

E.N.S.A.R.

Ecole Nationale Supérieure Agronomique
de Rennes

I.N.R.A.

Institut National
de la Recherche Agronomique

THESE

Présentée devant

L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES

Pour obtenir le titre de Docteur de l'E.N.S.A.R.
Mention : **Sciences de l'environnement**

par

Sylvie CROS-CAYOT

DISTRIBUTION SPATIALE DES TRANSFERTS DE SURFACE
A L'ECHELLE DU VERSANT.

CONTEXTE ARMORICAIN

Préparée au laboratoire de science du sol de l'INRA de Rennes
Soutenue le 5 juillet 1996 devant le jury composé de :

C. Cheverry	Président
J. Poesen	Rapporteur
C. Valentin	Rapporteur
C. Gascuel-Oudoux	Directeur de thèse
P. Davy	Examineurs
Y. Le Bissonnais	

Dans le contexte du massif armoricain, le ruissellement et l'érosion sont étudiés, non pas tant pour leurs effets intrinsèques, que pour l'impact qu'ils ont sur la qualité des eaux et des sols ; la contribution du ruissellement au débit total reste faible et l'érosion est rarement catastrophique. Le ruissellement de surface est principalement lié à l'intensification agricole et notamment à l'apparition d'une croûte de battance et à la compaction du sol (engins agricoles) ; les sols sont limoneux et présentent une faible stabilité structurale. L'utilisation de produits polluants tels que les produits phytosanitaires, les engrais transportés en partie par ruissellement, peuvent en effet induire une dégradation de la qualité des sols et des eaux de surface. Les successions dans l'espace de phase d'infiltration ou de genèse du ruissellement entraînent une non-linéarité des processus selon des échelles d'espace imbriquées. Ces processus ont un impact sur la localisation de la dégradation physique et chimique des sols et sur la qualité des eaux superficielles.

La méthode proposée ici, caractérise le ruissellement ainsi que les transports solides et solubles associés, en intégrant les hétérogénéités spatiales du versant. Néanmoins, les données de concentrations en charges solides et de granulométrie peuvent être biaisées par les erreurs induites par la technique d'échantillonnage par aliquote et par les débordements des totalisateurs du dispositif de base.

Trois périodes majeures s'opposent :

Au cours de la première période (printemps), tant que la croûte structurale n'est pas formée et quelles que soient l'intensité et la hauteur pluviométrique des averses, le ruissellement est nul. Les premiers ruissellements apparaissent préférentiellement à l'amont des versants, en liaison avec les caractéristiques physico-chimiques de la couche de surface, légèrement différentes topographiquement. Ce ruissellement «local» induit une croûte de dépôt par plaque. Le ruissellement se caractérise par un transport sélectif de particules fines (taille argile et limon fin) et de matière organique par rapport au sol. Les concentrations en charges solides sont relativement importantes ; beaucoup de particules de sol sont facilement détachables sous pluie (splash).

Au cours de la deuxième période (été), les précipitations sont peu nombreuses, mais de fortes intensités (orages). Le ruissellement, parfois conséquent, correspond à un ruissellement hortonien. Le ruissellement est alors fortement dépendant des caractéristiques physico-chimiques du sol et de l'intensité des averses. Ainsi, il apparaît pour des seuils variables d'intensité de pluie, selon les sites. De plus, deux cas existent en fonction de la pédologie aval du versant : (1) les concavités sont des zones privilégiées pour l'infiltration de l'eau et le dépôt des particules, si le sol est sain en surface ; une sortie des charges solides hors de la parcelle est possible pour les événements les plus violents, mais quantitativement faible comparée aux redistributions des particules dans le versant ; (2) les concavités du versant sont des zones de «transferts» vers le cours d'eau, si le sol présente une hydromorphie en surface. Les versants convexes ou rectilignes sont toujours des zones de départ. La granulométrie des charges solides est proche de celle du sol au cours des averses orageuses, probablement en relation avec des apports du sol des rangs de culture.

Au cours de la troisième période (automne et hiver), les précipitations sont plus nombreuses mais d'intensités plus faibles. Les caractéristiques physiques de la couche labourée témoignent d'un net tassement d'importance différente selon la topographie et contribuent à expliquer en partie le ruissellement ; il est fréquent et correspond à un ruissellement hortonien associé à un ruissellement par saturation. Les eaux sont moins chargées et la charge solide est essentiellement constituée de particules fines et de matière organique, en relation avec un «lavage» du sol. La position topographique n'est plus discriminante. Les concavités de bas de versant, proches de la saturation en eau et plus tassées ne sont plus des zones privilégiées d'infiltration. A l'opposé de la période estivale, elle contribue de façon notable à un transfert de surface et des éléments associés

Le versant se scinde en deux domaines bien distincts : un aval et un amont. Il ne peut être considéré comme un système invariant au cours du temps. La composition chimique de l'eau de ruissellement apparaît proche de celle de la pluie. La composition des particules solides apparaît liée à la topographie. Les variations spatiales et temporelles du ruissellement et des transports d'éléments associés ont des implications directes sur la fertilité et la qualité des sols.

Mots clés : *massif armoricain, ruissellement, transports solides et solubles, variations spatiale et temporelle, échelle du versant.*

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier de la région dans le cadre de la C.O.R.P.E.P. (Cellule d'Orientation Régionale pour la Protection des Eaux contre les Pesticides), de celui de l'I.N.S.U., dans le cadre du programme DBT II «Fédération érosion et hydrogéologie de l'ouest de la France» et de celui de l'INRA dans le cadre de l'AIP «transfert des polluants». L'I.N.R.A. (M. MAQUERE) a, de plus, mis à notre disposition une parcelle proche du laboratoire, permettant de réaliser nos expérimentations dans les meilleures conditions.



En envoyant tardivement un dossier pour le DEA de pédologie de Nancy, sous l'oeil attentif de François Lelong, j'ai quitté ma Bourgogne natale pour me retrouver dans un groupe particulièrement sympathique d'étudiants et de chercheurs au centre de pédologie de Nancy. Après cette période courte, mais intense de trois mois où j'ai rencontré Adrien Herbillon à qui je témoigne ma plus grande sympathie, je suis allée m'installer à Rennes.

J'ai été accueillie chaleureusement au sein du laboratoire INRA de Sciences du sol, alors dirigé par Monsieur Delmas. Ces six premiers mois d'initiation à la recherche, sous la responsabilité de Chantal Gascuel, «ma mère scientifique» ont donné naissance au sujet passionnant de cette thèse. Nous avons alors formé un «couple» riche de confiance, d'échange et parfois, d'angoisse et de colère. C'est avec elle que j'ai découvert mes premiers états de surface de sol en plaçant mon «37 fillette» au beau milieu d'un inter-rang de maïs où une belle croûte de battance pouvait être observée. Elle a su me «supporter», m'encourager, m'aider. Je la remercie chaleureusement de ces trois années partagées côte à côte où elle a toujours su me faire confiance.

Mais sans deux hommes forts et non moins très beaux, je n'aurais pas pu recueillir toutes les données de ce travail. Je veux parler de François Garnier, l'ingénieur et Gilles Dutin, le tendre qui ont creusé et creusé et creusé des trous pour accueillir des poubelles en plastique nommées totalisateurs... et puis, usé des tarières pour «pédophilosopher» les sols de mes trois parcelles malgré les abeilles et les vipères... et puis aidé à recueillir des litres et des litres et des litres d'eau «sale» (Adèle et Fanny Gascuel, communication orale), malgré la «forêt» coupante de maïs, le froid, le vent, la pluie et rarement le soleil et la chaleur. Je ne veux pas oublier la petite dame à la blouse blanche, Annick Regeard qui a passé beaucoup d'heures sur mes échantillons qui entre nous, ne

sentaient pas toujours très bon. Ils ont tous trois fournis un travail de très bonne qualité, toujours dans une ambiance très conviviale.

Et puis, après les bottes et le ciré arrive la phase bureau-micro.

Toujours avec une grande gentillesse, Yves Le Bissonnais et Patrick Durand m'ont apporté une grande aide dans l'analyse des données. Je pouvais compter sur eux à tous moments. Merci à Anne Jaffrézic, Annie Soulier et à Stéphane pour leurs dons «de colleur et photocopieur».

Nombreux sont ceux qui ont relu consciencieusement le manuscrit : Chantal Gascuel, Claude Cheverry, Patrick Durand, Djilali Heddadj et Fabienne Trolard. Ils ont été nombreux à m'écouter balbutier mon exposé et à me «former» à l'oral, Philippe Mérot, Chantal Gascuel, Patrick Durand, André-Bernard Delmas, Vincent Chaplot, Pierre Curmi, Vincent Hallaire, Djilali Heddadj, Vincent Houben, Anne Jaffrézic, Jérôme Molénat, et Mathurin Zida. Merci à vous tous.

La soutenance a été riche d'enseignements et la discussion passionnante et cela grâce aux différents membres du jury, Claude Cheverry, Christian Valentin par l'intermédiaire de son rapport, Jean Poesen, Chantal Gascuel, Yves Le Bissonnais et Philippe Davy. Je remercie plus particulièrement les deux rapporteurs de cette thèse, Jean Poesen et Christian Valentin qui m'ont envoyé des corrections peaufinées pour le document final.

Et il y a tous les amis, copains et collègues qui vous font oublier les malheurs, l'angoisse et le stress et avec qui ont partagé joie et rires. Je pense à l'épaule d'Anne Jaffrézic, aux dimanches à la campagne chez Anna, Patrick, Youri et Delphine, au chocolat suisse de Philippe Burri, à la joyeuse amitié de Claire Morisson et Nathalie Thiersault, les drôles de dame de Naizin Island, au professionnel des régimes Yannick Besnard, aux quatre joueurs de tarot, Annie Soulier, Laurent Barbiero, Sonia Furian et Widiatmaka, au maître chanteur Alain Crave, au gâteau au chocolat de Marie Baqué, aux longs moments ensoleillés près de Djilali Heddadj, au café turc de Bahar, aux bons repas de Amar Tahar, Véronique Antoni et Louisa Heddadj, et à Agnès et Florence qui m'ont toujours accueilli les bras grands ouverts dans leur appartement parisien. Je n'oublie pas Jeanine Le Guevel et Michèle Anders qui m'ont tout appris du fonctionnement du fax, des bons de commande et de régularisation et tant d'autres choses et je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire INRA-ENSAR.

Tu t'es retrouvé sur une parcelle de maïs certains soirs de semaine, le samedi, le dimanche en costume-cravate, en jean-pull (jamais en pyjama, j'étais raisonnable) ; tu as été patient, réconfortant, encourageant lorsque c'était nécessaire ; tu as écouté, je ne sais combien d'exposés en auditeur ignorant ; tu as survécu à la rédaction malgré les nuits écourtées et les annexes... (c'est dangereux les couloirs la nuit !). Merci Steph.

SOMMAIRE



INTRODUCTION

CHAPITRE I. LE RUISSELLEMENT ET L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE CONTEXTE ARMORICAIN

1. PROCESSUS ET FACTEURS INTERVENANT DANS LA GENESE DU RUISSELLEMENT	6
1.1. Processus de genèse du ruissellement	7
1.2. Les facteurs	8
2. PROCESSUS ET FACTEURS INTERVENANT DANS LA PROPAGATION DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION	11
2.1. Le ruissellement	11
2.2. L'érosion diffuse	13
3. ANALYSE DES FACTEURS DANS LE CONTEXTE ARMORICAIN	14
3.1. Bilan d'érosion	14
3.2. Les facteurs du milieu physique	16
3.3. Les facteurs anthropiques	20
CONCLUSION	24

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

INTRODUCTION	26
1. LA METHODOLOGIE	26
1.1. Historique des méthodes	26
1.2. Présentation du dispositif	31
1.3. Discussion sur le dispositif et les données recueillies	35
1.4. Installation des dispositifs au terrain	38
2. SITES D'ETUDE	39
2.1. Site de Rennes	39
2.2. Sites de Naizin	56
2.3. Installation et suivi des dispositifs	67
CONCLUSION	69

CHAPITRE III : MESURES PHYSIQUES ET SUIVI DES ETATS DE SURFACE

INTRODUCTION	72
1. HUMIDITE DU SOL	72
1.1. Méthode et protocole	72
1.2. Variations temporelles	73
1.3. Variations spatiales	73

1.4 Conclusion	77
2. LES ETATS DE SURFACE ET LEURS EVOLUTIONS DANS LE TEMPS	77
2.1. Méthode et protocole	77
2.2. Variations temporelles	78
2.3. Variations spatiales	80
2.4 Conclusion	82
3. STABILITE STRUCTURALE	82
3.1. Méthode et protocole	82
3.2. Variations temporelles	83
3.3. Variations spatiales	87
3.4 Conclusion	88
4. LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE	89
4.1. Méthode et protocole	89
4.2. Variations temporelles	89
4.3. Variations spatiales	92
4.4 Conclusion	92
DISCUSSION ET CONCLUSION	93
 CHAPITRE IV. CARACTERISATION DU RUISSELLEMENT	
INTRODUCTION	97
1. RESULTATS SUR LA PARCELLE DE RENNES	97
1.1. Résultats	97
1.1.1. Description des variations spatiales et temporelles	97
1.1.2. Analyse de la distribution des volumes ruisselés	101
1.1.3. Analyse par position dans le versant	104
1.1.4. Analyse temporelle	105
1.2. Discussion	108
1.3. Modèle statistique simple de genèse du ruissellement	109
1.4. Conclusion	119
2. RESULTATS SUR D'AUTRES PERIODES OU SITES D'ETUDE	120
2.1. Résultats sur les sites de Naizin : comparaison avec celui de Rennes	120
2.1.1. Le site de Tocplouz	120
2.1.2. Le site de Kerjos	122
2.1.3. Discussion	123
2.1.4. Conclusion	123
2.2. Comparaison avec d'autres cultures : petits pois, phacélie et sol nu	124
2.2.1. Rennes, culture de petits pois	124
2.2.2. Rennes, culture de phacélie	126
2.2.3. Rennes, Sol nu	128
2.2.4. Conclusion	129
2.3. Conclusion	129
3. SYNTHÈSE	130
3.1. Cas d'un système drainant non hydromorphe en surface	130
3.1.1. Première période	131
3.1.2. Deuxième période	131
3.1.3. Troisième période	132
3.2. Cas d'un système pédologique allant d'un sol drainant vers un sol hydromorphe en surface	133
3.2.1. Deuxième période, système 1	133
3.2.2. Deuxième période, système 2	133
3.2.3. Hypothèses sur la première et deuxième période	134
3.3. Conclusions	134
CONCLUSION	136

CHAPITRE V. TRANSPORTS SOLIDES

INTRODUCTION	139
1. ANALYSES DES MESURES	139
1.1. Rappel sur la méthode de prélèvement	139
1.2. Qualité des mesures	140
1.2.1. Biais systématique	140
1.2.2. Biais lié au débordement	143
1.3. Discussion	150
1.4. Conclusion	154
2. TURBIDITE DES EAUX DE RUISSELLEMENT	154
2.1. Parcelle de Rennes, 1994 - 1995	154
2.1.1. Description des variations spatiales et temporelles des transports solides	154
2.1.2. Analyse spatiale	158
2.1.3. Analyse des chroniques	159
2.2. Caractérisations de la charge solide	159
2.2.1. Granulométrie	159
2.2.2. Par rayons X	164
2.2.3. Par analyses totales	167
2.3. Autres situations	171
2.3.1. Résultats sur les autres sites	171
2.3.2. Résultats sur les autres cultures	173
2.3.2.a. Culture de petits pois, Rennes, 1993	173
2.3.2.b. Culture de phacélie et sol nu, Rennes, 1993-1994	173
3. BILAN D'ÉROSION ET BILAN DE DÉPÔT	175
3.1. Bilan d'érosion, Rennes, 1994-1995	175
3.2. Bilan de dépôt, Tocplouz, 1993	180
4. REFLEXIONS SUR LES MÉCANISMES ET FACTEURS DÉCLENCHANTS	181
4.1. Facteurs explicatifs (Rennes, 1994-1995)	181
4.2. Discussions	183
5. SYNTHÈSE ET CONCLUSION	185
5.1. Première période	185
5.2. Deuxième période	186
5.3. Troisième période	187
5.4. Conclusion	188

CHAPITRE VI. REFLEXIONS SUR LA CHIMIE DES EAUX

INTRODUCTION	190
1. ANALYSE DE LA CHIMIE DES EAUX DE RUISSELLEMENT	190
1.1. Données disponibles, Rennes, 1994-1995	190
1.2. Composition chimique des eaux de ruissellement et variabilité	192
1.3. Relations hauteur de pluie, volume ruisselé et concentration en charge solide	193
2. FAMILLES CHIMIQUES	195
2.1. Relations entre éléments	195
2.2. Origines des solutés de l'eau de ruissellement	196
2.3. Variations spatiale et temporelle	198
3. ÉTUDE COMPLÉMENTAIRE : UNE «SIMULATION DE PLUIE»	202
3.1. Protocole expérimental	202

3.2. Variations au cours des «averses simulées»	202
3.3 Discussion	205
4. DISCUSSION	206

CONCLUSION GÉNÉRALE

1. LE CONTEXTE D'ETUDE	212
2. RESULTATS SUR LA METHODOLOGIE	212
3. RUISSELLEMENT, TRANSPORT DE PARTICULES ET CHIMIE DES EAUX	213
4. LES ENJEUX	216
5. PERSPECTIVES DE RECHERCHE	217
6. IMPLICATION POUR LE DEVELOPPEMENT	218

Liste des figures, des tableaux et des photographies

Bibliographie

Annexes

INTRODUCTION

Le ruissellement et l'érosion nivellent le relief en fonction de quatre grands processus : la désagrégation des roches, l'ablation et le transport par les eaux superficielles ou le vent, le dépôt au pied des versants, puis dans les lacs et les océans. Ces processus naturels sont souvent extrêmement faibles à l'échelle d'une vie humaine (MOSIMANN, 1991). Ils sont modifiés par l'intervention de l'homme, notamment par la mise en culture du sol (GRECO, 1978 ; VAN VLIET-LANOE, 1995 ; MOSIMANN, 1991 ; BORK, 1989).

L'hydrologie, perçue comme une science prédictive, date des années 30 (HORTON, 1933). Le ruissellement, composante du cycle hydrologique, est associé à l'écoulement rapide de crue. *Stricto sensu*, il se limite aux transferts à la surface du sol et sera envisagé comme tel dans ce mémoire. Il est ainsi, le moteur des transports à la surface du sol (KIRKBY, 1978).

Les recherches sur les transferts de surface concernent l'érosion concentrée en zone méditerranéenne (ARABI, 1990 et 1991 ; DEMMAK, 1982), tropicale (HUDSON, 1961 ; MORGAN, 1974 ; ROOSE, 1977 ; PEREZ, 1994) ou sur les versants de fortes pentes (AUZET, 1987). Vers les années 1980, c'est l'érosion concentrée des terres limoneuses cultivées, du Nord Ouest de l'Europe qui est abordée (VOGT, 1979 ; LUDWIG, 1992 ; LE BISSONNAIS, 1988 ; DELAHAYE, 1992). Ces formes de ruissellement et d'érosion concentrées provoquent des dégâts visibles, parfois considérables, voire catastrophiques et très spectaculaires : rigoles, ravines, engorgement des retenues, coulées boueuses et pollution des cours d'eau (KIRKBY, 1969 ; AUZET, 1987 et 1990 ; PAPY & BOIFFIN, 1988 ; BOARDMAN, 1990 ; GOVERS, 1991). Elles sont souvent liées à une agriculture intensive, modifiant l'infiltration de l'eau, malgré des conditions topographiques et climatiques modérées (PIHAN, 1979 ; GABRIELS, 1988).

Dans le contexte du massif armoricain, on a longtemps considéré que le ruissellement se limitait aux fonds de talwegs, où se localisent les zones humides saturées en hiver (CROS-CAYOT & GASCUEL-ODOUX, 1996). Sur les versants, l'eau s'infiltrait verticalement (GASCUEL-ODOUX, 1984 ; GASCUEL-ODOUX & MEROT 1986). D'un point de vue hydrologique, l'écoulement de surface ne représente qu'une fraction mineure des écoulements (MEROT, 1978 ; DURAND & TORRES, 1996). La formation de ravines, de coulées boueuses ou d'incisions centimétriques sont rares et se limitent à des événements exceptionnels ou à des sites vulnérables. Cependant, le ruissellement et l'érosion diffuse, induits par l'intensification de l'agriculture, sont des vecteurs privilégiés pour les polluants liés aux particules de sol (phosphore, pesticide, éléments traces métalliques...). Ces processus ont un impact d'ordre environnemental : l'enjeu du contrôle de la qualité des eaux. En Bretagne, 80% de l'alimentation en eau potable provient des eaux superficielles (GUIHO, 1995 ; TALLANDIER, 1995). Les produits phytosanitaires, les plus souvent décelés

dans les rivières, sont les herbicides utilisés dans la culture de maïs (GUIHO, 1995). A long terme, ces processus peuvent également avoir un impact d'ordre environnemental et agronomique ; la redistribution des constituants le long du versant peuvent contribuer à une modification physico-chimique des couches de surface, tant en terme de fertilité qu'en terme de qualité des sols (COULON, 1986 ; MOSIMANN, 1991 ; CHEVERRY, 1994).

Dans ce contexte, il paraît nécessaire d'adopter une démarche d'une part quantitative, pour estimer l'importance de ces processus peu visibles, d'autre part spatialisée, en relation avec la topographie, l'organisation pédologique et physique du versant.

Les transferts à la surface du sol, peu étudiés dans le contexte armoricain, ont fait l'objet de trois ans de mesures. Les principaux objectifs de l'étude ont été :

- la connaissance de la distribution spatiale des flux de ruissellement le long du versant ;
- l'analyse des transferts couplés de particules et de solutés, induisant une redistribution, voire un tri des constituants le long du versant.

On tente de relier la distribution spatiale du ruissellement le long du versant avec : (1) celle des constituants - granulométrie ; minéralogie ; analyses totales - ; (2) celle des caractéristiques physiques de l'horizon de surface du sol - stabilité structurale ; conductivités hydrauliques - ; (3) celle de la chimie des eaux de ruissellement.

In fine, on cherche à définir des seuils de déclenchement du ruissellement et à établir un modèle conceptuel du rôle de la topographie sur l'ensemble des transferts à la surface du sol.

Le mémoire se découpe en six chapitres :

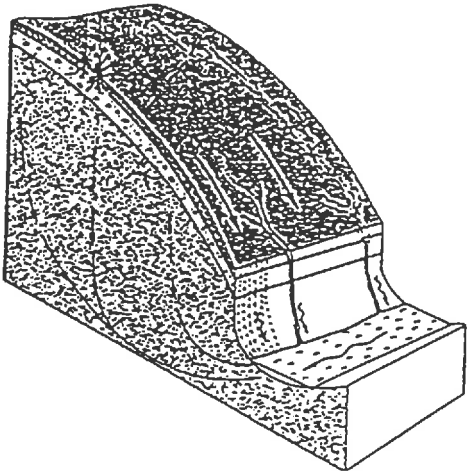
- Le premier chapitre présente brièvement les principaux processus et facteurs intervenant dans la genèse et la propagation du ruissellement. Puis, une analyse en est spécifiquement proposée pour le contexte du Massif Armoricain.
- Le deuxième chapitre décrit les méthodes d'étude et les caractéristiques des sites
- La troisième partie approfondit la description des variations spatiales et temporelles des caractéristiques physiques des sites, intervenant dans la genèse du ruissellement : la conductivité hydraulique (coll. HEDDADJ), la stabilité structurale (coll. LE BISSONNAIS) et l'évolution des états de surface du sol (coll. HALLAIRE).
- Le quatrième et le cinquième chapitres traitent respectivement de la distribution spatiale et temporelle du ruissellement et des transports solides : (1) à l'échelle d'un versant,

selon différentes positions topographiques ; (2) à l'échelle de l'année, selon des cumuls par averse essentiellement.

- Une réflexion sur la chimie des eaux est abordée dans le sixième chapitre.

*LE RUISSELLEMENT ET L'ÉROSION HYDRIQUE
DANS LE CONTEXTE ARMORICAIN*

A: Ruissellement hortonien



B: Ruissellement par saturation

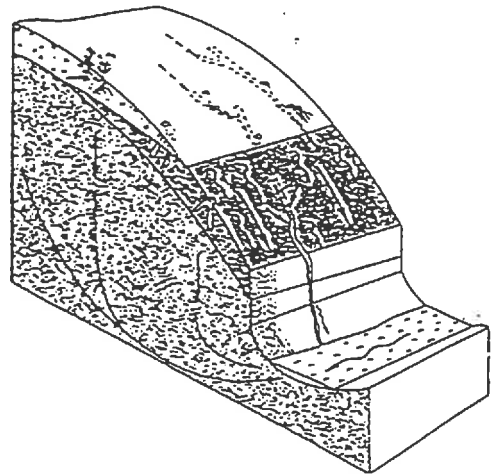


Figure I.1 : Processus de ruissellement de surface, d'après KÖLLA (1987)

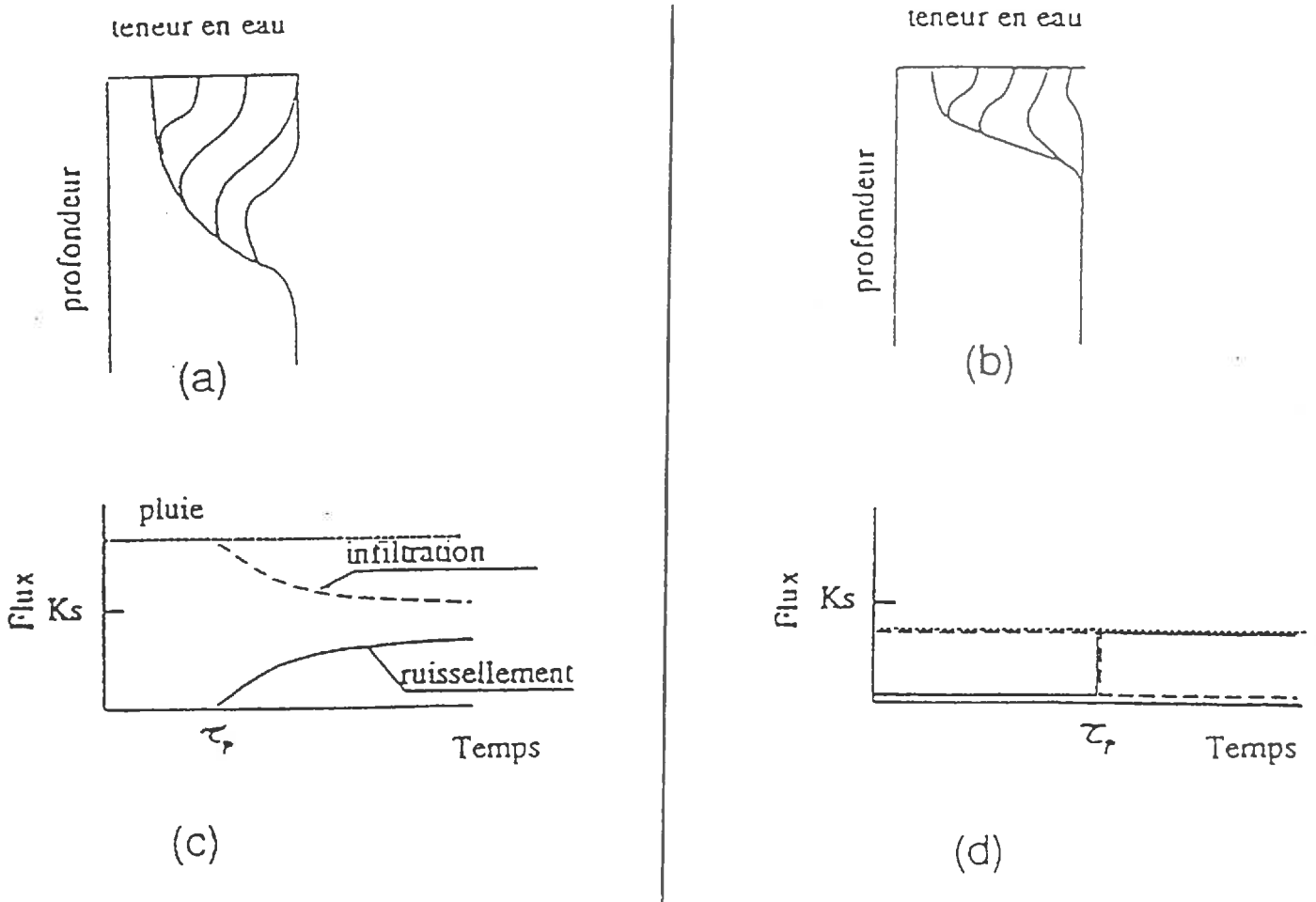


Figure I.2 : Evolution de la teneur en eau dans le sol - (a) : mécanisme d'HORTON ; (b) mécanisme de DUNNE - et illustration de l'apparition du ruissellement de surface - (c) : mécanisme d'HORTON (1933) ; (d) mécanisme de DUNNE (1970), d'après ABOUJAOUDE (1991)

Ce chapitre rappelle succinctement les connaissances sur la genèse et la propagation du ruissellement. Cette brève analyse bibliographique est confrontée aux connaissances actuelles sur le Massif Armoricain, afin d'expliquer les choix des sites et de la méthode adoptée.

1. PROCESSUS ET FACTEURS INTERVENANT DANS LA GENESE DU RUISSELLEMENT

1.1. Processus de genèse du ruissellement

Le terme de ruissellement désigne un mouvement d'eau dans ou sur le sol, consécutif à une précipitation, sous l'influence de la gravité. Les processus de ruissellement de surface sont principalement le ruissellement hortonien, mécanisme d'HORTON (1933), et le ruissellement par saturation, mécanisme de DUNNE. Le ruissellement hortonien (fig.I.1a, d'après KOLLA, 1987) apparaît si l'intensité des pluies est supérieure à la capacité limite d'infiltration du sol. L'excès d'eau s'écoule en surface par gravité le long des pentes. Le ruissellement par saturation (fig.I.1b, d'après KOLLA, 1987) est généré soit par l'eau de subsurface restituée par exfiltration, soit par la pluie tombant directement sur la zone saturée (DUNNE, 1970). La localisation et l'extension de ces zones saturées sont liées à la topographie et aux caractéristiques du sol.

Quatre phases sont distinguées (LAFFORGUE, 1977 ; LAFFORGUE & CASENAVE, 1980 ; CASENAVE & VALENTIN, 1989 ; AUZET, 1987 ; BOIFFIN & al., 1988 ; ABOUJAOUDE, 1991) :

- (1) la phase d'imbibition où le sol, non saturé, présente une infiltrabilité égale au flux maximum qu'il peut absorber (HILLEL, 1974) ;
- (2) la phase transitoire correspond au début du ruissellement ; l'infiltrabilité baisse et tend vers sa conductivité hydraulique à saturation ;
- (3) le régime de l'écoulement est ensuite permanent ; le ruissellement en surface est maximum, alors que l'infiltration est minimum.
- (4) la phase de vidange car la pluie cesse et le ruissellement décroît.

Ces quatre phases et l'évolution du profil hydrique associé, sont différents selon le mécanisme (fig. I.2, d'après ABOUJAOUDE, 1989).

Les processus de ruissellement sont amorcés : (1) lorsque le sol est saturé ou quasi-saturé en surface ; (2) lorsque les aspérités du sol sont remplies d'eau, c'est-à-dire que la

capacité de détention superficielle est atteinte ; (3) lorsque les forces gravitaires sont capables de vaincre les tensions superficielles. Ces trois conditions induisent une non-linéarité des processus de genèse du ruissellement, avec des connexions de flaque en flaque et une hétérogénéité du champ de vitesse, opposée à la vision de la formation d'une lame d'eau uniforme et continue à la surface du sol.

La formation d'un excès d'eau, à la surface du sol, dépend donc :

- des caractéristiques de la pluie : intensité ou cumul pluviométrique selon le processus ;
- des caractéristiques du sol dont la plupart varient dans le temps et l'espace : (1) en fonction de la chronique des pluies et du calendrier cultural : rugosité, conductivité hydraulique à saturation, courbes de rétention en eau ; (2) au cours de l'averse (conditions initiales) : gradients de potentiels, teneurs en eau, niveau de la nappe.

1.2. les facteurs

La genèse du ruissellement de surface est difficile à analyser car elle dépend d'événements aléatoires, la pluie, et de caractéristiques très variables de la surface du sol (DUVOUX, 1990 ; PARSONS & ABRAHAMS, 1992).

1.2.1. Les facteurs liés aux précipitations

En région tempérée océanique, les précipitations annuelles ont, en général, un maximum en automne et en hiver. Les cumuls annuels sont de 750 à 1000 mm (BARRY in CHORLEY, 1969). Les valeurs extrêmes, maximales et minimales, du module pluviométrique annuel, des hauteurs et des intensités des précipitations, sont primordiales en hydrologie. Une averse est définie, en général, comme un ensemble de pluies associés à une perturbation. La durée d'une averse peut donc varier de quelques minutes à une centaine d'heures avec plusieurs pointes d'intensité.

L'intensité moyenne, à l'intérieur d'une averse, pour un court laps de temps est préférable à l'intensité moyenne horaire pour analyser le déclenchement du ruissellement hortonien. Le ruissellement par saturation dépend avant tout du cumul des averses et de leur fréquence.

Dans les études de ruissellement, la fréquence d'apparition et le temps de retour des averses vont jouer un rôle primordial. Ils fixent les critères de prévision et de risque liée à ces averses. La notion de temps de retour n'a qu'un sens statistique.

L'action du climat induit de plus l'apparition de la battance. BOIFFIN & SEBILLOTE (1976) montrent que celle-ci dépend de l'histoire des relations climat-sol.

1.2.2. Les caractéristiques de la surface du sol

Elles déterminent la part des précipitations qui s'infiltrer, de celle qui ruisselle (KIRKBY, 1978 ; ABOUJAOUDE, 1991 ; DAIX, 1991 ; MOHAMOUD & al., 1990 ; ROTH & HELMING, 1992). La rugosité du sol détermine la détention superficielle et les chemins de l'eau. L'humidité apparaît comme un facteur déterminant du ruissellement par saturation alors que la conductivité hydraulique est déterminante pour le ruissellement hortonien. Dans le cas de sols croûtés, la notion de résistance hydraulique de la croûte, rapport de la conductivité hydraulique à saturation avec l'épaisseur de la croûte, est utilisée. L'évolution des propriétés de la surface du sol dépend aussi, à plus long terme, de l'humidité initiale du sol (BOWYER-BOWER, 1993).

L'infiltrabilité de l'ensemble de la couche proche de la surface de sol est elle aussi prépondérante. Elle dépend de l'état structural du sol et de sa stabilité structurale.

1.2.3. Les caractéristiques de la couche proche de la surface

☞ La dégradation de l'état structural

Plusieurs mécanismes interviennent simultanément ou se succèdent dans le temps pour transformer des agrégats bien individualisés en croûte (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Avant d'être arrachés sous l'effet des gouttes de pluie (ou du ruissellement), les particules de sol peuvent être mobilisées par humectation selon trois processus : (1) l'éclatement dû à la compression de l'air dans les agrégats secs subitement humectés (YODER, 1936 ; HENIN, 1938) ; (2) la dispersion pour les sols très sableux (CASENAVE et VALENTIN, 1989) , argileux (McINTYRE, 1958) ou riches en argiles gonflantes (VALENTIN, 1981) ; (3) la fissuration subie par les agrégats riche en smectites (KHEYRABI & MONNIER, 1968) ou pour les agrégats limoneux, une fissuration partielle (LE BISSONNAIS, 1987). Cette mobilisation des particules par humectation et l'énergie cumulée des gouttes de pluie

détermine la formation de la croûte structurale, puis de la croûte de battance (INTYRE, 1958 ; KINNEL, 1974 ; DE PLOEY, 1978 ; SAVAT & POESEN, 1981 ; BOIFFIN, 1984 ; BOIFFIN & BRESSON, 1987 ; LE BISSONNAIS, 1990 ; VALENTIN & BRESSON, 1992). Ces croûtes modifient les caractéristiques physiques et hydrauliques de la surface du sol (MONNIER & BOIFFIN, 1985 ; MOORE, 1981 ; LE BISSONNAIS & SINGER, 1992). La capacité d'infiltration initiale diminue jusqu'à une valeur de 2 à 6 mm/h avec des croûtes structurales et peut atteindre une valeur de moins de 1 mm/h avec des croûtes de dépôt (BOIFFIN & MONNIER, 1986). La rugosité de la surface du sol s'amointrit.

Deux autres processus diminuent fortement l'infiltrabilité du sol. MOHANTY & al. (1994) ont montré l'incidence du tassement des sols sur la conductivité hydraulique. BRESSON (1995) indique que le phénomène de prise en masse a été peu étudié. Il correspond à un effondrement de la structure au cours de l'humectation, reconnu par BOIFFIN & SEBILLOTE (1976) et LEY & al. (1989).

☞ La stabilité structurale dépend de la teneur en argile et de la matière organique des sols. Le complexe argilo-humique joue un fort rôle structurant. Ce rôle est plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et varie en fonction du type d'argile minéralogique (HENENSAL, 1986).

La matière organique augmente la stabilité des agrégats (MONNIER, 1965 ; HOFMAN & al, 1974 ; BOIFFIN & al, 1986 ; RUELLAN & DOSSO, 1993). Une valeur seuil est définie par le rapport matière organique sur argile (sens granulométrique). Elle varie en fonction des auteurs (MONNIER & STENGEL, 1982 ; DE PLOEY & POESEN, 1985).

La texture du sol joue essentiellement sur la valeur minimale de la conductivité hydraulique atteinte lorsque la porosité structurale est nulle (LUDWIG, 1992). Plus la teneur en argile est faible, plus la porosité texturale est forte (FIES & STENGEL, 1981 ; MONNIER & STENGEL, 1982). De plus, la vitesse d'extension des croûtes structurales dépend de la quantité des particules fines mobilisées à la surface du sol (LE BISSONNAIS, 1988).

L'humidité du sol va également déterminer directement la stabilité des sols (DE PLOEY, 1981), mais aussi, les processus de formation de croûtes (VALENTIN & BRESSON, 1992), par le phénomène d'éclatement des agrégats (BOIFFIN, 1984 ; LE BISSONNAIS, 1988 et 1990), l'importance du tassement et des phénomènes de prise en masse.

2. PROCESSUS ET FACTEURS INTERVENANT DANS LA PROPAGATION DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION

2.1. Le ruissellement

La rugosité influence la propagation du flux de ruissellement.

A l'échelle locale, le microrelief est déterminé par le travail du sol. Le sens du travail du sol est généralement orienté dans le sens de plus grande pente. En milieu agricole, le parcours de l'eau peut être celui du sens de la pente, l'écoulement en «baïonnette-pente», l'écoulement en «baïonnette-travail» ou l'écoulement dans le sens du travail du sol (DAROUSSIN & al., 1994 ; GALLIEN E., 1994 ; SOUCHERE V., 1995) ;

A l'échelle du versant, la morphologie du terrain intervient d'une part avec la pente qui détermine l'écoulement d'eau à l'intérieur du versant et d'autre part avec les limites des bassins versants élémentaires qui définissent en un point donné du bassin versant, l'importance des aires contribuant aux écoulements de surface (CHERY, 1990 ; PLANCHON, 1991 ; BURCH & al., 1988 ; LE BISSONNAIS & GASCUEL-ODOUX, 1996). Le ruissellement diffus tend à prendre la direction de plus grande pente, puis se concentre sur les collecteurs principaux, selon la topographie du versant (MOORE & al., 1988 ; LUDWIG, 1992). Sur les sols cultivés, la première concentration se fait au niveau des collecteurs secondaires formés principalement par les traces de roue des engins agricoles (AUZET & al., 1988 ; BOIFFIN & PAPY, 1988 ; AUZET & al., 1990).

