	39.5	9.7
	89/90	10.1	0.0	39.5	12.5
	90/91	9.6	0.0	39.5	12.7
Interculture travaillées	88/89	25.8	0.0	70.3	19.2
	89/90	36.5	0.0	99.3	26.0
	90/91	39.9	0.0	96.8	26.7
Intercultures non travail.	88/89	6.6	0.0	34.5	10.1
	89/90	1.6	0.0	17.4	4.0
	90/91	1.4	0.0	11.4	3.0
Taille moyenne par BVE des parcelles (ha)		2.9	0.5	9.0	2.3

Tableau 5.1. : caractéristiques pluviométriques pour les trois périodes d'automne hiver étudiées, sur deux sites : Blossesville ou Fongueusemare (à l'Ouest) et Erlon (à l'Est).

Période	Sites et campagnes							
	Blossesville ou Fongueusemare(*)				Erlon			
	88/89	89/90	90/91	91/92*	88/89	89/90	90/91	91/92
1 Oct.– 15 Nov.	91.0 18.2	134.3 31.9	170.6 58.6	158.7 29.8	63.6 11.8	67.0 10.2	81.7 9.3	58.7 7.5
16 Nov.– 15 Janv.	193.9 42.4	64.1 4.3	274.5 23.7	115.1 61.0	133.3 5.2	54.1 4.7	117.2 7.8	60.9 2.1
16 Janv.– 28 Févr.	69.8 3.9	210.4 23.7	37.2 0.2	44.6 0.6	46.8 1.2	96.3 17.0	10.3 0.6	15.2 0.2
1 Oct.– 28 Févr.	354.7 64.5	408.8 59.9	482.3 82.5	318.4 91.4	243.7 18.2	217.4 31.9	209.2 17.7	134.8 9.8

Hauteurs totales de pluies cumulées (mm) et hauteurs de pluies cumulées d'intensité ≥ 10 mm/h (mm), pour trois périodes et toute la saison d'automne hiver (du 1^{er} Octobre au 28 Février).

1 Oct. 28 Févr.	Normales climatiques : Dieppe			Normales climatiques : St Quentin	
	moyenne	quartile inf.	quartile sup.	moyenne	quartile sup.
		366		278	
		186		156	
		518		385	

Chapitre 5

CONTEXTE CLIMATIQUE

5.1. Enregistrements réalisés

Les précipitations ont été enregistrées en continu par des pluviomètres à enregistreurs automatiques. La mémoire d'enregistrement des données brutes utilisée est du type CR2M. La résolution des enregistrements est de une minute et de 1/10 mm.

Les données brutes sont traitées par le logiciel "LECPLUV" (DUBRULLE et BOIFFIN, 1989) et permet de calculer les données synthétiques suivantes :

- les hauteurs de pluie journalières totales ;
- les hauteurs de pluie journalières d'intensités supérieures ou égales à 5 mm/h ;
- les hauteurs de pluie journalières d'intensités supérieures ou égales à 10 mm/h.

Pour couvrir l'ensemble des BVE du premier et du second échantillon, respectivement sept et neuf pluviomètres ont été nécessaires. Ils sont implantés à moins de deux kilomètres des BVE qu'ils caractérisent. Compte tenu de la région et de la période d'étude (climat tempéré océanique hivernal du Nord du Bassin Parisien), on suppose dans ces conditions que les écarts pluviométriques entre les BVE situés à proximité d'un même poste sont faibles.

Le contrôle des données enregistrées par chaque pluviomètre est réalisé en les comparant avec :

- le volume d'eau recueilli dans un bidon, branché au tuyau d'évacuation des eaux après leur passage dans le pluviomètre ;
- les enregistrements effectués par les pluviomètres les plus proches ;
- les données fournies par Météo France.

5.2. Caractéristiques des campagnes étudiées

Le tableau n°5.1 présente le cumul des pluies totales et d'intensité supérieure à 10 mm/h, pour deux sites, les plus à l'Ouest et à l'Est, respectivement à Blossville ou Fongueusemare (Pays de Caux) et à Erlon (Marlois).

Il existe une variabilité interannuelle : le rapport entre les précipitations cumulées d'automne hiver maximales et minimales des années étudiées, sont respectivement de 1.8 pour le Marlois et de 1.5 pour le Pays de Caux.

Mais les différences pluviométriques interannuelles portent surtout sur la répartition des pluies au cours de la saison d'automne hiver. Les périodes de précipitations importantes se situent :

- en milieu de saison, pour 1988/1989 ;
- en fin de saison, pour 1989/1990 ;
- en début et milieu de saison, pour 1990/1991 et 1991/1992.

Quelles que soient les années, le gradient des pluies Est (Marlois) Ouest (Pays de Caux) existe, mais les écarts pluviométriques sont plus ou moins marqués. Les précipitations du 1^{er} Octobre au 28 Février, en 1988/1989 sont 1.5 fois plus importantes à Blosseville qu'à Erlon, tandis qu'en 1990/1991 ce rapport est de 2.3 pour la même période. Cet écart est encore plus fort si l'on tient compte des précipitations d'intensités supérieures ou égales à 10 mm/h : de 1.8 à 4.7. Les BVE de l'Ouest ont donc des conditions climatiques globalement plus propices à l'érosion hydrique.

Cependant, comme le montre les diagrammes des pluies journalières présentés en annexe 4 (figures n°1 à 6), que ce soit à Erlon ou à Blosseville (ou Fongueusemare), les principaux épisodes pluvieux surviennent à la même date (avec parfois un décalage d'un jour). Ces épisodes pluvieux correspondent au passage d'Ouest en Est de grandes dépressions. C'est pourquoi, les périodes pluvieuses d'une même saison se sont produites en même temps au Marlois et au Pays de Caux.

Ces écarts entre les pluies du Marlois et celles du Pays de Caux peuvent provenir, soit :

- d'une différence de hauteur et d'intensité des précipitations lors des épisodes pluvieux importants;
- de l'existence ou non de pluies de quelques millimètres et de faibles intensité entre ces épisodes.

Le tableau n°5.2 présente le cumul des pluies journalières inférieures à 5 mm, pour les deux sites : Pays de Caux et Marlois. Ces pluies ne permettent pas d'expliquer l'écart très important noté entre les précipitations cumulées totales du Pays de Caux et celles du Marlois. Ce rapport varie de 0.9 à 1.5, avec des relations pouvant être radicalement différentes à celles obtenues pour les précipitations totales. En 1990/1991, par exemple, les précipitations cumulées totales sont 2.3 fois plus importantes à Blosseville qu'à Erlon, tandis que ce rapport est de 0.9 pour les pluies journalières inférieures à 5 mm.

Tableau 5.2. : pluies de faibles intensités pour les trois périodes d'automne hiver étudiées, sur deux sites : Blosseville ou Fongueusemare (à l'Ouest) et Erlon (à l'Est).

	Sites et campagnes							
	Blosseville ou Fongueusemare(*)				Erlon			
Période	88/89	89/90	90/91	91/92*	88/89	89/90	90/91	91/92
1 Oct.– 15 Nov.	14.4 0.5	43.1 5.5	16.1 0.7	35.6 0.9	14.3 0.2	27.0 2.2	27.6 0.7	34.9 4.4
16 Nov.– 15 Janv.	34.4 2.1	24.9 1.3	40.2 1.8	22.0 1.0	31.4 0.0	20.4 1.4	49.1 0.7	22.3 2.1
16 Janv.– 28 Févr.	32.3 0.6	38.5 2.2	18.1 0.0	21.0 0.6	24.1 0.4	24.8 0.6	10.3 0.6	6.6 0.2
1 Oct.– 28 Févr.	81.1 3.2	106.5 9.0	74.4 2.5	78.6 2.5	69.8 0.6	72.2 4.2	87.0 2.0	63.8 6.7
% rapporté aux P. tot.	23 5	26 15	15 3	25 3	29 3	33 13	42 11	47 68

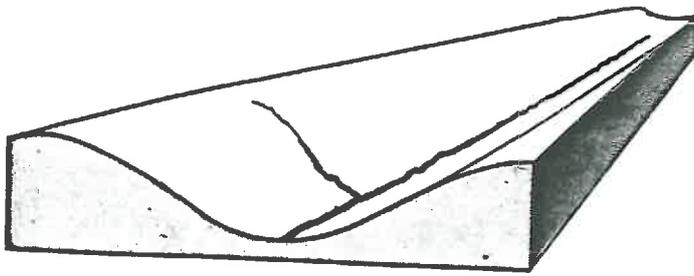
Hauteurs cumulées de pluies journalières inférieures à 5 mm (en mm) et hauteurs cumulées de pluies journalières inférieures à 5 mm d'intensité ≥ 10 mm/h (en mm), pour trois périodes et toute la saison d'automne hiver (du 1^{er} Octobre au 28 Février).

Pour vérifier le rôle éventuel des épisodes pluvieux importants sur l'écart des précipitations cumulées entre les BVE de l'Est et ceux de l'Ouest, nous avons comparé l'intensité maximale enregistrée durant 30 minutes de huit évènements pluvieux importants survenus au Pays de Caux et au Marlois (tableau n°5.3). Ces intensités maximales sont en moyenne 2.5 fois supérieures pour les épisodes pluvieux du Pays de Caux que ceux du Marlois, avec un maximum de 11 fois supérieures.

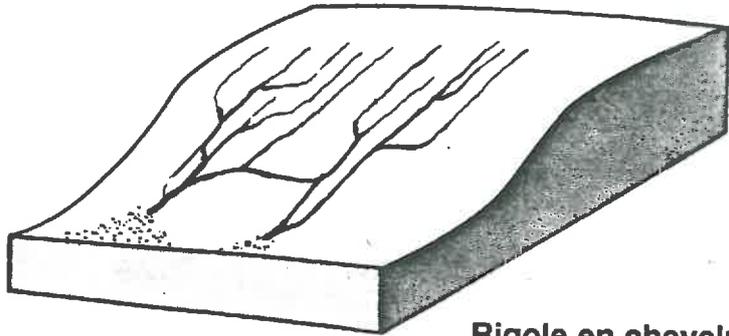
Tableau 5.3. : intensité moyenne (en mm/h) durant 30 mn de huit épisodes pluvieux particulièrement importants.

Date	Blosseville ou Fongueusemare (*)	Erlon	Rapport Bloss. / Erlon
20/11/89	18.9	3.3	5.7
04-05/01/89	13.7	4.1	3.3
04-05/11/89	11.1	3.7	3.0
23-26/01/90	7.7	0.7	11.0
26-28/02/90	6.3	12.7	0.5
26/10 03/11/90	12.1	3.9	3.1
29/12/90	10.7	2.5	4.3
16-21/12/91	4.3*	3.1	1.4

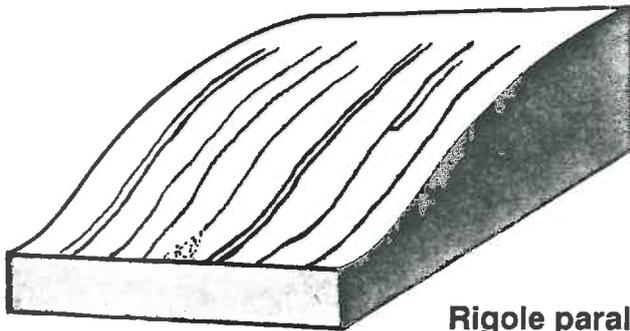
Les écarts pluviométriques entre les BVE de l'Est et ceux de l'Ouest sont donc principalement dus aux hauteurs et intensités des épisodes pluvieux importants, et non à de petites pluies.



Rigole à chenal unique

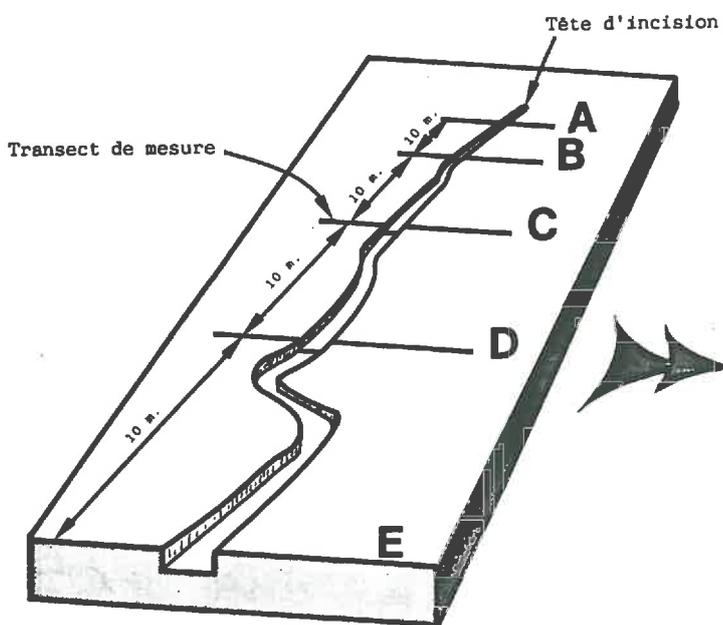


Rigole en chevelu



Rigole parallèle

Fig. 6.1. : types de schéma d'incision des rigoles



Abscisse (n° point)	Largeur	Profond
10 m. (A)		
20 m. (B)		
30 m. (c)		
40 m. (D)	Valeurs en cm	Valeurs en cm
50 m. (E)		

Fig. 6.2. : procédure de mesure d'une rigole

Chapitre 6

CARACTERISTIQUES DES RIGOLES

Pour apprécier l'importance de l'érosion en rigole, nous avons localisé, cartographié et mesuré chaque rigole. Afin d'homogénéiser les observations entre sites et entre années, nous avons adopté une convention sur la taille minimum des rigoles. Celle-ci doit avoir une section incisée d'au moins 5 cm² et une longueur minimale de 10 m. Car, les incisions à petite section (quelques centimètres carrés) et à faible longueur (quelques mètres) sont particulièrement difficiles à repérer sur le terrain, tout particulièrement si le couvert végétal est déjà développé. De plus, leur mesure augmenterait considérablement le temps nécessaire au relevé des symptômes d'érosion.

Les observations de terrain montrent qu'il existe des modalités très contrastées d'association spatiale des rigoles, appelées "schéma d'incision". Ces derniers pourraient correspondre à des modalités de concentration du ruissellement différentes.

Trois schémas d'incision ont été identifiés sur le terrain (figure 6.1) :

- à **chenal unique** : rigole isolée, dont les espacements avec les autres rigoles peuvent être importants (généralement supérieurs à 20 m) et surtout sans caractère périodique. Ces rigoles se rencontrent généralement le long d'axes de concentration du ruissellement, tels les thalwegs ;
- **en chevelu** : système à têtes d'incision multiples, dont les rigoles, espacées de quelques mètres, convergent progressivement d'amont vers l'aval. Elles résultent généralement d'un ruissellement dont la concentration est contrariée par le sens de travail du sol ;
- **parallèle** : système à plusieurs têtes d'incision, drainant une même parcelle ou portion de parcelle: les rigoles ne convergent pas et sont régulièrement espacées de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, donnant au système un caractère périodique. Ces rigoles se localisent toujours sur des portions de versants dont le travail du sol a été réalisé dans la direction de la plus grande pente.

Chaque rigole est également caractérisée selon :

- son appartenance à un sous-ensemble morphologique : le versant ou le thalweg ;
- son association à un ou plusieurs motifs linéaires morphologiques ou agraires préexistants et identifiés, pouvant être : une ligne en dépression marquée par la topographie, une dérayure, une fourrière, une limite de parcelle ou une trace de roue.

L'importance de l'érosion en rigoles est estimée d'après le volume incisé des rigoles. La figure n°6.2 présente la procédure type de mesure d'une rigole :

- localisation de la tête et de la fin d'incision (pouvant être une jonction avec une autre rigole) ;
- mesure de la largeur et de la profondeur tous les 5 à 20m selon la variabilité de la section d'incision ; une mesure est systématiquement effectuée avant et après une confluence avec une autre rigole, et à la tête et à la fin de l'incision, où la section incisée peut être très faible ;
- mesure de l'intervalle entre deux points de mesure d'une section d'incision, le long de la rigole.

Le volume d'une rigole est obtenu en additionnant le volume de toutes les portions de la rigole, caractérisées par une section d'incision et une longueur associée (correspondant à la longueur des deux demi-intervalles de part et d'autre du point de mesure de la section d'incision).

La procédure de mesure du volume des rigoles diffère légèrement selon leur schéma d'incision. Le volume incisé d'une rigole à chenal unique est mesuré selon la procédure décrite ci-dessus. Un système de rigoles en chevelu se compose généralement d'une ou plusieurs rigoles de section importante (100 cm² ou plus) et de rigoles courtes à petites sections. Les grosses rigoles sont mesurées selon la procédure type, tandis que la mesure du volume incisé des petites rigoles est obtenue par la mesure de la longueur et d'une section moyenne de chacune d'elles. La périodicité du système de rigoles parallèle, c'est-à-dire une répétition spatiale de rigoles ayant une longueur et une variation de section d'incision quasi-identiques, autorise à sélectionner des rigoles représentatives (généralement trois à quatre par type de rigoles), pour lesquelles les mesures sont réalisées en détail. Le volume total des rigoles du système est calculé en tenant compte du nombre total de rigoles par type de rigole.

La mesure du volume d'une rigole est sujette à trois sources d'erreurs, portant sur :

- la précision de la mesure de la section incisée ;
- la mesure de l'intervalle entre deux points de mesure de la section incisée ;
- la procédure de reconstitution des volumes, c'est-à-dire la représentativité de la section incisée du tronçon de rigole qu'elle caractérise.

La section incisée est déterminée par la mesure de sa largeur moyenne et de sa profondeur moyenne, en ramenant la section incisée réelle à un parallélépipède de section équivalente (figure n°6.3a). Dans le cas d'une section incisée "complexe", telles celles de rigoles à bords inclinés ou à incisions emboîtées, chaque portion de l'incision, ramenée à un rectangle ou un triangle, est mesurée (figure n°6.3b).

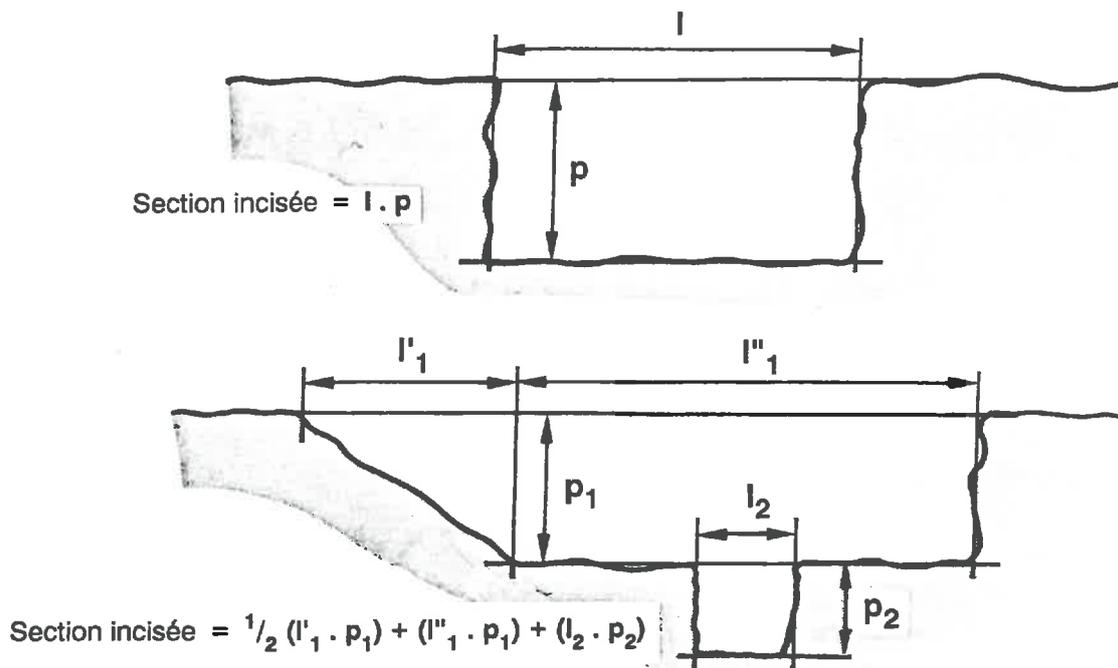


Fig. 6.3. : procédure de mesure d'une section d'incision d'une rigole

L'erreur de mesure sur la largeur et la profondeur de l'incision est d'environ 1 cm, quelle que soit la taille de la section incisée, d'où une erreur relative décroissant avec l'augmentation de la section, par exemple :

- 21% d'erreur pour une section de 10x10 cm² ;
- 7% d'erreur pour une section de 20x50 cm² ;
- 4% d'erreur pour une section de 40x80 cm².

L'intervalle entre deux points de mesure de la section d'incision a été mesuré au pas, pour les trois années d'étude du premier échantillon de BVE, et à la roulette d'arpentage pour l'année d'étude du second échantillon de BVE. L'erreur de mesure de l'intervalle est estimée à 5% pour les mesures réalisées au pas, tandis qu'elle est inférieure à 1% pour celles prises à la roulette d'arpentage.

L'erreur de mesure liée à la procédure adoptée dépend du choix des sections incisées à mesurer le long de la rigole. Pour estimer cette erreur, j'ai calculé le volume de la rigole en ne retenant qu'une mesure de section d'incision sur deux (en gardant toujours la première et la dernière mesure). L'erreur pour les volumes incisés calculés supérieurs à 3 m³, varie de 2 à 15% (tableau n°6.1), mais l'erreur est d'autant plus petite que le volume de la rigole est grand. Ainsi, en valeur absolue, l'erreur de mesure du volume des rigoles est faible. De plus, l'erreur réelle liée à la procédure de mesure est certainement encore plus faible, puisque le choix de la section incisée mesurée n'a pas été fait au hasard, mais en tenant compte de la variabilité réelle de la section d'incision le long de la rigole.

Tableau 6.1. : estimation de l'erreur sur le volume incisé due à la procédure de reconstitution.

Volume Incisé calculé pour une rigole d'après :				
toutes les sections d'incision mesurées (V1) (en m ³)	une section d'incision mesurée sur deux (V2)			
	(en m ³)	(V2/V1)	(en m ³)	(V2/V1)
319.4	309.8	3%	314.1	2%
87.3	90.2	3%	91.3	5%
21.6	22.8	6%	20.2	6%
11.3	9.8	13%	11.3	0%
7.1	5.9	17%	7.8	10%
5.8	6.6	14%	5.3	9%
3.7	3.9	5%	4.2	14%
1.1	0.8	27%	0.7	36%

Troisième partie

**ANALYSE DE LA VARIABILITE DES SYMPTOMES D'EROSION
A L'EHELLE DU BASSIN VERSANT ELEMENTAIRE**

ANALYSE DE LA VARIABILITE DES SYMPTOMES D'EROSION A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT ELEMENTAIRE

Introduction

L'objectif principal est de déterminer les caractéristiques des BVE permettant d'expliquer l'importance de l'érosion en rigoles, par la mise en relation de la variabilité des volumes de rigoles par BVE avec celle des caractéristiques morphologiques, pédologiques, agraires, ou une combinaison de celles-ci (*). La condition de base de l'érosion par ruissellement concentré est la genèse d'un ruissellement, par refus à l'infiltration de la surface du sol. En conditions climatiques hivernales du Nord du Bassin Parisien, les pluies sont de faible intensité, le ruissellement ne peut donc se produire qu'en présence d'un état de surface du sol caractérisé par des capacités d'infiltration et de rétention superficielle très limitées. Nous avons fait l'hypothèse que l'extension de ces surfaces permet d'expliquer une part importante de l'érosion par ruissellement concentré. Nous allons chercher à vérifier cette hypothèse, et à déterminer les autres variables qui permettent également d'expliquer la variabilité de l'érosion en rigoles.

Les étapes de la démarche sont :

- la description de la variabilité et de la répartition des volumes de rigoles à l'échelle globale du BVE, par schéma d'incision, et selon leur répartition spatiale ;
- la description des états de surface du sol et leur évolution ;
- l'étude d'éventuelles relations entre le volume des rigoles et, d'une part, l'aire des surfaces aptes à produire un ruissellement, et d'autre part, les autres variables susceptibles d'influer sur le niveau d'érosion atteint.

* Certains résultats présentés dans cette troisième partie ont déjà fait l'objet de publications (AUZET, BOIFFIN, PAPY, LUDWIG & MAUCORPS, 1993 ; AUZET, BOIFFIN, LUDWIG, soumis pour publication ; AUZET, BOIFFIN, LUDWIG & PAPY, en préparation)

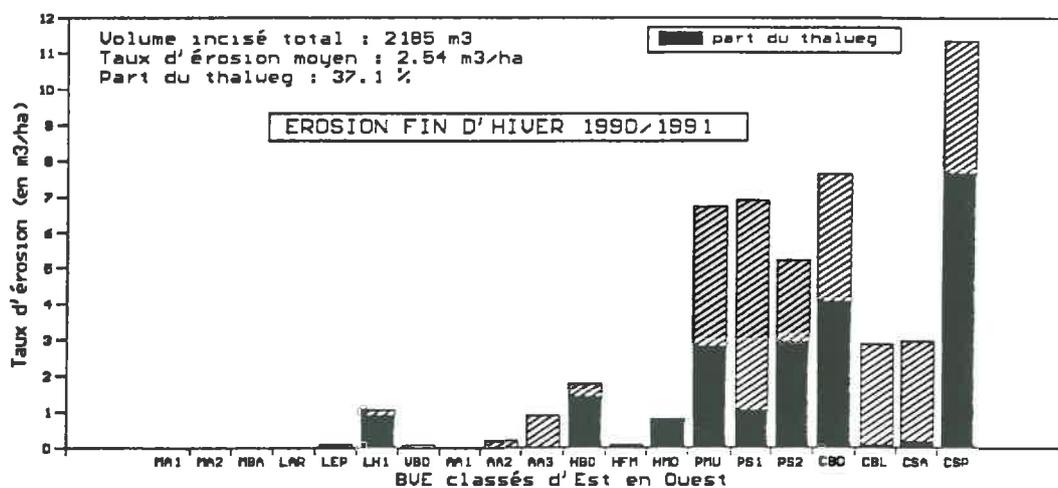
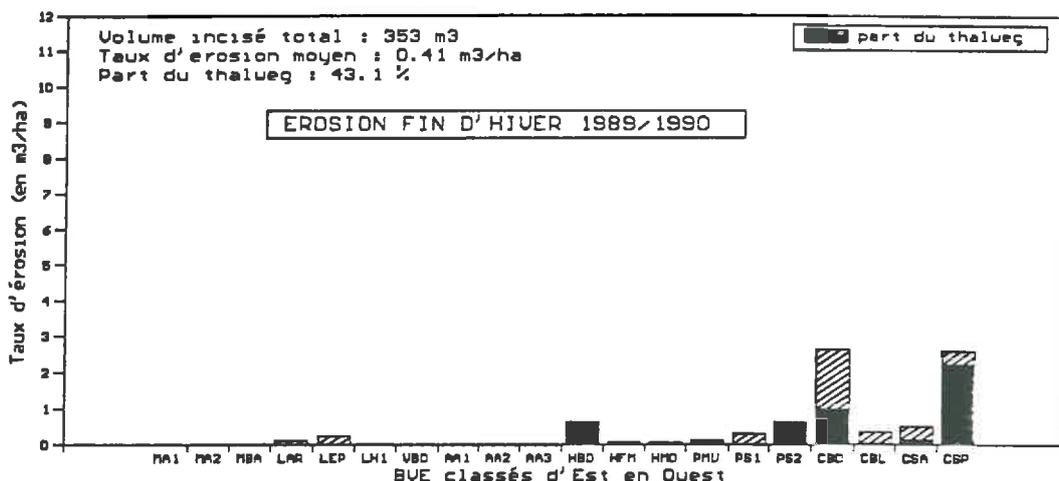
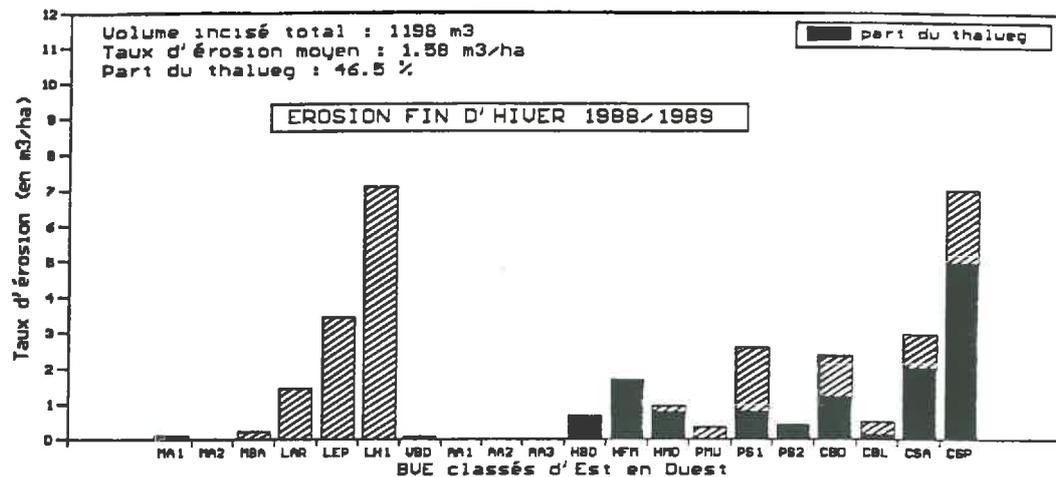


Fig. 7.1. : variation du taux d'érosion (m³/ha) des BVE du premier échantillon, en fin d'hiver.
 a. : 1988/1989
 b. : 1989/1990
 c. : 1990/1991

Chapitre 7

PRESENTATION ET DESCRIPTION DES SYMPTOMES D'EROSION

Nous disposons des données suivantes :

- les volumes des rigoles mesurés à la fin des trois hivers 1988/1989, 1989/1990 et 1990/1991 sur les 20 BVE du 1^{er} échantillon, et au cours de la période d'automne-hiver 1991/1992, lors de quatre passages, sur 15 BVE du 2^{ème} échantillon (distinct du premier);
- la distribution des volumes des rigoles selon leur localisation et selon les schémas d'incision.

7.1. Variabilité des volumes des rigoles

Les figures n°7.1.a, b et c présentent le taux d'érosion en rigoles, c'est-à-dire le volume total des rigoles d'un BVE rapporté à sa surface totale (en m³/ha), des 20 BVE du 1^{er} échantillon classés d'Est en Ouest, pour les trois années. Nous avons distingué sur ces diagrammes la contribution des rigoles localisées sur le thalweg.

Ces figures mettent en évidence une forte variabilité du taux d'érosion, que ce soit entre les BVE d'une même année ou d'une année à l'autre. Quelle que soit l'année étudiée, il existe toujours, en fin d'hiver, un certain nombre de BVE sans érosion en rigoles. Ce nombre peut varier du simple au double selon les années : 4 en 1988/1989 ; 7 en 1989/1990 ; 3 en 1990/1991. Le taux d'érosion maximum mesuré est également très différent d'une année à l'autre : 11.7 m³/ha pour CSP en 1990/1991 ; 7.1 m³/ha pour LHB en 1988/1989 ; 2.7 m³/ha pour CSP en 1989/1990.

La contribution moyenne des rigoles localisées sur le thalweg est toujours élevée (de 37 à 47% du volume total, selon les années). Cependant, celle-ci varie fortement d'un BVE à l'autre, et d'une année à l'autre pour un même BVE.

Les BVE du second échantillon présentent également une forte variabilité du taux d'érosion entre les BVE, avec un maximum de 10.1 m³/ha pour CMO (figure n°7.2). Le volume des rigoles de ce dernier ne représente pas moins de 87% du volume total des rigoles de l'ensemble des 15 BVE du second échantillon. La contribution des rigoles du thalweg (44% en moyenne) est du même ordre que celle du 1^{er} échantillon et présente également une forte variabilité entre bassins.

Le suivi des rigoles au cours de l'automne hiver 1991/1992 montre que la formation des rigoles débute en novembre 1991 pour 4 BVE du Pays de Caux, et en décembre 1991 pour LME (Laonnois), faisant suite au premier épisode pluvieux important de la saison (figure n°7.3). Seul CMO voit son taux d'érosion augmenter significativement par la suite. Nous constatons également que les taux d'érosion de CMO et de LME baissent significativement entre janvier et février 1992. Cette baisse provient de dépôts comblant partiellement certaines rigoles, tandis que peu de nouvelles rigoles apparaissent. Ces sédiments déposés pourraient provenir des zones d'interrigoles et/ou d'incisions mineures non mesurées (telles les griffures), et avoir été acheminés vers le lit des rigoles principales grâce au réseau très dense de rigoles mis en place sur une part importante du BVE, en janvier 1992 (CMO) ou en décembre 1991 (LME). Cette baisse peut également provenir d'une augmentation de la densité apparente des horizons travaillés, en particulier du lit de semence.

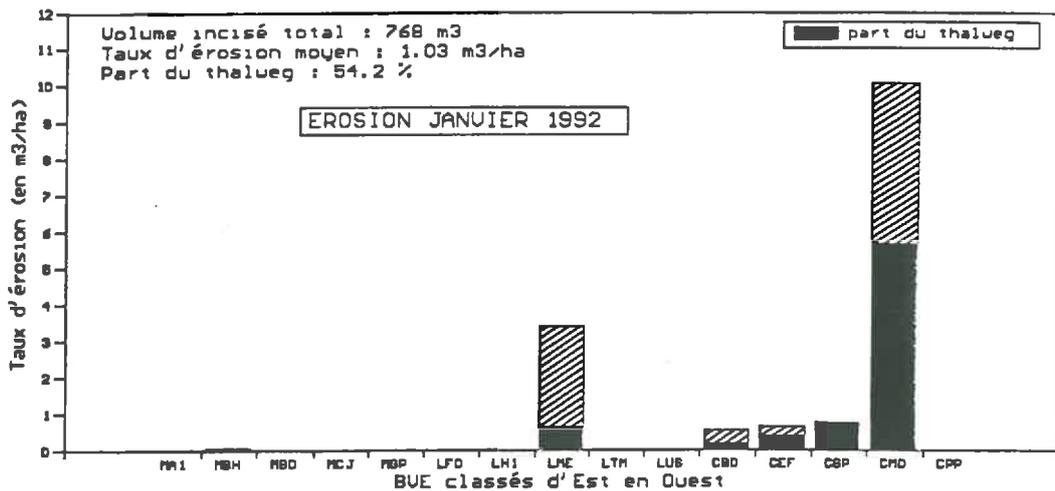


Fig. 7.2. : taux d'érosion (en m³/ha) des BVE du second échantillon, en janvier 1992.

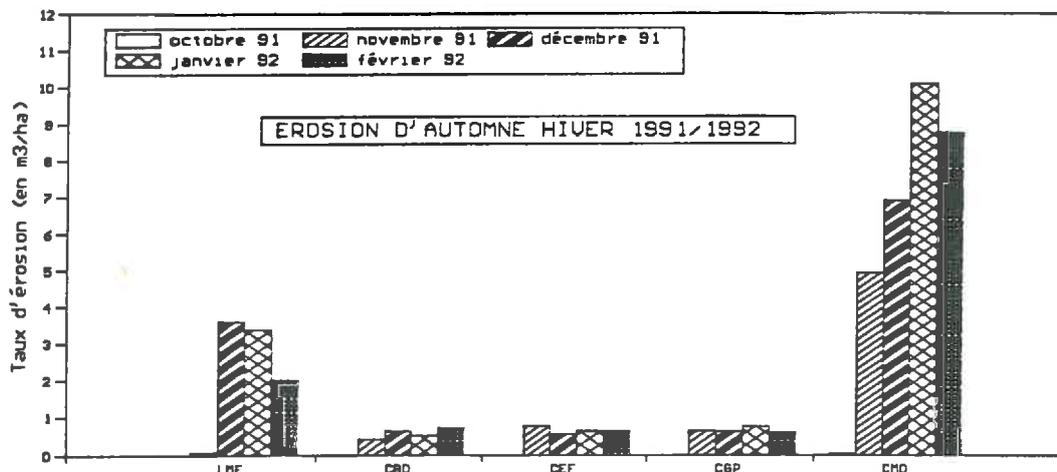


Fig. 7.3. : évolution du taux d'érosion (en m³/ha) de 5 BVE du second échantillon au cours de saison d'automne hiver 1991/1992.

Sur les deux échantillons de BVE, on constate une tendance au classement d'Est en Ouest des taux d'érosion. Celle-ci pourrait éventuellement être corrélée avec les pluies.

Il existe en effet un gradient pluviométrique Est Ouest, avec des précipitations abondantes et de plus fortes intensités pour les BVE de l'Ouest. Cependant, l'examen plus approfondi de la relation érosion-pluie remet en cause le rôle prépondérant des pluies. Le tableau n°7.1 montre que la variabilité interannuelle du taux d'érosion moyen des BVE d'une même région est supérieure à celles des pluies. Ceci est particulièrement net pour les BVE du Laonnois. Cette relation peut même être inversée. Ainsi, pour le Pays de Caux, les précipitations cumulées d'automne hiver 1989/1990 sont supérieures à celles de 1988/1989. Or, le taux d'érosion moyen des BVE de cette région est deux fois plus faible en 1989/1990 qu'en 1988/1989.

Cette inadéquation entre les taux d'érosion et les précipitations cumulées totales, se vérifie également pour les précipitations cumulées d'intensités supérieures à 10 mm/h. L'exemple le plus net à ce sujet, est le cas des BVE du Laonnois en 1989/1990, ils ont à la fois le cumul de pluies à intensités supérieures à 10 mm/h le plus élevé des quatre années et le taux d'érosion moyen le plus faible.

Tableau 7.1. : taux d'érosion moyen et précipitations cumulées pour les BVE de deux régions au cours des quatre années d'étude.

Région d'étude : Pays de Caux (Ouest)			
Campagne à I > 10 mm/h	Taux d'érosion moyen d'observation	Précipitations cumulées (Blosseville) (mm) Totales	
1988/1989	2.37	355	65
1989/1990	1.28	409	60
1990/1991	5.48	482	83
1991/1992*	3.54	318	91
Région d'étude : Laonnois (Est)			
Campagne d'observation	Taux d'érosion moyen (en m ³ /ha)	Précipitations cumulées (Erlon) (mm) Totales à I > 10 mm/h	
1988/1989	5.61	244	18
1989/1990	0.06	217	32
1990/1991	0.77	209	18
1991/1992*	0.25	135	10

(* : concernant les BVE du second échantillon)

Nous observons également une absence de corrélation entre les pluies et l'évolution des taux d'érosion au cours d'une même campagne d'automne hiver. Le tableau n°7.2 montre en effet que la progression des taux d'érosion moyens des BVE du Pays de Caux en 1991/1992, ne peut ni être expliquée par les précipitations cumulées totales, ni par celles d'intensités supérieures à 10 mm/h.

Tableau 7.2. : évolution du taux d'érosion moyen et des précipitations cumulées au cours de la campagne d'étude de 1991/1992, pour les BVE du Pays de Caux

Mois d'observation	Taux d'érosion moyen (en m ³ /ha)	Précipitations cumulées (mm)	
		Totales *	à I > 10 mm/h *
novembre 1991	2.05	150 (150)	30 (30)
décembre 1991	2.82	217 (67)	86 (56)
janvier 1992	3.96	274 (57)	91 (05)
février 1992	3.54	318 (44)	91 (00)

(* : la première valeur correspond aux précipitations cumulées à partir du 1^{er} octobre 1991 à la date de mesure des volumes de rigoles, la seconde, à celles comprises entre les deux dates de mesure des volumes de rigoles)

La très forte variabilité des taux d'érosion pouvant exister entre les BVE d'une même région, confirme l'absence de corrélation directe et simple des taux d'érosion avec les pluies, mais également avec la couverture pédologique. En effet, les BVE de certaines régions se caractérisent par une forte homogénéité de la couverture pédologique. Or, pour une même année, donc pour des pluies identiques, la variabilité du taux d'érosion entre ces BVE peut être très forte. Les BVE du Pays de Caux en sont l'exemple le plus marquant.

L'absence d'une relation directe et évidente entre les taux d'érosion et, respectivement, les pluies et la couverture pédologique, suggère que d'autres caractéristiques des BVE contribuent à la variabilité de l'érosion en rigoles des BVE.

7.2. Distribution spatiale des rigoles

Lors de la mesure des rigoles, celles-ci ont également fait l'objet d'une caractérisation selon leur schéma d'incision (Cf. définition § 6), leur localisation au sein du BVE et éventuellement le motif linéaire associé préexistant à la rigole.

7.2.1. Répartition par schéma d'incision

Le tableau n°7.3 donne la répartition par schéma d'incision de la part des volumes totaux des rigoles pour le 1^{er} échantillon de BVE et les trois hivers.

Tableau 7.3 : répartition des volumes de rigoles selon leur schéma d'incision.

Caractéristiques de l'érosion		Campagne d'observation		
		1988/1989	1989/1990	1990/1991
Volume total des rigoles (m ³)		1198	353	2185
Répartition par schéma d'incision (% du volume total)	à chenal unique	82	89	72
	en chevelu	6	2	5
	parallèle	12	9	23

Le système des rigoles à **chenal unique** contribue pour une part essentielle des volumes de rigoles : de 72 à 89%, selon les années. Cette part est d'autant plus importante que le volume total est réduit. Il faut noter que les rigoles localisées sur le thalweg font toutes partie de ce schéma d'incision. A l'inverse, la part des volumes de rigoles correspondant au système de rigoles à **schéma parallèle** est très variable d'une année à l'autre, et augmente proportionnellement au volume total des rigoles. Les systèmes de rigoles à **schéma en chevelu** contribuent pour une part réduite à l'érosion totale (de 2 à 6% selon les années), et n'ont jamais été rencontrés comme unique schéma d'incision sur un BVE.

La distinction des rigoles selon leur schéma d'incision est pertinente par rapport aux procédures de mesure de leur volume incisé. Toutefois, le schéma d'incision peut également être considéré comme un indicateur de la manière dont le ruissellement s'est produit et de son effet érosif. La différence essentielle entre chaque schéma d'incision décrit tient à la surface ayant contribué au ruissellement, et à la manière dont s'est effectuée la concentration du ruissellement dans l'espace.

Les rigoles correspondant au schéma d'incision à chenal unique peuvent être alimentées par des aires contributives au ruissellement de dimension variable, parfois très grandes, allant d'une portion de parcelle à l'ensemble du BVE. L'incision de ces rigoles résulte de la concentration de ce ruissellement sur un axe d'écoulement unique.

Les rigoles ayant un schéma d'incision en chevelu ne sont généralement alimentées en eau que par une portion de parcelle dont la concentration du ruissellement est contrariée par le sens de travail du sol réalisé perpendiculairement à la direction préférentielle de l'écoulement des eaux.

Chaque rigole d'un système à schéma d'incision parallèle n'est connectée qu'à une très petite surface. Souvent leur impluvium se limite à quelques mètres de part et d'autre de la rigole. Si les conditions hydraulique nécessaires pour la formation d'une incision sont réunies sur de faibles surfaces (parce que les pluies sont intenses et/ou que la sensibilité du matériau est forte), alors la localisation des têtes de rigoles est essentiellement déterminée par la topographie, correspondant à une combinaison déterminée des valeurs de pente et de longueur de pente (GOVERS, 1991b). Sur un terrain de forme relativement régulière, ceci se traduit par l'alignement de plusieurs têtes d'incision le long d'une même courbe de niveau, à intervalles sensiblement égaux. La localisation exacte de ces têtes d'incisions peut être soit aléatoire, soit prédéterminée par un processus de concentration due à des empreintes linéaires (traces de roue) espacées selon les opérations culturales de quelques mètres (semis) à 20 - 25 m (épandage de produits phytosanitaires). En définitive, le schéma d'incision parallèle semble représenter un continuum de formes intermédiaires entre les formes typiques à rigoles - interrigoles et par ruissellement concentré. Il correspond à la réalisation locale de conditions particulièrement favorables à la genèse et à l'action érosive du ruissellement. Ceci est cohérent avec le fait que leur contribution au volume total des rigoles augmente avec ce dernier.

7.2.2. Répartition des rigoles selon leur motif linéaire préexistant

La localisation des rigoles n'est pas due au hasard, mais est généralement associée à des motifs linéaires préexistants identifiables, marqués par la topographie (les lignes de concentration morphologiques, dont le thalweg) ou bien d'origine agraire (les traces de roue, les fourrières, ou les dérayures). Parfois, ces deux types de motifs sont superposés (par exemple : une limite de parcelle soulignée par une dérayure le long du thalweg). Enfin, il arrive que des rigoles ne soient pas associées à un motif linéaire préexistant facilement identifiable. Ces dernières résultent du débordement de chemins ou de petites retenues, ou bien, appartiennent à des systèmes de rigoles à schéma d'incision parallèle localisées sur des rangs de semis non pris en compte comme motif linéaire de concentration du ruissellement.

Le tableau n°7.4 présente la part des volumes de rigoles localisées sur un motif linéaire (VL), et leur répartition selon les types de motif.

Tableau 7.4. : répartition du volume des rigoles selon le type de motif linéaire, par campagne d'observation.

Volume des rigoles	1988/1989	1989/1990	1990/1991
Total (VT)	1198 m ³	353 m ³	2185 m ³
Localisées sur un motif linéaire préexistant (VL)	1138 m ³ (95 %)*	337 m ³ (95 %)*	1746 m ³ (80 %)*
Répartition de VL par type motif			
motif topographique	61 %	58 %	52 %
motif topographique et agraire	12 %	21 %	28 %
motif agraire	27 %	21 %	20 %

* (= 100 VL/VT)

Selon les années, 80 à 95% du volume des rigoles sont localisés sur un motif linéaire préexistant. Ceci souligne le rôle important de ces motifs dans la collecte du ruissellement. A contrario, c'est dans les conditions les plus favorables à l'érosion, en 1990/1991, qu'une part importante de ces rigoles se développe en l'absence de motifs linéaires préexistants.

Les rigoles localisées sur un motif topographique contribuent pour 73 à 80% au volume total des rigoles localisées sur un motif linéaire (associé ou non à un motif d'origine agraire). La part des rigoles localisées sur un motif agraire est de 39 à 48% du volume total des rigoles localisées sur un motif linéaire. Parmi ces rigoles, une part importante est localisée sur un motif à la fois topographique et agraire. Il est fort probable qu'en l'absence du motif agraire, ces rigoles se seraient tout de même formées sur ces axes. Quoiqu'il en soit la part des motifs agraires seuls est loin d'être négligeable.

7.2.3. Répartition spatiale des rigoles localisées sur un motif linéaire

Le BVE peut être subdivisé en trois sous-unités :

- le thalweg ;
- la zone amont des versants ayant une pente inférieure à 2%, correspondant à des portions de plateau ;
- la partie des versants en aval de la zone amont.

Répartition spatiale des volumes de rigoles selon leur schéma d'incision

Le tableau n°7.5 présente la répartition spatiale des volumes de rigoles en fin d'hiver, sur le thalweg, la zone amont et la zone aval des versants, selon les trois schémas d'incision des rigoles.

Tableau 7.5. : répartition spatiale des volumes de rigoles localisées sur un motif linéaire préexistant par schéma d'incision.

Volume des rigoles	VERSANT						THALWEG		
	zone amont			zone aval			88/89	89/90	90/91
	88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91
Total, VL (en m³)	30	16	111	552	169	823	557	152	812
SCHEMA D'INCISION									
à chenal unique *	91%	52%	59%	67%	85%	79%	100%	100%	100%
en chevelu *	9%	0%	6%	12%	1%	9%	0%	0%	0%
parallèle *	0%	48%	35%	21%	14%	12%	0%	0%	0%

(* : part de VL)

Les rigoles localisées sur le thalweg correspondent toujours au schéma d'incision à chenal unique, et représentent une part importante du volume total des rigoles (de 37 à 47%, selon les années). En revanche, les trois types de schémas d'incision sont présents sur les versants, que ce soit en zone amont ou aval. Le schéma d'incision dominant est à chenal unique (de 52 à 91% du volume total des rigoles localisées en zone amont ou aval des versants).

Répartition spatiale des volumes de rigoles selon le type de motif linéaire

Le tableau n°7.6 présente la répartition spatiale (thalweg, versant amont, versant aval) des volumes des rigoles regroupées selon leur motif linéaire préexistant (topographique, agraire ou la combinaison des deux).

Tableau 7.6. : répartition spatiale des volumes de rigoles par type de motif linéaire préexistant.

Volume des rigoles	VERSANT						THALWEG		
	zone amont			zone aval			88/89	89/90	90/91
	88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91
Volume total (en m³)	30	16	111	552	169	823	557	152	812
motif topographique	10%	52%	11%	48%	63%	63%	77%	100%	47%
motif combiné (topograph. et agraire)	0%	0%	0%	1%	5%	6%	23%	0%	53%
motif agraire	90%	48%	89%	51%	32%	31%	0%	0%	0%

Les rigoles localisées sur le thalweg sont, par définition, des rigoles associées à un motif topographique : le thalweg, combiné ou non à un motif agraire.

En zone aval des versants, les rigoles sont surtout localisées sur des motifs topographiques, tandis qu'en zone amont, la localisation sur des motifs agraires domine. Cette opposition de localisation s'explique par la forte densité des lignes de concentration morphologiques en zone aval des versants, bien marquées dans la topographie.

Inversement, en zone amont des versants, le fait que les lignes de concentration morphologiques soient peu denses (voire inexistantes) et peu marquées, permet aux motifs agraires d'être le facteur de localisation principal des rigoles (48 à 90% du volume total des rigoles de cette zone).

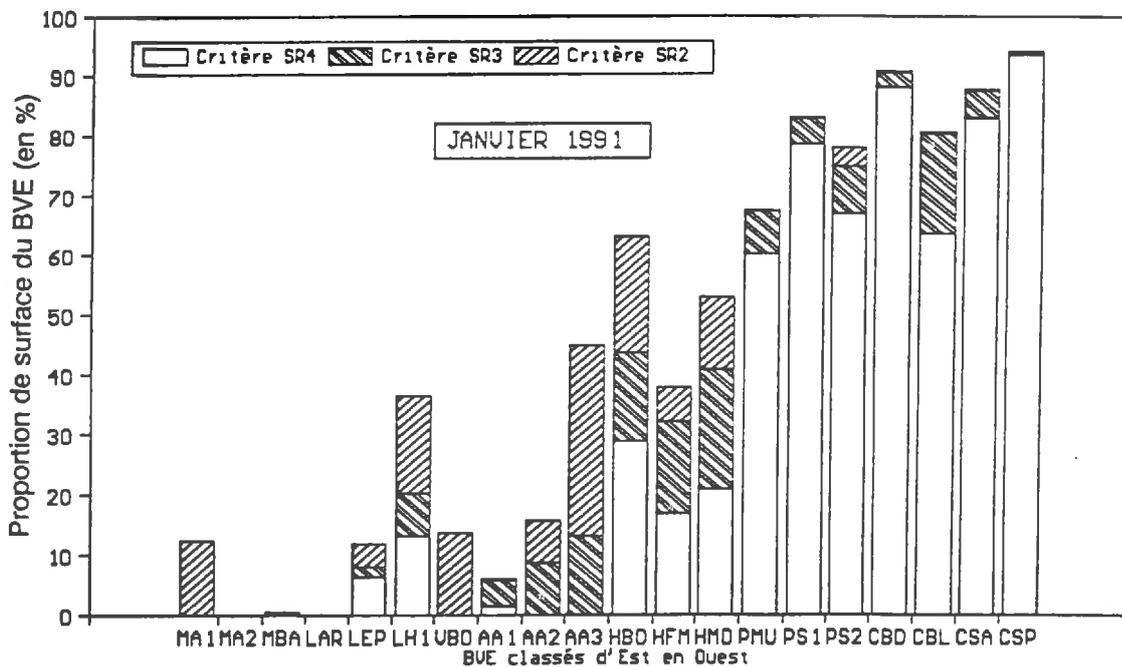
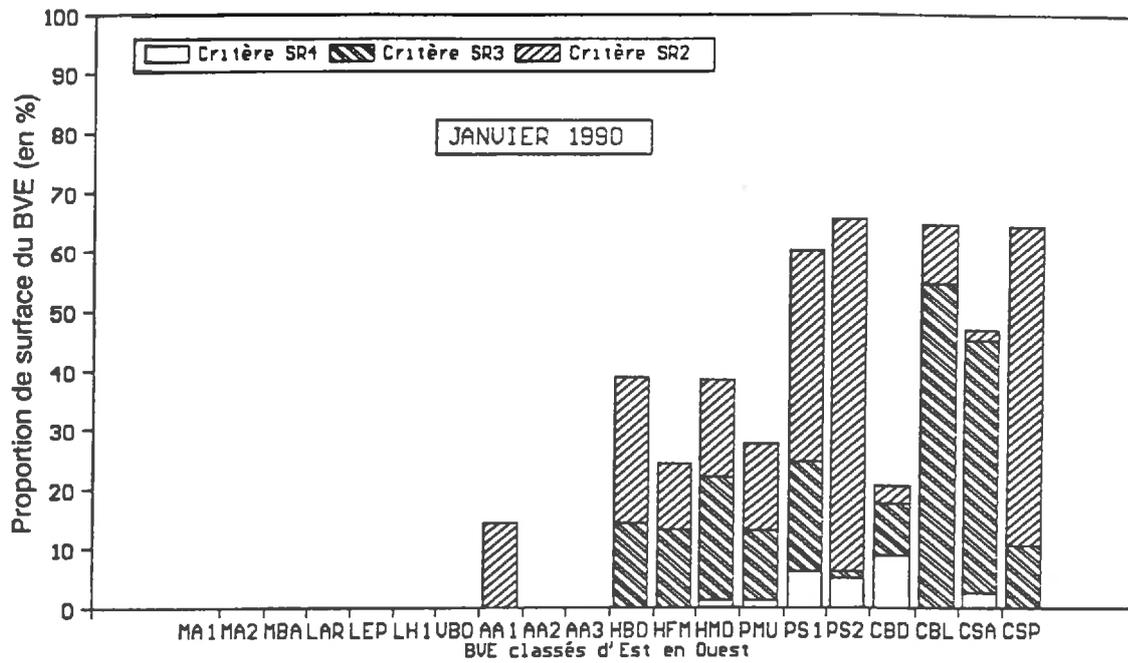


Fig. 8.1. : variabilité des proportions de surface (en %) répondant respectivement au critère SR2, SR3 ou SR4, des BVE du 1^{er} échantillon.

a. : en janvier 1990

b. : en janvier 1991

Chapitre 8

LES ETATS DE SURFACE DU SOL

Nous avons proposé trois types de critères permettant d'estimer les surfaces aptes à produire un ruissellement : **SR2**, **SR3** et **SR4** (Cf définition § 3.5., tableau n°3.4). Il est important de rappeler que ces trois critères caractérisent des capacités d'infiltration et de rétention superficielle de plus en plus limitées du critère **SR2** au critère **SR4**. Ainsi, une surface répondant à un critère donné, répond également aux critères moins exigeants.

Nous disposons : pour les campagnes de mesures 1989/1990, 1990/1991 et 1991/1992, d'observations des états de surface réalisées quatre à six fois au cours de la saison d'automne hiver, généralement à un mois d'intervalle ; pour la campagne de mesure 1988/1989, d'observations réalisées en fin d'hiver, mais non de manières exhaustives.

8.1. Variabilité des états de surface du sol

Les figures n°8.1.a et b présentent les proportions de surface des BVE répondant respectivement au critère **SR2**, **SR3** ou **SR4** (**PR2**, **PR3** ou **PR4**), en janvier 1990 et janvier 1991.

Pour une même année, la variabilité des proportions de surface répondant à l'un ou l'autre critère **SR** (**PR**) entre les BVE est forte. Les BVE de l'Ouest, c'est-à-dire du Haut Artois (H), du Pays de Montreuil (M) et du Pays de Caux (C), se caractérisent par des **PR** systématiquement plus importants que ceux des BVE de l'Est. Ceci est particulièrement net en 1989/1990, quel que soit le critère **SR** retenu, et pour **PR4** en 1990/1991.