Les résultats des recherches sur l'effet de la longueur et de l'angle de la pente sont souvent contradictoires. POESEN (1984 et 1992) montre que le taux d'infiltration augmente avec l'angle et la longueur de la pente et ainsi, que le ruissellement diminue. Ce résultat est expliqué par : (a) plus la longueur à parcourir est grande, plus le flux d'eau a des chances de s'infiltrer ; (b) une surface plus grande de sol présente des plages de rétention plus grande à la surface du sol. BRYAN & POESEN (1989) et SLATTERY & BRYAN (1994) indiquent qu'il s'agit d'une destruction de la croûte de surface. Inversement, le ruissellement semble augmenter avec l'angle de la pente selon les travaux de DE PLOEY & al., (1976), DJOVORIC, (1980), MATHIER & al. (1989) et SHARMA & al., (1983). L'effet de l'angle de la pente peut apparaître nul, selon les états de surface étudiés (LAL, 1975 ; ABRAHAMS & al., 1991).

La présence naturelle ou anthropique, de ralentisseur ou d'accélérateur du ruissellement est fréquente. On les retrouve à différentes échelles d'espace dans le bassin

versant (PEREZ, 1994) : à l'échelle de la parcelle ou à l'échelle du versant, selon la distribution spatiale des unités fonctionnelles (WILLIAMS & BONELL, 1987). Ils varient fortement en fonction du temps et induisent une non-linéarité des processus selon des échelles spatiales imbriquées (MOLINIER & al., 1990 ; HAMLETT & al., 1984).

A l'échelle du versant, ces ralentisseurs correspondent aux formes concaves et aux talus.

La forme convexo-concave est fortement liée à des reliefs mous composés de plateaux et de vallée. Ces formes s'observent en Angleterre (MORGAN, 1977) et aux Etats Unis (ELLISON, 1947 et 1948 ; LILLIARD & al., 1941). L'ensemble des études indiquent que la forme convexe augmente les risques d'apparition du ruissellement et que la forme concave ralentit la vitesse du flux, favorisant l'infiltration de l'eau. Les pratiques culturales, le drainage et le profil racinaire de la culture agissent fortement sur cette infiltrabilité des sols. Des facteurs naturels peuvent contribuer à augmenter l'infiltrabilité des sols. Les macropores, tels que les trous de vers de terre (ROTH & JOSCHKO, 1991) constituent des chemins préférentiels d'écoulement (ANDERSON, 1990).

La distribution spatiale des cultures (assolement) et des structures paysagères (haie) sur le versant vont déterminer la propagation du flux sur le versant. A cette échelle, les haies servent d'appui aux amas colluviaux, se manifestant sur le terrain par la dissymétrie amont - aval des talus. Le sol est tronqué au sommet de la parcelle, puis s'épaissit progressivement jusqu'au talus aval (DELAHAYE, 1992). Dans le système bocager, les talus ont une incidence majeure sur les transports le long du versant. L'examen des systèmes talus - fossés a montré d'importantes accumulations de terre riche en matière organique en amont des talus, résultant de différents facteurs : le travail du sol tend à faire descendre les matériaux organiques vers l'aval ; l'érosion différentielle entraîne les particules fines (humus, argiles, limons fins), en laissant sur place les plus grossières ou en les déplaçant sur une faible distance ; le talus ou le fossé constitue un obstacle efficace contre les apports par ruissellement provenant de l'amont du bassin et un piégeage des matériaux érodés (CARNET, 1976 et 1978).

Le versant est considéré comme un système évolutif, variable à différentes échelles spatiales et temporelles d'un point de vue hydrique ou d'un point de vue de son organisation - état de surface, occupation du sol, situation agronomique. Le versant est une zone émettrice du ruissellement et une zone siège de phénomène de concentration. En effet,

la parcelle est soumise aux variations annuelles des encroûtements et de l'humidité du sol. L'excès d'eau sur une parcelle située en amont a de fortes chances de traverser une zone qui lui permette de s'infiltrer (CAYOT, 1993).

2.2. L'érosion diffuse

Les facteurs présentés dans le paragraphe précédent vont évidemment jouer un rôle, puisque le moteur de l'érosion hydrique est le ruissellement superficiel (COSANDEY & MUXART, 1989 ; LE BISSONNAIS & GASCUEL-ODOUX, 1996). L'impact de la pluie sur le sol provoque une désagrégation des mottes et un déplacement par rejaillissement (ELLISON, 1944). Ce processus de splash détache les particules de la surface du sol tandis que le ruissellement de surface les transporte. L'importance de cette érosion diffuse dépend donc de la cohésion des propriétés du sol (TRUMAN & BRADFORD, 1993 ; NEARING & al., 1991) (matière organique, granulométrie, type d'argile, humidité des agrégats), du flux de ruissellement (KINNELL, 1991) (pente, longueur de pente, vitesse et hauteur du flux), du travail du sol (BRADFORD & HUANG, 1994) et de la plante.

L'angle de la pente guide l'efficacité de l'érosion en splash ; plus il est important plus le nombre de particules de sol détachées vers l'aval est important (ELLISON, 1944). Des études récentes dans le pays de Caux indiquent une augmentation des pertes en terre avec l'inclinaison de la pente, liée à la vitesse du ruissellement (CHAPLOT & al., 1996). Mais les études ne montrent pas toutes, une augmentation de l'érosion avec celle de l'angle de la pente (LILLIARD & al., 1941 ; NEAL, 1938 in EVANS, 1980).

La longueur de pente semble augmenter l'érosion (MUSGRAVE, 1954 ; WISCHMEIER & SMITH, 1965). Mais les relations sont équivoques entre longueur de pente et taux d'érosion (LAL, 1976). Pour ABRAHAMS & al. (1991), l'érosion augmente jusqu'à un seuil de longueur de pente, puis décroît lorsque ce seuil est dépassé. Beaucoup de ces résultats proviennent d'études en microparcelles, généralement, de moins de 30 mètres de long et rarement supérieures à 200 mètres de long. La forme de la pente est alors rarement prise en compte (EVANS, 1980).

La vitesse du flux et les contraintes de cisaillement (PROFFITT & al., 1991) exercée sur le sol augmentent au niveau des profils convexes. Le risque d'érosion est alors important. Inversement, au niveau des profils concaves, dans le cas d'érosion diffuse, le dépôt de particules de sol est grand, car la vitesse du flux diminue (GOVERS & RAWES, 1986 ; GOVERS, 1985).

Les feuilles de la plante forment une rugosité à la surface du sol et les racines créent des voies d'infiltration dans le sol (LATTANZI & al., 1974 ; EVANS, 1980 ; POSS & al., 1989). La structure des plantes peut concentrer l'eau de pluie, comme c'est le cas du maïs, ou au contraire «diffuser» l'eau vers des voies d'infiltration liées aux racines (DE PLOEY, 1984). Le recouvrement du sol par la culture limitera l'impact direct des gouttes de pluie sur le sol (BRANDT & THORNES, 1987). MOSIMANN (1991) considère qu'un taux de recouvrement supérieur à 30% permet d'atteindre un bon degré de protection, alors que COPELAND (1965) indique que l'érosion augmente rapidement avec des taux de recouvrement de la culture inférieurs à 70 %. Les structures des racines induisent une infiltration plus ou moins grande selon leur forme et leur développement (DUNNE & al., 1991). On peut ainsi améliorer la durée et la qualité de la couverture du sol par le semis d'une interculture après la récolte d'une culture principale (MAILLARD, 1988) ou semer une culture intercalaire, dans le cas d'une culture couvrant lentement le sol, telle que le maïs (GALLIEN & al., 1995).

3. ANALYSE DES FACTEURS DANS LE CONTEXTE ARMORICAIN

3.1. Bilan d'érosion

PIHAN (1976) a établi une carte d'érosivité sur l'ensemble de la France, en utilisant l'équation générale de perte en sol (WISCHMEIER & SMITH, 1958 et modifiée en 1978). L'indice R, d'érosivité, pour le massif armoricain, est inférieur à 40 ; 25% de l'érosivité moyenne annuelle sont attribuées à la période comprise entre le premier juin et le 15 juillet ; une faible érosion, non représentée, a lieu de novembre à mai. Cependant cette équation n'est pas adaptée au contexte du massif armoricain. En effet, elle estime de manière imprécise l'érosion affectant les talus et les versants soumis à divers modes cultureux. Cette approche ne permet pas de prendre en compte les variations spatiale et temporelle de l'état de surface du sol. «Elle est d'une utilisation malaisée car elle prend en compte des caractéristiques du système de culture sans distinction explicite entre les processus qui influent sur la naissance du ruissellement...» (MONNIER & al., 1986).

Une approche qualitative a été menée par CARNET (1978), à partir de l'étude des systèmes fossé/haie/talus. L'auteur montre des différences notables entre l'amont et l'aval du talus : (1) en terme d'épaisseur du sol avec des valeurs de 100 cm en amont contre 30



Photo 1.1 : dépôt à l'aval d'une parcelle de maïs ; Naizin (56), septembre 1993



Photo 1.2 : formation de griffes et de rigoles sur une parcelle de blé ; Naizin (56), 1993



Photo 1.3 : formation de rigoles sur parcelle de maïs en plasticulture ; Meslin (22), juin 1993, photo de CHAUVIN, d'après LE REST (1996)

cm en aval ; (2) en terme d'épaisseur de l'horizon A : 50 cm en amont contre 20 cm en aval ; (3) en terme de teneur en matière organique : 15,4% en amont contre 13,6% en aval. L'auteur élabore des hypothèses à partir de données physico-chimiques et de suivis du fonctionnement hydrique, quant aux modifications sur le sol et sur la circulation de l'eau ; le talus est un barrage à l'érosion hydrique ; la haie joue un rôle sur les propriétés hydriques des sols sous le talus et près du talus. Les éléments fins sont exportés de la parcelle lorsque le système fossé-talus n'est pas complètement fermé à l'aval de la parcelle (PIHAN, 1976). Ils sont alors piégés en majorité par les fossés (CARNET, 1978).

Sur les dynamiques actuelles, les méthodes quantitatives, basées sur l'utilisation du Césium (QUINE & WALLING, 1993) ou la matière organique, n'ont jamais été utilisées dans le contexte armoricain.

La description des processus actuels se résume donc à un constat très bref, avec la quasi absence de travaux sur cette question dans le contexte armoricain. Des phénomènes d'érosion, en fin d'été, ont été observés par MEROT (1978) et CARNET (1978). Ils sont induits par des fortes intensités de pluie avec des conditions de matière organique sèche. Quelques photos récentes témoignent de dépôts, parfois importants à l'aval des parcelles (photo I.1), de la formation de griffes et de rigoles (photo I.2) et parfois, de ravines (photo I.3). Des enquêtes dans le cadre du programme Bretagne Eau Pure (HEDDADJ et GASCUEL-ODOUX) devraient permettre d'appréhender l'importance et la forme des phénomènes de ruissellement et d'érosion, les zones, les périodes et les cultures sensibles à ces phénomènes.

3.2. Les facteurs du milieu physique

3.2.1. Les pluies

Le climat breton présente une certaine régularité (GUYOT & al., 1974) : la répartition annuelle des précipitations est quasi uniforme, avec un maximum en automne. Les hauteurs de pluies sont souvent faibles : plusieurs dizaines de jours par an où la pluie est trop faible pour être mesurée ; 110 à 130 jours par an où la pluie n'atteint pas 5 mm ; 17 jours par an où la pluie est supérieure à 10 mm ; 3 à 6 jours tous les dix ans où la pluie dépasse les 40 mm (LARIVIERE & VERDOU, 1976).

Les gradients thermiques et pluviométriques sont faibles (LARIVIERE & VERDOU, 1976). Néanmoins, les reliefs, relativement modestes, jouent un grand rôle dans la

répartition spatiale des précipitations (fig. I.3, HOUBEN, 1995). La disposition «du massif armoricain» protège la majeure partie du département d'Ile et Vilaine, des pluies provenant du sud-ouest et de l'ouest. Ce département présente un régime thermique plus contrasté et des précipitations plus faibles par rapport aux autres départements bretons. Avec 632 mm, la station de Rennes Saint-Jacques enregistre le minimum départemental (ANONYME, 1989). Le climat de ce département est qualifié d'océanique dégradé avec quelques signes de continentalité car les orages y sont un peu plus nombreux.

Aucune donnée sur les intensités des pluies à différents pas de temps et sur la fréquence de retour des pluies n'est disponible pour l'ensemble du Massif Armoricain. Seul le travail de CANN (1995) indique des valeurs de temps retour sur le cumul des averses, pour le bassin versant du Coët Dan (MORBIHAN).

En définitive, le contexte armoricain constitue une situation climatique très modérée du point de vue de l'érosivité de la pluie et du ruissellement. Deux aspects seront cependant considérés : les trains d'averses d'automne et d'hiver ; les averses orageuses.

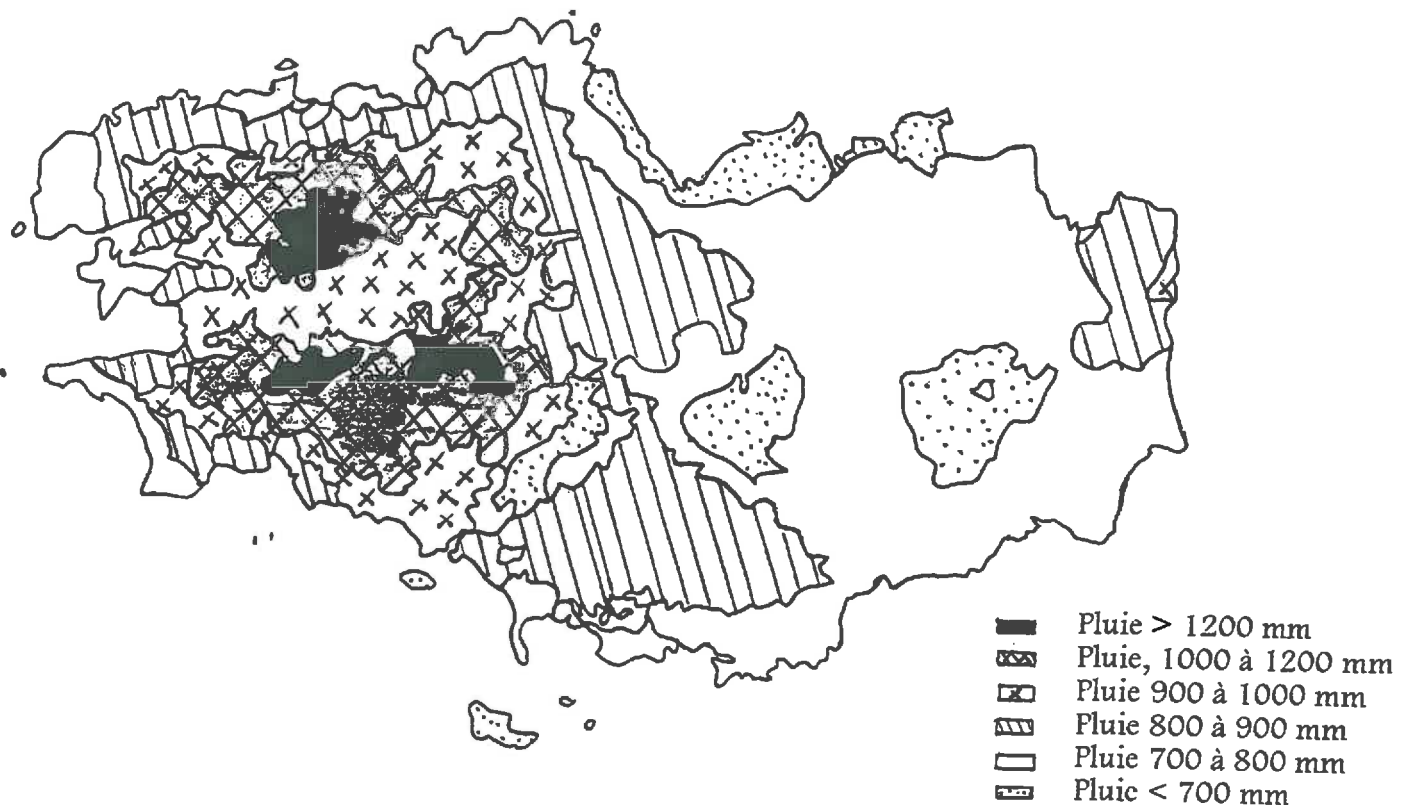


Figure I.3 : répartition spatiale des précipitations en Bretagne, d'après HOUBEN (1995)

3.2.2. Le sol

Un inventaire des horizons pédologiques, à l'exception des horizons de surface, a été réalisé à partir de travaux antérieurs (AL-SIDDICK, 1983 ; ROBAIN & BACHELARD, 1985 ; THIBAUD & WIDIATMAKA, 1990 ; in WIDIATMAKA, 1994). Les horizons limoneux présentent une fréquence constante sur les différents substrats, granite ou schiste (WIDIATMAKA, 1994 ; CURMI, 1993).

Ces travaux montrent que l'hydromorphie liée à la topographie est largement représentée dans le contexte armoricain, et témoignent ainsi de l'importance de la saturation de fond de vallée.

A moyenne et à grande échelle, WALTER & al. (1995) ont réalisé deux cartes : celle des teneurs en matière organique des horizons de surface des sols cultivés ; celle de l'évolution des teneurs entre 1980-1985 et 1990-1994. Les teneurs en matière organique, des sols cultivés en Bretagne, varient de 1,5 à 12 % (fig. 1.4). La tendance à la baisse des teneurs confirme les variabilités décrites par LELEUX (1988). L'étude met en évidence une baisse de la teneur en matière organique qui semble induite, au cours de la dernière décennie, par l'évolution des pratiques agricoles (fig. 1.5).

De plus, en Ille et Vilaine, 130 échantillons d'horizons de labour, répartis sur trois unités cartographiques, présentent un taux d'argile compris entre 19,4 à 28,6 % (WALTER, 1990). Ces trois unités sont différentes pour les propriétés physiques de l'horizon de surface. L'auteur précise que la variabilité au sein des unités cartographiques est parfois importante.

☞ On note, ainsi, une variabilité :

- des sols, à l'échelle du versant, de l'amont à l'aval ;
- des occurrences de saturation relative des sols, à l'échelle du bassin versant ;
- de la teneur en matière organique et de la texture des horizons de labour, à l'échelle régionale, soit de la stabilité structurale.

**Médiane communale
du taux de Matière organique:
données 1990-1994**

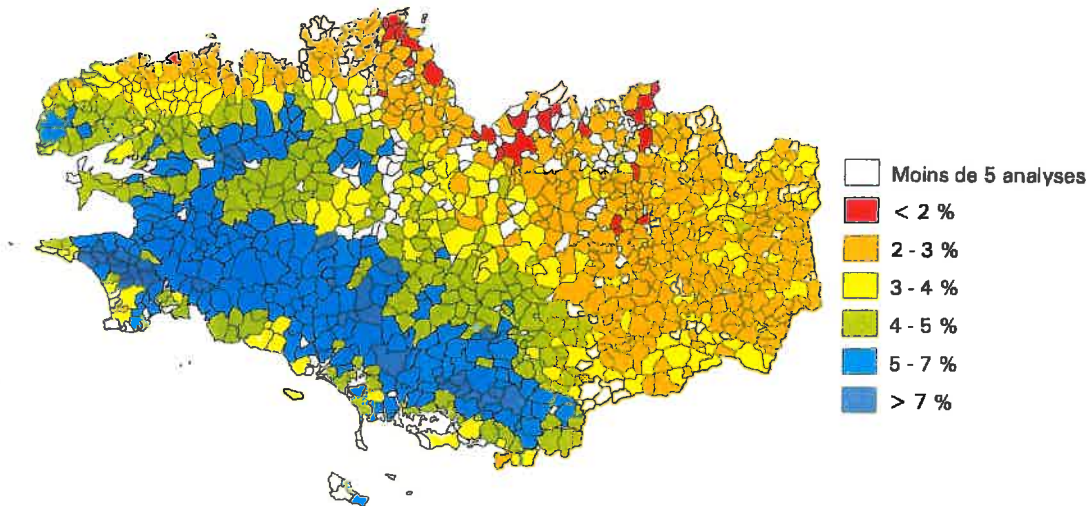


Figure I.4 : répartition spatiale des teneurs en matière organique entre 1990-1994, en Bretagne, d'après WALTER & al. (1995)

**Evolution des teneurs
en matière organique**

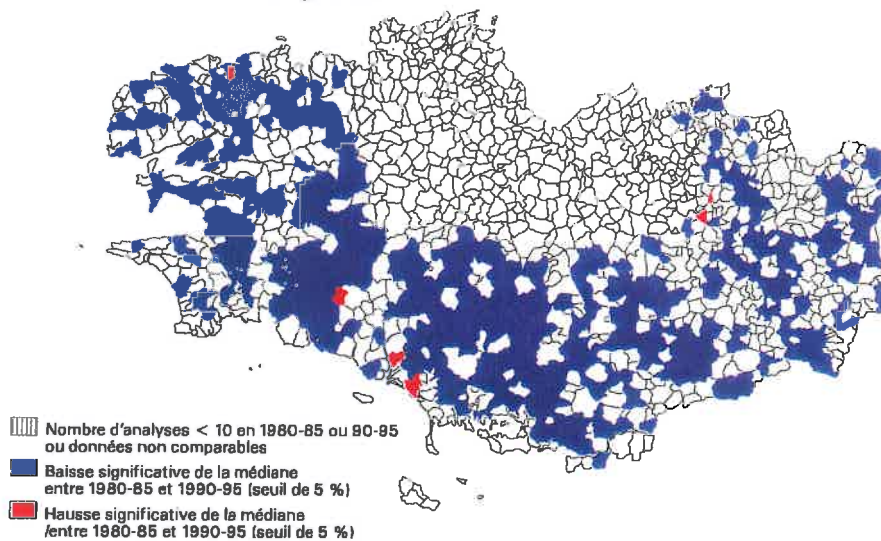


Figure I.5 : évolution des teneurs en matière organique en Bretagne entre 1980-1984 et 1990-1994, d'après WALTER et al. (1995)

3.2.3. La structure des bassins versants

GASCUEL-ODOUX (1984), GASCUEL-ODOUX & MEROT (1986), MEROT (1988 et 1993) distinguent une zone saturée contributive à l'écoulement rapide (BEVEN, 1978) et une zone non saturée de versant, siège de l'infiltration. La localisation des zones hydromorphes, en fond de talweg ou sur les plateaux, est fréquente (MEROT & al., 1995 ; CURMI, 1993). MEROT (1978) constate que dans certains bassins versants élémentaires granitiques de Bretagne, les coefficients de ruissellement correspondent à la proportion de sols hydromorphes du bassin étudié, au cours de l'hiver.

Les bassins versants d'ordre 1 sont en général de petites tailles ; le réseau hydrographique est dense et les pentes relativement courtes : la longueur moyenne des biefs extérieurs du réseau hydrographique est d'environ 1 kilomètre ; la densité de drainage de ces biefs, rapport de l'aire drainée sur la longueur du bief, est en moyenne de 0,7 km (CRAVE, 1994 ; CRAVE & DAVY, sous presse).

Les pentes inférieures à 5% représentent une fréquence cumulée de 76,5%. La rareté des pentes supérieures à 10%, soit 4,7% du Massif Armoricain, explique la quasi inexistence des phénomènes d'érosion concentrée (fig. 1.6).

La forme des pentes, dont dépend fortement la propagation du ruissellement de surface, n'est pas pris en compte dans ces études.

3.3. Les facteurs anthropiques

3.3.1. Les aménagements anthropiques

Les réseaux de haies, de routes ou de fossés, sont surimposés à la topographie naturelle, réduisant les versants, relativement courts. Cependant, depuis la deuxième guerre mondiale, la destruction du réseau de haie est estimée à 200 000 kilomètres (communication orale, MEROT). Plus d'un millions d'hectares ont été concernés par des opérations d'aménagement foncier (INIZAN, 1995), soit environ 65 % de la surface agricole en quarante ans, avec un taux d'arasement d'environ 40% jusqu'à 1980 pour les communes remembrées (HUBERT-MOY & MEROT, 1995). Dans le Finistère, de 1963 à 1992, le nombre de kilomètre de haie a diminué de 135 000 à 79 000 kilomètres.

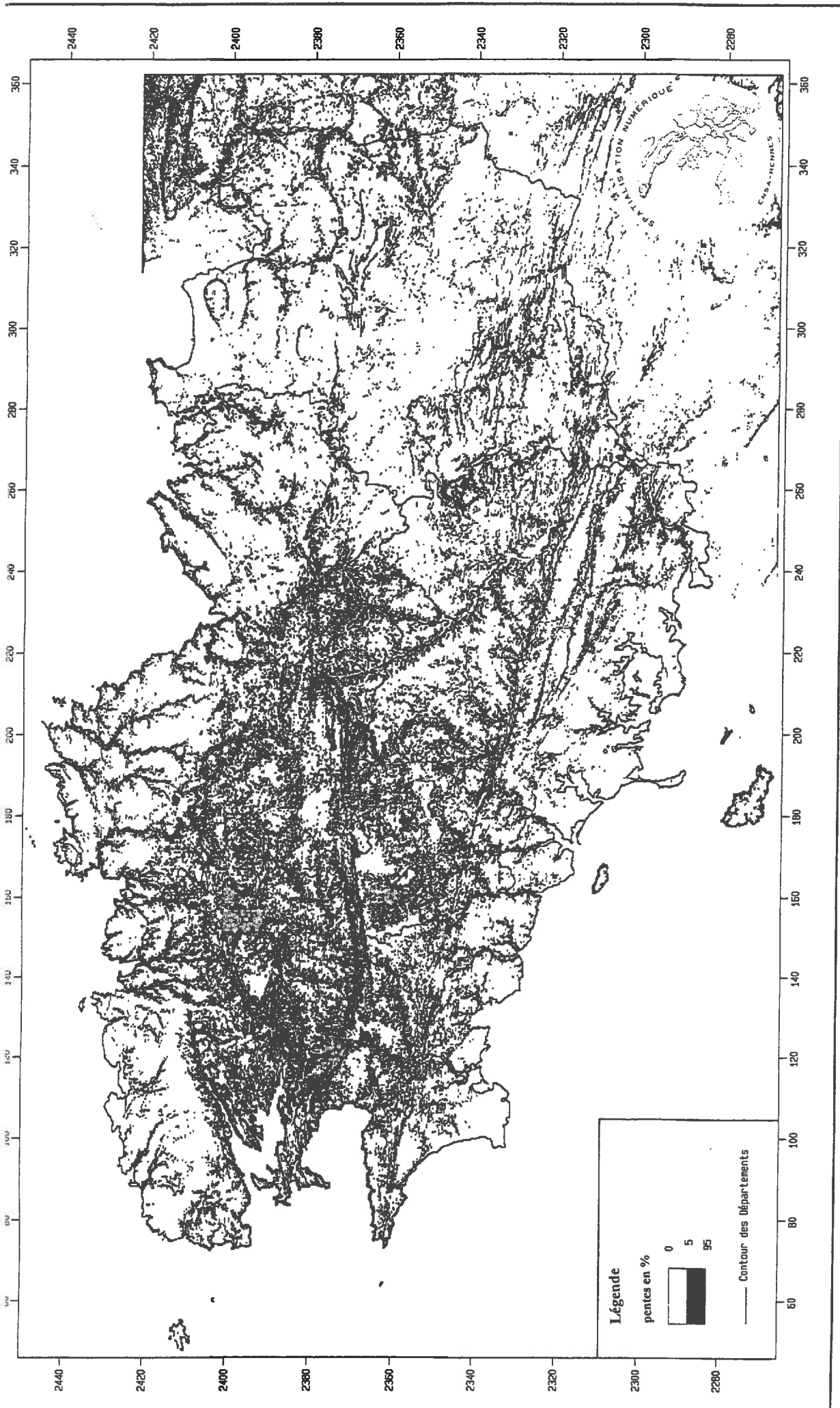


Figure 1.6 : répartition des pentes supérieures à 5% en Bretagne, carte réalisée par BAQUE et SQUIVIDANT (Equipe spatialisation numérique, ENSAR) ; source MNT - IGN, au pas de 250 mètres. Les coordonnées Lambert sont indiquées sur le cadre

Les drains réduisent de manière notable les lames d'eau ruisselée, en particulier lorsque les sols sont peu profonds ou tassés, ce qui les rend sensibles au ruissellement par saturation (LORRE & al., 1994 ; KAO, 1994). C'est pourquoi les impacts du drainage sont complexes et dépendent fortement de l'échelle de travail et du contexte local (OBERLIN, 1982).

La taille, la forme, l'accès à la parcelle ou encore le sens du travail du sol, facteurs déterminants dans la propagation du ruissellement, n'ont pas fait l'objet de travaux spécifiques.

3.3.2. Les systèmes de production et les systèmes de culture

En contexte d'agriculture intensive, une diminution de l'infiltrabilité des sols au cours du cycle cultural est fréquente. Elle dépend à la fois du système de production et des pratiques culturales. La culture de maïs apparaît comme particulièrement mise en cause. Le maïs fourrager représente 25,5% de la Surface Agricole Utile (CANEVET, 1992). La somme des surfaces en maïs et en céréales représente 46% de la S.A.U., contre 35% au niveau national ; la surface en herbe ne représente que 15% contre 37% au niveau national (GRIVAULT, 1995). «Le maïs fourrager, symbole de l'intensification sur le plan végétal, a connu une croissance spectaculaire, passant de 6 000 ha en 1960 à 469 000 ha en 1991 (CANEVET, 1992). La localisation géographique des cultures de maïs grains et de maïs fourrage sur des pentes inférieures à 5% est commune (fig. 1.7). A titre d'exemple, de 1970 à 1979, sur le bassin versant du Coët Dan, les surfaces cultivées en maïs se sont multipliées par 2 (GOENADI, 1989). En 1992, 31,5% des surfaces enquêtées (42 exploitations) sont en maïs sur ce bassin (MIMAULT, 1993).



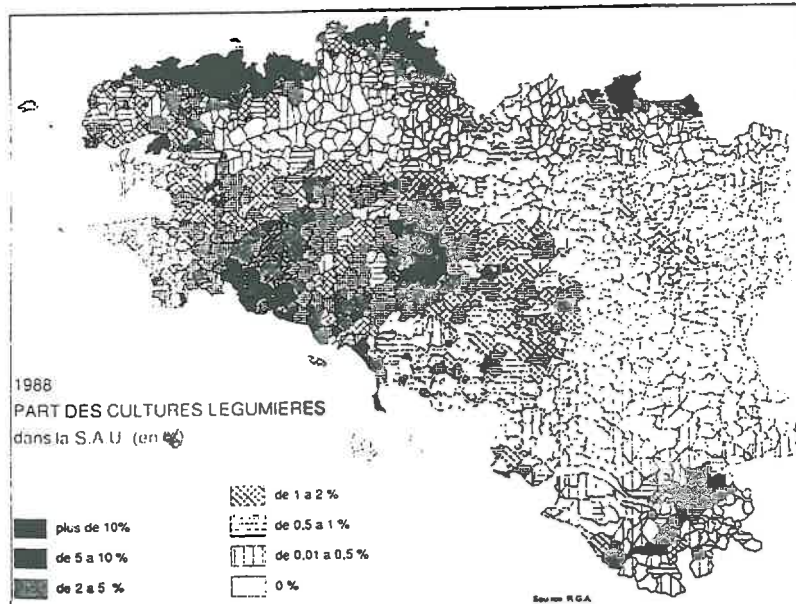


Figure 1.8 : situation géographique en 1988 des zones légumières, d'après CANEVET (1992)

Le maïs est une culture sensible au ruissellement ; elle est très mécanisée. Les nombreux passages d'engins tassent les sols. Ce tassement est notable sur les sols limoneux connus pour leur faible stabilité structurale (GRIMALDI, 1981), et ce d'autant plus qu'il y a succession de cultures de maïs (LAL, 1984). Cette pratique entraîne une diminution du taux de matière organique, de la stabilité du sol, de la capacité d'infiltration et de la porosité du sol (LAL, 1984 ; MONNIER & STENGEL, 1982 ; BOIFFIN & MONNIER, 1982). La dégradation du potentiel organique, d'une part et les opérations de travail du sol, réalisées souvent sur une période courte et humide, en automne (GRIMALDI, 1981), d'autre part, entraînent une sensibilité accrue au compactage. Les conséquences sont la réduction de la porosité et l'accentuation de la semelle de labour. La présence de motifs agraires non pérennes (traces de roue, fourrières ou dérayures) provoque de même, une compaction du sol. L'infiltrabilité du sol varie ainsi fortement au cours du cycle cultural (HEDDADJ et al., 1995). Le maïs est, par ailleurs, une culture semée tardivement dans la saison et qui a une croissance juvénile très lente (TRAPPENIERS, 1988). Le sol reste le plus souvent nu durant une grande partie de l'année. Il ne couvre jamais complètement le sol ; le maximum est de 70% en août (MOSIMANN, 1991). En 1980, la plasticulture a été introduit en Bretagne, pour répondre à des nécessités économiques des agriculteurs. En 1991, 28 000 hectares des surfaces de maïs sont sous plastique (CARPENTIER, 1992). Les conséquences sur l'érosion des sols semblent grandes (témoignage des enquêtes en cours, B.E.P.).

La zone légumière de la côte nord a augmenté progressivement en surface de 1955 à 1988 et s'est érigée comme un modèle intensif légumier (fig. 1.8). Ces cultures sont relativement sensibles à l'érosion. MOSIMANN (1991) indique que les parcelles de légumes plein champ ont le même degré de sensibilité à l'érosion qu'une parcelle cultivée en maïs.

CONCLUSION

Le Massif Armoricain présente, à l'échelle régionale, une forte diversité géographique vis à vis des risques de ruissellement : la battance des sols est plus importante à l'est qu'à l'ouest, liée en particulier au taux de matière organique ; le relief est plus accentué à l'ouest et en centre Bretagne qu'à l'est ; les cumuls pluviométrique diminuent d'est en ouest.

Cette région semble plus marquée, qu'il n'y paraît, par une saisonnalité vis à vis des problèmes de ruissellement et d'érosion. Un jeu saisonnier d'interaction entre climat et cycle cultural intervient, par le biais de différents processus : saturation des sols, battance, tassement ou prise en masse des couches labourée.

Les aménagements agricoles jouant le rôle de «ralentisseur dynamique» et ayant un impact conséquent sur les réseaux d'écoulement, que ce soit le parcellaire, les haies, les fossés et les drains, ont évolué fortement ces dernières décennies.

Enfin, l'introduction de nouvelles cultures, comme le maïs, l'intensification ou la spécialisation poussée en productions légumières, induisent une dégradation des propriétés physique du sol.

Dans ce contexte, il apparaît important de caractériser le ruissellement et les transports solides en fonction d'une hétérogénéité spatiale, difficile à appréhender à partir d'une valeur moyenne établie à l'échelle régionale, que ce soit, du taux de matière organique ou de la topographie (CROS-CAYOT & GASCUEL-ODOUX, 1996).

Dans cette analyse de la distribution spatiale et temporelle du ruissellement et des transports solides, il est important d'établir le poids : (1) de la saisonnalité, (2) des cultures sensibles telles que le maïs, (3) et de prendre en compte la diversité régionale.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

La méthode d'analyse du ruissellement et de l'érosion est décrite et discutée. Elle permet la quantification et la caractérisation des transferts de surface en différents points du versant, pour chaque événement pluvieux. Elle est basée sur l'utilisation d'un ensemble de dispositifs légers installés selon différentes positions topographiques. Ainsi, elle est définie comme une méthode multi-échelle. Ces dispositifs collectent le ruissellement de surface et les charges solides associées dans la mesure de la capacité d'un fût totalisateur. Il est possible d'enregistrer le flux instantané de ruissellement, au cours de l'averse, en plaçant une sonde à ultrasons dans le totalisateur.

Les mesures ont toutes été réalisées sous pluie naturelle, au cours d'une année culturale, sur trois parcelles agricoles présentant un profil de forme convexe-concave. Une parcelle est située sur le versant et deux parcelles sont connexes au ruisseau. Les caractéristiques topographiques, pédologiques, culturales des sites, le climat correspondant aux périodes étudiées sont présentées.

INTRODUCTION

Le contexte régional a conduit à privilégier l'échelle de la parcelle agricole (chapitre I). Le ruissellement semble discontinu à la fois dans l'espace et dans le temps. Cette propriété nous conduit à choisir une méthode permettant une analyse spatiale. Le choix de la méthode, dans les études de ruissellement et d'érosion induit directement la forme des résultats et leurs interprétations. Les données correspondent à une échelle précise. Une expérience est créée dans le but d'expliquer un type de phénomène particulier dans un contexte bien précis (DE PLOEY et GABRIELS, 1980). Les différents processus de ruissellement et d'érosion sont définis en fonction des échelles d'espace et de temps.

Ce chapitre présente les sites et la méthode. Les résultats n'ont de valeur que dans le contexte géographique et climatique de la période étudiée.

Le premier paragraphe présente la méthode et analyse l'intérêt et les limites de celle-ci.

Le second paragraphe replace les sites d'étude dans le contexte armoricain et indique la représentativité de la période d'étude. Les caractéristiques des sites et des périodes étudiées sont détaillées.

1. LA METHODOLOGIE

1.1. Historique des méthodes

Le ruissellement de surface et l'érosion hydrique sont des processus complexes ; des phases de ruissellement et d'infiltration couplées à des phases d'érosion et de dépôts se succèdent dans l'espace et dans le temps.

On distingue les facteurs intervenant à l'échelle locale tels que les facteurs agronomiques, de ceux à l'échelle du versant, la pente ou la géomorphologie (CAYOT, 1993). Le versant est considéré à la fois comme système évolutif (GOURRU, 1992) et comme zone émettrice du ruissellement. Localement, on observe des variations d'encroûtements et d'humidité du sol qui conduisent à la genèse des processus.

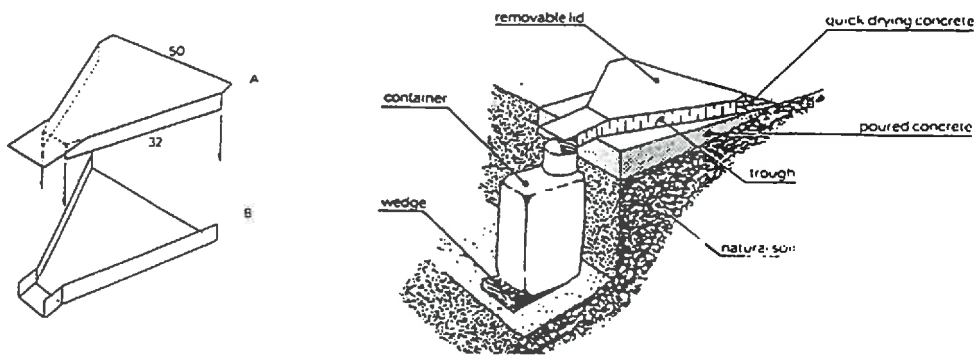
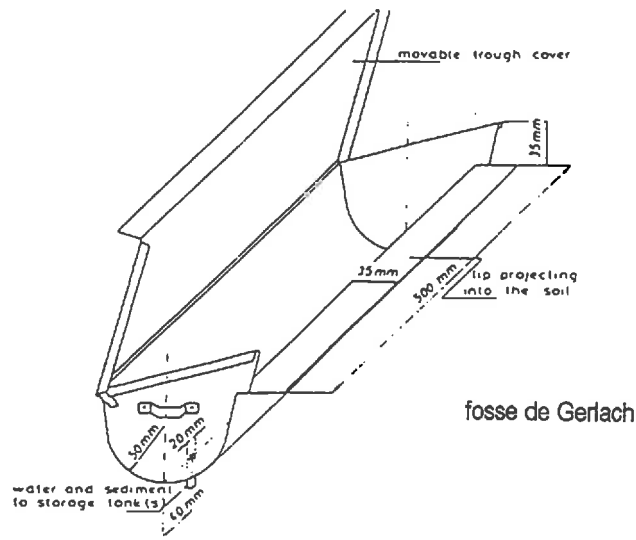
La caractérisation des processus à une échelle donnée implique les observations à cette échelle. Il est indispensable pourtant, d'évaluer les différents processus qui interviennent aux différentes échelles. En effet, les processus définis à un niveau d'organisation peuvent se combiner ou s'annuler en intégrant différentes échelles spatiales. La méthodologie doit s'adapter à l'échelle considérée et au processus envisagé (Cf. chap. I).

A l'échelle du versant ou de la parcelle, on peut distinguer deux types de méthode, les méthodes globales et les méthodes ponctuelles. Le premier groupe fournit des valeurs globales de ruissellement et d'érosion pour une superficie connue, alors que le deuxième permet de caractériser le ruissellement et l'érosion en un point donné du versant.

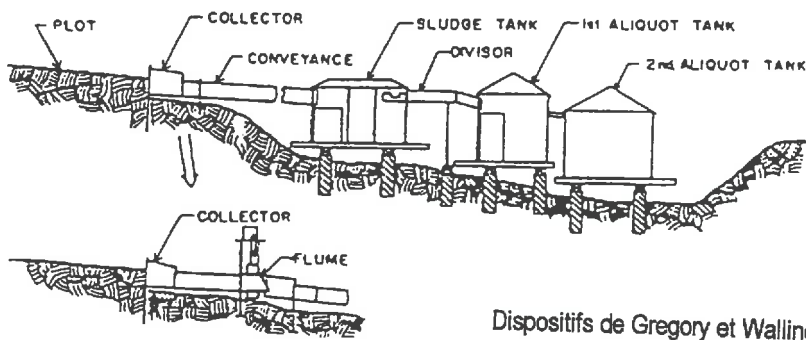
☞ Très utilisées dans les études de typologie, de hiérarchisation des situations agronomiques et de la prédiction des flux de ruissellement et d'érosion, les méthodes globales quantifient les phénomènes soit sous forme de volumes d'eau et de perte en sol pour un type d'averse (mesures volumétriques), soit sous forme de flux d'eau de ruissellement et de charges solides transportées au cours de l'averse pour une superficie connue (aspect dynamique) (mesures débitométriques). Quels que soit les résultats, ils doivent conduire, par une démarche statistique, à une généralisation et *in fine* à la prédiction. C'est la démarche définie par WISHMEIER et SMITH (1958), par l'Universal Soil Loss Equation.

Ainsi, les méthodes volumétriques s'interprètent en bilan d'érosion et de ruissellement, de l'échelle du m² jusqu'à la parcelle. Les dispositifs expérimentaux sont composés d'une cuve située à l'exutoire de la placette ; ils recueillent eau et charges solides après l'épisode pluvieux. Ils ont été décrits par MUTCHLER (1963). La fosse de GERLACH (GERLACH TROUGH, 1967 ; ROELS et JONKER, 1983) se compose d'une surface basale métallique insérée au niveau de l'horizon A du sol, associé à une cuve recueillant eau et sédiment (fig. II.1). Les dispositifs de GREGORY et WALLING (1973) sont composés d'un collecteur et de réservoirs mis bout à bout permettant de faire face à des averses plus conséquentes. Des dispositifs tels que le «multislot divisor» (MUTCHLER et YOUNG in KIRKBY et MORGAN, 1980) ou le «coshocton-type vane sampler» de PARSONS (in DE PLOEY et GABRIELS, 1980) permettent de fractionner le ruissellement et les charges solides associées, au cours de l'averse, grâce à l'installation de partiteurs d'eau entre le collecteur et le premier réservoir.

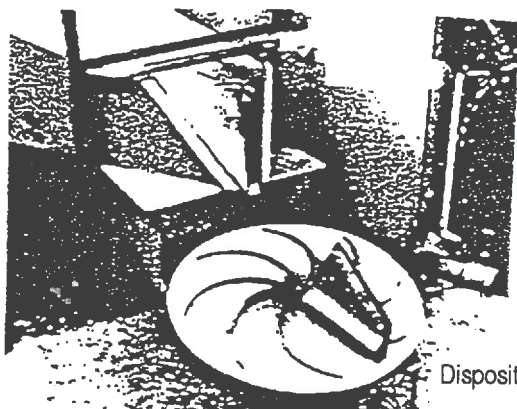
Les méthodes débitométriques sont des mesures dynamiques. Les flux d'eau et de charges solides qui sortent de la parcelle, sont enregistrés en continu. Elles permettent ainsi d'identifier le temps de transfert de l'eau et des éléments associés et de caractériser la vitesse des processus. Ces dispositifs de mesure se composent d'un déversoir calibré et d'un limnigraphe. Ce dispositif de base est parfois complété par un préleveur automatique pour la mesure des charges solides.



modification du dispositif ; l'avancée en métal est remplacé par une plateforme de béton



Dispositifs de Gregory et Walling



Dispositif de Mutchler et Young

figure II.1 : méthodes volumétriques

Ces méthodes restent limitées pour la connaissance des répartitions de flux à l'intérieur de la surface étudiée : les dispositifs utilisés sont trop lourds ou trop coûteux pour envisager leur spatialisation.

☞ Les méthodes ponctuelles fournissent des informations sur la répartition spatiale des processus de transfert le long du versant. Les mesures de ruissellement et d'érosion ne sont plus quantitatives mais qualitatives, voire semi-quantitatives (mesures les plus couramment employées). Elles caractérisent l'importance des processus en un point précis du versant et ne permettent pas d'établir un bilan par rapport à la superficie amont. Les points clés du versant sont définis, des relations entre le ruissellement, l'érosion et la topographie du versant : longueur, pente et forme du versant. Elles permettent de comprendre les effets d'échelle observés.

L'emploi des marqueurs a permis de suivre le déplacement des particules dans le temps et dans l'espace. LEOPOLD et al (1967) ont utilisé de simples pierres peintes afin d'observer le déplacement de débris grossiers sur pente. KIRKBY (1974) utilise une méthode identique basée sur une ligne peinte («*painted erosion line method*»). Les sables radioactifs marqués au scandium 46 (DE PLOEY, 1969) et des sables fluorescents (LEOPOLD et al, 1966) permettent de suivre des sédiments. De nombreuses études (BROWN et al, 1981 ; PENNOCK et JONG, 1990 ; QUINE et WALLING, 1993 ; QUINE et al, 1994 ; SUTHERLAND, 1994) utilisent le Cs 137 pour faire un bilan de la redistribution des sédiments le long du versant. De même, PARSONS et al (1993) utilisent le magnétisme de certains éléments.

Afin de recueillir le long d'une pente, l'eau de ruissellement, WENDT et al (1986), WILLIAMS et BONNELL (1986) ont tenté d'installer des instruments en chaîne mais qui restent difficilement «*spatialisables*» (en grand nombre, pour éviter une réponse binaire, ruissellement - pas ruissellement). MATHIER et ROY (1986) ont placé huit dispositifs à différentes longueurs de pente le long du versant, recueillant eaux ruisselées et sédiments, sur une parcelle d'environ 10 000 m². CHEVALLIER et PLANCHON (1993) décrivent l'utilisation de mini-pièges pour l'observation de ruissellement diffus en domaine tropical humide.

La méthode utilisée dans cette étude trouve sa place dans cette catégorie de méthodes ponctuelles. L'utilisation d'un grand nombre de dispositifs a permis d'aborder la distribution spatiale des flux d'eau de surface et de particules. Notre choix méthodologique a été guidé par l'objectif du travail, portant sur la caractérisation spatiale et temporelle du ruissellement et de l'érosion diffuse à l'échelle du versant.

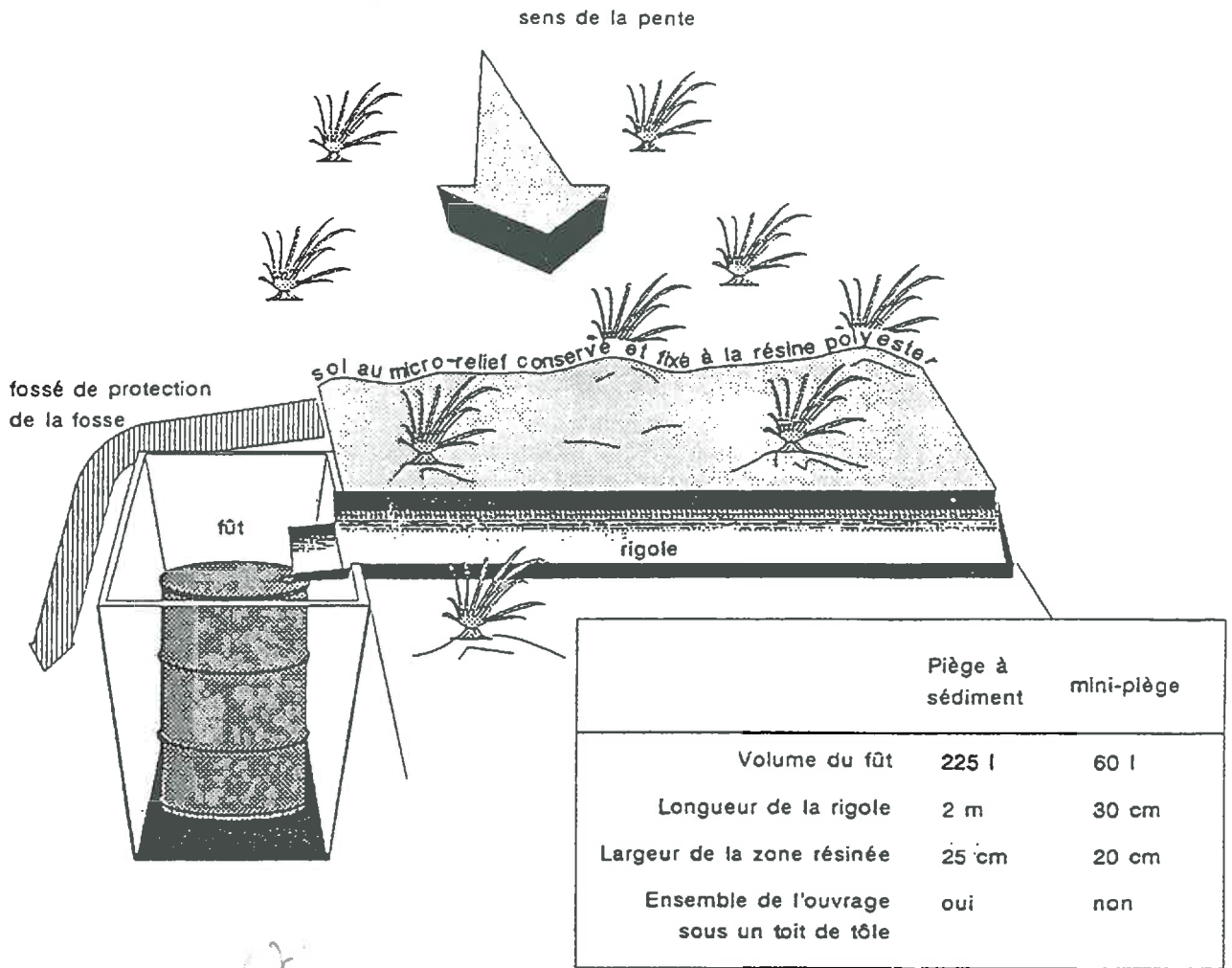


Fig II.2

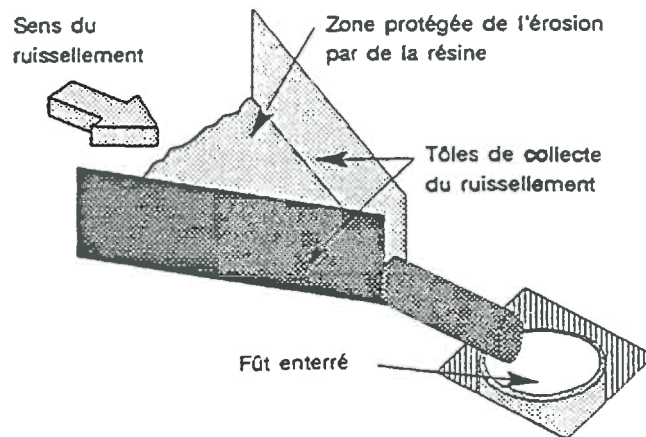


Fig II.3

1.2. Présentation du dispositif

Planchon (1991) a proposé l'installation de dispositifs en différents points du versant, en milieu tropical humide. Il les nomme mini-pièges car ils sont de petite taille. Les minipièges sont composés d'une rigole perpendiculaire à la pente qui se déverse dans un fût (fig. II.2, PLANCHON 1991). La présence de la fosse à une même hauteur que la rigole perturbe la mesure (PLANCHON, 1991). ASSELINE (1990) propose un dispositif qui pallie cet inconvénient (fig. II.3). Le dispositif utilisé s'appuie sur ce schéma.

Il est composé d'une surface triangulaire de collecte des eaux de ruissellement. Cette surface est délimitée par deux plaques de PVC fixées sur une base de gouttière. L'ensemble se prolonge par un tube à base rectangulaire vers un fût enterré au $\frac{3}{4}$ (fig. II.4). La surface de collecte est un triangle isocèle de 70 centimètres de large, soit l'équivalent de la largeur d'un inter-rang de maïs. La longueur du tube à base carrée est de 50 centimètres de long. Le premier fût totalisateur utilisé en 1993 avait une capacité volumique de 25 litres. Cette capacité est apparue insuffisante pour qu'il ne se produise pas de débordements trop fréquents. En 1994-1995, le volume des fûts totalisateurs a été porté à 60 litres.

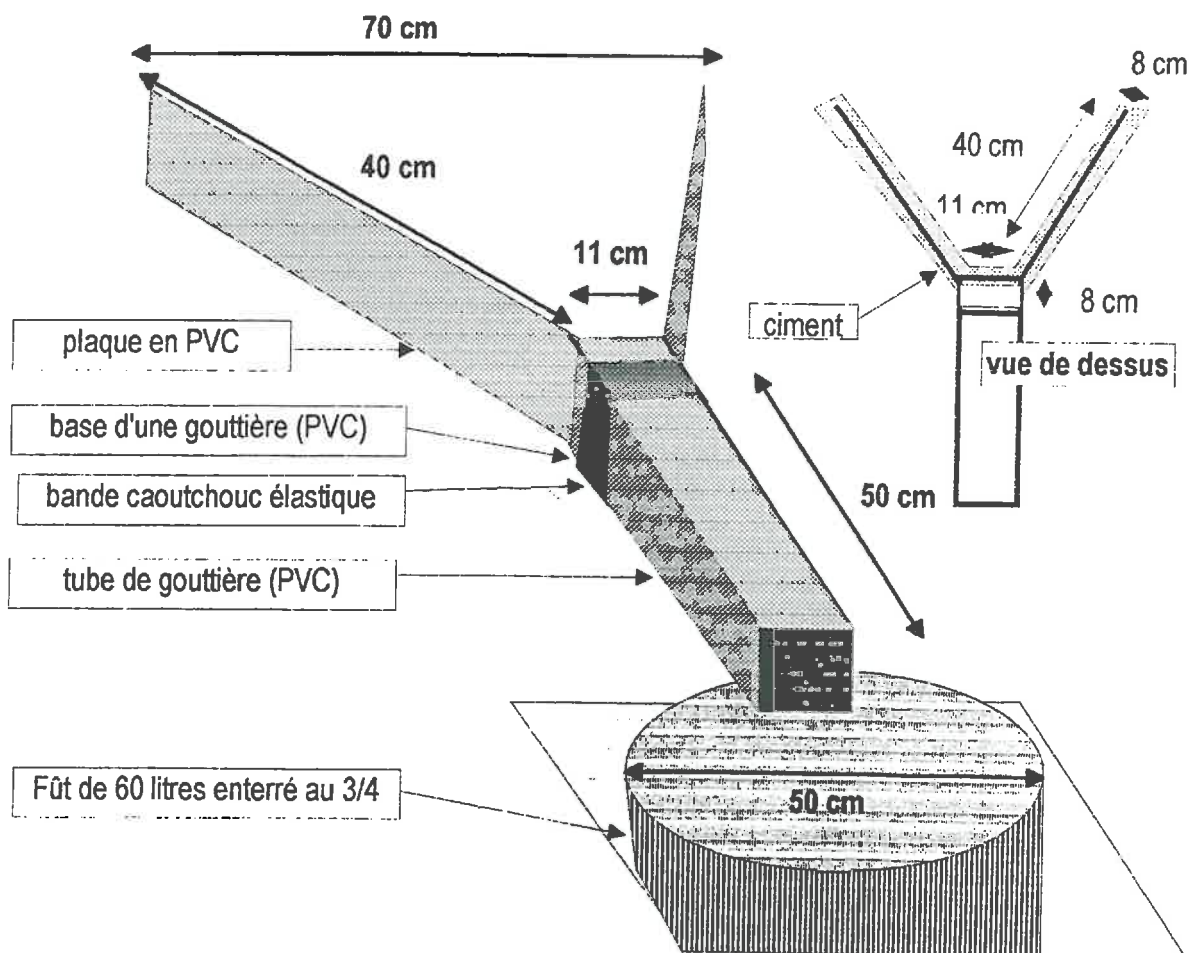


Figure II.4 : schéma du dispositif de recueil des eaux de ruissellement et de charges solides

Le dispositif est fixé au sol au niveau des plaques et d'une partie de la base de la gouttière par du ciment (nivellit) recouvert de résine. Cette surface de sol imperméabilisée mesure 1 cm de large et 40 cm de long à la base de chacune des plaques ; elle représente 69 cm² au maximum. Si la hauteur d'une pluie est de 20 mm (averse importante dans le Massif Armoricain), le volume recueilli lié à la surface imperméabilisée (ciment - résine) est de 0.138 litre. La conception de ce dispositif s'est faite avec la collaboration ingénieuse de F. GARNIER et l'aide de G. DUTIN (INRA Science du sol, Rennes).

La mesure du flux au cours de l'averse est estimée en modifiant légèrement le dispositif. Une sonde est placée dans le fût totalisateur et enregistre à un pas de temps de l'ordre de la minute, la montée de l'eau de ruissellement dans le fût, au cours de l'averse. La hauteur de l'averse est enregistrée simultanément, au même pas de temps (la minute) (fig. II.5). De même, la conception du dispositif s'est faite avec la collaboration de F. GARNIER.

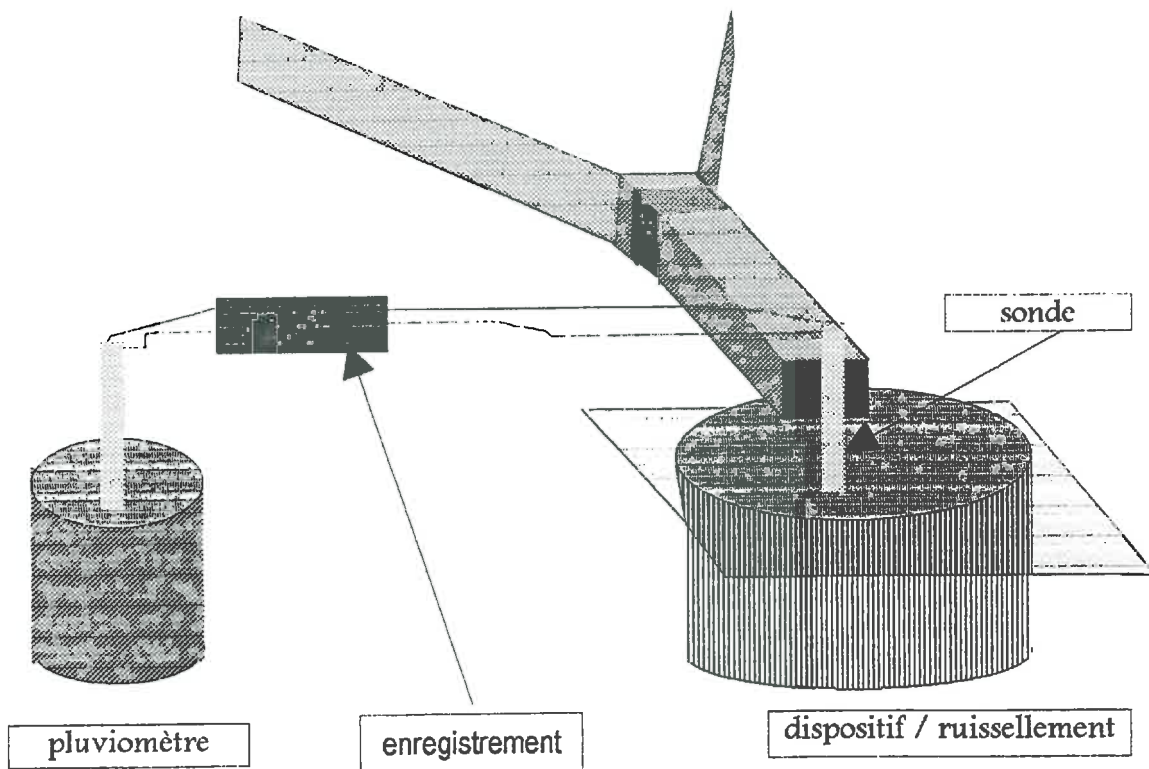


Figure II.5 : schéma du dispositif d'enregistrement du ruissellement et de la pluie au pas de temps de la minute

Une série de 3 dispositifs est installée à un même niveau de pente, afin d'apprécier la variabilité du ruissellement d'un inter-rang à l'autre. Ces séries de 3 dispositifs sont répétées régulièrement à différents niveaux de pente (fig. II.6). On peut ainsi apprécier la variabilité du ruissellement selon la pente, le long du versant, et pour un même niveau de pente. Le choix de la position du dispositif dans le versant est guidé par la forme de la

penne. Les états de surface du sol fixent le choix de l'inter-rang où localement le ruissellement semble le plus important. Les objectifs et les contraintes de l'étude fixent le nombre de dispositifs.

Après chaque événement pluvieux (averse ou train d'averse), le volume d'eau est relevé, dans la limite de contenance du fût totalisateur. Un aliquote (250 ml) d'eau et de charges solides est prélevé après homogénéisation de l'ensemble, dans le fût.

☞ L'interprétation peut se faire alors :

- selon la «méthode PLANCHON», d'une analyse ternaire (PLANCHON,1991) :

- ① le dispositif est vide. Il n'y a pas de ruissellement ;
- ② le dispositif est plein. Le ruissellement est local ;
- ③ le dispositif est débordé. Le ruissellement est généralisé.

Cette analyse revient à utiliser les dispositifs comme détecteur d'écoulement en surface et à observer l'importance du processus. Les résultats sont interprétés par averse et par position de pente. On considère, ici, la variabilité à l'intérieur du versant à partir des répétitions. Les données sont qualitatives.

- selon la «méthode Rennaise», d'une analyse semi-quantitative :

l'aire contributive amont est estimée au regard des états de surface et de la microtopographie ; sur une parcelle cultivée dans le sens de la pente, les rangs de culture forment un microrelief de 7 à 8 centimètres au-dessus de la pente (GASCUEL-ODOUX & al, 1996) ; si la lame d'eau n'excède pas cette hauteur, seul l'inter-rang connecté au dispositif constitue l'aire contributive amont du dispositif. Au cours des années d'étude, ce microrelief n'a jamais été totalement détruit et les connexions entre inter-rangs ont été liées au passage de l'engin agricole, au cours des travaux culturaux ; on peut considérer que ces connexions sont absentes avant la récolte ; lors du chantier de récolte, certaines se créent, tout en restant peu nombreuses.

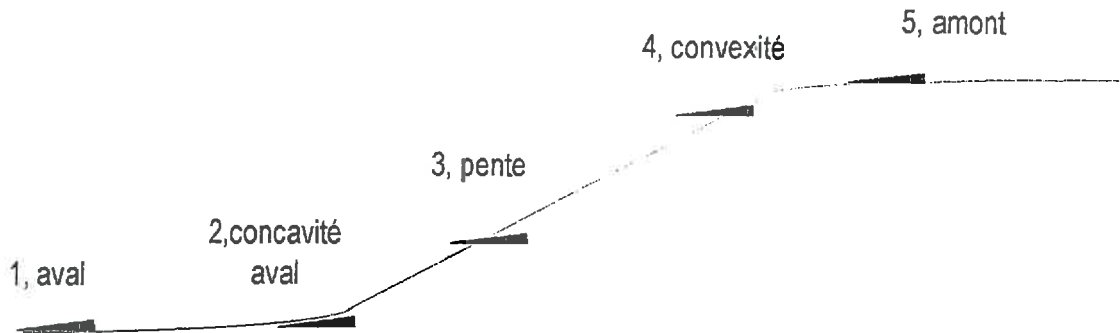
☞ En définitive, cet ensemble de collecteurs des eaux de surface peut être considéré

comme un seul dispositif multi-échelle par rapport à la topographie. L'interprétation des résultats se fait sur l'ensemble des dispositifs installés en grand nombre.

Dans le cas d'un versant naturel, «Une batterie de mini-pièges disséminés dans le versant doit être considérée comme un seul instrument de mesure qui fournit des informations à l'échelle d'étude du versant» (PLANCHON, 1991).

Dans le cas d'un versant agricole, le nombre de dispositif doit permettre de couvrir les différentes morphologies de pente pour apprécier l'importance du ruissellement à l'échelle du versant mais également de prendre en compte les différents états de surface.

A. 5 points d'emplacement le long de la pente à partir de la topographie



B. répétition dans l'espace pour mesurer la variabilité du ruissellement diffus

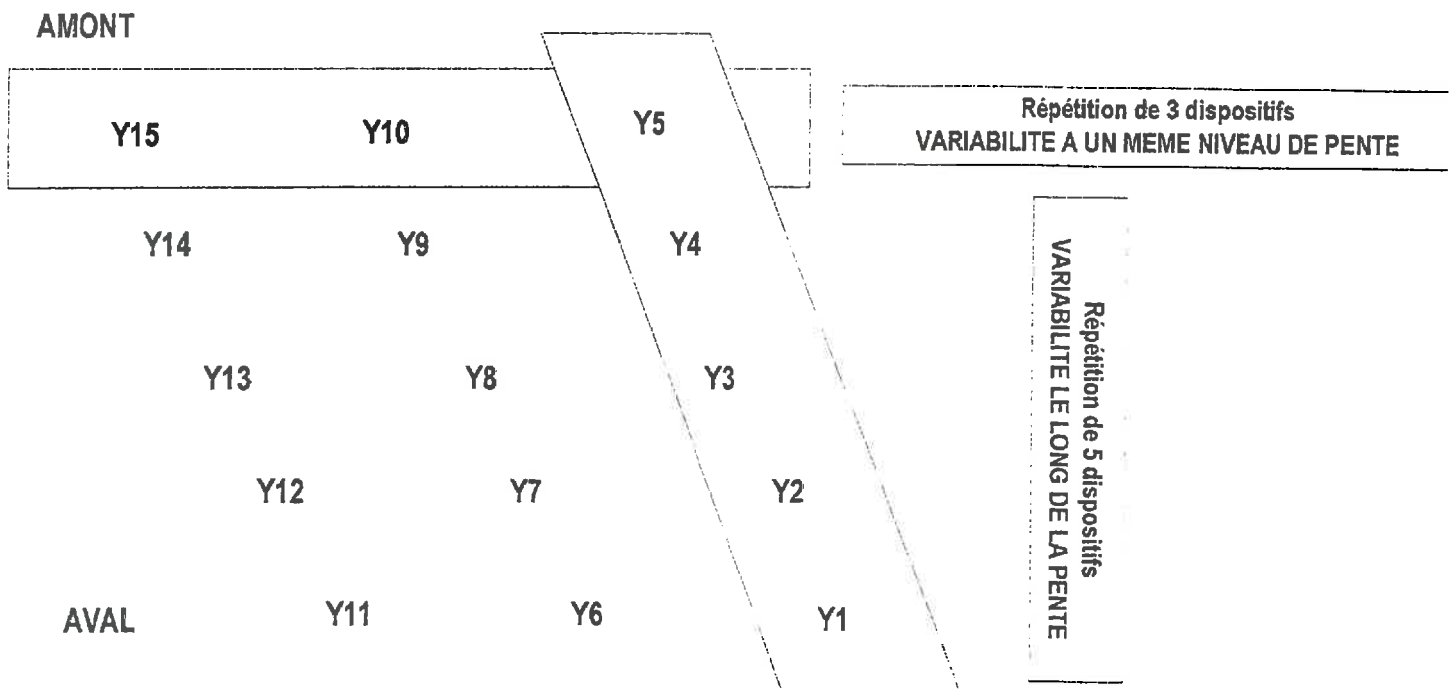


Figure II.6 : schéma de l'utilisation des dispositifs de recueil des eaux de ruissellement

1.3. Discussion sur le dispositif et les données recueillies

L'utilisation d'une méthode ou d'un instrument de mesure nécessite de préciser la qualité et les limites de l'instrument ainsi que la précision des mesures. On définit ainsi les possibilités d'analyse du processus à partir d'une discussion sur les données brutes recueillies.

1.3.1. Informations qualitatives ou quantitatives

La conception des dispositifs doit tenir compte des contraintes du milieu. La largeur de la surface de collecte est fixée en fonction du micro-relief et de la structure du semis. Ils déterminent les chemins d'eau de surface et leur organisation. Sur parcelle agricole, les inter-rangs de culture forment des micro-rigoles naturelles qui canalisent l'eau.

Le volume du fût totalisateur est estimé en fonction des volumes escomptés :

* Si le milieu n'est pas favorable au ruissellement, avec des débordements de fût peu fréquents, la méthode fournit des valeurs quantitatives ;

* Si le milieu est favorable au ruissellement, l'information recueillie est qualitative ou semi quantitative ; il est nécessaire de déterminer le volume à partir duquel on considère le ruissellement généralisé, soit un ruissellement sur l'ensemble du versant.

1.3.2. Capacité volumique du fût totalisateur

Les données recueillies sont des volumes ruisselés et des concentrations en charge solide jusqu'au débordement des fûts totalisateurs.

* Si le fût totalisateur ne déborde pas.

Les mesures d'eau sont quantitatives (litres) et sont rapportées à la zone contributive amont du dispositif, égale au produit de la largeur de la micro-rigole par sa longueur (fig. II.7). L'erreur sur le volume d'eau est liée à la lecture du dispositif. Pour les petits volumes, un bécher est placé à l'intérieur du fût et permet de limiter cette erreur à un volume $\mp 0,05$ litres, soit une erreur au plus de 10%.

Les volumes inférieurs à 1 litre sont considérés comme des non-ruissellements.

Pour les volumes compris entre 5 et 60 litres, l'erreur est de $\mp 0,5$ litres, soit aussi, une erreur de 10% au plus. Ces erreurs sont faibles.

Les mesures par aliquote des charges solides sont analysées dans le chapitre V.

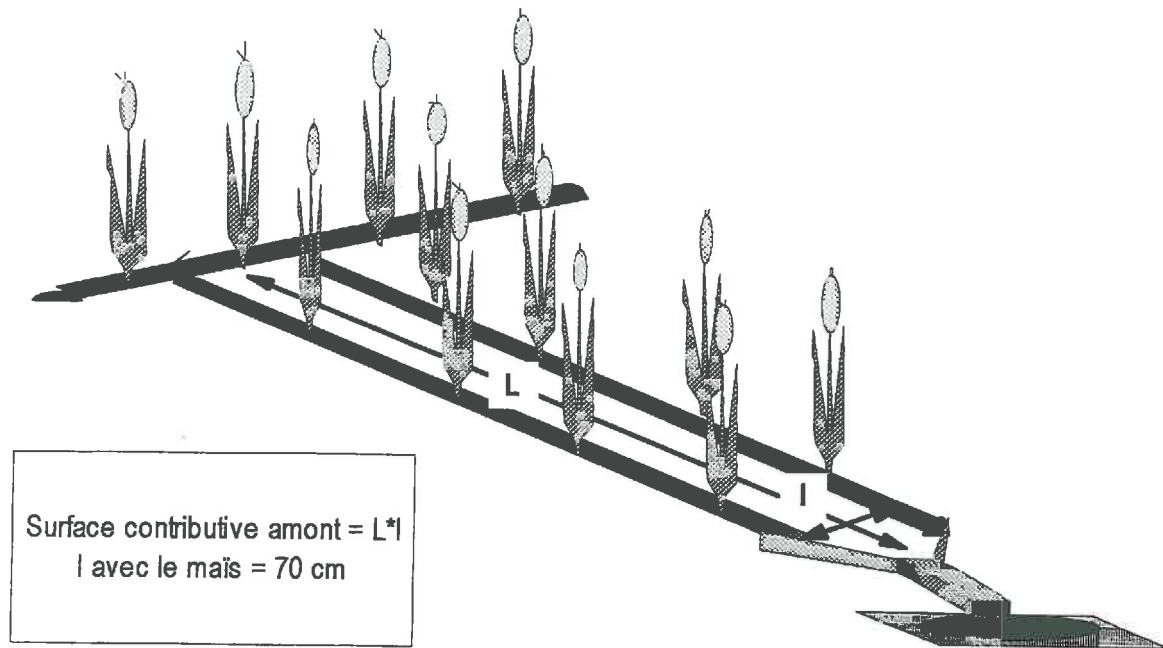


Figure II.7 : schéma de la définition de la zone contributive amont du dispositif

* si le fût totalisateur déborde

La mesure est alors qualitative et correspond au dépassement d'un seuil fixé par le volume du fût (ici, 60 litres). La mesure correspond à un ruissellement important au point de mesure. Lorsque le dispositif déborde, une partie de l'eau ruisselée et une partie des charges solides ne sont pas recueillies et ne sont pas appréciées quantitativement (chapitre V).

1.3.3. Traitement des données

Les résultats des dispositifs de recueil des eaux de ruissellement ne peuvent être comparés que s'ils sont implantés dans des zones comparables vis à vis de la structure du ruissellement. Bien que les données soient entachées d'une grande variabilité, elles peuvent permettre des comparaisons d'un dispositif à l'autre, soit pour un même niveau de pente,

soit à différents niveaux de pente en les rapportant à l'aire contributive amont de chaque dispositif.

Dans le cas général, ces données ne permettent pas de calculer des coefficients de ruissellement sans émettre des hypothèses sur le chemin de l'eau. Elles ne permettent pas non plus d'établir des bilans de ruissellement puisque la surface contributive amont est mal définie (cas de PLANCHON).

Dans le cas d'un micro-relief dans le sens de la pente, définissant bien les aires contributives amont, ces limites sont en partie levées et conduisent à des données originales, impossible à acquérir par les techniques classiquement mises en oeuvre.

1.3.4. Test des matériaux

Pour permettre des analyses d'anions et de cations dans l'eau de ruissellement, l'inertie chimique des matériaux utilisés a été testée. Ces tests ont été réalisés in situ et au laboratoire (CAYOT, 1993) (annexe 1a).

Deux passages d'eau distillée, l'un rapide et l'autre lent, à partir de l'entonnoir de collecte des eaux indiquent une contamination si le ciment est en contact direct avec l'eau. Au contraire, si le ciment est recouvert de résine, cette contamination est nulle.

Au laboratoire, l'évolution des deux matériaux immergés dans l'eau distillée a été testée. Deux lames de verre recouvertes, l'une du ciment (nivellit), l'autre de résine sont placées dans l'eau distillée, après séchage. Les conductivités électriques de chacune des deux eaux ont été mesurées. Le ciment pollue rapidement l'eau, de manière non négligeable ; puis, la conductivité électrique se stabilise ; le ciment se désagrège totalement, au bout de 2 heures 30. La résine ne se dissout pas et ne pollue pas l'eau. L'analyse de cations et d'anions des solutions de trempage de la résine révèle de faibles concentrations. Les essais réalisés sur 5 mois consécutifs au maximum, au cours des différentes périodes (de 1993 à 1994), indiquent la nécessité de recouvrir le ciment situé au niveau de l'ancrage du dispositif par de la résine, en limitant la surface ainsi imperméabilisée au minimum. Le dispositif est alors stable malgré les phénomènes de retrait/gonflement du sol.

De même, le totalisateur de recueil des eaux a été testé. Il ne conduit à aucune pollution vis à vis des anions et cations analysés dans l'eau de ruissellement (annexe 1a). Ainsi l'ensemble du dispositif apparaît inerte vis à vis des éléments chimiques analysés (chapitre VI).

1.4 Installation des dispositifs au terrain

La conception des dispositifs doit tenir compte des contraintes du milieu.

- La largeur de la surface de collecte doit s'adapter aux états de surface, c'est à dire aux caractéristiques du couvert végétal et au micro-relief, facteurs importants des chemins du ruissellement.
- La grandeur du fût totalisateur est en relation avec l'intensité des phénomènes de ruissellement.
- La localisation des dispositifs dans la zone d'étude s'effectue en fonction de la forme de la pente, en privilégiant les sites où localement le ruissellement semble important du fait du micro-relief et des états de surface. Dans le cas d'une culture implantée dans le sens de la pente, ils sont installés sur les inter-rangs les plus tassés, et donc, éventuellement les plus sensibles au ruissellement.
- La surface de collecte doit être protégée par la résine lorsque la formation d'incision est probable, au risque de conduire à une discontinuité entre cette surface et le dispositif. Cependant dans le contexte de l'étude, il a semblé préférable de ne pas recouvrir cette surface par de la résine ; des phases successives de gonflement et de retrait du sol et une forte activité biologique sont fréquemment observées. Des essais ont montré par ailleurs que la résine peut aisément se décoller du sol, au cours du temps (échelle de la saison), ce quel que soient les différents types de résine utilisés.
- Les dispositifs sont installés de façon à ne pas créer d'interception des aires contributives, les unes par rapport aux autres. Dans le cas d'une culture dans le sens de la pente, il est facile de choisir des inter-rangs bien distincts.
- Lors de l'installation, les inter-rangs nécessaires au passage ultérieur d'engins, pour des traitements phytosanitaires par exemple, sont évités de façon à ne pas avoir à déplacer les dispositifs. La hauteur du dispositif ne gêne pas, le passage des rampes de traitement. Ces rampes sont par ailleurs relativement larges et seul un petit nombre d'inter-rang est requi pour ces opérations.

2. SITES D'ETUDE

Les trois parcelles choisies présente un profil de pente convexo-concave. La topographie est un des facteurs privilégiés de l'analyse spatiale des données (chapitre I). Le site de Rennes correspond à la parcelle de Champs-Noël. Son suivi expérimental est régulier car cette parcelle est géographiquement proche du laboratoire. C'est la parcelle de référence de l'étude. Les deux autres parcelles sont situées sur le bassin versant du Coët Dan, englobant la commune de Naizin, aux lieux dits de Kerjos et Tocplouz.