La variabilité des **PR** d'un même BVE entre les deux années est également importante, mais celle-ci est beaucoup plus forte pour **PR4** que **PR2**. Les deux années se distinguent en effet par une forte différence de l'écart entre **PR4** et **PR2** pour un même BVE, particulièrement pour ceux du Pays de Caux (C) et du Pays de Montreuil (M).

Les conditions nécessaires à la formation d'un état de surface du sol répondant au critère **SR2** sont moins exigeantes que celles devant être réunies pour que l'état de surface d'un sol réponde au critère **SR4**. Ces conditions particulièrement exigeantes ont été réunies sur les BVE de l'Ouest durant l'automne hiver 1990/1991.

La variabilité des états de surface constatée entre les BVE lors d'une même année et entre années pour un même BVE, se retrouve également au niveau de leur évolution au cours d'une même saison d'automne hiver.

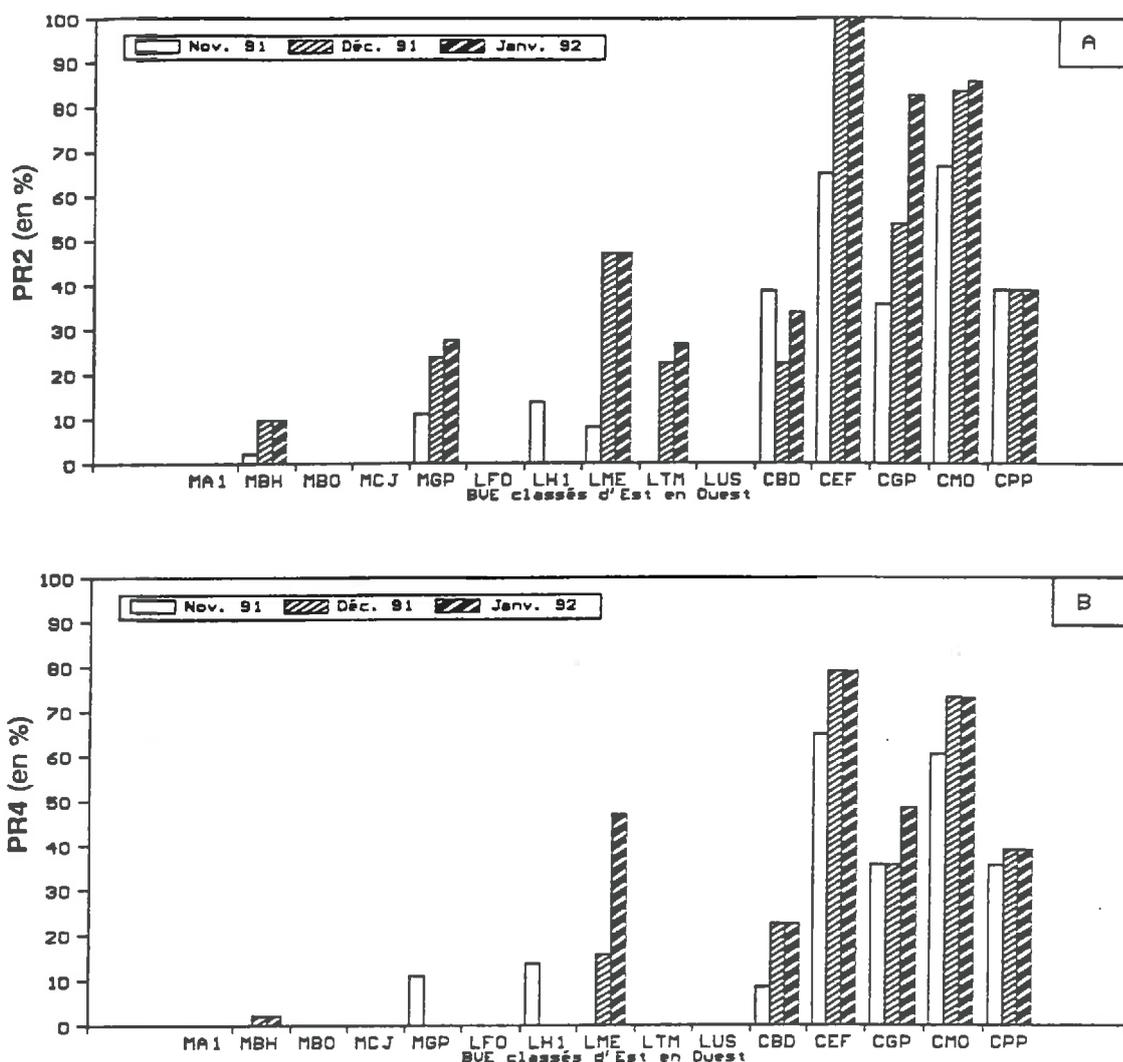


Fig. 8.2. : évolution des états de surface au cours de la campagne d'observation de 1991/1992, pour les BVE du second échantillon. a. : évolution de PR2. b. : évolution de PR4.

Tableau 8.1. : caractéristiques des parcelles dont l'état de surface répond au critère SR4.

Classe texturale	OCCUPATION DU SOL								
	Culture d'hiver			Chantier de récolte NON travaillé			Interculture travaillée		
	t1	t2	n	t1	t2	n	t1	t2	n
A ; AL	4	4	24	50	*	0	0	0	9
LA ; LAS ; LSA ; SA	2	14	128	30	100	5	0	4	48
LM	17	61	115	0	100	5	0	9	44
LMS ; LS ; S ; SL	41	71	48	59	100	19	5	39	39
Total	12	39	315	54	100	29	3	15	140

t1 : pourcentage de parcelles dont l'état de surface correspond au critère SR4 fin novembre 1990

t2 : pourcentage de parcelles dont l'état de surface correspond au critère SR4 mi-janvier 1991

n : nombre de parcelles observées mi-janvier 1990.

(* : toutes les parcelles répondant à ces caractéristiques ont été travaillées entre la date t1 et t2)

Les figures n°8.2.a et b portent sur l'évolution respectivement de PR2 et de PR4, pour les BVE du second échantillon au cours de la campagne d'observation de 1991/1992. Deux formes d'évolution peuvent se présenter, soit la proportion de surface répondant à un critère donné croît progressivement au cours de la saison (par exemple, CGP pour PR2), soit elle acquiert très tôt sa valeur maximale (par exemple, CPP pour PR2). Cette évolution n'a pas nécessairement la même allure pour PR2 et PR4 d'un même BVE. Ainsi, l'écart entre PR2 et PR4 peut donc également varier au cours du temps.

Les éventuelles reprises du sol au cours de la saison peuvent réduire PR2 ou PR4 (par exemple PR2 de CBD).

8.2. Facteurs déterminant la variabilité des états de surface du sol

L'évolution de l'état de surface du sol est contrôlée par trois grands types de facteurs : les pluies, les caractéristiques physiques du sol, les occupations du sol (Cf chapitre 1).

8.2.1. Rôle de l'occupation du sol

La mise en oeuvre d'un système de culture sur une parcelle se traduit par une série d'opérations culturales susceptibles de modifier brutalement l'état de surface du sol. Cependant, il existe, dans une région et à un moment donné, un nombre limité de grands types d'états de surface liés aux cultures et à la nature des opérations culturales (BOIFFIN et al., 1986). Ainsi en automne – hiver, les occupations du sol peuvent être regroupées en trois grands types : les cultures d'hiver ; les chantiers de récolte non travaillés ; les intercultures travaillées (labour, déchaumage,...). Le tableau n°8.1 présente l'évolution et l'importance du nombre de parcelles dont le sol se caractérise par un état de surface répondant au critère SR4, regroupées selon la texture du sol et par type d'occupation du sol.

Pour les parcelles en culture d'hiver, la part des surfaces répondant au critère SR4 à une date donnée est d'autant plus forte que la teneur en argile du sol est plus faible. Mi-janvier 1991, elle varie de 5% à plus de 60% pour des sols ayant respectivement plus de 30% d'argile (A et AL) et moins de 17.5% d'argile (LM, LMS,...). L'évolution au cours du temps des pourcentages de parcelles dont l'état de surface du sol répond au critère SR4 varie également selon l'appartenance du sol à une classe texturale donnée. Cette évolution semble d'autant plus rapide que la teneur en argile du sol est faible.

Pour les parcelles en intercultures travaillées, la part des parcelles ayant un état de surface répondant au critère SR4 est systématiquement plus faible que celle des cultures d'hiver, tout en présentant le même classement en fonction des classes texturales du sol. La forte rugosité initiale conférée au sol lors des travaux agraires est vraisemblablement responsable de cette évolution plus lente des états de surface. En effet, cette rugosité initiale est telle que la dénivelée du microrelief (Cf modalités de notation, § 3.5) est au minimum égale à 10 cm, tandis qu'il est toujours inférieure à 10 cm, souvent à 2 cm après un semis.

En revanche, à la mi-janvier 1991, quelle que soit la classe texturale, 100% des parcelles en chantier de récolte non travaillé ont un état de surface répondant au critère SR4. Le tassement du sol par les pneumatiques des engins agricoles limite considérablement à la fois la capacité d'infiltration et la rugosité initiale du sol, d'où une atteinte du critère SR4 par l'état de surface du sol rapide, favorisé par la très faible capacité d'infiltration initiale d'un sol compacté.

Les occupations du sol jouent donc un rôle déterminant sur l'état de surface. Ainsi, en début d'hiver 1990/1991, les parcelles susceptibles de contribuer au ruissellement, dont l'état de surface répond au critère SR4, sont principalement : les chantiers de récolte non travaillés, quelle que soit la classe texturale de leur sol, et un nombre croissant de parcelles en cultures d'hiver, d'autant plus important que la teneur en argile est faible.

8.2.2. Rôle de la texture du sol

Pour déterminer la sensibilité à la désagrégation mécanique de la surface d'un sol, l'apparition de croûtes sédimentaires (facies F2) est mise en relation avec les précipitations cumulées reçues à partir de la date des travaux. Afin d'éviter l'influence des systèmes de culture sur la dégradation de l'état de surface, nous nous sommes limités aux parcelles en culture d'hiver (179 sites d'observation).

La figure n°8.3 montre que pour un cumul de pluie donné, la proportion de sites dont la surface du sol a atteint le facies F2 varie fortement d'une classe texturale à une autre. Ainsi, se caractérisent par une atteinte du facies F2 très précoce les sols de classe texturale LMS, LM, LS, SL ou S, et par une atteinte du facies F2 tardive ceux de classe texturale LA, LAS, LSA ou SA. Par contre, la surface des sols de classe texturale AL ou A, a une probabilité faible, voire nulle, d'être caractérisée par un facies F2 en fin d'hiver.

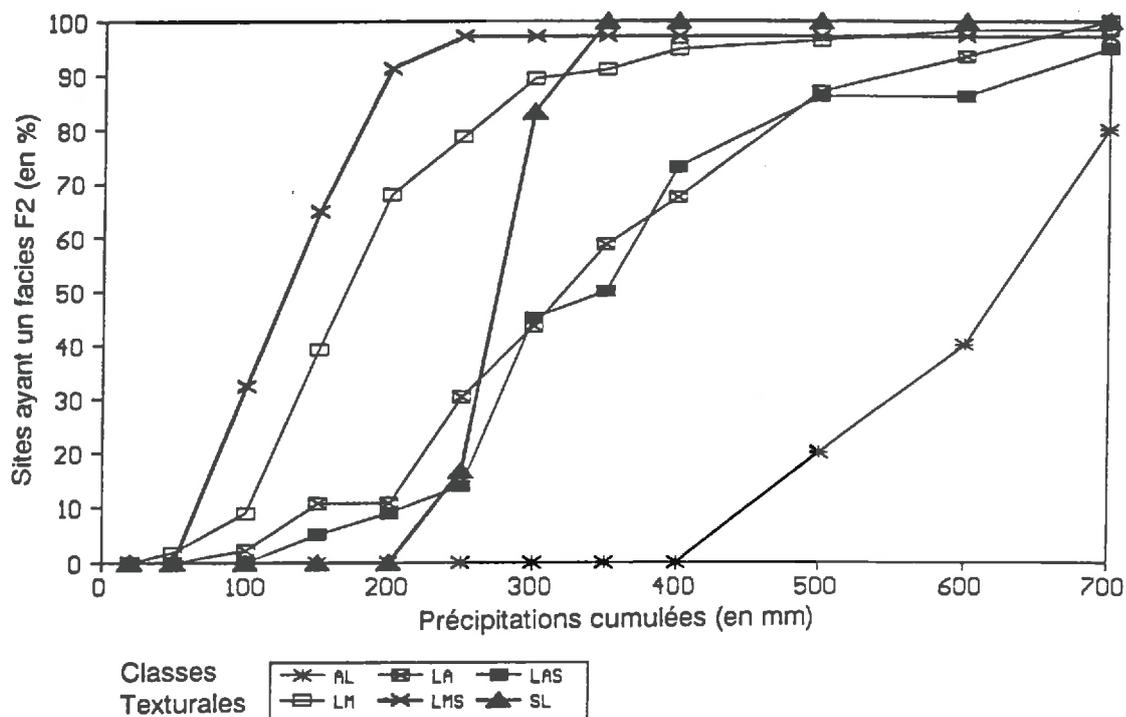


Fig. 8.3. : relation entre l'atteinte du facies F2 par la surface d'un sol d'une culture d'hiver et les précipitations cumulées à partir de la date du semis.

Toutefois, au sein d'une même classe texturale, les précipitations cumulées correspondant à l'atteinte du facies F2 présentent une grande variabilité. Cette variabilité est de l'ordre de 200 mm pour LMS et LM, et de 400 mm pour LA et LAS. Ceci suggère que d'autres facteurs interviennent dans l'évolution des états de surface du sol. Les rôles de la teneur en matière organique, de l'état et de l'histoire hydriques doivent probablement être considérés, mais nous ne disposons pas des données nécessaires pour permettre d'aller plus loin dans cette analyse. De plus, l'atteinte par une placette donnée du facies F2 résulte d'un événement pluvieux précis, c'est-à-dire ayant permis la formation d'un excès d'eau à la surface du sol. La probabilité qu'un tel événement survienne est d'autant plus grande que les précipitations cumulées précédentes sont importantes, mais cette variable ne joue pas un rôle causal direct dans l'apparition des croûtes sédimentaires. C'est d'abord l'intensité et la durée du premier épisode pluvieux ayant permis la formation de flaques à la surface du sol, qui explique cette apparition. Il est donc assez normal que les précipitations cumulées ne soient liées que de façon assez lâche à la date d'apparition des facies F2.

Les caractéristiques texturales du sol et celles des pluies ont une grande influence sur l'évolution des états de surface du sol. Cependant, cette évolution ne peut être directement déterminée par les pluies, étant donné la grande variabilité de la date et de la nature des travaux agraires réalisés. Les états de surfaces doivent donc être directement notés sur le terrain, et pour chaque portion de parcelle ayant un sol de même classe texturale.

8.2.3. Relation entre les surfaces répondant à l'un des critères SR et les pluies

Les graphiques n°8.4.a, b et c présentent l'évolution des proportions de surfaces répondant à l'un des trois critères, en relation avec les pluies cumulées à partir du 1^{er} octobre 1989 et 1990, pour les BVE du Pays de Montreuil (M) et du Pays de Caux (C). Ces BVE ont été choisis car ils présentent des caractéristiques climatiques et pédologiques proches. Ils se caractérisent également par une très faible proportion de chantiers de récolte non travaillés, quelle que soit l'année (de 1 à 5%). Ceci permet donc d'étudier l'évolution des états de surface du sol de deux régions distinctes en fonction des précipitations reçues.

Le graphique n°8.4.a, concernant l'évolution des proportions de surfaces répondant au critère SR2 (PR2) en fonction des pluies, fait apparaître une évolution commune quels que soient le site ou l'année : à cumul de pluies équivalent, PR2 est semblable pour les deux années. La seule différence est un déficit pluviométrique en automne 1989, se traduisant par un retard dans l'apparition des états de surfaces correspondant au critère SR2.

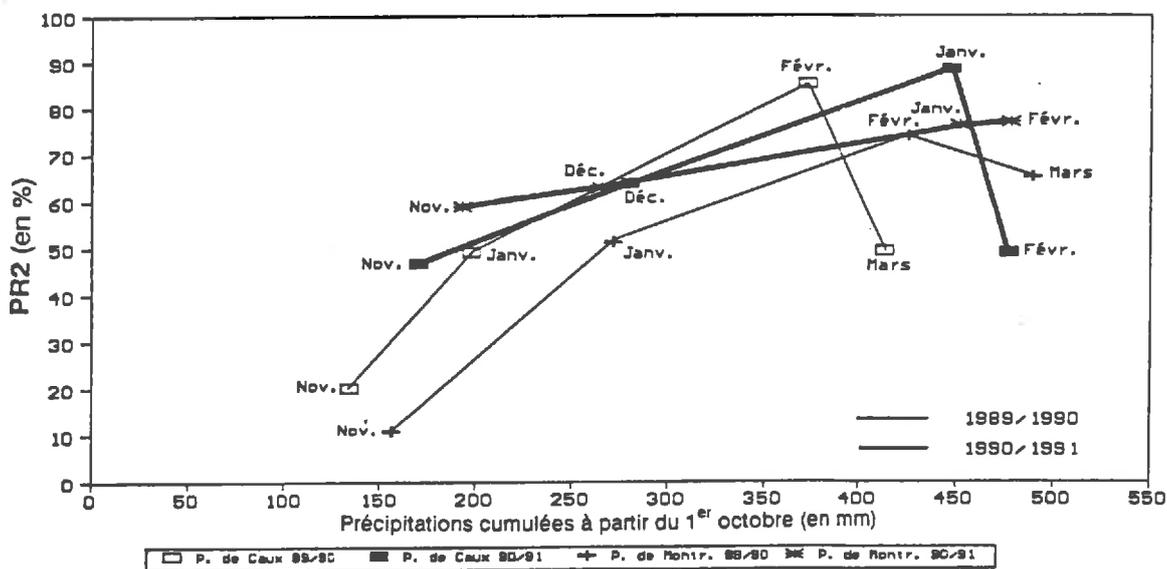


Fig. 8.4.a : évolution des proportions de surfaces (en %) répondant respectivement au critère SR2, en fonction des précipitations cumulées à partir du 1^{er} octobre.

Le graphique n°8.4.b, portant sur l'évolution de PR4 en fonction des pluies reçues, montre une forte opposition entre les deux années d'étude. En 1990/1991, la proportion des surfaces ayant un état de surface le plus dégradé et avec une rugosité quasi nulle (PR4) augmente rapidement : en novembre PR4 est compris entre 25 et 42% ; il est de 50% en décembre et atteint 70 à 90% en janvier. En revanche, en 1989/1990, PR4 ne dépasse jamais 15%, quel que soit le cumul des précipitations totales enregistrées.

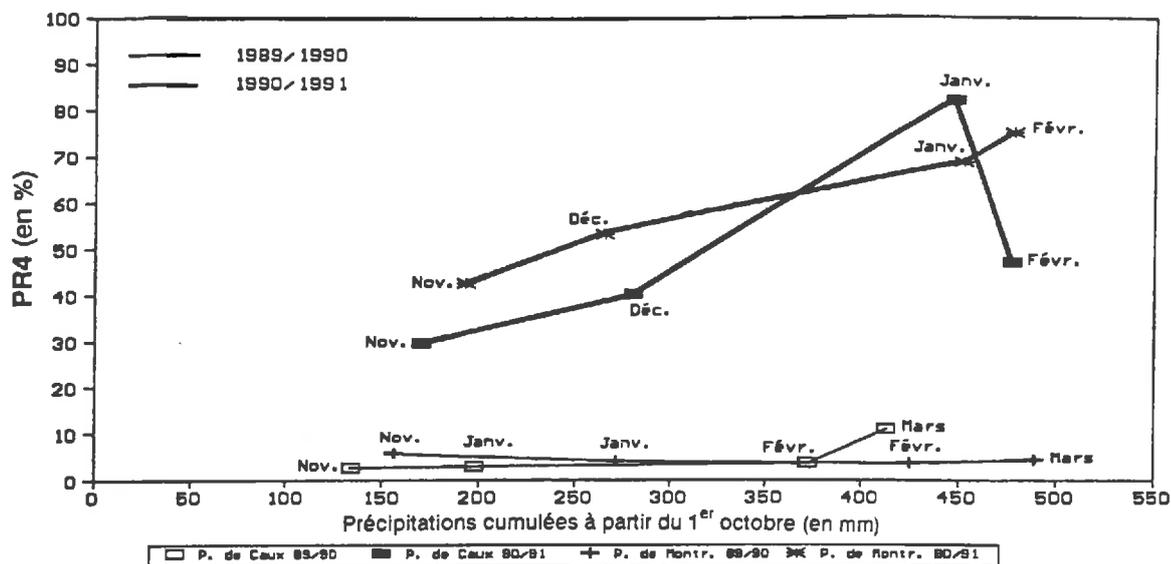


Fig. 8.4.b : évolution des proportions de surfaces (en %) répondant respectivement au critère SR4, en fonction des précipitations cumulées à partir du 1^{er} octobre.

L'estimateur PR3 donne un résultat intermédiaire aux deux types précédents (figure n°8.4.c).

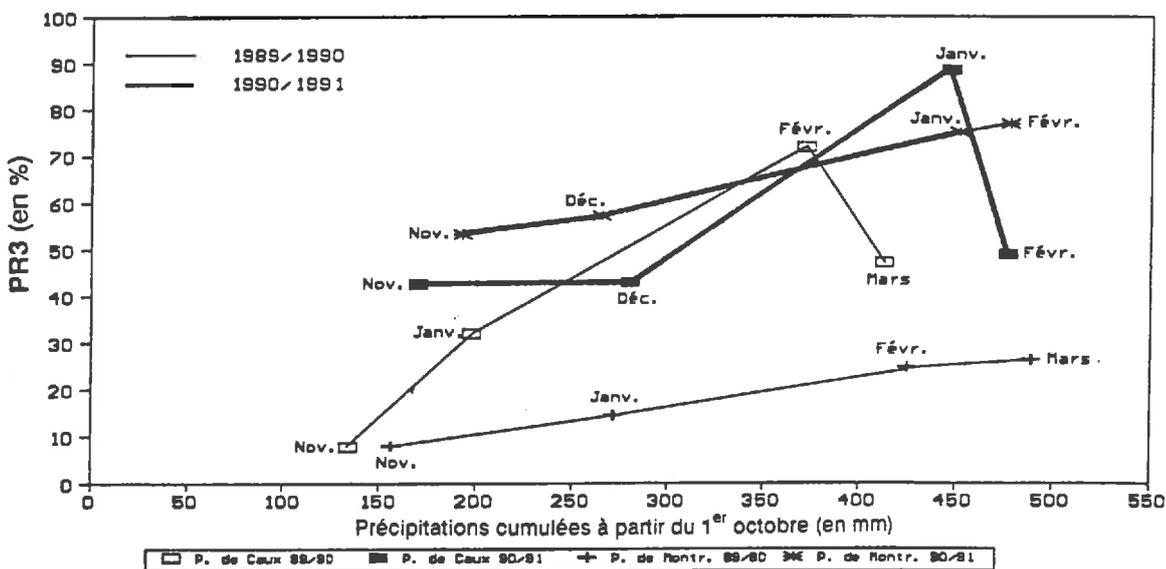


Fig. 8.4.c : évolution des proportions de surfaces (en %) répondant respectivement au critère SR3, en fonction des précipitations cumulées à partir du 1^{er} octobre.

La décroissance de la proportion des surfaces répondant à l'un ou l'autre des critères SR qui peut être notée en fin d'hiver, s'explique par le début des opérations culturales de printemps, réalisées sur certaines parcelles dont l'état de surface du sol répondait à l'un des trois critères avant la reprise du sol.

La différence entre les deux années d'étude réside dans une évolution beaucoup plus poussée de la dégradation de l'état de surface en 1990/1991, qu'en 1989/1990. C'est au dernier stade d'évolution de l'état de surface, c'est-à-dire répondant au critère SR4, que cette différence apparaît. Ainsi, ces deux années aux précipitations cumulées semblables, sont très contrastées du point de vue de l'extension des surfaces répondant au critère SR4.

La figure n°8.5 présente la relation entre PR4 et les précipitations cumulées d'intensité supérieure à 10 mm/h. L'extension des surfaces répondant au critère SR4 semble être en partie dépendante des pluies de fortes intensités. Cependant, il reste une forte variabilité résiduelle : avec 60 mm de précipitations cumulées d'intensité supérieure à 10 mm/h, l'écart des PR4 entre les deux années est de l'ordre de 50%. Ceci est lié à la chronologie des pluies importantes. En effet, le cumul de 60 mm de précipitations d'intensité supérieure à 10 mm/h est atteint dès le mois de novembre pour la campagne de 1990/1991, et seulement au mois de mars pour la campagne de 1989/1990. Ainsi, lorsque les précipitations de fortes intensités surviennent en 1989/1990, le couvert végétal est déjà suffisamment développé (entre 30 et 40%) pour intercepter une part significative de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, limitant ainsi la dégradation de l'état de surface du sol.

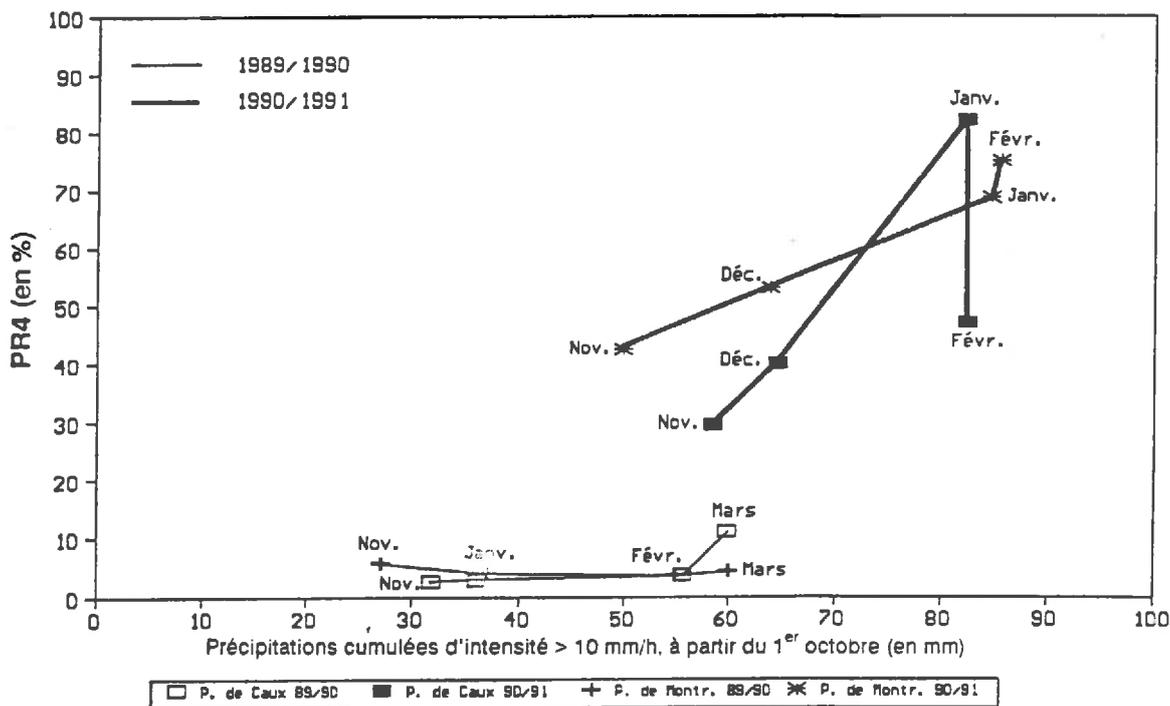


Fig. 8.5. : évolution de PR4 (en %) en fonction des précipitations cumulées d'intensité supérieure à 10 mm/h, à partir du 1^{er} octobre.

L'atteinte du critère SR4 par la surface du sol dépend non seulement de l'interaction entre les pluies et le sol, mais également de la chronologie des pluies de forte intensité. Ceci confirme que le suivi de l'état de surface est indispensable pour estimer les aires aptes à produire un ruissellement.

8.3. Choix des observations des états de surface à mettre en relation avec les volumes des rigoles

Le tableau n°8.1 et la figure n°8.3 montrent qu'au cours de l'automne hiver, il y a une augmentation progressive de l'extension des surfaces susceptibles de contribuer au ruissellement. Ceci pose le problème de la date de prise en compte des observations des états de surface du sol à mettre en relation avec les symptômes d'érosion.

Cette date est choisie de telle sorte que les observations des états de surface se rapprochent le plus des états de surface réels lors du dernier évènement pluvieux important, tenu pour responsable des dernières évolutions du volume total des rigoles. Cette date peut précéder ou suivre celle de l'épisode pluvieux important, d'où un facteur important d'imprécision de la connaissance des états de surface réels lors d'un évènement pluvieux. Deux exemples concrets de détermination de la date des observations des états de surface sont présentés en annexe 5.

Nous avons ainsi retenu comme dates d'observation des états de surface du sol à mettre en relation avec les volumes des rigoles mesurées, celles permettant d'apprécier les états de surfaces réels lors du dernier épisode pluvieux supposé érosif, soit :

- février ou mars 1990, pour les rigoles mesurées en mars 1990 dans les BVE du premier échantillon ;
- janvier 1991 pour celles mesurées en février 1991 dans les BVE du premier échantillon ;
- respectivement novembre et décembre 1991 et janvier 1992 pour celles mesurées en novembre 1991, décembre 1991 et janvier et février 1992 dans les BVE du second échantillon.

En 1988/1989, l'observation des états de surface n'a pas été réalisée de manière exhaustive pour l'ensemble des unités élémentaires homogènes (même parcelle, même classe texturale) des 20 BVE du 1^{er} échantillon. Néanmoins, compte tenu des conditions climatiques particulières de cet hiver (pluies importantes en début de période et somme toute assez semblables sur l'ensemble des BVE), on peut raisonnablement admettre que les surfaces répondant au critère **SR4**, quel que soit le BVE, sont (BEUVE, 1989) :

- les chantiers de récolte non travaillés ;
- les cultures d'hiver ayant un sol de classe texturale LMS, LM, LS, SL ou S.

Chapitre 9

ANALYSE DE LA RELATION ENTRE LE VOLUME DES RIGOLES ET LES SURFACES APTES A PRODUIRE UN RUISSELLEMENT

Nous venons de voir que l'érosion en rigoles se caractérise par une très forte variabilité entre BVE d'une même année et entre années pour un même BVE. Nous allons donc d'abord vérifier l'hypothèse du rôle supposé déterminant des surfaces aptes à produire un ruissellement dans l'explication de la variabilité des volumes de rigoles, puis chercher à identifier d'éventuels d'autres facteurs explicatifs.

9.1. Mise en relation du volume des rigoles avec les surfaces aptes à produire un ruissellement

Les figures n°9.1 et 9.2 présentent la relation entre le taux d'érosion et la proportion des surfaces aptes à produire un ruissellement répondant respectivement au critère **SR2** et **SR4**, pour les 20 BVE du 1^{er} échantillon, les trois années réunies (pour les valeurs numériques, Cf. annexe 6, tableau n°1). Les trois individus issus d'un même BVE peuvent être considérés comme partiellement indépendants, leurs caractéristiques climatiques et d'occupation du sol étant différentes, tandis que celles d'ordre morphologique et pédologique sont identiques.

Les proportions de surfaces répondant au critère **SR2** (**PR2**) ne sont que faiblement liées à la variabilité du taux d'érosion en rigoles par BVE. L'augmentation de la valeur de **PR2** s'accompagne d'un accroissement du risque d'une érosion en rigoles importante. Ainsi, les BVE ayant un **PR2** faible ont un taux d'érosion également faible, voire nul. Par contre, les BVE ayant un **PR2** élevé peuvent aussi bien avoir un taux d'érosion très important qu'un taux nul. Parmi les BVE dont **PR2** est supérieur à 90%, CSP a un taux d'érosion de 12 m³/ha, tandis que AA1 n'a pas d'érosion en rigoles. **PR2** semble donc fixer un taux d'érosion maximum que peut avoir un BVE, taux croissant avec l'augmentation de la valeur prise par **PR2**. Ceci suggère que **PR2** correspond à l'extension maximale des surfaces aptes à produire un ruissellement, mais dont seule une partie plus en moins importante contribue effectivement au ruissellement, en fonction d'autres caractéristiques.

Les années apparaissent distinctes les unes des autres. Les points de 1988/1989 s'inscrivent dans pratiquement toute la gamme de variation, avec une tendance à l'augmentation du taux d'érosion pour des **PR2** croissants. En revanche, ceux de 1989/1990 se répartissent le long de l'axe des abscisses : un taux d'érosion faible, voire nul, quelle que soit la valeur prise par **PR2**. Les points de 1990/1991 présentent la même tendance que celles de 1988/1989, mais avec une gamme de variation plus étendue. La variable **PR2** n'a donc pas la même répercussion sur le risque d'érosion en rigoles d'une année à l'autre.

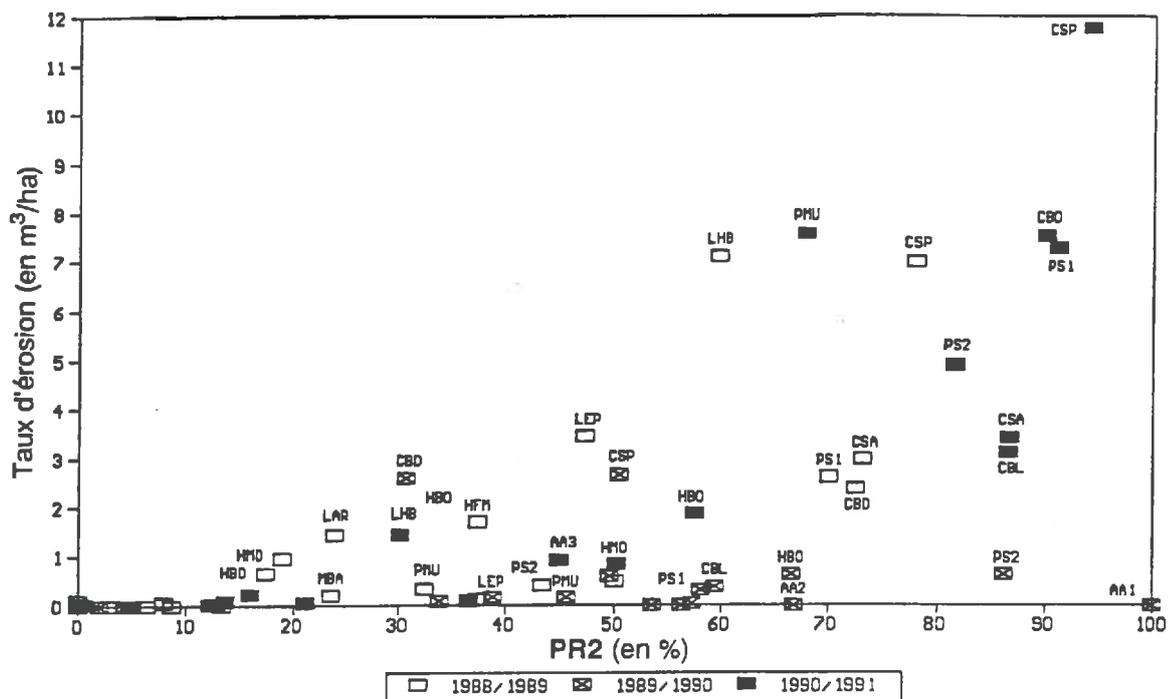


Fig. 9.1. : variabilité du taux d'érosion (en m^3/ha) en fonction de PR2 (en %), pour les trois années réunies (sauf 1988/1989, PR4 reconstitué).

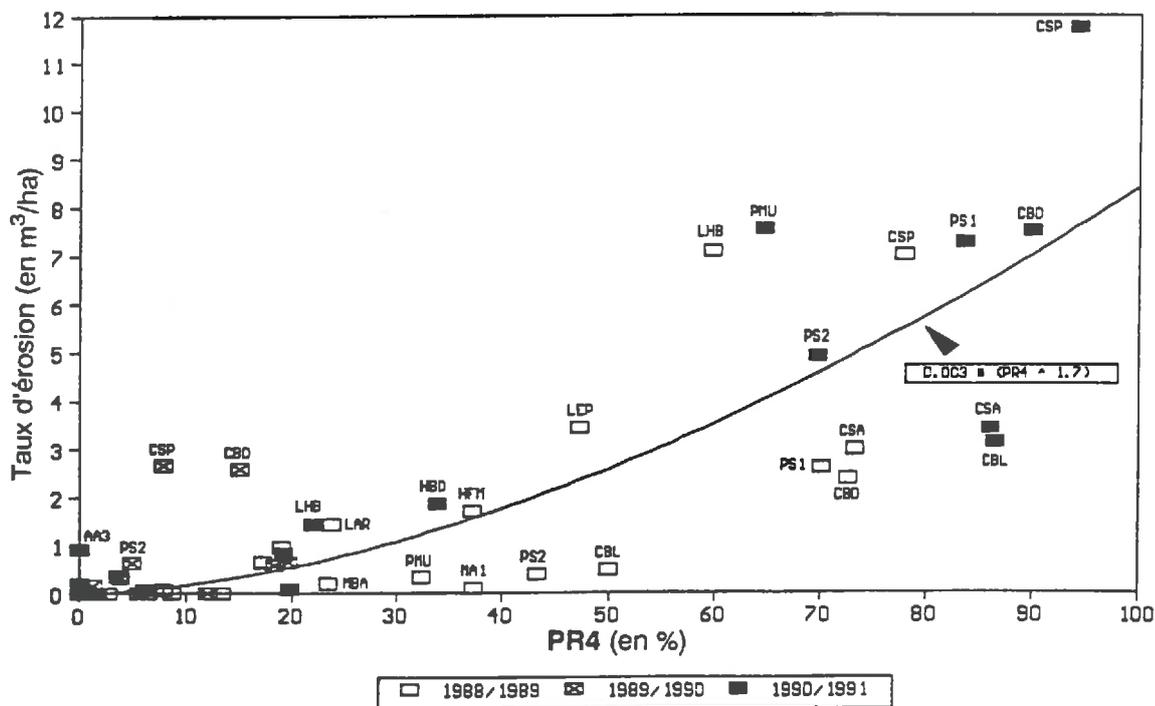


Fig. 9.2. : variabilité du taux d'érosion (en m^3/ha) en fonction de PR4 (en %), pour les trois années réunies.

Remarque : PR2 et PR4 de 1989/1990 sont obtenus d'après les observations de février ou mars 1990, et non janvier 1990 comme ceux de la figure n°8.1.a, d'où de légères différences.

La relation entre **TE** et **PR4** tend vers une forme curvilinéaire (figure n°9.2), l'influence de la variable **PR4** semblant de plus en plus forte lorsque ses valeurs croissent. L'interprétation de cette forme de relation est éventuellement imputable à une non-linéarité de la relation incision – débit. Une autre interprétation nous semble devoir être mentionnée, fondée sur l'idée que la liaison entre **TE** et **PR4** traduit non seulement un effet de débits hydrauliques croissant lorsque **PR4** augmente, mais aussi un effet de connexions de plus en plus nombreuses entre les surfaces contributives au ruissellement et les axes de collecte du ruissellement. Jusqu'à des valeurs de **PR4** d'environ 50%, on pourrait encore trouver des configurations sans connexions entre les surfaces ruisselantes et le réseau des collecteurs, aboutissant à une très faible érosion en rigoles. Au delà, cette probabilité deviendrait très faible et évidemment nulle pour un **BVE** ayant un **PR4** de 100%.

9.2. Analyse de la variabilité résiduelle

Autour de la tendance générale, correspondant à la relation entre le taux d'érosion (**TE**) et **PR4**, il existe une variabilité résiduelle importante (surtout pour les **BVE** à **PR4** élevé).

Les caractéristiques climatiques, pédologiques et agraires sont déjà prises en compte par l'intermédiaire de la variable **PR4**. En effet, les pluies contribuent à la fermeture de la surface du sol et à la réduction de la rugosité, dont la valeur initiale est par ailleurs variable. L'absence d'un éventuel effet année ou région est confirmée par les résidus moyens par année et par région (Cf. tableau n°5 de l'annexe 6). La moyenne des résidus par année est en effet proche de zéro quelle que soit l'année, tandis que la moyenne des résidus par région varie fortement d'une année à l'autre. Par contre, il existe un effet **BVE** : quelle que soit l'année, pour certains le résidu est systématiquement positif (par exemple **CSP**), pour d'autres négatif (par exemple **CBL**). Cet effet **BVE** doit probablement être lié à des caractéristiques pérennes propres au **BVE**, particulièrement celles d'ordre morphologique.

La mise en évidence du rôle éventuel d'autres facteurs est effectuée selon deux méthodes : par la mise en relation des résidus avec les autres variables ; par l'analyse comparative de **BVE** d'une même région ayant un résidu opposé mais un **PR4** proche.

D'après les processus d'érosion par ruissellement, la pente joue un rôle sur la vitesse acquise par un ruissellement. Parmi l'ensemble des variables de pente disponibles, seule la pente globale du **BVE** permet d'expliquer partiellement la variabilité résiduelle : la valeur de cette variable augmente avec l'accroissement du résidu (Cf. figure n°4 de l'annexe 6). Nous rappelons que les proportions de surface à pentes supérieures à 5 ou 10% sont étroitement liées aux proportions de surface ayant un sol à forte teneur en argile, peu propice au ruissellement, ce qui peut expliquer l'absence de corrélation entre ces deux variables de pente et les résidus (Cf. figures n°6 et 7 de l'annexe 6).

L'intensité de la concentration du ruissellement sur des collecteurs, exprimée sous la forme d'une densité de lignes de concentration morphologiques, devrait favoriser l'érosion en rigoles. Cependant, cette variable n'est pas corrélée aux écarts résiduels (Cf. figure n°5 de l'annexe 6). Ainsi, notre hypothèse sur le rôle des collecteurs du ruissellement dans l'explication de la variabilité de l'érosion en rigole n'est pas vérifiée à l'échelle globale du **BVE**.

Parmi les lignes de concentration morphologiques du **BVE**, le thalweg est la plus importante, et contribue à une forte part des volumes de rigoles. Les proportions de surfaces susceptibles de contribuer au ruissellement, répondant au critère **SR4**, localisées en amont du thalweg devraient permettre de vérifier le rôle éventuel de la localisation des surfaces par rapport aux collecteurs incisés. Cependant, là encore, à l'échelle globale du **BVE**, cette variable ne permet pas d'expliquer la variabilité résiduelle (Cf. figure n° 2 de l'annexe 6).

Bien que les caractéristiques pédologiques soient prises en compte par la variable PR4 du point de vue de l'aptitude d'une surface à produire un ruissellement, nous avons tout de même vérifié leur éventuelle relation avec les résidus. En effet, l'incision par ruissellement d'un sol est, en plus des caractéristiques hydrauliques de l'écoulement, fonction de la cohésion du sol. La gamme de variation des résidus décroît avec l'augmentation des proportions de surface ayant un sol à teneur en argile supérieur à 17.5%, et inversement pour celles ayant un sol à teneur en argile inférieur à 17.5%. Ceci suggère que la forte teneur en argile d'un sol est un facteur limitant de l'érosion en rigoles, et peut être pas uniquement sur la dégradation de l'état de surface. Par contre, le caractère sableux des sols semble les rendre plus sensibles à l'incision. Les BVE ayant un sol à teneur en sable supérieure à 35% ont effectivement tous un résidu positif (il s'agit des BVE du Laonnois).

N'ayant pu mettre en évidence le rôle d'autres facteurs sur l'érosion en rigole par l'analyse des résidus, une étude comparative est réalisée pour les BVE du Pays de Caux (sols et précipitations quasi-identiques). Ceux-ci ont en 1988/1989 et en 1990/1991 des proportions de surfaces susceptibles de contribuer au ruissellement du même ordre (autour de 70%, sauf CBL avec 50%, en 1988/1989 ; autour de 90% en 1990/1991). Cependant, leur taux d'érosion est très variable (de 0.5 à 7 m³/ha en 1988/1989 ; de 3.1 à 11.7 m³/ha en 1990/1991) (figure n°9.3). L'analyse détaillée de ce deux BVE au comportement extrême (CSP et CBL) devrait permettre d'identifier les caractéristiques à l'origine de ces écarts.

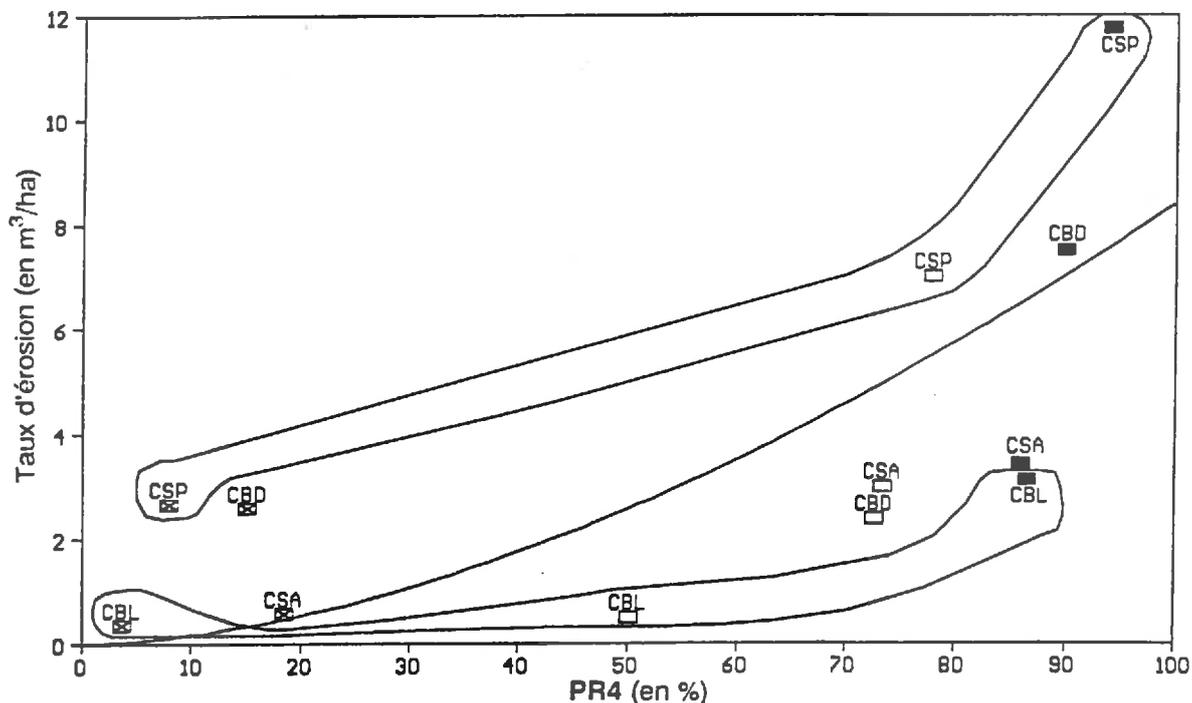


Fig. 9.3. : variabilité du taux d'érosion (en m³/ha) en fonction de PR4 (en %), uniquement pour les BVE du Pays de Caux, les trois années réunies.

Le bassin versant CSP a systématiquement un taux d'érosion supérieur aux autres BVE, même en 1989/1990 (année avec pourtant peu d'érosion). Il se caractérise par une morphologie permettant une rapide concentration du ruissellement sur le thalweg (forte densité des lignes de concentration, longueur du thalweg importante par rapport à la surface totale du BVE, pentes fortes sur les versants) (tableau n°9.2), et une morphologie favorable à une importante érosion du thalweg (pente moyenne du thalweg élevée, longueur du thalweg importante par rapport à la taille du BVE). Des caractéristiques autres que morphologiques permettent également d'expliquer la forte érosion en rigole de CSP. Il s'agit de la présence d'une limite de parcelle sur pratiquement toute la longueur du thalweg, double quasiment sa longueur (formation de grosses rigoles de part et d'autre de cette limite de parcelle). De plus, l'incision du thalweg se fait systématiquement au même endroit, favorisée par la mauvaise cohésion des matériaux de remblais des anciennes rigoles.

Tableau 9.2. : caractéristiques morphologiques des BVE du Pays de Caux.

Variables	CSP	CBL
Surface totale du BVE	32 ha	95 ha
Longueur du thalweg	500 m	220 m
Proportion de surface à pente supérieure à 5%	11.0 %	0.3 %
Pente moyenne du thalweg	5.2 %	1.7 %
Indice de Gravélius : K	1.3	1.1
Densité des lignes de concentration morphologiques (thalweg compris)	38 m/ha	37 m/ha

Le cas de CBL est inverse. Ce BVE a systématiquement une faible érosion par rapport à sa proportion de surfaces aptes à produire un ruissellement. Les caractéristiques morphologiques de ce bassin versant ne permettent pas une importante érosion en rigole : pentes très faibles, faible longueur de thalweg pour un BVE de grande taille. Seule la densité des lignes de concentration devrait permettre la mise en place de nombreuses rigoles, mais leurs pentes réduites limitent le risque d'incision.

Le volume d'une rigole est déterminé par deux composantes : sa longueur et sa section d'incision. On peut se demander si la variabilité résiduelle est due à une mauvaise prise en compte d'une des deux composantes du volume des rigoles. La relation entre le taux d'érosion et la densité des rigoles (rigoles à schéma d'incision parallèle exclues, non dépendantes de la concentration du ruissellement), présentée par la figure n°9.4, fait apparaître que la variabilité des volumes des rigoles est principalement associée à celle des longueurs des rigoles. Ceci est confirmé par la répartition des BVE d'une même région, d'une même année dans la relation taux d'érosion – densité de rigoles, en fonction de leurs résidus dans la relation taux d'érosion – PR4 (figure n°9.5).

Nous avons sélectionné trois groupes de BVE, correspondant à des BVE d'une même région et d'une même année. Les BVE des groupes A et B se caractérisent par une très forte variabilité de leurs taux d'érosion, tandis que leurs PR4 sont proches. En revanche le taux d'érosion et PR4 des BVE du groupe C présentent tous deux des valeurs assez semblables. En reportant ces trois groupes sur le nuage de points de la figure n°9.4, on constate que les BVE des groupes A et B s'ordonnent le long de la droite d'ajustement de la relation taux d'érosion – densité de rigoles. Inversement, les BVE du groupe C sont regroupés. Si la variabilité des taux d'érosion est mal expliquée c'est donc d'abord qu'on explique mal celle des longueurs de rigoles.

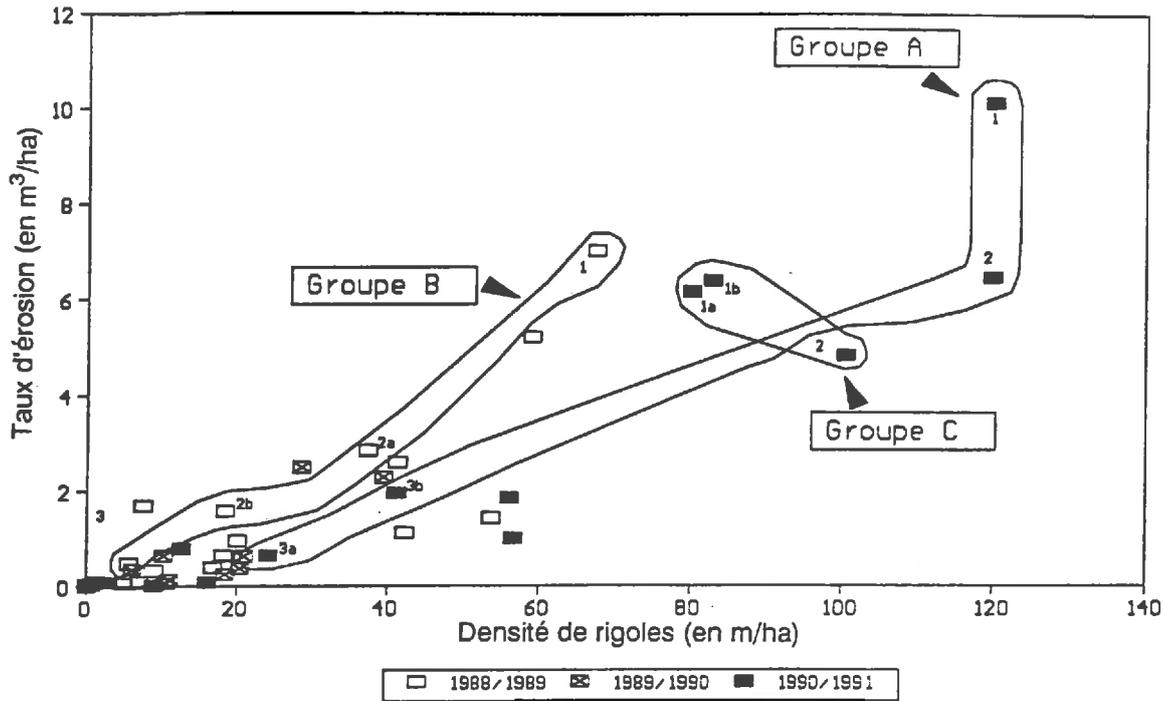


Fig. 9.4. : relation entre le taux d'érosion par BVE (m³/ha) et la densité des rigoles par BVE (m/ha).

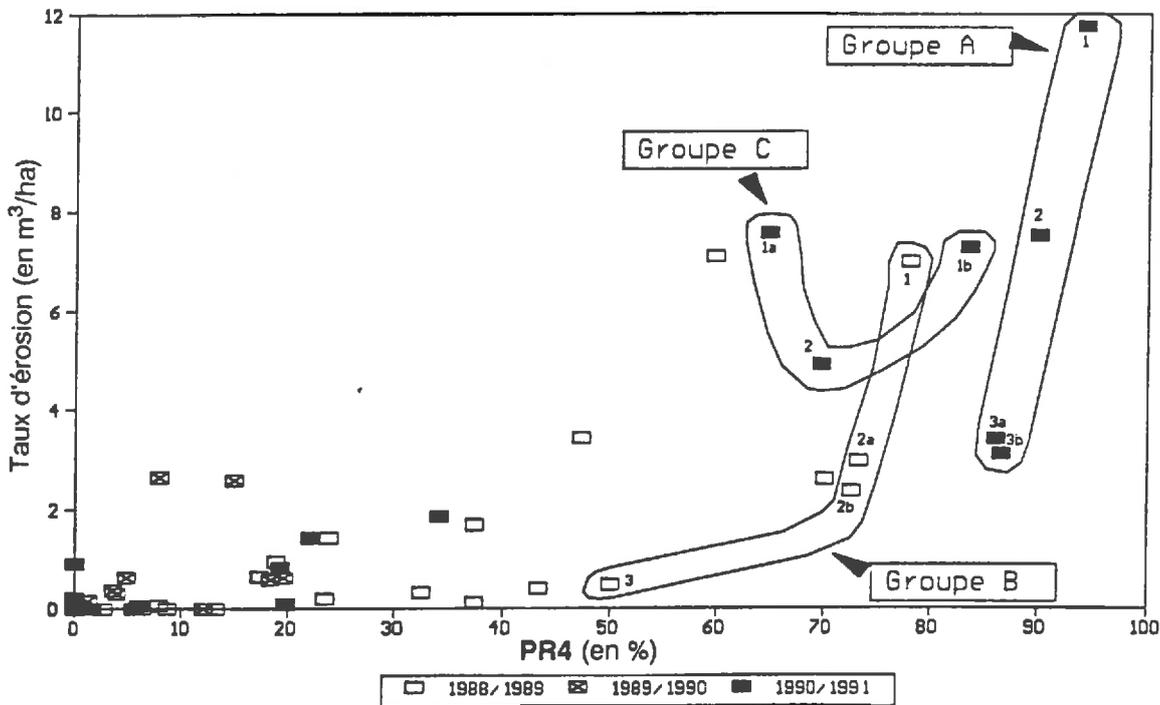


Fig. 9.5. : relation entre le taux d'érosion par BVE (m³/ha) et la proportion de surfaces aptes à produire un ruissellement : PR4 (en %).

9.3. Tentative de validation avec les BVE du second échantillon

La figure n°9.6 présente la relation entre le taux d'érosion et les proportions de surfaces aptes à produire un ruissellement, répondant au critère SR4, pour les BVE du 2ème échantillon aux quatre dates d'observation de l'automne-hiver 1991/1992. La tendance générale est proche de celle obtenue d'après les mesures réalisées sur le premier échantillon de BVE.

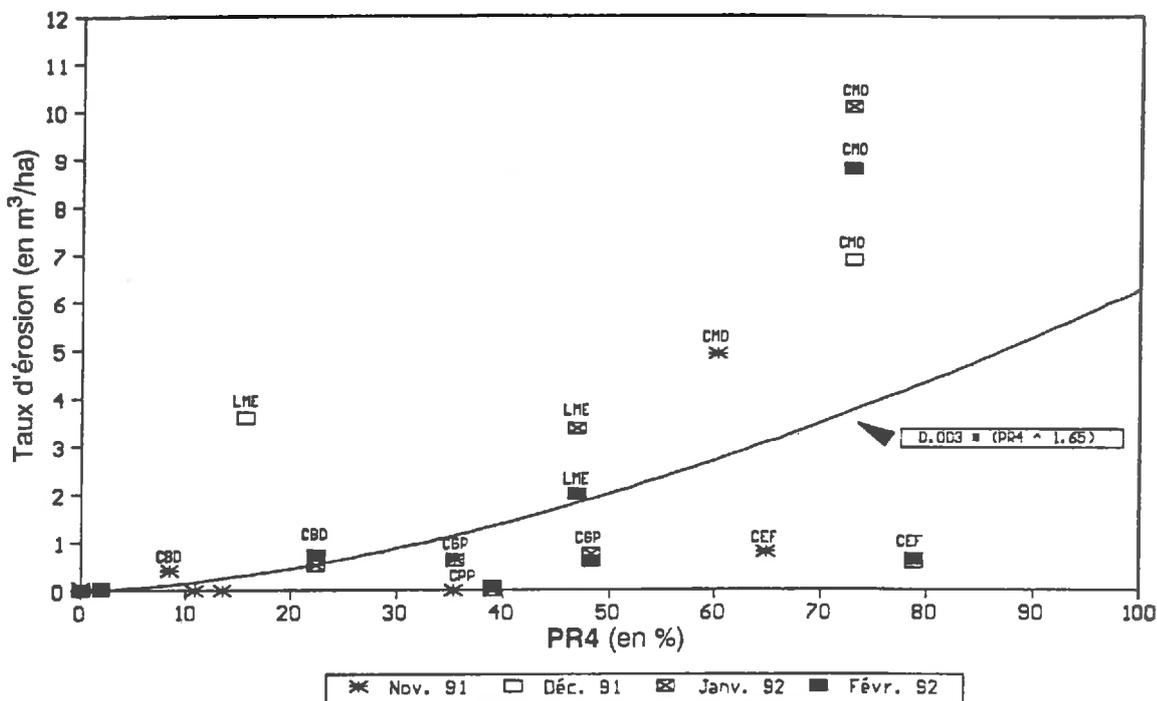


Fig. 9.6. : variabilité du taux d'érosion (en m³/ha) en fonction de PR4 (en %), pour les quatre mois de mesures de 1991/1992, deuxième échantillon de BVE.

La fonction d'ajustement des taux d'érosion (TE) en fonction de PR4, pour les quatre mois réunis est très proche, pour ainsi dire identique à celle obtenue avec le premier échantillon de BVE :

Equation n°2

$$\text{TE (en m}^3\text{/ha)} = 0.0017 \text{ PR4}^{1.80} \quad (\text{en m}^3\text{/ha})$$

avec un R² de 0.42 et un écart type résiduel de 1.73 en m³/ha.

Cependant, certains points s'écartent fortement de cette tendance (LME et CEF), d'où le coefficient de corrélation relativement faible. Rn fait, ces BVE sont des cas particuliers aisément explicables.

Le bassin versant LME a un taux d'érosion élevé, mais une faible proportion de surfaces susceptibles de contribuer au ruissellement. L'unique portion de parcelle de LME en état de contribuer au ruissellement, est également le siège d'une intense érosion sous forme d'un système très dense de rigoles à schéma parallèle, associée à des fortes pentes et des textures sableuses.

Le bassin versant CEF a un taux d'érosion faible, mais une forte proportion de surfaces susceptibles de contribuer au ruissellement. Ce BVE se compose uniquement de deux parcelles, toutes deux en chantier de récolte non travaillé, donc productrices de ruissellement, mais rendues résistantes à l'incision par le fort compactage du sol.

Conclusion

Le principal facteur d'explication de la variabilité des volumes de rigoles est l'extension des surfaces aptes à produire un ruissellement. Le critère **SR4** correspond au meilleur estimateur de ces surfaces. Ce critère est caractérisé par la présence de croûtes sédimentaires couvrant plus de 90% de la surface du sol ou d'empreintes d'engins agricoles sur au moins 50% de la surface, à condition que la notation de rugosité dans le sens du travail du sol corresponde à la classe **R0**.

La corrélation sous-estimée peut être qualifiée de spatiale puisque, pour une année donnée, elle se manifeste lorsqu'on fait varier les symptômes d'érosion et les états de surface entre BVE, c'est-à-dire entre sites différents. Cette corrélation dans l'espace confirme la corrélation dans le temps qu'avaient constatée BOIFFIN et al. (1988) grâce au suivi du déclenchement et du développement de rigoles dans le Pays de Caux. Ces deux types de corrélation sont redevables de la même interprétation : **la formation des rigoles est imputable au ruissellement superficiel, issu des surfaces ayant des capacités d'infiltration et de rétention superficielle limitées.** Ces conditions permettent à des pluies d'hiver de faible intensité de générer un excès d'eau suffisant pour provoquer un ruissellement, qui atteint les vitesses et débits critiques à l'incision du sol grâce au regroupement des écoulements à partir d'impluviums de très grande dimension.

Il subsiste cependant une forte variabilité résiduelle autour des relations mises en évidence. **L'analyse de cette dernière fait apparaître une influence de la pente et de la sensibilité du sol à l'incision.** Le rôle de la pente a été mis en évidence par la variable pente globale du BVE lors de l'analyse comparative entre CSP et CBL, et du cas particulier de LME. La relation faiblement significative qui apparaît entre les résidus et les proportions de surfaces ayant un sol à teneur en sable supérieure à 35%, dont la cohésion est probablement faible, suggère que la sensibilité à l'incision des sols doit contribuer à la variabilité du taux d'érosion. Cette hypothèse semble confirmée a contrario par le cas de CEF. Le faible taux d'érosion par rapport à **PR4** de ce dernier est lié à la forte cohésion du sol, non pas due à sa texture, mais à son compactage.

Cependant, **quelles que soient les variables exprimant la pente ou la cohésion du sol, elles ne sont pas retenues dans les procédures statistiques utilisées, comme variables explicatives des taux d'érosion des BVE.** Cette non prise en compte des variables pente et cohésion du sol paraît au premier abord surprenante. En fait, à l'échelle globale du BVE, il existe dans notre échantillon de BVE (Cf § 2.3.2 et annexe 3) une forte corrélation entre les surfaces à fortes pentes et l'extension des sols à fortes teneurs en argiles. Or, leurs influences respectives sur les processus d'érosion par ruissellement concentré sont antagonistes. Le rôle des pentes, intervenant comme facteur aggravant du risque d'érosion en rigoles, ne peut être mis en évidence qu'à cohésion du sol équivalente, et inversement pour le rôle de la cohésion du sol. Ceci ne peut cependant être réalisé à l'échelle du BVE.

En définitive la variabilité résiduelle du taux d'érosion en fonction de **PR4** traduit vraisemblablement le fait que l'on rend mal compte de la variabilité des longueurs incisées. Ceci suggère **un défaut de prise en compte de la répartition des surfaces aptes à produire un ruissellement au sein du BVE.** Il est donc nécessaire de changer de niveau d'appréhension spatiale dans l'analyse de la variabilité de l'érosion en rigoles.

Quatrième partie

ETUDE DU RESEAU DES RIGOLES AU SEIN DES BVE

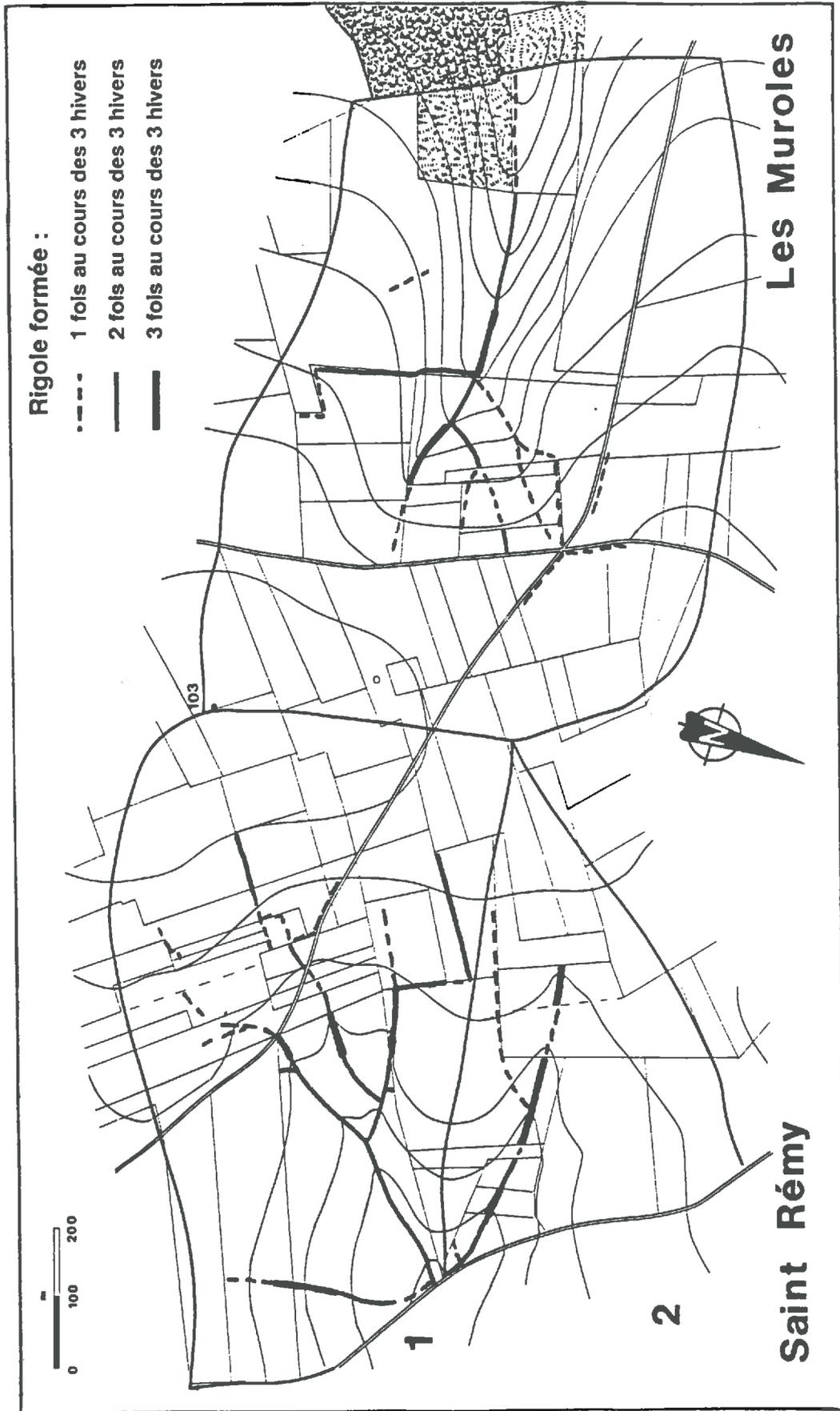


Fig. 10.1. : localisation des rigoles en fin d'hiver sur les trois BVE du Pays de Montreuil, en 1988/1989, 1989/1990 et 1990/1991.

Introduction

La localisation des rigoles n'est pas due au hasard, mais se fait suivant certains motifs linéaires d'origine topographique (permanents) ou agraire (temporaires).

La superposition des cartes de localisation des rigoles en fin d'hiver met en évidence une certaine permanence des localisations des rigoles. Cette superposition dessine une ébauche d'un réseau de parcours préférentiels du ruissellement concentré.

Chaque année une partie plus ou moins importante de ce réseau est effectivement incisée (figure n°10.1.), d'où l'idée que le ruissellement concentré s'effectue sur des axes identifiables, dont le tracé est quasi-pérenne d'une année à l'autre. Ce tracé forme un réseau susceptible d'être en partie incisé, selon la position et l'importance des surfaces aptes à contribuer au ruissellement, et en fonction des caractéristiques du terrain au niveau des axes de concentration du ruissellement.

Une nouvelle méthode d'analyse de la variabilité de l'érosion en rigoles peut donc être développée, en analysant le réseau des parcours du ruissellement concentré au sein de chaque BVE. Cette étude est limitée aux systèmes de rigoles à schéma à chenal unique ou en chevelu. En effet, les systèmes de rigoles à schéma parallèle présentent une relation volumes incisés – longueurs incisées très différente de celle des systèmes de rigoles à chenal unique ou en chevelu. L'incision des rigoles à schéma parallèle est déterminée, pour certaines par les processus d'érosion en rigole – interrigoles, pour d'autres par la concentration du ruissellement sur des motifs linéaires d'origine agraire (par exemple, les traces de roue). Toutes les rigoles à chenal unique sont dues à la concentration du ruissellement, ce qui est également le cas pour les rigoles en chevelu. La contribution au volume incisé total par BVE des systèmes de rigoles à schéma parallèle est par ailleurs relativement faible (de 9 à 23% selon les années).

Chapitre 10

DEMARCHE

10.1. Principe de la démarche

Le principe de la démarche consiste à rendre compte de la variabilité des volumes de rigoles :

- d'une part, en distinguant l'analyse des longueurs incisables, c'est-à-dire du réseau des collecteurs du ruissellement, de l'analyse des sections d'incision de chaque tronçon du réseau ;
- d'autre part en ne travaillant plus à l'échelle globale du BVE, mais à celle du réseau des collecteurs du ruissellement.

La démarche comporte cinq étapes :

- 1^{ère} étape** : identification du réseau des collecteurs du ruissellement de chaque BVE, estimation de la longueur totale potentiellement incisable ;
- 2^{ème} étape** : découpage du réseau en segments à caractéristiques pédologiques et agraires homogènes ;
- 3^{ème} étape** : inventaire et caractérisation des variables supposées contrôler la section d'incision de chaque segment du réseau ;
- 4^{ème} étape** : étude de la relation entre les sections d'incision observées et les variables supposées explicatives à l'échelle du segment de réseau ;
- 5^{ème} étape** : reconstitution des volumes d'incision, d'après les sections d'incision estimées et les longueurs incisables, par segment, puis par BVE.

10.2. Procédures

La construction du réseau des collecteurs du ruissellement requiert les cartes suivantes :

- carte topographique du BVE : avec sa limite, ses lignes de concentration morphologiques ;
- carte des pentes : avec les limites de classe de 2%, 5% et 10% ;
- carte du parcellaire (chemins et routes inclus) : avec les limites de parcelles, le sens du travail et la localisation des fourrières et des dérayures spécifiques à chaque campagne de travaux culturaux.

10.2.1. Construction du réseau des collecteurs du ruissellement

Tout motif linéaire en dépression, susceptible de concentrer et de guider le ruissellement, est considéré comme un élément du réseau des collecteurs du ruissellement. Pour pouvoir constituer la base d'une modélisation, la construction du réseau des collecteurs du ruissellement concentré doit être réalisée indépendamment de l'observation des rigoles sur le terrain, c'est-à-dire en début d'automne, avant que n'apparaissent les premières rigoles. C'est pourquoi les procédures suivantes ont été adoptées.

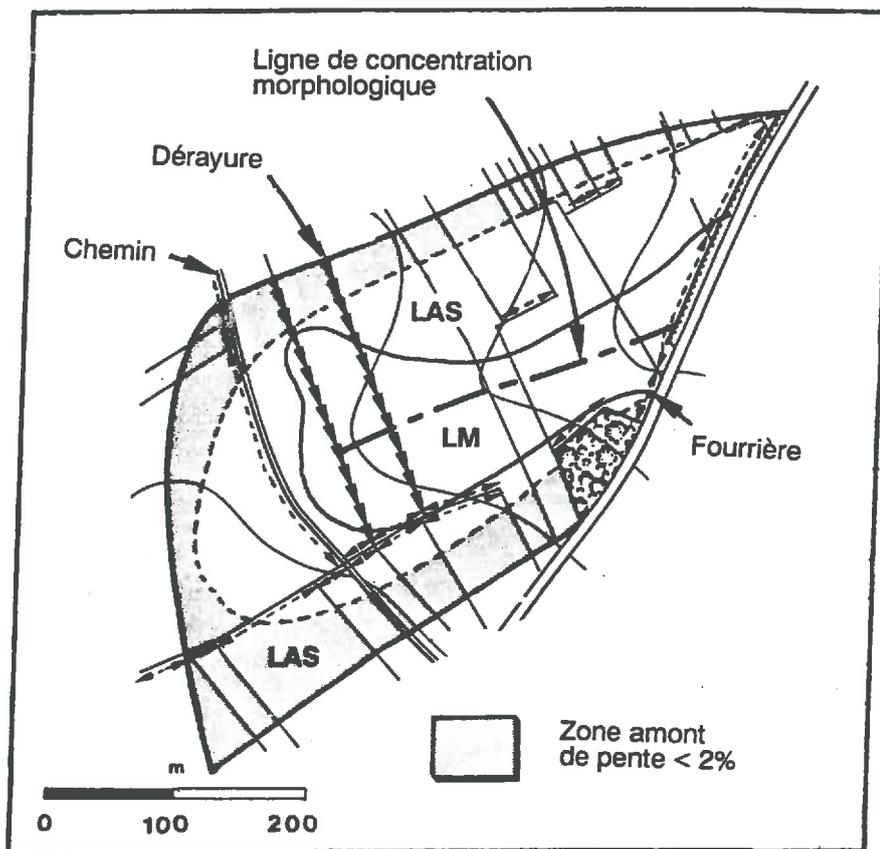


Fig. 10.2. : zone amont à pente inférieure à 2% exclue de l'aire de construction du réseau des collecteurs, localisation des lignes de concentration morphologiques, des chemins, des fourrières et dérayures sur le BVE de HBO en 1990/1991.

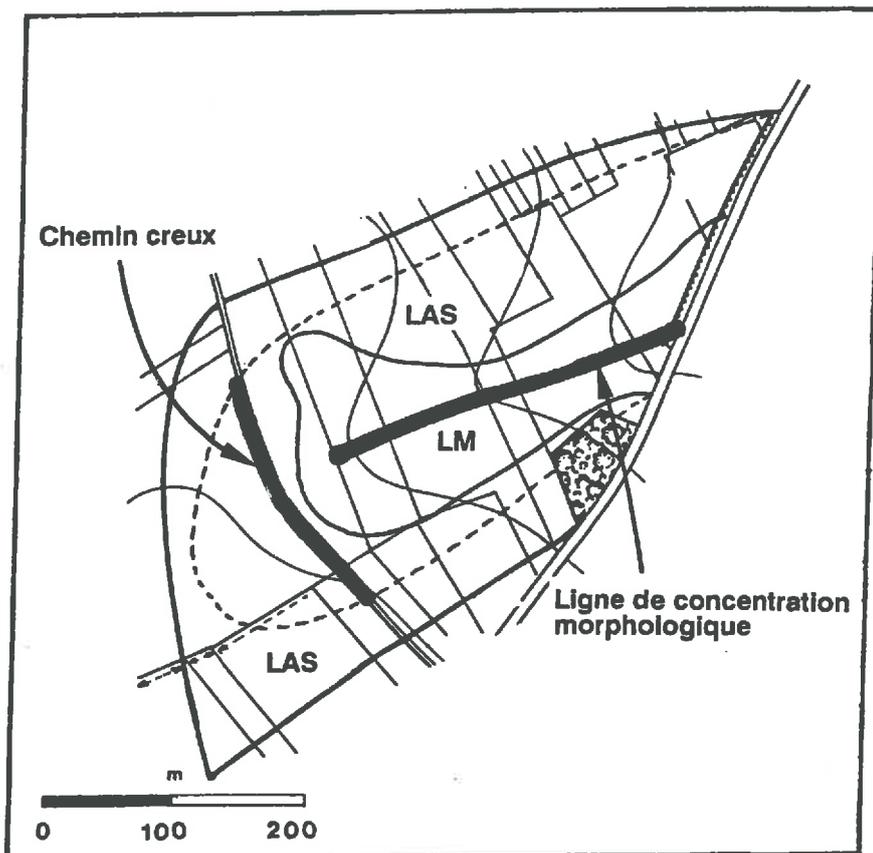


Fig. 10.3. : identification des tronçons pérennes du réseau de HBO en 1990/1991.

a. Zone de construction du réseau

La partie amont du bassin versant en pente inférieure à 2% ne subit pas ou peu d'érosion en rigole (de 0 à 5% du volume total des rigoles). De plus, la prédiction des parcours du ruissellement concentré sur de courtes distances y est particulièrement délicate. La part réduite des rigoles mises en place dans cette zone ne justifie pas l'important risque d'erreur que représente l'introduction de cette zone dans l'aire de construction du réseau des collecteurs du ruissellement, non pas tant sur le tracé des collecteurs, mais surtout pour les surfaces d'alimentation en ruissellement qui leur sont connectées. En effet, dans cette zone, les moindres variations topographiques et les travaux agraires peuvent radicalement modifier la direction du ruissellement, sans qu'elle puisse être déterminée par avance. En revanche, l'erreur ainsi induite devient négligeable pour les collecteurs situés en aval de cette zone, vu qu'ils concentrent le ruissellement provenant de sur plus grandes.

Par convention, le réseau des collecteurs du ruissellement est donc uniquement reconstitué sur la partie du BVE restant après le retrait de la zone amont en pentes inférieures à 2% (figure n°10.2).

b. Eléments du réseau

Tout axe pouvant concentrer le ruissellement issu d'une ou plusieurs parcelles est considéré comme un élément constitutif du réseau.

Le réseau se compose de trois types d'éléments (figure n°10.2) :

- les lignes de concentration liées à la morphologie du terrain ;
- les chemins en dépression, même faiblement marquée ;
- et les limites de parcelle, uniquement si elles sont soulignées par une fourrière ou une dérayure.

Les deux premiers types forment la partie pérenne du réseau des collecteurs du ruissellement (reconnus une fois pour toute lors d'une tournée de caractérisation morphologique des BVE), tandis que les éléments liés au parcellaire sont en partie spécifiques à une campagne de travaux culturels.

Identification des tronçons pérennes du réseau

L'identification et la cartographie des lignes de concentration morphologiques et des chemins pouvant collecter le ruissellement (Cf. photos n°3 et 4, annexe 8), se font directement sur le terrain (figure n°10.3).

Motifs agraires susceptibles de concentrer le ruissellement

Seuls deux motifs agraires sont aptes à drainer le ruissellement provenant des surfaces amont :

- la **fourrière** : toute opération culturale sur une parcelle nécessite d'effectuer des demi-tours en bout de parcelle. En fin d'opération, l'agriculteur repasse sur ces zones perpendiculairement au reste de la parcelle. Ces bandes en bout de parcelle sont appelées fourrières. Celles-ci sont toujours marquées par des lignes en dépression (recoupant perpendiculairement le sens du travail de la parcelle) pouvant drainer l'ensemble de la parcelle : des traces de roue de tracteur ou de semoir, des lignes de semis, voire une dérayure (Cf photo n°6, annexe 8).
- la **dérayure** : lors du labour de la parcelle la charrue découpe, retourne et déplace latéralement une bande de terre, d'où, au niveau du dernier passage, la présence d'une raie de charrue non recouverte de terre, située d'un côté ou de l'autre de la parcelle et de la fourrière.

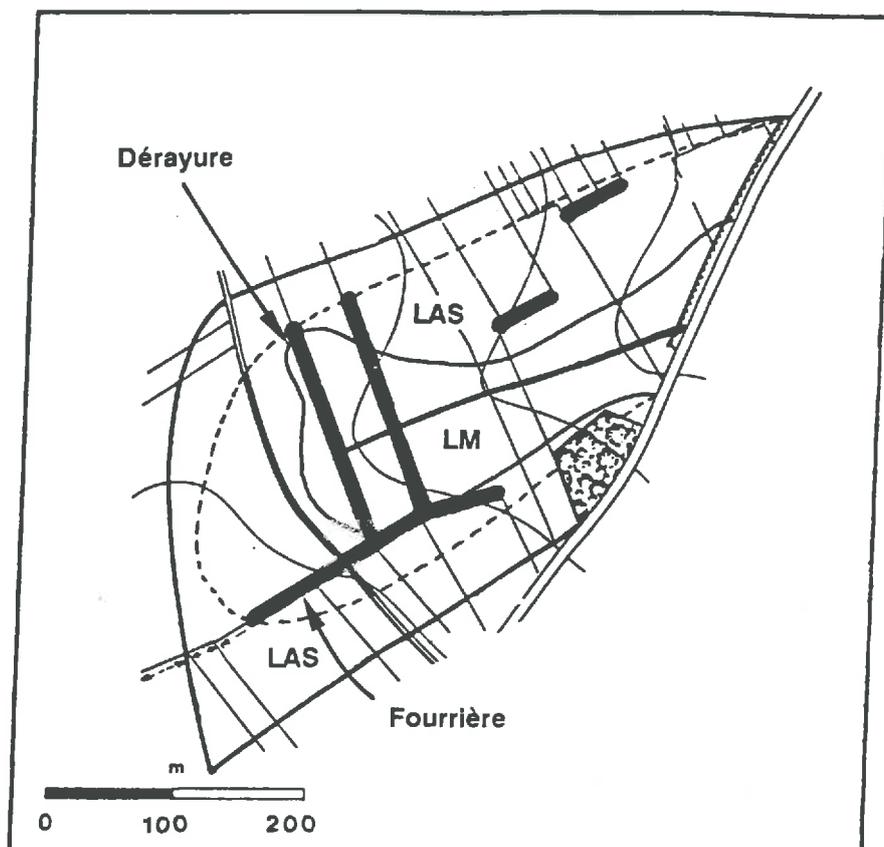


Fig. 10.4. : identification des tronçons liés aux motifs d'origine agraire du réseau de HBO en 1990/1991.

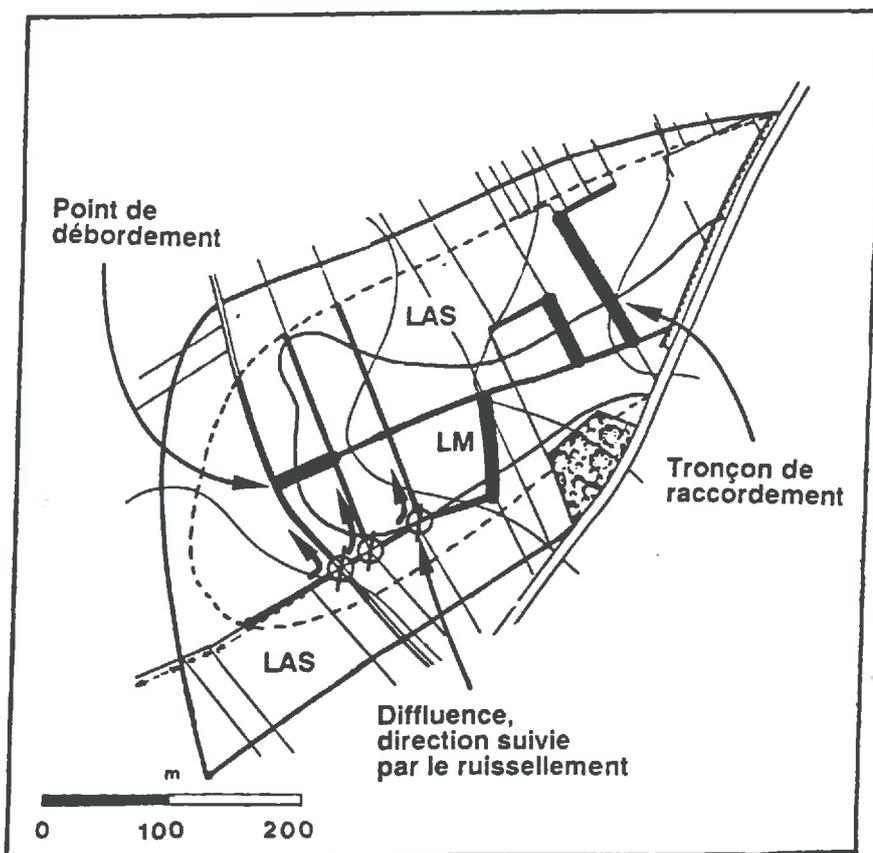


Fig. 10.5. : tracé définitif du réseau des collecteurs par le raccordement des tronçons isolés et des points de débordement des chemins au reste du réseau des collecteurs de HBO en 1990/1991.

Ces motifs sont toujours localisés à proximité ou sur une limite de parcelle. Ainsi, une limite de parcelle sera considérée comme un axe de concentration possible du ruissellement (figure n°10.4), si elle est :

- matérialisée par une dérayure ou attenante à une fourrière ;
- et située en aval de la parcelle.

Cette convention ne s'applique pas aux limites attenantes à des fourrières sans dérayure, dont le sens de travail est perpendiculaire à la plus grande pente de valeur élevée. Par convention celle-ci doit être supérieure à 10%. En effet, dans ce cas la fourrière est généralement franchie par le ruissellement, et ne peut jouer le rôle de collecteur.

c. Raccordement des tronçons les uns aux autres

L'ensemble de ces procédures de construction aboutit à un réseau de collecteurs qui n'est pas nécessairement continu. Or, n'ayant jamais observé un ruissellement concentré reprendre un caractère diffus, hormis dans les zones quasi-planes à l'aval des BVE (Cf. § 3.1.1 sur la position de l'exutoire), nous sommes amenés à postuler des règles sur la continuité du réseau.

Les tronçons isolés sont connectés au reste du réseau, en priorité par l'intermédiaire de limites de parcelles et, sinon, en travers d'une parcelle suivant le sens du travail du sol (cas exceptionnel). Ces axes de jonction sont tracés en partant du point le plus en aval du tronçon isolé, et en suivant le parcours le plus court possible, tout en respectant les règles précitées (figure n°10.5).

Le long des chemins supposés être des axes de concentration du ruissellement, il existe parfois des points de débordement uniquement identifiables sur le terrain, par exemple une entrée de champ, dont le ruissellement ne se déverse pas nécessairement sur un tronçon déjà identifié du réseau. Dans ce cas, de la même manière que pour les tronçons isolés, il faut effectuer la jonction de ces points de débordement au reste du réseau (figure n°10.5).

Enfin, certains réseaux de parcours du ruissellement concentré présentent des diffluences : deux collecteurs (ou plus) sont raccordés à l'aval d'un collecteur unique. Dans ce cas, les observations de terrain permettent souvent d'identifier le collecteur en aval effectivement connecté à celui en amont. Sinon, chacun d'eux sera supposé recevoir une part égale du ruissellement issu de l'unique collecteur amont (figure n°10.6).

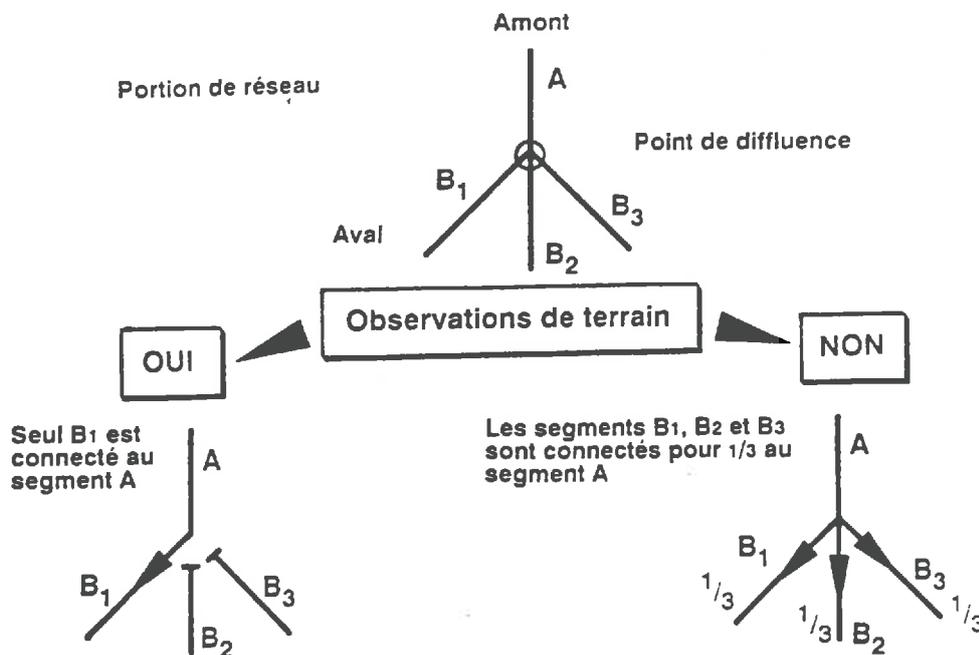


Fig. 10.6. : procédure de raccordement des tronçons en aval d'un point de diffluence.

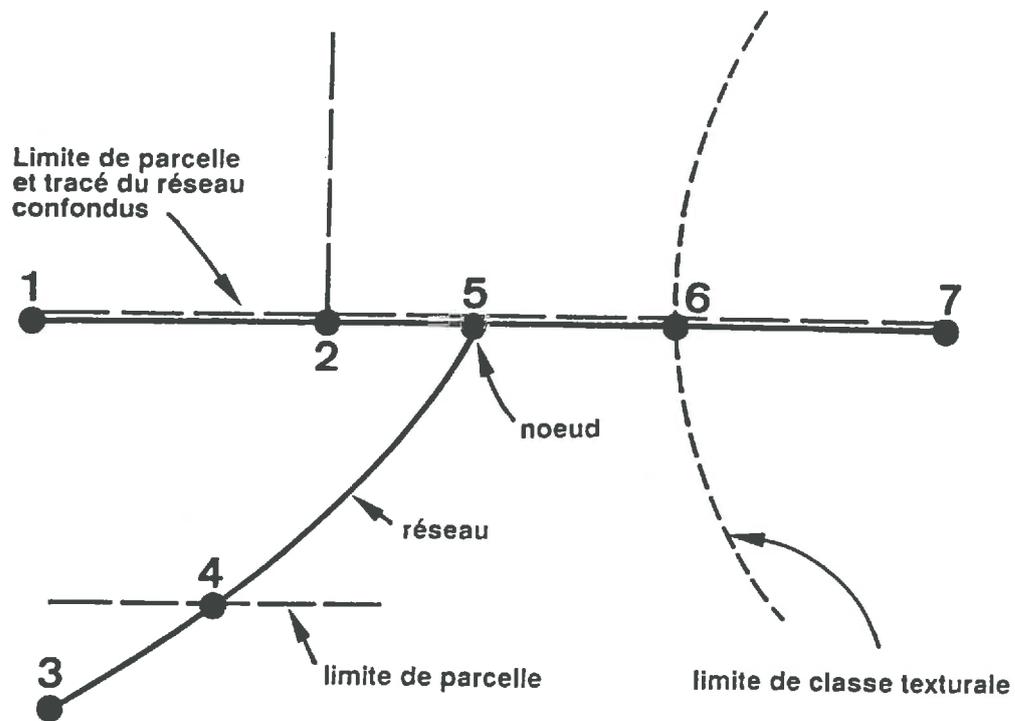


Fig. 10.7. : procédure de segmentation du réseau des collecteurs du ruissellement.

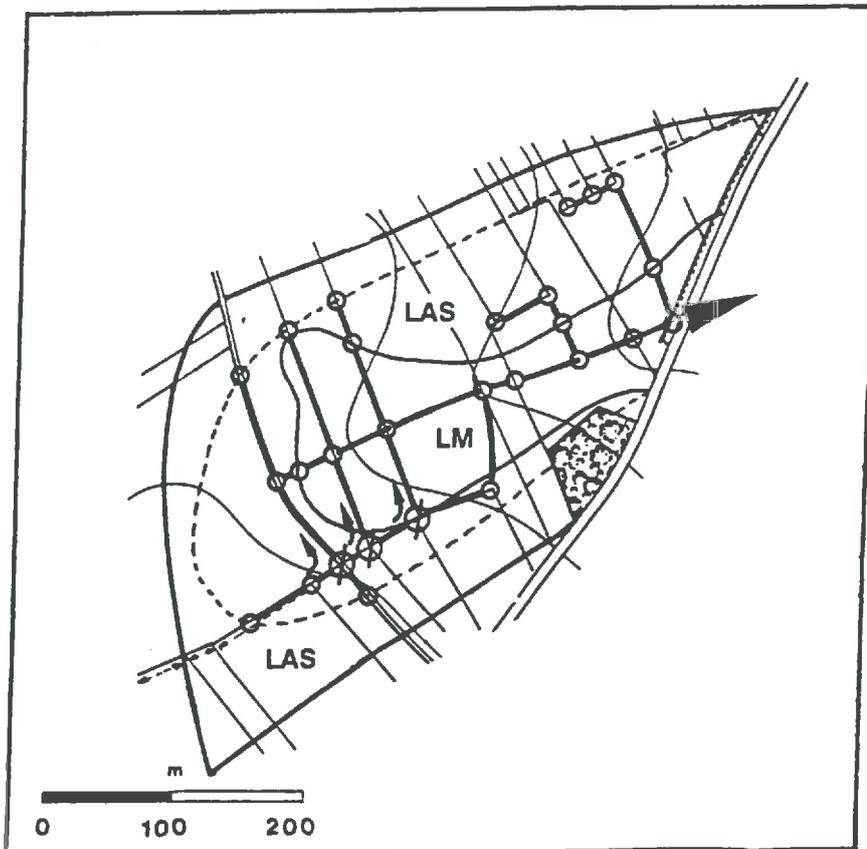


Fig. 10.8. : segmentation et identification des raccordements aux points de diffluence du réseau des collecteurs de HBO en 1990/1991.

10.2.2. Segmentation du réseau

Le découpage du réseau des collecteurs du ruissellement de chaque BVE a comme objectif d'obtenir une série de segments, aux caractéristiques homogènes, au sein desquels le débit du ruissellement ne présente pas de discontinuité majeure. Chaque segment se caractérise ainsi par une classe texturale, un type d'occupation du sol, et est raccordé à une surface bien définie, apte à produire un ruissellement.

La figure n°10.7 résume la procédure de découpage du réseau en segments. La segmentation du réseau est réalisée par l'identification de noeuds, correspondant aux extrémités des segments.

Un noeud peut être (Cf. figure n°7) :

- l'exutoire du BVE (noeud n°7) ;
- le point amont de chaque branche du réseau (noeuds n°1 et 3) ;
- la confluence entre deux branches du réseau (noeud n°5) ;
- l'intersection entre le tracé du réseau et une limite de classe texturale (noeud n°6) ;
- l'intersection entre le tracé du réseau et une limite de parcelle (noeud n°4) ;
- la limite entre deux parcelles contigües à une branche du réseau (noeud n°2).

Un noeud peut également être localisé sur une forte rupture de pente (cas non rencontré dans notre échantillon de BVE).

La figure n°10.8 illustre la segmentation du réseau des collecteurs correspondant au même exemple précédemment présenté pour les étapes de la construction du réseau.

10.2.3. Caractérisation des variables propres à chaque segment

Les caractéristiques supposées contrôler l'érosion de chaque segment du réseau sont :

- sa longueur ;
- les surfaces susceptibles de contribuer à son alimentation en eau ;
- sa pente moyenne ;
- la sensibilité du sol à l'incision.

Les trois dernières caractéristiques seront utilisées pour expliquer la variabilité de la section moyenne incisée mesurée le long de chaque segment. Cette section combinée à la longueur du segment permettra de reconstituer le volume incisé du segment.

a. Surfaces aptes à produire un ruissellement

Du fait de la topographie, chaque segment a une surface d'alimentation potentielle en ruissellement (figure n°10.9.a), incluant celles des segments amont. En fait, seule une partie de cette surface d'alimentation potentielle est réellement susceptible de contribuer au ruissellement. Il s'agit des surfaces qui répondent au critère SR4, et qui sont par ailleurs connectées au segment à caractériser.

Pour déterminer les aires d'alimentation potentielles d'un segment, il faut d'une part postuler un ruissellement diffus sur l'ensemble de la surface du BVE, d'autre part connaître la direction suivie par ce ruissellement potentiel. Par convention, le ruissellement diffus suit la plus grande pente, sauf dans la zone amont en pente inférieure à 2% où il est guidé par le sens du travail du sol. Dès que la direction théorique prise par le ruissellement diffus rencontre un collecteur, il se concentre sur ce dernier, et est acheminé d'amont vers l'aval le long du réseau jusqu'à l'exutoire du BVE.

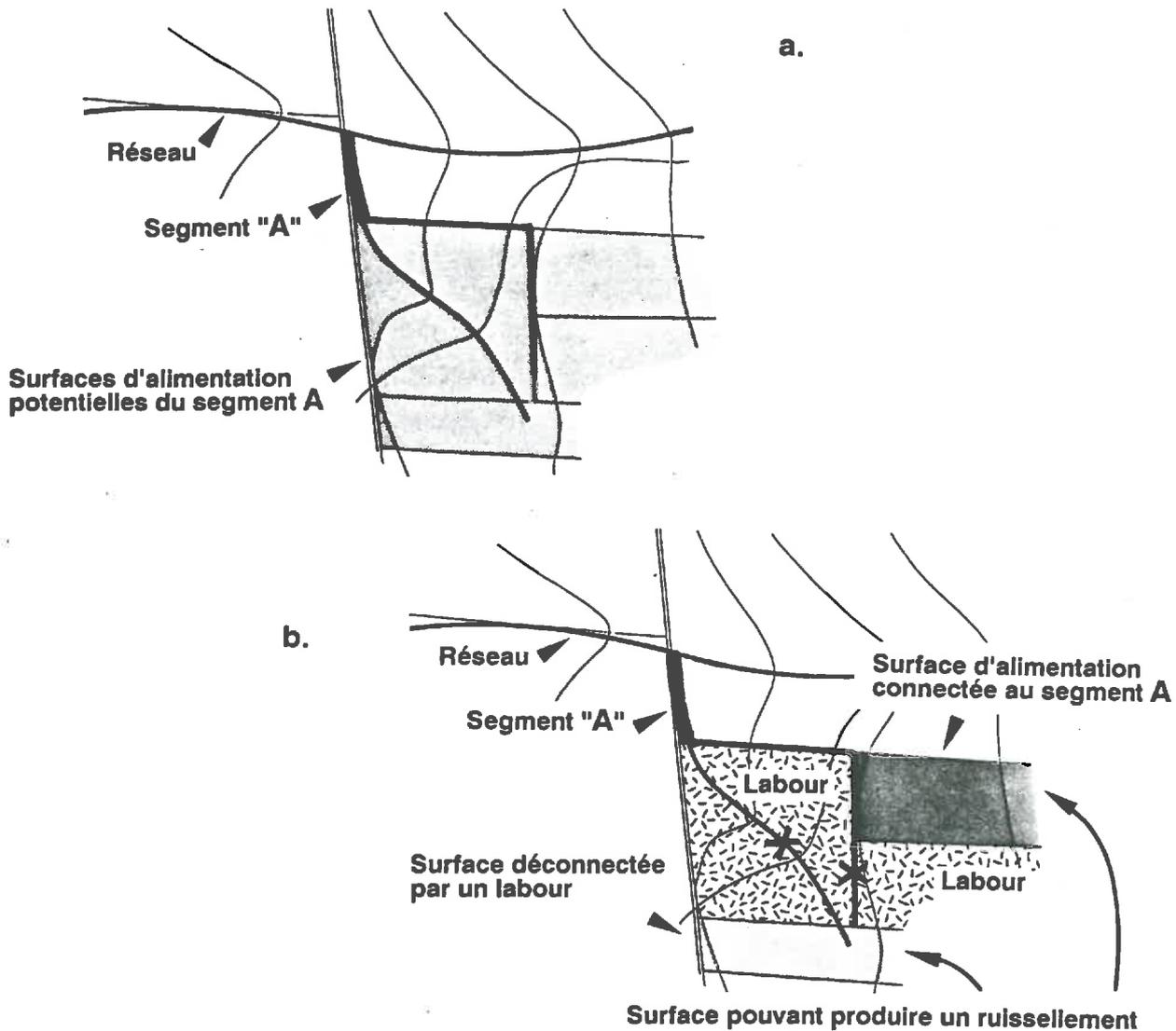


Fig. 10.9 : surface d'alimentation du segment "A"

a. : potentielle

b. : réelle

Dans la réalité, seule une fraction de ces aires est en état de produire un ruissellement. L'étude de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle globale du BVE a permis d'identifier le meilleur estimateur des surfaces aptes à produire un ruissellement en conditions climatiques hivernales : les états de surface fortement dégradés répondant au critère SR4 (Cf. tableau n°3.4, § 3.5). Les mêmes conditions de dégradation de l'état de surface sont adoptées pour définir les surfaces en état d'alimenter un segment en eau.

Ces surfaces peuvent être directement connectées à un segment, soit à l'amont du segment, soit le long du segment. Dans ce dernier cas, seule la moitié de la surface est prise en compte. En effet, la contribution de cette surface est nulle au point amont du segment, et maximale au point aval.

Les surfaces susceptibles de contribuer au ruissellement peuvent également être connectées à un segment par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres segments en amont, voire d'une parcelle. Mais, le passage du ruissellement n'est pas systématique. En effet, suivant les caractéristiques du ou des segments (de la parcelle), un ruissellement peut ne pas franchir un segment, suite à une très forte capacité d'infiltration ou de stockage le long de celui-ci.

Lors des pluies d'hiver, caractérisées par leur faible intensité, les labours et les déchaumages présentent en général une capacité d'infiltration et de stockage suffisante pour déconnecter hydrologiquement les segments amont de ceux en aval. De même, les prairies permanentes ou temporaires de plus d'un an sont supposées avoir une capacité d'infiltration suffisante pour déconnecter hydrologiquement les surfaces aptes à contribuer au ruissellement.

La convention suivante a été adoptée : tout segment recoupant un déchaumage, un labour ou une prairie est supposé bloquer le passage du ruissellement (figure n°10.9.b). Dans 10% des cas, cette règle conduit à une erreur car on constate l'existence d'une rigole qui connecte la partie du réseau situé en amont d'une parcelle, ayant l'une des occupations du sol précitées, à la partie en aval. Dans ce cas, on s'est autorisé à tenir compte des observations de terrain et de la connexion réelle pour définir les surfaces d'alimentation des segments situés à l'aval de ces segments particuliers.

b. Pente moyenne

La pente moyenne de la plupart des segments a été mesurée directement sur le terrain. Pour quelques segments, par manque de temps, elle a été obtenue à l'aide des cartes topographiques. Dans ce cas, la marge d'erreur est estimée au maximum à 1.5% de pente, et en moyenne à 0.7% (calcul réalisé sur un échantillon de 50 mesures de pente effectuées simultanément sur le terrain et sur la carte).

c. Sensibilité d'un sol à l'incision

Dans un milieu agrégé comme l'est un sol, la sensibilité à l'incision dépend avant tout de la cohésion globale, c'est-à-dire de la résistance du sol opposée à la force tractrice du ruissellement.

Cette cohésion globale est en fait la résultante de trois caractéristiques du sol :

- la cohésion interagrégat ;
- la cohésion propre à l'agrégat ;
- la présence éventuelle d'une armature racinaire.

La cohésion interagrégat dépend des surfaces de contact entre les agrégats et de leur degré de coalescence. Il en résulte une relation inverse à la porosité structurale du sol ou croissant avec la densité apparente.

Les processus qui déterminent le niveau de cette cohésion interagrégat sont le compactage et la fragmentation. Le degré de compacité du sol est lié soit à l'action des pneumatiques sur le sol, soit à la prise en masse des couches superficielles sous l'action des pluies. Inversement, la fragmentation du sol annule ou réduit très fortement la cohésion interagrégat, ceci d'autant plus que le degré d'ameublissement obtenu est élevé : plus l'affinement est important, plus la sensibilité à l'incision d'une couche non reprise en masse sera importante. Les agents de fragmentation de la surface du sol sont d'origine soit anthropique : travail du sol, soit naturelle : alternance humectation-dessiccation, cycle gel-dégel.

La cohésion propre à l'agrégat dépend uniquement de sa composition granulométrique et de son état hydrique (GUERIF, 1990). Cette composante texturale de la cohésion, pour une humidité donnée, augmente avec le taux d'argile ayant le rôle de ciment. Pour un matériau donné, cette cohésion est maximale à l'état sec et décroît exponentiellement avec la teneur en eau.

La présence éventuelle d'une armature racinaire forme un lien mécanique entre les agrégats, et dépend de la densité du peuplement végétal, de sa nature et de son stade de développement.

La variabilité de la sensibilité à l'incision d'un sol le long d'un segment va donc être commandée par celles des caractéristiques pédologiques et agraires du segment.

Par commodité, nous avons intégré à l'appréciation de la sensibilité du sol à l'incision des aspects qui, en toute rigueur, ne sont pas directement liés, mais influent plutôt sur la vitesse et la dispersion des écoulements. Il s'agit de la rugosité de la surface du sol, de la présence d'un couvert végétal ou de résidus, susceptibles d'étaler et de ralentir les flux.

Le suivi de 15 ou 20 BVE (300 à 530 segments) en un temps relativement court ne permet pas de mesurer directement sur le terrain la sensibilité à l'incision d'un sol, par exemple à l'aide d'un scissomètre. On a donc proposé de caractériser cette sensibilité par une variable qualitative ordonnée, avec 5 classes de sensibilité du sol à l'incision.

La notation des classes de sensibilité du sol à l'incision, adoptée par type d'occupations du sol et de travaux agraires, et par classe texturale, est résumée dans les tableaux n°10.1 et 10.2, en tenant compte respectivement de leur influence sur la cohésion globale du sol et sur le ruissellement.

Tableau 10.1 : sensibilité d'un sol à l'incision selon les caractéristiques agraires.

Type de situation		Classe	
Prairie permanente ou temporaire de plus d'un an		1	
Culture d'hiver en place Céréale ou colza	travail récent (couv. vég. inf. 20%)	4	
	travail ancien (couv. vég. entre 20 et 40%)	3	
	travail ancien (couv. vég. sup. 40%)	2	
	Betterave ou maïs encore en place	2	
	Pois récemment semés	4	
Intercultures	Travail réalisé		
	Précédent céréale, colza	chaume en place	1
		déchaumage	2
		labour fin	2
		labour grossier	1
	Pois, lin (récolte été)	non travaillé	1
		reprise du sol	3
		labour fin	2
		labour grossier	1
	Betterave, carotte, maïs (récolte automne)	non travaillé	1
		reprise du sol	3
		labour fin	2
labour grossier		1	

Tableau n°10.2 : modification du risque d'incision en fonction de la texture du sol.

Classes texturales (Cf § 2.2.3)	Modification de la classe de sensibilité d'incision (en nombre de rangs)
S ; SL ; LS ; LMS	+1 rang
SA ; LSA ; LM	0 rang
LAS ; LA	-1 rang
AS ; A ; AL	-2 rang

Les classes de sensibilité d'un sol à l'incision, présentées dans le tableau n°10.1, ont été déterminées pour un sol à texture limon moyen (LM). La valeur de ces classes doit être modifiée en fonction de la composition texturale du sol. La cohésion des agrégats croît en effet avec l'augmentation du taux d'argile. Le tableau n°10.2 présente les modifications à apporter à la classe de sensibilité d'un sol à l'incision, selon le taux d'argile, pour autant que la classe finalement obtenue ne soit ni inférieure à 1, ni supérieure à 4.

Enfin, les classes de sensibilité d'un sol à l'incision caractérisent uniquement l'horizon de labour. Or, sur certains axes de concentration du ruissellement (tout particulièrement les thalwegs), des ravines temporaires peuvent inciser la semelle de labour, et être rebouchées par la suite. La cohésion des matériaux de remblai (sous l'horizon de labour), par rapport au sol en place, est généralement plus faible. Ainsi, leur classe de sensibilité à l'incision est augmentée de 1 point, et peut, uniquement dans ce cas, atteindre la classe 5.

d. Longueur du segment

La longueur du segment est directement mesurée sur la carte du réseau des collecteurs du ruissellement. Cette caractéristique est retenue comme estimateur de la longueur incisable.

e. Section d'incision du segment

Il s'agit de la section d'incision moyenne des rigoles localisées sur un segment. Elle est obtenue en divisant le volume de la ou des rigoles du segment par la plus grande longueur de rigole le long du segment.

Cette plus grande longueur correspond :

- dans le cas d'une rigole à schéma d'incision à chenal unique: à la longueur de la rigole pour sa portion localisée le long du segment (cas 1a et 1b de la figure n°10.10) ;
- dans le cas d'une rigole à schéma d'incision en chevelu : à la longueur de la plus longue rigole de ce système de rigoles (cas 2 de la figure n°10.10) ;
- dans le cas de plusieurs rigoles : à la longueur de la rigole la plus longue (cas 3 de la figure n°10.10) ;
- dans le cas d'une succession de rigoles avec interruptions d'incision : à la somme des longueurs des rigoles (cas 4 de la figure n°10.10).

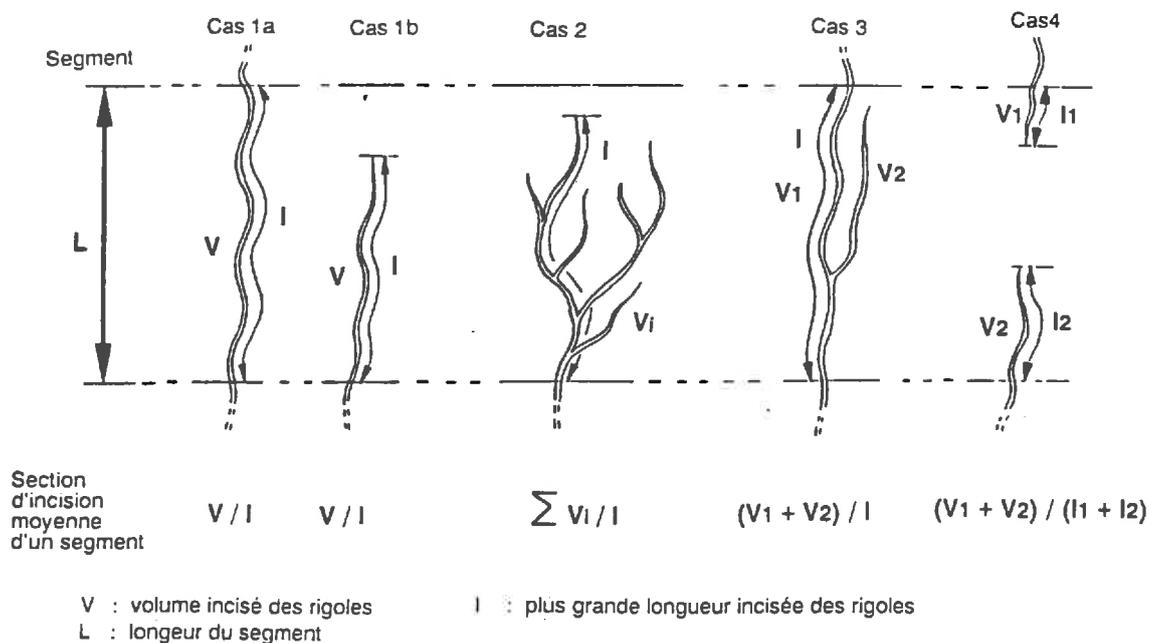


Fig. 10.10. : procédure d'obtention de la section d'incision moyenne d'un segment.