2.1. Site de Rennes

2.1.1. Choix du site

Une situation physiquement et agronomiquement sensible au ruissellement, tout en restant représentative du contexte armoricain, a été recherchée.

Les critères de choix ont été, par ordre d'importance, les suivants :

1. une topographie de forme convexo-concave, topographie largement représentée dans le contexte armoricain ; celle-ci intervient surtout par trois facteurs, l'angle, la longueur et la forme de la pente, qui jouent un rôle évident dans les processus de ruissellement et d'érosion ;
2. la position dans le versant ; dans le contexte de l'étude, l'hydromorphie des sols est fortement liée à la situation par rapport au cours d'eau (WALTER et al, 1995). Selon la position des différents sites expérimentaux sur le versant, la genèse du ruissellement selon les formes de la pente pourront ne pas concorder ; il semble alors important de prendre en compte des situations de versant peu ou non hydromorphes et des situations comportant une hydromorphie aval et allant jusqu'au ruisseau ;
3. la culture de maïs ; le risque élevé d'érosion apparaît avec les cultures sarclées de type maïs, betterave, pommes de terre, soja, tabac ou tournesol (MOSIMANN, 1991) ;
4. un sol limoneux brun, relativement pauvre en matière organique par rapport au contexte armoricain ; ce sont des sols bien représentés dans le bassin de Rennes ;
5. une grande proximité entre le laboratoire et une parcelle, permettant un suivi régulier et précis des transferts de surface, et un accès à l'historique et à la conduite de la culture ; une parcelle du domaine de l'INRA a été ainsi retenue ; elle permet :
 - un suivi cultural régulier ; les travaux (labour, semis, traitement) et les précédents culturaux sont connus ;

- une récupération des eaux après chaque averse ;

Une parcelle de versant,, relativement homogène d'un point de vue pédologique, a été choisie. Ce site ne présente ni rigoles ou ni ravines. Ce premier site est situé à l'amont du bassin tertiaire de Rennes (carte géologique, Rennes au 1/80 000, 3^{ème} édition), sur le domaine expérimental de l'INRA (Bretagne, France) (fig. II.8, parcelle A). Sur ce site, de nombreuses données ont été acquises et un suivi de toutes les averses durant plus d'une année a été réalisé.

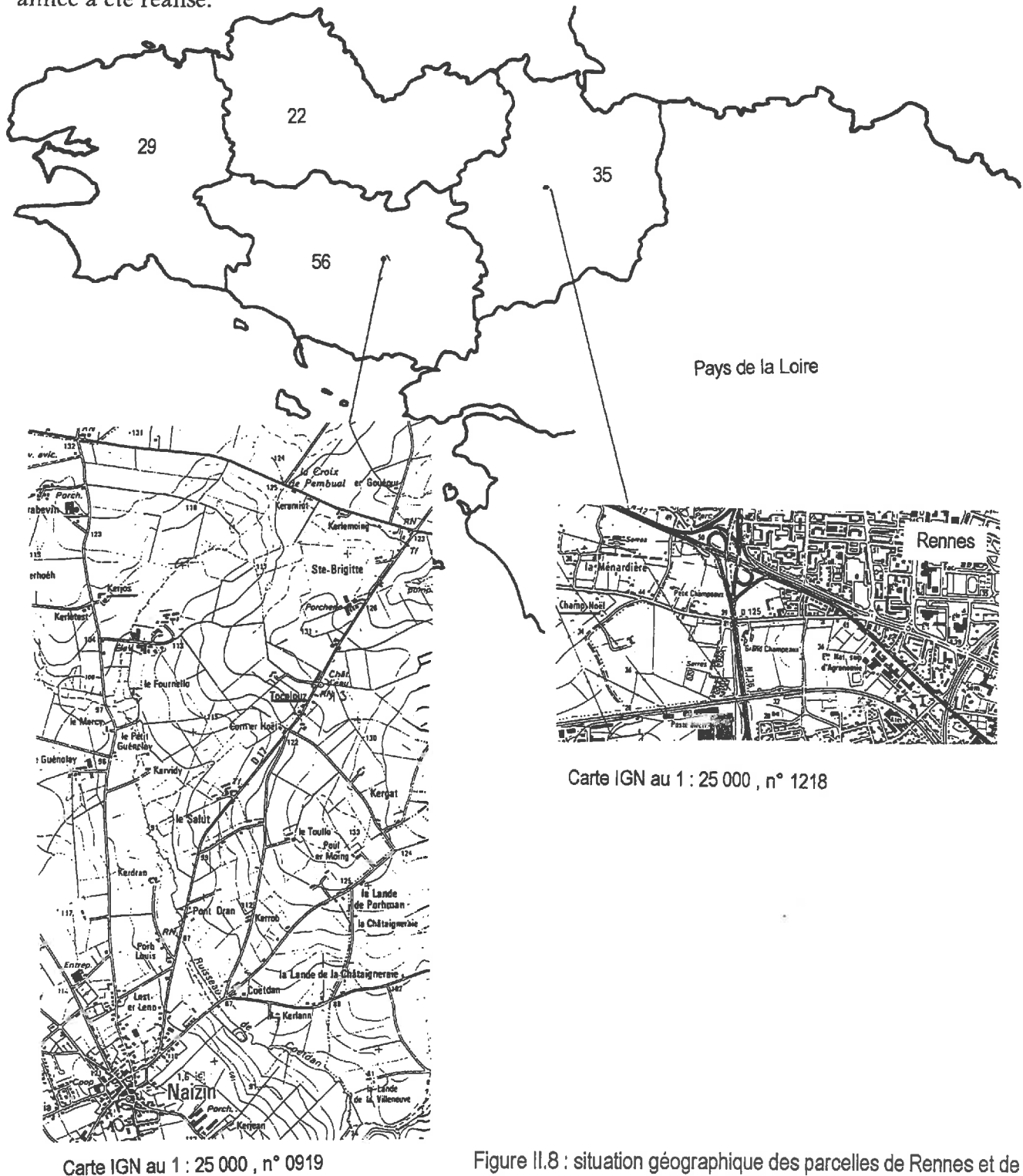


Figure II.8 : situation géographique des parcelles de Rennes et de Naiz

2.1.2. Caractéristiques du site

2.1.2.a. La topographie

La parcelle présente une pente moyenne de 4,5 % sur 200 mètres qui évolue progressivement vers l'aval, sur 50 mètres, vers une valeur de 1,5 % (fig. II.9). On distingue ainsi 2 points clés : la convexité amont sépare le plateau, du versant rectiligne de pente maximum ; la concavité aval sépare le versant, du replat aval. Cette topographie a été établie avec un théodolite WILD T1000 ou tachéomètre électronique. La précision de mesure sur la distance est de 3 mm, la précision sur l'angle de 3'', la portée étant de 4 km. Un distomat placé sur le théodolite permet la visée jusqu'au réflecteur (THIERSAULT & RODRIGUEZ LADO, 1994). Pour établir la topographie de la parcelle, le théodolite a été placé au point le plus bas et n'a jamais été déplacé.

2.1.2.b. La pédologie

Le substrat géologique est le schiste Briovérien. Il s'étend sur la feuille de Rennes en un vaste plateau sous forme d'une longue voûte anticlinale, limitée par des bandes synclinales (carte géologique de Rennes au 1/80.000, 3^{ème} édition). La parcelle se situe dans une zone cartographiée en sables glauconieux datant du pliocène, rouges par oxydation, argileux (lentilles plus ou moins bien étendues). Vers les sommets peuvent apparaître des lits de graviers et de galets parfois considérés comme des «alluvions anciennes» (carte géologique de Rennes au 1/80.000, 3^{ème} édition). Sous cette formation du pliocène se retrouve le schiste Briovérien.

Deux transects pédologiques (fig. II.10) ont été effectués de l'amont de la parcelle jusqu'au replat aval (fig. II.9). L'ensemble des horizons ont été inventoriés et cartographiés. Le premier transect (T1), situé sur le bord de la parcelle et long de 270 mètres, comprend 15 points de sondages, espacés d'environ 20 mètres les uns des autres. Le deuxième transect (T2), long de 290 mètres, situé au centre de la parcelle comprend 25 points de sondage espacés de 20 mètres au maximum et de 2,5 mètres au minimum. Les limites d'horizon ont été précisées en réduisant jusqu'à 2,5 mètres l'espace entre les sondages. Chaque point de sondage est détaillé en annexe 1b. Une fosse pédologique du plateau (fig. II.11) a été décrite.

Le sol de cette parcelle est relativement homogène d'un point de vue morphologique. C'est un sol brun très faiblement lessivé. L'hydromorphie indiquée dans la légende correspond à des tâches d'hydromorphie observées soit à la base de l'horizon labouré, en relation avec une semelle de labour, soit à la transition des horizons éluvial et

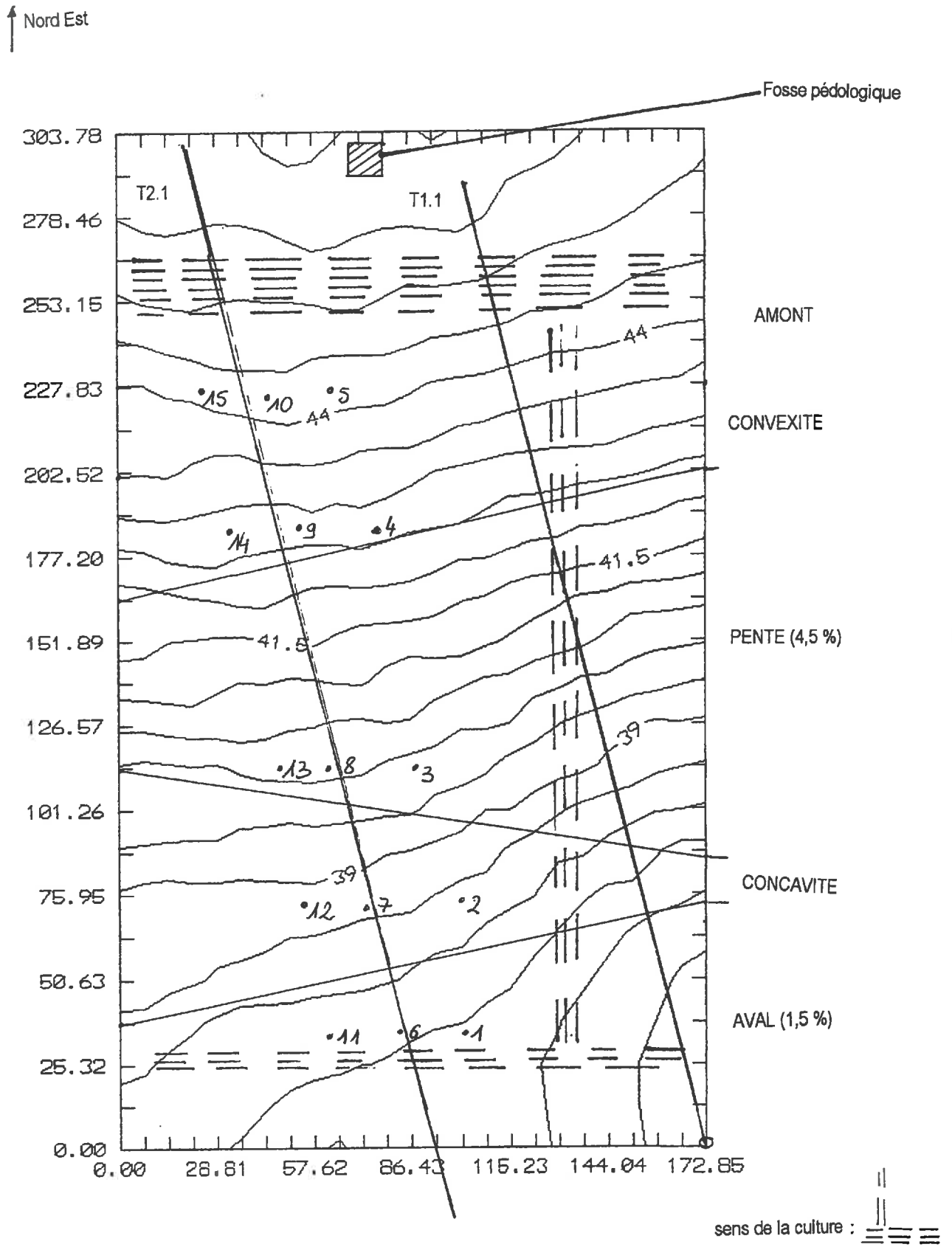


Figure II.9 : topographie de la parcelle de Rennes ; position des transects pédologiques et de la fosse pédologique ; sens de la culture

d'accumulation, soit au contact de l'altérite de schiste. Ces tâches sont liées à un engorgement temporaire. Elles sont probablement dues à une teneur en eau du sol élevée, au cours des mois les plus pluvieux, ou, indirectement, à des phénomènes de prise en masse réduisant la macroporosité du sol (HEDDADJ & al, 1995).

La parcelle est composée d'un versant «sain» et d'un aval faiblement hydromorphe (fig. II.10) : aucune tache d'hydromorphie n'apparaît au niveau de l'horizon de labour de l'amont à l'aval de la parcelle.

↳ Sur *le plateau*, (photo II.1 et fig. II.11), la fosse permet de distinguer 5 horizons. L'horizon de labour a une épaisseur de 30 centimètres. Il se subdivise en 3 : sur 12 cm, à partir de la surface, une structure polyédrique subanguleuse témoigne de la profondeur du déchaumage ; à la base de l'horizon La apparaît une semelle de labour de 4 à 5 centimètres d'épaisseur. Les racines qui traversent cet horizon de labour, se structurent en «arêtes de poisson», à la limite de la semelle de labour, ou empruntent les nombreux conduits de lombrics. Sous cet horizon La, se distingue un horizon de transition composé d'un niveau Eh et Ebt. Eh est enrichi en matière organique par rapport au Ebt. Ebt, d'une épaisseur de 10 ∓ 2 à 3 centimètres présente une limite floue et ondulée avec l'horizon sous-jacent Bt (horizon d'accumulation). L'épaisseur de cet horizon Bt varie entre 25 et 65 centimètres puisque l'altérite de schiste a une limite en forme de créneau. Ces figures de cryoturbation se retrouvent sur les parcelles environnantes où des fosses ont été creusées et pourraient se présenter sous forme de poches ou de chenaux (J.M. RIVIERE, communication orale). L'horizon Bt, de couleur sombre, a une structure prismatique. Il est ponctué de nombreux dépôts de coprolithes et de conduits d'origine biologique de type lombric. Le dernier horizon observé est l'altérite de schiste, de couleur bleutée, entaché de traces rouges.

↳ Au sein de la *pente rectiligne*, cinq horizons sont distingués : l'horizon de labour (La), un horizon éluvial (E), un horizon d'accumulation d'argile (Bt), un horizon de transition entre Bt et C (B/C) et l'horizon de schiste altéré voire d'altérite (Ct).

L'horizon de labour a une épaisseur constante de 30 centimètres. Cette limite ne semble cependant pas induite par un travail du sol actuel qui n'atteint pas cette profondeur, et semble donc à relier à des pratiques culturelles anciennes. La couleur est 10YR4/3. Une semelle de pseudo-labour apparaît à une profondeur de 12 centimètres et à sa base, l'existence d'une semelle de labour est constante. Quelques rares taches d'hydromorphie peuvent apparaître à ce niveau.

L'horizon éluvial E a une épaisseur variant de 15 centimètres en amont à 60 centimètres au niveau de pente maximum du transect T2. Il apparaît dès le plateau et se

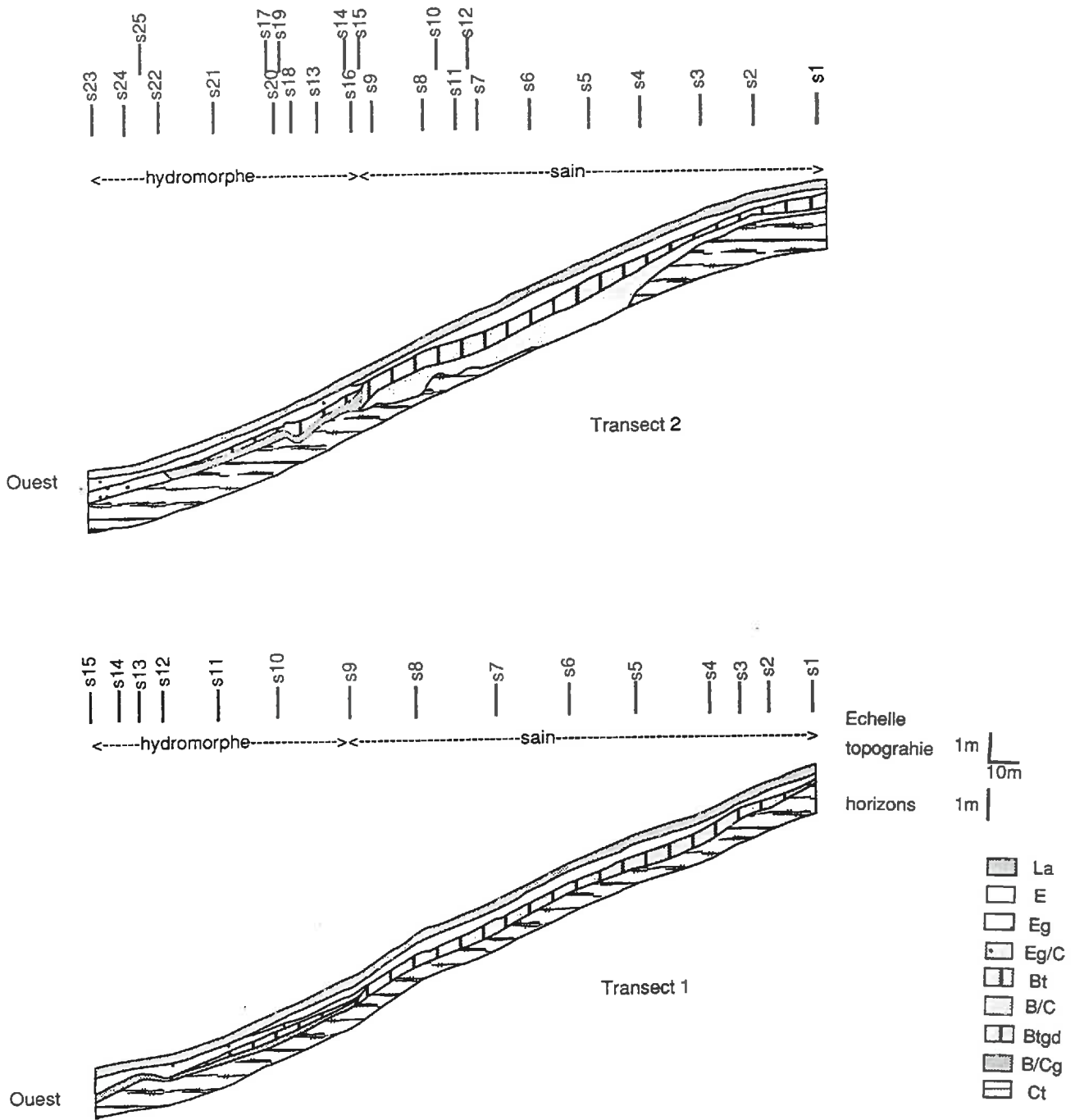


Figure II.10 : deux toposéquences pédologiques, Rennes

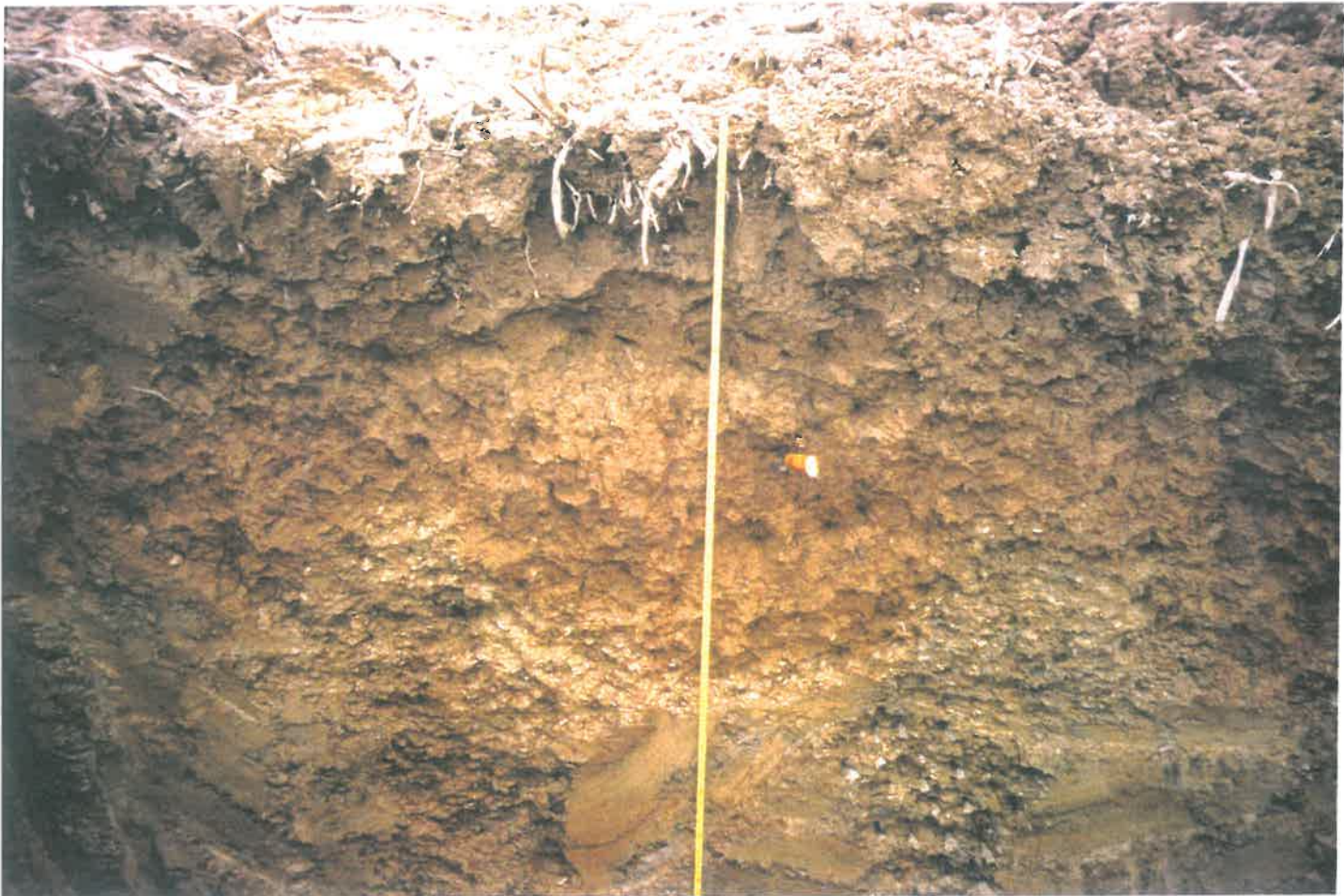
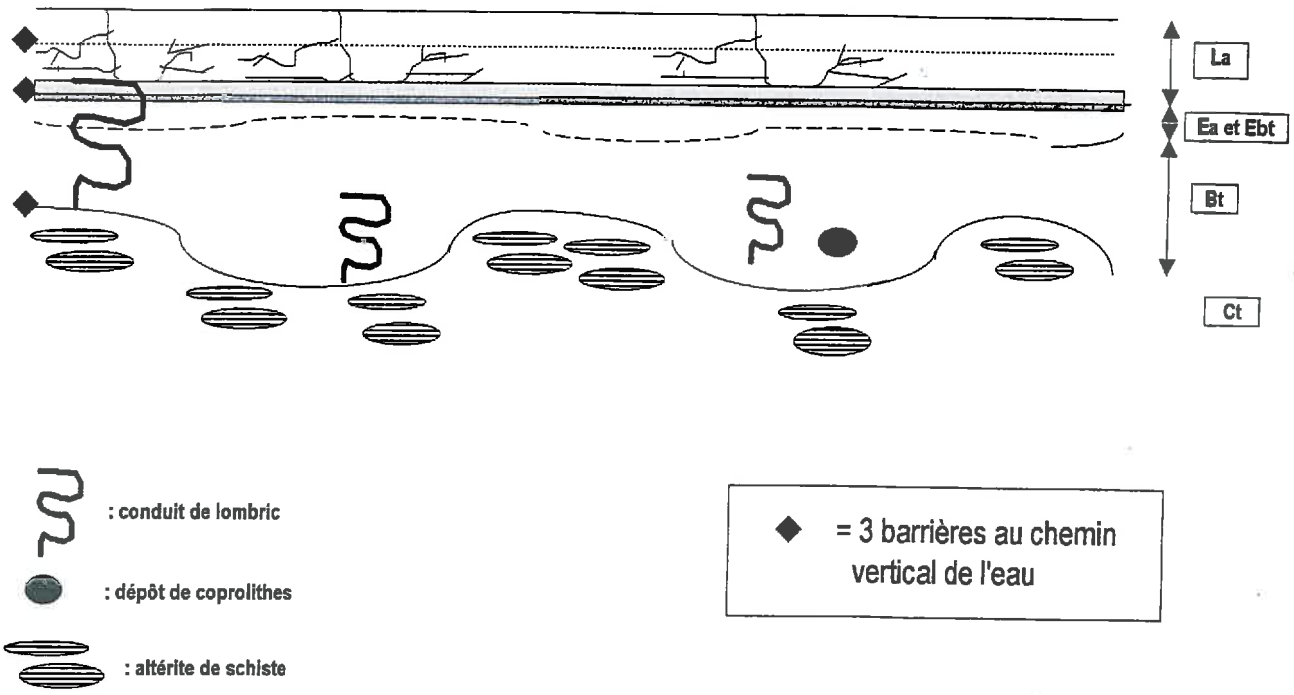


Figure II.11 et photo II.1 : schéma et photo de la fosse du plateau, Rennes.

poursuit jusqu'au point de concavité aval. Il présente parfois une légère accumulation d'argile à sa base accompagnée de taches d'hydromorphie.

L'horizon d'accumulation sous-jacent a une épaisseur très variable. Il contient, en plus ou moins grand nombre, du quartz. Il n'est pas rare de trouver des galets «roulés» (forme arrondie caractéristique) le long de la pente, au niveau du Bt. Ils proviennent du plateau où se situent des terrasses de galets et de graviers (pliocène).

La transition entre Bt et l'altérite de schiste est progressive. Cette transition est définie comme un horizon B/C. Son apparition est liée à la présence d'éléments de schiste, mais la limite Bt et B/C reste diffuse.

↳ L'aval de la parcelle est plus complexe. L'hydromorphie, faible, apparaît toujours sous l'horizon de labour. Au point de concavité, 5 horizons plus ou moins bien développés, selon la position des transects, sont dénombrés : L'horizon de labour, un horizon Eg, un horizon Btgd, un horizon B/Cg et le schiste altéré Ct. L'horizon Btgd n'apparaît qu'à ce niveau et n'est plus visible sur le replat aval. L'accentuation de l'hydromorphie apparaît donc au point de concavité. Au niveau du transect T2, les horizons Btgd et B/Cg disparaissent et un horizon Eg/C apparaît entre Eg et Ct sur le replat aval. L'effet de la haie qui borde la parcelle est visible au point de sondage numéro 23 (CURMI P., communication orale). Les horizons Eg et Eg/C s'épaississent.

2.1.2.c. Les caractéristiques physico-chimiques

Les trois zones, (1) convexité et pente rectiligne, (2) versant rectiligne, (3) concavité et replat aval, se distinguent nettement par leurs fractions granulométriques et leurs taux de matière organique (fig. II.12).

En surface, les taux de colloïdes minéraux (inférieurs à 2 µm) sont de 15% à l'aval, de 25% au niveau de la concavité et de 10% sur le versant.

Les valeurs de pourcentage en limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers sont proches pour les points de versant et de concavité. Le point aval est très légèrement différent.

Le taux de matière organique est très faible sur l'ensemble de la parcelle (entre 1 et 2%). L'aval est plus riche en matière organique (2%) que la concavité et le versant (1,5 %). Le pH eau évolue entre 6,7 et 7.

Dans le profil, les caractéristiques physico-chimiques du sol témoignent d'un très faible lessivage vertical en particules de taille argile, soit un E peu différencié.

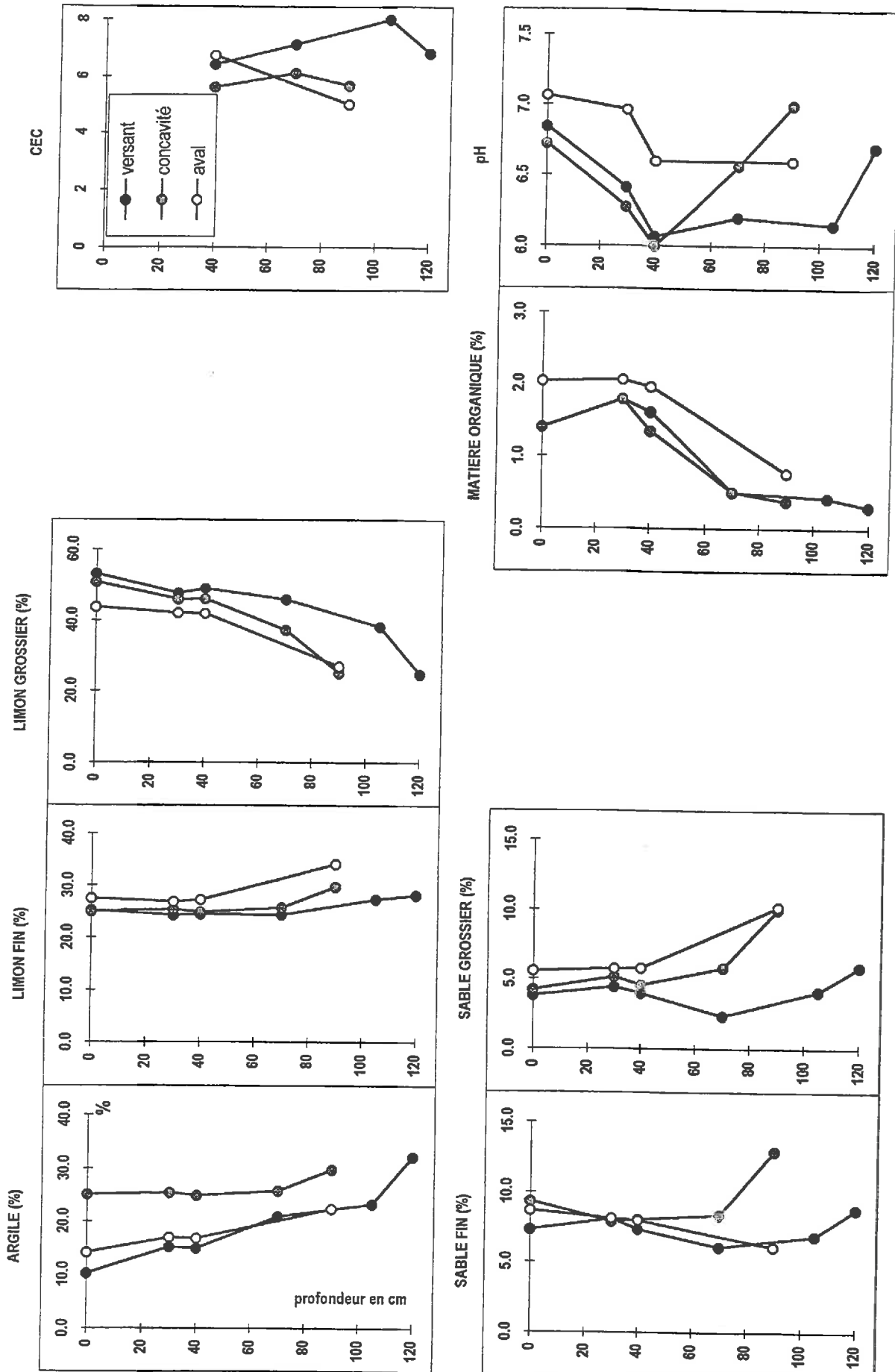
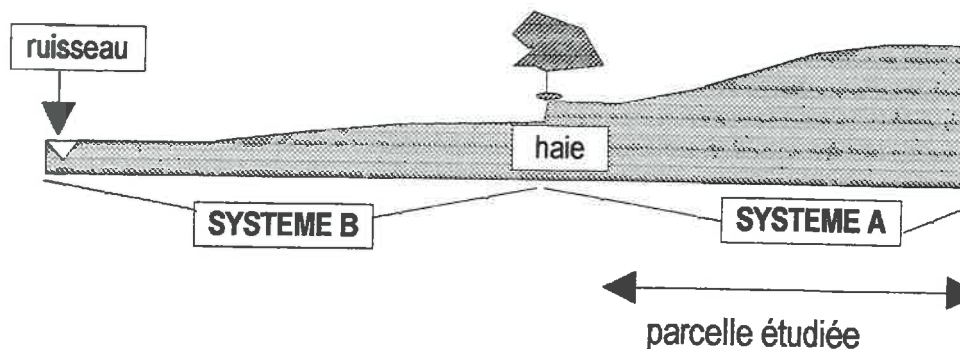


Figure II.12 : caractéristiques physico-chimiques du sol de la parcelle de Rennes ; en ordonnée, la profondeur en cm

Le faible taux de matière organique (inférieur à 2%) et le faible pourcentage de colloïdes minéraux indiquent que le sol est très battant sur le versant de la parcelle. La formule de REMY révisée par J.M. RIVIERE (annexe 1f) indique une forte battance sur l'ensemble de la parcelle. Les valeurs pour chacune des trois zones donnent respectivement de l'amont à l'aval : 3,2 ; 3,1 et 2,1. Lorsque IB est supérieur à 2, le sol est considéré comme très battant.

2.1.2.d. Discussion

Ces caractéristiques pédologiques et granulométriques conduisent à émettre quelques hypothèses quant aux chemins de l'eau à l'intérieur et en surface du sol (fig. II.11). Sur ces sols limoneux considérés comme bien drainants, l'infiltration verticale peut être affectée par 4 discontinuités structurales : la semelle de pseudo-labour à 12 centimètres ; la semelle de labour à 30 centimètres ; la limite E-Bt ; l'altérite de schiste. Une circulation latérale, intermittente, pourrait alors être favorisée sous pluie, lorsque le sol se sature. Par ailleurs, cette parcelle est à resituer dans le contexte bocager (chapitre I) : cette parcelle se termine en aval par une ancienne haie qu'il est difficile de dater, qui la déconnecte, au moins pour la surface, du système aval.



2.1.2.e. Historique cultural

La ferme et la route situées au bord de la parcelle ont été construites dans les années 50. La parcelle est cultivée par l'INRA depuis 1981. L'historique de la parcelle est donnée en annexe 1d.

L'année culturale 1993-1994 a débuté en mars 1993 par une culture de pois, récoltée le 11 août 1993. Une partie de la parcelle a été ensemencée en phacélie et une

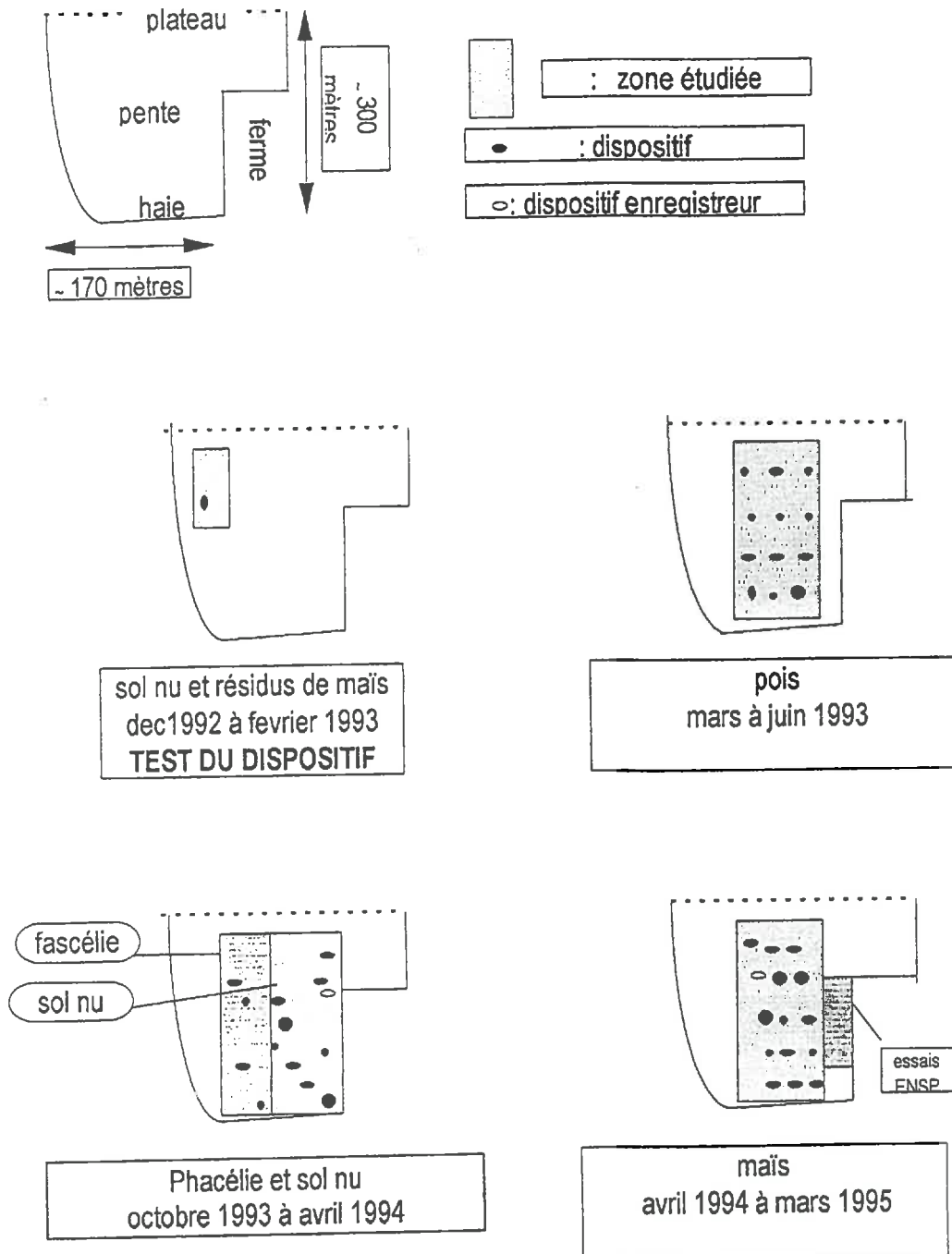


Figure II.13 : calendrier cultural ; Rennes

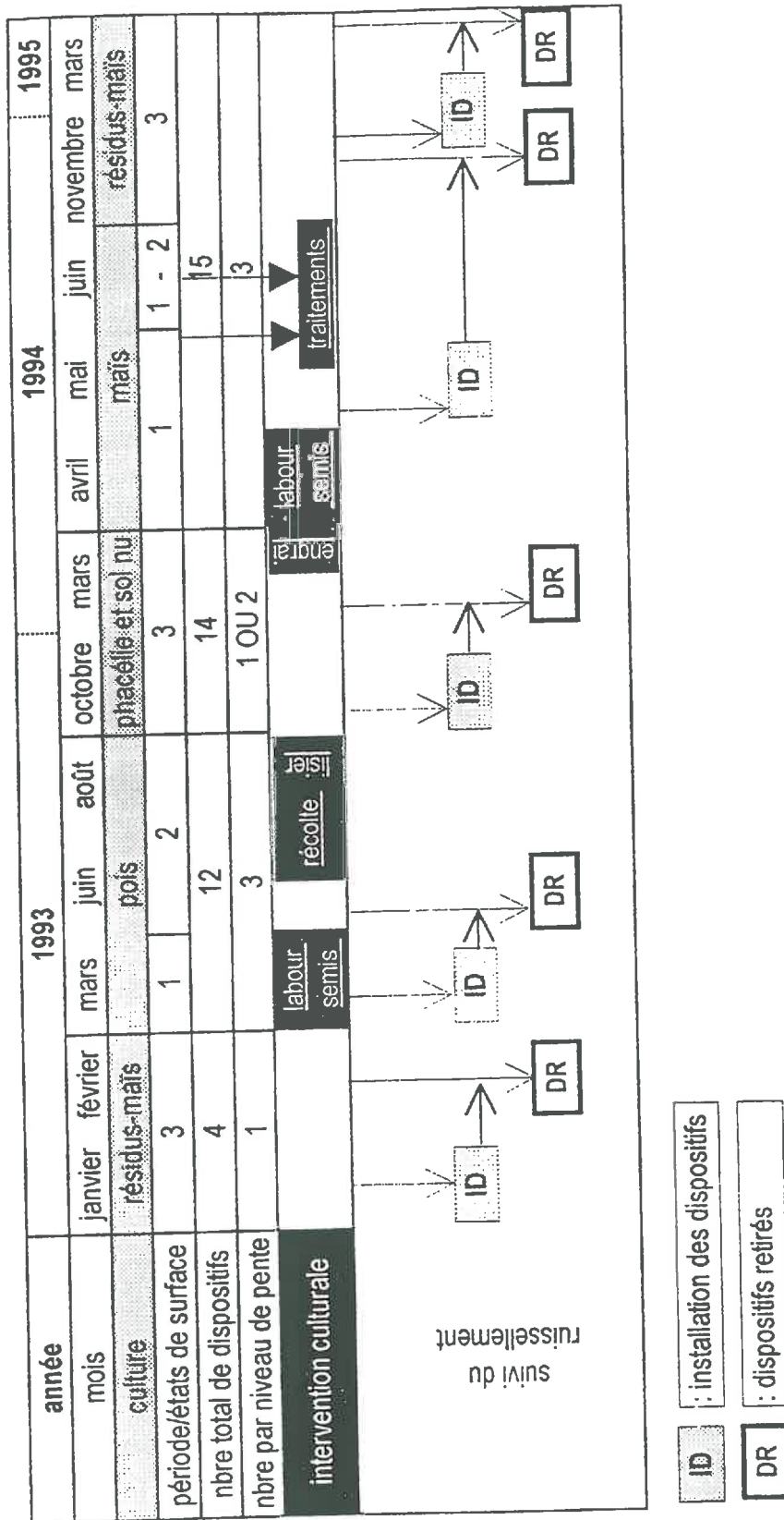


Figure II. 14 : conduite des cultures, Rennes

bande juxtaposée est restée *nue*, du début de l'hiver (*octobre 1993*) jusqu'au labour d'*avril 1994* (fig. II.13 et 14). Avant l'implantation du maïs, la parcelle a subi un amendement organique avec épandage du fumier le 30 janvier 1994 et le 21 avril 1994. L'enfouissement du fumier a eu lieu le 24 mars (cover-crop lourd 28 disques, profondeur de 10-15 cm). Les 12 et 26 avril 94, la parcelle a été labourée. La préparation du lit de semence et le semis du maïs ont été effectués le 27 avril 94 (profondeur du travail 15 cm). L'entretien de la culture a consisté en deux désherbages, le 30 mai et le 17 juin 1994.