Tableau 11.1. : Variabilité des sections incisées des segments du premier échantillon de BVE, pour les deux années d'étude

	Année d'étude	
	1989/1990	1990/1991
Nombre total de segments	530	523
Segments ayant une section d'incision	76	187
Section incisée (en m ²)		
maximum	0.501	0.968
moyenne ^{min.}	0.008	0.033
écart-type	0.035	0.083
moyenne*	0.054	0.093
écart-type*	0.076	0.149

(* : uniquement pour les segments ayant une section incisée)

Chapitre 11

ANALYSE ET MODELISATION DES RESEAUX DE RIGOLES DU 1^{er} ECHANTILLON DE BVE

Cette étude porte sur la variabilité du volume des rigoles, localisées sur les segments des réseaux de collecteurs du ruissellement des 20 BVE du premier échantillon, mesuré en fin d'hiver 1989/1990 et 1990/1991.

A l'issue de la procédure de construction et de segmentation du réseau des collecteurs, on aboutit pour chaque BVE à un réseau comportant de 2 à 55 segments, correspondant à la longueur potentiellement incisable (lg , en m). Il reste à déterminer si ces segments sont incisés, et dans ce cas quelle est leur section d'incision. Connaissant les composantes du volume incisé (longueur et section), on pourra ainsi le reconstituer par segment en multipliant sa longueur par sa section incisée estimée. La somme des volumes de l'ensemble des segments d'un BVE permettra de reconstituer le volume total de ce BVE.

Pour déterminer si un segment est incisé, et si oui, pour estimer sa section incisée, on va suivre une démarche empirique, consistant à analyser la variabilité des sections incisées mesurées (S , en m^2 ou cm^2) des segments de l'ensemble des BVE du premier échantillon. Cette démarche comporte deux étapes distinctes : une première déterminant si le segment est incisé ou non, une seconde estimant la section incisée des segments reconnus comme ayant une incision par la première étape.

Pour la première étape, nous cherchons à estimer la probabilité qu'un segment ne soit pas incisé, ceci nous amenant à estimer une fonction f . Pour la seconde étape, nous cherchons à estimer une fonction g , permettant de calculer la section incisée du segment.

Le recours à ces deux sous-modèles est justifié d'une part, par le grand nombre de segments sans incision, d'autre part par les processus intervenants :

- dans la formation d'une incision (force tractrice critique) ;
- dans l'évolution d'une incision (mouvement de masse, force tractrice du ruissellement).

Rappelons que les caractéristiques pouvant être utilisées comme variables explicatives sont :

- les surfaces aptes à produire un ruissellement répondant au critère **SR4**, connectées au segment (**sr4**), exprimées soit en hectares, soit en ares ;
- la pente moyenne du segment (**pt**), en pour-cent ;
- la sensibilité du sol à l'incision le long du segment (**sl**), en classes ordonnées de 1 à 5, exprimant une sensibilité croissante.

11.1. Présentation de l'échantillon de segments

Le nombre total de segments d'une année à l'autre varie très peu (tableau n°11.1). Par contre, la variabilité annuelle du nombre de segments ayant une section incisée est très importante, avec un grand nombre de segments qui ne sont pas incisés. De plus, la variabilité des sections incisées est très forte, mais celles de 1990/1991 sont en moyenne plus grandes que celles de 1989/1990.

L'opposition entre les deux années d'étude, constatée à l'échelle globale du BVE, se retrouve également au niveau des sections d'incision des segments. L'automne hiver 1989/1990 se caractérise en effet par une érosion en rigoles limitée avec des sections d'incision moins importantes que celles de 1990/1991. Le rapport entre les volumes de rigoles en 1990/1991 et ceux en 1989/1990 est plus grand que celui des sections incisées. En fait, la différence entre les deux années porte également sur le nombre de segments ayant une section incisée : 76 en 1989/1990, 187 en 1990/1991.

Cette opposition entre les deux années se retrouve également pour l'extension des surfaces susceptibles d'alimenter le segment en ruissellement (**sr4**) (tableau n°11.2).

Les trois variables supposées explicatives de la section incisée présentent une gamme de variation étendue. Leur valeur moyenne se caractérise par une très petite surface d'alimentation (**sr4**) et par une pente (**pt**) et une sensibilité du sol à l'incision (**si**) moyennes. Il faut noter que seules les surfaces susceptibles d'alimenter en ruissellement un segment peuvent prendre une valeur nulle. Les deux autres variables ont toujours une valeur supérieure à zéro.

Tableau 11.2. : variabilité des caractéristiques attribuées aux segments des réseaux.

Campagnes	1989/1990			1990/1991		
	sr4 (ha)	pt (%)	si (note)	sr4 (ha)	pt (%)	si (note)
Moyenne	0.38	4.6	2.7	2.33	4.6	2.7
Maximum	20.18	28.0	4.0	46.42	28.0	5.0
Minimum	0.00	0.5	1.0	0.00	0.5	1.0
Ecart-type	1.66	3.4	1.1	5.75	3.4	1.2

11.2. Estimation de la probabilité de non incision du segment

Il s'agit d'estimer la fonction f permettant de déterminer la probabilité qu'un segment ne soit pas incisé (section d'incision nulle).

11.2.1. Présentation des données de base, allure de la variation

Les données de base qui permettent d'estimer la fonction f sont les fréquences de segments sans incision. Il s'agit donc du rapport entre le nombre de segments sans incision et le nombre total de segments répondant aux mêmes caractéristiques. Ceci suppose de définir des règles de découpage en classes des caractéristiques retenues.

Le nombre insuffisant de segments disponibles impose, d'une part que l'on réunisse les deux années pour obtenir un total de 1053 segments, dont 790 n'ont pas d'incision, et d'autre part qu'on ne retienne que deux variables explicatives, sous peine d'avoir un nombre trop faible de segments par classe de variables combinées. Nous avons choisi **sr4** et **pt** comme variables explicatives des fréquences de non incision des segments. Ces variables nous semblent correspondre aux facteurs prédominants. En effet, ils permettent une bonne discrimination entre les segments non incisés et ceux ayant une incision.

Le tableau n°11.3 présente la répartition du nombre de segments selon les valeurs prises par **sr4** et **pt**, ainsi que les fréquences observées de segments non incisés dans chaque classe **sr4 x pt**.

Tableau 11.3. : fréquence (en %) de segments non incisés selon leur surface apte à produire un ruissellement répondant au critère **SR4 (sr4)** et leur pente moyenne (**pt**).

sr4 (ha)	Pente (%)									
	[0;2[[2;3[[3;4[[4;5[[5;6[[6;8[[8;10[[10;15[[15;35[
0 <i>n</i>	93 67	92 103	90 129	87 76	94 77	82 60	94 34	98 40	100 12	
]0;0.5[<i>n</i>	75 28	81 16	81 21	70 21	68 27	88 16	64 14			
[0.5;1[<i>n</i>	82 11	89 18	76 17	56 18	59 17		50 10			
[1;2[<i>n</i>	53 19	71 17	67 15	62 13	27 11		25 4			
[2;7[<i>n</i>	40 20	20 20	29 7	22 9	10 21		10 10			
[7;50[<i>n</i>	30 10	24 17				17 24				

(*n* : nombre total de segments observés par classes de **sr4** x **pt**)

La variable **sr4** discrimine fortement les segments sans incision de ceux ayant une section incisée. Les fréquences de non incision sont proches de 100% pour un **sr4** égal à zéro, puis elles diminuent rapidement avec l'augmentation de la valeur de **sr4**, pour tendre vers une constante comprise entre 15 et 30% selon les classes de **pt**. La relation entre la fréquence des segments sans incision et **sr4** garde la même allure quelle que soit la classe de **pt**. Mais la décroissance de ces fréquences est d'autant plus rapide et celles obtenues pour les **sr4** élevés sont d'autant plus faibles, que **pt** est important.

11.2.2. Ajustement de la fonction f

Vu l'allure des variations des fréquences des segments sans incision d'après les variables **sr4** (surfaces aptes à produire un ruissellement connectées au segment) et **pt** (pente moyenne du segment), on a choisi la fonction **f** d'ajustement suivant :

$$P(S = 0) = \frac{a \text{ sr4} + b}{(c \text{ pt} + d) \text{ sr4} + 1} \quad (\text{en } \%)$$

Cette fonction détermine la probabilité qu'a un segment donné de ne pas être incisé, en fonction de **sr4** et **pt**. La constante **b** de cette fonction fixe la probabilité maximale de non incision que peut prendre un segment lorsque **sr4** est nul. On s'attend dans ce cas à un **b** voisin de 100%. Le rapport $a / (c \text{ pt} + d)$ détermine à la fois la forme de la décroissance des probabilités, ainsi que la valeur minimale vers laquelle tend la courbe (asymptote). Or, en augmentant le dénominateur de ce rapport, soit **pt**, la décroissance de la courbe est d'autant plus rapide, et l'asymptote plus proche de l'axe des abscisses. Ce qui correspond effectivement aux tendances de l'évolution des fréquences de segments non incisés en fonction de **pt**, présentées par le tableau n°11.3. Les coefficients de la fonction **f** ont été calculés à l'aide de la fonction "nonlinear regression" du logiciel "Statgraphics, version n°2.6", de Graphic Software Systems.

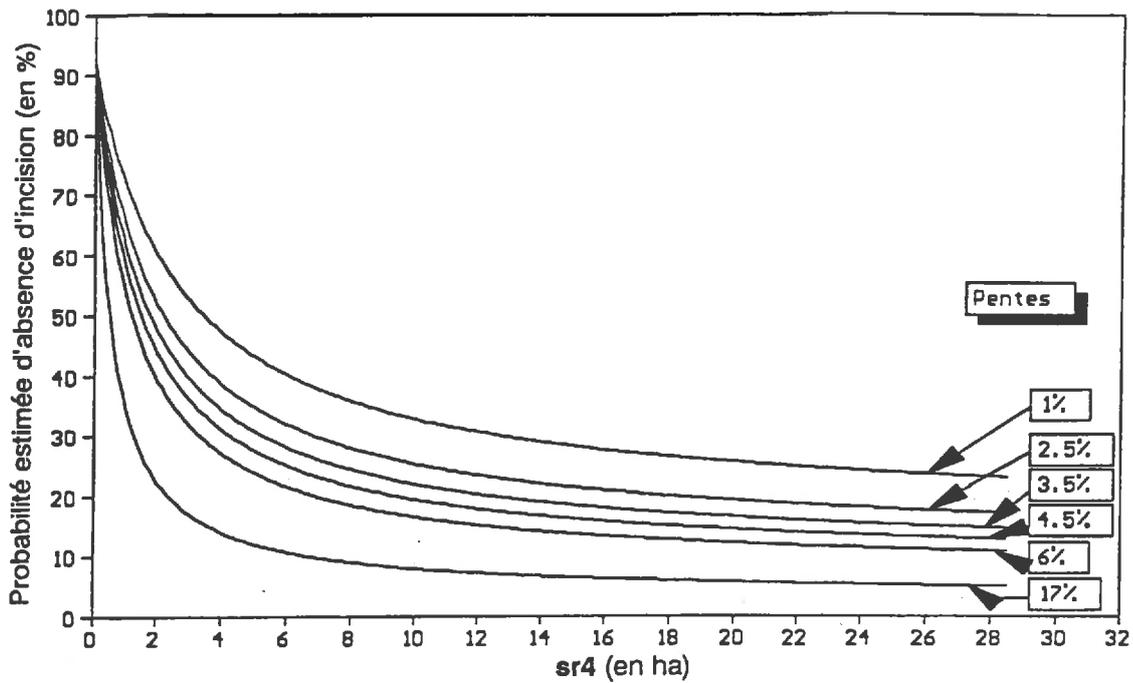


Fig. 11.1. : probabilité estimée qu'un segment ne soit pas incisé (en %), en fonction de $sr4$ (en ha), par classe de pt (en %), les courbes sont renseignées par la valeur moyenne de chaque classe de pt .

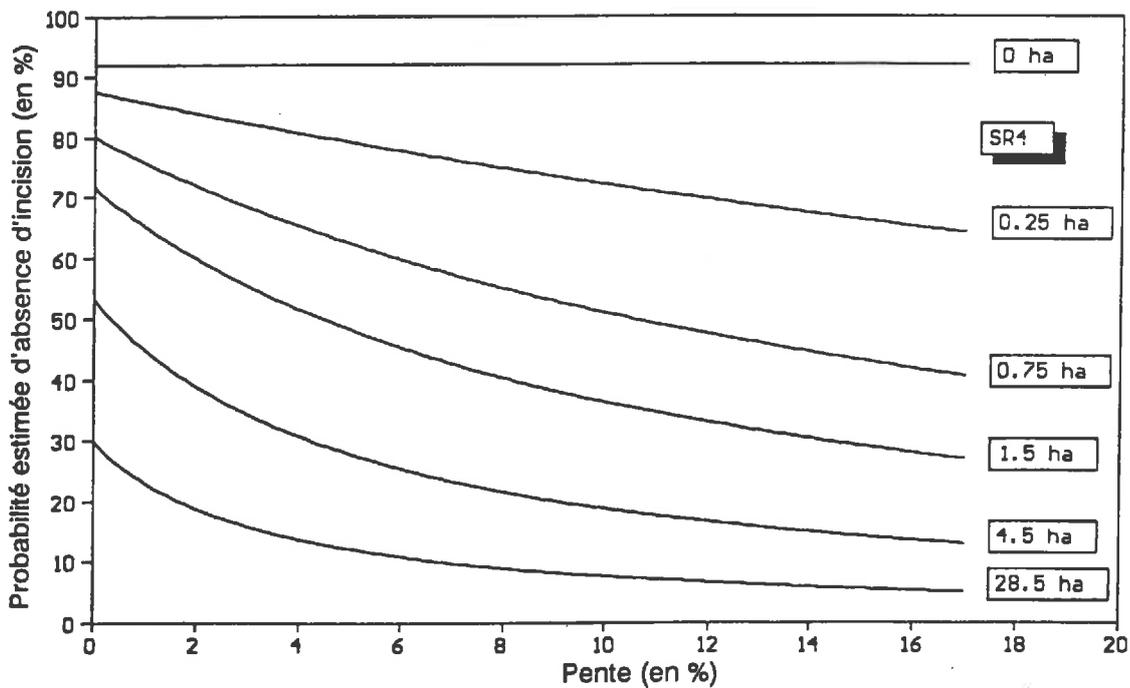


Fig 11.2. : probabilité estimée qu'un segment ne soit pas incisé (en %), en fonction de pt (en %), par classe de $sr4$ (en ha), les courbes sont renseignées par la valeur moyenne de chaque classe $sr4$.

La fonction f obtenue est la suivante :

Equation n°3 (fonction f)

$P(S = 0) = \frac{6.06 \text{ sr4} + 92.05}{(0.092 \text{ pt} + 0.275) \text{ sr4} + 1} \quad (\text{en } \%)$
--

dont sr4 en ha, pt en % :

avec un coefficient de détermination R^2 de 0.90 et une erreur standard de la probabilité estimée de 9.09 (en %).

Le détail des analyses statistiques effectuées et les graphiques correspondants sont présentés en annexe 7.

Les probabilités sous-estiment légèrement les fréquences observées pour les sr4 très élevées (28.5 ha), et inversement pour les sr4 moyens (4.5 ha) (Cf. figure n°3.a, annexe 7). En revanche, pour les valeurs de sr4 faibles, voire nuls, les points sont indifféremment répartis de part et d'autre de la première bissectrice. Par contre, quelle que soit la classe de pente, aucune tendance à la sous-estimation ou surestimation n'est notable (Cf. figure n°3.b, annexe 7).

Cette fonction traduit de manière satisfaisante l'interaction entre sr4 et pt sur l'absence d'incision d'un segment, déjà perceptible sur le tableau n°11.3. Les figures n°11.1 et 11.2 montrent une nette prédominance de la variable sr4 sur l'évolution de la probabilité qu'un segment ne soit pas incisé, et le rôle important, mais secondaire de pt , qui module le rôle de sr4 .

Ce résultat est conforme à ce que l'on sait des processus d'érosion par ruissellement. En effet, la force tractrice du ruissellement croît avec le rayon hydraulique (en relation avec les surfaces aptes à produire un ruissellement) et avec la pente, d'où un accroissement du risque d'incision du sol. Cependant, quelles que soient les valeurs de sr4 et de pt , il existe toujours des segments sans incision. Or, pour qu'il y ait effectivement une incision de la surface du sol le long d'un segment, il est nécessaire que la force tractrice atteigne une valeur critique, qui dépend de la résistance du sol à l'incision. Cette caractéristique est prise en compte par les classes de sensibilité à l'incision (sl). Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, le jeu de données disponibles est insuffisant pour permettre la prise en compte de cette troisième variable explicative.

En revanche, il est étonnant qu'un certain nombre de segments ayant un sr4 nul soient incisés. En effet, il est indispensable qu'un ruissellement alimente le segment pour qu'il y ait formation d'une incision sur ce dernier.

Cependant, il existe effectivement dans notre échantillon de segments avec un sr4 nul (598 segments), 55 segments ayant une incision. 29 d'entre-eux sont connectés à des surfaces répondant au critère SR2 (Cf. définition, § 3.5), correspondant à un estimateur des surfaces aptes à produire un ruissellement moins exigeant que le critère SR4 . Ainsi, dans certains cas, des surfaces ayant une moindre aptitude à la production d'un ruissellement ont tout de même pu émettre un ruissellement.

Pour les 16 segments restants, seuls les 10 segments ayant une section incisée mesurée supérieure à 0.01 m^2 ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) ont été étudiés dans le détail. Il en ressort trois autres types d'erreurs :

- une erreur de connexion au niveau d'une diffluence des surfaces susceptibles d'alimenter le segment en ruissellement, le ruissellement ayant pu changer de direction au cours de la saison ;
- une parcelle labourée, déchaumée ou en prairie, qui, d'après la procédure adoptée, empêche le transfert du ruissellement formé en amont d'atteindre un segment en aval, a néanmoins été franchie ;
- une production de ruissellement très localisée, à la surface d'une dérayure ou d'une trace de roue, non prise en compte par le modèle.

Ces quatre types d'erreur sont inhérents aux hypothèses sur la production et la circulation du ruissellement au cours de l'automne hiver :

- en automne hiver les pluies se caractérisent généralement par leur faible intensité d'où l'hypothèse que seules les surfaces fortement dégradées sont aptes à produire un ruissellement, et que ce ruissellement ne peut franchir un labour, un déchaumage ou une prairie :
- aux points de diffluence, le ruissellement ne peut changer de direction au cours de la saison ;
- seules des portions de parcelles, et non des motifs linéaires comme les dérayures ou les traces de roue, sont considérées aptes à contribuer au ruissellement.

En fait, ces hypothèses devraient être plus nuancées, mais pour une première approche du problème elles restent tout de même valables : ces 55 segments ne représentent en fait que 9% des segments ayant un $sr4$ nul.

Le modèle de probabilité de non incision d'un segment est calé sur les données réelles et tient donc compte de ces erreurs, ce qui explique que la probabilité maximale calculée d'après la fonction f soit de 92.05%, et non de 100% comme on pouvait s'y attendre.

11.3. Estimation des sections incisées

Les fonctions permettant d'estimer la section incisée d'un segment sont obtenues d'après une régression statistique, réalisée entre la section incisée mesurée S (variable à expliquer) et les variables explicatives que sont : $sr4$ (surfaces aptes à produire un ruissellement), pt (pente moyenne) et si (sensibilité à l'incision) (analyses statistiques et figures correspondantes en annexe 7). Pour ce faire, on travaille sur le sous-échantillon des segments ayant effectivement une section incisée.

On dispose d'un jeu de données suffisant pour effectuer un ajustement statistique propre à chaque année :

- 76 observations en fin d'hiver 1989/1990 ;
- 187 observations en fin d'hiver 1990/1991 ;
- 263 observations pour les deux années réunies.

Il faut cependant noter que 30 segments sur les 76 à section incisée en fin d'hiver 1989/1990 ont un $sr4$ de zéro, 25 sur 187 en fin d'hiver 1990/1991, et donc 55 sur 263 pour les deux années réunies.

11.3.1. Choix de la forme d'ajustement

Une étude préliminaire, sous forme de corrélations simples, confirme le rôle déterminant de $sr4$ dans l'explication de la variabilité des sections incisées (S) mais fait douter qu'une régression linéaire simple soit judicieuse, vu les faibles valeurs des coefficients de corrélation ($R \approx 0.50$).

La mise en relation des sections incisées (S) avec $sr4$ (figure n°11.3) suggère que la forme d'ajustement retenue en fonction de $sr4$ doit être multiplicative, conduisant à un S nul pour un $sr4$ nul. Malgré l'existence de quelques points très déviants, la répartition des points suggère également une variation plutôt curvilinéaire que linéaire. L'effet d'un accroissement de $sr4$ sur celle de S semble s'atténuer avec l'augmentation de $sr4$.

La figure n°11.3 montre que la non prise en compte de pt et de si , ainsi que le mélange de toutes les sources de variabilité, rendent la relation entre $sr4$ et S très floue. Cependant les deux remarques précédentes sont confirmées par l'observation des données pour quelques BVE pris individuellement.

En fonction de ces considérations, on a choisi une forme d'ajustement g des sections incisées du type suivant :

$$S = \alpha (sr4^a \cdot pt^b \cdot sl^c) \quad (\text{en cm}^2)$$

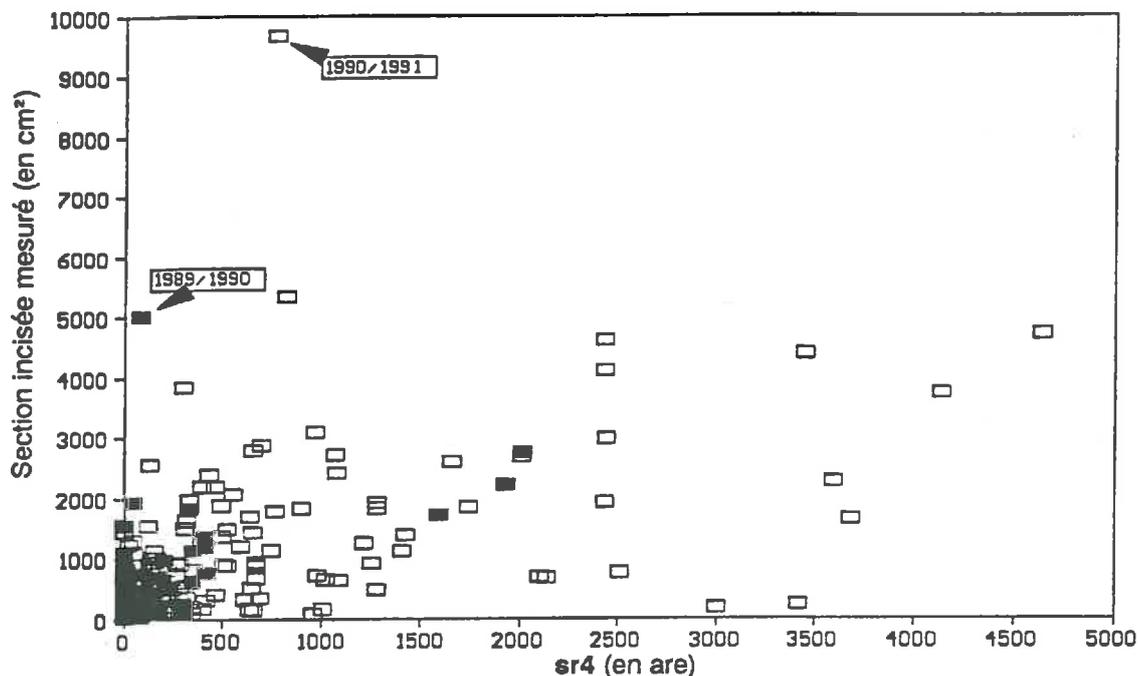


Fig. 11.3. : relation entre les sections incisées mesurées et $sr4$ pour les deux années réunies.

11.3.2. Ajustement de la fonction g

Pour réaliser l'ajustement de la fonction g , on dispose de deux techniques :

- une classique, consistant à linéariser la fonction g (transformation des valeurs en leur logarithme), et à recourir à un programme de régression linéaire multiple ;
- une autre qui garde la fonction sous sa forme non-linéaire et qui requiert l'emploi d'un programme de régression non-linéaire.

La fonction "nonlinear regression" du logiciel statistique utilisé ("Statgraphics, version n°2.6", de Graphic Software Systems), permettant de calculer les coefficients des fonctions non-linéaires, suppose que la variance est constante. Or, celle-ci devrait être croissante avec l'augmentation des valeurs prise par $sr4$. En revanche, la transformation logarithmique postule une variation de la variance en fonction de la variable explicative. A priori, la régression linéaire multiple semble donc plus appropriée à l'ajustement des fonctions g .

Par ailleurs, le passage aux logarithmes donne un poids important aux petites sections incisées, tandis que les régressions non-linéaires donnent un poids beaucoup plus important aux segments ayant une grande section incisée. Or, se sont les grandes sections qui doivent être particulièrement bien estimées. En effet, la contribution totale à l'érosion en rigoles des segments à grande section incisée est de loin beaucoup plus forte, que celle des segments ayant une petite section incisée.

Après avoir testé les deux formes d'ajustement des sections incisées, on constate effectivement que l'estimation des grandes sections incisées est fortement sous-estimée par les fonctions linéarisées. Les sections incisées mesurées sont deux fois plus grandes que les valeurs estimées par celles-ci, tandis qu'avec les fonctions non-linéarisées, elles sont proches. C'est pourquoi, l'ajustement des sections incisées est réalisé par la régression non-linéaire.

Les résultats de l'ajustement des trois fonctions g : g_1 pour 1989/1990, g_2 pour 1990/1991 et g_{1+2} pour ces deux années réunies, sont présentés par le tableau n°11.4.

Tableau n°11.4. : résultats de l'ajustement des fonctions g .

	Echantillon	Coefficients				R ²	σ résid. (en cm ²)
		α	a	b	c		
g_1	89/90 (n = 76)	82.15 ^{ns}	0.39***	-0.01 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.25***	662.7
g_2	90/91 (n = 187)	0.86 ^{ns}	0.71***	0.89***	1.19***	0.48***	847.2
g_{1+2}	89/90 et 90/91	1.93*	0.65***	0.78***	1.04***	0.44***	808.3

(n : nombre de segments utilisés pour l'ajustement des régression)

*** : P < 0.01

** : P < 0.05

* : P < 0.10

ns : P ≥ 0.10, non significatif

Les trois variables ont un rôle significatif dans l'explication de la variabilité des sections incisées, pour les fonctions g_2 et g_{1+2} . Leur coefficient de détermination est proche de la moitié de l'explication de la variance des sections incisées, ce qui est bien meilleur que le résultat obtenu par une régression linéaire simple avec la variable explicative $sr4$ ($R^2 \approx 0.25$). Par contre, l'ajustement des sections incisées en 1989/1990 est particulier, avec des coefficients d'ajustement très différents de ceux des deux autres fonctions g , seul $sr4$ a un rôle significatif, et le coefficient de détermination est très faible. Ceci suggère de ne pas retenir la fonction g_1 pour estimer les sections incisées des segments en fin d'hiver 1989/1990. La fonction g_{1+2} n'est en fait pas très différente de la fonction g_2 . C'est pourquoi nous retenons la fonction g_{1+2} , réunissant les deux années, pour estimer les sections incisées des segments, quelle que soit l'année d'étude.

La fonction d'estimation des sections incisées le long des segments en fin d'hiver, pour les deux années, est donc la suivante :

Equation n°4 (fonction g_{1+2})

$$S = 1.93 (sr4^{0.65} \cdot pt^{0.78} \cdot si^{1.04}) + \epsilon \quad (\text{en cm}^2)$$

(ϵ correspondant à l'erreur d'estimation de la section incisée)

dont $sr4$ en arc, pt en % et si en classes ordonnées de 1 à 5 ;

avec un coefficient de détermination de 0.44 et un écart-type de 808.3 cm² (Cf annexe 7, tableau n°3).

Cependant, cette fonction ne permet d'expliquer que 44% de la variabilité des sections incisées, ce qui justifie une analyse des résidus.

11.3.3. Analyse des résidus

Les figures n°11.4 et 11.5 confirment qu'il n'y a pas lieu de remettre en cause la forme de l'ajustement obtenue pour la fonction g_{1+2} , et d'en attendre une nette amélioration. Ceci est confirmé par l'absence de biais entre les résidus et les trois variables explicatives : $sr4$, pt et si , prises individuellement.

L'importante variabilité résiduelle des sections incisées estimées est croissante avec l'augmentation de la section incisée. Ceci est dû au fait que la variance est supposée constante par le type de régression non-linéaire utilisé.

La section incisée de deux segments du thalweg de CSP est fortement sous-estimée par la fonction g_{1+2} (résidus de 5.5 et 7.5 écart-types). Ces deux segments ont une section incisée particulièrement forte par rapport à $sr4$. Nous avons refait la régression non-linéaire avec les données des deux années réunies, après avoir retiré ces deux segments. On obtient un ajustement globalement meilleur (l'erreur standard de l'estimée est environ 20% inférieure à celle obtenue sans le retrait de ces deux segments). La faible valeur $sr4$ de ces deux segments ayant été contrôlée, nous avons identifié une erreur de connexion des surfaces aptes à produire un ruissellement au segment (cas de 1990/1991) et une erreur de liée au critère SR retenu. Cependant, nous avons pensé que leur retrait n'était pas justifié, étant donné que ces erreurs sont liées à la procédure adoptée.

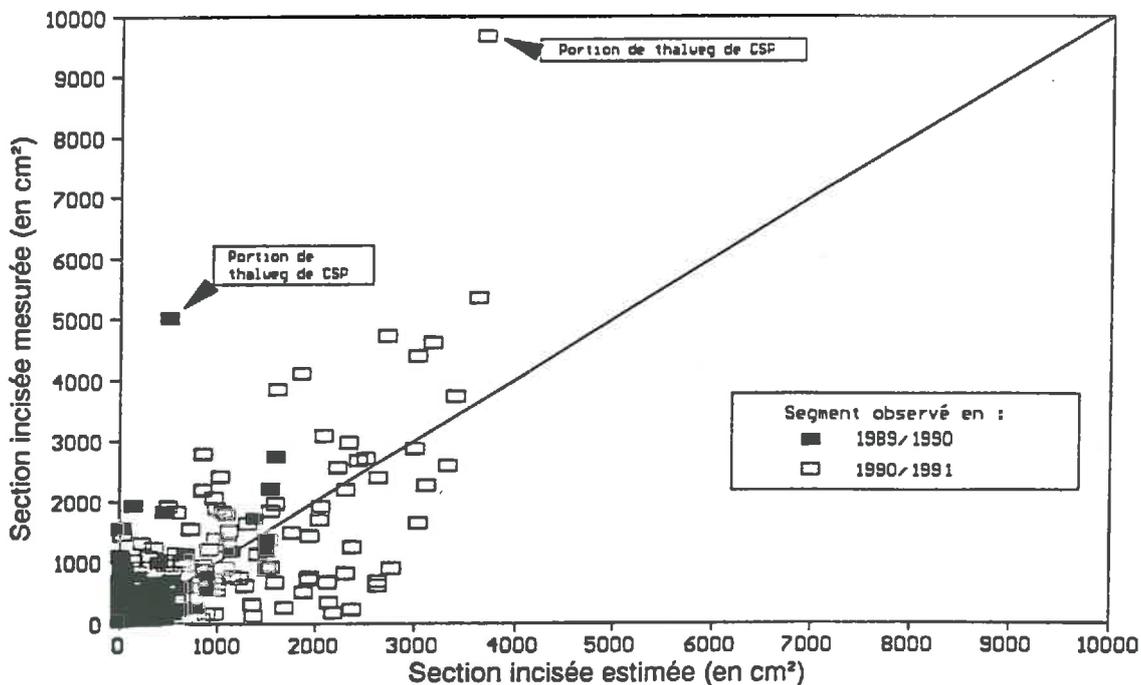


Fig. 11.4. : relation entre les sections incisées mesurées et les sections incisées estimées l'équation n°4.

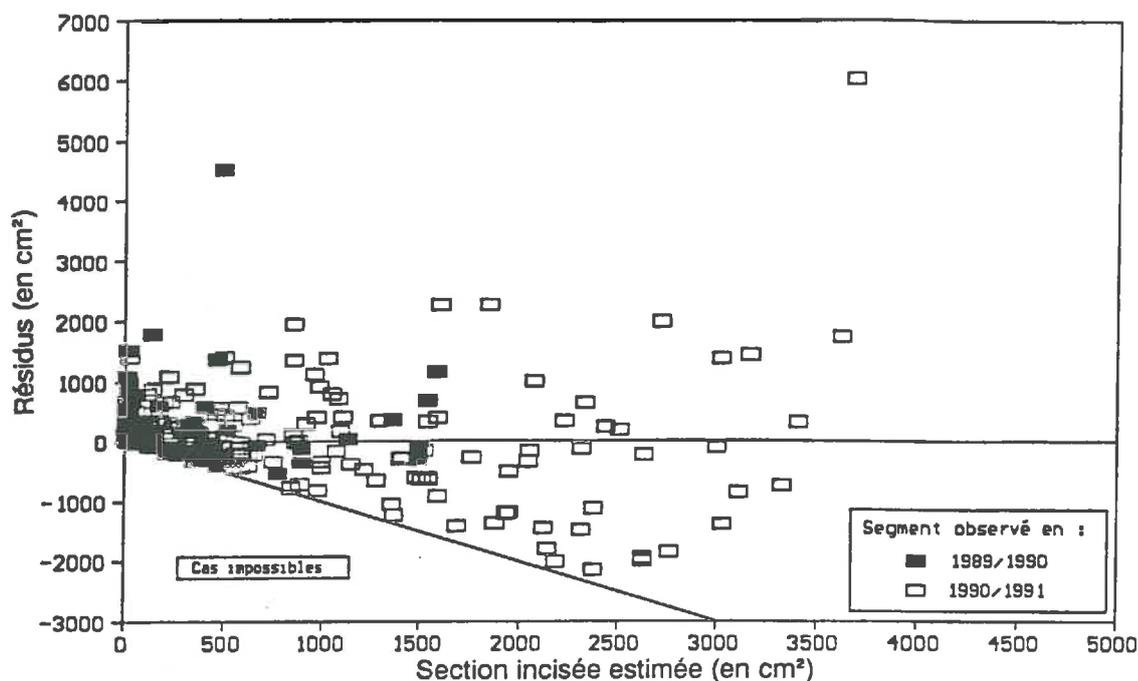


Fig. 11.5. : relation entre les résidus et les sections incisées estimées l'équation n°4.

Remarque : la section incisée mesurée d'un segment peut être au minimum nulle, c'est pourquoi le résidu d'un segment ne peut être inférieur à la valeur négative de la section incisée estimée, d'où la zone des cas impossibles indiquée sur la figure n°11.5.

a. Effet année

La variable la plus pertinente pour expliquer la section incisée est le flux de ruissellement. Il paraît donc discutable de ne pas avoir pris en compte les intensités et les hauteurs des pluies, que l'on sait très différentes d'une année à l'autre. Or, il semble, d'après les figures n°11.4 et 11.5, qu'il n'y a pas de biais flagrant sur la répartition des points en fonction de l'année. Ceci est confirmé par le test de Kolmogorov - Smirnov : les résidus des données de 1989/1990 n'ont pas une distribution significativement différente de ceux de 1990/1991 (Cf. annexe 7, figure n°12 et tableau n°5).

Il n'existe donc pas d'effet année sur la répartition des résidus. La variable sr4 semble donc bien prendre en compte la variabilité des caractéristiques pluviométriques.

b. Effet BVE

Selon les caractéristiques pérennes des BVE (morphologiques et pédologiques), les sections incisées estimées sont-elles systématiquement sous ou sur-estimées ? Seuls les BVE avec un nombre suffisant de segments ayant une section incisée (au minimum 5), pour les deux saisons d'automne hiver, sont retenus pour cette étude (Cf. annexe 7, tableau n°6).

La figure n°11.6 montre que les gammes de variabilité des résidus par BVE se recoupent très largement. Seul le BVE de CSP pour les deux années se caractérise par une variabilité beaucoup plus importante, et une moyenne très élevée en 1989/1990. En fait, ceci est lié aux deux segments particuliers indiqués sur la figure n°11.4, ayant un résidu très grand. Si l'on retire ces deux segments, le comportement de CSP ne se différencie plus des autres BVE.

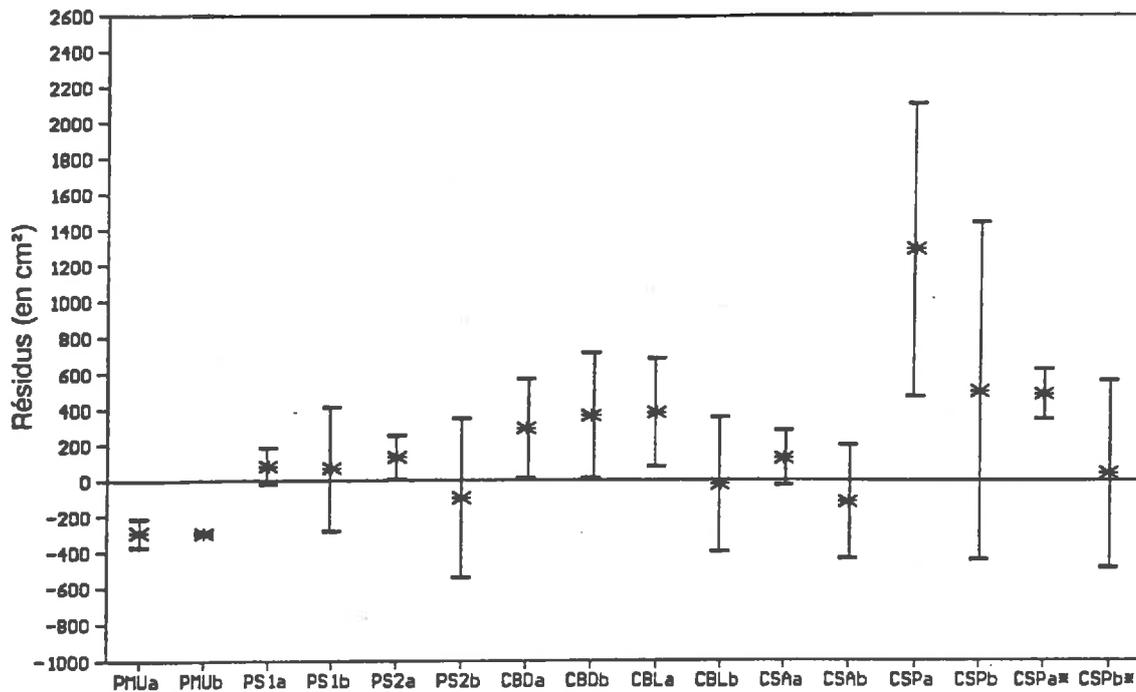


Fig. 11.6 : variabilité des résidus des valeurs de section observées et estimées (en cm^2) par l'équation n°4, par BVE : en 1989/1990 (a) ; en 1990/1991 (b) (* en ayant retiré le segment du thalweg de CSP à résidu très élevé)

Au vu de ces résultats, la mise en évidence d'autres facteurs explicatifs ne peut être réalisée qu'en analysant les résidus des segments s'écartant de la tendance générale.

c. Hypothèses et autres facteurs pouvant expliquer les variabilités résiduelles

Sur les 263 segments étudiés, 49 ont un résidu de valeur absolue supérieure à un écart-type (808.3 cm^2). La source d'erreur est principalement liée à $sr4$. En effet, cette variable est sujette à quatre types d'erreur, liées aux procédures adoptées (Cf. § 10.2.3.a), qui peuvent conduire à des fortes différences entre les surfaces d'alimentation du segment réelle et $sr4$. Cette erreur peut conduire à la présence d'une incision alors que $sr4$ nul.

Nous avons vu qu'environ 50% des segments ayant une section incisée et un $sr4$ nul, sont en fait raccordés à des surfaces d'alimentation ($sr2$) répondant à un critère de susceptibilité au ruissellement moins exigeant : $SR2$ (Cf. tableau n°3.4, § 3.5). Cependant, il n'existe aucune relation (Cf. figure n°10, annexe 7) entre les résidus des sections incisées estimées et $sr2$. Toutes les surfaces d'alimentation répondant au critère $SR4$ répondent a fortiori au critère $SR2$, c'est pourquoi nous avons également vérifié la relation entre les résidus et $sr2$ - $sr4$, c'est-à-dire des surfaces répondant au critères $SR2$ mais pas au critère $SR4$. Là encore, cette variable supplémentaire ne permet pas d'expliquer la variance résiduelle des sections incisées (Cf. figure n°11, annexe 7).

La forte variabilité résiduelle peut également être liée aux variables si ou pt . Pour si , ceci est probablement lié au caractère grossier de cette variable. La valeur de pente retenue correspond à la moyenne le long du segment, sans tenir compte de son profil. Or, à pente moyenne égale, un segment à profil convexe peut être incisé sur toute sa longueur, cette section d'incision augmentant d'amont vers l'aval, tandis qu'un segment à profil concave peut avoir une zone de dépôt dans sa partie aval, d'où une section incisée moyenne inférieure à celle d'un segment à profil convexe.

Enfin, 27 des 49 segments ayant un résidu supérieur ou inférieur à un écart-type, sont des segments correspondant à des portions de thalweg. Non seulement le thalweg est susceptible d'avoir une importante section d'incision associée à une grande surface d'alimentation, mais de par sa position dans le réseau des collecteurs, il cumule les erreurs d'estimation des surfaces d'alimentation et de leurs connexions au réseau.

11.4. Reconstitution des volumes de rigoles

La reconstitution du volume incisé V est réalisée en cinq étapes :

- 1^{ère} étape : estimation de la probabilité qu'un segment ne soit pas incisé : $P(S = 0)$, d'après l'équation n°3 (fonction f) ;
- 2^{ème} étape : détermination si un segment est incisé ou non en fonction de $P(S = 0)$ estimée ;
- 3^{ème} étape : si d'après la seconde étape, la section incisée est reconnue différente de zéro, estimation de la section incisée : S , d'après l'équation n°4 (fonction g_{1+2}) ;
- 4^{ème} étape : reconstitution du volume incisé V par segment ;
- 5^{ème} étape : reconstitution du volume incisé par BVE et calcul du taux d'érosion.

Le recours à des tirages aléatoires s'impose pour la seconde et la troisième étapes, ce qui nous a conduit à réaliser 10 reconstitutions des volumes incisés, pour accéder à un volume moyen et évaluer une marge de variabilité de part et d'autre de cette moyenne.

11.4.1. Probabilité qu'un segment ne soit pas incisé

La valeur $P_i(S = 0)$ est calculée pour chaque segment i d'après l'équation n°3 (fonction f) :

Equation n°3 (fonction f)

$P(S = 0) = \frac{6.06 \text{ sr}4 + 92.05}{(0.092 \text{ pt} + 0.275) \text{ sr}4 + 1} \quad (\text{en } \%)$
--

avec $\text{sr}4$ en hectares, et pt en pour-cent.

11.4.2. Détermination si un segment est incisé ou non

Un segment i ayant une probabilité $P_i(S = 0)$ forte a très peu de chance d'être incisé. A l'inverse, une probabilité $P_i(S = 0)$ faible donne une forte chance au segment d'avoir une incision. Pour déterminer si celui-ci est incisé ou non, nous avons recours à un nombre p_i compris entre 0 et 100, obtenu par un tirage au hasard dans une série de nombres aléatoires suivant une loi de répartition uniforme.

La probabilité $P_i(S = 0)$ estimée est comparé au p_i obtenu :

$\text{Si } P_i(S = 0) \geq p_i, \quad \text{alors } S_i = 0$ $\text{sinon } S_i > 0$

Par exemple, pour un segment I donné ayant un $P_i(S = 0)$ de 80%, nous considérerons qu'il y a 80% de chance que celui-ci n'ait pas d'incision. Ainsi, p_i doit être strictement supérieur à 80 pour que le segment I soit reconnu comme ayant une incision.

11.4.3. Estimation de la section incisée

L'équation n°4 est utilisée pour estimer la section incisée de chaque segment I, dont S_i est déterminé comme différent de zéro d'après le test de $P_i(S = 0)$:

Equation n°4 (fonction g_{1+2})

$$S = 1.93 (sr4^{0.65}) \times (pt^{0.78}) \times (si^{1.04}) + \epsilon \quad (\text{en cm}^2)$$

avec $sr4$ en ares, pt en % et si en classes ordonnées de 1 à 5.

L'erreur d'estimation de la section incisée est exprimée par ϵ . Pour chaque segment i , ϵ_i est obtenu d'après un tirage au hasard selon une loi normale de moyenne nulle et d'un écart-type égal à l'erreur standard de l'estimée : 808.25 cm². $\sigma\epsilon$ est constant quelles que soient les valeurs prises par les variables explicatives, or il devrait être croissant avec l'augmentation de ces dernières. Ceci nous amène à surestimer l'erreur pour les petites sections incisées, et, inversement, sous-estimer l'erreur pour les grosses sections incisées.

11.4.4. Reconstitution du volume incisé par segment

La valeur du volume incisé V_i de chaque segment i est obtenue en multipliant S_i par l_{gi} (longueur du segment i) :

Equation n°5

$$V_i = (S_i / 10000) \times l_{gi} \quad (\text{en m}^3)$$

avec S_i en cm² et l_{gi} en m.

Ainsi pour un segment identifié comme ayant une incision, nous faisons l'hypothèse que s'il est incisé, il l'est sur toute sa longueur avec une section d'incision homogène.

La figure n°11.7 (Cf. au verso) montre que la relation entre les volumes reconstitués et ceux mesurés est acceptable. Cette relation est plutôt forte pour l'hiver 1990/1991 ($R^2 = 0.69$) (Cf. tableau n°6, annexe 7), tandis qu'elle semble médiocre pour 1989/1990 ($R^2 = 0.22$). En fait, pour cette dernière, deux segments s'éloignent fortement de la première bissectrice. Ces segments feront l'objet d'une étude détaillée afin d'identifier les causes de leur écart particulièrement élevé dans l'analyse critique des volumes reconstitués par BVE.

La relation entre les longueurs incisées des segments et les longueurs est présentée par la figure n°11.8 (Cf. au verso), uniquement pour les segments ayant effectivement une section incisée. Elle montre que la longueur du segment est proche de celle incisée, dans un grand nombre de cas, mais avec une forte variabilité résiduelle. L'écart entre ces deux longueurs provient soit du tracé non linéaire des rigoles d'où une longueur incisée supérieure à la longueur du segment (point au-dessus de la première bissectrice), soit d'une incision partielle du segment (point sous la première bissectrice), d'où dans certains cas une très forte surestimation.

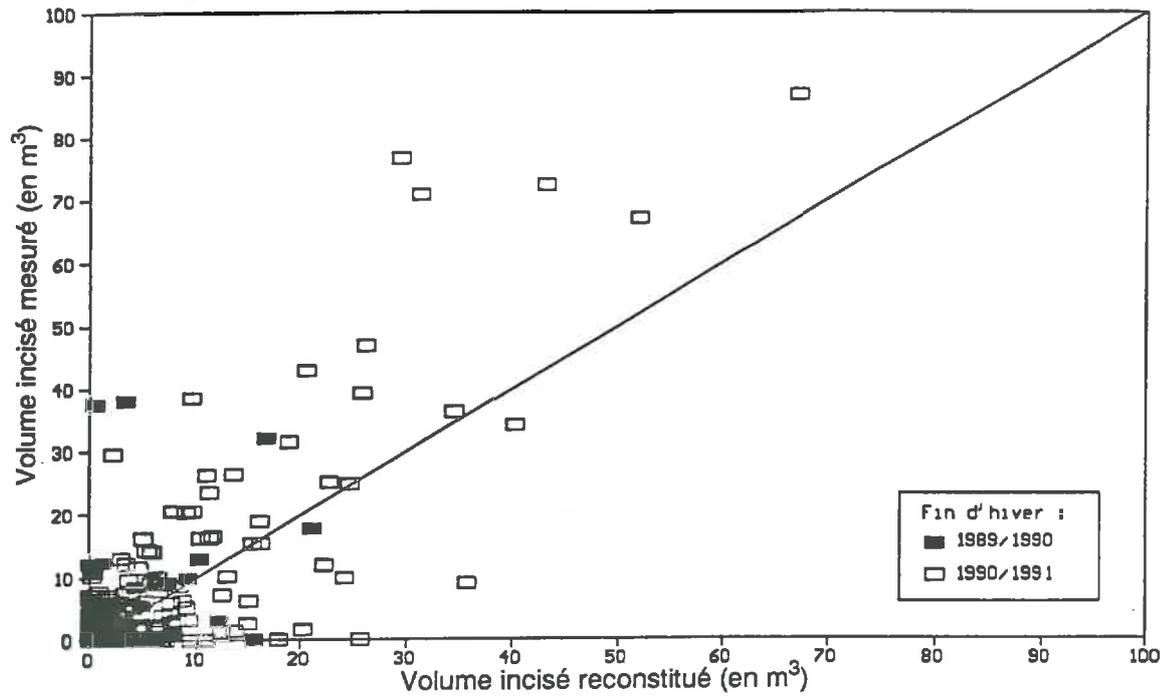


Fig. 11.7. : volume incisé mesuré et reconstitué (en m³), correspondant à la moyenne des dix volumes reconstitués, par segment.

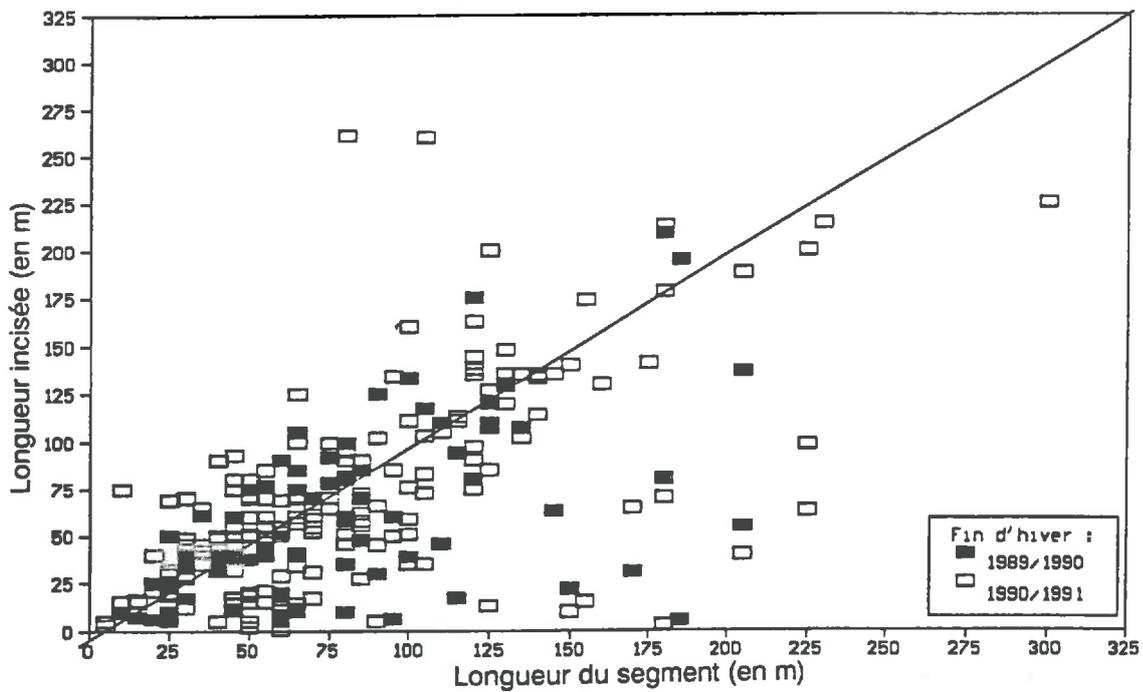


Fig. 11.8. : relation entre la longueur incisée du segment (L_i) et la longueur du segment (l_g), en mètres.

Les couples section – longueur sont tels que les erreurs importantes sur les longueurs concernent surtout les faibles valeurs de section, sinon on n'aurait pas une meilleure configuration avec les volumes incisés des segments. Les segments ayant une grande section incisée sont en effet généralement incisés sur toute leur longueur, dans ce cas la longueur du segment est un bon estimateur de la longueur incisable.

11.4.5. Reconstitution du volume incisé par BVE

Le volume total incisé (en m^3) par BVE est obtenu en additionnant les volumes incisés reconstitués de tous les segments constituant le réseau de collecteurs du BVE considéré.

Cette méthode de reconstitution des volumes incisés présente l'avantage de pouvoir estimer une erreur de reconstitution. En effet, les étapes de reconstitution du volume incisé par segment font appel à deux reprises à un tirage de nombres aléatoires :

- un premier (p_i) afin de déterminer si le segment est ou non incisé ;
- un second (ϵ_i) fixant l'erreur d'estimation de la section incisée du segment d'après la fonction g .

Nous obtenons ainsi un volume reconstitué spécifique à chaque série indépendante de p_i et de ϵ_i . Nous avons procédé à dix reconstitutions des volumes incisés pour estimer la variance des volumes reconstitués (Cf. annexe 7, tableau n°7).

Le volume total ainsi reconstitué par BVE, rapporté à sa surface totale (taux d'érosion reconstitué, V_{rec}) est mis en relation avec le taux d'érosion mesuré (V_{mes}), uniquement pour les rigoles à schéma d'incision à chenal unique ou en chevelu (Cf. figure n°11.9). Pour juger de l'amélioration apportée par l'analyse de la variabilité des volumes incisés par la prise en compte des réseaux de collecteurs, la figure n°11.9 est comparée à la figure n°11.10, mettant en relation les taux d'érosion mesurés (regroupant les trois schémas d'incision des rigoles) avec ceux estimés pour la relation établie à l'échelle globale du BVE (Cf. § 9.1).

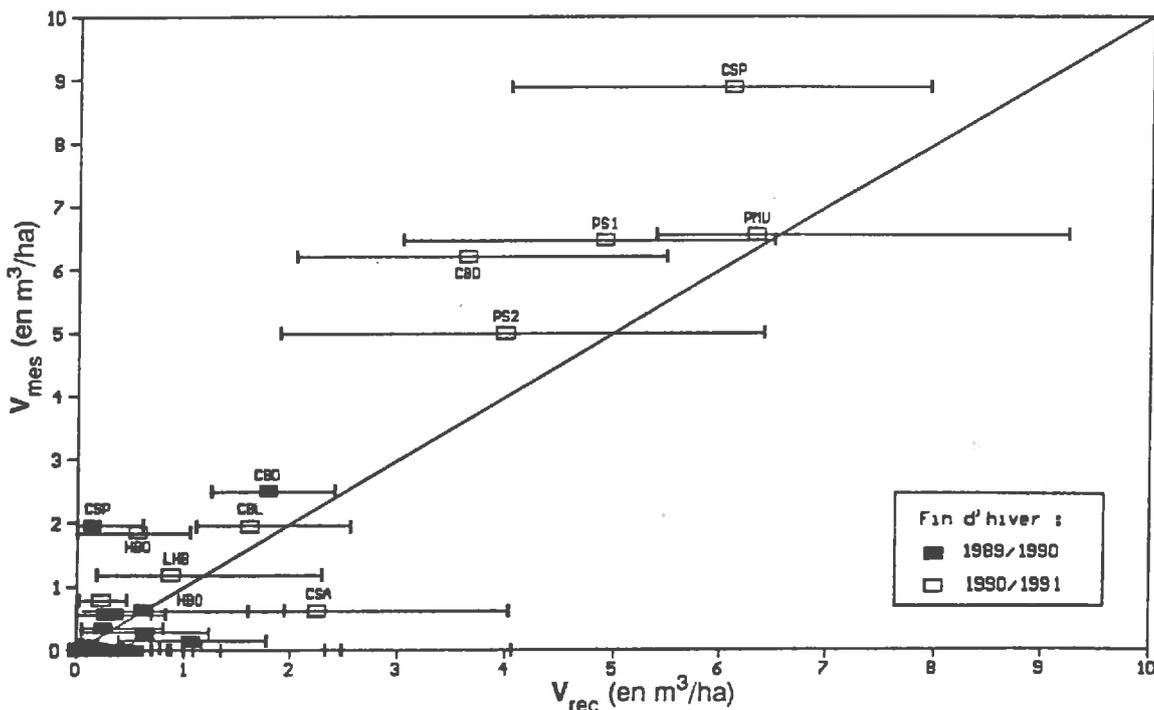


Fig. 11.9 : Taux d'érosion (en m^3/ha) en rigoles mesuré (V_{mes}) et reconstitué (V_{rec}) par BVE : taux d'érosion reconstitué moyen (carré), maximum et minimum obtenus pour les dix reconstitutions des volumes incisés.