La récolte du maïs a eu lieu le 4 novembre 1994 pour la moisson et le 21 novembre 1994 pour le broyage des tiges. L'ensemble de cette campagne est présenté sur la figure II.13 et II.14. Les dates d'installation des dispositifs, de leur démontage et les stades 1, 2 et 3 de l'état de surface sont également indiqués.

La description détaillée des états de surface du sol est présentée au chapitre III. L'existence ou non d'une couverture végétale et la présence ou non d'une croûte de battance permet de définir trois périodes qui étayeront l'analyse des résultats (chapitre IV, V, VI et VII).

- La première période (P1, «printemps») : la surface du sol est en partie rugueuse et composée de mottes ; la croûte structurale ou de dépôt ne couvre pas la totalité de la surface.
- La deuxième période (P2, «été») débute lorsque l'ensemble de la surface est encroûté, soit par une croûte structurale, soit par une croûte de dépôt. La culture est alors bien développée.
- Le troisième période (P3, «automne - hiver») commence avec la récolte de la culture. Une croûte de dépôt recouvre la majorité de la surface du sol. Le sol est nu ou recouvert par quelques résidus de récolte.

2.1.3. Précipitations lors des périodes étudiées

Les mesures sont toutes sous pluies naturelles. Les données sont recueillies par la station INRA, au Rheu. Cette station appartient au réseau agrométéo de l'INRA. Elles sont équipées de 11 capteurs : girouette, sondes de température et d'humidité, sonde d'humectation, pluviomètre, pyranomètre et anémomètre. Les enregistrements se font automatiquement, toutes les heures. Seules la hauteur et l'intensité moyenne horaire de la pluie ont été analysées.

L'année d'étude (1994-1995) s'est révélée excédentaire par rapport à une année moyenne (fig. II.15). Les 4 mois de juin, août, octobre et novembre, ont présenté un déficit en eau. Les averses les plus fréquentes ont des hauteurs comprises entre 1 et 5 mm et une intensité moyenne horaire inférieure à 4 mm/h. Les événements de faible intensité sont les plus nombreux.

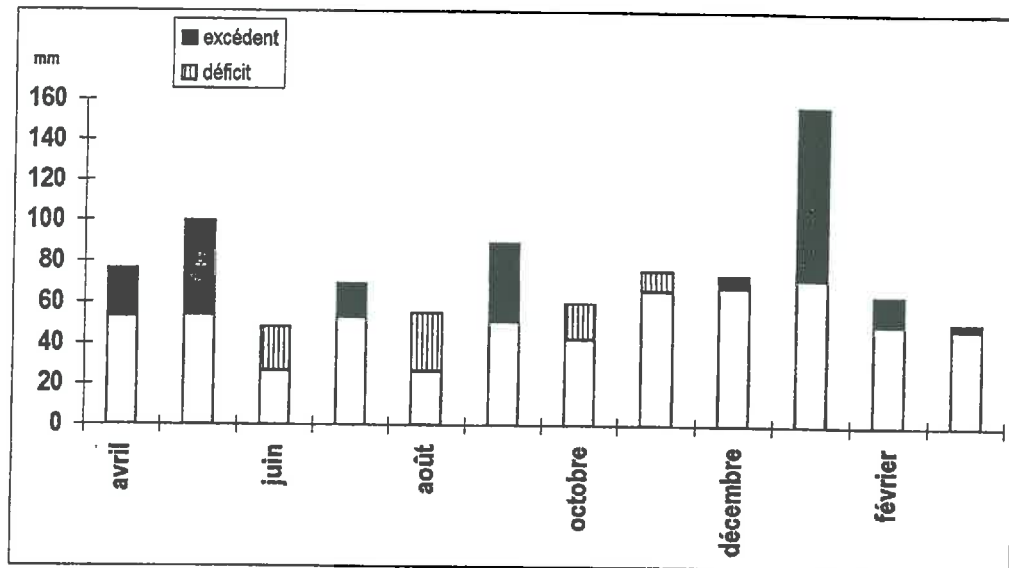


Figure II.15 : répartition par mois des excédents et déficits pluviométriques de 1994-1995 en fonction de la moyenne calculée sur 29 ans (1951-1980) ; Rennes
 Référence année normale (1951-1980) : Rennes ENSA, réseau climatologique
 Année d'étude 1994-1995 : Données du Rheu (station INRA)

Du point de vue climatique, on peut définir grossièrement deux périodes (fig. II 16) :

La première période (C1), se distingue de la deuxième (C2), par des seuils grossièrement identifiés sur les données :

- un nombre d'événements d'intensité moyenne horaire supérieur à 6 mm/h plus important ;
- des valeurs extrêmes de hauteurs pluviométriques, inférieures ;
- des durées d'averse ne dépassant pas 10 heures contre une valeur extrême de 18 heures pour C2.

Au cours de C1, les pluies présentent une intensité faible : 61% des intensités moyennes horaires sont inférieures à 2 mm/h ; elles peuvent atteindre des valeurs supérieures à 9 mm/h. Sur l'année, les jours d'orages représentent en moyenne 13 jours. Leur répartition sur l'année montre une fréquence plus importante de mai à août, avec un maximum en juin. Les orages (tableau II.1) des mois de mai (au nombre de 3), de juin (1), de juillet (4), d'août (1) et de septembre (3) ont présenté des intensités conséquentes (fig. II.16), voire violentes pour un événement au cours du mois de juillet (24 juillet 1994).

	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	TOTAL
1951-1980	0,8	2,53	2,63	2,23	2,5	1,47	12,16
1994	1	3	1	4	1	3	12

Tableau II.1: nombre de jours d'orage : réseau climatologique d'Ille et Vilaine, période 1951-1980 et station INRA du Rheu, période d'avril à septembre 1994

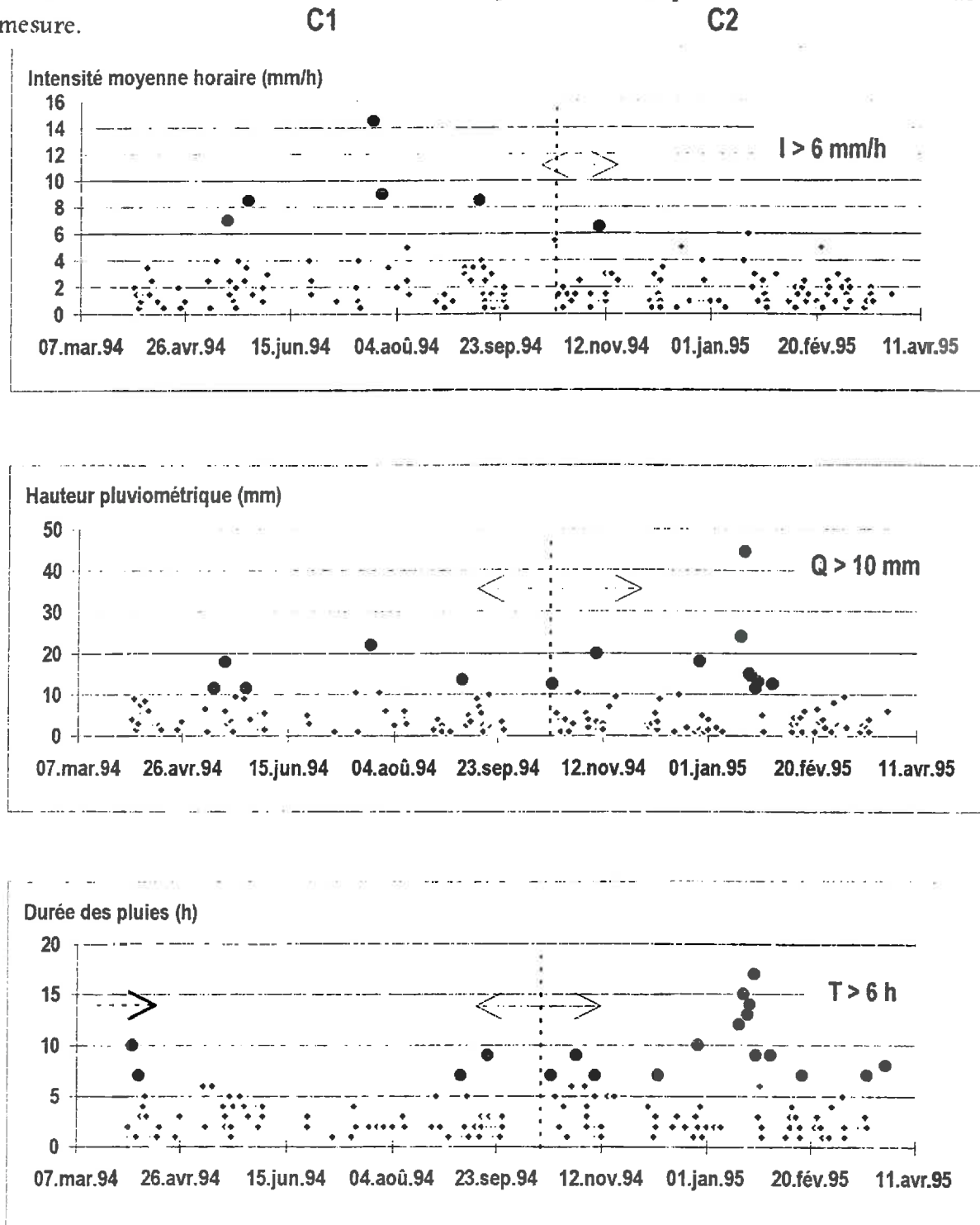
Les résultats obtenus au cours de l'ensemble de cette première période apparaissent représentatifs d'une année normale, à l'exception du mois de juin particulièrement sec et de l'orage du 24 juillet 94.

Au cours de C2, les événements pluvieux sont comparables à une situation moyenne établie sur plusieurs années, à l'exception du mois de janvier pour lequel la situation a été exceptionnelle. Les conditions climatiques du mois de janvier ont provoqué «des inondations historiques» (OUEST FRANCE, édition spéciale, 1995). Le 19 janvier, une pluie, d'ordre décennal, de 44 mm, est tombée en 24 heures sur la parcelle de Rennes. Des crues de cette envergure sont apparues au cours des années 1881, 1936, 1966, 1974, 1981 et 1995 (OUEST FRANCE, 1995). Sur une année moyenne, le nombre de jours de pluie au cours de la période d'octobre à mars est de 76 jours. Au cours de l'année 1994-1995, pour la même période, ce nombre s'est élevé à 102 jours.

En hydrologie, les données de précipitation doivent aussi être exprimées par des valeurs extrêmes maximales et minimales. Dans le cas du ruissellement, il est également primordial d'exprimer l'intensité d'une averse, selon des pas de temps courts. Un pluviomètre, mis au point par F. GARNIER, est basé sur l'enregistrement du cumul pluviométrique au pas de temps de la minute, avec une précision de l'ordre de 0.3 mm, par une sonde à ultrason. Il permet ainsi un calcul très précis de l'intensité pluviométrique. Malheureusement, la mise au point du dispositif n'a permis des enregistrements qu'à partir de septembre, hormis pour un événement de juillet (fig. II.17). La comparaison avec des données similaires dans la région Bretagne pour une longue période est impossible car aucune donnée n'est disponible.

L'intensité moyenne horaire des événements orageux ne reflète pas l'importance de l'événement. En effet, pour l'averse orageuse étudiée, l'intensité décroît fortement lorsque le pas de temps augmente, allant de 40 à 5 mm/h pour un pas de calcul allant de quelques minutes à une heure. Cette décroissance est exponentielle. Pour un train d'averses hivernal (fig. II.18), les valeurs d'intensité passent de 9 à 2,5 mm/h. L'intensité calculée sur différents pas de temps présente des valeurs extrêmes moins contrastées que pour une averse orageuse, mais les écarts sont cependant importants. Si l'on fixe une intensité seuil

pour le déclenchement du ruissellement, cas du ruissellement hortonien, on obtient des cumuls pluviométriques très différents selon le pas de calcul de l'intensité. Un pas de mesure de l'ordre de quelques minutes semble requis pour expliquer la genèse et l'importance des transferts de surface. Un pas de temps trop fin, de l'ordre de la minute, intègre, à l'opposé des fluctuations liées au phénomène de pluie et aux contraintes de la mesure.



Les points noirs représentent les pluies supérieures au seuil indiqué sur chaque graphique
 ←→ limite variable entre les périodes C1 et C2

Figure II.16 : chronologie des intensités moyennes horaires, des hauteurs pluviométriques et de la durée des averses, 1994-95 ; Rennes

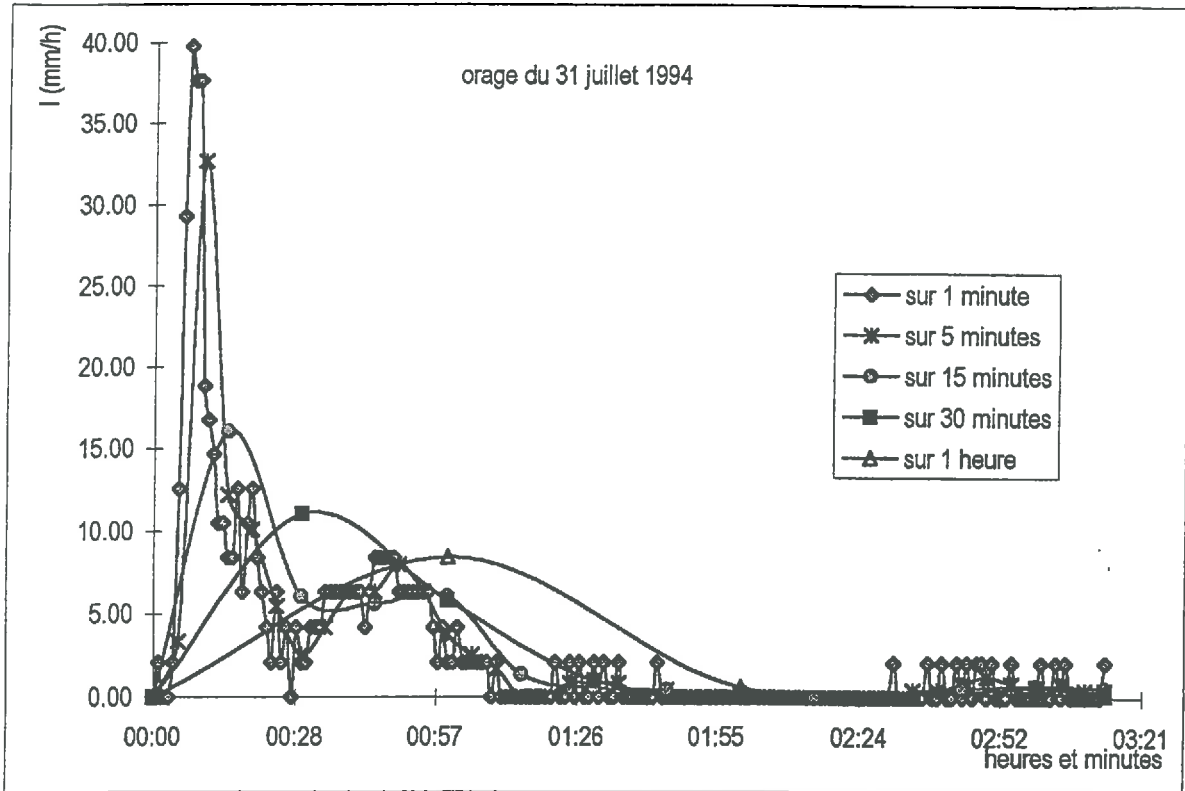


Figure II.17 :valeurs d'intensité de pluie (mm/h) selon 4 pas de temps ; ETE

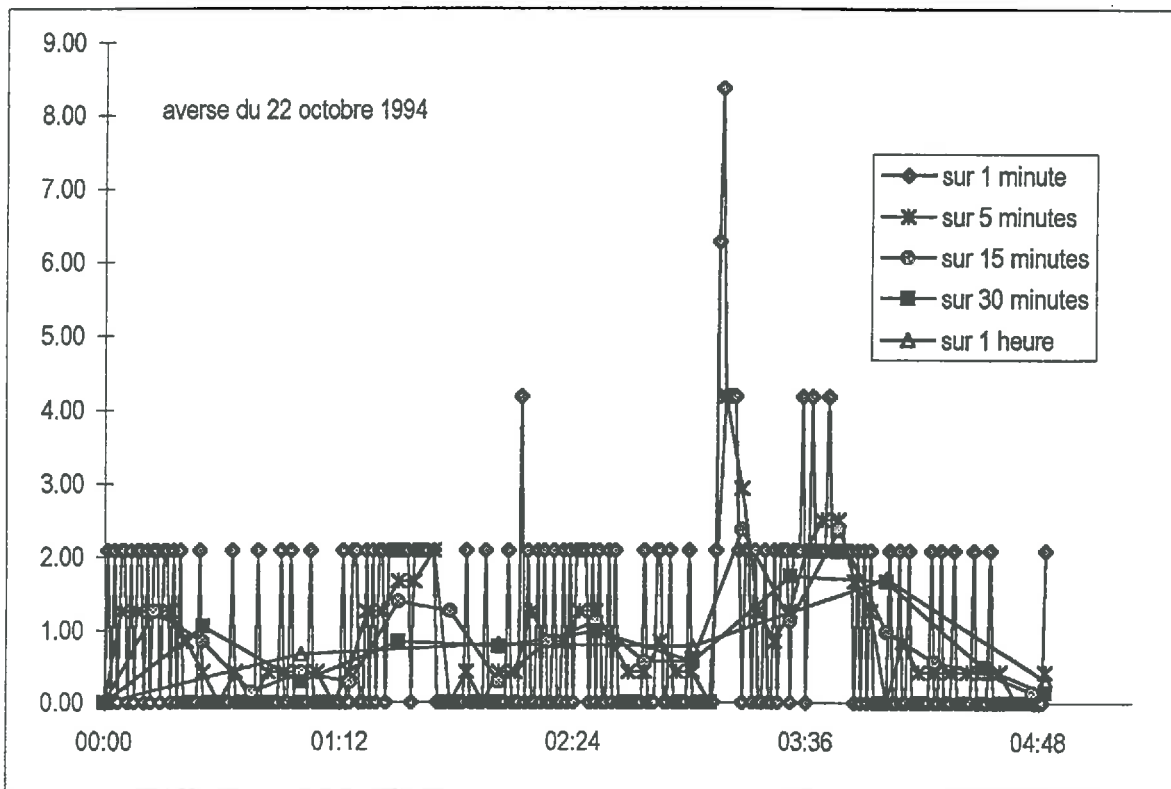


Figure II.18 :valeurs d'intensité de pluie (mm/h) selon 4 pas de temps ; HIVER

2.2. Sites de Naizin

2.2.1. Choix des sites sur le bassin versant de Naizin

Afin d'effectuer des mesures sur un autre site du Massif Armoricain, deux parcelles, situées sur le bassin versant de Naizin ont été étudiées. Il était nécessaire de comparer la parcelle de Rennes à d'autres sites.

Le bassin versant de Naizin a fait l'objet de nombreuses études par différents organismes (CEMAGREF, CNRS, INRA). Il fait partie du réseau de bassin versant européen. Il a fait l'objet d'un programme de recherche, le programme CORMORAN. (Caractérisation ObseRvation MOdélisation des tRansferts en milieu Agricole iNtensif). Ce projet vise à définir l'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux et des sols. La SAU représente 80% de la superficie du bassin versant (12 km²). Le remembrement, réalisé de janvier à juin 1975 (ROLLARD et al, 1975), a touché 74% de la superficie du bassin versant (GOENADI, 1989). Le ruisseau qui le traverse, le Coët Dan, est un affluent du Blavet. Le substrat géologique est sur la quasi totalité du bassin versant du schiste Briovérien. Au nord, se trouve un plateau de champs ouverts et au sud, persiste un bocage. Cette partie sud est plus vallonnée et présente des pentes supérieures à 5%. Dans l'ensemble, les pentes sont relativement douces (inférieures à 5%).

Au sein du bassin versant, on a recherché des parcelles :

- ayant une pente de forme convexo-concave,
- situées dans la partie amont du bassin versant, de façon à avoir une topographie comparable à celle de la parcelle de Rennes,
- présentant des croûtes de dépôt et des formes accentuées d'érosion (protogriffes, griffes, microrigoles)

Cinq parcelles ont été retenues (description de l'état des parcelles et de leur localisation en annexe 1e). Deux de ces parcelles (fig. II.8), celle de Tocplouz et celle de Kerjos, ont été équipées de 5 dispositifs chacune.

2.2.2. Caractéristiques des sites

2.2.2.a. La parcelle de Tocplouz

La parcelle est située sur la partie amont (NE) du bassin versant (fig. II.19). Au cours de la reconnaissance de terrain, la surface en aval de la parcelle présentait des dépôts

importants composés en surface d'une couche d'éléments fins de la taille des limons, de couleur rouge (1 à 5 cm) et en dessous d'une partie d'éléments riches en matière organique (couleur noire) à structure stable. Une incision centimétrique a été observée et des petites incisions indiquaient un passage direct d'eau de ruissellement, de la parcelle au ruisseau.

- Avant avril 1993, une prairie permanente occupait la parcelle. Le maïs a été semé dans le sens de la pente début avril et la récolte s'est effectuée en octobre 94. Après l'ensilage du maïs, les mesures ont été interrompues en raison des pratiques culturales (griffage du sol, ray-grass...) (fig. II.20).
- La topographie du « transect de dispositif » a été établie avec un théodolite WILD T1000. La longueur de la parcelle est de 415 mètres, allant de l'amont jusqu'au ruisseau. Elle est composée d'un plateau, d'un versant et d'un aval dont les pentes sont respectivement de 4%, 5,6% et de 3%.
- La cartographie des sols a été faite de même que pour la parcelle de Rennes, avec la collaboration de G. DUTIN (fig. II.19), à partir de 48 points de sondages répartis sur un transect. Le sol est peu épais en amont sur le plateau (30-40 cm de profondeur) et s'approfondit vers l'aval (1,20 mètres). Le sol est brun sur le plateau. Il évolue sur la pente en un sol brun faiblement lessivé, puis lessivé et dégradé présentant une forte hydromorphie à l'aval. La présence de taches d'oxydo-réduction apparaît dès l'horizon éluvial après la convexité de pente. A l'aval l'hydromorphie apparaît dès la surface. La description des sondages est reportée en annexe 1f.
- Les analyses physico-chimiques (granulométrie, CEC, pH et matière organique) (fig. II.21) suggèrent une forte stabilité structurale des sols. L'indice IB (RIVIERE, 1990 ; annexe 1a) est respectivement de 1,64, 1,27 à 0,7, d'amont en aval. Le sol semble battant en amont jusqu'à non battant en aval du versant. Ce faible risque de battance estimé par la formule de Rivière est lié aux taux de matière organique du sol, supérieurs ou égaux à 4%, dans les horizons superficiels ; les taux de colloïdes minéraux sont supérieurs à 18%.

 La parcelle de Tocplouz se distingue de celle de Rennes, car :

- le sol est hydromorphe dès la surface à l'aval, alors qu'à Rennes l'horizon de labour est sain de l'amont à l'aval ;
- les pentes sont supérieures à celle de la parcelle de Rennes ;
- les différences granulométriques selon la topographie sont importantes, notamment les taux de matière organique et de colloïdes minéraux.

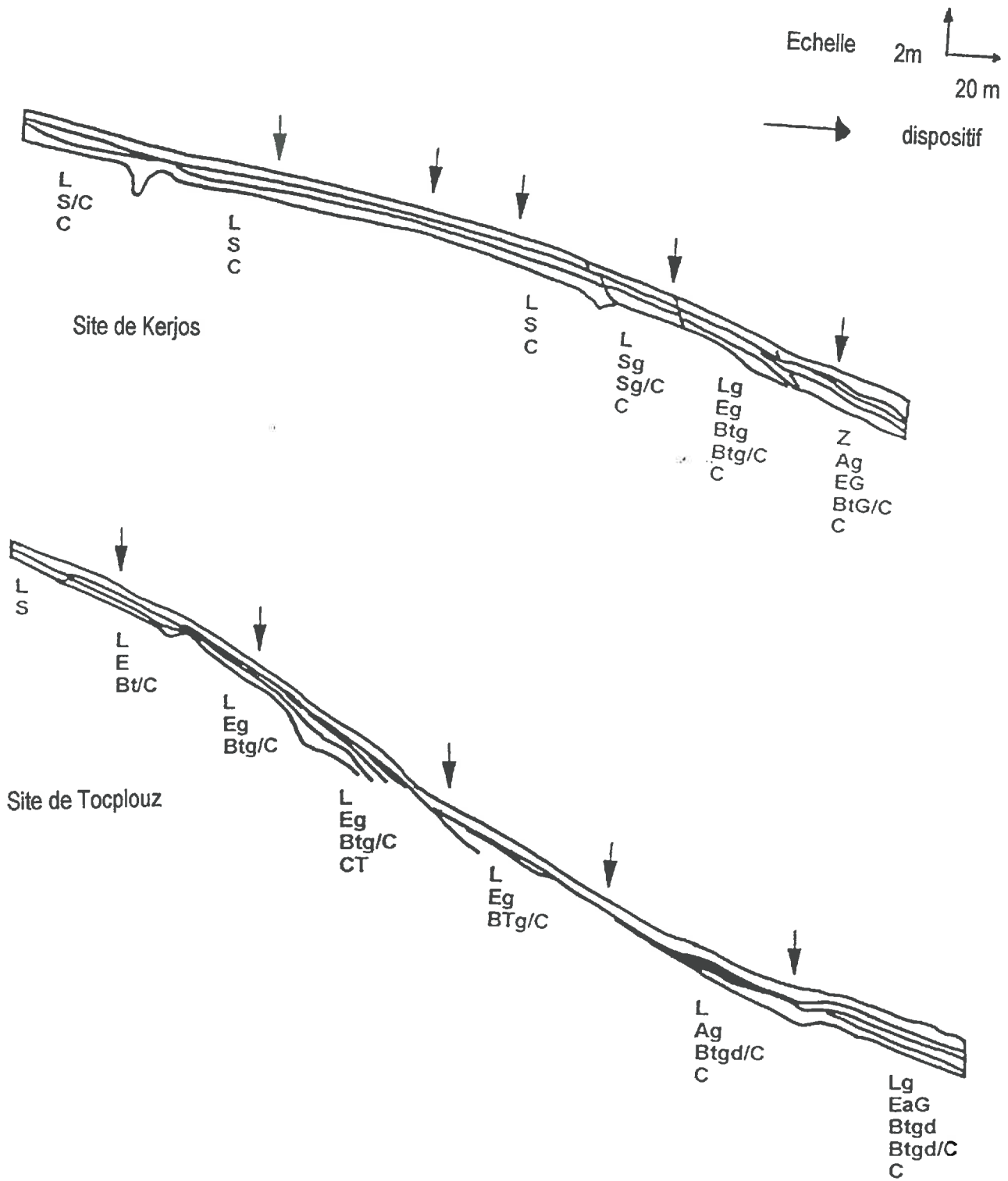


Figure II.19 : deux toposéquences pédologiques, Naizin.

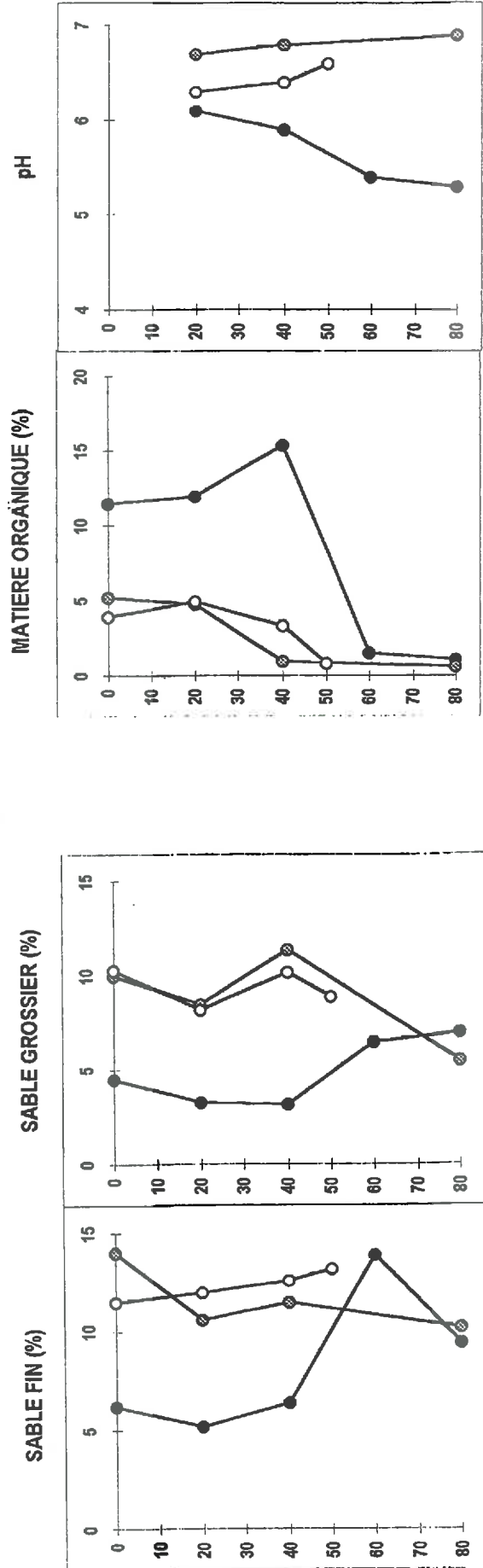
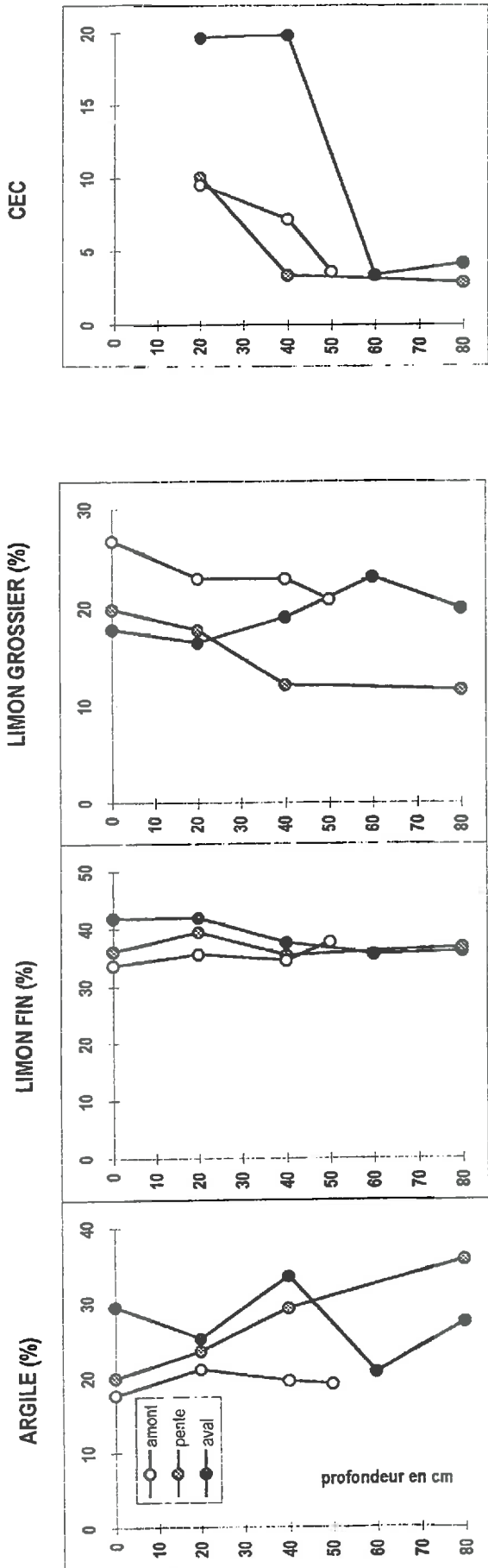


Figure II.21 : caractéristiques physico-chimiques, Tocplouz

2.2.2.b. La parcelle de Kerjos

La parcelle se situe également dans la partie amont du bassin versant (fig. II.19). Au cours de la reconnaissance de terrain préalable, la surface, en aval de la parcelle, près de l'étang, présentait une croûte de dépôt constituée d'une première couche de matériel de la taille des sables et d'une deuxième couche d'éléments fins de la taille des limons. L'épaisseur du dépôt varie de 1 à 10 centimètres. Une incision importante est observée. En ce point, un passage direct d'eau de ruissellement jusqu'à l'étang est observé.

- La parcelle représente une superficie importante, en forme d'entonnoir. La parcelle a étéensemencée en maïs début avril. Le sens de culture est variable mais préférentiellement dans le sens de la pente (fig. II.22). La récolte s'est effectuée en octobre 94. Les mesures se sont arrêtées après l'ensilage du maïs (fig. II.20).

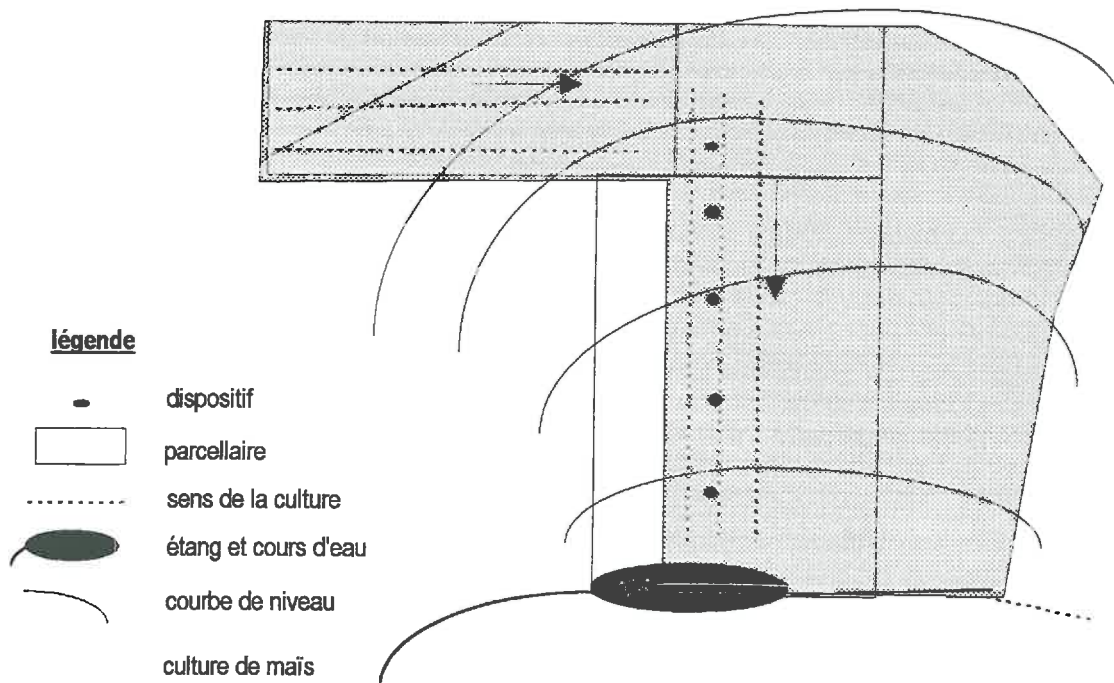


Figure II.22, parcelle de Kerjos

- De la même manière que pour la parcelle de Tocplouz, la topographie du « transect de dispositif » a été établie avec un théodolite WILD T1000. La longueur de pente du transect choisi est de 340 mètres de l'amont jusqu'à l'étang. Le plateau, d'une longueur de 175 mètres, est composé de 2 parties, une première partie d'une longueur de 25 mètres présente une pente de 3 %, une deuxième partie longue de 150 mètres est

caractérisée par une pente de 1,6%. La pente maximum du transect choisi est de 3,2 % sur 135 mètres. L'aval présente une pente de 2 % sur une longueur de 37,5 mètres.

- La cartographie du transect (méthode «tarière, 4 critères», RIVIERE, 1989) a été établie à partir de 35 points de sondages. L'hydromorphie apparaît en profondeur à mi-pente et en surface en bas de pente maximum avant la concavité (fig. II.19). Le sol a une profondeur relativement constante sur l'ensemble du transect (de 1 mètre à 1,50 mètres environ). La roche mère est du schiste avec des passages d'altérites. Le sol est un sol brun jusqu'en bas de pente et lessivé puis lessivé dégradé de la concavité aval jusqu'à l'étang. L'aval proche de l'étang est caractérisé en surface par du sol de remblais provenant du creusement de l'étang (trou artificiel). La description des sondages est reportée en annexe 1f.
- Les caractéristiques physico-chimiques (fig. II.23) indiquent une forte stabilité des sols du plateau et de la pente. Le taux de matière organique est supérieur à 3 % sur le plateau et sur la pente. Le taux de matière organique de 2%, à l'aval de la parcelle, indique que le sol est plus fragile en ce point que sur l'ensemble du versant. Les taux de colloïdes minéraux sont compris entre 10 et 20 %. L'indice IB de Rivière, d'amont en aval de la parcelle, est égal à 1,8, 1,9 et 3,2. Le sol semble très battant à l'aval de la parcelle comparé à l'amont qui apparaît battant (annexe 1a).



La comparaison de la parcelle de Kerjos avec celle de Rennes montre que :

- les pentes sont de valeurs comparables à celles de la parcelle de Rennes ; la longueur de pente de l'ensemble du transect est supérieure ; la longueur des différentes portions (plateau, pente, replat aval) contributives au ruissellement sont très différentes ;
- la différence importante avec le site de Rennes et avec le site de Tocplouz correspond au remblaiement, située à l'aval de la parcelle. En ce point, l'hydromorphie apparaît dès la surface ;
- les taux de matière organique sont supérieurs sur le plateau et dans la pente, et décroissent vers l'aval, contrairement aux sites de Rennes et de Tocplouz.

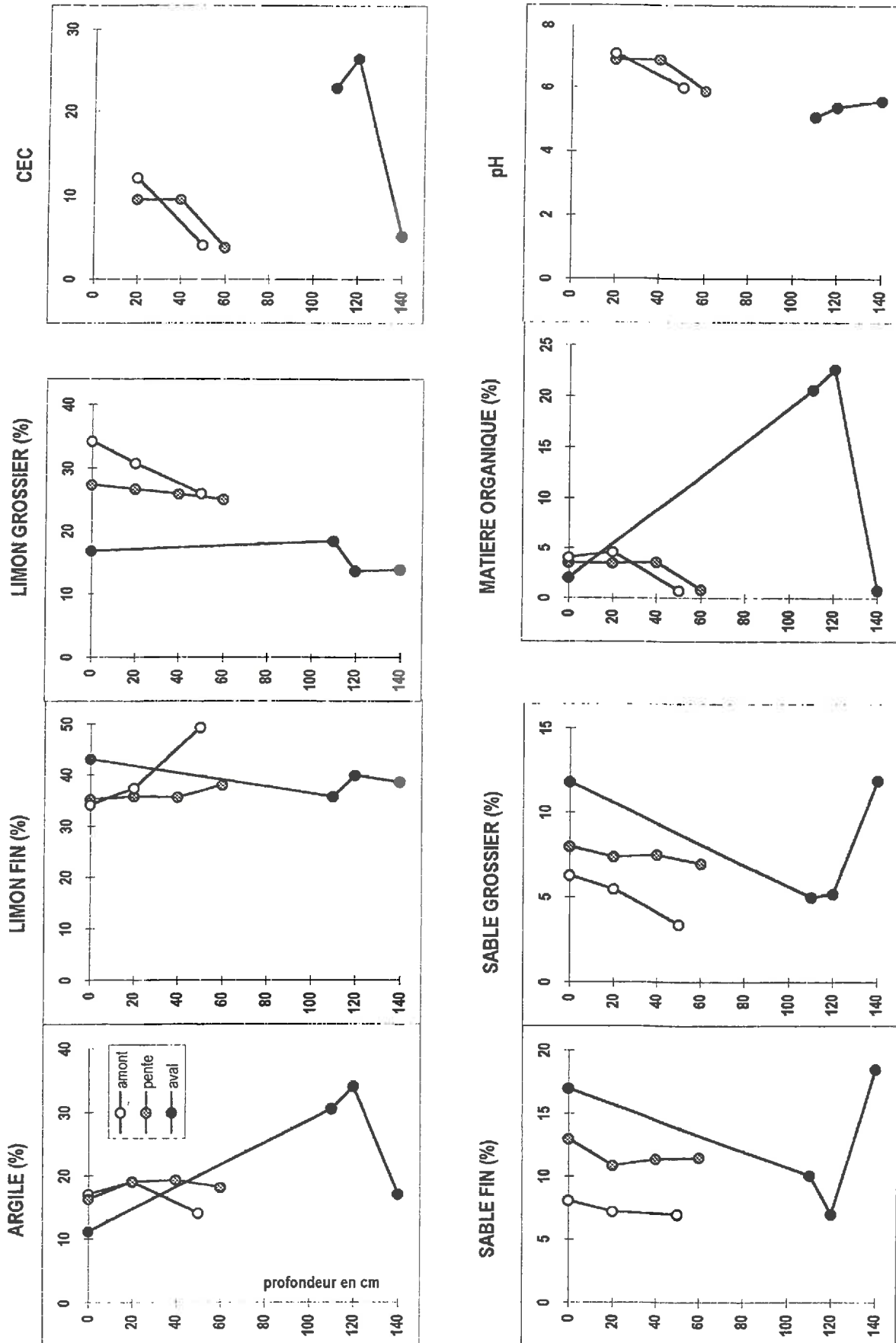


Figure II.23 : caractéristiques physico-chimiques, Kerjos


2.2.3. La pluviométrie sur le bassin versant de Naizin

Les références utilisées sur le site de Naizin sont les valeurs moyennes mesurées par le CEMAGREF (CANN C & al., 1993 ; CANN & VILLEBONNET, 1994).

2.2.3.a. représentativité de la période d'étude

Cette région, située au sud-est de Pontivy, est protégée par la Montagne Noire et se caractérise par une lame d'eau précipitée annuelle de 710 mm (moyenne calculée par le CEMAGREF de 1971 à 1992) contre plus de 800 mm pour la majorité du territoire du Morbihan (LARIVIERE et VERDOU, 1976). Le maximum de pluviosité est atteint en décembre, le minimum en août et en avril (CEMAGREF, 1993). La moitié de la période d'étude (3 mois) apparaît plus pluvieuse que la normale (avril - mai - septembre) (fig. II.24) ; les hauteurs de pluie enregistrées en mai et septembre sont égales respectivement au double et au triple des hauteurs relevées au cours d'une année moyenne. L'autre moitié de la période (juin - juillet - août) est proche d'une année moyenne.

Au cours de la période d'étude (1994), il y a eu 28 jours où les pluies ont été supérieures à 5 mm/jour dont 17 jours supérieurs à des valeurs comprises entre 10 et 40 mm (fig. II.25). Sur une année moyenne, le nombre de pluies journalières de plus de 5 mm se situe entre 40 et 50 ; une pluie supérieure à 20 mm est exceptionnelle (CEMAGREF, 1994). La majorité des événements pluvieux présentent des intensités moyennes horaires faibles, inférieurs à 5 mm/h. Les intensités moyennes horaires les plus fortes se situent au cours des mois de juillet et de septembre avec des valeurs supérieures à 10 mm/h (fig. II.26). L'intensité moyenne horaire d'un des orages de juillet a atteint la valeur de 14 mm/h et l'intensité la plus forte au cours du mois de septembre a été de 11 mm/h (fig. II.26). Le nombre de jours d'orage au cours de la période d'étude a été important puisqu'il s'élève à 17, la moyenne étant de 15 jours (LARIVIERE & VERDOU, 1976).

 Le cumul pluviométrique de la période étudiée (473,5 mm) comparé à celui de la même période pour une année normale (288 mm) est 1,6 fois supérieur.

2.2.3.b. Comparaison avec la pluviométrie de Rennes

La différence climatique, au sein de la Bretagne, est illustrée par ces deux sites expérimentaux. Le cumul pluviométrique d'avril à septembre, pour la région de Naizin est de 473,5 mm, alors qu'à Rennes, le cumul sur cette même période est de 382,1 mm (tableau II.2). La fréquence des pluies reste proche pour les deux régions (fig. II.27). La

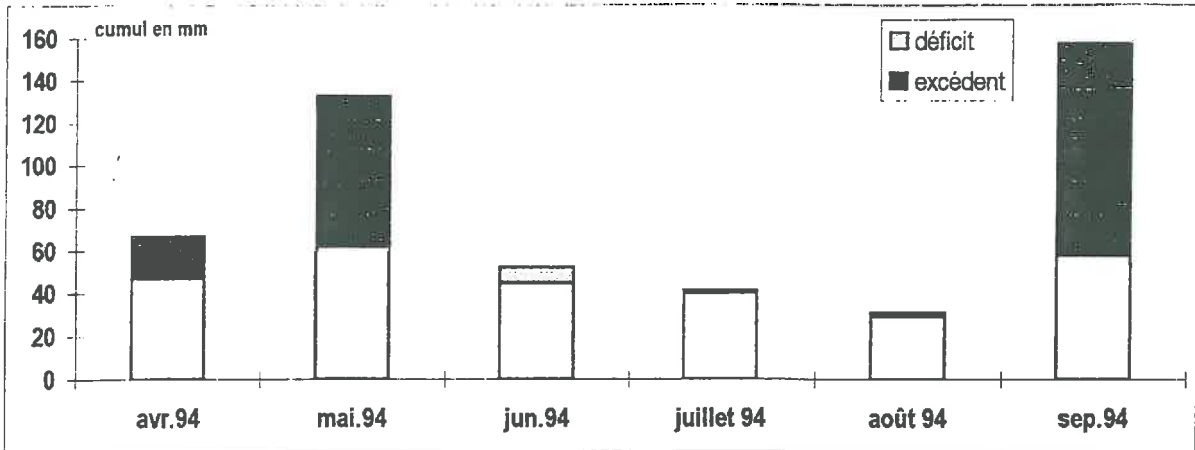


Figure II.24 : répartition par mois des excédents et des déficits pluviométriques d'avril à septembre 1994 en fonction de la moyenne calculée sur 21 ans (1971-1992) ; Naizin

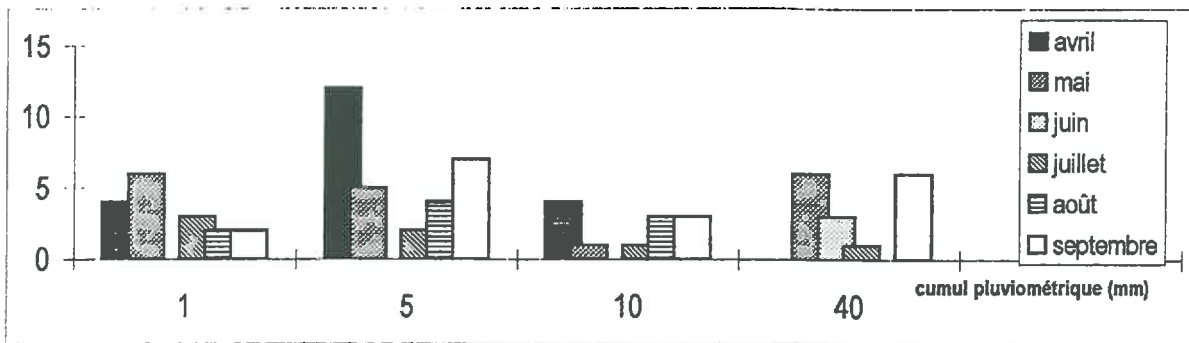


Figure II.25 : distribution par mois du nombre de pluie selon leurs hauteurs pluviométriques (mm) ; Naizin

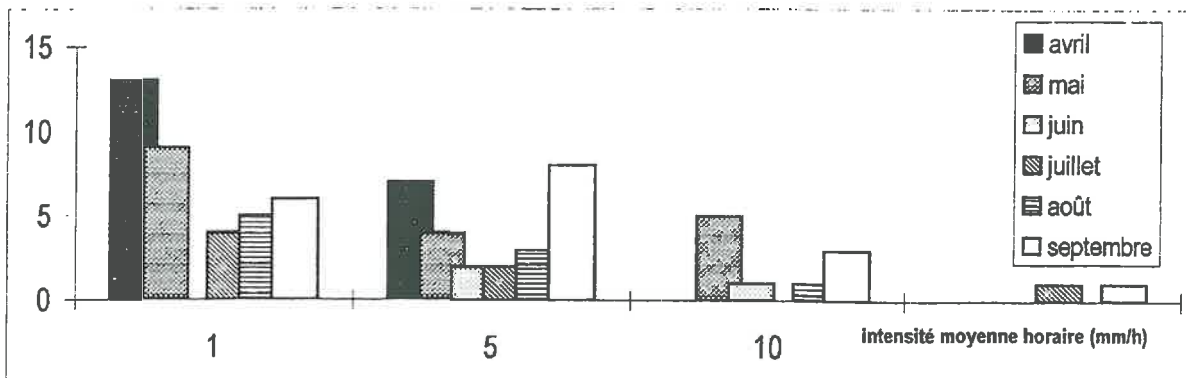


Figure II.26 : distribution par mois du nombre de pluie selon leurs intensités moyennes horaires (mm/h) ; Naizin

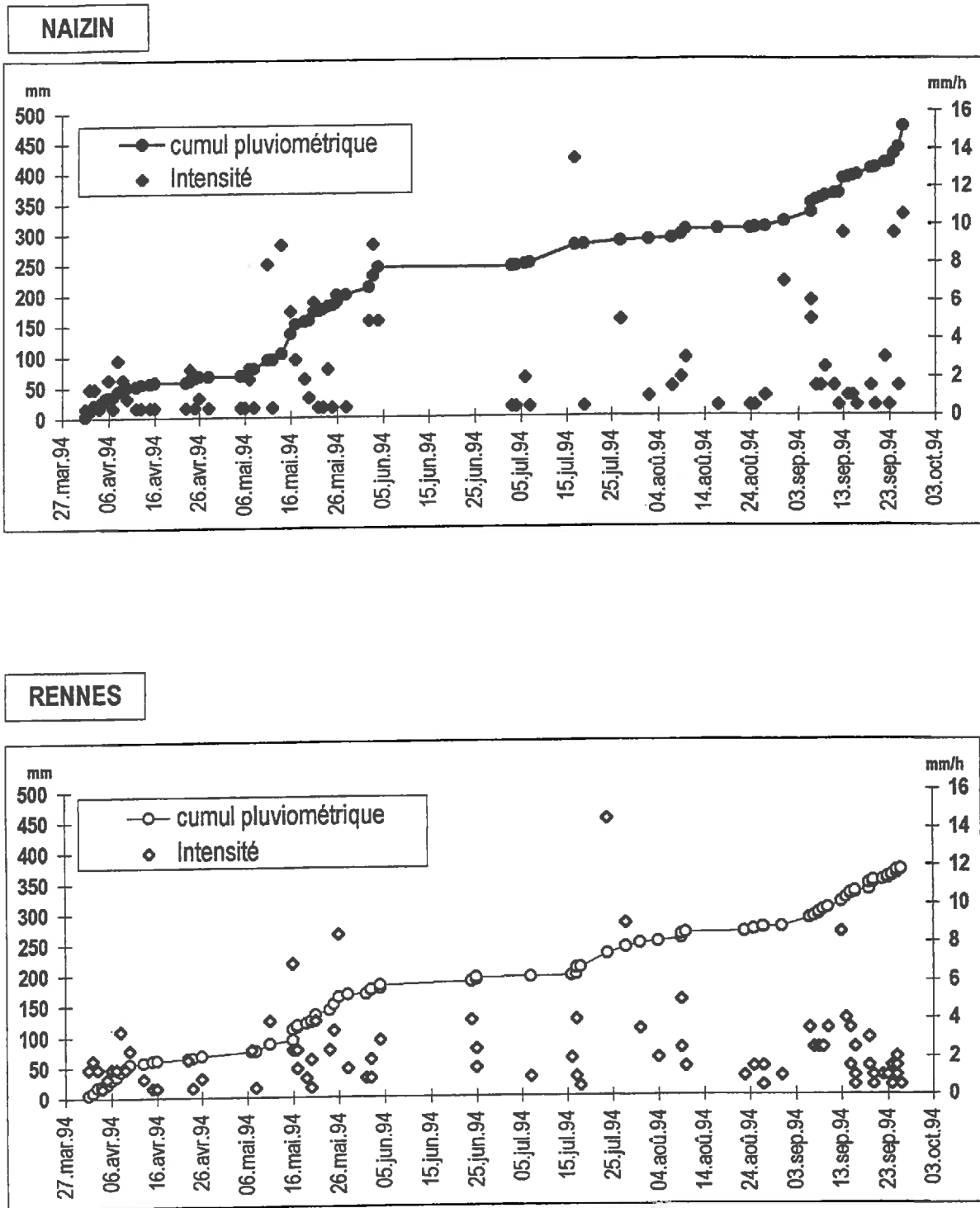



Figure II.27 : chronologie des intensités moyennes horaires et des cumuls pluviométriques d'avril à septembre 1994 ; Naizin et Rennes

différence se situe dans les valeurs de hauteurs pluviométriques plus fortes pour le bassin de Naizin que pour celui de Rennes. L'intensité moyenne horaire maximum entre ces deux régions est de 14,5 mm/h pour une averse à Rennes contre 13,5 mm/h à Naizin, mais le nombre d'orage, au cours de la période étudiée est supérieur à Naizin (17) par rapport à Rennes (13) (tableau II.2).

lieu		avril	mai	juin	juillet	août	septembre	total
	jours	18	14	5	9	13	18	77
Rennes	cumul	68.5	98.6	26.5	54.5	26.5	107.5	382.1
	orages	1	3	1	4	1	3	13
	<i>I max</i>	3.5	8.5	3	14.5	3.5	8.5	
	<i>P max</i>	8.5	17.9	5.5	22	6	13.5	
	jours	18	17	3	5	9	16	68
Naizin	cumul	66.5	133	44.5	41	31	157.5	473.5
	orages	0	6	3	2	2	4	17
	<i>I max</i>	2.5	9	9	13.5	7	10.5	
	<i>P max</i>	10	32.5	18.5	29	8	35	

tableau II.2 : comparaison des caractéristiques climatiques de Rennes et Naizin, pour la même période : (a) du nombre de jours de pluie, (b) des intensités moyennes horaires maximums et (c) des hauteurs pluviométriques maximum

 - Différence : Pour la période d'avril à septembre, le climat sur Rennes semble moins agressif et moins favorable à l'apparition de phénomènes de ruissellement et d'érosion.

- Similitude : pour les deux régions, la période d'étude présente des valeurs fortes par rapport aux données climatiques observées sur une longue période. Cette remarque est valable aussi bien pour les hauteurs pluviométriques que pour l'intensité moyenne horaire des averses.

2.3. Installation et suivi des dispositifs

Les dispositifs ont tous été installés sur des inter-rangs où l'engin agricole est passé lors du semis de la culture. Ils correspondent alors aux inter-rangs les plus tassés, et donc, les plus sensibles au ruissellement. Lors de l'installation, le nombre d'inter-rangs nécessaire au passage du tracteur pulvérisateur a été calculé, de façon à ce que l'on puisse intervenir sur la parcelles pour les traitements phytosanitaires sur des inter-rangs non occupés par des dispositifs. Au cours des traitements phytosanitaires, ils n'ont ainsi pas été déplacés : la

hauteur du dispositif ne gêne pas le passage des rampes de traitement. La période de récolte a provoqué de nombreux dégâts de dispositifs ou de limite entre les inter-rangs voisins de ceux occupés par les dispositifs. Certains dispositifs ont alors dû être réinstallés sur des inter-rangs proches de leur position initiale. Sur le bassin versant de Naizin, la récolte de la culture de maïs a conclu la période d'étude.

Les mesures de ruissellement et d'érosion ont débuté dès janvier 1993. Les différentes situations et périodes d'étude sont indiquées sur l'ensemble des figures II.13, II.14 et II.19. L'interprétation des processus de ruissellement et d'érosion s'appuie essentiellement sur la période d'avril 1994 à 1995, sur la parcelle de Rennes. Les autres données permettent de discuter de la représentativité de ces résultats.

Sur le site de Rennes, la mise au point de la méthode et le choix des différentes cultures permettent de distinguer quatre périodes d'étude. Un schéma d'ensemble de la parcelle (fig. II.13) indique la position des dispositifs au cours de ces différentes périodes d'étude.

De décembre 1992 à mars 1993, les trois premiers dispositifs construits par F. GARNIER ont été installés sur pente faible avec une ancienne culture de maïs.

D'avril à juin 1993, 12 dispositifs, 3 répétitions à 4 niveaux de pente, ont été installés sur culture de petits pois, peu favorable à l'apparition du ruissellement et peu adapté à la forme du dispositif au regard des objectifs visés : l'inter-rang est moins bien défini que sur maïs. Les quatre niveaux de pente choisis au cours de cette période ont permis de distinguer le bas de la convexité, la pente, la concavité aval et le replat aval. Vingt et un jours de pluie ont eu lieu dont seulement 3 avec une intensité supérieure à 5 mm/h. Les dispositifs étaient alors équipés d'un totalisateur de faible contenance (20 litres) (CAYOT, 1993 ; GASCUEL et al, 1996).

D'octobre 1993 à février 1994, une toposéquence de 3 dispositifs a permis de recueillir eau de ruissellement et charges solides sur une culture de phacélie (engrais vert). Pendant la même période, une deuxième toposéquence de 12 dispositifs étaient placés sur sol nu. Un dispositif muni d'une sonde à ultrasons a alors été testé.

Ces trois périodes ont ainsi guidé le choix du nombre de dispositifs à installer, sur maïs, en 1994 et ont permis d'établir une contenance approximative du totalisateur. Elle a été fixée à 60 litres. Trois dispositifs ont été installés aux 5 niveaux de pente suivants : avant et après la convexité amont, au maximum de pente, après la concavité aval et sur le replat aval (fig. II.9). Ils ont été suivis durant une année culturale complète d'avril 1994 à mars 1995.

Sur le site de Naizin, les expérimentations ont toujours eu pour objectifs de compléter les résultats obtenus à Rennes. Ainsi, 3 périodes d'expérimentation ont eu lieu. Les différentes parcelles choisies au cours des expériences in situ sont indiquées sur la figure II.19.

De janvier à avril 1993, une parcelle (Le Salut) avec quelques résidus de récolte, anciennement cultivés en maïs a été équipée de quatre dispositifs en séquence.

De mi-février à juin 1993, 3 dispositifs en séquence ont été installés sur une culture de blé et 6 autres (soit 2 séries de 3 dispositifs) sur une culture de petits pois (Le Mercy) (CAYOT, 1993).

D'avril à septembre 94, deux parcelles (Tocplouz et Kerjos) ont été équipées de 5 dispositifs chacune. La situation des dispositifs devait reproduire celle de Rennes, avec 5 positions topographiques : amont, convexité, pente, concavité et replat aval.

CONCLUSION

Cette méthode, de réseau de dispositif, permet de caractériser un ruissellement effectif, intégrant des différents effets d'échelle possible, par opposition au ruissellement local, mesuré traditionnellement sur des placettes normalisées. Elle permet ainsi d'aborder les problèmes d'échelle, du local à la parcelle ou au versant, en intégrant explicitement les variations liés aux sols et à la topographie. Ces problèmes sont souvent négligés dans les approches de modélisation ou dans les approches expérimentales réalisées sur de petites surfaces strictement délimitées, définies comme homogènes, à partir desquelles l'extrapolation spatiale est fondée. Cette méthode, basée sur un recueil des données averses par averse, permet ainsi de caractériser la réponse d'un versant différencié dans l'espace, d'un point de vue topographique, pédologique et de son état initial, à un signal, l'averse, pris dans sa globalité ou différencié dans le temps par son intensité.

D'autres méthodes de spatialisation des transferts, telles que la mesure de la hauteur de la lame ruisselante ou l'utilisation de traceurs auraient pu compléter cette approche spatiale. Elles n'ont pas été menées ici.

Cette étude prend en compte en détail un site du bassin de Rennes, site sensible au ruissellement, tout en restant représentatif. Elle compare à d'autres sites moins sensibles du point de vue de leur stabilité structurale, mais comparables du point de vue de leur topographie et de la conduite de la culture.

Pour caractériser les sites et leur variabilité spatiale en relation avec la topographie, d'autres mesures physiques liées aux processus de ruissellement et de transport solide ont été réalisées. Elles font l'objet du chapitre suivant.

MESURES PHYSIQUES ET SUIVI DES ETATS DE SURFACE

Les variabilités spatiales sur le versant et temporelles au cours d'une année culturale, des mesures physiques du sol. (1) la stabilité structurale (coll. LE BISSONNAIS) - (2) la conductivité hydraulique (coll. HEDDADI et GASCUEL-ODOUX) - (3) l'humidité du sol - (4) l'évolution des états de surface du sol - sont importantes.

- *La conductivité hydraulique apparaît plus forte en amont qu'en aval. Elle diminue fortement au cours de l'année.*
- *Les sols de Rennes et de Naizin ont un comportement très différents. Rennes apparaît plus sensible à la battance, avec un sol relativement instable. Les résultats des tests de stabilité structurale varient de manière non négligeable d'amont en aval du versant, mais pas toujours dans le même sens selon les sites.*
- *L'évolution de la surface du sol est expliquée en partie par ces résultats, ainsi que par les valeurs d'humidité du sol.*

In fine, ces mesures permettent de hiérarchiser les situations, et de montrer que sur un même site, le versant est un système différencié.

INTRODUCTION

Ce chapitre présente d'une part, l'évolution des états de surface, d'autre part les mesures physiques réalisées sur les sols des parcelles de Rennes et de Naizin. Elles ont été mises en oeuvre grâce à différentes collaborations.

① La teneur en eau volumique a été mesurée après chaque averse analysée, ainsi qu'au cours d'un ressuyage (fin mars 1995).

② Des photos d'état de surface ont été réalisées en collaboration avec HALLAIRE, de mai à fin juillet 1994.

③ Les mesures de stabilité structurale, réalisées par LE BISSONNAIS, doivent permettre d'évaluer la sensibilité des sols à la battance et à l'érosion hydrique (LE BISSONNAIS et LE SOUDER, 1995).

④ L'infiltrabilité du sol, à la surface, dans le domaine proche de la saturation, est principalement liée à la macroporosité du sol, en particulier dans les sols de faible stabilité structurale (HEDDADJ et al., 1996). Des mesures de conductivités hydrauliques ont été réalisées sur la parcelle de Rennes, à différents niveaux de pente et au cours de trois périodes de l'année culturale.

1. HUMIDITE DU SOL

1.1. Méthode et protocole

Après chaque averse, les mesures ont été réalisées par la technique de TDR - Time Domain Reflectometry - sur le même inter-rang (avec passage de roue), aux 5 niveaux de pente, définis dans le chapitre II, et à deux profondeurs, 5 cm et 11 cm. Trois mesures par profondeur ont été effectuées : une mesure sur une bosse et une dans un creux du micro-relief, une mesure sur le bord de l'inter-rang. Les mesures d'humidité du sol portent sur 28 dates : 7 au cours de la première période, un mois après le semis de la culture, 7 au cours de la deuxième période (été) et 14 au cours de la troisième période (automne - hiver).

A la fin de la troisième période, on a tenté de mesurer le «ressuyage» du sol (GASCUEL-ODOUX). Vingt-deux mesures d'humidité à 15 cm et 30 cm ont été effectuées sur un rang et un inter-rang, du 21 mars 1995 au 7 avril 1995. Au cours de cette période, une pluie a eu lieu, le 28 mars 1995 (Tab. III. 1).

1.2. Variations temporelles

Valeurs après chaque averse

Les variations temporelles de l'humidité volumique (moyenne sur les trois mesures) du sol sont fortes. Elles semblent en relation avec la chronique des pluies (fig. III.1). Les valeurs sont les plus basses en été et les plus fortes en hiver (fig. III.2). Les différences d'humidités entre 0 et 5 cm et entre 0 et 11 cm, sont sensibles en été et au cours des périodes de réhumectation des sols ; elles sont négligeables en hiver.

Ces mesures indiquent qu'il y a :

- dans ces horizons superficiels, une recharge régulière de leur réserve en eau, lors des périodes pluvieuses ;

- un drainage rapide de la couche la plus superficielle (0 à 5 cm) par rapport à la couche sous-jacente (5 à 11 cm), durant toute l'année, à l'exception de l'hiver : cet état stable traduit une saturation quasi-permanente de ces deux profondeurs en hiver, et ce d'autant plus, semble-t-il, que l'on est proche de l'aval de la parcelle.

Valeurs d'humidité volumique au cours d'un «ressuyage»

A la fin du mois de mars, les différences entre 0 et 15 cm et entre 0 et 30 centimètres sont faibles au cours du ressuyage (fig. III.3). L'infiltration paraît lente et progressive ; la dynamique est plus lente sur l'inter-rang que sur le rang, mais relativement identique sur l'ensemble du versant.

1.3. Variations spatiales

Valeurs après chaque averse

En été, les variations spatiales de l'humidité volumique du sol sont faibles (fig. III.4). En hiver, elles sont importantes, que ce soit sur 5 cm ou 11 cm. Sur 5 cm, on distingue nettement le domaine amont du domaine aval, à partir «du point de concavité». Les valeurs sont les plus basses dans la partie amont et les plus fortes dans la partie aval. Sur 11 cm, l'humidité du sol augmente encore «de la concavité» jusque sur le replat aval.

Valeurs d'humidité volumique au cours d'un «ressuyage»

Les mesures à un pas d'espace plus serré, montre une même différenciation amont-aval, notamment à partir de la concavité. Le 21 mars, l'humidité du sol est croissante

situation dans le versant états de surface	photos surface	Mesures de conductivités hydrauliques								Mesures de stabilité structurale	TDR	TDR sur T2.1
		avril.94		juin.94		octobre 1994						
		inter-rang sur passage de roue	inter-rang sans passage de roue	inter-rang sur passage de roue	inter-rang sans passage de roue	inter-rang sur passage de roue	inter-rang sans passage de roue					
AMONT	*	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	*	*	
CONVEXITE	*	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	*	*	
PENTE	*	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	*	*	
CONCAVITE	*	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	*	*	
AVAL	*	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 3 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	4 mesures à 4 potentiels	*	*	

Tableau III.1 : situation dans le versant des mesures de conductivités hydrauliques, de densité apparente, de stabilité structurale, d'humidité volumique et des photos d'état de surface ; Rennes

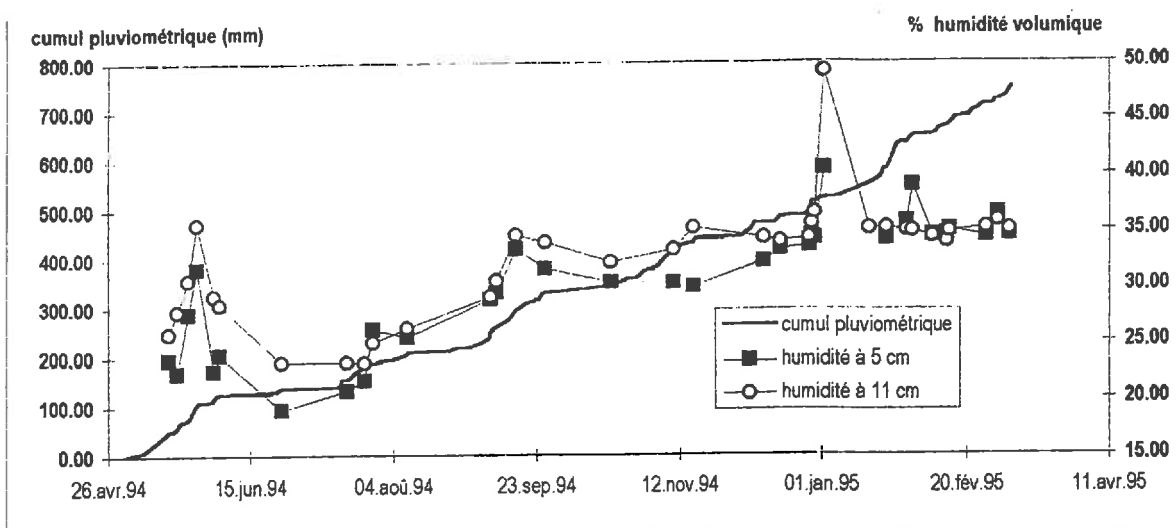


Figure III.1 : cumul pluviométrique (mm) et % d'humidité volumique à 5 et 11 cm de profondeur en fonction du temps ; Rennes

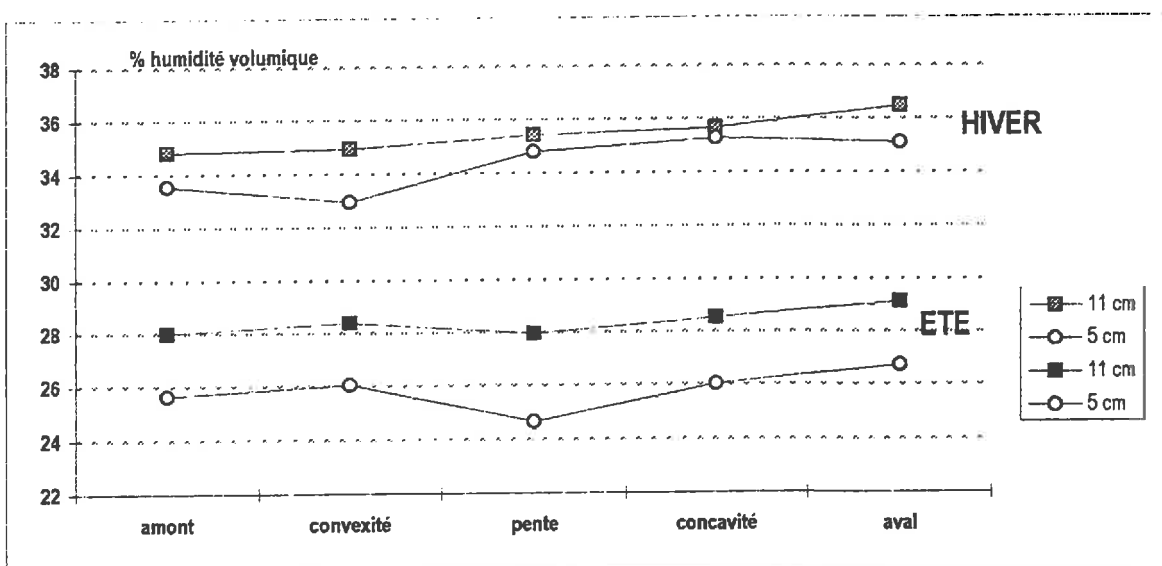


Figure III.2 : moyenne d'humidité volumique (%) à 5 et 11 cm, pour l'été et l'hiver en fonction des niveaux ; Rennes

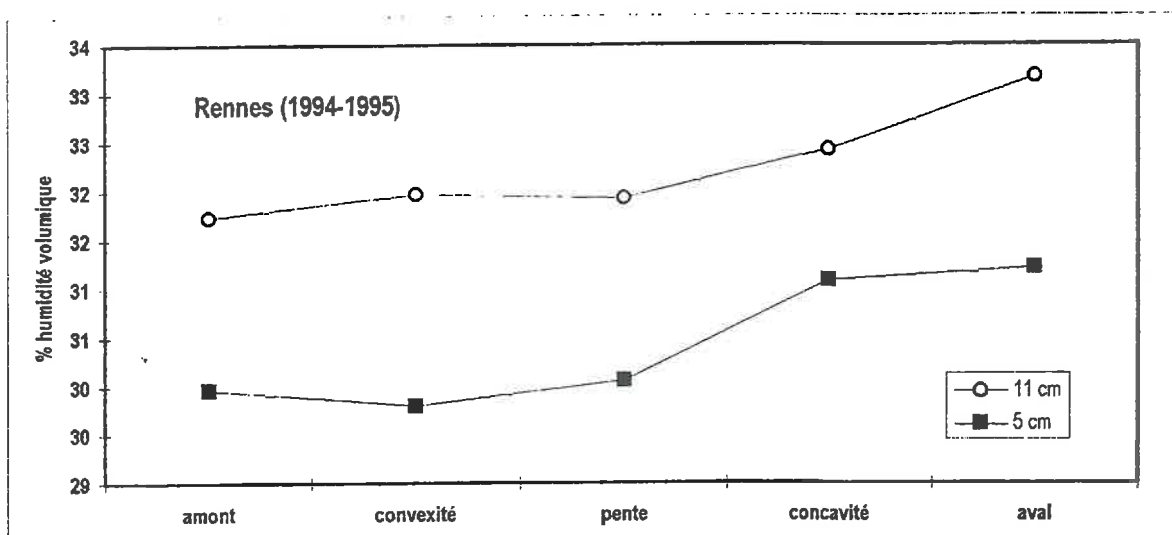


Figure III.4 : moyenne d'humidité volumique (%) à 5 et 11 cm, pour l'année culturale en fonction des niveaux ; Rennes

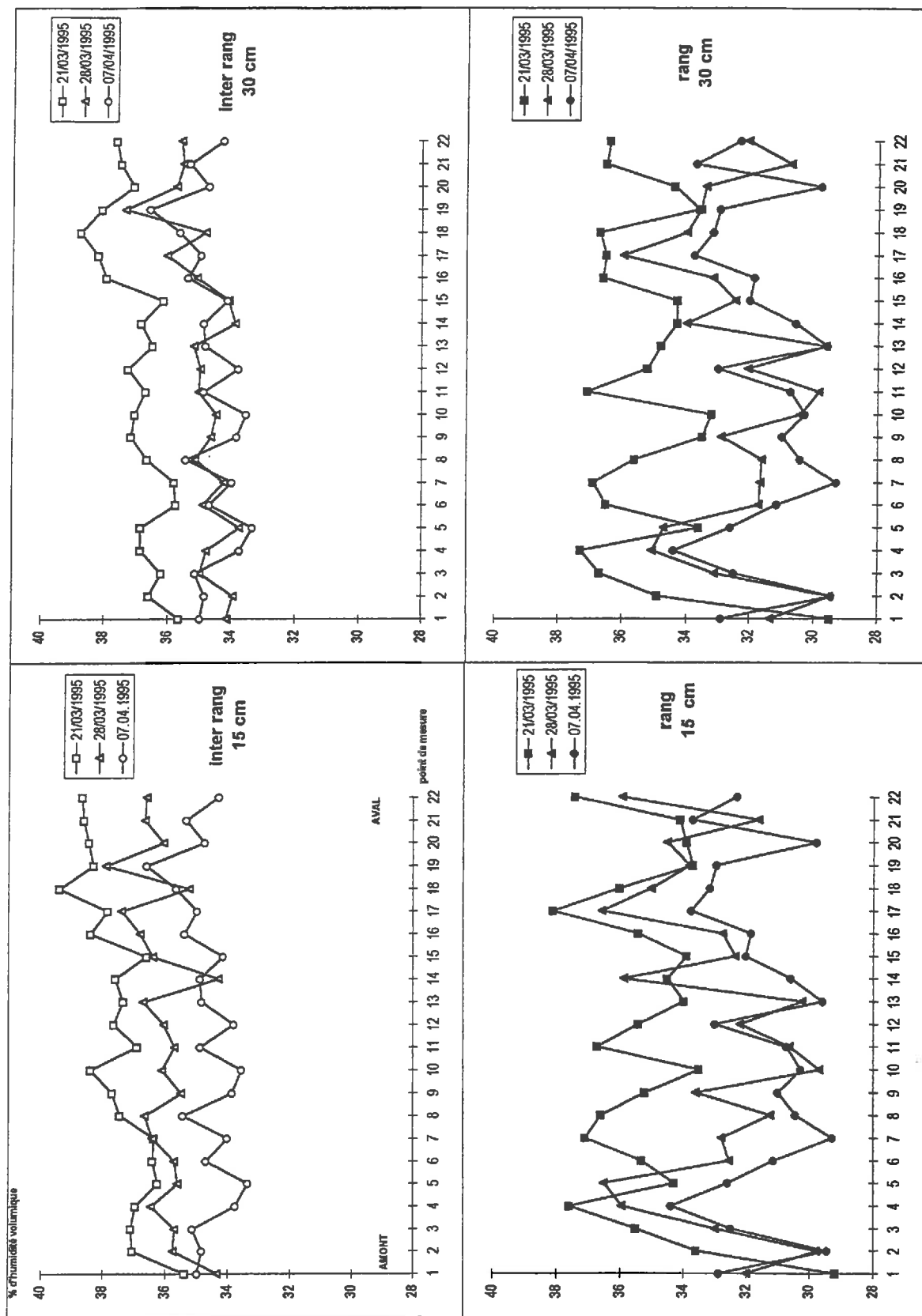


Figure III.3 : valeur d'humidité volumique du sol à 15 et 30 cm de profondeur, sur rang et inter-rang en fonction d'une toposéquence ; Rennes

d'amont en aval, sur 15 ou 30 centimètres (fig. III.3). Au cours du ressuyage, cette «hétérogénéité» du versant se réduit. La comparaison entre inter - rang et rang montre que l'humidité volumique est beaucoup plus variable et plus faible d'environ 2 points d'humidité, sur le rang que sur l'inter - rang.