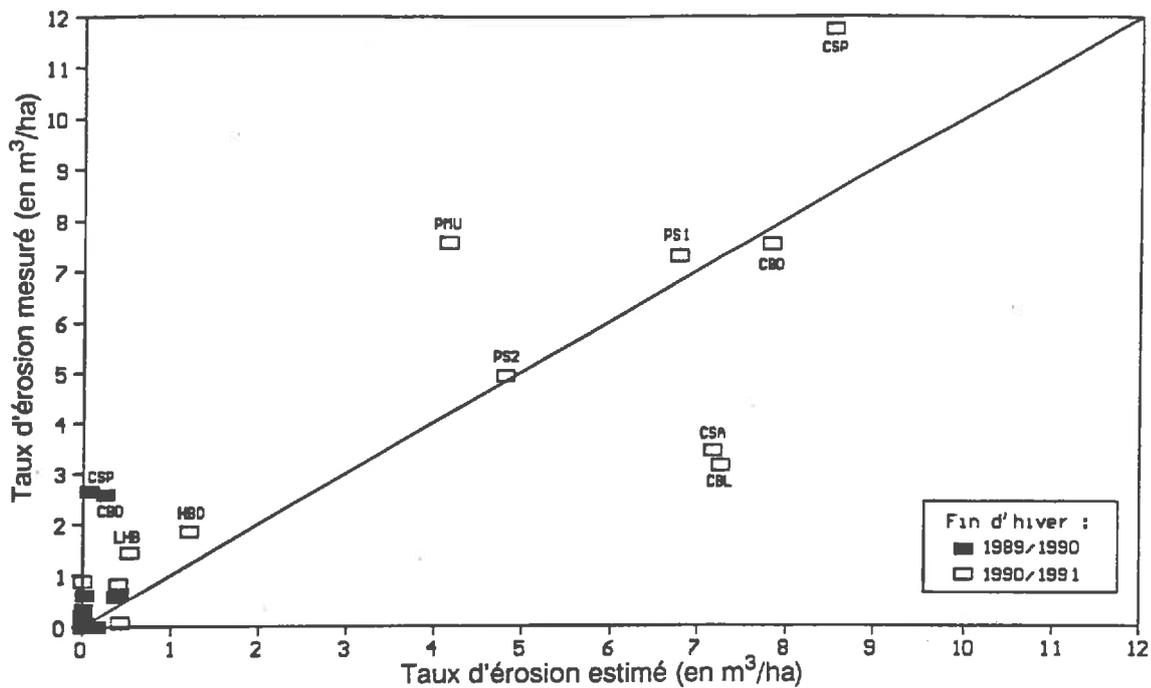


Fig. 11.10 : Taux d'érosion (en m³/ha) en rigoles mesuré et estimé pour la relation établie à l'échelle globale du BVE.

Sur les 40 cas, 35 ont un taux d'érosion reconstitué proche de celui estimé d'après l'analyse à l'échelle globale du BVE des volumes incisés (équation n°1, § 9.1). Sur les 5 cas restant, on constate une nette amélioration du taux d'érosion reconstitué par rapport à celui estimé par l'équation n°1, pour quatre BVE : PMU, CSA, CBL en 1990/1991, et CBD en 1989/1990, tandis que nous avons la situation inverse pour CBD en 1990/1991.

Cette amélioration dans l'analyse de la variabilité des taux d'érosion par l'intermédiaire des réseaux des collecteurs est confirmée par l'équation n°6 suivante. Cette équation permet d'apprécier la qualité de l'ajustement des taux d'érosion mesurés V_{mes} par ceux reconstitués V_{rec} moyens, selon les 10 reconstitutions :

Equation n°6

$$V_{mes} = -0.13 + 1.28 V_{rec} \text{ moyen} \quad (\text{en } m^3/\text{ha})$$

avec un R^2 de 0.90 et un écart-type résiduel de 0.72 m³/ha (Cf. annexe 7, tableau n°8).

La prise en compte des composantes longueur et section des rigoles conduit à une meilleure prévision du risque d'érosion des BVE que ne le permet la prise en compte des variables explicatives caractérisant l'ensemble du BVE. En effet, le coefficient de détermination et l'écart-type résiduel sont respectivement de 0.90 et de 0.72 m³/ha pour l'équation n°6, tandis qu'ils sont respectivement de 0.71 et 1.38 m³/ha pour l'équation n°2 (Cf. § 9.3).

Origine de la variabilité résiduelle

Le taux d'érosion reconstitué, d'après l'estimation séparée des sections et des longueurs incisées, est pour certains BVE soit fortement sous-estimé (CSP, 1990/1991 ; CSP, 1989/1990 ; CBD, 1990/1991), soit fortement surestimé (CSA, 1990/1991).

L'étude détaillée de ces quatre BVE a permis de mettre en évidence quatre types d'erreur de reconstitution des volumes incisés.

Généralement, les segments localisés sur le thalweg sont à l'origine des écarts les plus importants entre les volumes reconstitués et ceux mesurés. En fait, comme nous l'avons déjà montré pour les sections incisées, ces segments sont susceptibles d'avoir une très grosse section incisée, et de par leur position dans la partie aval du réseau des collecteurs, ils cumulent les erreurs d'estimation des surfaces d'alimentation et de leurs connexions au réseau. Ce type d'erreurs est à l'origine de la forte sous-estimation du taux d'érosion de CSP en 1989/1990 et 1990/1991.

Le BVE de CSA en 1990/1991 met en évidence une autre source d'erreur : le caractère "grossier" de la variable s_i , exprimant la sensibilité du sol à l'incision. La forte armature racinaire due à une couverture dense d'adventices (environ 75%) sur une parcelle déchaumée et l'utilisation d'une portion du thalweg recoupant un chantier de récolte de carottes comme chemin de passage des tracteurs font que la classe de sensibilité à l'incision attribuée d'après les conventions adoptées est trop faible, d'où une surestimation de l'incision du thalweg.

CBD en 1990/1991 met en évidence un cas très particulier, qui ne peut en aucun cas être prévu par un modèle. Il s'agit de la rupture accidentelle d'une retenue en position amont, dont l'effet de chasse d'eau par sa brutale vidange est à l'origine d'une forte incision d'un labour situé juste en aval.

Quatre types de problèmes peuvent donc être à l'origine des principales erreurs de reconstitution des volumes incisés :

- une mauvaise estimation des surfaces aptes à contribuer au ruissellement ;
- une erreur de connexion des surfaces d'alimentation aux segments ;
- un critère de sensibilité du sol à l'incision trop grossier (cinq classes qualitatives ordonnées) ;
- et la présence de situations particulières non prévisibles.

Tableau n°12.1 : caractéristiques des segments du second échantillon de BVE.

Variables	Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart-type
Section incisée (m ²)	0.016 0.096*	0.754	0.000	0.073 0.159*
sr4 (ha)	1.45	47.80	0.00	5.88
pt (%)	5.3	21.0	0.3	3.4
si (classes de 1 à 5)	2.7	4.0	1.0	1.3

(* : uniquement pour les segments ayant une section incisée)

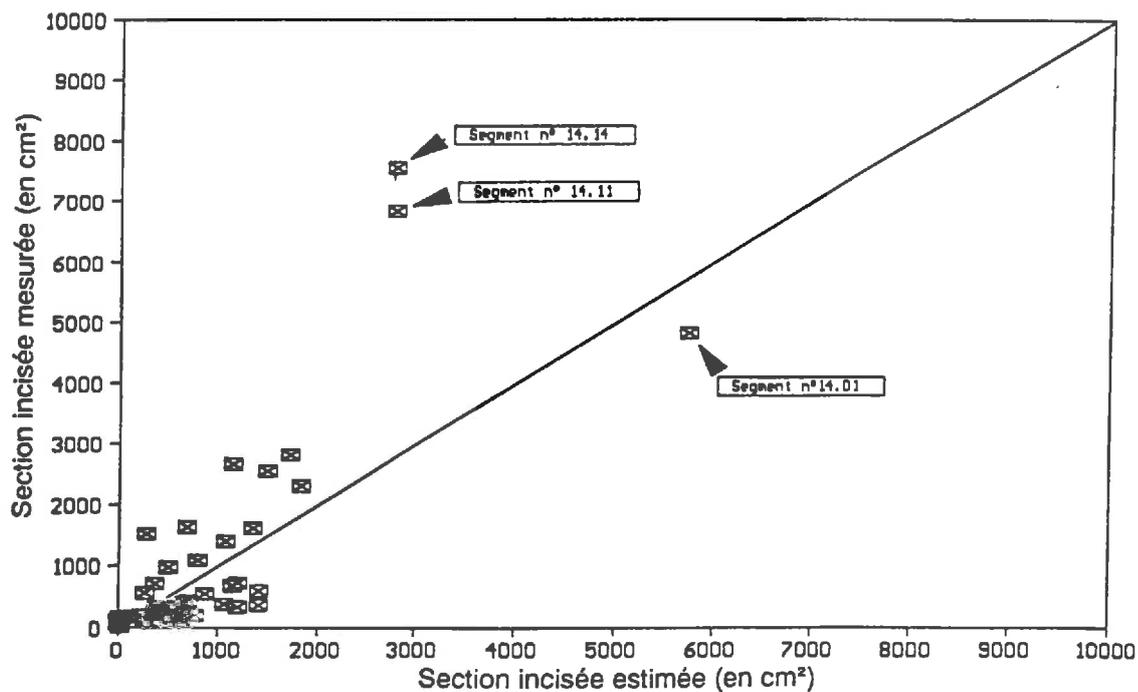


Fig. 12.1 : relation entre les sections incisées (en cm²) mesurées en fin d'hiver 1991/1992 et les sections incisées estimées d'après l'équation n°4, des segments du deuxième échantillon.

Chapitre 12

APPLICATION DE LA DEMARCHE AU SECOND ECHANTILLON DE BVE

Le test de validité du modèle de reconstitution des volumes de rigoles (élaboré d'après l'érosion en rigoles des fins d'hiver 1989/1990 et 1990/1991 mesurée sur le premier échantillon de BVE) est réalisé avec les mesures des volumes des rigoles de fin d'hiver 1991/1992, effectuées sur les 15 BVE du deuxième échantillon. Pour ce faire, nous allons suivre la procédure adoptée pour la reconstitution des volumes incisés des réseaux de collecteurs du premier échantillon de BVE.

12.1. Démarche adoptée et présentation des données

On dispose de toutes les variables nécessaires par segment pour reconstituer les volumes incisés par BVE du second échantillon. Ceci nous permettra d'estimer la section incisée de chaque segment avec les équations n°3 et n°4, déterminées d'après le jeu de données du premier échantillon de BVE. Les volumes incisés par BVE vont être obtenus en appliquant le modèle de reconstitution des volumes incisés développés dans le chapitre 11, dont les étapes sont :

- estimation de la probabilité de non incision d'un segment : $P(S = 0)$ (équation n°3) ;
- détermination si le segment est incisé ou non ;
- estimation de la section incisée des segments reconnus comme ayant une incision d'après l'étape précédente (équation n°4) ;
- reconstitution du volume incisé par segment (équation n°5) ;
- reconstitution des volumes incisés par BVE.

L'échantillon de validation, comportant 301 segments (Cf. tableau n°12.1), présente un grave défaut : 30 segments sur les 49 ayant une section incisée font partie du réseau des collecteurs d'un seul BVE : CMO, en particulier les trois segments à section incisée dépassant 0.3 m². Cependant, en l'absence d'autres observations disponibles, nous utilisons ce jeu de données pour tester le modèle de reconstitution des volumes d'après l'analyse séparée des sections et des longueurs incisées établi pour le premier échantillon de BVE.

De plus, neuf segments ont la particularité d'avoir une section incisée, mais un sr_4 nul. Ils présentent les mêmes sources d'erreurs que celles mentionnées pour les segments du premier échantillon présentant le même problème.

La gamme de variabilité des variables explicatives nécessaires à l'estimation des sections incisées est du même ordre que celle du premier échantillon de BVE.

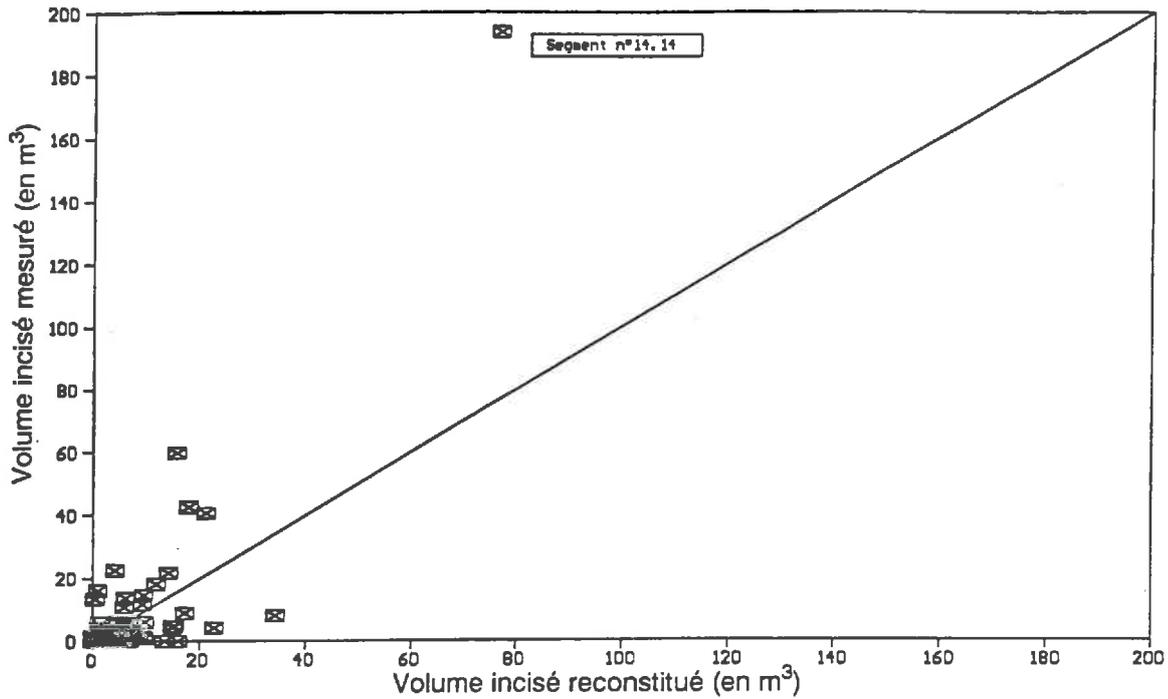


Fig. 12.2. : volume incisé par segment, mesuré (en m³) et reconstitué moyen (en m³) obtenus à l'aide de l'équation n°4.

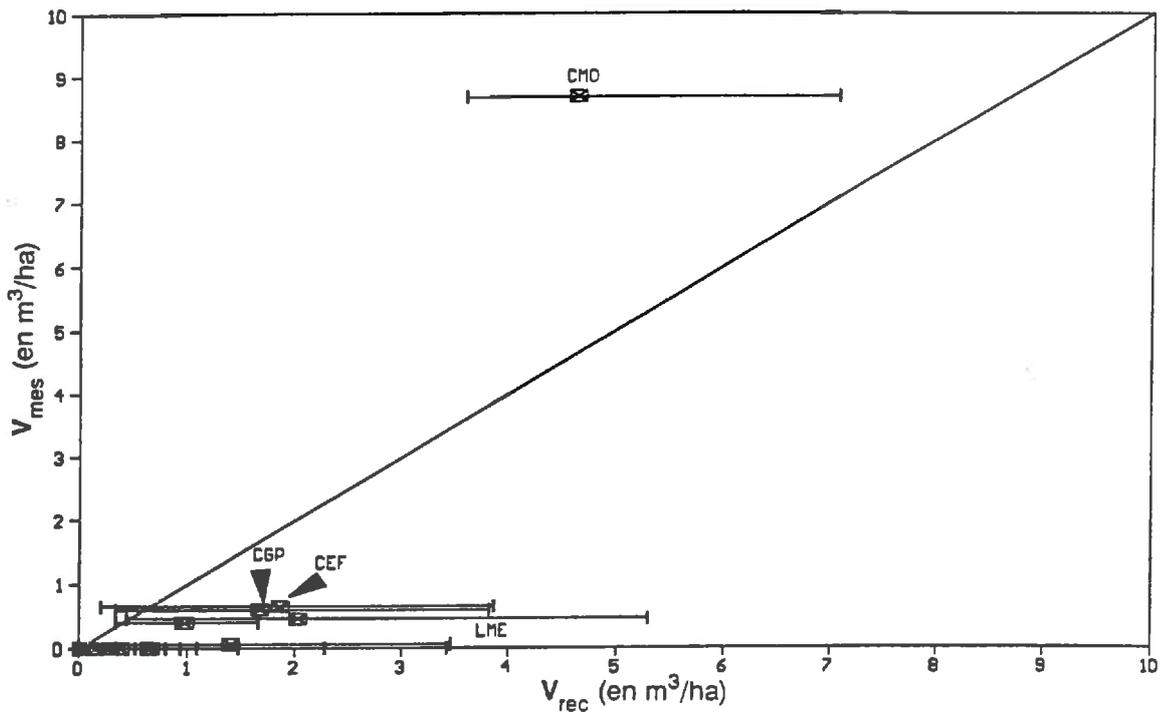


Fig. 12.3. : taux d'érosion du BVE (en m³/ha) mesuré (V_{mes}) et reconstitué (V_{rec}) d'après l'équation n°4 d'estimation des sections incisées par segment : taux d'érosion reconstitué moyen (carré), maximum et minimum obtenus pour les dix reconstitutions des volumes incisés.

12.2. Résultats et discussions

12.2.1. Estimation de la section incisée des segments

La section incisée des segments du deuxième échantillon de BVE est estimée d'après l'équation n°4 (sans tenir compte de l'erreur d'estimation). La relation entre ces sections incisées ainsi estimées et celles mesurées, uniquement pour les 49 segments ayant une section incisée, présentée par la figure n°12.1, permet de vérifier la qualité de cette estimation.

La portée des conclusions que l'on peut tirer de ces résultats est amoindrie par le fait qu'il y a peu de segments à forte section incisée, et que ceux-ci font tous partie du même BVE. On retrouve la tendance à une sous-estimation des sections incisées. Cependant, l'accord prévision - observation est du même ordre que celui obtenu sur les données antérieures (Cf. figure n°11.4, § 11.3.2). Ceci nous conduit à conclure que le second échantillon ne contredit pas l'équation n°4.

12.2.2. Reconstitution des volumes incisés par segment

L'emploi des équations n°3 et n°4 obtenues d'après le premier échantillon de segments, nous a permis de reconstituer le volume incisé de chaque segment du second échantillon de BVE. Comme pour le premier échantillon, nous avons également réalisé 10 reconstitutions de volumes incisés par segment.

La figure n°12.2 met en relation la moyenne des volumes incisés reconstitués de chaque segment avec celui mesuré. Le nuage de point du second échantillon présente la même tendance que celui obtenu pour le premier échantillon (Cf. figure n°11.7, § 11.4.4). Seul un segment dont le volume incisé est fortement sous-estimé (une portion du thalweg de CMO) s'éloigne beaucoup de la première bissectrice. En fait, la rigole de ce segment, mise en place dès le mois de novembre 1991, a subi une évolution importante au cours de l'hiver du fait du recul des berges lié aux mouvements de masse, favorisés par la profondeur de l'incision qui localement a atteint près de 80 centimètres.

Hormis ce segment particulier, la qualité de reconstitution des volumes incisés par segment du deuxième échantillon, d'après les équations n°3 et n°4 obtenues par l'ajustement des sections incisées du premier échantillon de segments, est du même ordre que celle du premier échantillon.

12.2.3. Reconstitution des volumes par BVE

Les taux d'érosion moyens du second échantillon de BVE reconstitués selon la même procédure que précédemment avec les équations n°3 et 4 sont présentés par la figure n°12.3. On distingue les BVE sans érosion, des BVE avec peu d'érosion et surtout CMO ayant une forte érosion.

Le fait qu'un seul BVE (CMO) a un taux d'érosion important ne permet pas de conclure définitivement sur la validité de la reconstitution des volumes. Cependant, le taux d'érosion reconstitué moyen par BVE du deuxième échantillon est proche de celui effectivement mesuré.

La variabilité du taux d'érosion reconstitué peut être très importante pour les BVE à faible taux d'érosion. Ceci est principalement lié au nombre de segments de ces BVE. En effet, une sous ou surestimation importante du volume d'un de leurs segments peut avoir une grande répercussion sur le volume incisé total du BVE, ceci d'autant plus que le BVE est de petite taille.

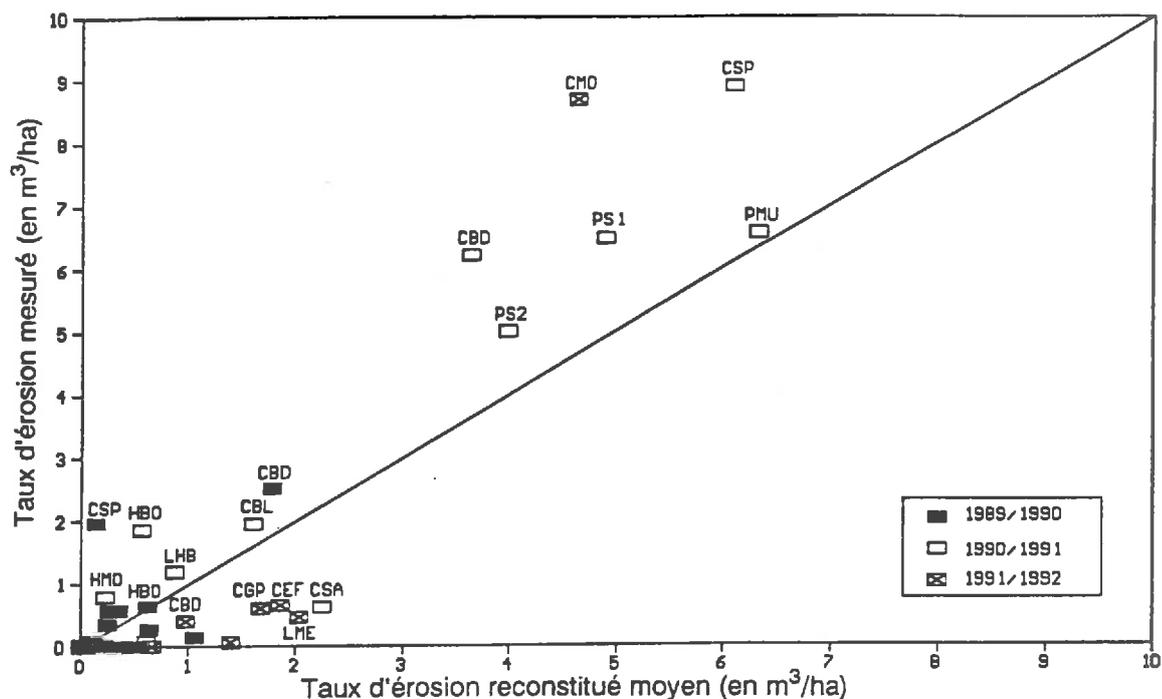


Fig. 12.4. : comparaison entre les taux d'érosion reconstitués moyens du second échantillon de BVE (en m³/ha), obtenus à l'aide de l'équation n°4, avec ceux du premier échantillon

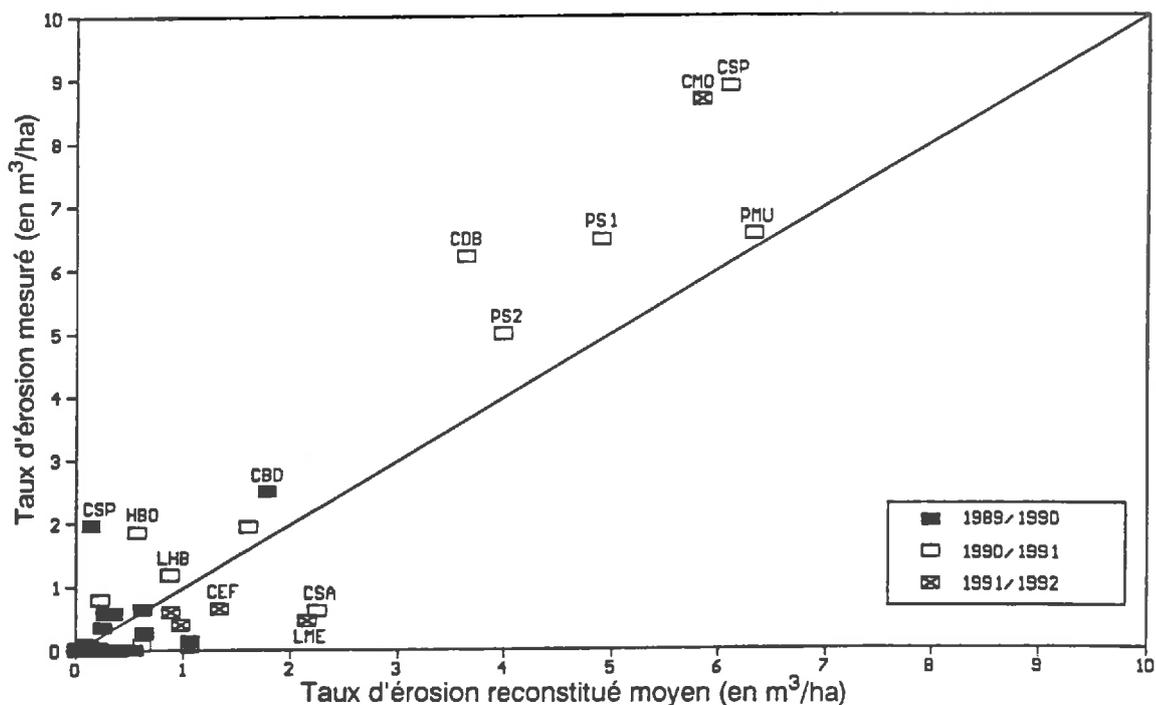


Fig. 12.5. : comparaison entre les taux d'érosion reconstitués moyens du second échantillon de BVE (en m³/ha), obtenus à l'aide de l'équation n°7, avec ceux du premier échantillon

En regroupant les résultats obtenus pour les BVE du premier et du second échantillon avec ceux des BVE du premier échantillon, la figure n°12.4 montre un décalage des valeurs du deuxième échantillon par rapport au nuage de points du premier échantillon. Le taux d'érosion de CMO est sous-estimé et ceux des BVE à peu d'érosion sont surestimés. On peut se demander si une meilleure prise en compte de l'effet année, par l'ajustement de la fonction g_3 d'après les segments incisés du second échantillon, peut améliorer la qualité de la reconstitution des taux d'érosion.

12.2.4. Reconstitution des volumes incisés par BVE d'après la fonction g_3

Le faible nombre de segments du second échantillon ne permet pas d'ajuster une fonction f pour déterminer la probabilité de non incision d'un segment. En revanche, une fonction g_3 d'ajustement des sections incisées peut être calculée pour les données de 1991/1992.

Nous obtenons la fonction g_3 d'ajustement des sections incisées suivante :

Equation n°7 (fonction g_3)

$$S = 0.16 (sr4^{0.69} \cdot pt^{0.45} \cdot sl^{3.50}) + \epsilon \quad (\text{en cm}^2)$$

dont $sr4$ en ha, pt en %, sl en classes ordonnées de 1 à 5 ;
avec un R^2 de 0.69 et un écart-type résiduel de 898.48 cm² (Cf. annexe 7, tableau n°10).

Les sections incisées sont évidemment mieux estimées par cette équation, qu'elles ne le sont par l'équation n°4 obtenue par l'ajustement des sections incisées du premier échantillon (Cf. figure n°13 de l'annexe 7, à comparée à la figure n°12.1). La légère tendance à la sous-estimation par l'équation n°4 n'apparaît plus avec l'équation n°7.

Les volumes incisés par segment sont reconstitués d'après l'équation n°3 (probabilité de non incision du segment) et l'équation n°7, ci-dessus. Là encore, 10 reconstitutions ont été réalisées pour permettre d'estimer une erreur de reconstitution des volumes incisés (Cf. annexe 7, tableau n°11). Les volumes incisés reconstitués moyens ne sont pas fondamentalement différents de ceux obtenus avec l'équation n°4. Seul l'incision importante du segment correspondant au thalweg de CMO est mieux reconstitué par l'emploi de l'équation n°7.

Ces volumes incisés, obtenus d'après l'ajustement des sections incisées du second échantillon de BVE, nous permettent de reconstituer un taux d'érosion pour chaque BVE (Cf. figure n°14, annexe 7). Ces taux d'érosion ont tendance à légèrement mieux ajuster les valeurs mesurées. La figure n°12.5 montre en effet que le nuage de points des BVE du second échantillon s'inscrit intégralement dans celui des BVE du premier échantillon. Le léger biais constaté pour les taux d'érosion reconstitués avec l'équation n°4, n'apparaît plus pour ceux reconstitués d'après l'équation n°7.

Conclusion

Cette méthode d'analyse de la variabilité des volumes incisés, par la prise en compte du réseau des collecteurs du ruissellement des BVE, permet un bon classement de nos BVE selon les risques d'érosion en rigoles. Elle donne de meilleurs résultats que ceux obtenus par l'analyse réalisée à l'échelle globale du BVE. Le fait de découper le réseaux des collecteurs en segments permet de tenir compte des aires d'alimentation en ruissellement à l'origine des incisions.

Sans avoir atteint une bonne estimation des sections et des longueurs incisées, la reconstitution des volumes incisés, particulièrement pour les segments à forte érosion, permet une reconstitution du volume total des rigoles par BVE somme toute pas trop mauvaise. Ceci confirme le rôle à la fois des longueurs incisables et de la position et l'importance des aires d'alimentation en ruissellement connectées à ces longueurs.

La procédure de validation appliquée à une année différente (conditions climatiques différentes) pour un jeu de données également différent (second échantillon de BVE), permet de conserver le modèle de reconstitution adopté. Ainsi un paramétrage annuel des équations d'ajustement des sections incisées n'est pas obligatoire. Ceci confirme que les variables sr_4 et si rendent compte, de manière non biaisée, de l'effet année.

Les problèmes déjà perceptibles sur le premier échantillon de BVE se retrouvent également présents pour le second échantillon. Notre procédure de reconstitution des volumes incisés par BVE a un biais systématique, qui consiste à sous-estimer les BVE à forte érosion, et inversement à surestimer les BVE à peu d'érosion. Les segments correspondant à une portion de thalweg sont principalement responsables de cette erreur sur la reconstitution des volumes incisés par BVE : soit leur section incisée est importante et dans ce cas le modèle de reconstitution sous-estime leur section, soit ils sont peu ou pas incisés et le modèle risque de surestimer leur section.

Les incertitudes sur le risque d'incision (probabilité de non incision d'un segment) et sur la fonction g d'estimation des sections incisées sont importantes, aboutissant à une assez grande imprécision sur les volumes incisés reconstitués. Ceci est imputable au caractère irrémédiablement "grossier" des variables utilisées, aux erreurs qui s'introduisent à tous les niveaux de la procédure de reconstitution des volumes incisés, à l'absence de nuances de la discrétisation de la variable sr_4 . On touche ainsi à une limite fondamentale de la procédure, qui n'est pas un modèle de prévision de l'érosion en rigoles, mais peut parfaitement convenir comme procédure de classement des BVE au risque d'érosion par ruissellement concentré.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La perspective dans laquelle se situait notre démarche était **l'élaboration d'une méthode de classement des risques d'érosion**, en nous limitant au contexte **des terres agricoles limoneuses du Nord du Bassin Parisien**. Dans ce cadre géographique, les pertes en terre résultent principalement **en hiver de l'érosion par ruissellement concentré**. La perspective et le cadre d'étude ainsi définis, nous ont conduit à nous fixer pour objectif, non d'élaborer un modèle déterministe d'érosion, mais **d'analyser la variabilité des symptômes d'érosion** pour en mieux comprendre les déterminants.

Après avoir situé la démarche adoptée par rapport au contexte et aux méthodes habituellement mises en oeuvre dans l'étude de l'érosion hydrique, nous rappellerons et discuterons les principaux résultats, puis la portée et les limites de la démarche.

Démarche

Relativement peu de résultats sur la forme d'érosion par ruissellement concentré ont été acquis jusqu'à présent. L'étude de cette forme impose une unité spatiale de dimension et de forme telles que la concentration du ruissellement puisse s'y manifester, mais aussi de taille suffisamment limitée pour permettre des observations de terrain et des mesures exhaustives. Cette double exigence nous a amené à définir le **Bassin Versant Élémentaire (BVE) comme unité spatiale d'étude** ; un effort de conception et de mise au point de méthodes de caractérisation adaptées à cette échelle a été nécessaire.

Le **BVE** est défini comme une **unité comprenant un axe de concentration majeur unique, non occupé par un cours d'eau permanent, et délimité par une ligne de partage des eaux stable, en particulier non dépendante des opérations culturales**. Dans les faits, il s'agit d'un bassin versant correspondant à une ramification ultime du réseau des vallons secs, sous réserve que son fond de vallon ait une longueur minimale (fixée conventionnellement à 250 mètres), pour répondre à la condition de stabilité de la ligne de partage des eaux.

Pour caractériser le fonctionnement hydrologique et érosif de telles unités spatiales, nous avons fait **l'hypothèse que les pratiques agraires et la couverture pédologique avaient une influence déterminante sur les phénomènes observés**. Ceci nous a conduit à réaliser la description des BVE sur la base d'un découpage en sous-unités de description, définies par des pratiques agraires et une texture de surface du sol homogènes. Ce découpage nous a servi de trame d'extrapolation des mesures, elles-mêmes réalisées ponctuellement sur chaque sous-unité. Le très grand nombre de sous-unités, nous a amené à porter notre préférence sur des méthodes d'observations pouvant être réalisées rapidement, quitte à paraître peu précises. Le choix des caractéristiques prises en compte, à été guidé par les connaissances actuelles des processus de base intervenant dans l'érosion par ruissellement concentré, c'est-à-dire sur la genèse du ruissellement et sa concentration, et sur l'arrachement des particules solides.

Les connaissances limitées sur les interrelations fonctionnelles entre ces différents processus, nous ont amené à opter pour une démarche empirique, fondée sur **la mise en relation des caractéristiques retenues avec les symptômes d'érosion mesurés**. Cette démarche a été réalisée selon deux approches : à l'échelle du BVE, pris comme une entité globale, et, toujours à l'échelle du BVE, mais en tenant compte de sa structure interne, qui impose de considérer des sous-unités distinctes du point de vue hydrologique. Cette seconde approche n'a pu être abordée sans la conception de méthodes permettant le découpage du BVE et la description des sous-unités ainsi obtenues. Nous avons subdivisé le BVE en portions de surface ayant leur propre fonctionnement hydrologique (aptitude ou non à la production d'un ruissellement et son évolution), raccordées à un réseau de concentration et d'acheminement du ruissellement, lui-même également subdivisé en tronçons (segments) à caractéristiques homogènes, ayant une aire d'alimentation en ruissellement spécifique.

Principaux déterminants de la variabilité de l'érosion en rigoles

L'observation des modalités de répartition spatiale des rigoles au sein des BVE a mis en évidence le rôle prépondérant de la concentration du ruissellement sur leur formation et leur évolution.

La variabilité du volume des rigoles est principalement liée à deux déterminants :

- **l'aire des surfaces aptes à produire un ruissellement en conditions climatiques hivernales ;**
- **la longueur des collecteurs de ce ruissellement.**

Leur interaction est primordiale. Celle-ci est déterminée par la manière dont sont réparties dans l'espace les surfaces aptes à produire un ruissellement par rapport au réseau des collecteurs de ce ruissellement, et par la façon dont ces surfaces sont connectées à ce réseau.

L'approche globale (prise en compte du BVE comme une entité) permet déjà de mettre en évidence le rôle de la variable "aire des surfaces aptes à produire un ruissellement". Par contre, le rôle des collecteurs et leurs interactions avec les surfaces n'apparaît que lors d'une analyse plus fine tenant compte de la structure et du fonctionnement hydrologique interne au BVE. En fait, la prise en compte des caractéristiques à l'échelle globale du BVE, en particulier des caractéristiques morphologiques, ne permet de rendre compte ni de leur rôle dans la concentration du ruissellement sur des axes d'écoulement, ni de la répartition spatiale des éléments au sein du BVE. Au total, on rend mieux compte de la variabilité des symptômes d'érosion en adoptant une démarche de reconstitution des volumes de rigoles basée sur l'identification et le découpage du réseau des collecteurs.

Surfaces aptes à produire un ruissellement

Que ce soit à l'échelle globale du BVE ou à celle des tronçons du réseau des collecteurs, l'extension des surfaces aptes à produire un ruissellement est la variable la plus déterminante sur l'explication de la variabilité des volumes incisés. Ceci corrobore, pour le type de milieu étudié, l'hypothèse de **validité du schéma hortonien**, qui conduit à attribuer une importance majeure à l'état de surface pour identifier les aires émettrices d'un ruissellement. **L'état de surface du sol est la résultante de l'influence interactive des systèmes de cultures et des pluies sur la genèse d'un ruissellement, d'où son caractère fondamentalement dynamique**. Les procédures de notation, proposées pour évaluer les conséquences de cet état de surface sur l'aptitude à produire un ruissellement, se sont avérées bien adaptées à la très forte variabilité spatiale et temporelle de cette aptitude. En revanche, elles sont trop grossières pour traduire de manière suffisamment sensible la variabilité des propriétés hydrologiques du terrain, dans une gamme où celles-ci ont des répercussions décisives sur l'érosion. Il en résulte une forte sensibilité des résultats obtenus aux modalités de notation des états de surface du sol.

Réseau des collecteurs du ruissellement

La compréhension de la formation des rigoles, particulièrement de leurs localisations et de leurs longueurs, ne peut être acquise qu'en les replaçant dans le cadre du réseau des collecteurs du ruissellement. Ce dernier définit la limite maximale des longueurs incisables par le ruissellement concentré. Cette potentialité s'exprime dans un contexte culturel et climatique donné, selon la position des surfaces alimentant réellement les segments du réseau.

L'identification des collecteurs du réseau peut être réalisée, indépendamment des observations des rigoles, selon des procédures prenant en compte des caractéristiques morphologiques du BVE (lignes de concentration morphologiques) et des motifs linéaires d'origine agraire (fourrières, dérayures). Le réseau se compose ainsi de deux parties, l'une permanente, liée à des éléments topographiques, l'autre temporaire, liée aux systèmes de culture.

Un des intérêts de la prise en compte des longueurs des collecteurs tient à ce qu'elle permet une analyse plus approfondie et plus détaillée de la variabilité des volumes incisés, en distinguant les deux composantes du volume, c'est-à-dire la section et la longueur incisées. On peut considérer que la section incisée d'une rigole est déterminée par les débits du ruissellement auxquels elle est soumise. Ces débits sont eux-mêmes contrôlés par l'extension des surfaces émettrices du ruissellement et de leur mode de connexion aux segments du réseau des collecteurs. En revanche, la longueur des rigoles est, en première approche, plutôt déterminée par la longueur des collecteurs que par le débit. Dans de nombreux cas, la longueur joue un rôle limitant sur le volume de la rigole. **La composante "longueur" du volume des rigoles est donc liée de manière prédominante à la topographie et aux caractéristiques agraires, et non à l'aspect hydrologique.**

Autres caractéristiques à prendre en compte

Les connaissances actuelles des processus de base de l'érosion par ruissellement attribuent un rôle déterminant à la pente et à la cohésion du sol. L'analyse de leur contribution à la variabilité des volumes de rigoles permet de retrouver l'influence de ces caractéristiques. Leur rôle n'a pu être mis en évidence que par l'analyse prenant en compte le réseau des collecteurs, et non par celle réalisée à l'échelle globale du BVE.

Un résultat particulièrement surprenant est d'avoir pu réaliser l'analyse de la variabilité des volumes incisés sans prendre en compte les pluies de manière explicite. En effet, à aucun moment, **les pluies ne sont apparues comme un facteur explicatif en soi**, ni comme un facteur explicatif de la variabilité résiduelle. Or, la variable d'érosivité des pluies est un des facteurs déterminants, voire le plus important, des modèles d'érosion traditionnels. Ceci est probablement lié au contexte climatique hivernal de l'étude. Dans ce cas, l'effet des pluies est essentiellement pris en compte par l'intermédiaire de l'évolution de l'état de surface du sol. Cette évolution est relativement progressive et résulte de l'action cumulative des pluies. Il n'en n'est pas de même pour la section des rigoles, probablement plutôt déterminée par l'épisode pluvieux ayant généré un débit maximum. Or, il n'est pas sûr que cet épisode soit si différent d'un site à l'autre. En fin de compte, à travers les processus d'infiltration et de genèse du ruissellement, la variabilité des débits de pointe est peut être plus liée à celle des aires d'alimentation et de leur état structural qu'à la variabilité des pluies.

Rôle déterminant des systèmes de culture

A tous les niveaux d'analyse et sur tous les paramètres agissant sur l'érosion par ruissellement concentré, **les systèmes de cultures apparaissent comme ayant un rôle déterminant**. Il est impossible de comprendre le fonctionnement hydrologique d'un BVE sans prendre les caractéristiques des systèmes de cultures comme une des bases essentielles de ce fonctionnement. **Celles-ci contribuent au découpage du BVE en sous-unités, dont l'aptitude au ruissellement est déterminée par l'état de surface du sol. L'évolution de cet état de surface est elle-même contrôlée par les systèmes de culture. Le réseau des collecteurs, permettant la concentration du ruissellement est également, en partie, issu des systèmes de culture qui, de plus, agissent sur les connexions des aires émettrices du ruissellement aux segments du réseau. L'influence dynamique des systèmes de culture sur le fonctionnement de l'érosion en rigole apparaît également à travers le critère de sensibilité du sol à l'incision, exprimant sa cohésion.**

Contribution à la modélisation de l'érosion par ruissellement concentré

Ayant été validée sur un second échantillon de BVE, la démarche d'analyse de la variabilité des volumes des rigoles, que nous avons adoptée, peut être envisagée comme un élément d'une modélisation déterministe de l'érosion par ruissellement concentré. Dans un tel modèle, nous sommes capables de proposer **un sous-modèle de découpage du BVE en sous-unités fonctionnelles formées de segments du réseau des collecteurs et de surfaces de contribution au ruissellement connectées à ces segments.**

La structure spatiale ainsi définie permet la reconstitution des longueurs et des sections incisées à partir de fonctions déterminées empiriquement : l'une estimant la probabilité qu'un segment soit incisé, l'autre estimant les sections incisées des segments reconnus comme ayant une incision d'après la première fonction. A chaque étape de la procédure de structuration spatiale du BVE et pour les deux fonctions de reconstitution des volumes incisés, on prend en compte trois séries de caractéristiques : morphologiques, pédologiques et agraires.

Cette démarche est donc restée en grande partie empirique, puisque nous avons considéré les processus de genèse et d'émission du ruissellement, d'une part, et d'incision et d'évolution des rigoles, d'autre part, comme une série de boîtes noires. Le fait que cette démarche ait permis d'analyser de façon assez satisfaisante la variabilité des volumes pris en compte de manière assez imprécise, renforce l'idée que **la modélisation de la structure spatiale fonctionnelle des BVE est primordiale pour la compréhension de l'érosion par ruissellement concentré.**

Limites de la démarche suivie

Cette méthode ne s'applique qu'à la forme d'érosion par ruissellement concentré s'exerçant sur des axes de concentration du ruissellement identifiables, les zones sources du ruissellement et celles sources de sédiments étant distinctes. En revanche, elle ne peut pas convenir pour estimer les risques d'érosion lorsque les processus de genèse du ruissellement et de détachement ou d'arrachement des particules solides s'exercent sur la même surface, ce qui est le cas pour l'érosion diffuse ou en rigole - interrigoles. En particulier, notre démarche est à considérer avec prudence par rapport à l'érosion résultant des orages de printemps, pouvant prendre un caractère catastrophique. En effet, la contribution des systèmes de rigoles à schéma parallèle, affectant les versants et non localisés de manière privilégiée sur des axes de concentration du ruissellement prédéterminés, peut alors être plus importante que celle de rigoles localisées sur des collecteurs du ruissellement. Dans ce cas, il faut probablement plutôt s'adresser à des méthodes plus classiques d'évaluation du risque d'érosion, telle celle développée par Wischmeier, pour ne citer que la plus ancienne et la plus connue.

Si l'on reste dans le cadre de l'érosion par ruissellement concentré, notre démarche a le mérite de permettre une assez bonne reconstitution des volumes incisés, mais fait l'impasse sur le fonctionnement hydrologique réel, c'est-à-dire sur les flux d'eau. Cette limite est telle, qu'aucun perfectionnement important de la qualité prédictive de notre modèle ne peut être espérée sans prendre en compte la variable flux de manière explicite.

De ce fait, la procédure de reconstitution des volumes incisés mise au point ne peut être considérée comme un modèle de prédiction de l'érosion en valeurs absolues, mais comme un système assez satisfaisant de classement des sites au regard du risque d'érosion par ruissellement concentré.

Applications

L'analyse de l'érosion en rigoles, nous montre que les interactions spatiales sont si complexes, qu'aucune pratique agraire, aucune caractéristique pédologique ou morphologique, ne peut être correctement jugée en soi, sans la situer par rapport au fonctionnement hydrologique d'ensemble du BVE. Ainsi, par exemple, le compactage du sol par les pneumatiques des engins agricoles contribue à la fois à augmenter le risque de ruissellement, du fait de la baisse de l'infiltrabilité conférée au sol, et à diminuer le risque d'incision du sol par l'augmentation de sa cohésion. Appliqué au niveau des zones amont susceptibles d'émettre un ruissellement, il apparaît comme un facteur aggravant des risques d'érosion. A l'opposé, il contribue à limiter ce risque au niveau des collecteurs du ruissellement situés en aval. De la même façon, il apparaît impossible d'attribuer de manière normative une vertu ou un défaut particulier à la taille des parcelles. L'augmentation de la taille des parcelles diminue la longueur du réseau des collecteurs du ruissellement en réduisant la densité des motifs linéaires d'origine agraire, mais d'un autre côté, augmente le risque d'avoir de grandes surfaces aptes à produire un ruissellement d'un seul tenant connectées à un segment du réseau. Ceci peut s'étendre à toutes les caractéristiques, prises individuellement, intervenant dans les processus d'érosion par ruissellement concentré.

La seule démarche qui semble pouvoir être efficace pour évaluer l'effet d'une pratique agraire ou d'un aménagement particuliers, est de tester leurs éventuelles influences par une simulation au cas par cas.

Nous avons déjà évoqué la contribution que peut apporter ce travail à l'élaboration des modèles déterministes mais leur aboutissement est probablement encore assez éloigné. Sans attendre cette échéance, il nous paraît dès à présent possible de le valoriser en mettant au point un simulateur qui permettrait de tracer le réseau des rigoles, en s'appuyant sur les procédures que nous avons systématisées. Un tel simulateur permettrait de tester différentes hypothèses sur le parcellaire, les systèmes de culture et les moyens de lutte contre l'érosion en rigoles sur les collecteurs du ruissellement, dans un cadre physique donné. Il implique le recours à un système d'information géographique, comme base de données, et à des méthodes d'intelligences artificielles appliquées à la représentation de phénomènes spatiaux interdépendants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBOTT M.B., BATHURST J.C., CUNGE J.A., O'CONNELL P.E., RASMUNSEN J. (1986) : An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen – "SHE", 2: structure of physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* 87: 61–77.
- ALONSO C.V. (1985a) : Channel flow routing in the SWAM model. In Decoursey D.G., *Proceedings of the Natural Resources Modeling Symposium*, Pingree Park, (USDA), 353–357.
- ALONSO C.V. (1985b) : Instream sediment routing in the SWAM model. In Decoursey D.G., *Proceedings of the Natural Resources Modeling Symposium*, Pingree Park, (USDA), 490–494.
- ALONSO C.V., DECOURSEY D.G. (1985) : Small watershed SWAM model. In Decoursey D.G., *Proceedings of the Natural Resources Modeling Symposium*, Pingree Park, (USDA), 490–494.
- AUZET A.V. (1987a) : L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Ann. Geogr.* 537, 529–556.
- AUZET A.V. (1987b) : L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Min. Env. / Min. Agr., CEREG-URA 95 CNRS, 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 Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (eds.), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 383–400.
- AUZET A.V., BOIFFIN J., PAPY F., LUDWIG B., MAUCORPS J. (1993) : Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena* 20, 41–62.
- AUZET A.V., BOIFFIN J., LUDWIG B. (soumis) : Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. Soumis pour publication dans les actes du 1er colloque de l'ESSC "Conserving our soil resources", April 1992, Silsoe, Bedford UK.
- AUZET A.V., BOIFFIN J., LUDWIG B., PAPY F. (en préparation) : Influence of topographic and agricultural linear features on the location of rills.
- BEASLEY D.B., MONKE E.J., HUGGINS L.F. (1980) : ANSWERS: a model for watershed planning. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.*, 23, 939–944.
- BEUVE P. (1989) : Evaluation de la sensibilité des sites du Nord du Bassin Parisien. Prise en compte des caractéristiques de la couverture pédologique. Mémoire de DEA, ENSA Rennes, 33 p. + ann.
- BEVEN K., WARREN R., ZAOUI J. (1980) : SHE: towards a methodology for physically-based distributed forecasting in hydrology. Hydrological forecasting – Prévisions hydrologiques, Actes du colloque d'Oxford, avril 1980, *IAHS-AIHS Publ.* 129, 133–137.
- BOARDMAN J. (1983) : Soil erosion at Albourne, West Sussex, England. *Applied Geography* 3, 317–329.
- BOARDMAN J. (1985) : Soil erosion, climatic vagary and agricultural change on the Downs around Lewes and Brighton, autumn 1982. *Applied Geography* 5, 243–258.
- BOARDMAN J. (1990) : Soil erosion on the South Downs : a review. In Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (eds.), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 87–105
- BOARDMAN J., DEARING J.A., FOSTER I.D.L. (1990) : Soil erosion studies : some assessments. In Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (eds.), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 659–672
- BOIFFIN J. (1976) : Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agronom.* 27, 447–463.
- BOIFFIN J. (1984) : La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Doc. Ing. INA Paris-Grignon, 320 p.
- BOIFFIN J. (1985) : Stages and time-dependency of soil crusting in situ. In Callebaut F., Gabriels D. & De Boodt M. (eds.), *Assessment of soil surface sealing and crusting* (Proceedings of the Symposium held in Ghent, Belgium), 91–98.

- BOIFFIN J. (1989) : La dégradation structurale des couches superficielles sous l'action des pluies. In Sebillotte M. (Ed), *Fertilité et système de production*, INRA, Paris, 137-155.
- BOIFFIN J., MONNIER G. (1986) : Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. In Callebaut F., Gabriels D. & De Boodt M. (eds.), *Assessment of soil surface sealing and crusting* (Proceedings of the Symposium held in Ghent, Belgium), 210-217.
- BOIFFIN J., PAPY F. (1988) : Prévision et maîtrise de l'érosion : influence des systèmes de culture. *Perspectives Agricoles* 122, 93-98.
- BOIFFIN J., PAPY F., EIMBERCK M. (1988) : Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré - I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 8(8), 663-673.
- BOLLINNE A. (1982) : Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en Moyenne Belgique. Thèse Univ. Liège, 356p.
- BOLLINNE A., LAURANT A. (1983) : La prévision de l'érosion en Europe atlantique: le cas de la zone limoneuse de Belgique. *Pédologie* XXXIII, 2, 117-136.
- BORK H.R. (1988) : Bodenerosion und Umwelt. Verlauf, Ursachen und neuzeitlichen Bodenerosion. Bodenerosionsprozesse. Modelle und Simulationen. *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, 13, 250 p.
- BORK H.R. (1989) : Soil erosion during the past millennium in Central Europe and its significance within the geomorphodynamics of the Holocene. *Catena Suppl.* 15, 121-131.
- BORK H.R., HENSEL H. (1987) : Computer-aided construction of soil erosion and deposition maps. *Geol. Jahrd.*
- BORK H.R., ROHDENBURG H. (1986) : Transferable parameterization methods for distributed hydrological and agroecological catchment models. *Catena* 13, 99-117.
- BRESSON L.-M., BOIFFIN J. (1990) : Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma* 47, 301-325.
- BRUNET R. (1963) : Les cartes des pentes. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, XXXIV, 317-334.
- BRYAN R.B. (1987) : Processes and significance of rill development. *Catena Suppl.* 8, 1-15.
- CAPPUS P. (1960) : Bassin expérimental d'Arlande. Etude des lois d'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche* A, 493-520.
- DE PLOEY J. (1986) : Soil erosion and possible conservation measures in loess loamy areas. In Chisci G., Morgan R.P.C. (Eds), *Soil Erosion in the European Community, Impact of changing agriculture*, Balkema, Rotterdam, 157-164.
- DE PLOEY J. (1989) : Soil erosion map of Western Europe. *Catena* Ed.
- DE PLOEY J., POESEN J. (1985) : Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In Richards K.S., Arnett R.R. and Ellis S. (Eds.), *Geomorphology and Soils*, George Allen & Unwin, 99-120.
- DE ROO A.P.J., HAZELHOFF L., BURROUGH P.A. (1989) : Soil erosion modelling using 'ANSWERS' and geographical information systems. *Earth Surface Processes & Landforms*, 14, 517-532.
- DUBRULLE P., BOIFFIN J. (1989) : Un exemple de traitement informatisé des enregistrements pluviométriques pour les études relatives à la dégradation physique des sols. *La Météorologie* 29, 22-27.
- 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 D.L. and Dearing J.A. (Eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 285-300.
- ELLISON W.D. (1945) : Some effects of raindrops and surface-flow on soil erosion and infiltration. *Trans. Am. Geophys. Union* 26, 415-429.
- EVANS R. (1990) : Water erosion in British farmers' fields - some causes, impacts, predictions. *Progress in Physical Geography* 14(2), 199-219.
- FIES J.C., STENGEL P. (1981) : Densité texturale des sols naturels; éléments d'interprétation. *Agronomie* 1(8), 659-666.
- FLACKE W., AUERSWALD K., NEUFANG L. (1990) : Combining a modified universal soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena* 17, 383-397.