La variabilité spatiale est plus forte sur le rang que sur l'inter-rang. L'évolution croissante de l'humidité volumique, d'amont en aval, est moins marquée sur le rang que sur l'inter-rang.

1.4. Conclusion

Au printemps et en été, la réserve en eau de l'horizon superficiel se recharge régulièrement lors des périodes pluvieuses. Le versant apparaît homogène.

En hiver, l'horizon superficiel présente une saturation quasi-permanente, d'autant plus que l'on est proche de l'aval. La dynamique d'infiltration est lente et progressive. L'hétérogénéité du versant se réduit au cours du réessuyage. Elle est moins marquée sur le rang que sur l'inter-rang.

2. LES ETATS DE SURFACE DU SOL ET LEUR EVOLUTION DANS LE TEMPS

2.1. Méthode et protocole

Après chaque relevé d'eau de ruissellement, une description des états de surface a été réalisée. Elle prend en compte :

- la typologie des faciès de croûte établie par BOIFFIN (1984) : F0, F1 et F2 ;
- l'importance de turricules de vers de terre ou de remaniement de la surface par la faune ;
- la présence ou l'absence d'incisions, de type protogriffe ou griffe ;
- les formes fissurales.

D'avril à fin juillet 1994, des photos, correspondant à une surface de 5 sur 10 cm, ont été prises régulièrement dans le temps, avec la collaboration de V. HALLAIRE. A Rennes, les clichés ont été effectués sur les cinq niveaux de pente, à 2 - 3 mètres, en amont de chacun des dispositifs 6, 7, 8, 9 et 10 (Tableau III.1).

A Naizin, 3 niveaux de pente pour chaque parcelle, amont, pente maximum et aval, ont été retenus.

2.2. Variations temporelles

• A Rennes

Période de 1994 à 1995, sous culture de maïs ; à partir du suivi visuel, le faciès fragmentaire (F0) est encore observable à l'aval de la parcelle jusqu'à fin juin (fig. III.5). Les fragments les plus grossiers disparaissent après l'événement orageux du 27 juillet 1994. Cette date correspond donc à la limite entre le faciès fragmentaire altéré (F1) et le faciès continu (F2), alors que la culture est à son maximum de recouvrement. Les cumuls pluviométriques, de F0 à F1, vont de 60 à 100 mm, en fonction de la topographie ; ils sont de 140 mm pour passer de F0 au stade F2. BOIFFIN et SEBILLOTE (1976) indiquent un cumul pluviométrique de 50 mm sous un sol nu et de 90 mm sous une culture de maïs (BOIFFIN, 1984), pour passer du stade sans croûte au stade croûte de dépôt, F2. Malgré la faible stabilité structurale du sol, le stade F2 est atteint lentement. Les cumuls pluviométriques nécessaires paraissent importants, comparés à ceux donnés dans la bibliographie. Le stade F2, atteint après l'averse orageuse du 25 juillet 1994, peut être expliqué par le fait que le sol était sec et que l'intensité de la pluie était forte (LE BISSONNAIS et al., 1995) : l'effet splash, en liaison avec l'énergie des gouttes de pluie, et l'entraînement des agrégats par le ruissellement se sont combinés au cours de cette averse. Il faut noter qu'aucune protogriffe ou griffe n'a été observée

A partir des photos (III.1), on observe les différents stades de formation des croûtes :

- de la série 1 à 2 (du 10 au 12 mai), les agrégats les plus gros sont encore visibles alors que les plus fins sont déjà plus difficilement discernables ;
- de la série 2 à 3 (du 12 mai au 18 mai), des zones continues en «plaques» sont déjà observables ;
- de la série 3 à 4 (du 18 mai au 27 mai), l'évolution de la surface du sol est lente pour ce qui concerne la destruction des agrégats ; le sol commence à se fissurer ;
- de la série 4 à 5 (du 27 mai au 17 juin), la fissuration du sol est de plus en plus importante ;
- de la série 5 à 6 (du 17 juin au 25 juillet), les dépôts de particules induits par le ruissellement sont bien visibles ; il y a connexion entre les plaques ; le stade de faciès continu est atteint ; malgré les averses de juillet, la fissuration du sol persiste ; cependant elle est réduite.

A partir de là, l'évolution de la surface du sol est essentiellement liée au remaniement du sol par la faune et aux passages d'engins, au moment de la récolte. On observe, par ailleurs, de nombreux turricules de vers de terre et ce d'autant plus que le sol

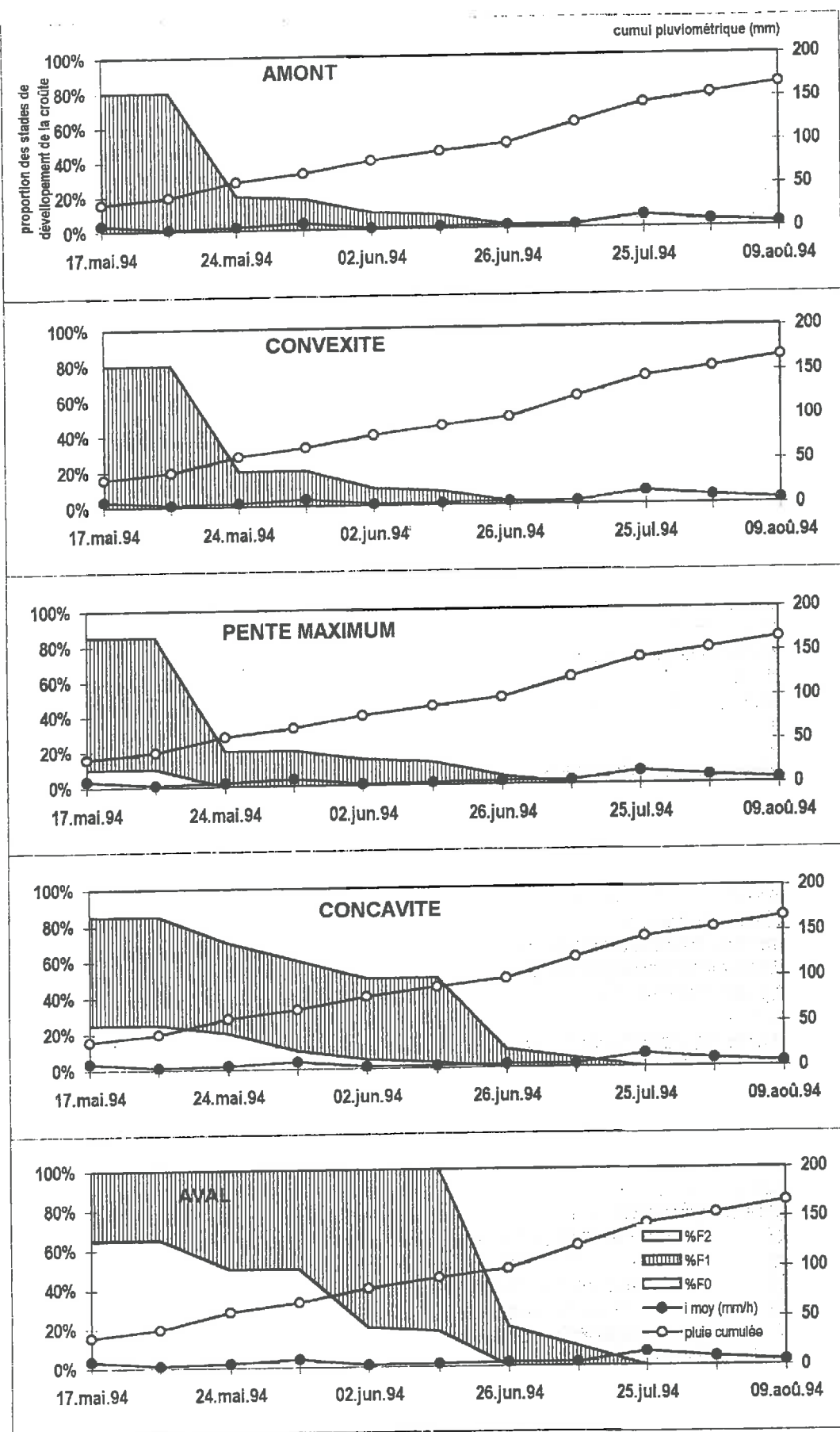


Figure III.5 : chronique des états de surface (F0, F1 et F2, d'après BOIFFIN, 1984) et chronique des cumuls pluviométriques (mm)

série 1 : 10 mai 1994

série 2 : 12 mai 1994

AMONT



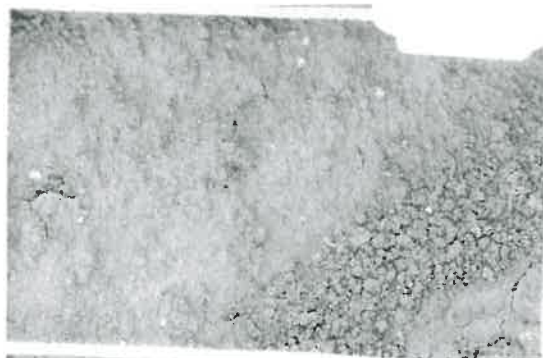
AVAL

série 3 : 18 mai 1994

série 4 : 27 mai 1994



AMONT



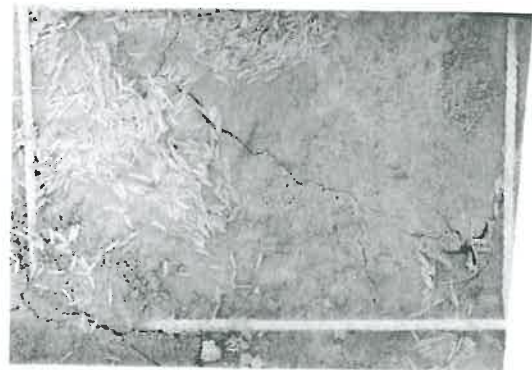
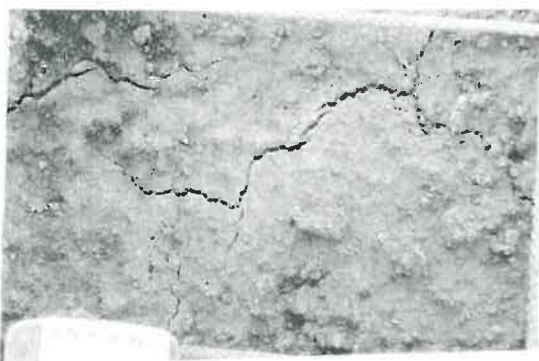
AVAL



série 5 : 17 juin 1994

série 6 : 25 juillet 1994

AMONT



AVAL

AV/L



AV/L

série 2 : 21 juillet 1984

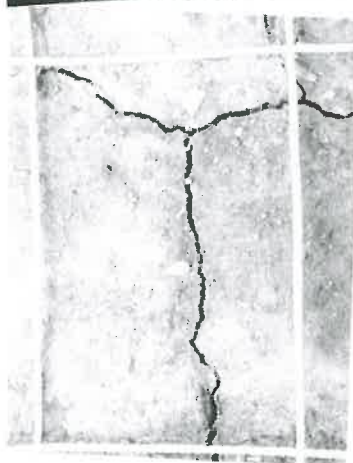
Toulour

photos III.3 : surface de 5 sur 10 centimètres, photographées au 3 niveaux de pente



AV/L

série 1 : 4 juillet 1984



AV/L

série 4 : 21 juillet 1984

Kerfès



AV/L

série 3 : 4 juillet 1984

CONVEXITE



AMONT



photos III.2 : 3 juin 1994 / photos d'état de surface du replat aval, de la concavité, de la pente, de la convexité et de l'amont associées aux photos de surface de 5 sur 10 centimètres, photographés au 5 même niveaux de pente



PENTE



CONCAVITE



REPLAT AVAL

est humide (photos des séries 2, 3 et 4). Beaucoup de turricules ont été observés de septembre à octobre 1994, ainsi qu'en février 1995.

Ces photos ne sont qu'un faible aperçu de la surface du sol (photos III.2). Ainsi, selon leur position sur l'inter-rang, l'évolution de la surface du sol diffère parfois de celle observée au cours du suivi. La dimension des surfaces photographiées, relativement petite a été choisie pour suivre spatialement et temporellement la fissuration et pour pouvoir effectuer des analyses d'image (HALLAIRE). L'importance de la fissuration mériterait d'être analysée du manière plus approfondie, afin de déterminer leur influence sur le ruissellement.

Période de 1993, sous culture de petits pois ; la croûte de battance (stade F2) est atteinte relativement rapidement, avec un cumul pluviométrique de 80 mm, en relation avec un affinement plus poussé du travail du sol dont l'influence apparaît très marquée. La culture recouvre le sol entièrement à partir du mois de juin, alors que le sol est déjà battu.

- **A Naizin**

La battance du sol est très réduite (photos III.3). Hormis au point aval de Kerjos, le stade F2 n'a jamais été atteint. Les fissures du sol sont plus importantes, comparé au sol de Rennes (photos III.1). Les processus de fissuration sont plus rapides qu'à Rennes ; avec une averse d'un cumul de 28 mm et d'intensité moyenne horaire de 13,5 mm/h, certaines se sont refermées. Des observations semblent indiquer qu'elles se reforment aux mêmes endroits.

Les fortes différences entre les caractéristiques physico-chimiques des sols de Rennes et de Naizin, influencent fortement les états de surface.

2.3. Variations spatiales

- A Rennes, période de 1994 à 1995, sous culture de maïs

La formation des croûtes de dépôt varie selon la topographie (photos III.2) : le 3 juin, à l'aval et au point de concavité, les gros agrégats à la surface du sol sont encore bien visibles ; de l'amont jusqu'au niveau de pente maximum, des plages de dépôt liées, d'une part au ruissellement, d'autre part à l'effet splash, sont présentes dans les dépressions et sur les chemins d'écoulement formés par le ruissellement ; la faune modifie de façon notable la surface (trou, turricules) à tous les niveaux de pente.

Les photos de 5 sur 10 cm, correspondant à la même date, sont associées (photos III.1) ; elles montrent les différences amont - aval de la surface du sol.

- sur la première série de photos, le 10 mai 1994, la taille des agrégats est plus réduite d'amont en aval et ainsi, la rugosité plus forte au point aval ;

- sur la deuxième série, le 12 mai 1994, la différence amont - aval est toujours visible, malgré la désagrégation des mottes ; le nombre de turricules est important à la surface du sol, en particulier à l'aval ;

- sur la troisième série, le 18 mai 1994, les modifications à la surface du sol sont importantes, essentiellement du niveau de pente maximum jusqu'au replat aval où les dépôts sont conséquents ; la parcelle apparaît alors plus homogène, bien que les surfaces photographiées soient petites ;

- sur la quatrième série, le 27 mai 1994, les dépôts sont plus continus sur le domaine amont, avec l'apparition d'éléments grossiers ; sur le domaine aval, la surface du sol est modifiée par l'activité biologique. Alors que la partie amont du versant se situe entre le stade F1 et F2, l'aval est encore en phase F1 ;

- sur la cinquième série, le 17 juin 1994, la fissuration est à son stade ultime ; le nombre de turricules n'augmente pas, voire diminue ; les différences liées à la topographie semblent faibles ; les fissures apparaissent dès le 27 mai 1994, à l'aval ;

Sur la dernière série, le 25 juillet 1994, les écoulements et les dépôts de sol ou de résidus végétaux sont bien visibles ; les fissures sont réduites, mais toujours présentes ; les variations spatiales sont alors réduites et la surface du sol peut être classée en phase F2.

- A Naizin, les variations spatiales de la désagrégation du sol sont faibles à Tocplouz, et dans le domaine amont à Kerjos (photos III.3). Le point aval de Kerjos apparaît peu représentatif d'un versant «naturel», puisque le sol est d'origine anthropique (chapitre II). Que ce soit à Tocplouz ou à Kerjos, la largeur des fissures est plus importante en aval qu'en amont du versant, leurs fermetures plus lentes de l'aval à l'amont.

Ces variations spatiales d'état de surface :

- peuvent être le résultat de celles des teneurs en matière organique, des teneurs en particules de taille argile et des caractéristiques minéralogiques de l'argile entre les sols de Naizin et de Rennes (BOIFFIN & SEBILLOTE, 1976 ; LE BISSONNAIS et SINGER, 1993 ; LE BISSONNAIS et al., 1995).

- sont importantes, non seulement entre les trois sites, mais aussi aux différents niveaux de pente.

2.4. Conclusion

L'apparition du stade de croûte de dépôt est fortement dépendant du travail du sol au moment du semis, des chroniques pluviométriques et semble-t-il des caractéristiques pédologiques et topographiques des sites. A Rennes, les croûtes de dépôts s'établissent plus rapidement au cours de la période de 1993 (pois protéagineux) qu'en 1994 (maïs) et se forment plus rapidement en amont qu'en aval. Le sol de Rennes est plus «battant» que celui de Naizin et semble avoir une dynamique de «fissuration» de moindre importance.

3. LA STABILITE STRUCTURALE

3.1. Méthode et protocole

Le test de stabilité structurale, proposée par LE BISSONNAIS et LE SOUDER (1995) comporte trois traitements : (1) une humectation rapide par immersion, (2) une désagrégation mécanique par agitation après réhumectation et (3) une humectation lente par capillarité. Ainsi, la méthode doit permettre d'établir une description du comportement différencié des sols soumis à l'action des pluies. L'humectation rapide (ou éclatement), l'agitation mécanique et la réhumectation lente permettent de tester respectivement : (1) le comportement des matériaux soumis à des «pluies intenses» de type orage ; (2) des pluies modérées avec des matériaux humides, correspondant plutôt à des trains d'averses de périodes hivernales ; (3) des pluies modérées avec des matériaux secs, proches des pluies de périodes estivales ou de périodes de réessuyage. Les tests sont présentés sous la forme d'histogramme de distribution de la taille des particules (en mm), selon différentes classes ou encore, sous la forme d'indice, M.W.D. - Mean Weight Diameter -, le diamètre moyen pondéré (annexe 2c). Le test permet de caractériser et de comparer le comportement des sols vis à vis des mécanismes de désagrégation, en fonction de la position topographique et en fonction du site. Cette méthode a été appliquée sur Naizin et sur Rennes, à différents niveaux de pente (Tableau III.1).

3.2. Variations temporelles

a. Rennes

Sur un échantillon composite, issu de 5 prélèvements par niveau de pente, les distributions granulométriques des trois tests sont très différentes (fig. III.6a et b). Elles sont caractérisées par :

- une forte proportion (63 %) de particules de tailles comprises entre 0,1 mm et 0,5 mm, pour la désagrégation par éclatement ; le diamètre moyen pondéré est d'environ 0,25 mm ;

- environ 50 % des particules inférieures à 0,2 mm après le test de désagrégation mécanique par agitation après réhumectation ; le diamètre moyen pondéré est quasiment égal à 0,6 mm ;

- une proportion importante de particules de tailles comprises entre 0,5 et 0,2 mm, après humectation lente par capillarité ; le diamètre moyen pondéré est légèrement inférieur à 0,4 mm ;

Au cours des pluies d'orage, au printemps et en été (éclatement), et d'après le tableau III.2 de classe de risque proposé par LE BISSONNAIS et LE SOUDER (1995), le test indique :

- (1) une battance systématique et des risques de ruissellement et d'érosion diffuse importants et permanents ;
- (2) une désagrégation conduisant à une majorité de macro-agrégats (TISDALL et OADES, 1982, in LE BISSONNAIS et LE SOUDER, 1995).

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
< 0,4 mm	Très instable	systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4 - 0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toutes situations
0,8 mm - 1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3 mm - 2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
> 2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

Tableau III.2 : Classe de de stabilité, de battance et de ruissellement - érosion en fonction du diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD) ; d'après LE BISSONNAIS et LE SOUDER (1994)

RENNES

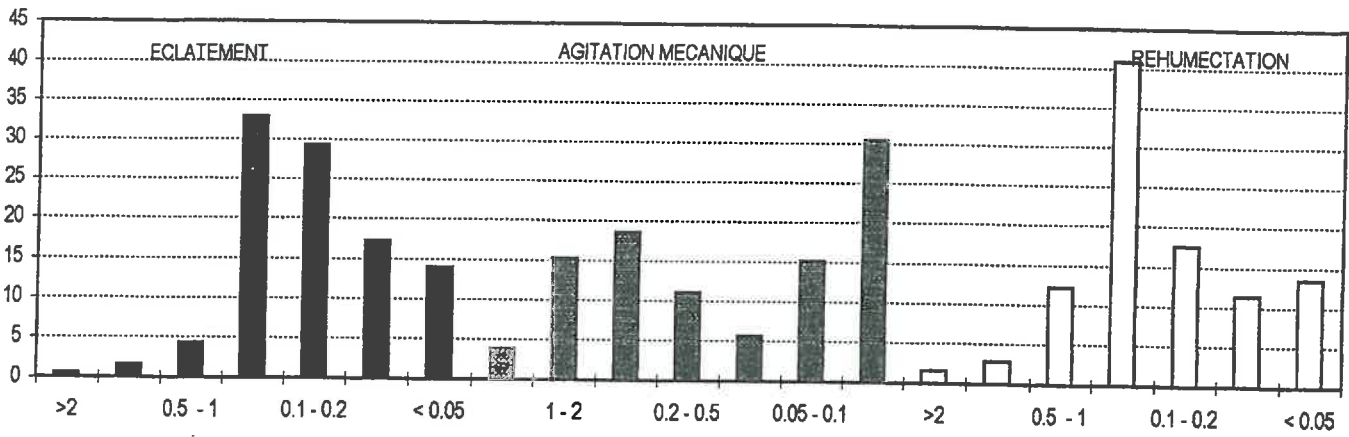
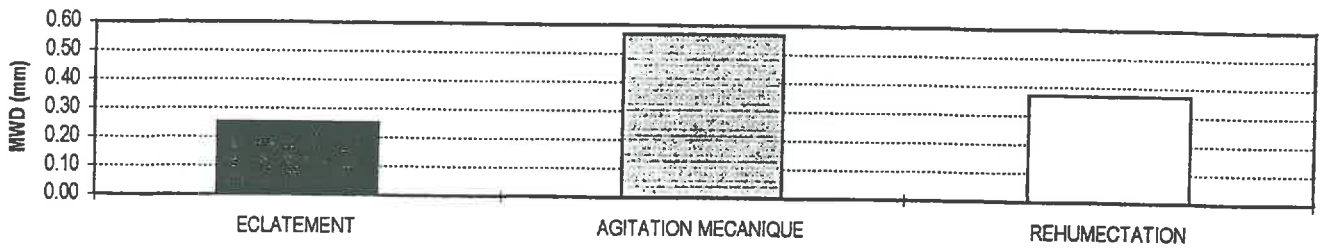


Figure III.6 a et b : Résultats des tests de stabilité pour un échantillon moyen ; Rennes
(b : % de particules en fonction de classes granulométrique en mm)

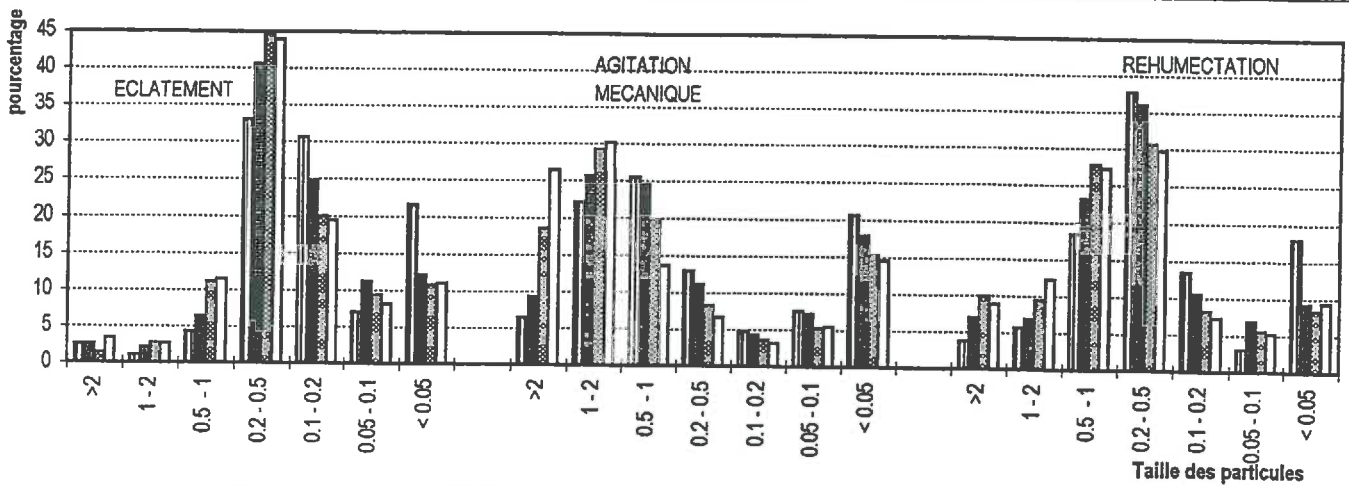
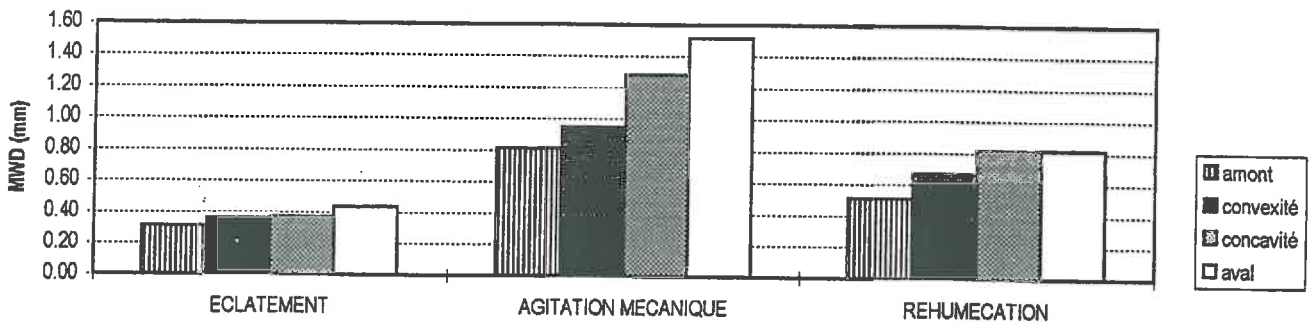


Figure III.9 a et b : Résultats des tests de stabilité pour quatre échantillon de sol à quatre niveaux de pente ; Rennes
(b : % de particules en fonction de classes granulométrique en mm)

Le sol apparaît peu stable au cours des pluies d'hiver (agitation mécanique). La battance apparaît et les risques de ruissellement et d'érosion diffuse apparaissent fréquents en toute situation.

Au cours des pluies modérées, avec des matériaux secs (réhumectation), la battance et les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont identiques à ceux des pluies d'orage, mais la majorité des agrégats ont une taille plus importante.

b. Naizin

Pour les deux sites, les trois tests indiquent des valeurs de diamètre moyen pondéré nettement supérieures, comprise entre 1 mm et 2 mm (fig. III.7 et fig. III.8). La battance des sols n'est donc pas systématique.

A Tocplouz, le diamètre moyen pondéré est comprise entre 1 mm et 2 mm, avec le test par éclatement, supérieur à 2 mm, avec les deux autres tests. Le sol est donc stable à très stable quelles que soient les périodes climatiques. La battance du sol est occasionnelle à très rare et les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont limités, voire très faibles. Les tailles des agrégats fournies par les trois tests sont importantes, puisque qu'elles concernent majoritairement (de 30 à 65 %) des agrégats de taille supérieure à 2 mm.

A Kerjos, sans prendre en compte les variabilités dans le versant, les valeurs moyennes de «MWD» indiquent une variabilité non négligeable en fonction des tests : par éclatement, la valeur moyenne est d'environ 0,7 mm ; par agitation mécanique, elle est supérieure à 2 mm ; par réhumectation, elle est d'environ 1,6 mm.

C'est au cours des pluies d'orage, avec des matériaux secs (éclatement), que le sol apparaît le plus instable, la battance est fréquente et les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont fréquents. La distribution des tailles d'agrégats indique une classe légèrement mieux représentée, de 0,2 à 0,5 mm.

Au cours des pluies d'hiver (matériaux humides) ou avec des pluies modérées avec un sol sec, le sol apparaît très stable à stable. Les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont alors limités. 65 % à 80 % des agrégats fournis par les deux tests ont une taille supérieure à 2 mm.

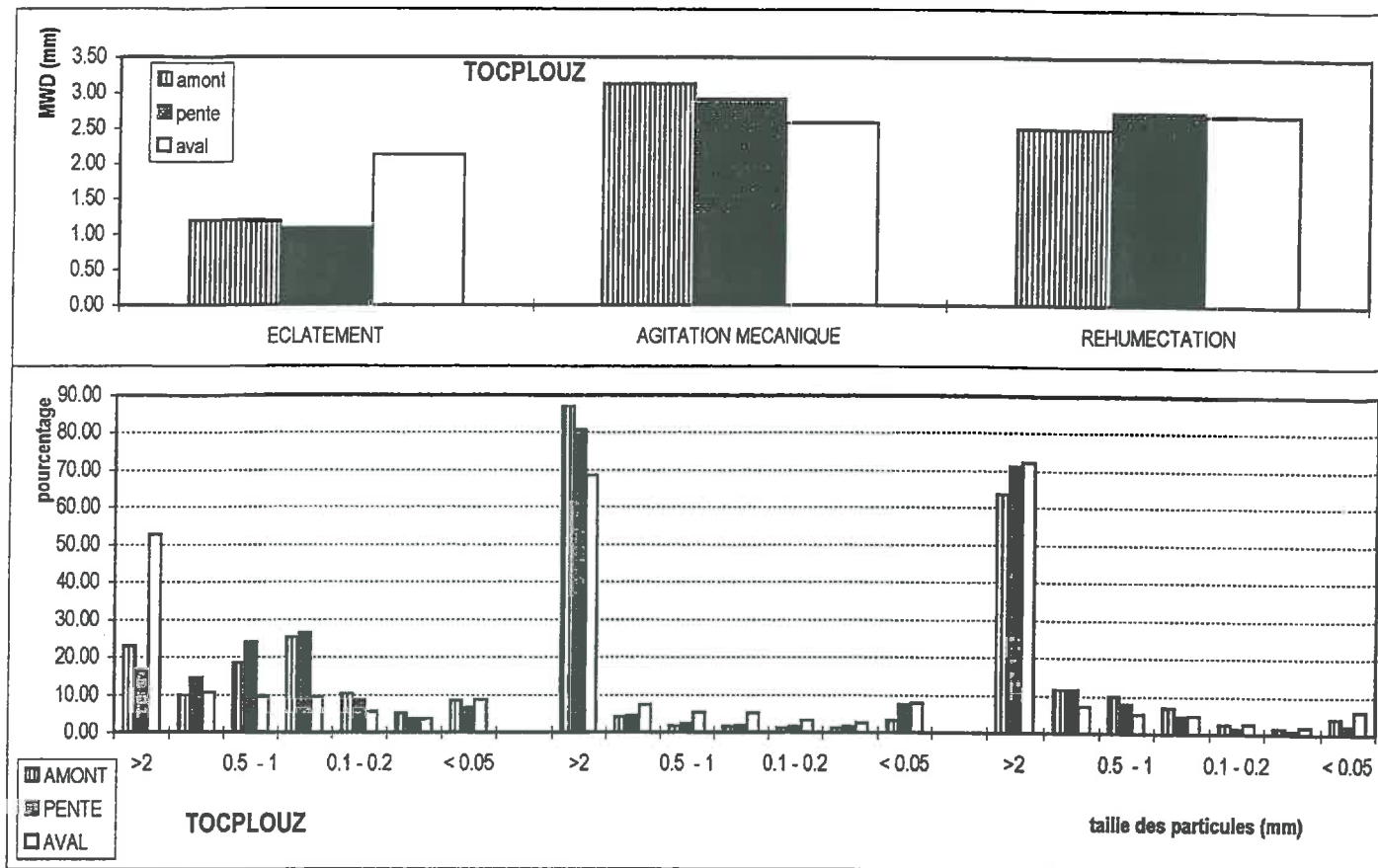


Figure III.7 a et b : Résultats des tests de stabilité pour quatre échantillon de sol à quatre niveaux de pente ; Naizin (b : % de particules en fonction de classes granulométrique en mm)

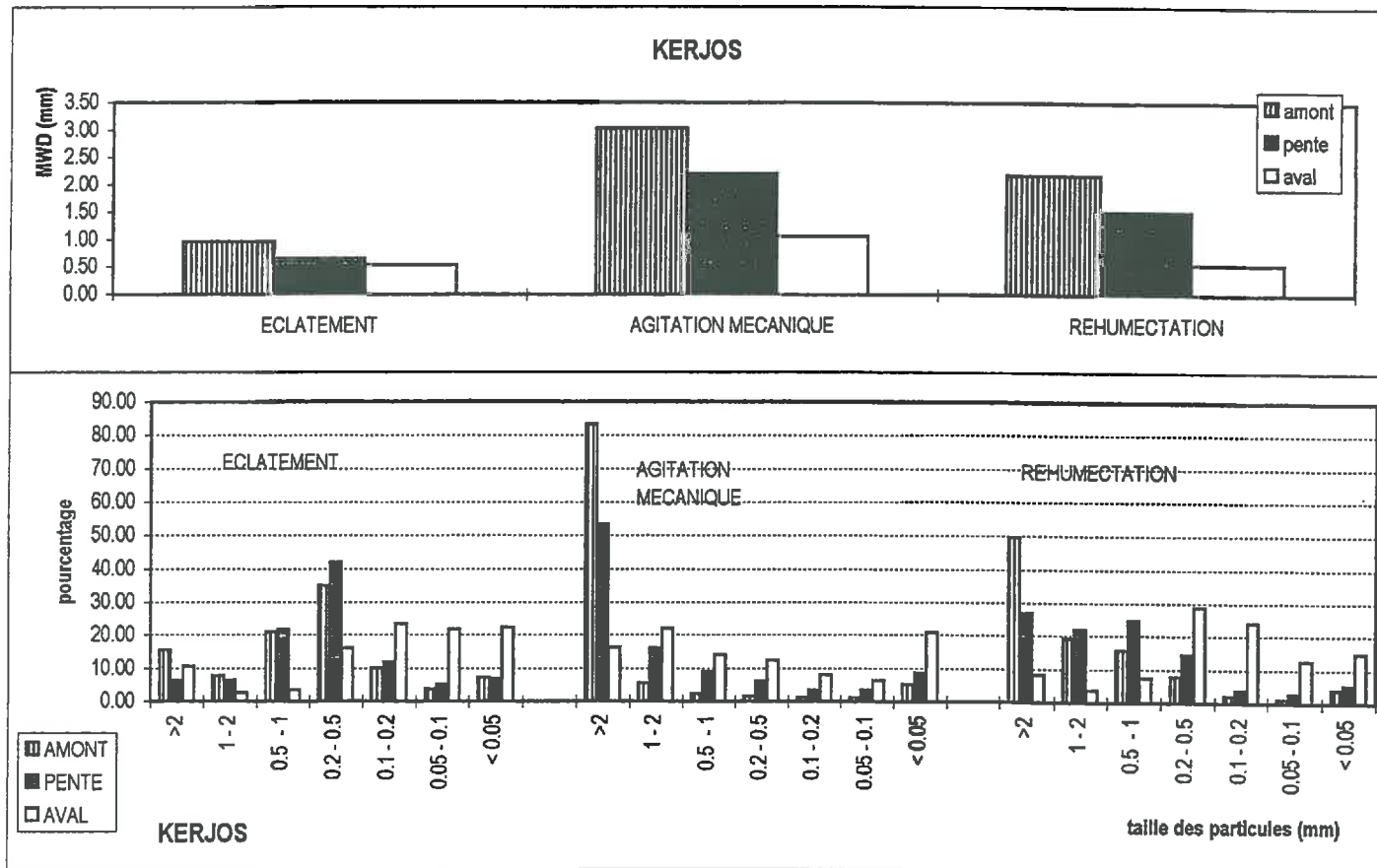


Figure III.8 a et b : Résultats des tests de stabilité pour quatre échantillon de sol à quatre niveaux de pente ; Naizin (b : % de particules en fonction de classes granulométrique en mm)

3.3. Variations spatiales

a. Rennes

Quels que soient les tests, la stabilité structurale augmente d'amont en aval. Ces variations en fonction de la topographie ne sont pas négligeables. Les différences selon les différents niveaux de pente sont : (1) moyennes avec le test par réhumectation ; (2) relativement faibles avec le test par éclatement ; (3) très marquées avec le test par agitation mécanique (fig. III.9).