- FOSTER G.R. (1990) : Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (Eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 429-445.
- FOSTER G.R., LANE L.J. (1987) : User requirements USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). National Soil Erosion Research Laboratory, Report 1, USDA-ARS, W.Lafayette, Indiana, 43p.
- FOSTER G.R., MEYER L.D., ONSTAD C.A. (1977) : A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.* 20, 683-687.
- FOSTER G.R., SMITH R.E. (1985) : A dynamic erosion concept. In Decoursey D.G., *Proceedings of the Natural Resources Modeling Symposium*, Pingree Park, (USDA), 434-437.
- FOSTER G.R., YOUNG R.A., NIEBLING W.H. (1985) : Sediment composition for nonpoint source pollution analyses. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.* 28, 133-139.
- FOSTER G.R., WISCHMEIER W.H. (1974) : Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.* 17, 305-307.
- FOURNIER F. (1960) : Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. *Presses Universitaires de France*, Paris, 201p.
- FULLEN M.A. (1985) : Compaction, hydrological processes and soil erosion on loamy sands in East Shropshire, England. *Soil & Tillage Research* 6, 17-29.
- GABRIELS D. (1988) : Use of organic waste materials for soil structurization and crop production : initial field experiment. *Soil Technology* 1, 89-92.
- GOVERS G. (1985) : Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Catena* 12, 35-49.
- GOVERS G. (1987) : Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldenberg experimental site. *Catena Suppl.* 8, 17-34.
- GOVERS G. (1989) : Grain velocities in overland flow : a laboratory study. *Earth Surface Processes & Landforms*, 14, 481-498.
- GOVERS G. (1991a) : A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation. *Catena* 18, 91-111.
- GOVERS G. (1991b) : Rill erosion on arable land in central Belgium : rates, controls and predictability. *Catena* 18, 133-155.
- GOVERS G., POESEN J. (1985) : A field-scale study of surface sealing and compaction on loam and sandy loams soils - I. Spatial variability of soil surface sealing and crusting. In Callebaut F., Gabriels D. & De Boodt M. (Eds.), *Assessment of soil surface sealing and crusting* (Proceedings of the Symposium held in Ghent, Belgium), 171-182.
- GOVERS G., RAUWS G. (1986) : Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. *Earth Surface Processes & Landforms* 11, 515-524.
- GUERIF J. (1988) : Résistance en traction des agrégats terreux : influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. *Agronomie* 8, 379-386.
- GUERIF J. (1990) : Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In Boiffin J. et Marin-Lafèche (Eds.), *La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*, Les colloques de l'INRA, 71-89.
- HEATHWAITE A.L., BURT T.P., TRUDGILL S.T. (1990) : Land-use controls on sediment production in a lowland catchment, South-west England. In Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (Eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 69-86.
- HENIN S., GOBILLOT T. (1950) : L'érosion en France. *Bulletin Technique d'Information* 50, 431-433.
- HENSEL H., BORK H.R. (1987a) : EDV - Gestützte Erstellung von Erosionsakkumulationskarten. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 53, 39-45.
- HENSEL H., BORK H.R. (1987b) : EDV - Gestützte Bilanzierung von Erosions und Akkumulation in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. *Landschaftökologisches Messen und Auswerten*, 2, 2/3.
- HILLEL D. (1974) : L'eau et le sol, principes et processus physiques. Leuven, Vander.
- HORTON R.E. (1933) : The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.* 14, 446-460.
- HUDSON N.W. (1961) : An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of subtropical rainfall. *Rhodesia Science Association Proceedings* 49, 14-25.

- JAMAGNE M. (1964) : Introduction à une étude pédologique dans la partie nord du Bassin Parisien. *Pédologie XIV*(2), 228-342.
- KEMPER W.D., KOCH E. (1966) : Aggregate stability of soils from Western United States and Canada. *USDA Techn. Bull.*1355.
- KNISEL W.G. (1980) : CREAMS - A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. *Conservation Research Report 26*, Washington D.C. (USDA).
- KWAAD F.J.P. (1991) : Summer and winter regimes of runoff generation and soil erosion on cultivated loess soils (the Netherlands). *Earth Surface Processes & Landforms* 16, 653-662.
- LAUTRIDOU J.P. (1985) : Le cycle périglaciaire pleistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Caen, 908p.
- LE BISSONNAIS Y. (1988) : Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse Univ. d'Orléans, INRA, 225p.
- LEFEVRE P. (1958) : Quelques phénomènes d'érosion en Picardie. *Ann. Agron.* 1, 91-129.
- LHENAFF R. (1986) : Le système morphogénique des milieux tempérés humides. *Hommes et Terres du Nord* 1986-4, 241-253.
- LILIN Ch., PAULET B. (1987) : L'érosion des sols cultivés en France: développement actuel et actions entreprises. *Bulletin Technique d'Information* 417, 71-94.
- LUDWIG B. (1989) : Essai d'évaluation de la sensibilité à l'érosion des sites du Nord du Bassin Parisien. Prise en compte des caractéristiques morphologiques. Mémoire de DEA, ULP Strasbourg, CEREG-URA95 du CNRS, INRA Laon, INRA-SAD Grignon, 70p + ann.
- LUDWIG B., BOIFFIN J., MASCLÉ A. (1992) : Origine spatiale des sédiments et contribution relative aux pertes en terre de différentes formes d'érosion au sein d'un bassin versant élémentaire. Communication au Symposium International "Erosion des terres agricoles en milieu tempéré de plaines et collines, Saint-Cloud, Paris, 25-29 mai 1992.
- 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.
- MASSON F.X. (1987) : L'érosion des terres agricoles de la région Nord-Pas-de-Calais. *Hommes et Terres du Nord* 1987-3, 139-145.
- MAUCORPS J. (1982) : A note on farmland erosion in Northern France. Report EUR 8427 E.N. (Soil erosion, abridged proc. of the workshop on soil erosion and conservation, Florence, oct. 82), 50-52.
- 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.
- MONNIER G., KONAN L. (1968) : Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.* 19(5), 541-551.
- MONNIER G., STENGEL P. (1982) : La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. *Agronomie* 122, 503-512.
- MORGAN R.P.C. (1974) : Estimating regional variations in soil erosion Hazard in Peninsular Malaysia. *Malay Nature Journal* 28, 96-106.
- MORGAN R.P.C., MORGAN D.D.V., FINNEY H.J. (1986) : A simple model for assessing annual soil erosion on hillslopes. In Giorgini A., Zingales F. (Eds.), *Agricultural Nonpoint Source Pollution: Model selection and application*, Elsevier, Oxford, 147-159.
- MOORE I.D., BURCH G.J., MACKENZIE D.H. (1988) : Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.* 31(4), 1098-1107.
- NEBOIT R. (1983) : L'homme et l'érosion. Publ. Fac. des Lettres et Sc. Hum. Clermont-Ferrand II, fasc. 17, 183p.
- ONSTAD C.A. (1984) : Depressional storage on tilled soil surfaces. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.* 27(3), 729-732.
- OUVRY J.F. (1982) : Localisation et description des sites d'érosion des sols agricoles du bassin inférieur de l'Yères (Seine Maritime). Mémoire DAA, ENSA Rennes, INRA Rennes et Rouen, 72p + ann.

- OUVRY J.F. (1989) : Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré: expérience du Pays de Caux (France). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 25(1,2), 157-169.
- PAPY F., BOIFFIN J. (1989) : The use of farming systems for the control of runoff and erosion (Example from a given country with thalweg erosion). *Soil Technology series* 1, 29-38.
- PAPY F., BOIFFIN J. (1988) : Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré - II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 8/9, 745-756.
- PAPY F., DOUYER C. (1991) : Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie* 11, 201-215.
- PIHAN J. (1979) : Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. In Vogt H. et Vogt T. (Eds.), *Colloque sur l'érosion des sols en milieu tempéré non méditerranéen* (Strasbourg-Colmar, sept. 1978), 9-18.
- POESEN J. (1989) : Conditions for gully formation in the Belgian loam belt and some ways to control them. *Soil Technology series* 1, 39-52.
- POESEN J., GOVERS G. (1985) : A field-scale study of surface sealing and compaction on loam and sandy loam soils II. Impact of soil surface sealing and compaction on water erosion processes In Callebaut F., Gabriels D. & De Boodt M. (Eds), *Assessment of soil surface sealing and crusting* (Proceedings of the Symposium held in Ghent, Belgium), 183-193.
- POESEN J., GOVERS G. (1990) : Gully erosion in the loam belt of Belgium : typology and control measure. In Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (Eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 513-530.
- QUINTON J.N. (1992) : Validation of physically based models. Paper presented to the 1st International ESSC Congress "Conserving our Soil Resources" April 1992, Silsoe, Bedford U.K.
- QUINTON J.N., CATT J.A., STYLES P.D.R. (1992) : The Woburn erosion experiment. In 1st International ESSC Congress "Conserving our Soil Resources" April 1992, Mid-Congress tour guide, 11-15.
- RAUWS G. (1987) : The initiation of rills on plane beds of non-cohesive sediments. *Catena Suppl.* 8, 107-118.
- RAUWS G., AUZET A.V. (1989) : Laboratory experiments on the effects of simulated tractor wheelings on linear soil erosion. *Soil & Tillage Research* 13, 75-81.
- RAUWS G., GOVERS G. (1988) : Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science* 39, 111-124.
- ROBINSON D.A., BLACKMAN J.D. (1990) : Some costs and consequences of soil erosion and flooding around Brighton and Hove, Autumn 87. In Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (Eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 369-382.
- ROCHE M. (1963) : Hydrologie de surface. Gauthier-Villars, Paris, 430p.
- ROOSE E. (1981) : Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. *Travaux et Documents de l'ORSTOM* n°130, 569p.
- ROTH C.H., HELMING K. (1992) : Dynamics of surface sealing, runoff formation and interrill soil loss as related to rainfall intensity, microrelief and solpe. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155, 1-8.
- ROTH C.H., JOSCHKO M. (1991) : A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 154, 101-105.
- SAVAT J. (1978) : L'hydraulique du ruissellement en nappe mince sur un loess nu et sous couverture steppique simulée au laboratoire. *Geo-Eco-Trop* 1, 131-142.
- SAVAT J., DE PLOEY J. (1982) : Sheetwash and rill development by surface flow. In Bryan R. & Yair A. (Eds), *Badland, Geomorphology and Piping*, Geo Books, 113-126.
- SEBILLOTTE M. (1968) : Stabilité structurale et bilan hydrique du sol - Influence du climat et de la culture. *Ann. Agron.*, 19(4), 403-414.
- SOMME J. (1975) : Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude Géomorphologique 1975, Thèse de Doctorat d'Etat. 2vol, 790p.
- SPOMER R.G., HJEMFELT A.T. (1986) : Concentrated flow erosion on conventional and conservation tilled watersheds. *Trans. of Amer. Soc. of Agric. Engr.* 29 (1), 124-127.

- THORNES J.B. (1980) : Erosional processes of running water and their spatial and temporal controls: a theoretical viewpoint. in Kirkby M.J., Morgan R.P.C. (eds), *Soil Erosion*, Wiley, Chichester, 129-182.
- THORNE C.R., ZEVENBERGEN L.W. (1990) : Prediction of ephemeral gully erosion on cropland in the Southeastern United States. In Boardman J., Foster D.L. and Dearing J.A. (eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons Ltd, 447-460.
- VALENTIN C. (1985) : Effects of soil moisture and kinetic energie on the mechanical resistance of surface crusts. In Callebaut F., Gabriels D. & De Boodt M. (eds), *Assessment of soil surface sealing and crusting* (Proceedings of the Symposium held in Ghent, Belgium), 367-369.
- VOGT H., AUZET A.V. (1989) : Erosion des sols. In Groupe français de Géomorphologie (Ed.), *Recent advances in French Geomorphology*, 167-173.
- VOGT H., VOGT T. Eds. (1979) : Colloque sur l'érosion des sols en milieu tempéré non méditerranéen (Strasbourg-Colmar, sept. 1978), 251p.
- VOORHEES W.B., YOUNG R.A., LYLES L. (1979) : Wheel traffic considerations in erosion research. *Trans. of the Amer. Soc. of Agric. Engr.* ; 22 ; 4 ; 786-790
- WILLIAMS J.R. (1985a) : The physical components of the EPIC model. In EL-SWAIFY et al. *Soil Erosion and Conservation*, Ankeny (SCSA), 272-284.
- WILLIAMS J.R. (1985b) : The EPIC model. An overview. In Decoursey D.G., *Proceedings of the Natural Resources Modeling Symposium*, Pingree Park, (USDA), 353-357.
- WISCHMEIER W.H. (1976) : Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation. *Journ. 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, 58p.

ANNEXES

Annexe 1

LISTE DES VARIABLES MORPHOLOGIQUES, PEDOLOGIQUES ET AGRAIRES

Liste des variables morphologiques, pédologiques et agraires

Caractéristiques morphologiques

ST	Surface totale du BVE	ha
Ltwb	Longueur brute du thalweg.....	m
Ltw	Longueur incisable du thalweg	m
Dtw	Densité de thalweg.....	m/ha
Llc	Longueur des lignes de concentration morphologiques, thalweg exclu	m
Dlc	Densité de lignes de concentration morphologiques thalweg exclu	m/ha
Llcw	Longueur des lignes de concentration morphologiques, thalweg compris	m/ha
Dlcw	Densité de lignes de concentration morphologiques, thalweg compris	m/ha
K	Indice de compacité de Gravélius	
Ptw	Pente du thalweg.....	%
Pg	Pente globale du BVE.....	%
Pmx	Pente maximale du BVE	%
Sp5	Surface de pentes supérieures à 5%.....	ha
Pp5	Proportion de surface de pentes supérieures à 5%.....	%
Sp10	Surface de pentes supérieures à 10%	ha
Pp10	Proportion de surface de pentes supérieures à 10%	%
Sapf	Surface en position amont à pentes inférieures à 2%.....	ha
Papf	Proportion de surface en position amont à pentes inférieures à 2%.....	%
Sat	Surface en amont du thalweg	ha
Pat	Proportion de surface en amont du thalweg	%

Caractéristiques pédologiques

SC	Surface à sol sensible à la battance	ha
PC	Proportion de surface à sol sensible à la battance	%
Sla	Surface à teneur en argile $\geq 17.5\%$	ha
Pla	Proportion de surface à teneur en argile $\geq 17.5\%$	%
Saal	Surface à teneur en argile $\geq 30\%$	ha
Paal	Proportion de surface à teneur en argile $\geq 30\%$	%
Ssa	Surface à teneur en sable $\geq 35\%$	ha
Psa	Proportion de surface à teneur en sable $\geq 35\%$	%

Caractéristiques agraires

TP	Taille moyenne des parcelles d'un BVE	ha
SCH	Surface en cultures d'hiver	ha
PCH	Proportion de surface en cultures d'hiver	%
SIT	Surface en intercultures travaillées	ha
PIT	Proportion de surface en intercultures travaillées	%
SINT	Surface en intercultures non travaillées.....	ha
PINT	Proportion de surface en intercultures non travaillées.....	%
SDv	Surface en occupations du sol divers (prairies, bois et friches.....	ha
PDv	Proportion de surface en occupation du sol divers	%

Annexe 2

FORMATION DES CROUTES SEDIMENTAIRES EN FONCTION DE LA TEXTURE EN SURFACE DU SOL ET DES CARACTERISTIQUES DES PLUIES POUR LES SEMIS D'AUTOMNE

Les relevés des états de surface ont été effectués sur l'ensemble des unités spatiales à texture homogène d'une même parcelle (appelées : unités spatiales élémentaires, USE), des BVE du premier échantillon, en 1989/1990. Ils permettent de préciser la variabilité d'atteinte du facies F2, pour les différentes classes texturales, en fonction des pluies reçues depuis la date des derniers travaux du sol, et d'analyser les causes de la variabilité résiduelle au sein d'une même classe texturale.

L'étude est volontairement limitée aux semis d'automne, effectués à des dates rapprochées et ayant subi des types de travaux semblables, de manière à avoir un état initial similaire, des conditions d'humidité et d'histoire hydrique assez proches.

Données utilisées

Dates de semis :

Elles ont été obtenues par enquête auprès des agriculteurs.

Facies :

Les observations du facies (Cf. § 3.5), par unité spatiale élémentaire : USE (portion de parcelle à même texture), ont été réalisées tous les un à deux mois, selon les pluies (un minimum de 60 mm de précipitations cumulées entre chaque tournée), pour l'ensemble des 7 tournées, d'automne hiver 1989/1990 et de printemps 1990.

Pluviométrie :

Les données pluviométriques ont été enregistrées par huit pluviomètres enregistreurs (type CR2M), à pas de temps d'une minute et de hauteur de pluie de 0.1 mm., permettant de couvrir l'ensemble des 20 BVE étudiés. Le traitement des données brutes enregistrées a été réalisé par le logiciel "Pluvmenu" de l'INRA (DUBRULLE et BOIFFIN, 1989), et à permis d'obtenir les données suivantes :

- hauteurs des pluies en 1/10 mm (P);
- énergie cinétique totale (Kec);
- énergie cinétique des pluies ayant une intensité instantanée supérieure ou égale à 5 mm/h et 10 mm/h (Ke5 et Ke10).

Précipitations de Bourg Dun (Pays de Caux) d'automne hiver 1989/1990

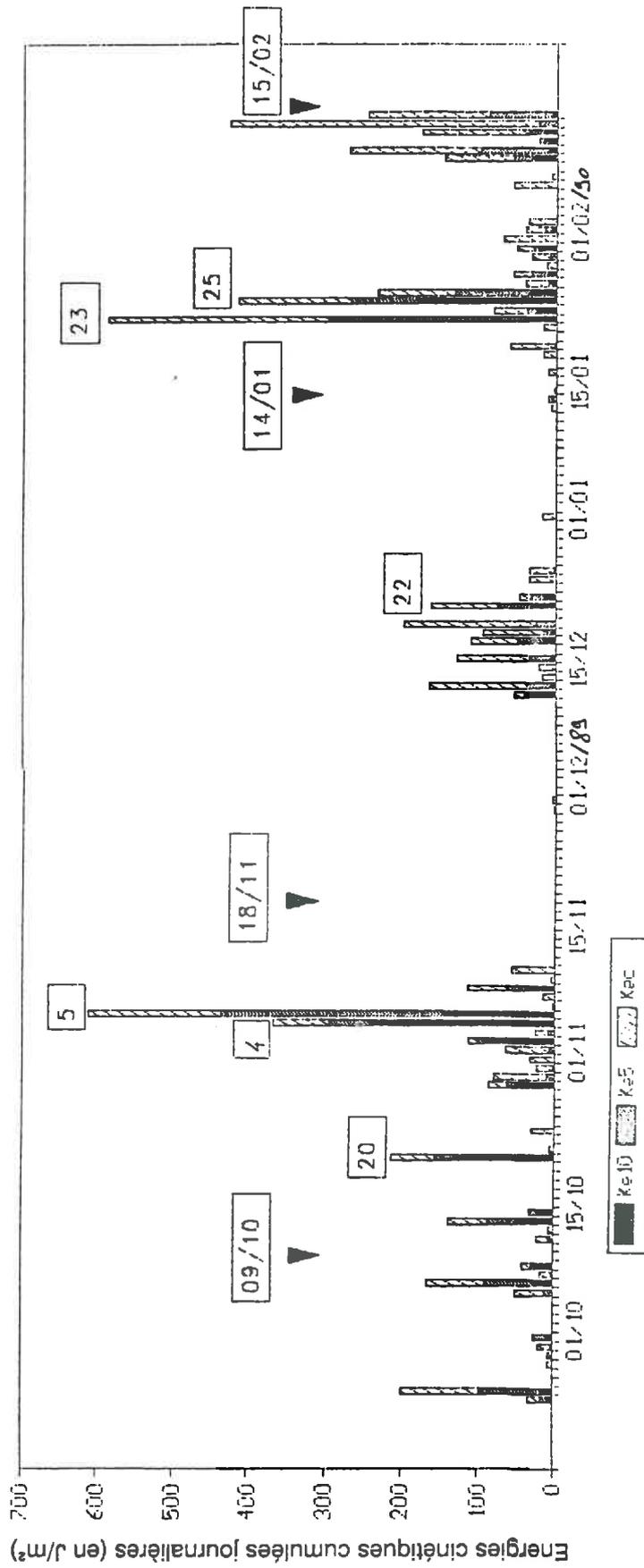


Fig. 1. : cumul des énergies cinétiques des précipitations journalières (en J/m²).

Méthode

L'objectif est de déterminer le hauteur de pluie cumulée ayant permis l'atteinte du facies F2 par la surface du sol. La date d'atteinte du facies F2 de la surface d'un sol peut être déterminée d'après les Ke5 et Ke10 journaliers, enregistrées entre la date de la première observation du facies F2 et la date de la tournée précédente, en fonction des facies notées lors de ces deux tournées.

Les hauteurs cumulées des précipitations, entre la date du semis et la date supposée du passage en facies F2, sont calculées pour chaque USE en quatre étapes :

1ère étape : encadrement de la date du passage en F2 d'après les observations de terrain (date de la première observation du facies F2 et date de la tournée précédente).

2ème étape : construction d'un diagramme des énergies cinétiques (Kec, Ke5 et Ke10) des précipitations journalières, en indiquant les dates des tournées et les jours de pluies particulièrement battantes (généralement de une à trois entre chaque tournée) (Cf. figure n°1). On suppose que les jours responsables de l'atteinte du facies F2 sont soit des journées à pluie d'intensités élevées, soit des épisodes pluvieux de plusieurs jours. Dans ce dernier cas, la date retenue correspond au dernier jour de l'épisode pluvieux.

3ème étape : identification de l'épisode pluvieux responsable du passage en facies F2 de la surface du sol, ceci en fonction de l'extension des plages à croûtes sédimentaires lors de la première date d'observation du facies F2 et de la tournée précédente.

Exemple

N°USE	Observations facies (date, facies*)		Episodes pluvieux	Date atteinte facies F2
C 48 LMS	09/10/89 F0	18/11/89 F2-	20/10/89 04/11/89 05/11/89	05/11/89
C 57 LMS	14/10/90 F1/2	16/02/90 F2+	23/01/90 25/01/90 15/02/90	23/01/90
C 3b LMS	18/11/89 F1/2	14/01/89 F2	22/12/89	22/12/89

(* : voir chapitre 3.5, tableau n°3.1)

4ème étape : cumul des précipitations entre la date du semis et celle supposée d'atteinte du facies F2.

Résultats

Les précipitations cumulées, ayant permis la formation de croûtes sédimentaires en contact, couvrant plus de 50% de la surface du sol, sont calculées pour 179 USE, comportant des sols appartenant à 11 classes texturales distinctes.

Le tableau n°1 et la figure n°2 présentent les hauteurs de pluie cumulées entre la date du semis et celle supposée d'atteinte du facies F2. Ces hauteurs de pluie cumulées varient entre 35 mm et 700 mm. Le cumul de précipitation est découpé en classes selon un pas variable de 20 à 100 mm, dont la classe de 50 à 100 mm, importante car elle encadre les valeurs permettant l'atteinte du facies F2 pour les classes texturales LM et LMS (60 à 90 mm) citées dans la littérature (J. BOIFFIN et F. PAPY, 1988).

Tableau 1 : proportions d'USE dont la surface du sol ait notée facies F2, selon les précipitations cumulées depuis la date du semis (en mm).

Précipitation	A	AL	LA	LAS	LM	LMc	LMS	LS	LSA	SA	SL
0-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-50	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
50-100	0	0	2	0	9	0	32	0	0	0	0
100-150	0	0	11	5	39	0	65	0	0	0	0
150-200	0	0	11	9	68	0	91	100	0	0	0
200-250	0	0	30	14	79	0	97	100	0	0	17
250-300	0	0	43	45	89	0	97	100	100	100	83
300-350	0	0	59	50	91	0	97	100	100	100	100
350-400	0	0	67	73	95	0	97	100	100	100	100
400-500	0	20	87	86	96	0	97	100	100	100	100
500-600	0	40	93	86	98	0	97	100	100	100	100
600-700	0	80	100	95	98	0	97	100	100	100	100
Pas de F2	100	20	0	5	2	100	3	0	0	0	0
Nbre de cas	4	5	46	22	56	3	34	1	1	1	6

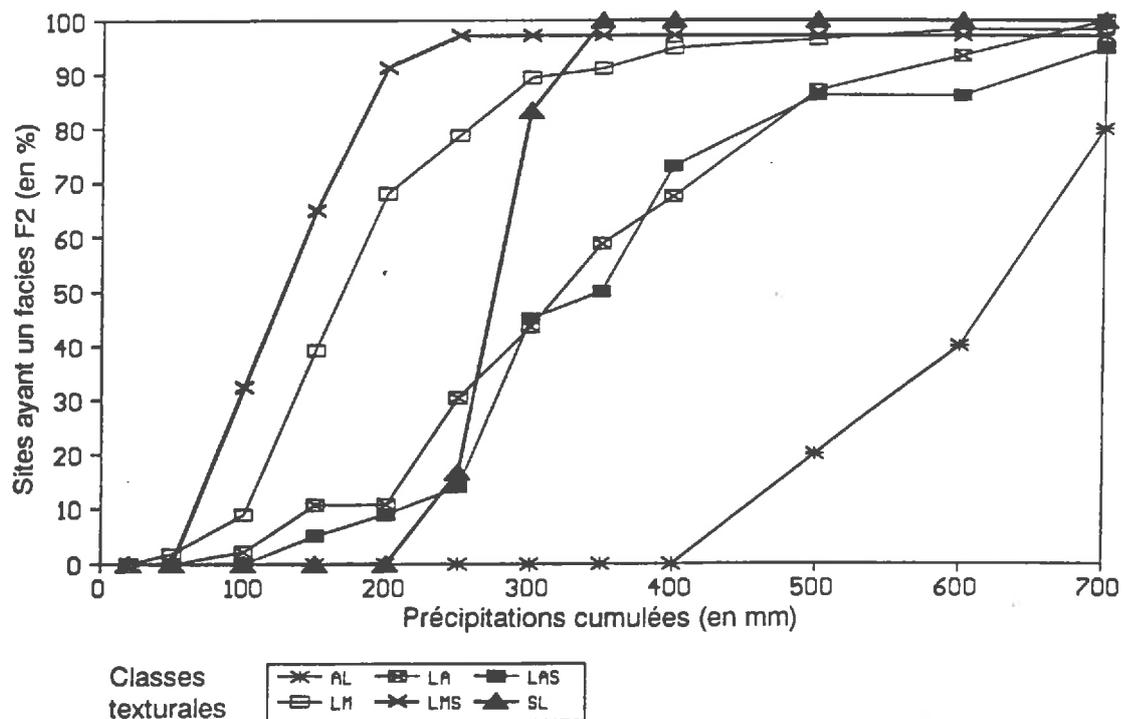


Fig. 2. : évolution des proportions de sites ayant un état de surface répondant au facies F2 (croûte sédimentaire) avec les cumules de pluies à partir de la date du semis (en mm), par classe texturale.

Parmi les 11 classes texturales, seules quatre : LA ; LAS ; LM ; LMS, ont un nombre suffisant d'observations (entre 21 et 56) pour permettre une étude objective. Cependant, les textures SL, AL et A peuvent être intégrées dans l'étude, à condition de tenir compte du faible nombre d'observation (entre 4 et 6) lors de la discussion de leurs résultats.

Le tableau n°1 et la figure n°2 permettent de classer les textures selon leur sensibilité à la battance décroissante : LMS – LM – SL – LA/LAS – AL – A. Aucun sol à classe texturale A n'a un faciès F2 après 700 mm de précipitations cumulées.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par P. BEUVE (1989), qui a réalisé une étude similaire en fin d'hiver 1988/1989 sur le même échantillon de BVE. Celle-ci porte sur 245 observations, pour des précipitations cumulées depuis la date des semis comprise entre 500 et 600 mm, selon les BVE. Les proportions de sites dont l'état de surface est noté faciès F2 (après 500 à 600 mm de pluie) de 1988/1989 sont quasi identiques à celles de 1989/1990 (Cf. tableau n°2), sauf pour la classe texturale AL. Cependant, la différence notée pour la classe texturale AL n'est pas significative au regard du faible nombre d'observations (5 ou 6 selon l'étude).

Tableau 2 : proportions de sites à faciès F2 après avoir reçu 500 à 600 mm de pluies depuis la date des semis

Saison d'étude		A	AL	LA	LAS	LM	LMS	SL
1988/ 1989*	% (nbre de cas)	0 1	0 6	87 93	100 2	86 77	100 65	100 11
1989/ 1990	% (nbre de cas)	0 4	40 5	93 46	86 22	98 56	97 34	100 6

(* : d'après BEUVE, 1989)

La figure n°2 montre qu'il existe une variabilité des précipitations cumulées, ayant permis l'atteinte du faciès F2, au sein de chaque classe texturale. Cependant, celle-ci est plus ou moins forte selon la classe texturale. Les courbes des proportions d'observation notées faciès F2 pour les sols à classes texturales LA et LAS, quasi confondues, se caractérisent par une pente d'accroissement plus faible que celles des LM et LMS. Tandis que la courbe des sols à texture SL a une très forte pente : après 250 mm de précipitations cumulées seuls 17% des sites ont un sol à faciès F2 ; après 300 mm, 83% des sites. Il faut cependant noter le très faible nombre d'observation pour cette dernière (6 cas).

Discussion

En début d'hiver (cumul de précipitations moyen de 200 mm), on note une forte différence de la proportion d'observation notées faciès F2 des sols appartenant aux classes texturales LMS et LM d'une part, et LA et LAS d'autre part. Par contre, en fin d'hiver (cumul de précipitations moyen de 500 mm), les quatre classes texturales ont une proportion proche de 100%. Ceci a des conséquences importantes sur la formation et l'évolution des rigoles. Seules les surfaces à sols de texture LM ou LMS sont susceptibles de contribuer au ruissellement relativement tôt dans la saison d'automne hiver, et donc, d'être à l'origine d'une érosion en rigoles précoce. Par contre, les surfaces à sols de texture LA ou LAS ne sont susceptibles de contribuer au ruissellement qu'en fin d'hiver, à condition qu'un épisode pluvieux survienne avant la reprise des sols de printemps.

Cependant, il existe une variabilité de sensibilité à la battance au sein de chaque classe texturale. Cette variabilité peut s'expliquer par l'existence ou non de précipitations non déterminantes sur la dégradation de l'état de surface entre la date du semis et celle supposée d'atteinte du facies F2 (sachant que la date du semis n'est pas la même d'une parcelle à l'autre : du 20/09/89 au 01/12/89, et que les précipitations diffèrent légèrement d'une région à l'autre). Ceci conduit à un cumule des pluies et à un état et une histoires hydrique légèrement différents. Or, en conditions plus humides, la stabilité des agrégats est réduite (SEBILLOTTE, 1968 ; MONNIER et KONAN, 1968).

Cette variabilité peut également provenir d'une trop forte hétérogénéité de la sensibilité à la battance des sols d'une même classe texturale. Le taux de matière organique peut intervenir sur la stabilité structurale des agrégats (MONNIER, 1965 ; DE PLOEY et POESEN, 1985), cependant son rôle est significatif pour des taux supérieurs à ceux des sols étudiés (de 1.5 à 2.5%). La stabilité structurale des agrégats est surtout déterminée d'après sa composition texturale, or le découpage en classes texturales adopté ne tient pas compte de la variabilité de la stabilité structurale. Il faut donc revoir le découpage des classes texturales, tout particulièrement pour les classes LA et LAS, suivant leur taux d'argile.

Les précipitations cumulées en millimètres devraient permettre d'encadrer la date d'atteinte du facies F2 par la surface du sol, selon leur classe texturale. Mais dans l'état actuel de cette étude, la variabilité résiduelle est trop forte, et le nombre d'observations pour certaines classes texturales est trop faible. C'est pourquoi, cette étude doit être développée, afin d'obtenir un modèle de prévision de la date d'atteinte du facies F2 déterminée par la date du travail du sol, les caractéristiques du sol (composition, état et histoire hydrique), les caractéristiques des pluies, et éventuellement le taux de couverture végétale ou de résidus du sol.

Cependant, des regroupements de classes texturales selon leur sensibilité à la battance (Cf. figure n°3), en l'état actuel de l'étude, peuvent être proposés :

- un risque élevé pour les classes texturales LMS, LM, LS, SL et S ;
- un risque moyen pour les classes texturales LA, LAS, LSA et SA ;
- un risque faible pour les classes texturales AL et A (probablement aussi pour AS et ALO).

Annexe 3

**ANALYSE FACTORIELLE DES PRINCIPALES
CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET PEDOLOGIQUES
DES BVE DU 1er ECHANTILLON**

L'objectif est d'identifier les divers types de combinaisons morpho-pédologiques des BVE de notre échantillon.

L'analyse factorielle porte sur neuf variables morphologiques et trois variables pédologiques.

Liste des variables utilisées :

ST	Surface totale du BVE	ha
Dtw	Densité de thalweg	m/ha
Dlc	Densité de lignes de concentration morphologiques thalweg exclus.....	m/ha
K	Indice de compacité de Gravélius	
Ptw	Pente du thalweg.....	%
Pp5	Proportion de surface de pentes supérieures à 5%	%
Pp10	Proportion de surface de pentes supérieures à 10%	%
Papf	Proportion de surface en position amont à pentes inférieures à 2%.....	%
Pat	Proportion de surface en amont du thalweg	%
PC	Proportion de surface à sol sensible à la battance.....	%
Paal	Proportion de surface à teneur argile $\geq 30\%$	%
Psa	Proportion de surface à teneur en sable $\geq 35\%$	%

Analyse factorielle :

Variables	Communauté	Facteurs	Variance	Cumulée
ST	0.697	1	36.7	36.7
Pat	0.557	2	21.1	57.8
Dtw	0.768	3	12.5	70.3
K	0.633	4	10.5	80.9
Dlc	0.655	5	5.8	86.7
Pp5	0.930	6	3.8	90.5
Pp10	0.738	7	2.6	93.1
Ptw	0.720	8	2.3	95.3
Papf	0.793	9	1.9	97.3
Psa	0.618	10	1.4	98.7
PC	0.749	11	0.9	99.6
Paal	0.618	12	0.4	100.0

Les quatre premiers facteurs expliquent chacun plus de 10% de la variance. Cependant, aucune interprétation morpho-pédologique ne peut être donnée au quatrième facteur, même après la rotation matricielle, seuls les trois premiers facteurs seront donc retenus. Ils expliquent 70% de la variance totale.

La rotation matricielle permet une meilleure interprétation des facteurs. L'objectif est de présenter sur chaque facteur à la fois un grand nombre de saturations nulles ou quasi nulles, un nombre relativement grand de saturations très différentes de zéro et un nombre de valeurs intermédiaires aussi réduit que possible.

Matrice factorielle

Variables/Facteurs	1	2	3
ST	0.751	0.034	-0.363
Pat	0.037	0.832	0.038
Dtw	-0.474	-0.639	0.401
K	0.373	-0.723	0.146
Dlc	-0.321	0.635	-0.012
Pp5	-0.971	0.015	-0.070
Pp10	-0.719	-0.141	-0.277
Ptw	-0.540	-0.225	0.599
Papf	0.849	-0.164	0.259
Psa	-0.526	0.412	0.257
PC	0.739	0.184	0.226
Paal	-0.277	-0.456	-0.749

Matrice factorielle après rotation varimax

Variables/Facteurs	1	2	3
ST	-0.360	-0.194	-0.728
Pat	-0.219	0.788	-0.159
Dtw	0.246	-0.464	0.719
K	-0.229	-0.793	0.046
Dlc	0.126	0.699	0.048
Pp5	0.783	0.285	0.502
Pp10	0.749	0.057	0.225
Ptw	0.092	-0.041	0.831
Papf	-0.775	-0.387	-0.253
Psa	0.163	0.553	0.424
PC	-0.741	-0.024	-0.285
Paal	0.761	-0.387	-0.340

Parmi les douze variables étudiées, seules les variables dont le coefficient de corrélation est significativement différent de zéro sont retenues pour l'interprétation des trois facteurs obtenus après rotation de la matrice.

Test du coefficient de corrélation : R

H0 : R n'est pas significativement différent de zéro

Seuil de confiance : 5%

Degré de liberté : $= n - p - 1 = 7$

$n = 20$ observations ;

$p = 12$ variables explicatives ;

1 = variable expliquée.

$R_0 = 0.666$ (pour le seuil de confiance de 5%).

Les trois facteurs obtenus sont définis par les variables suivantes :

	Variables	Coefficient de corrélation
Facteur 1 :	Pp5	0.783
	Paal	0.761
	Pp10	0.749
	:	:
	PC	-0.741
	Papf	-0.775
Facteur 2 :	Pat	0.788
	Dlc	0.699
	:	:
	K	-0.793
Facteur 3 :	Ptw	0.831
	Dtw	0.719
	:	:
	ST	-0.728

Les projections de ces variables sur les plans factoriels, définis respectivement par les facteurs combinés deux par deux, sont présentées par les figures n°1.a., b. et c.

Les interprétations morpho-pédologiques de chacun des trois facteurs sont les suivantes :

Facteur 1 : facteur de modelé, opposant les BVE des plateaux limoneux (forte proportion de surfaces à textures sensibles à la battance (PC) et grandes surfaces amont à faibles pentes (Papf)), aux BVE de rebord de plateau, caractérisés par des pentes plus fortes et un décapage des limons entraînant l'affleurement des formations argileuses sous jacentes (forte proportion de surfaces à fortes pentes (Pp5 et Pp10) et à textures argileuses (Paal)).

Facteur 2 : facteur de forme, opposant les BVE compacts, ayant une part importante de leur surface en amont du thalweg (Pat), une forte densité de lignes de concentration morphologiques secondaires (Dlc), aux BVE très allongés (indice K de compacité de Gravélius élevé).

Facteur 3 : facteur de modelé, tenant compte des caractéristiques du thalweg, opposant les BVE des plateaux de grande taille (ST), aux petites BVE de rebord de plateau, caractérisé par une densité de thalweg élevée (Dtw) (due à leur petite taille) et une forte pente de thalweg (Ptw).

Matrice des scores après rotation varimax :

BVE / Facteurs	1	2	3
MA1	0.223	0.162	0.230
MA2	0.114	-0.579	2.166
MBA	3.023	-0.985	-1.279
LAR	0.768	0.522	2.368
LEP	0.501	2.520	0.249
LHB	-0.352	0.648	0.120
VBO	1.228	-0.052	-0.559
AA1	-0.005	0.609	0.236
AA2	0.203	0.817	-0.472
AA3	0.635	-0.047	0.122
HBO	-0.346	-0.554	0.607
HFM	0.201	-2.303	-0.466
HMO	-0.360	-0.287	-0.090
PMU	0.034	0.422	-0.292
PS1	-0.456	0.980	-0.963
PS2	-0.616	-0.512	0.640
CBD	-0.967	-0.542	-0.733
CBL	-1.135	0.873	-1.837
CSA	-1.069	-0.883	-0.472
CSP	-1.624	-0.808	0.425

Les projections de chaque BVE sur les plans factoriels, définis respectivement par les facteurs combinés deux par deux, sont présentées par les figures n°2.a., b. et c.

On note que chaque BVE a une localisation propre dans l'espace défini par les trois axes factoriels. Même s'il existe des regroupements régionaux sur un axe, ils sont toujours individualisés par un autre axe factoriel. Trois BVE du Pays de Caux (CSP exclus), par exemple, sont regroupés sur l'axe du facteur 1, mais s'opposent sur les deux autres axes factoriels.

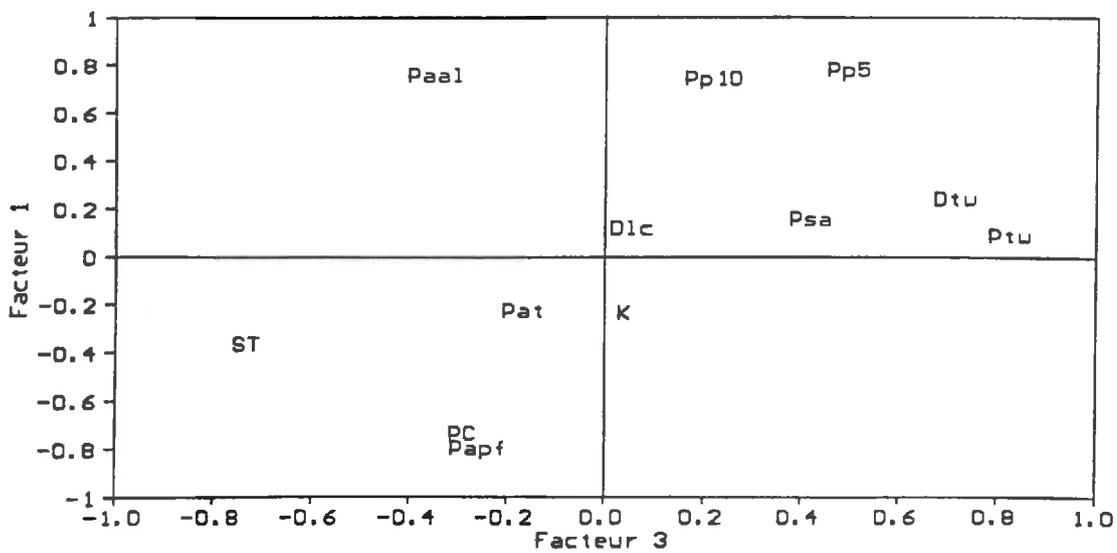
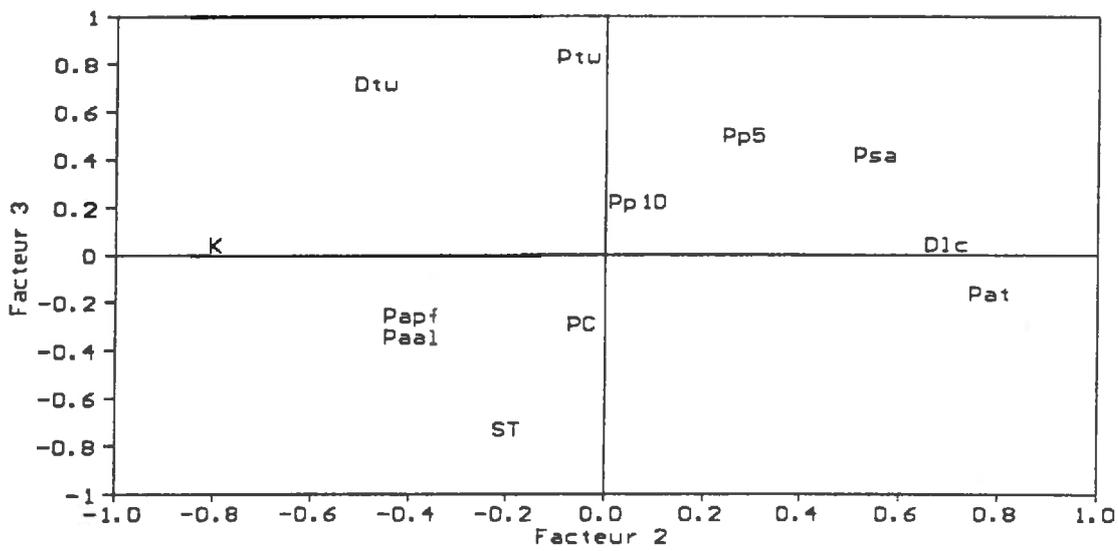
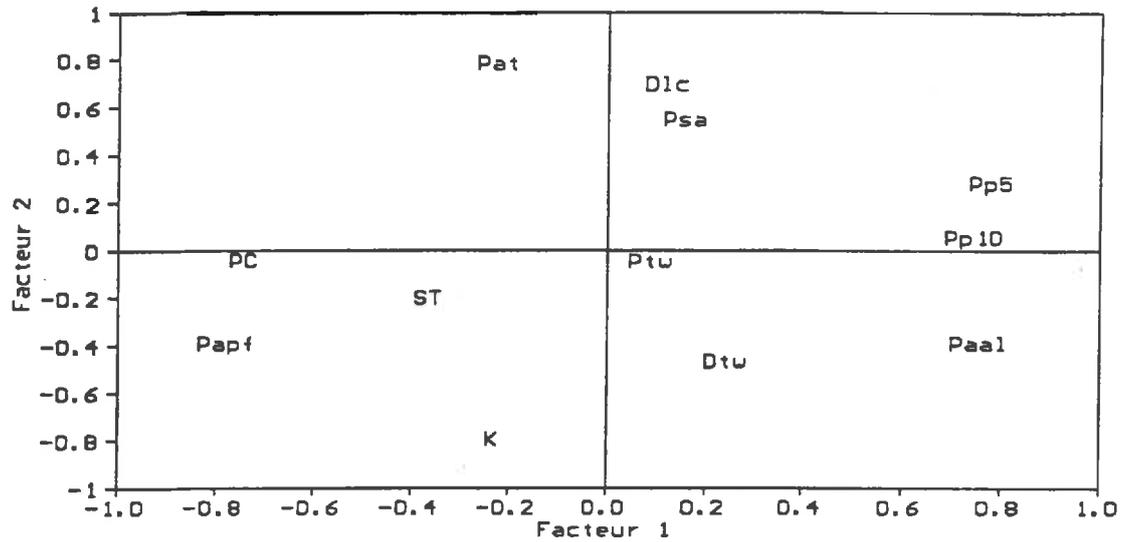


Fig. 1.a., b. et c. : représentation des variables dans les plans factoriels 1/2, 2/3 et 3/1

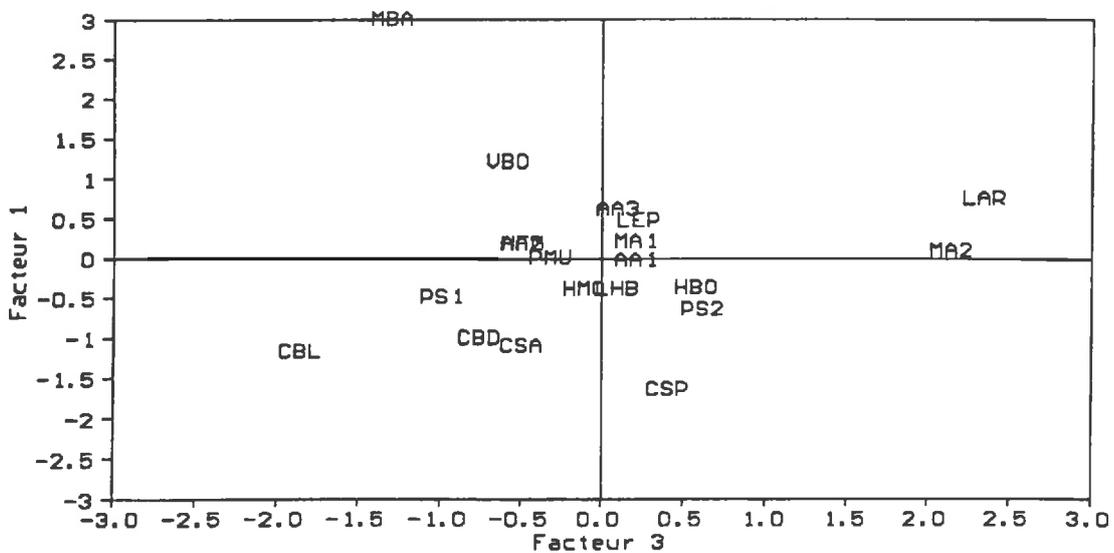
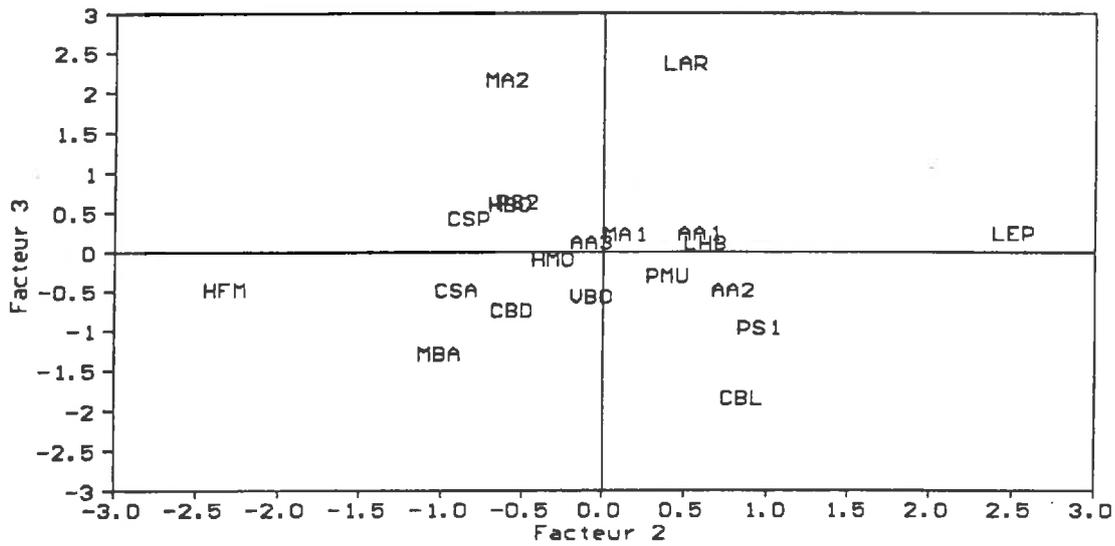
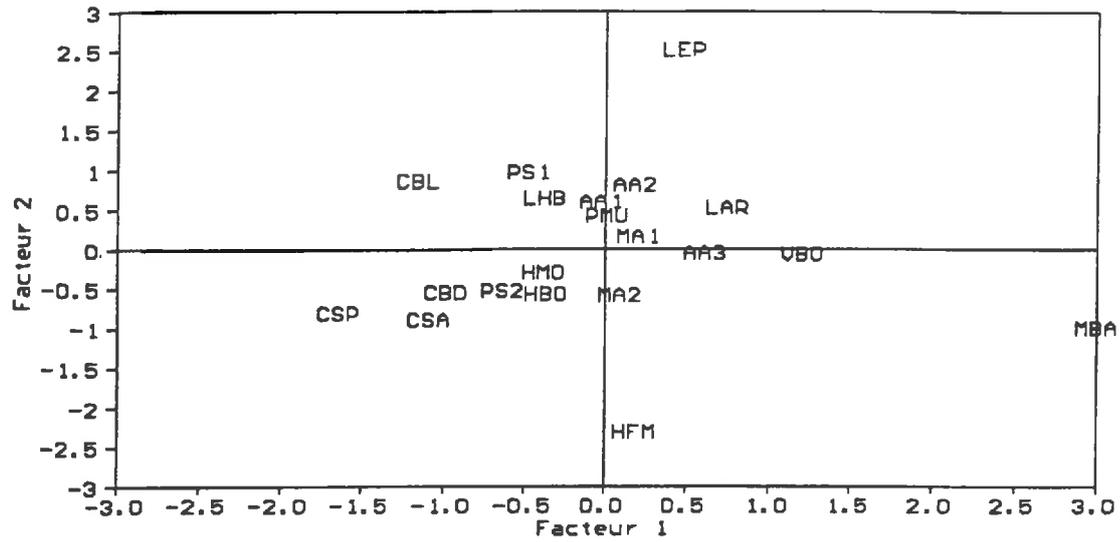


Fig. 2.a., b. et c. : représentation des BVE dans les plans factoriels 1/2, 2/3 et 3/1

Annexe 4

DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Procédure d'obtention des données manquantes

En cas de panne d'enregistrement (auget basculeur bloqué, mémoire du CR2M saturée, câble d'alimentation sectionné,...), les données manquantes sont estimées soit par :

- les enregistrements des pluviomètres proches (moins de 10 km), implantés pour cette étude, ou par d'autres organismes (SRAE et AREAS, à Blosseville (Pays de Caux) ; Laboratoire de Biogéographie de l'ENS St Cloud, à Erlon (Marlois)) ;
- les enregistrements des pluviomètres plus éloignés.

Dans le premier cas, les données manquantes sont directement remplacées par les enregistrements du pluviomètre le plus proche.

Dans le second cas, les hauteurs de pluie journalières manquantes sont estimées en utilisant une fonction d'ajustement des hauteurs de pluie des deux pluviomètres, établie sur une période de deux mois, encadrant la panne. Les intensités sont estimées d'après la relation entre les hauteurs de pluies journalières et leurs intensités enregistrées par le pluviomètre ayant eu la panne, avec un contrôle d'absence d'évènements particuliers sur la période de panne. Si ce dernier cas se présente, les intensités sont estimées en fonction des intensités enregistrées par les pluviomètres les plus proches.

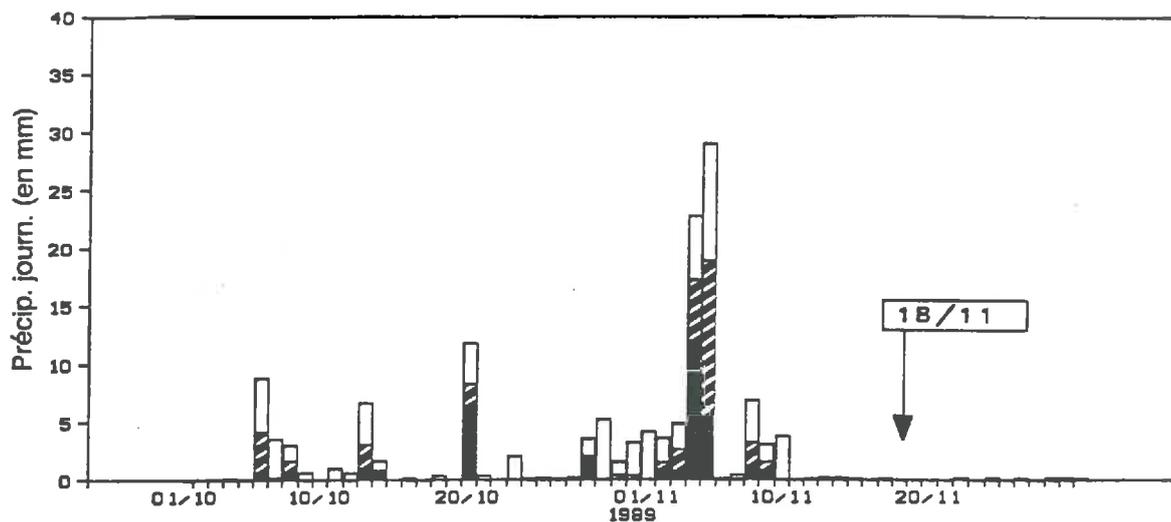


Fig. 1. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Blosseville

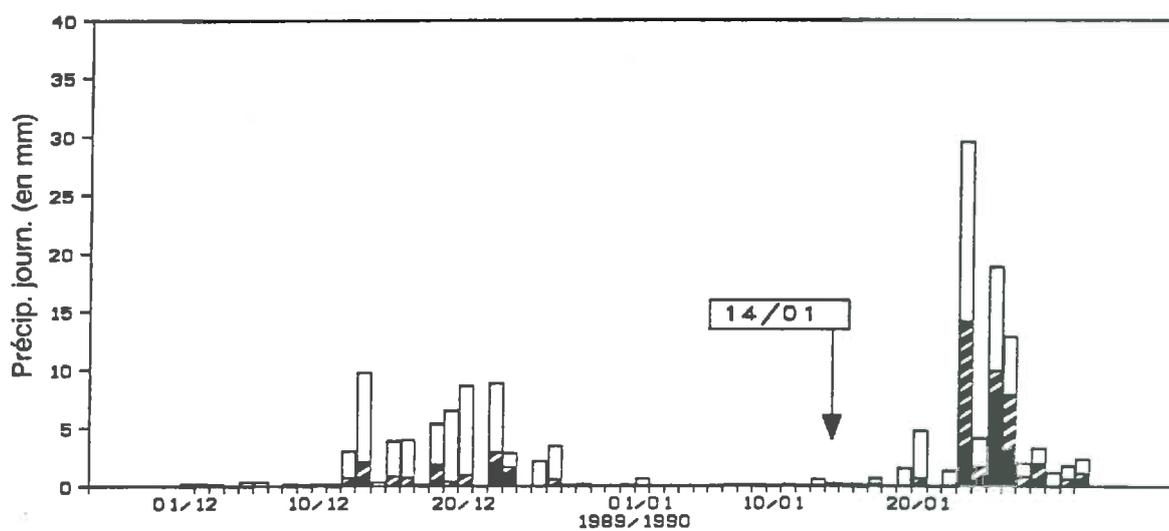


Fig. 2. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Blosseville

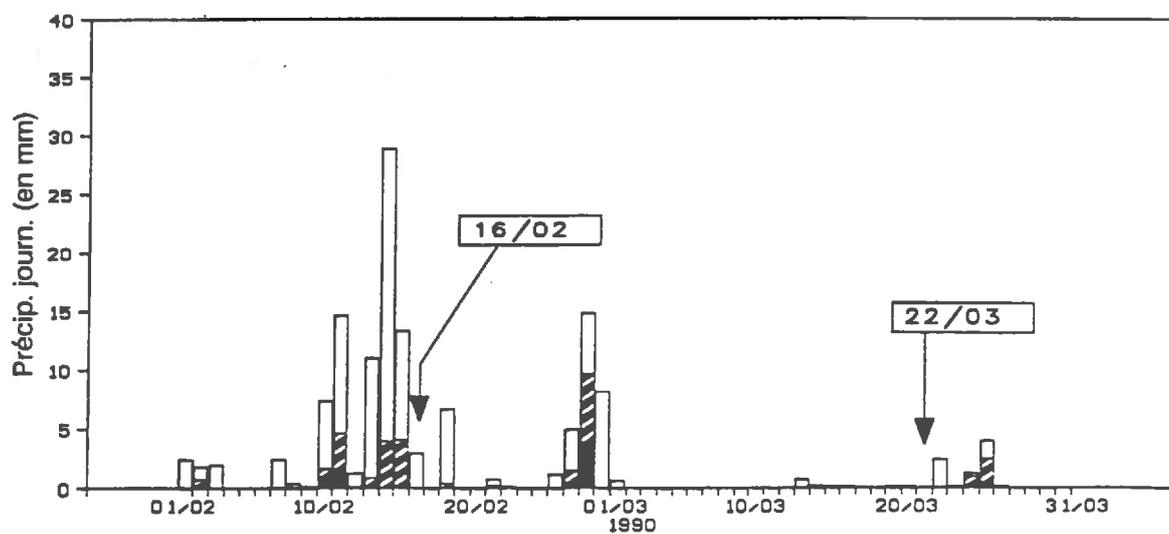


Fig. 3. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Blosseville

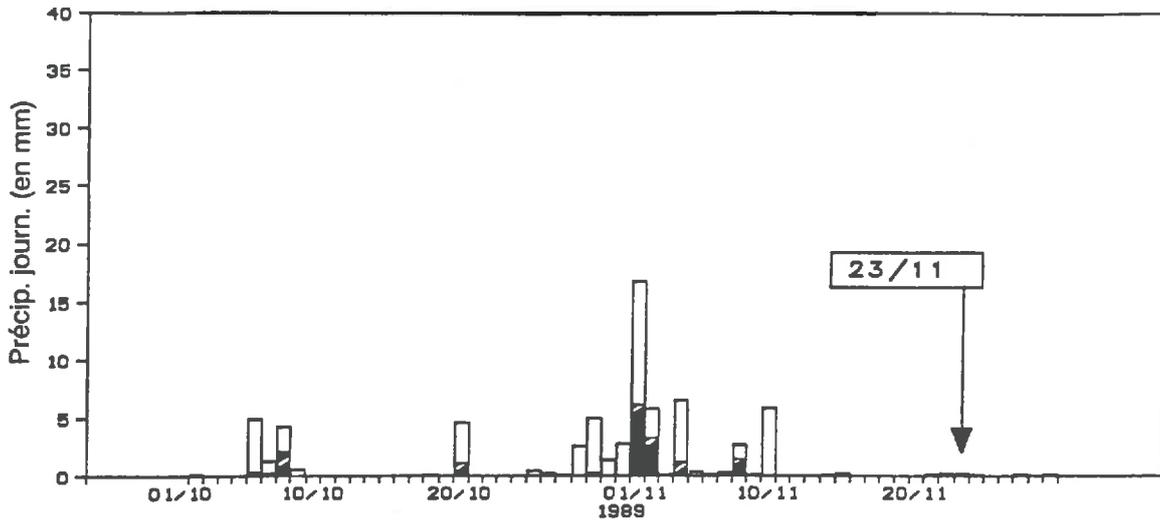


Fig. 4. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Erlon

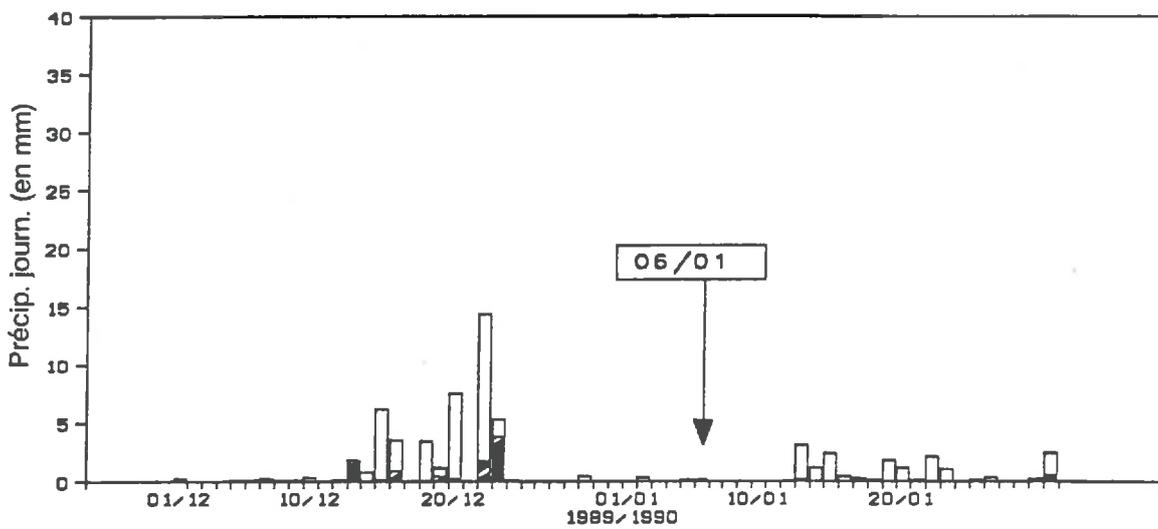


Fig. 5. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Erlon

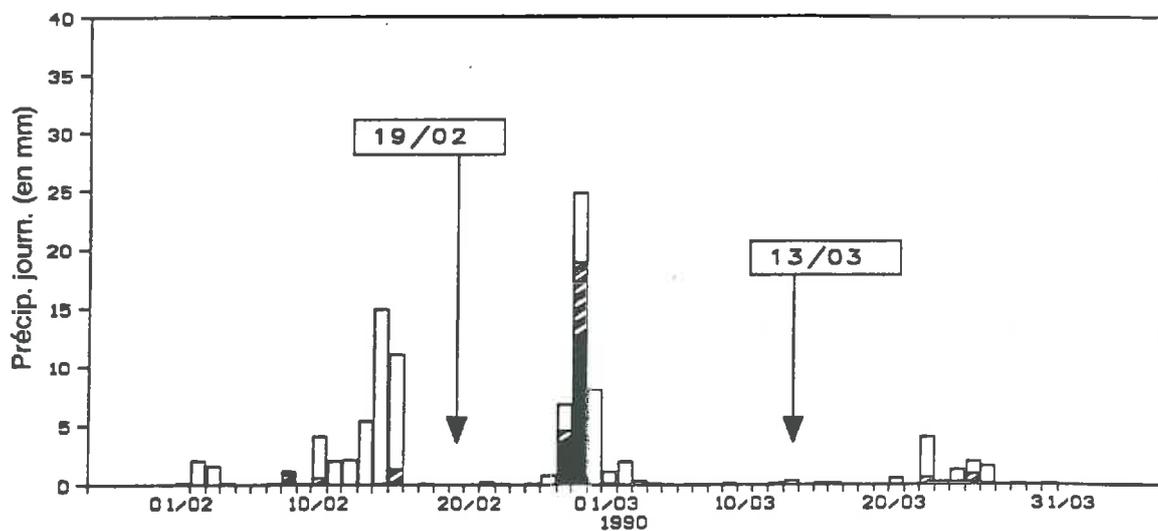


Fig. 6. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Erlon

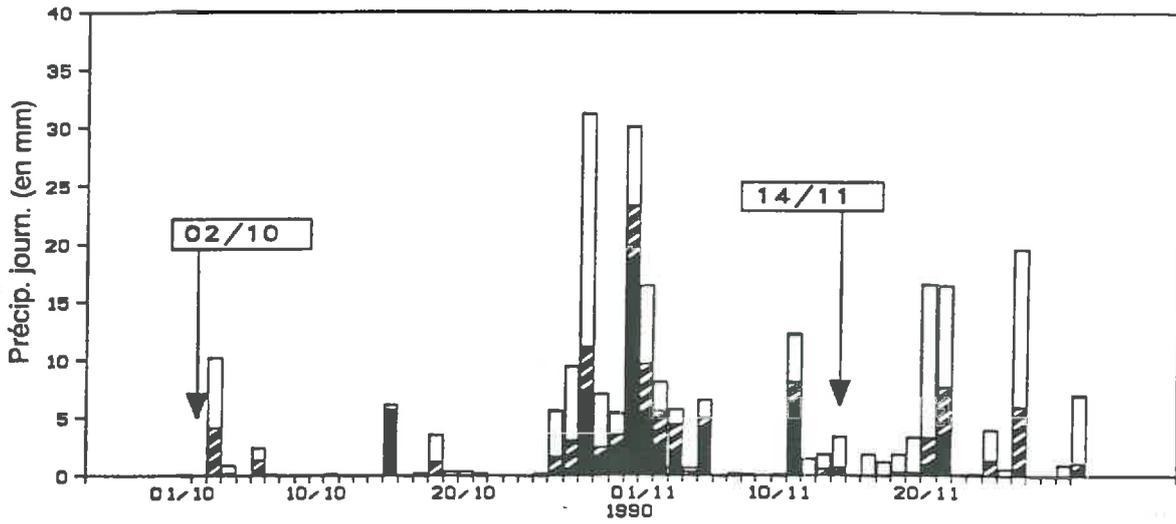


Fig. 1. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Blosseville

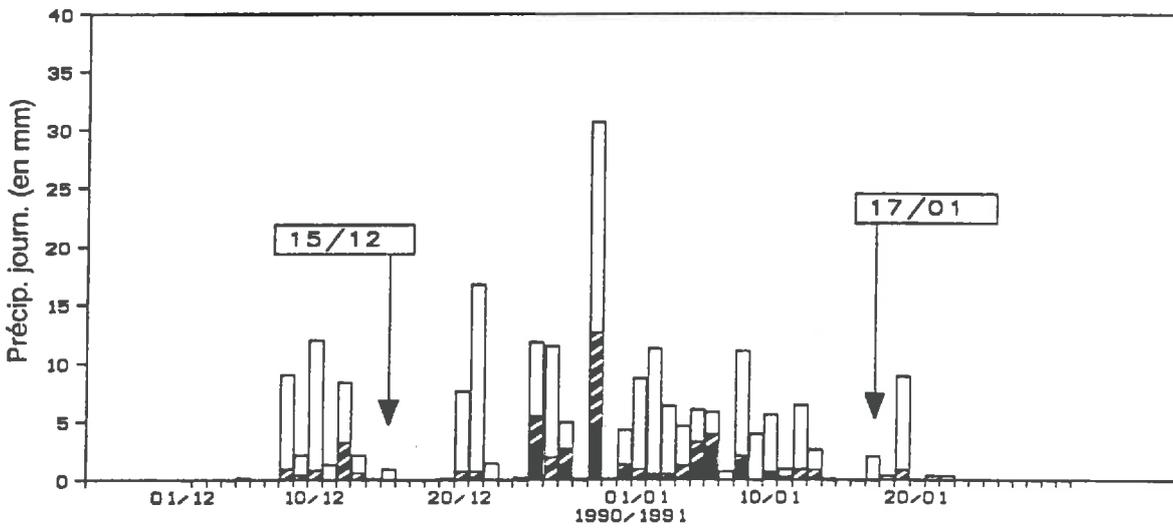


Fig. 2. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Blosseville

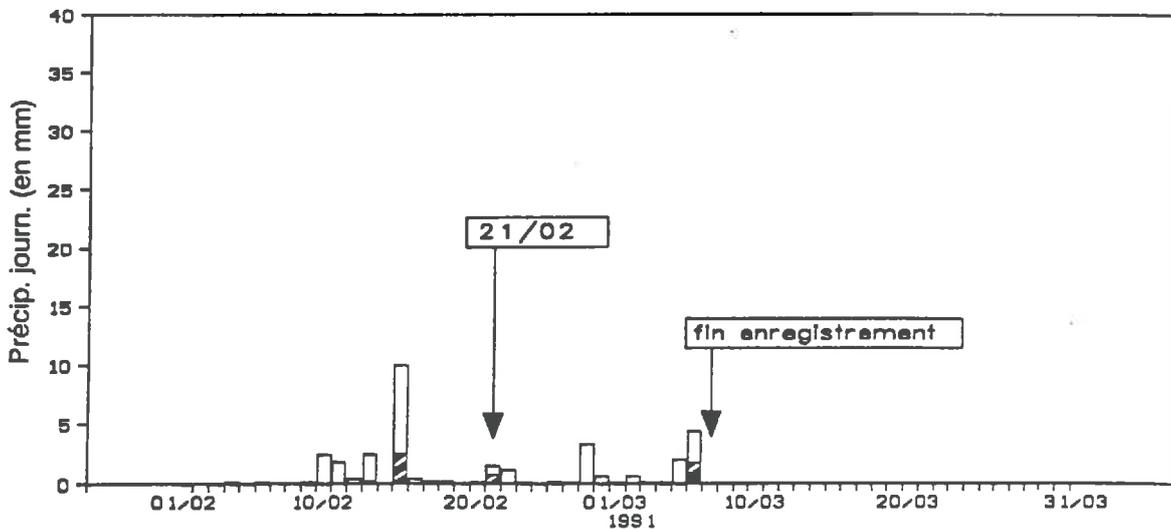


Fig. 3. : précipitations journalières (en mm) enregistrées à Blosseville

Annexe 5

DATE DE PRISE EN COMPTE DES OBSERVATION DES ETATS DE SURFACE

Exemples de choix de la date d'observation des états de surface pour déterminer les surfaces aptes à produire un ruissellement mises en relation avec les volumes de rigoles mesurés en fin d'hiver.

Dans le cas du Pays de Caux, les mesures des rigoles ont été réalisées le 22 mars 1990. La chronologie des pluies (Cf. figure n°1) nous permet d'émettre l'hypothèse que l'évènement pluvieux du 27 février 1990 peut être tenu pour responsable des dernières évolutions des volumes de rigoles. Dans ces conditions il semble judicieux de se référer aux notations des états de surface du 16 février pour apprécier les états de surface qui prévalaient au début du dernier épisode supposé érosif.

Le choix de la date d'observation des états de surface à mettre en relation avec les volumes des rigoles mesurés le 21 février 1991 (Cf. figure n°3), sur les BVE du Pays de Caux, est plus délicat. En effet, l'épisode pluvieux probablement responsable des dernières évolutions des volumes des rigoles, avant leur mesures, se situe entre le 21 décembre 1990 et le 8 janvier 1991 (Cf. figure n°2). Deux dates d'observation des états de surface peuvent a priori convenir : le 15 décembre 1990 et le 17 janvier 1991. Cependant, le risque d'avoir des états de surface très différents de ceux réels lors du dernier épisode érosif est beaucoup plus important pour les observations du 15 décembre 1990 que pour celles du 17 janvier 1991. C'est pourquoi nous avons retenu la seconde date pour déterminer les surfaces ayant probablement contribuées au ruissellement lors du dernier épisode pluvieux. L'existence après cette date de deux épisodes pluvieux, que nous supposons non érosifs, nous conforte dans notre choix.

Annexe 6

ANALYSE DE LA VARIABILITE DE L'EROSION EN RIGOLE A L'ECHELLE DU BVE

Tableau 1 : PR2 (en %), PR4 (en %) et taux d'érosion (en m³/ha) des BVE du premier échantillon, pour les trois années d'étude

BVE	PR2		PR4			Taux d'érosion		
	89/90	90/91	88/89*	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91
MA1	53.6	12.3	37.4	0.0	0.0	0.10	0.00	0.00
MA2	56.3	0.0	6.5	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00
MBA	4.5	0.5	23.5	1.8	0.0	0.20	0.00	0.03
LAR	0.0	0.0	23.9	0.0	0.0	1.43	0.10	0.00
LEP	38.9	21.1	47.3	0.0	6.1	3.43	0.15	0.05
LH1	12.8	30.1	59.8	0.0	22.0	7.08	0.00	1.43
VBO	2.0	13.7	8.0	0.0	0.0	0.05	0.00	0.06
AA1	100.0	5.0	2.7	12.2	1.5	0.00	0.00	0.00
AA2	66.8	16.0	8.8	5.6	0.0	0.00	0.00	0.21
AA3	0.0	44.9	13.3	0.0	0.0	0.00	0.00	0.90
HBO	66.6	57.5	17.4	19.7	34.0	0.63	0.63	1.85
HFM	33.8	36.6	37.3	0.2	19.8	1.70	0.08	0.06
HMO	57.3	50.3	19.0	0.9	19.3	0.95	0.04	0.81
PMU	45.6	67.9	32.4	1.3	64.8	0.32	0.16	7.54
PS1	58.1	91.1	70.1	4.0	83.5	2.60	0.29	7.27
PS2	86.2	81.6	43.3	5.0	69.8	0.39	0.61	4.90
CBD	30.7	90.0	72.7	15.1	90.0	2.36	2.58	7.50
CBL	59.5	86.6	50.1	3.7	86.5	0.48	0.34	3.11
CSA	49.6	86.7	73.4	18.4	86.0	2.98	0.57	3.42
CSP	50.5	94.2	78.0	8.0	94.2	6.99	2.65	11.74

(* : PR4 estimée d'après l'occupation du sol et la classe texturale du sol)

Tableau 2. : fonctions d'ajustement des taux d'érosion (en m³/ha) d'après PR2 et PR4 (en %), du premier échantillon de BVE, par année d'étude.

Fonction : Taux d'érosion = a (PR4 ^b)				
Données de fin d'hiver 1988/1989				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	0.0015	0.0041	0.373	acceptée
b	1.8508	0.6159	3.016	rejetée
R ² = 0.56		Ratio : 23.29		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 1.426				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t0	2.55	1.73		
F0	6.01	3.55		

Fonction : Taux d'érosion = a (PR2 ^b)				
Données de fin d'hiver 1989/1990				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	0.2310	0.5213	0.443	acceptée
b	0.1842	0.5703	0.323	acceptée
R ² = 0.04		Ratio : 3.02		acceptée
Erreur standard de l'estimée : 0.771				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t0	2.55	1.73		
F0	6.01	3.55		

Fonction : Taux d'érosion = a (PR4 ^b)				
Données de fin d'hiver 1989/1990				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	0.2493	0.2336	1.067	acceptée
b	0.5290	0.3695	1.432	acceptée
R ² = 0.30		Ratio : 7.51		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 0.657				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t0	2.55	1.73		
F0	6.01	3.55		

Fonction : Taux d'érosion = a (PR2 ^b)				
Données de fin d'hiver 1990/1991				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	0.00001	0.00004	0.240	acceptée
b	2.9845	0.8712	3.426	rejetée
R ² = 0.76		Ratio : 50.44		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 1.934				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t0	2.55	1.73		
F0	6.01	3.55		

Fonction : Taux d'érosion = a (PR4^b)				
Données de fin d'hiver 1990/1991				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	0.0158	0.0332	0.476	acceptée
b	1.3616	0.4547	2.994	rejetée
R ² = 0.77		Ratio : 51.69		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 1.666				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t0	2.55	1.73		
F0	6.01	3.55		

Fonction : Taux d'érosion = a (PR4^b)				
Données de fin d'hiver des trois années réunies				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	0.0031	0.0039	0.793	acceptée
b	1.7165	0.2791	6.151	rejetée
R ² = 0.71		Ratio : 107.34		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 1.383				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t0	2.39	1.67		
F0	4.98	3.15		

Tableau 3. : fonction d'ajustement des taux d'érosion (en m³/ha) d'après PR4 (en %), du second échantillon de BVE.

Fonction : Taux d'érosion = a (PR4^b)				
Données de fin d'hiver 1991/1992				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	0.0017	0.0091	0.190	acceptée
b	1.7904	1.1966	1.492	acceptée
R ² = 0.42		Ratio : 6.33		rejetée (P 0.95)
Erreur standard de l'estimée : 1.727				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t0	2.65	1.77		
F0	6.70	3.81		

Tableau 4. : taux d'érosion estimés (en m³/ha) d'après la fonction ajustée avec les trois années réunies.

BVE	Taux d'érosion mesurés (en m ³ /ha)			Taux d'érosion estimés (en m ³ /ha)			Résidus (en m ³ /ha)		
	88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91	88/89	89/90	90/91
MA1	0,10	0,00	0,00	1,6	0,0	0,0	-1,5	0,0	0,0
MA2	0,00	0,00	0,00	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0
MBA	0,20	0,00	0,03	0,7	0,0	0,0	-0,5	0,0	0,0
LAR	1,43	0,10	0,00	0,7	0,0	0,0	0,7	0,1	0,0
LEP	3,43	0,15	0,05	2,3	0,0	0,1	1,1	0,1	0,0
LH1	7,08	0,00	1,43	3,5	0,0	0,6	3,6	0,0	0,8
VBO	0,05	0,00	0,06	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,1
AA1	0,00	0,00	0,00	0,0	0,2	0,0	0,0	-0,2	0,0
AA2	0,00	0,00	0,21	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,2
AA3	0,00	0,00	0,90	0,3	0,0	0,0	-0,3	0,0	0,9
HBO	0,63	0,63	1,85	0,4	0,5	1,3	0,2	0,1	0,5
HFM	1,70	0,08	0,06	1,5	0,0	0,5	0,1	0,1	-0,5
HMO	0,95	0,04	0,81	0,5	0,0	0,5	0,5	0,0	0,3
PMU	0,32	0,16	7,54	1,2	0,0	4,0	-0,9	0,2	3,6
PS1	2,60	0,29	7,27	4,6	0,0	6,2	-2,0	0,3	1,1
PS2	0,39	0,61	4,90	2,0	0,0	4,5	-1,6	0,6	0,4
CBD	2,36	2,58	7,50	4,9	0,3	7,0	-2,5	2,3	0,5
CBL	0,48	0,34	3,11	2,6	0,0	6,6	-2,1	0,3	-3,4
CSA	2,98	0,57	3,42	4,9	0,5	6,5	-2,0	0,1	-3,1
CSP	6,99	2,65	11,74	5,5	0,1	7,6	1,5	2,5	4,2

Tableau 5. : résidus moyens (en m³/ha) par région, total.

Région	1988/1989	1989/1990	1990/1991
Marlois	-0.7	-0.0	+0.0
Laonnois	+1.8	+0.1	+0.3
Arrageois	-0.1	-0.1	+0.4
Haut Artois	+0.3	+0.1	+0.1
Pays de Montreuil	-1.5	+0.3	+1.7
Pays de Caux	-1.3	+1.3	-0.5
TOTAL	-0.3	+0.3	+0.3

Tableau 6. : corrélation entre les résidus (en m³/ha) et d'autres variables.

Variabes (Cf. unités annexe 1)	R ²	niveau de sign.
PR4	-6.61	62
PR4 en amont du thalweg	12.39	35
Densité du thalweg	13.50	30
Pente moyenne du thalweg	23.98	7
Densité des lignes de concentration morphologiques	1.46	91
Pente globale du BVE	20.91	11
Proportion de surfaces à pentes supérieures à 5%	10.75	41
Proportion de surfaces à pentes supérieures à 10%	1.31	92
Proportion de surfaces à sol sensible à la battance	-1.35	92
Proportion de surfaces à teneur en argile ≥ 17.5%	1.92	88
Proportion de surfaces à teneur en argile ≥ 30%	-6.47	62
Proportion de surfaces à teneur en sable ≥ 35%	17.06	19

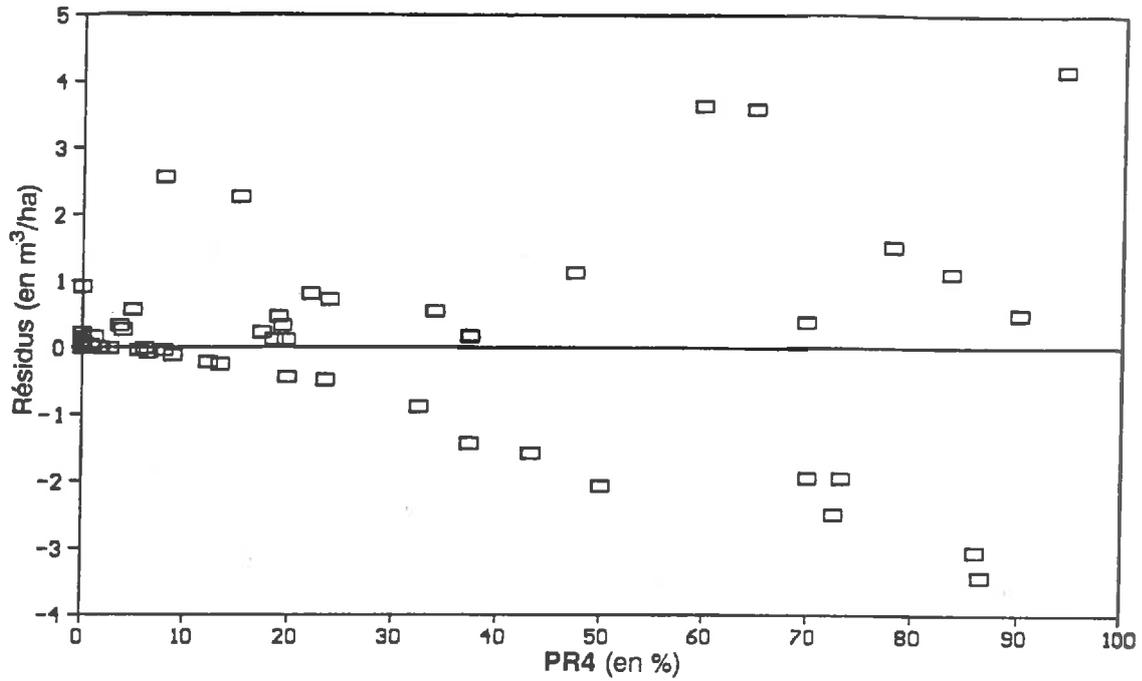


Fig. 1. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de PR4 (en %).

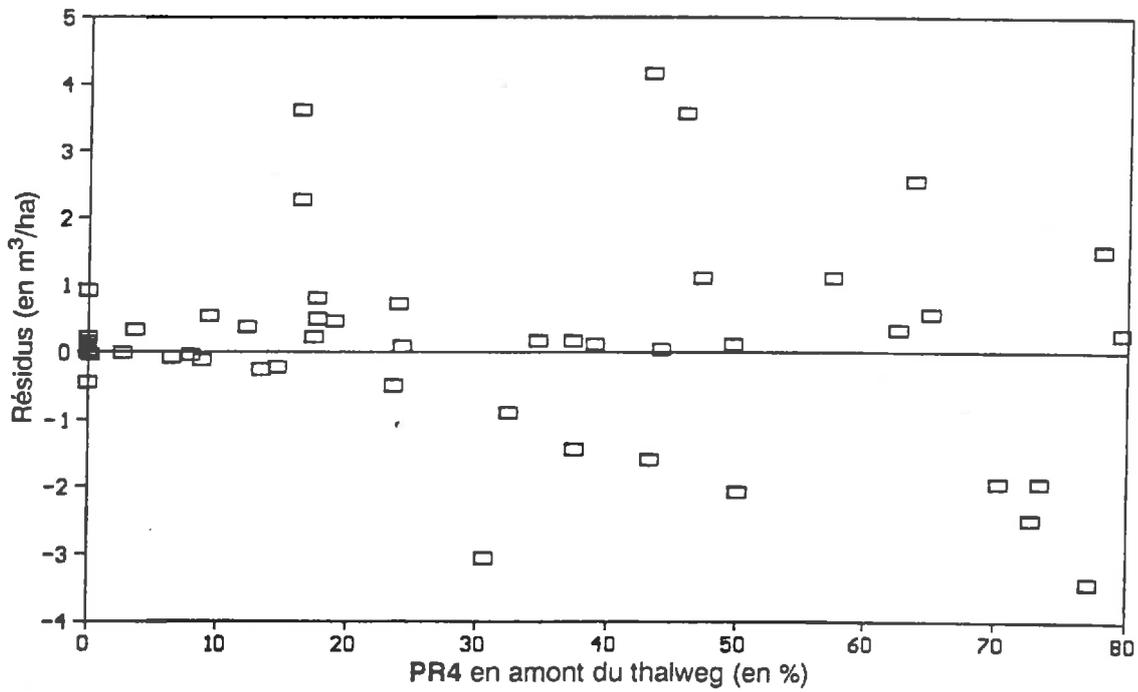


Fig. 2. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction des proportions de surfaces (en %) répondant au critère SR4 en amont du thalweg.

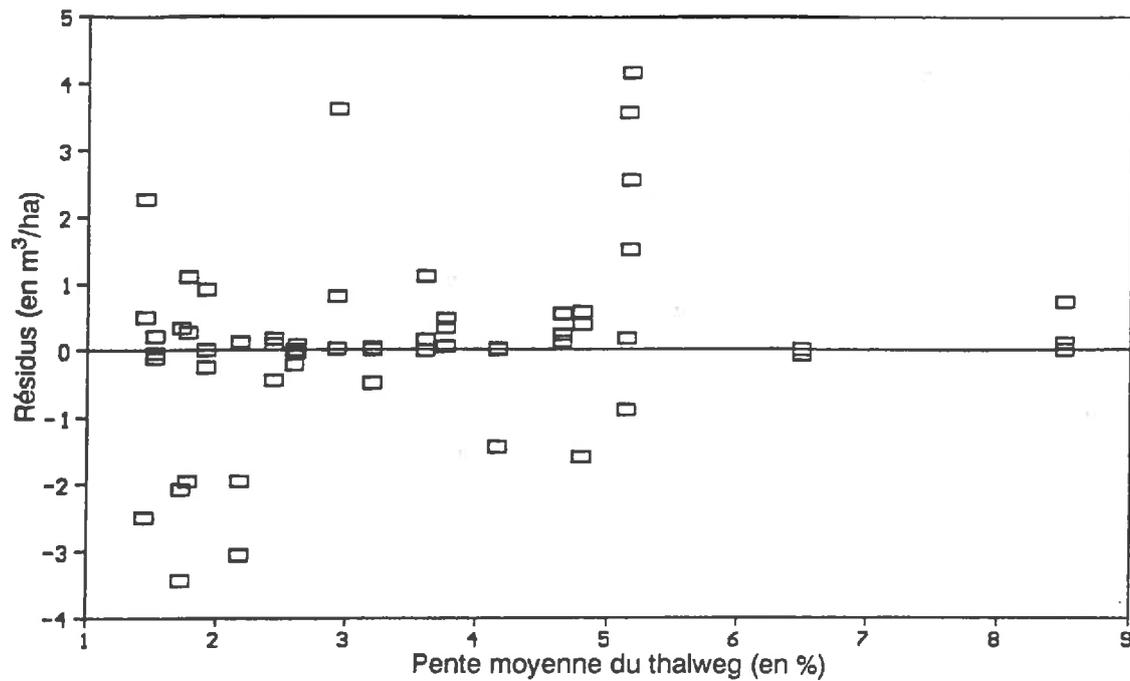


Fig. 3. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la pente moyenne du thalweg (en %).

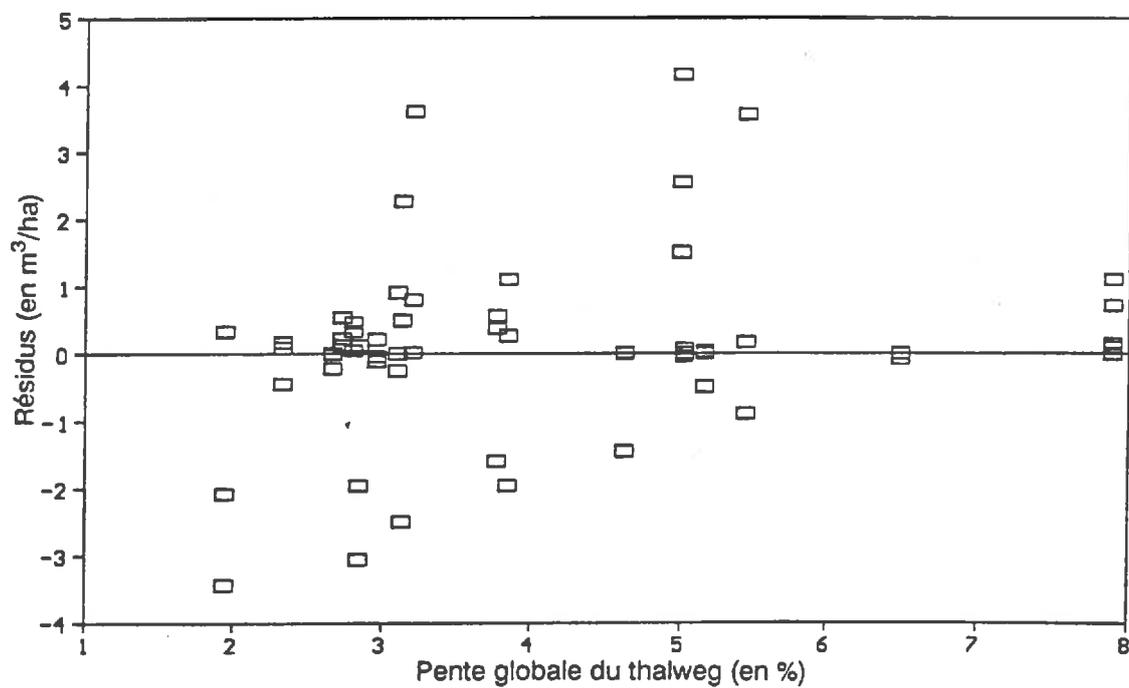


Fig. 4. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la pente globale du BVE (en %).

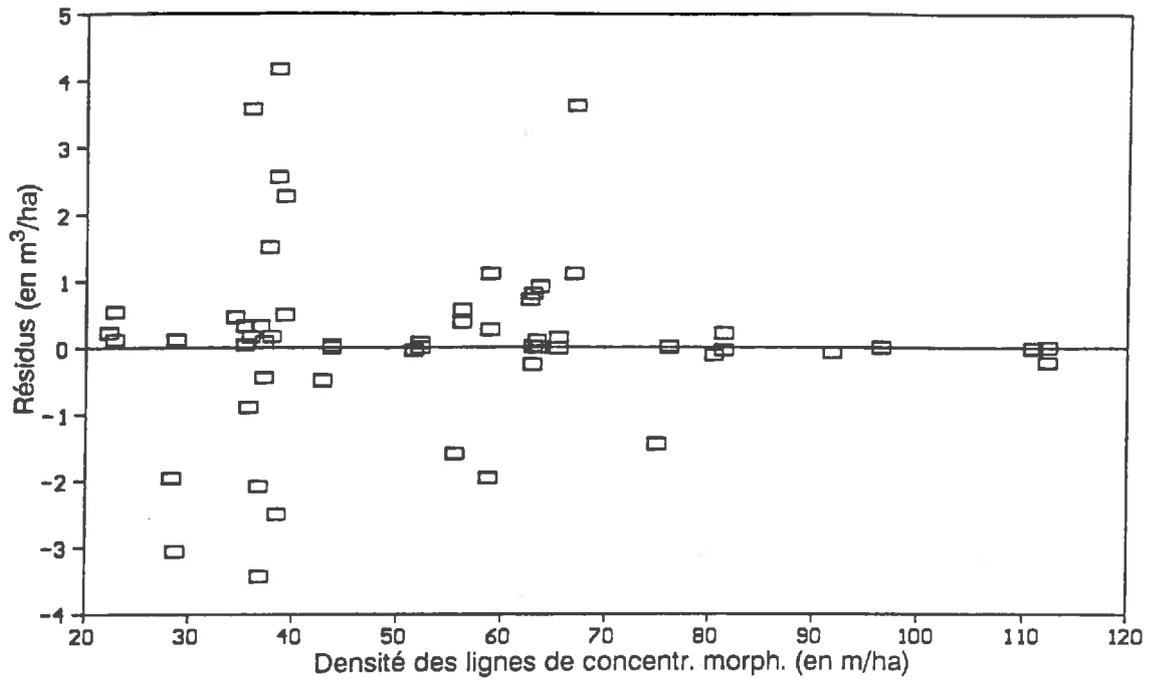


Fig. 5. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la densité des lignes de concentrator morphologiques (en m/ha), thalweg compris.

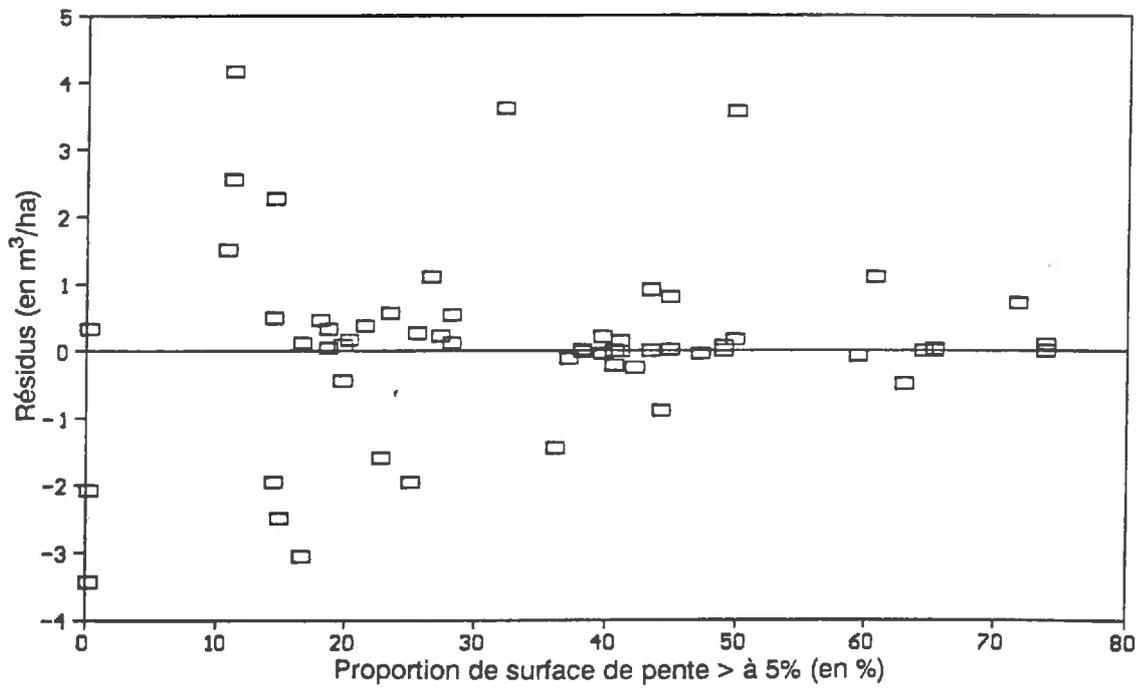


Fig. 6. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la proportion des surfaces de pentes supérieures 5% (en %).

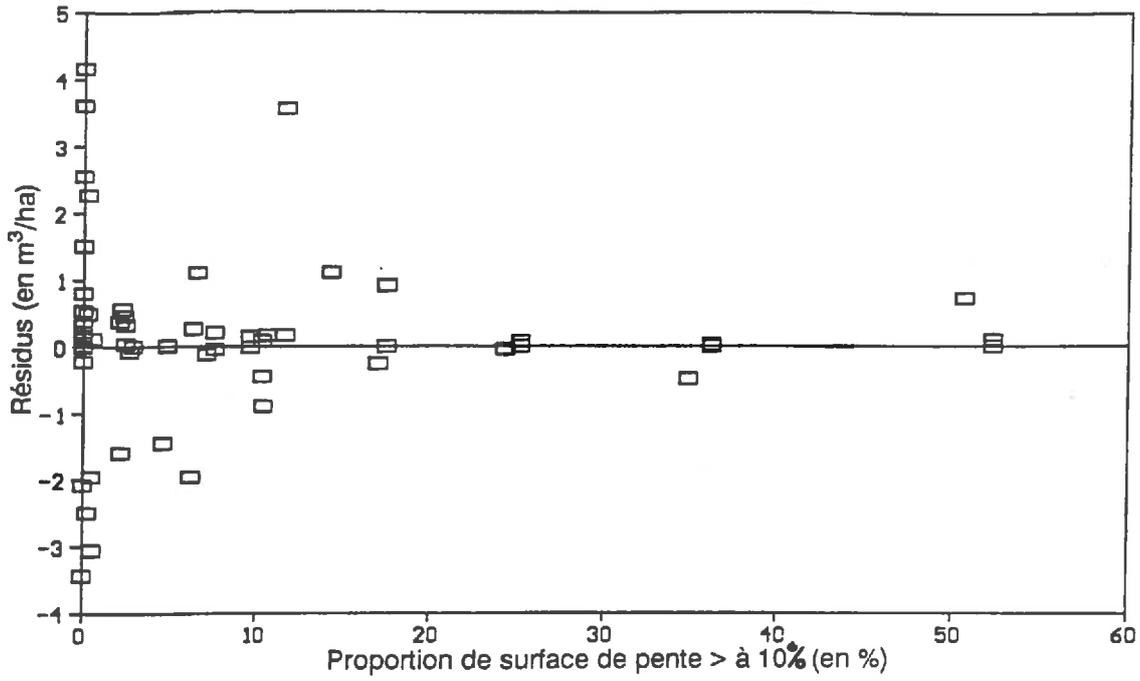


Fig. 7. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la proportion des surfaces de pente supérieures 10% (en %).

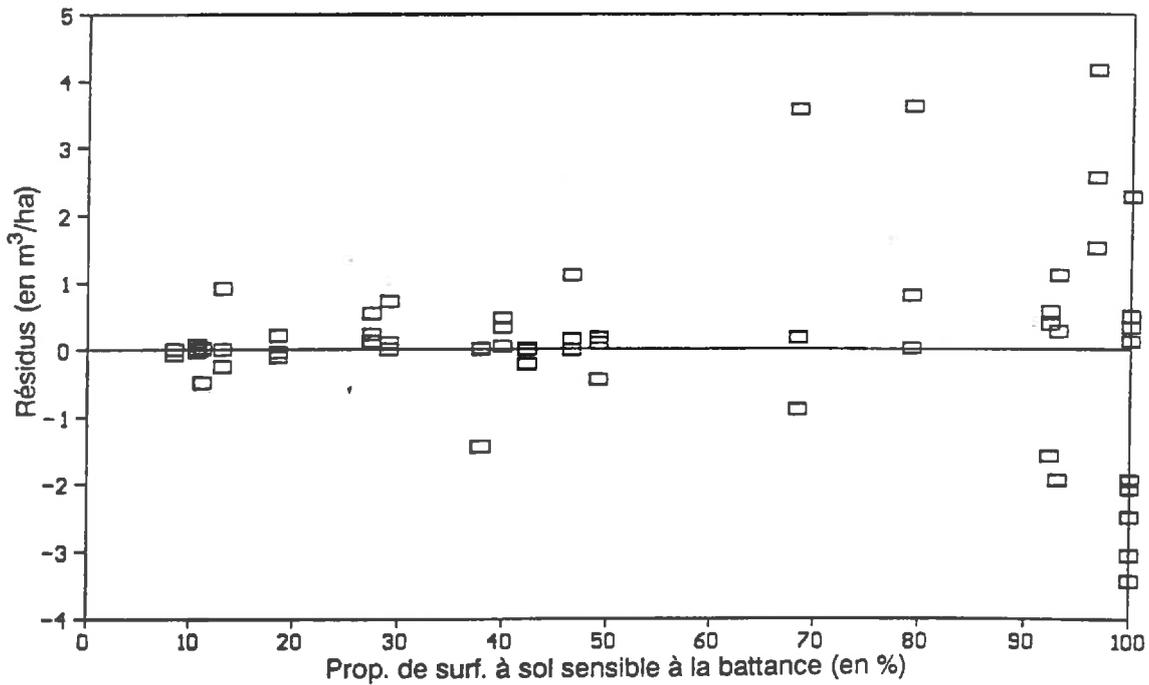


Fig. 9. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la proportion de surfaces ayant un sol à teneur e argile < 17.5% (en %).

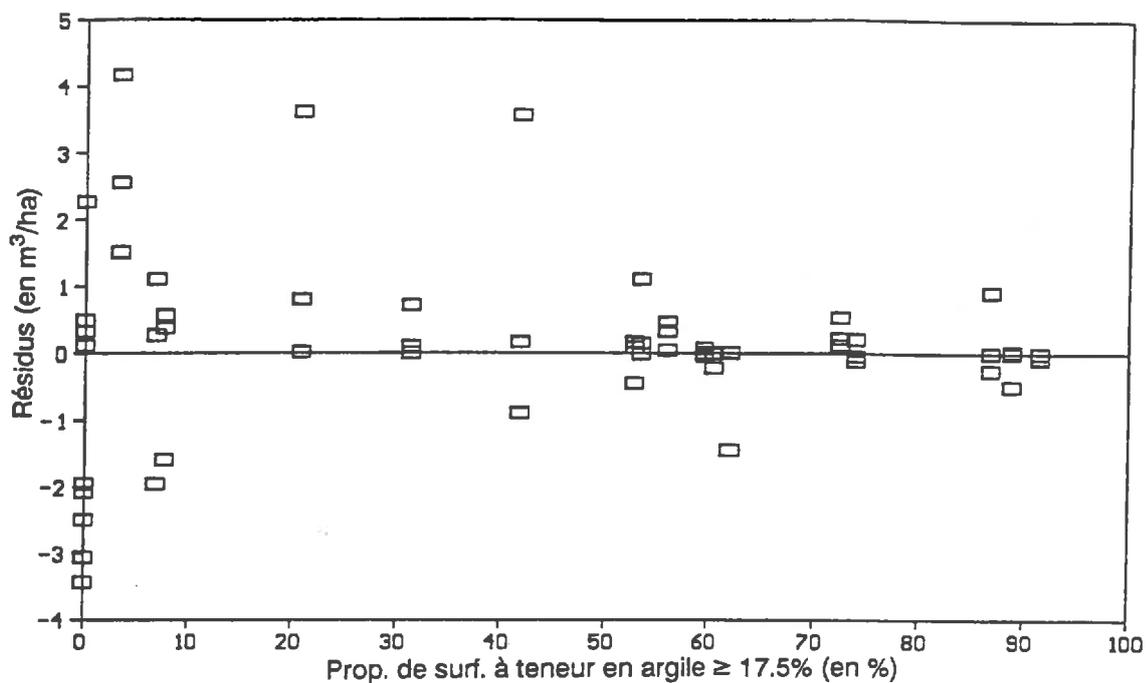


Fig. 9. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la proportion de surfaces ayant un sol à teneur en argile ≥ 17.5% (en %).

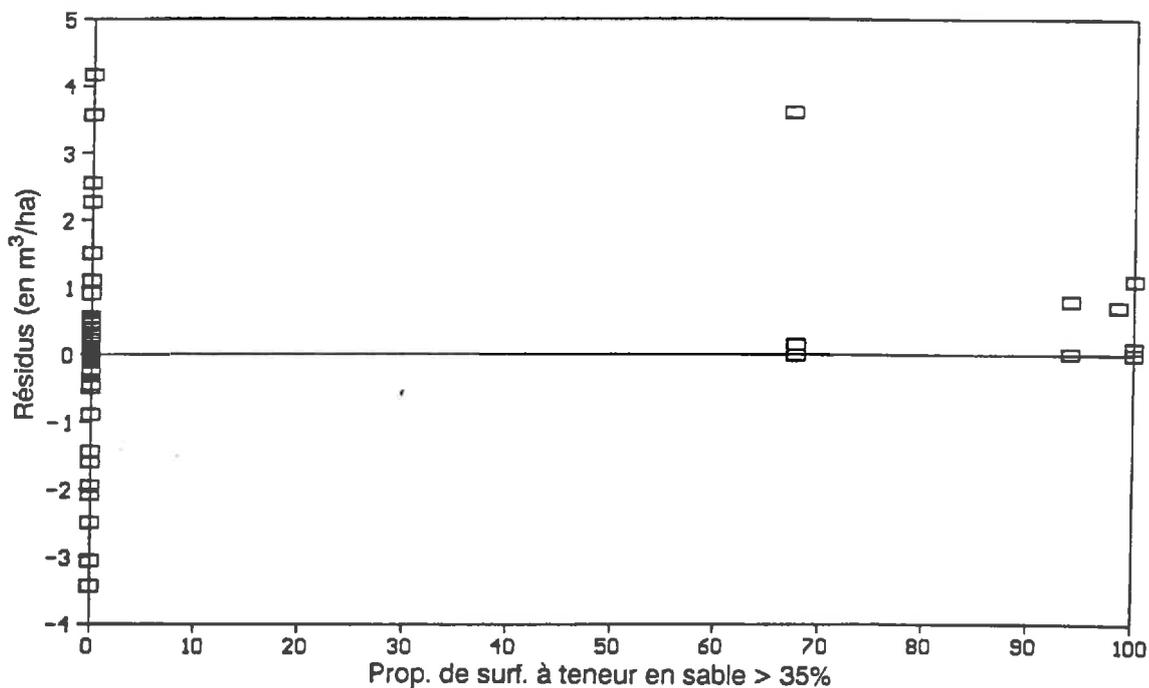


Fig. 10. : variabilité des résidus (en m³/ha) en fonction de la proportion des surfaces ayant un sol à une teneur en sable supérieure à 35% (en %).

Annexe 7

**ANALYSE ET MODELISATION DES RESEAUX DE RIGOLES :
1^{er} ECHANTILLON DE BVE**

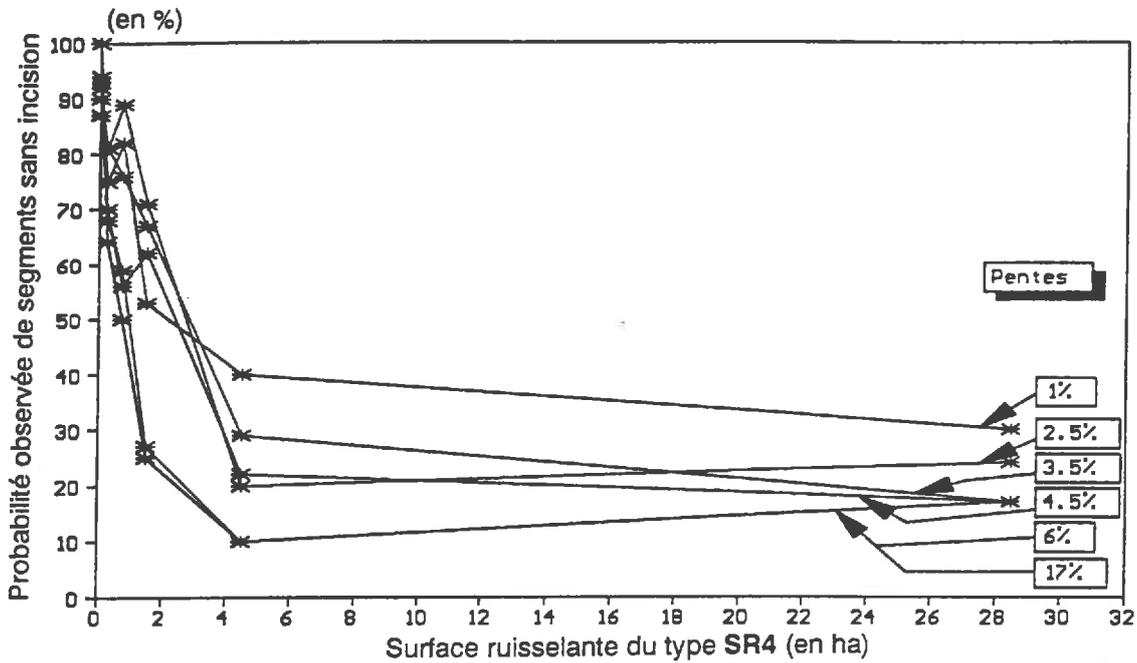


Fig. 1. : fréquence (en %) de segments sans incision, en fonction de sr4 (en ha), par classe de pt (en %).

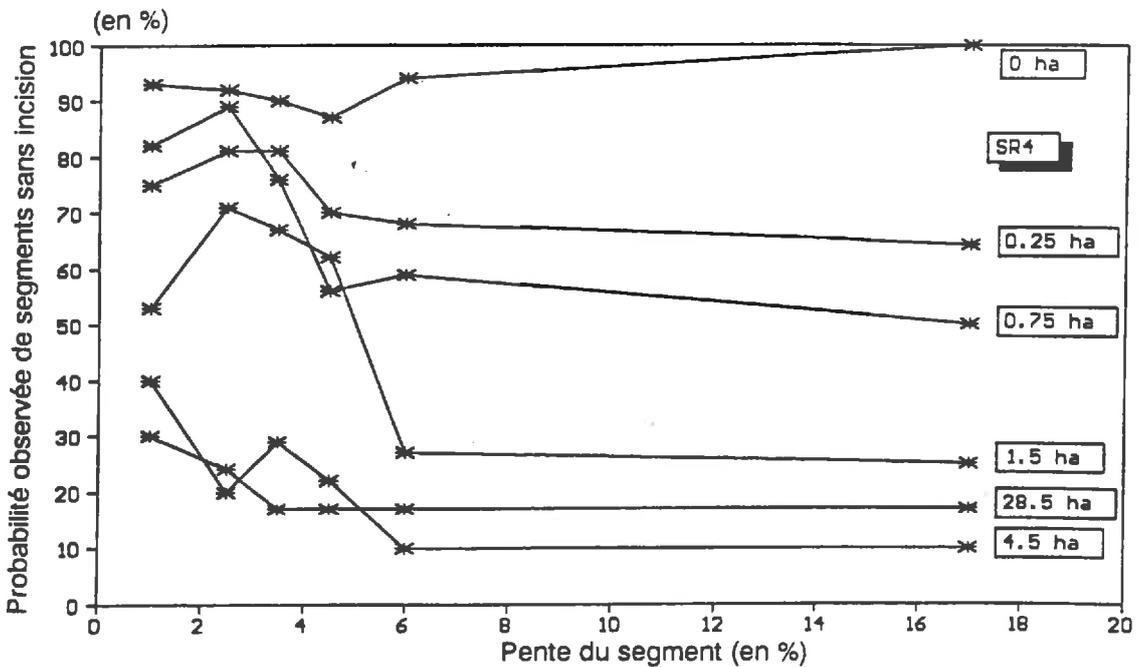


Fig. 2. : fréquence (en %) de segments sans incision, en fonction de pt (en %), par classe de sr4 (en ha).

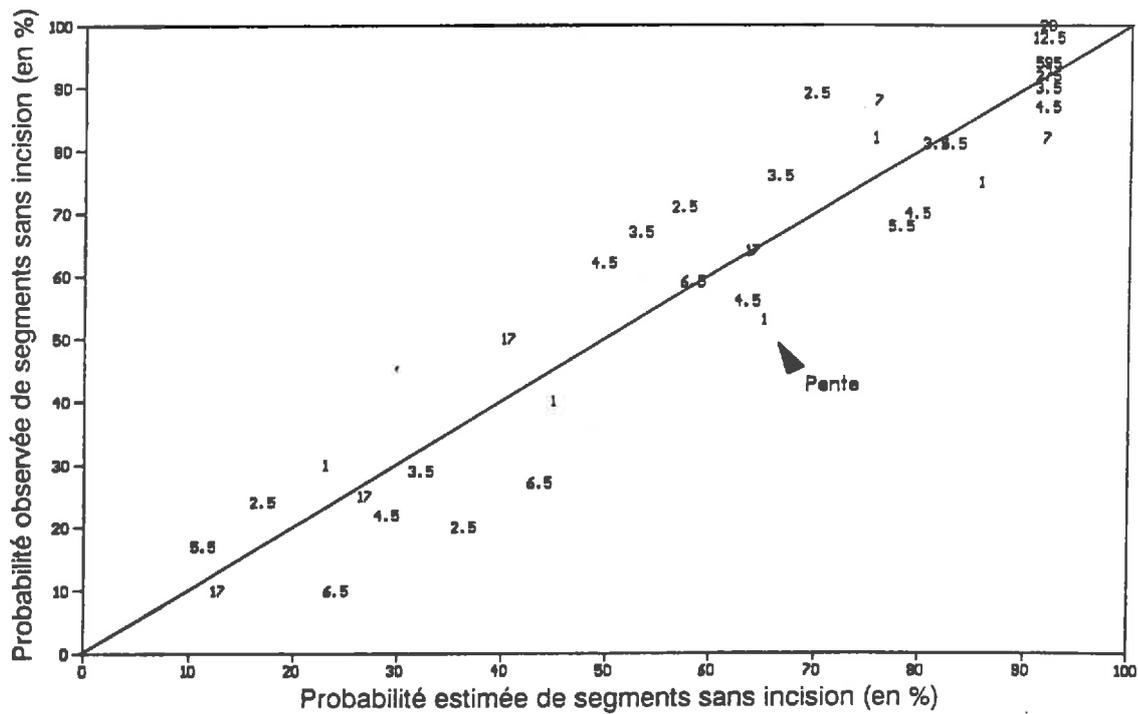
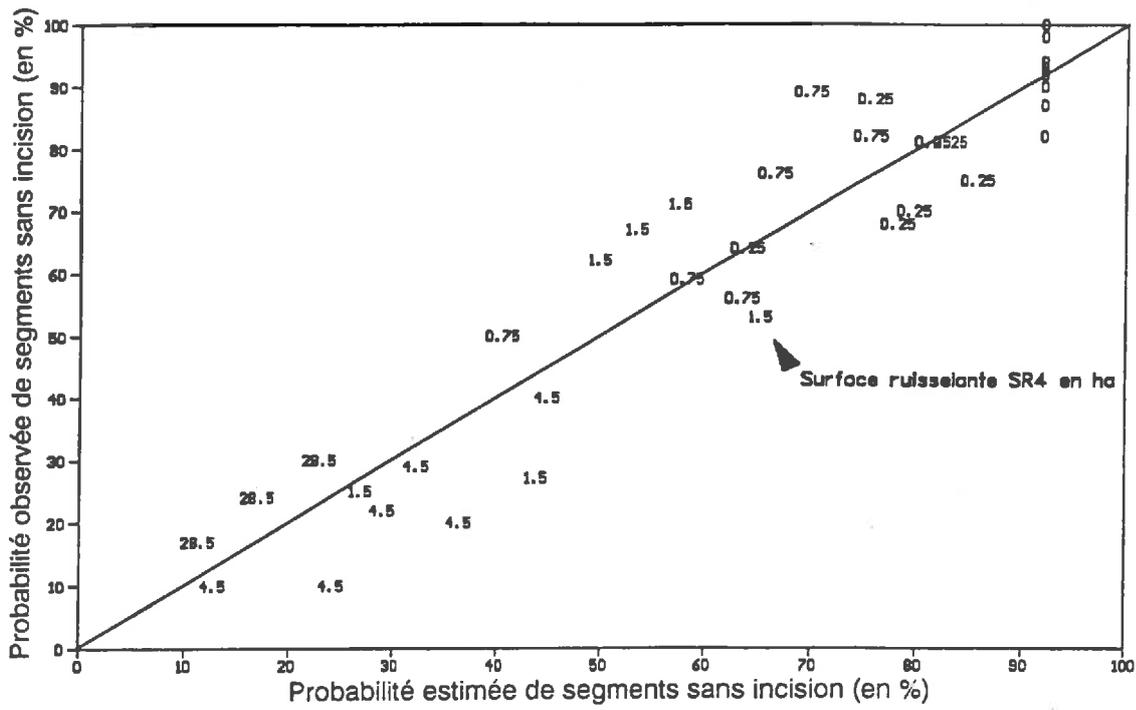


Fig. 3 : relation entre la fréquence (en %) de non incision et la probabilité estimée des segments
 a : les points sont renseignés par leur valeur de sr4
 b : les points sont renseignés par leur valeur de pt

Tableau 1 : matrice de corrélations simples.**Données de 1989/1990**

	S	sr4	pt	si
S				
sr4		0.52**	-0.19	0.14*
pt			-0.19	0.06
si				-0.37**

(** : seuil de confiance de 1% ; * : seuil de confiance de 5%)

Données de 1990/1991

	S	sr4	pt	si
S				
sr4		0.50**	0.18*	0.13
pt			-0.12	-0.03
si				-0.09

(** : seuil de confiance de 1% ; * : seuil de confiance de 5%)

Données des deux années réunies

	S	sr4	pt	si
S				
sr4		0.52**	0.08	0.14*
pt			-0.13*	0.00
si				-0.18*

(** : seuil de confiance de 1% ; * : seuil de confiance de 5%)

S : section incisée du segment, en cm²**sr4** : surface d'alimentation, répondant au critère SR4, connectée au segment, en ares**pt** : pente moyenne du segment, en %**si** : classe de sensibilité du sol à l'incision

Tableau 2 : ajustement des fonctions g linéaires.

Fonction linéaire g_1 : fin d'hiver 1989/1990				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	5.6002	0.721	7.768	rejetée
b	0.2381	0.059	4.058	rejetée
c	-0.6810	0.260	-2.618	rejetée
d	0.1390	0.410	0.339	acceptée
$R^2 = 0.32$		Ratio : 11.45		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 1.229				
Seuils de confiance				
	1%	5%	10%	
t0	2.38	1.67	1.29	
F0	2.50	3.60		
Fonction linéaire g_2 : fin d'hiver 1990/1991				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	3.7477	0.317	11.815	rejetée
b	0.2794	0.030	9.272	rejetée
c	0.4742	0.118	4.020	rejetée
d	0.4428	0.180	2.457	rejetée
$R^2 = 0.36$		Ratio : 34.88		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 0.962				
Seuils de confiance				
	1%	5%	10%	
t0	2.35	1.65	1.29	
F0	2.42	3.41		
Fonction linéaire g_{1+2} : deux années réunies				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	t	H0
a	4.0258	0.304	13.247	rejetée
b	0.2928	0.026	11.127	rejetée
c	0.1709	0.113	1.507	rejetée (P 0.90)
d	0.4555	0.175	2.597	rejetée
$R^2 = 0.34$		Ratio : 44.17		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 1.081				
Seuils de confiance				
	1%	5%	10%	
t0	2.34	1.65	1.28	
F0	2.41	3.39		

Tableau 3 : ajustement des fonction g non-linéaires.

Fonction non-linéaire g_1 : fin d'hiver 1989/1990				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	Ratio	H0
α	82.1453	91.492	0.898	acceptée
a	0.3852	0.089	4.332	rejetée
b	-0.0080	0.263	0.030	acceptée
c	0.2541	0.574	0.443	acceptée
$R^2 = 0.25$		Ratio : 18.00		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 662.7				
Seuils de confiance				
	1%	5%	10%	
t0	2.38	1.67	1.29	
F0	2.50	3.60		
Fonction non-linéaire g_2 : fin d'hiver 1990/1991				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	Ratio	H0
α	0.8619	0.684	1.259	acceptée
a	0.7083	0.074	9.591	rejetée
b	0.8886	0.112	7.909	rejetée
c	1.1869	0.192	6.168	rejetée
$R^2 = 0.48$		Ratio : 96.16		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 847.2				
Seuils de confiance				
	1%	5%	10%	
t0	2.35	1.65	1.29	
F0	2.42	3.41		
Fonction non-linéaire g_{1+2} : deux années réunies				
Coefficient	Estimé	Erreur standard	Ratio	H0
α	1.9328	1.179	1.640	rejetée (P 0.90)
a	0.6468	0.058	11.247	rejetée
b	0.7793	0.092	8.464	rejetée
c	1.0381	0.169	6.129	rejetée
$R^2 = 0.44$		Ratio : 116.43		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 808.3				
Seuils de confiance				
	1%	5%	10%	
t0	2.34	1.65	1.28	
F0	2.41	3.39		

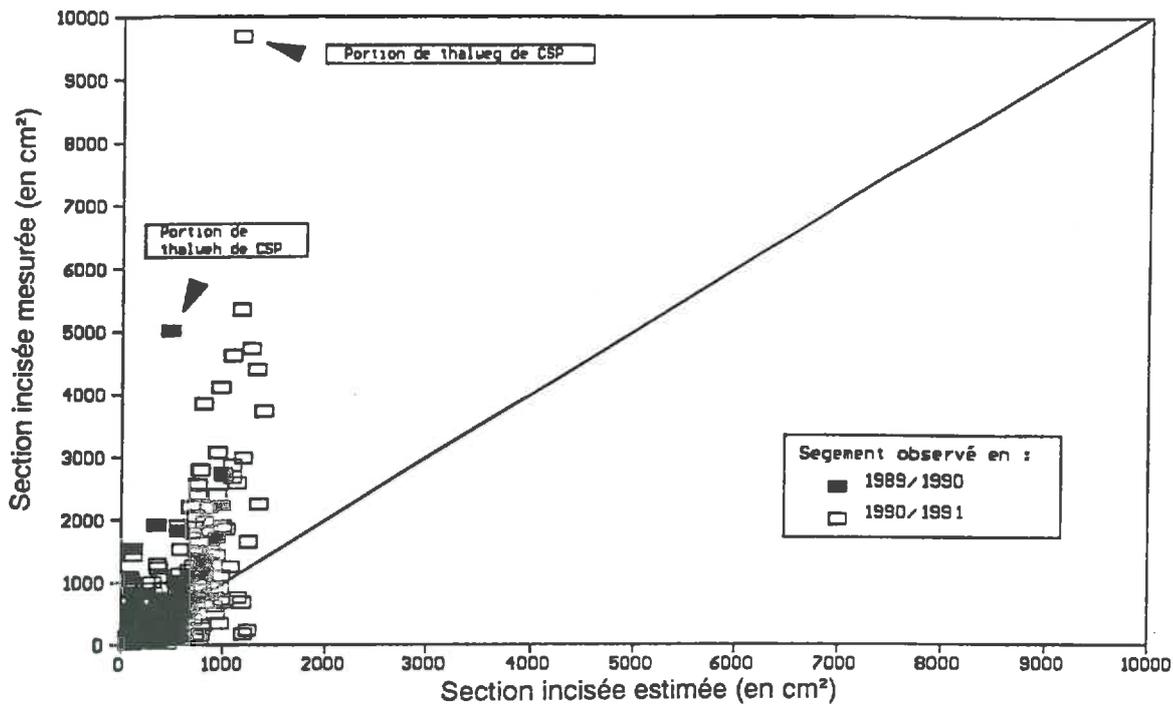


Fig. 5 : relation entre les sections incisées (en cm²) mesurées et celles estimées d'après la fonction linéaire g_{1+2}

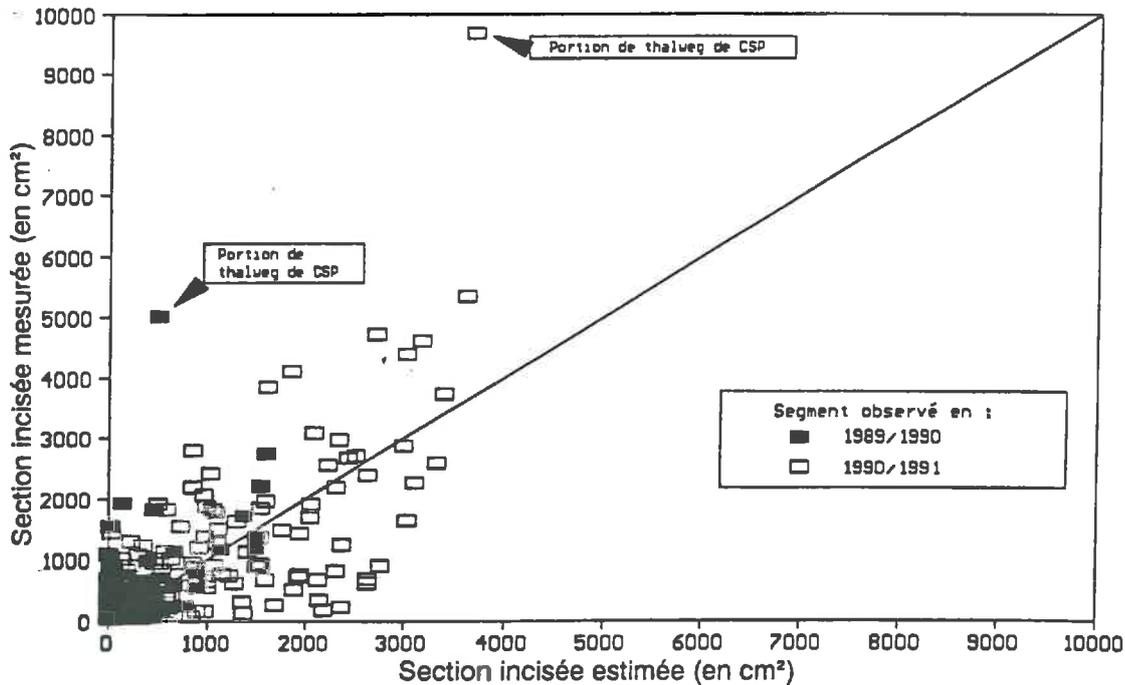


Fig. 6 : relation entre les sections incisées (en cm²) mesurées et celles estimées d'après la fonction non-linéaire g_{1+2}

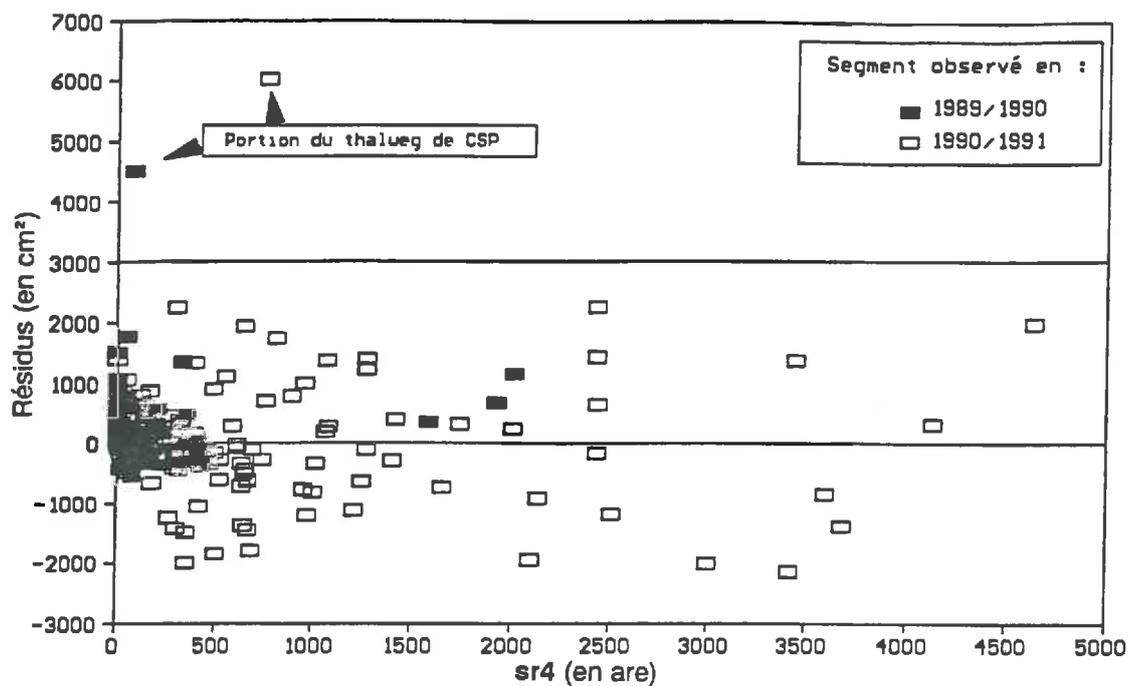


Fig. 7 : relation entre les résidus (en cm²) et sr4 (en ares).

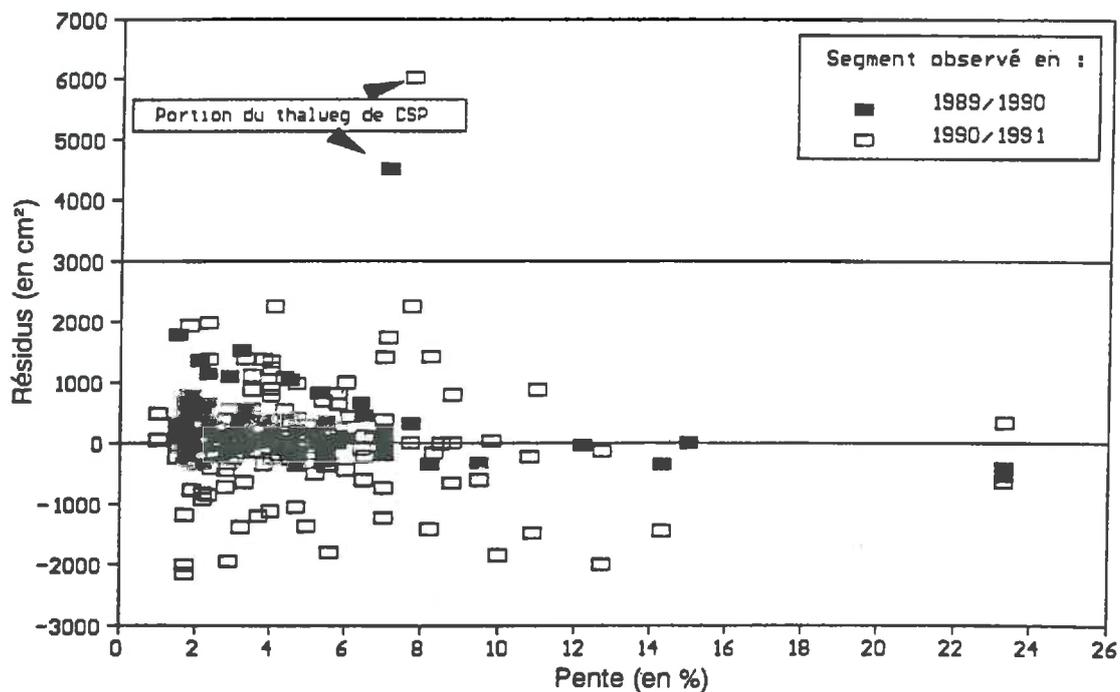


Fig. 8 : relation entre les résidus (en cm²) et pt (en %).

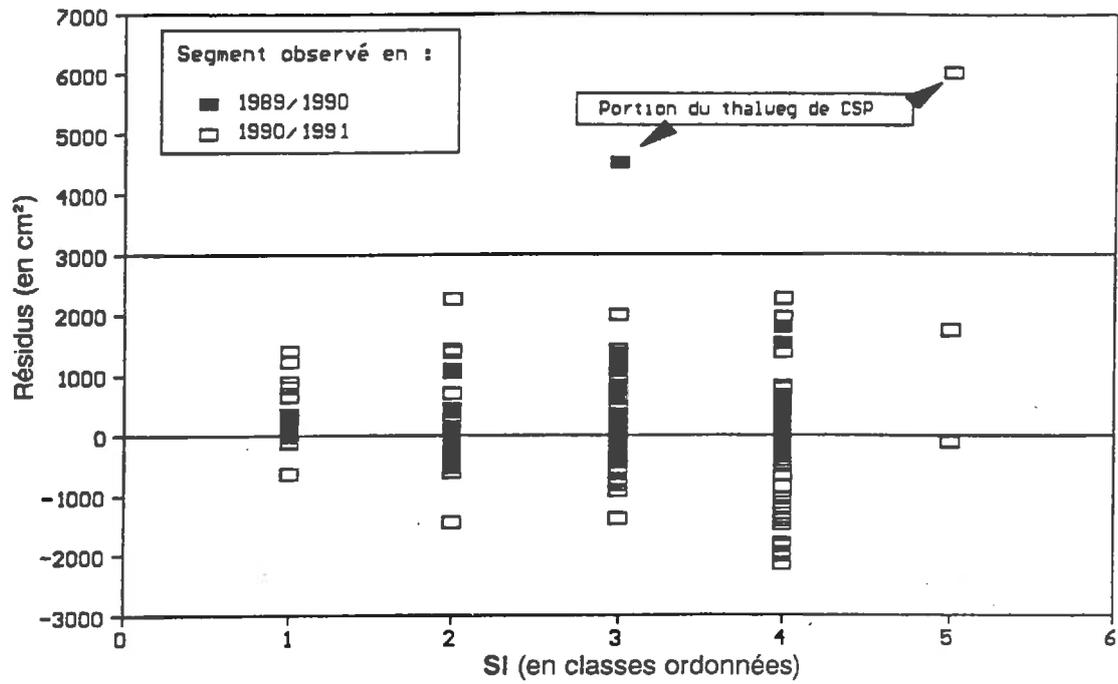


Fig. 9 : relation entre les résidus (en cm²) et si (par classe ordonnée).

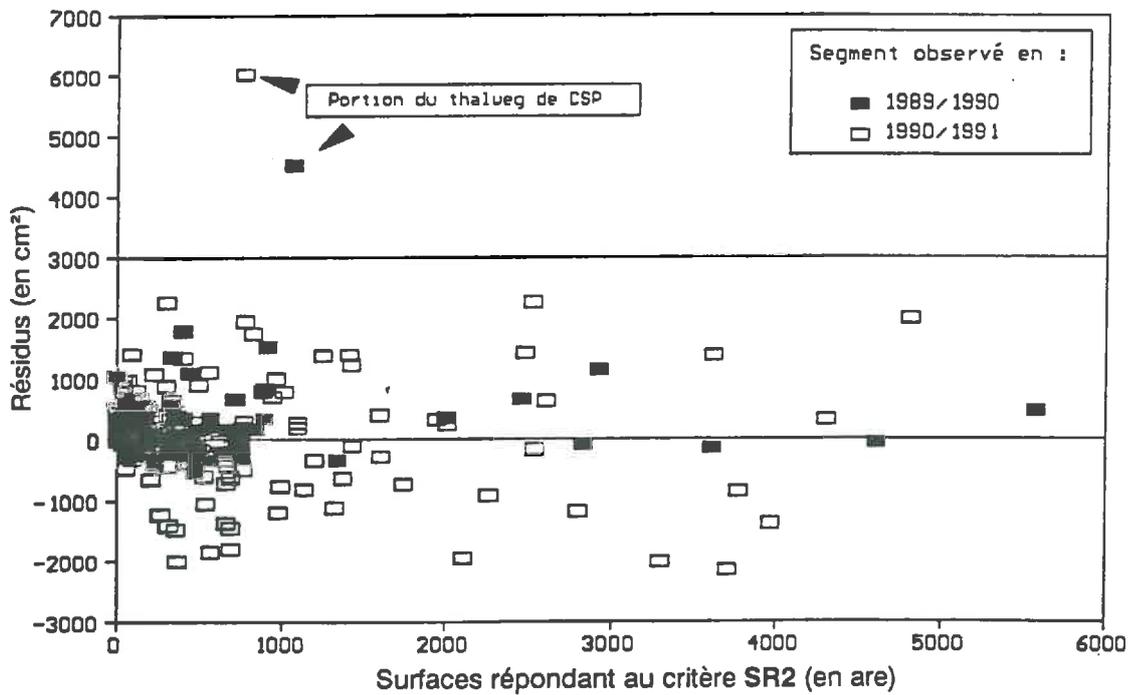


Fig. 10 : relation entre les résidus (en cm²) et les surfaces du type SR2 (en are) susceptibles d'alimenter un segment en ruissellement.

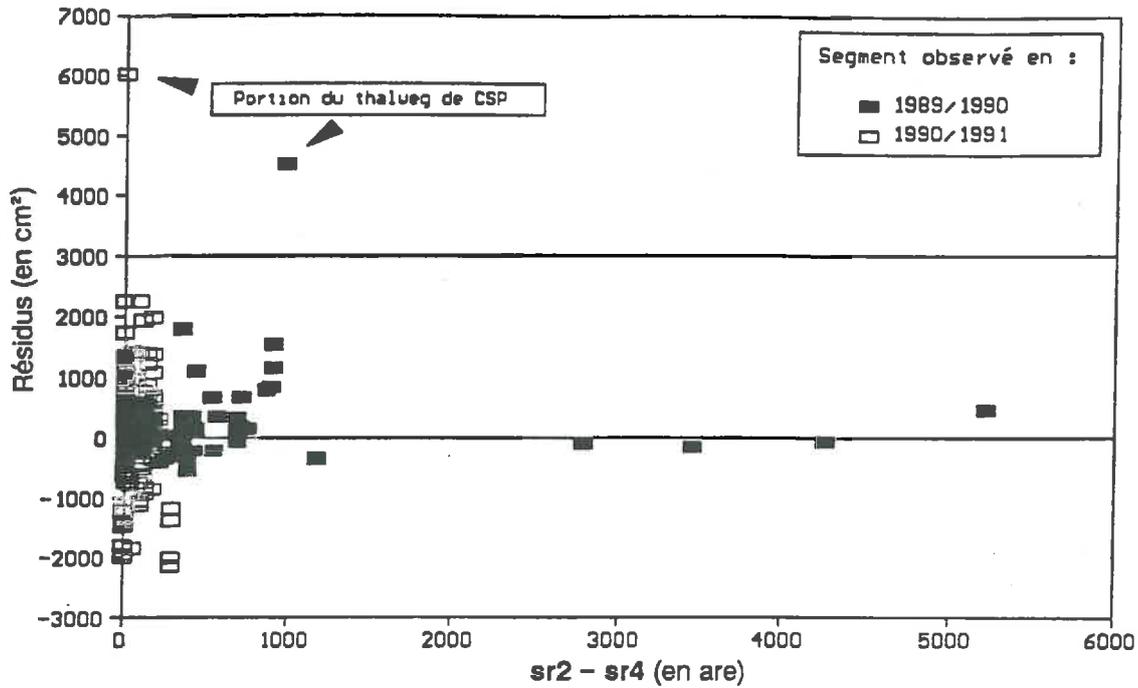


Fig. 11 : relation entre les résidus (en cm^2) et les surfaces du type SR2, n'étant pas du type SR4, (en ares) susceptibles d'alimenter un segment en ruissellement.

Tableau 4 : ajustement de la fonction puissance g_{1+2} , sans les deux segments atypiques de CSP.

Coefficient	Estimé	Erreur standard	Ratio	H0
α	7.3007	3.353	2.178	rejetée
a	0.5841	0.044	13.131	rejetée
b	0.5605	0.077	7.304	rejetée
c	0.5054	0.131	3.862	rejetée
$R^2 = 0.49$		Ratio : 151.22		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 646.4				
Seuils de confiance				
	1%	5%	10%	
t0	2.58	1.96	1.28	
F0	2.41	3.39		

Tableau 5 : Test de Kolmogorov – Smirnov.

Population	PA (1989/1990)	PB (1990/1991)
Nombre de cas	76	187
Résidus :		
maximum	4517	6010
minimum	-546	-2153
moyenne	237	63
écart-type	668	856
Hypothèse H0 : identité des distributions des résidus dans la population PA et dans la population PB.		
$d = \max FA - FB = 0.12$		
	Valeurs de d0	
Seuil de confiance	Test bilatéral	Test unilatéral
5%	0.19	0.17
1%	0.22	0.21
Test bilatéral : $d < d_0$ quel que soit le seuil de confiance.		
Le test unilatéral est donc inutile.		
L'hypothèse H0 est donc vérifiée : la population PA n'est donc pas significativement différente de la population PB.		

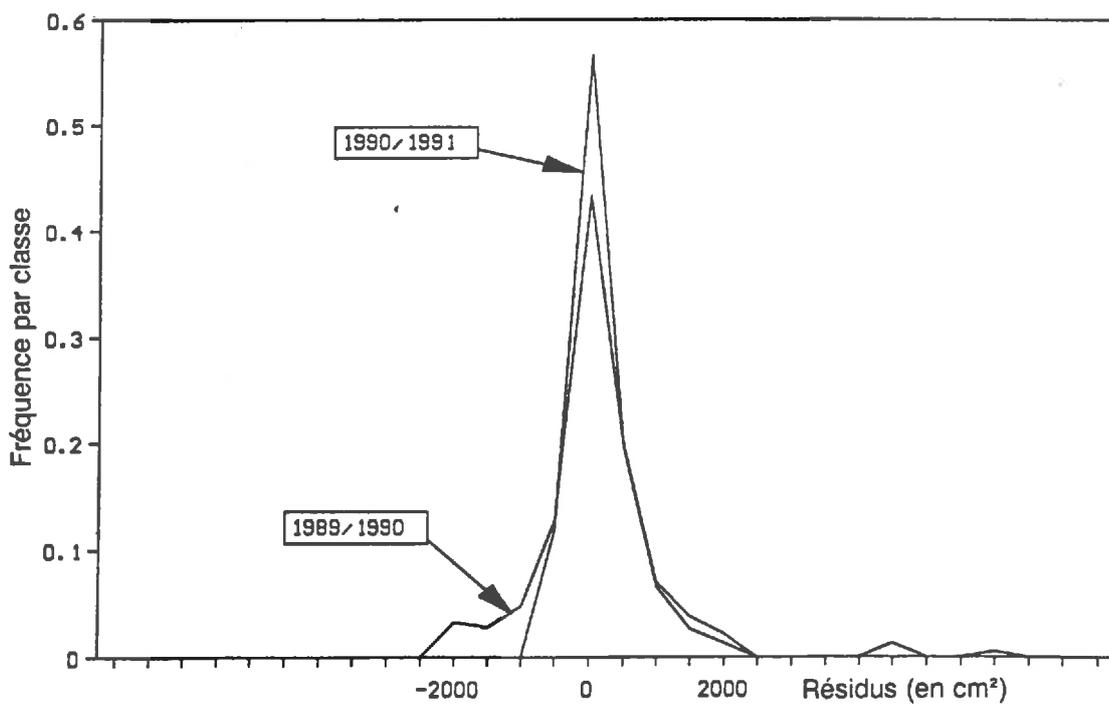


Fig. 12 : fréquence par classe de résidus (en cm²) des populations PA et PB

Tableau 6 : analyse de la reconstitution du volume incisé (en m³) par segment (volume reconstitué moyen).

Régressions linéaires simples, variable à expliquer : V _{mes} Equation d'ajustement : $V_{mes} = a + b V_{rec}$ (moyen)				
Données de fin d'hiver 1989/1990				
Paramètre	Estimé	Erreur standard	t calculé	HO (P = .95)
a	0.0961	0.1275	0.754	acceptée
b	0.8238	0.0679	12.132	rejetée
R ² = 0.22		Ratio = 147.18		rejeté
Erreur standard de V _{rec} = 2.788 m ³				
Test H0 (b = 1) : H0 rejetée				
t = (0.8238 - 1) / 0.0679 = 2.594				
t0 (P = 0.99) = 2.334				
Données de fin d'hiver 1990/1991				
Paramètre	Estimé	Erreur standard	t calculé	HO (P = .95)
a	-0.2175	0.2449	-0.888	acceptée
b	1.1603	0.0344	33.756	rejetée
R ² = 0.69		Ratio = 1139.47		rejeté
Erreur standard de V _{rec} = 5.196 m ³				
Test H0 (b = 1) : H0 rejetée				
t = (1.1603 - 1) / 0.0344 = 4.662				
t0 (P = 0.99) = 2.334				

Tableau 7 : taux d'érosion en rigoles par BVE (en m³/ha), mesurés (V_{mes}) et reconstitués (V_{rec}), du premier échantillon.

BVE	Erosion en fin d'hiver 1989/1990					Erosion en fin d'hiver 1990/1991				
	V_{mes}	V_{rec} pour les 10 reconstitutions				V_{mes}	V_{rec} pour les 10 reconstitutions			
		moy	min	max	écart-type		moy	min	max	écart-type
MA1	0,00	0,24	0,00	0,89	0,25	0,00	0,22	0,00	0,70	0,24
MA2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	4,05	1,22
MBA	0,00	0,54	0,08	1,10	0,33	0,00	0,12	0,00	0,46	0,16
LAR	0,03	0,02	0,00	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LEP	0,05	0,13	0,00	0,44	0,16	0,01	0,16	0,00	0,85	0,26
LHB	0,00	0,16	0,00	0,89	0,29	1,18	0,88	0,19	2,30	0,65
VBO	0,00	0,20	0,00	0,71	0,24	0,03	0,22	0,00	0,79	0,21
AA1	0,00	0,38	0,00	2,48	0,72	0,00	0,39	0,00	2,33	0,69
AA2	0,00	0,49	0,00	1,00	0,33	0,00	0,19	0,00	0,50	0,18
AA3	0,00	0,05	0,00	0,24	0,09	0,00	0,14	0,00	1,35	0,41
HBO	0,63	0,63	0,00	1,95	0,56	1,85	0,58	0,00	1,07	0,31
HFM	0,09	0,11	0,01	0,21	0,06	0,07	0,62	0,03	1,17	0,39
HMO	0,03	0,16	0,00	0,45	0,15	0,79	0,24	0,03	0,48	0,14
PMU	0,14	1,07	0,40	1,78	0,43	6,55	6,33	5,39	9,24	1,04
PS1	0,26	0,64	0,05	1,24	0,38	6,47	4,91	3,04	6,51	1,00
PS2	0,56	0,27	0,00	0,84	0,27	4,99	3,99	1,88	6,41	1,32
CBD	2,50	1,78	1,25	2,41	0,37	6,20	3,63	2,03	5,49	0,88
CBL	0,34	0,26	0,05	0,81	0,21	1,95	1,61	1,12	2,56	0,37
CSA	0,56	0,36	0,00	0,69	0,19	0,61	2,25	1,60	4,03	0,70
CSP	1,97	0,14	0,00	0,62	0,20	8,87	6,11	4,02	7,93	1,25
CSP	1,97	0,09	0,00	0,21	0,06	8,87	5,86	4,43	7,23	0,89

Tableau 8 : Régressions linéaires simples, variable à expliquer : V_{mes} du premier échantillon de BVE.

Equation d'ajustement : $V_{mes} = a + b V_{rec}$				
Variable explicative : V_{rec} moyenne (en m ³ /ha)				
Paramètre	Estimé	Erreur standard	t calculé	HO (P = .95)
a	-0.1341	0.1345	-0.997	acceptée
b	1.2838	0.0703	18.268	rejetée
$R^2 = 0.90$		Ratio = 333.71		rejeté
Erreur standard de l'estimée : 0.7211				
Test H0 (b = 1) : H0 rejetée				
$t = (1.2838 - 1) / 0.0703 = 4.039$				
$t0 (P = 0.99) = 2.429$				

APPLICATION DE LA DEMARCHE AU 2^{ème} ECHANTILLON DE BVE

Tableau 9 : sections incisés (en cm²) du second échantillon, estimées d'après l'équation n°2.

Régression linéaire simple, variable à expliquer : S_{mes} Equation d'ajustement : $S_{mes} = a + b S_{est}$				
Paramètre	Estimé	Erreur standard	t calculé	HO (P = .95)
a	-94.156	189.64	-0.4965	acceptée
b	1.288	0.1498	8.5964	rejetée
$R^2 = 0.61$		Ratio = 73.90		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 1012.35				
Test HO (b = 1) : HO acceptée				
$t = (1.2877 - 1) / 0.1498$		= 1.920		
$t_0 (P = 0.999)$		= 2.429		

Tableau 10 : ajustement de la fonction g_3 d'après les sections incisées mesurées (en cm²) du second échantillon.

Fonction non-linéaire g_3 : données de fin d'hiver 1991/1992				
Paramètre	Estimé	Erreur standard	Ratio	HO
α	0.1617	0.5052	0.320	acceptée
a	0.6854	0.0870	7.881	rejetée
b	0.4529	0.1241	3.648	rejetée
c	3.5029	2.2143	1.379	acceptée
$R^2 = 0.69$		Ratio : 37.81		rejetée
Erreur standard de l'estimée : 898.48				
Seuils de confiance				
	1%	5%		
t_0	2.66	2.00		
F_0	2.50	3.60		

Tableau 11 : taux d'érosion reconstitué (en m³/ha) des BVE du second échantillon.

BVE	Taux d'érosion reconstitué d'après g_3					Taux d'érosion reconstitué d'après g_{1+2}				
	V_{mes}	V_{rec} pour les 10 reconstitutions				V_{mes}	V_{rec} pour les 10 reconstitutions			
		moy	min	max	écart-type		moy	min	max	écart-type
MA1	0,00	0,32	0,00	1,45	0,50	0,00	0,28	0,00	0,68	0,22
MBH	0,00	0,11	0,00	0,32	0,10	0,00	0,40	0,03	1,10	0,34
MBO	0,00	0,34	0,00	1,11	0,40	0,00	0,66	0,00	2,28	0,66
MCJ	0,00	0,13	0,00	1,31	0,39	0,00	0,03	0,00	0,31	0,09
MGC	0,00	0,10	0,00	0,63	0,20	0,00	0,17	0,00	0,81	0,29
LFO	0,00	0,26	0,00	0,79	0,31	0,00	0,30	0,00	1,49	0,47
LHB	0,00	0,19	0,00	0,69	0,23	0,00	0,26	0,00	0,95	0,31
LME	0,45	2,16	0,25	5,81	1,40	0,45	2,03	0,45	5,30	1,62
LTM	0,00	0,35	0,00	1,03	0,40	0,00	0,16	0,00	0,52	0,15
LUS	0,00	0,19	0,00	0,65	0,27	0,00	0,68	0,00	3,43	1,20
CBD	0,39	0,98	0,35	2,03	0,48	0,39	0,98	0,34	1,66	0,40
CEF	0,64	1,34	0,04	4,65	1,20	0,64	1,86	0,21	3,87	1,07
CGP	0,60	0,89	0,00	1,60	0,39	0,60	1,68	0,35	3,82	0,93
CMO	8,67	5,84	4,90	7,01	0,70	8,67	4,64	3,60	7,08	1,01
CPP	0,05	1,07	0,00	2,72	1,09	0,05	1,41	0,00	3,46	0,94

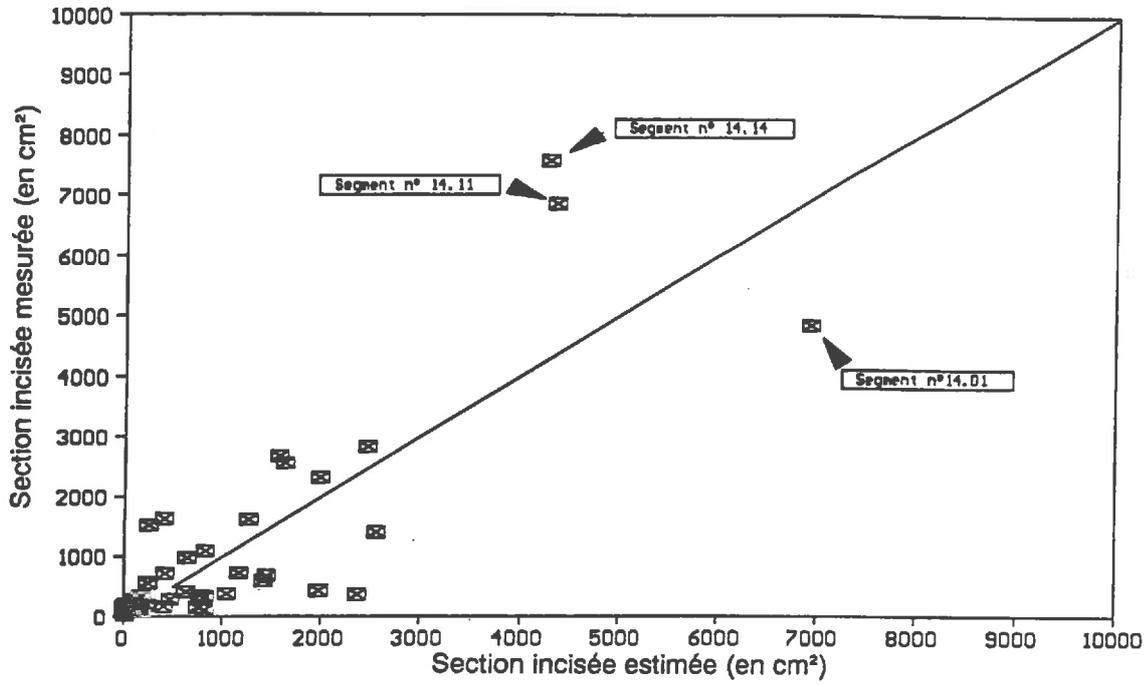


Fig. 13 : relation entre les sections incisions (en cm²) mesurées et celles estimées d'après la fonction g_3 .

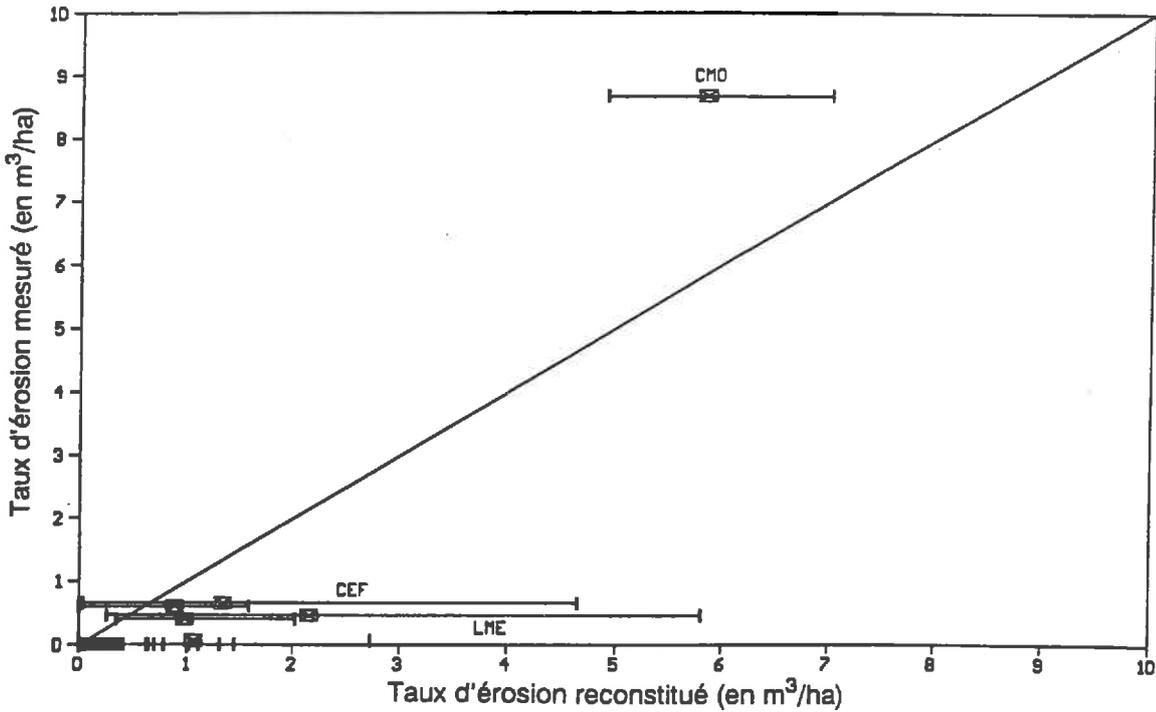


Fig. 14 : taux d'érosion (en m³/ha) en rigoles mesuré (V_{mes}) et reconstitué (V_{rec}) d'après la fonction g_3 par BVE : taux d'érosion reconstitué (carré), maximum et minimum obtenus pour les dix reconstitutions des volumes incisés.

Annexe 8



Photo 1 : surface répondant au critère **SR4** : croûte sédimentaire généralisée et rugosité nulle (blé d'hiver).

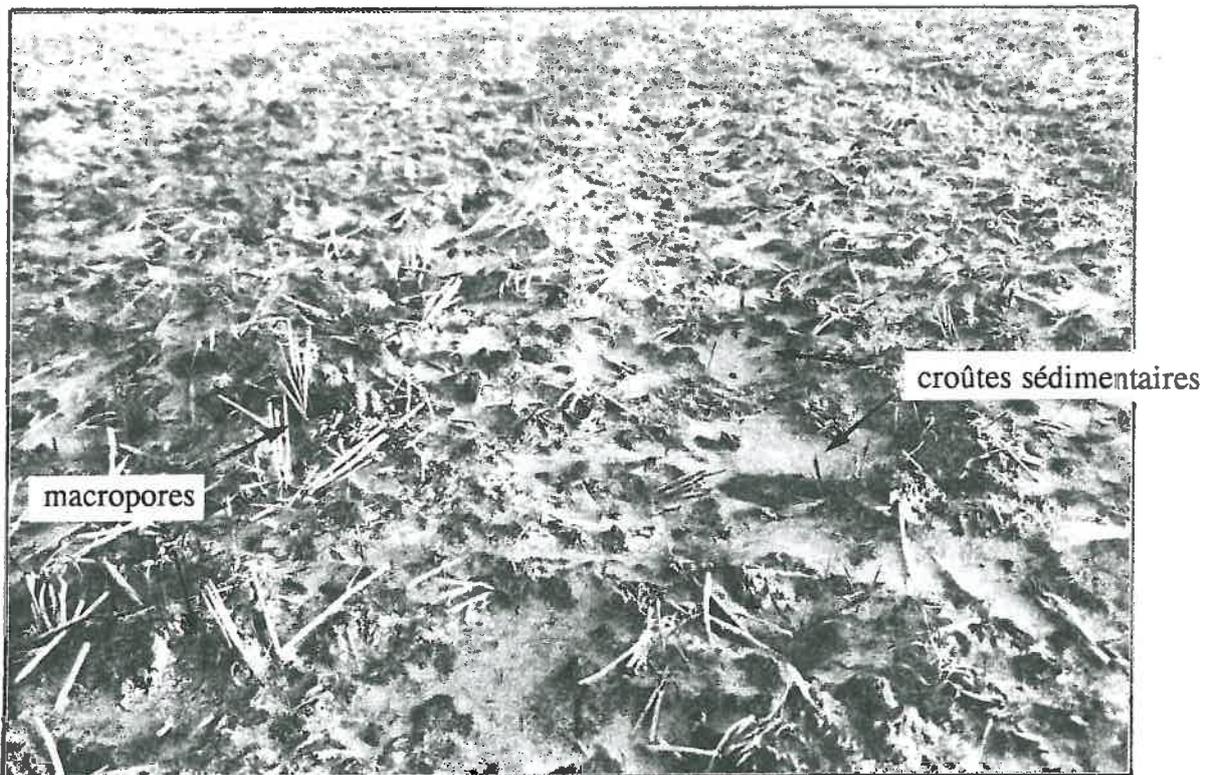


Photo 2 : déchaumage ne répondant par au critère **SR4**, bien que les microdépressions soient toutes tapissées d'une croûte sédimentaire : rugosité forte (type **R2**, de 2 à 5 cm) et macroporosité importante au niveau des pailles semi-enfuies.

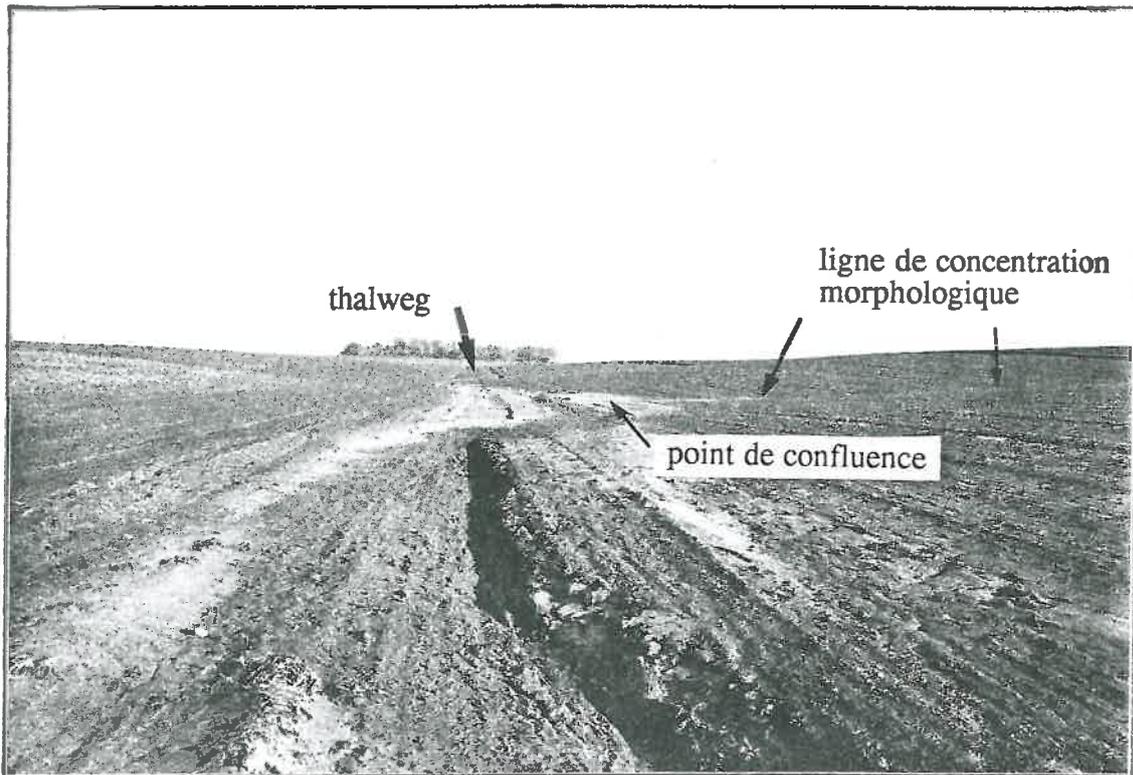


Photo 3 : thalweg en tant que collecteur principal du ruissellement : 44 ha de surfaces répondant au critère SR4 sont connectées à la rigole du premier plan.



Photo 4 : ligne de concentration morphologique incisée, drainant une parcelle de blé d'hiver.

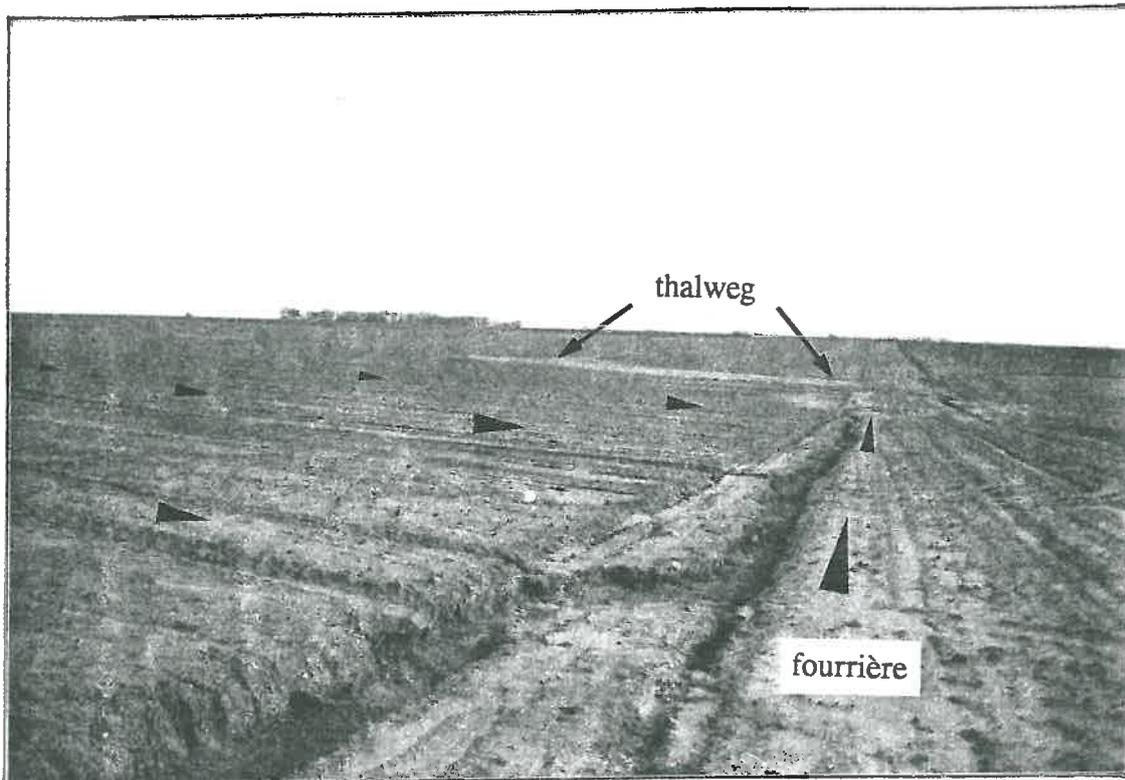


Photo 5 : fourrière incisée concentrant le ruissellement issu de la parcelle (les flèches indiquent le sens du ruissellement : noter le rôle des traces de roue comme guide du ruissellement).

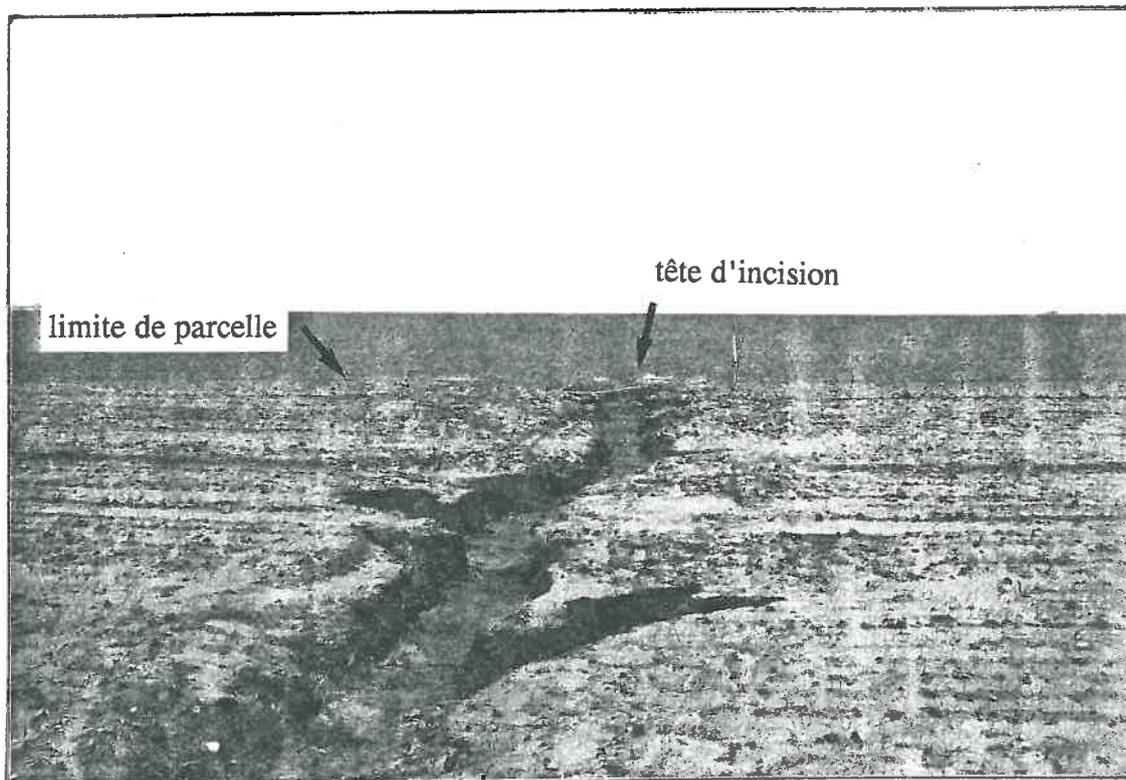


Photo 6 : tête d'incision en limite de parcelle, d'une rigole localisée sur une ligne de concentration morphologique peu marquée.