- Lors des pluies modérées avec un sol sec, la battance du sol est alors très fréquente ($0,4 < MWD < 0,8$). La distribution granulométrique obtenue après le test de réhumectation est semblable, dans des proportions moindres puisque les pourcentages des produits de la taille supérieure à 1 mm sont plus importants que pour le test précédent.
- Pour les averses orageuses, le versant apparaît homogène du point de vue de la stabilité structurale du sol. Le sol est très instable ($MWD < 0,4$ mm). La battance est systématique. Les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont importants. La distribution granulométrique résultante du test d'éclatement est caractérisée par une forte proportion de tailles intermédiaire : de 30 % en amont jusqu'à 45 % à l'aval compris entre 0,2 et 0,5 mm. De plus, l'amont de la parcelle présente une distribution granulométrique importante des produits de la taille inférieure à 0,05 mm, confirmant l'instabilité du sol.
- Au cours des pluies d'hiver (fig. III.9 a et tableau III.2), avec un sol humide, la stabilité du sol augmente progressivement de l'amont à l'aval ; les risques de ruissellement et d'érosion semblent supérieurs en amont qu'en l'aval ($0,8 < MWD < 1,5$). Avec le test par agitation mécanique, la distribution granulométrique se caractérise par 55% des agrégats à l'aval de taille supérieure à 1 mm, 50 % au point de concavité, 35 % au point de convexité et 28 % en amont.

b. Naizin

A Tocplouz (fig. III.7), l'aval se distingue des deux autres niveaux par le test par éclatement. La valeur du diamètre moyen pondéré est supérieure à 2 mm, alors qu'il est d'environ 1 mm sur la pente et en amont. Avec un sol sec et des pluies de fortes intensités, la battance est fréquente sur le domaine amont, occasionnelle à l'aval. Les risques de ruissellement et d'érosion sont faibles au point aval ; en effet, 50% des produits obtenus

après le test ont une taille supérieure à 2 mm. Le test par agitation mécanique et le test par réhumectation indiquent que le sol est très stable en tout point du versant ; les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont très faibles. 60 % à 80 % des agrégats issus des tests ont une taille supérieure à 2 mm.

Inversement aux deux autres sites, à Kerjos (fig. III.8) la stabilité structurale du sol est plus faible à l'aval qu'à l'amont. Les différences entre les trois niveaux de pente sont marquées pour les trois tests:

- avec le test par éclatement, la valeur du diamètre moyen pondéré évolue entre 0,5 et 1 mm, de l'aval à l'amont ; à l'aval, 60 % des particules fournies par le test ont une taille inférieure à 0,2 mm contre environ 20 % sur la pente et en amont ;
- pour le test par agitation mécanique, la valeur du diamètre moyen pondéré est de 1 mm à l'aval et supérieur à 2 mm pour les deux autres niveaux ; 80 % des agrégats fournis par le test ont une taille supérieure à 2 mm en amont, 52 % dans la pente et seulement 18 % à l'aval ;
- au cours du test par réhumectation, la valeur du diamètre moyen pondéré à l'aval est de 0,5 mm, de 1,5 mm dans la pente et 2,1 mm en amont ; les particules de taille supérieure à 2 mm représentent respectivement, en amont, dans la pente maximum et en aval : 50%, 29 % et 9%.

Quelles que soient les conditions d'humidité du sol et le type d'averse, le sol est instable et la battance est systématique à l'aval. Les risques de ruissellement et d'érosion diffus sont alors importants. A l'amont et sur la pente, les sols sont moyennement stables au cours des averses de fortes intensités. Mais au cours des pluies modérées, que le sol soit sec ou humide, le sol est stable et les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont alors limités à très faibles.

3.4. Conclusion

La stabilité structurale des sols est plus forte à Naizin qu'à Rennes ; à Rennes, quelle que soit la période, la stabilité du sol apparaît faible, plus importante cependant en aval qu'en amont ; à Naizin, seule la stabilité du sol à l'aval de la parcelle de Kerjos est faible ; sinon, le sol apparaît très stable, quelle que soit le type d'averse et d'état hydrique du sol.

4. LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

4.1. Méthode et protocole

Un infiltromètre à disques - T.R.I.M.S., Triple Ring Infiltrometer at Multiple Suctions - permet de mesurer la conductivité hydraulique (K) à un potentiel donné (h), proche de la saturation (ANKENY & al., 1990 ; 1991). En répétant les mesures pour différents potentiels, on obtient une courbe $K(h)$, permettant d'analyser les transferts dans le domaine proche de la saturation, correspondant aux conditions de transferts au cours de la genèse du ruissellement (HEDDADJ et al., 1995). Un seul disque est utilisé et maintenu en place au cours des mesures pour les 3 ou 4 potentiels choisis : 1, 3, 6 et 15 hPa. Ce protocole permet de ne pas intégrer la variabilité spatiale du sol en passant d'un potentiel à l'autre (HEDDADJ et al., 1996).

Un lit de sable fin, d'environ 1 à 3 mm, permet un contact intime entre le sol et la membrane du «TRIMS», sans destruction de la surface. Cette mesure intègre les premiers centimètres du sol et une surface circulaire de 80 mm de diamètre, égale au diamètre du disque utilisé.

Ces mesures ont été réalisées :

- sur deux inter-rangs de maïs, l'un affecté par des passages d'engins, l'autre non perturbé
- à pour trois périodes de l'année (Tableau III.1) : un mois après l'implantation de la culture (juin 1994), avant la récolte (octobre 1994) et en fin de saison hivernale (avril 1994).

4.2. Variations temporelles

Les valeurs de conductivité hydraulique, quelles que soient les valeurs de succion, diminuent fortement au cours de l'année culturale, sur les deux types d'inter-rang «tassé» et «non tassé» (fig. III.10). Cette diminution est deux fois plus importante sur l'inter-rang avec passage d'engins que sur l'inter-rang non perturbé. La croûte de dépôt, par elle-même, ne semble pas influencer les valeurs de conductivité, ou tout du moins, pas celles escomptées (fig. III.11). Cependant ce résultat ne peut être confirmé que par des mesures par tensiométrie.

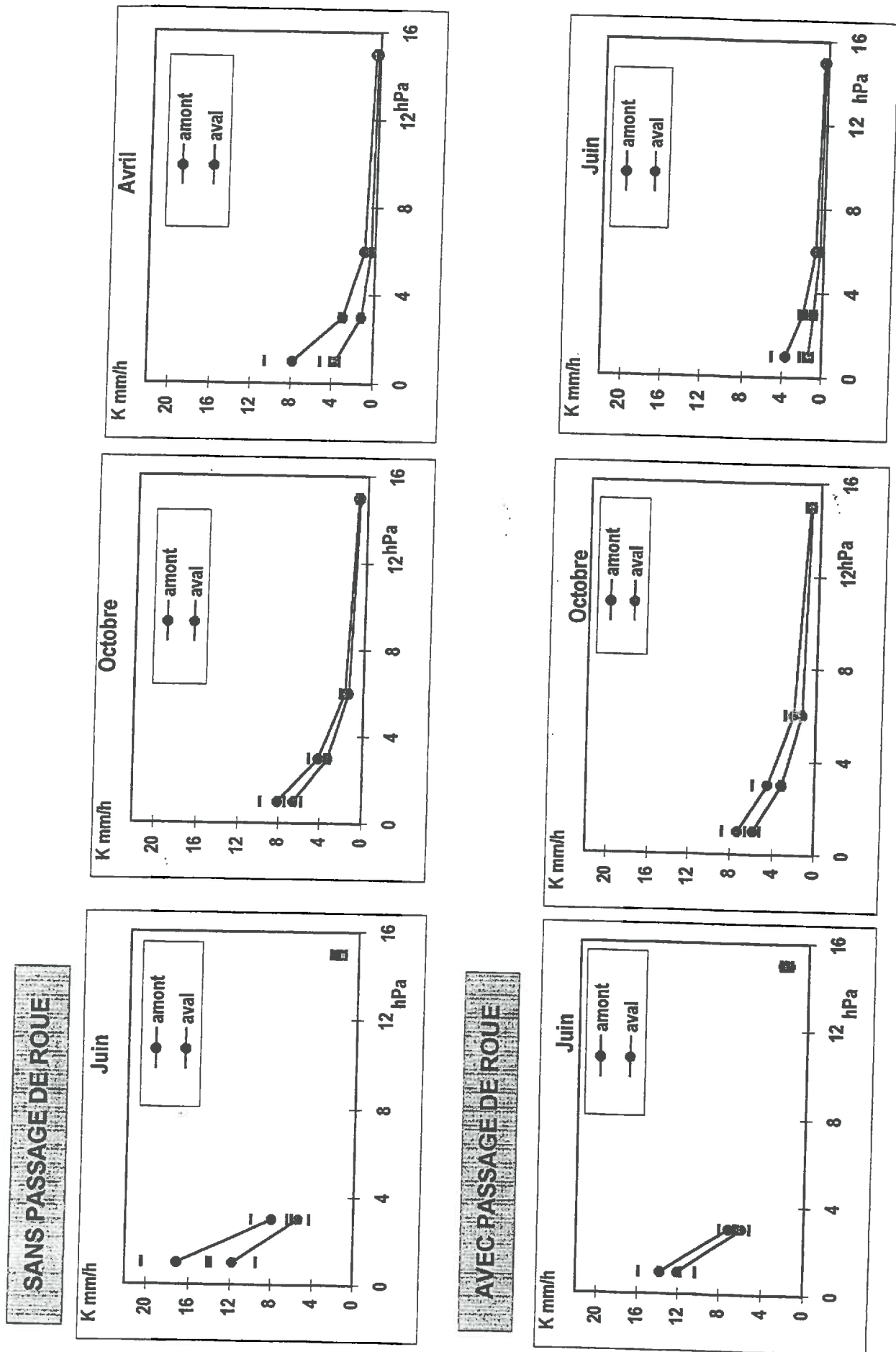


Figure III.10 : valeurs de conductivité hydraulique à saturation en mm/h sur des inter-rangs avec et sans passage de roue

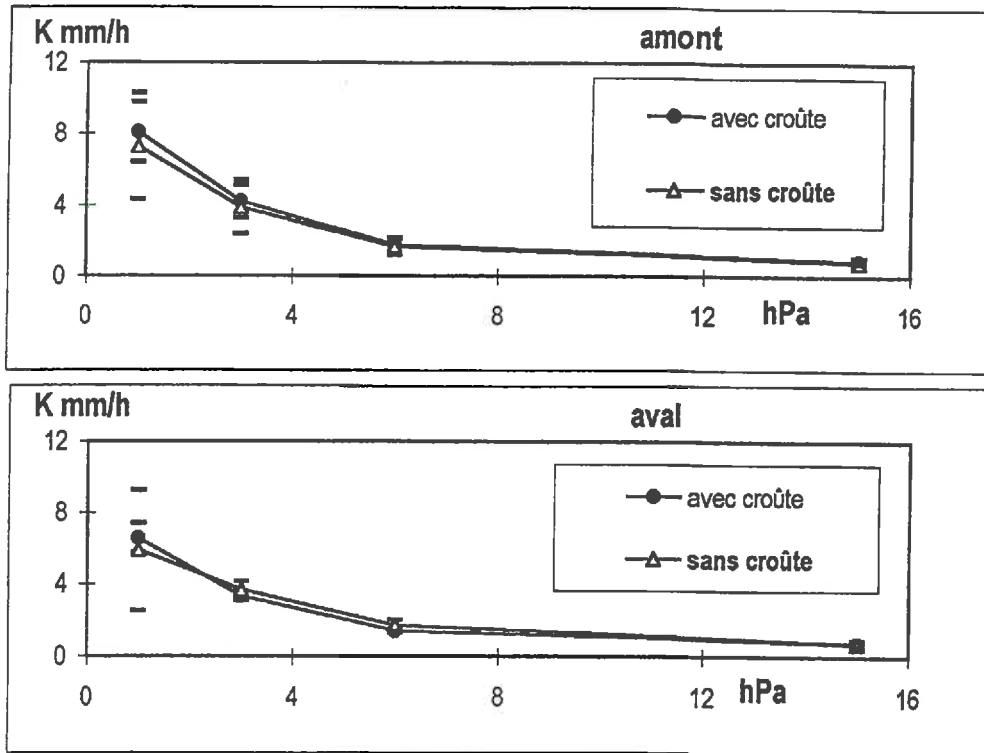


Figure III.11 : valeurs de conductivité hydraulique à saturation (mm/h) en amont et en aval, avec et sans croûte.

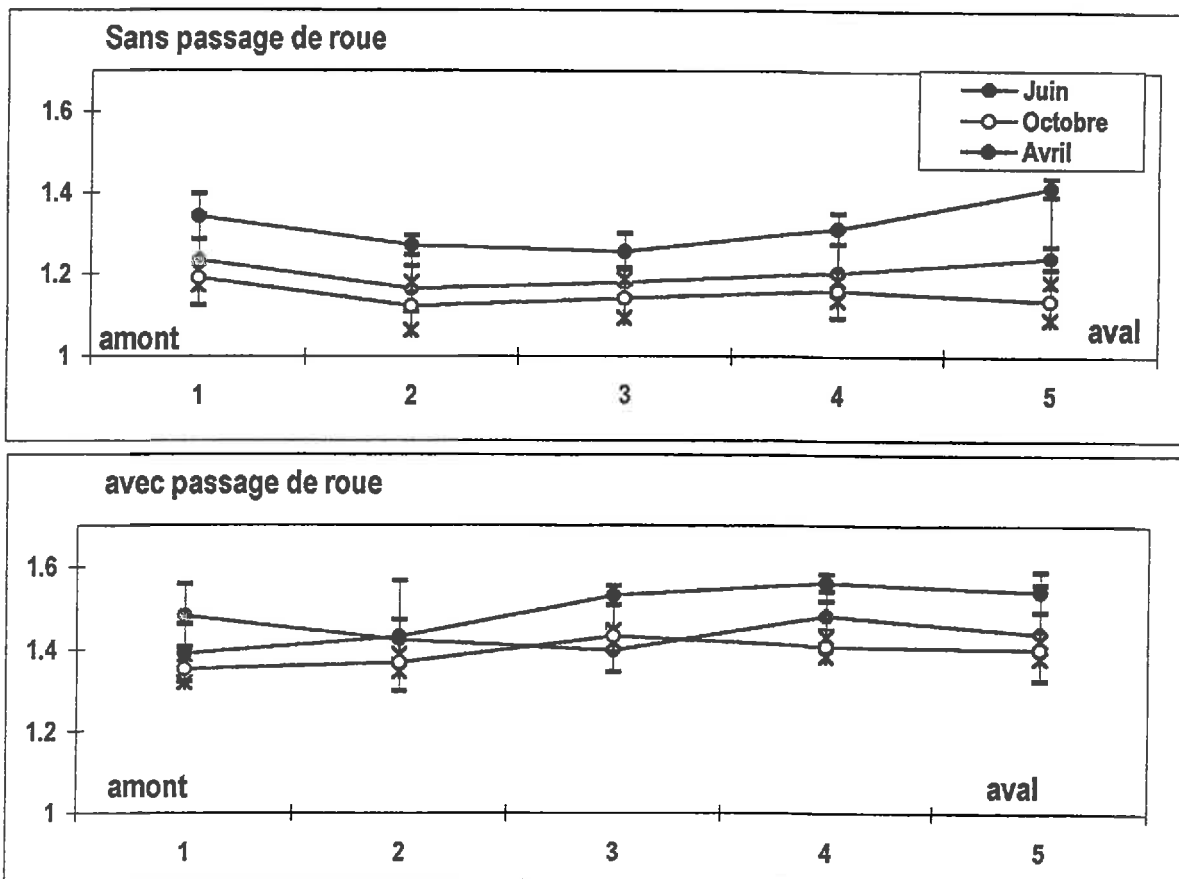


Figure III.12 : valeurs de densités apparentes en fonction de l'inter-rang et du temps

4.3. Variations spatiales

En début de cycle cultural (juin), la conductivité hydraulique est plus forte en amont qu'en aval (fig. III.10). Les différences entre les deux niveaux de pente ne concernent que les potentiels les plus faibles de 1 et 3 hPa. Cette diminution est nettement plus marquée sur l'inter-rang sans passage de roue que sur l'inter-rang avec passage de roue.

Avant la récolte (octobre), les valeurs de conductivité hydraulique sont équivalentes sur le versant pour les deux types d'inter-rang. La parcelle apparaît homogène, du point de vue de son infiltrabilité.

En fin d'hiver (avril), les valeurs de conductivité hydraulique sont plus importantes en amont qu'en aval. Cette différence, jusqu'à 6 hPa, est plus forte pour le rang sans passage de roue qu'avec passage de roue.

4.4 Conclusion

La conductivité hydraulique

- varie peu en fonction de la topographie au début du cycle cultural. Au cours de cette période, le passage d'engin induit une faible diminution de la conductivité aux faibles potentiels et uniquement en amont. Le versant est alors peu différencié

- diminue nettement, à la fin du cycle cultural : (1) de l'amont à l'aval, sur l'inter-rang affecté par le passage d'engin ; (2) de la pente jusqu'au point aval, sur le rang sans trace de roue. Cette diminution est à imputer aux passages d'engins au cours de la récolte à un état hydrique du sol assez élevé.

Ces hypothèses ne sont pas suffisantes pour expliquer ces variations, puisqu'on les observe sur les inter-rangs sans trace de roue. Il est possible qu'au cours des cycles d'humectation et dessiccation, des processus de prises en masse existent, affectant différemment l'horizon de labour selon la topographie. De plus, le développement des croûtes de dépôt n'est pas homogène selon la topographie.

Les variations spatiale et temporelle de la conductivité hydraulique, ne semblent pas induites uniquement par les croûtes de dépôt. Les tests statistiques, réalisés par C. GASCUEL-ODOUX, montre (tableau III.3) : (1) en juin, seules les différences entre inter-rang tassé et non tassé, sont significatives aux différents potentiels ; (2) en octobre, aucune différence significative apparaît entre les inter-rangs tassés et non tassés, et entre l'amont et

l'aval ; (3) en avril, les différences amont - aval et inter-rangs tassés et non tassés sont très significatives. Des mesures de densité apparente, réalisées par HEDDADJ et GASCUEL-ODOUX, indiquent que (fig. III.12) : (1) de juin à octobre, avec ou sans passage d'engin, la porosité évolue peu ; (2) à la fin du cycle cultural, les différences amont - aval sont nettes. Cette évolution au cours du temps, indique des remaniements structuraux, pas seulement d'origine anthropique, qui aboutissent à une hétérogénéité du versant.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Ces mesures physiques et ces observations de la surface du sol sont interprétées en terme de risque de ruissellement et d'érosion diffuse, en fonction de la topographie et des caractéristiques climatiques, correspondant à l'humidité du sol initiale du sol et aux types d'averse (tableaux III.4).

- A Rennes, avec un sol sec et des pluies modérées, soit des conditions de printemps et été, l'occurrence d'apparition du ruissellement est très faible à limitée ; en effet, les valeurs de conductivités hydrauliques sont fortes. Sans ruissellement, bien que la stabilité du sol soit faible, les risques d'érosion diffuse sont aussi limités.
- Avec un sol sec et des pluies de fortes intensités en fin de printemps ou en été; les valeurs de conductivités sont plus faibles ; les croûtes de dépôt s'établissent ou sont établies ; le sol apparaît instable ; les risques de ruissellement et d'érosion diffuse sont alors importants.
- Avec un sol humide, l'occurrence du ruissellement semble plus importante en aval qu'en amont, alors que celle d'érosion diffuse semble plus importante en amont qu'en aval.

Les différences entre Rennes, Tocplouz et Kerjos sont importantes pour les tests de stabilité structurale et l'analyse des états de surface (tableau III.5). A partir des tests, on peut conclure que, quelle que soit l'état hydrique du sol et avec des pluies modérées, l'occurrence de ruissellement et d'érosion diffuse est beaucoup plus importante à Rennes qu'à Naizin ; avec des pluies violentes, le risque sur le site de Tocplouz apparaît très faible.

Les variations spatiales en fonction de la topographie, quels que soient les sites, sont fortes et beaucoup plus importantes que ne l'aurait laisser présumer la description sommaire des sites réalisée au chapitre II. Il apparaît alors essentiel de caractériser les processus de ruissellement et d'érosion diffuse en fonction de la topographie.

SAISON	SOL	PLUIE	AVAL	CONCAVITE	PENTE	CONVEXITE	AMONT	
PRINTEMPS ETE	sec	modérée	12	0,8 mm	22,2	0,65 mm	14	K(1) mm/h MWD humidité à 5 cm Etat de surface
			25,5	24,2		24,9	25	
			minimum	à		maximum		
ETE	sec	orageuse	limité	limité	26,9	très faible	très faible	K(1) mm/h MWD humidité à 5 cm Etat de surface
			fréquent	fréquent		fréquent	fréquent	
			-	-		-	-	
	6	0,38 mm	fissures et maximum de développement de croûte	8	K(1) mm/h MWD humidité à 5 cm Etat de surface			
	28,6	27,6		0,38 mm		0,3 mm		
	fréquent	fréquent		27		26		
AUTOMNE HIVER	humide	modérée	fréquent	fréquent	34,8	fréquent	fréquent	K(1) mm/h MWD humidité à 5 cm Etat de surface
			important	important		important	important	
			++	++		++	++	
4	1,3 mm	perturbée par la faune	8	K(1) mm/h MWD humidité à 5 cm Etat de surface				
1,5 mm	35		0,9 mm		0,8 mm			
35	35		33		33,5			
AUTOMNE HIVER	sec	modérée	fréquent	fréquent	34,8	occasionnelle	occasionnelle	K(1) mm/h MWD humidité à 5 cm Etat de surface
			limité	limité		fréquent	fréquent	
			+-	+-		+-	+-	

Tableau III.4 : risque d'apparition du ruissellement et de l'érosion diffuse en fonction des caractéristiques physiques de la couche superficielle ; Rennes

suction (hPa)		1	3	6	15
Juin	Roue	**	**	/	***
	Site			/	
	interaction			/	
Octobre	Roue				
	Site	**	**	**	
	interaction				
Avril	Roue	***	***	***	***
	Site	***	***	**	
	interaction		**	**	

: non significatif

** : significatif (seuil de 5 %)

*** : hautement significatif (seuil de 1 %)

/ : pas de mesure

Tableau III.3 : résultats des tests statistiques réalisés sur les mesures de conductivité hydraulique

SITE	sol sec	pluie modérée	AVAL	CONCAVITE	PENTE	CONVEXITE	AMONT
RENNES			0,8 mm	0,8 mm		0,65 mm	0,5 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		fréquent	fréquent		fréquent	fréquent
TOCPOUZ			2,6 mm		2,7 mm		2,5 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		très faible		très faible		très faible
KERJOS			0,5 mm		1,5 mm		2,2 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		fréquent		limité		très faible
SITE	sol sec	pluie orgeuse	AVAL	CONCAVITE	PENTE	CONVEXITE	AMONT
RENNES			0,4 mm	0,4 mm		0,4mm	0,3 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		important	important		important	important
TOCPOUZ			2,1 mm		1,0 mm		1,2 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		très faible		fréquent		fréquent
KERJOS			0,5 mm		0,6 mm		1,0 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		fréquent		fréquent		fréquent
SITE	sol humide	pluie modérée	AVAL	CONCAVITE	PENTE	CONVEXITE	AMONT
RENNES			1,5 mm	1,3 mm		0,9 mm	0,8 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		limité	limité		fréquent	fréquent
TOCPOUZ			3,1 mm		2,9 mm		2,6 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		très faible		très faible		très faible
KERJOS			1,1 mm		2,2 mm		3,0 mm
	risque ruissellement et érosion diffuse		limité		très faible		rare

Tableau III.5 : comparaison de Rennes et Naizin pour les risques de ruissellement et d'érosion diffuse établis à partir des tests de stabilité structurale

CARACTÉRISATION DU RUISSELLEMENT

Au cours d'une première période, le ruissellement est de type hortonien. La redistribution des eaux est importante à l'intérieur de la parcelle, sans transfert ou presque, vers le cours d'eau.

Pendant une deuxième période (orages estivaux), les deux mécanismes peuvent exister en fonction des caractéristiques pédologiques et topographiques des parcelles. La redistribution des eaux à l'intérieur de la parcelle est importante. Selon les conditions climatiques, il peut y avoir transfert vers le cours d'eau.

Au cours de la troisième période, un ruissellement par saturation est observé quel que soit le site. Le ruissellement est fréquent à l'aval de la parcelle. Les sorties vers le cours d'eau sont abondantes.

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, les transferts par ruissellement sur une topographie convexo-concave de pente moyenne sont quantifiés. Deux contextes pédoclimatiques sont abordés : la parcelle de Rennes (§1) et les sites situés sur le bassin de Naizin (§2). Le troisième paragraphe propose des schémas conceptuels des mécanismes intervenants, en fonction de la topographie.

L'analyse détaillée sera réalisée pour le site de Rennes. Elle traitera d'une part, des facteurs pertinents du ruissellement et d'autre part, des aspects de déclenchement du ruissellement à l'intérieur d'une averse, et de la notion de seuil de déclenchement (§ 1).

1. RESULTATS SUR LA PARCELLE DE RENNES, PÉRIODE 1994 - 1995.

1.1. Résultats

1.1.1. Description des variations spatiales et temporelles

Les dispositifs ont été relevés pendant une année (mai 1994 à avril 1995), après chaque épisode de pluie caractérisé, soit par un cumul pluviométrique supérieur à 4 mm, soit par une intensité moyenne horaire supérieure à 2,5 mm/h. Une chronique des volumes ruisselés par averse et par niveau de pente a été établie sur 44 averses (fig. IV.1). Des coefficients moyens de ruissellement ont été calculés à partir des trois dispositifs d'un même niveau de pente (fig IV.2). Les trois périodes définies dans le chapitre II sont utilisées pour l'analyse des données.

Au cours de la première période (d'avril à juin, chap. II et III), quel que soit le niveau de pente, le ruissellement est faible à nul pour la majorité des averses. Il est plus fréquent et conséquent en amont (du haut de la convexité jusqu'à la pente) qu'à l'aval de la parcelle (de la pente jusqu'à l'aval). Les dispositifs situés sur le replat aval sont toujours vides. Il n'y a pas de sortie directe d'eau, hors de la parcelle. Trois événements sur 8 provoquent du ruissellement. Les coefficients de ruissellement diminuent en fonction de la longueur de pente, au cours de 2 événements, et augmentent du haut de la convexité jusqu'à la pente pour l'événement du 26 mai 1994.

Le ruissellement est faible sur l'ensemble du versant. L'eau ruisselée s'infiltré lors de son cheminement, en particulier au point de concavité ; elle n'atteint jamais le replat aval.

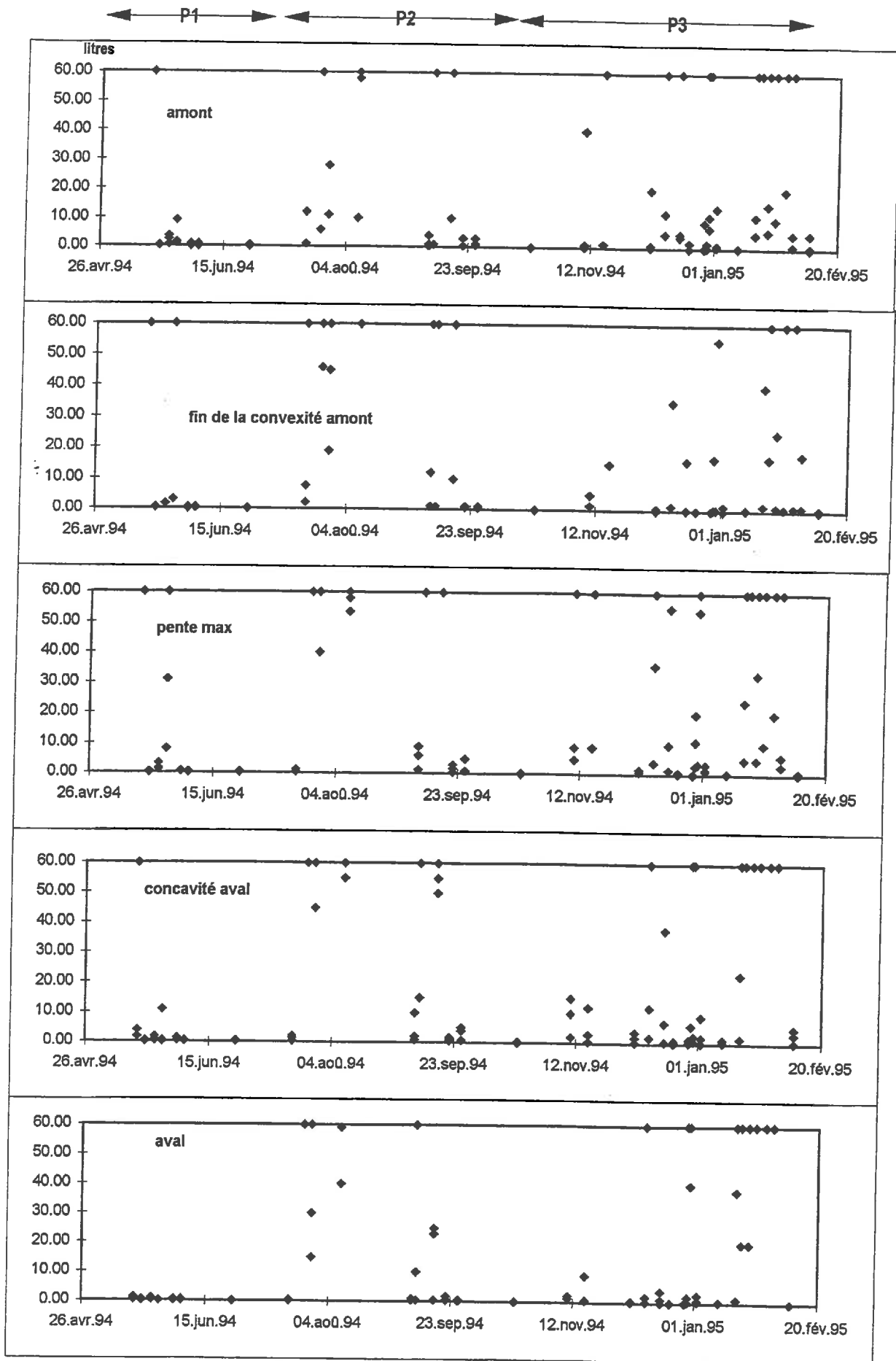


Figure IV.1 : chronique des volumes ruisselés, Rennes, 1994-1995

Du mois de juillet à octobre 1994, deux averses analysées sur dix n'ont pas déclenchées de ruissellement, deux averses ont provoqué du ruissellement, soit strictement en haut, soit en bas de la convexité et cinq averses sur l'ensemble de la parcelle. Les débordements les plus fréquents sont sur la pente. Les sorties d'eau de ruissellement à l'aval de la parcelle ont lieu au cours de 5 averses ; pour ce niveau de pente, la valeur maximum du coefficient de ruissellement a été de 2,5 % (fig. IV.2). Le ruissellement est au moins 2 fois plus important durant les épisodes de la deuxième période qu'au cours de la première (fig IV.2). Pour la majorité des événements (4 sur 9), le coefficient de ruissellement diminue en fonction de la longueur de pente. Au cours de ces averses, le ruissellement reste diffus, sans phénomène de concentration le long de la pente. Trois événements font exception : celui du 28 juillet 94, celui du 6 septembre et celui 9 septembre 94. Pour ceux-ci, les phénomènes de concentration sont mis en évidence par une augmentation du coefficient de ruissellement le long de la pente, soit entre le haut et le bas de la convexité, soit entre la pente et la concavité.

Au cours de la troisième période, les averses provoquant du ruissellement sont très nombreuses (26 sur 27 analysées). A l'inverse des deux premières, le ruissellement est plus important à l'aval qu'à l'amont de la parcelle, particulièrement en fin de période (fig IV.1). Les processus de ruissellement en fonction de la topographie sont très différents des deux autres périodes (fig IV. 2).

Au cours de 5 averses, les coefficients de ruissellement diminuent avec la longueur de pente. Les rapports des coefficients de ruissellement entre la pente, la concavité et, ou l'aval diminuent de 1,75 à 1,25 de décembre 1994 à janvier 1995. L'infiltration est de moins en moins importante d'une averse à l'autre, de la pente jusqu'à l'aval de la parcelle.

Les 21 autres averses ou trains d'averse indiquent des volumes ruisselés qui augmentent en proportion avec la longueur de pente. Dans ce cas, le coefficient de ruissellement croît entre les niveaux concernés. En début de période, la concentration du ruissellement est effective du bas de la convexité jusqu'à la pente, de façon identique à la deuxième période. A la fin de cette troisième période, le coefficient de ruissellement diminue de l'amont de la parcelle jusqu'à la pente, pour croître à nouveau de la pente jusqu'à la concavité. A partir de ce niveau jusqu'au replat aval, les trois cas existent : le coefficient de ruissellement diminue (10 sur 16), est égal (2 sur 16) ou augmente (4 sur 16). Ce dernier cas a lieu à partir du 10 février.

Le ruissellement reste diffus de l'amont jusqu'à la pente. De la pente jusqu'au replat aval, l'eau ruisselée ne semble pas pouvoir s'infiltrer et les phénomènes de concentration de l'eau sont importants.

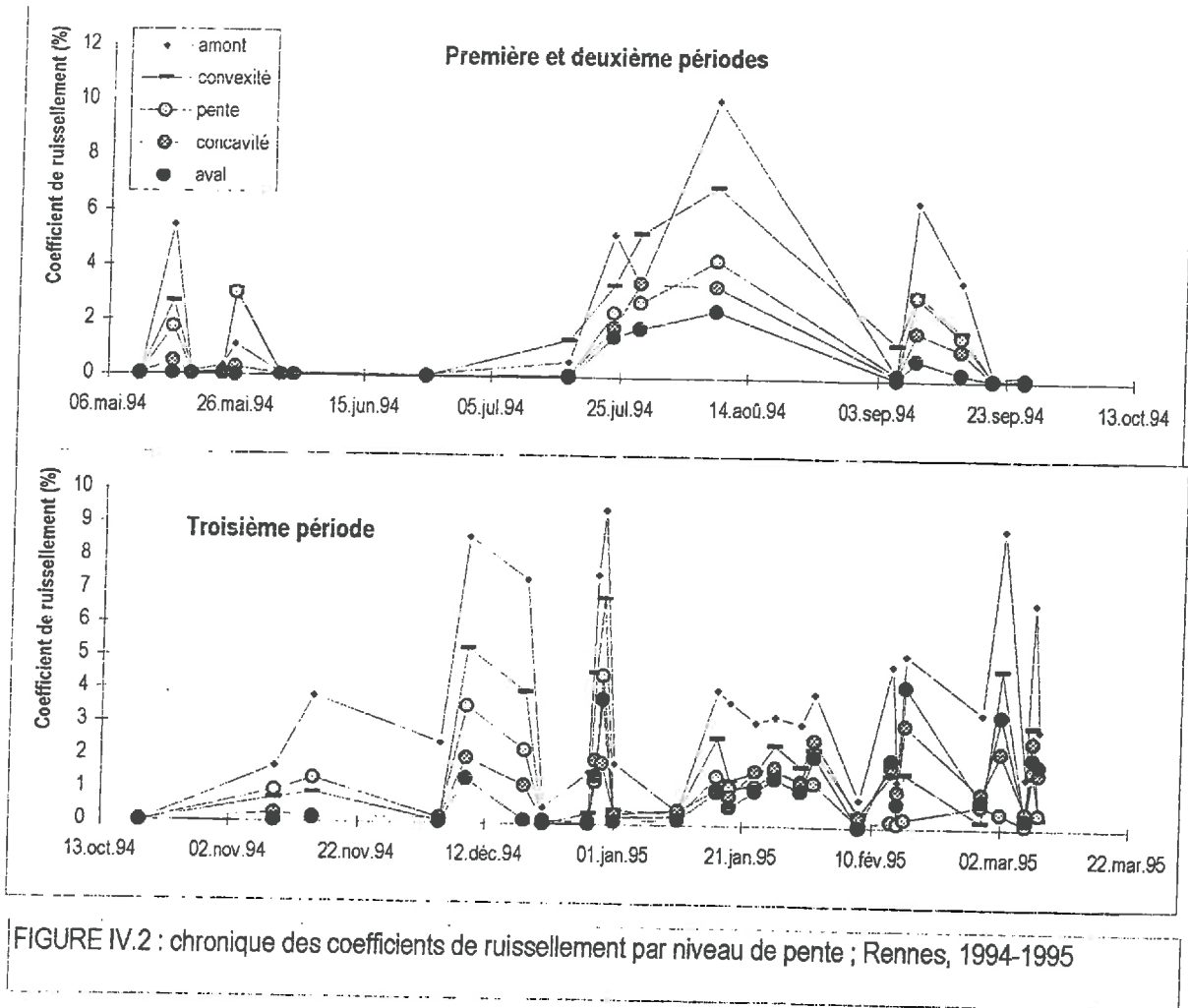


FIGURE IV.2 : chronique des coefficients de ruissellement par niveau de pente ; Rennes, 1994-1995



Les chroniques des volumes ruisselés et des coefficients de ruissellement montrent une dynamique spatiale et temporelle du ruissellement.

La variabilité des volumes ruisselés (fig. IV.3) pour un même niveau de pente, ne semble dépendre ni de la position dans le versant, ni des différentes périodes. La représentation des valeurs moyennes, sur trois répétitions seulement par niveau de pente, en fonction de l'écart type présente une forme en «cloche». Elle ne peut être significative de la variabilité spatiale et temporelle puisque la limite de capacité du fût totalisateur (60 litres) masque cette variabilité. Cet aspect est abordé par des analyses par classe de volume ruisselé, par niveau de pente.

1.1.2. Analyse de la distribution des volumes ruisselés

Un histogramme de fréquence, calculé sur l'ensemble des dispositifs de la parcelle et sur l'année culturale, (fig. IV.4) montre un continuum. Le fort pourcentage attribué à la classe des volumes ruisselés supérieurs à 60 litres est lié à la capacité du fût, qui masque sans doute un fort étalement des volumes ruisselés au - delà des 60 litres.

Trois classes peuvent être distinguées arbitrairement à partir de l'histogramme et interprétées à partir des observations de terrain. En effet, les états de surface renseignent sur les chemins empruntés par l'eau (chapitre III). Ce sont les croûtes sédimentaires, les filets d'eau et les flaques. En faisant l'hypothèse d'un écoulement laminaire (EMMET, 1978), on peut calculer la hauteur de la lame d'eau correspondante.

- le totalisateur est vide (volume ruisselé inférieur à 1 litre) ; il n'y a pas de ruissellement ; la hauteur de la lame d'eau est égale à une valeur maximum de 0,2 mm, avec la plus courte longueur de pente (Rennes) ; une telle hauteur indique un écoulement très proche du dispositif ne pouvant être qualifié de ruissellement ;
- le volume ruisselé est compris entre 1 et 10 litres, le ruissellement est faible et apparaît localement au point considéré ; pour des volumes de 10 litres, la hauteur de la lame d'eau a des valeurs comprises entre 0,4 et 2 mm ; même avec une rugosité du sol très réduite, cette hauteur représente des écoulements faibles et locaux ;
- Le totalisateur est plein à débordé (volume ruisselé compris entre 10 et 60 litres, volume maximum) ; le ruissellement est localement important et apparaît au point considéré ; pour les volumes égaux à 60 litres, la hauteur de la lame d'eau est de 2 à 12 mm ; le ruissellement peut être considéré comme généralisé, pour des rugosités du sol réduites. Les hauteurs de la lame d'eau sont calculées en considérant que le volume recueillie correspond à l'ensemble de la surface contributive amont des dispositifs :

$$H = \frac{v}{l * L}$$

H : hauteur de la lame d'eau (m)

v : volume ruisselé (m)

L : largeur de l'inter -rang (m)

l : longueur de l'inter -rang (m)

- L'ensemble du versant contribue au ruissellement, si au moins un totalisateur par situation topographique a débordé.

Dans le cas de l'analyse d'une averse, les distances parcourues par l'eau sont croissantes de la première à la dernière classe, si le ruissellement se propage sans s'infiltrer.

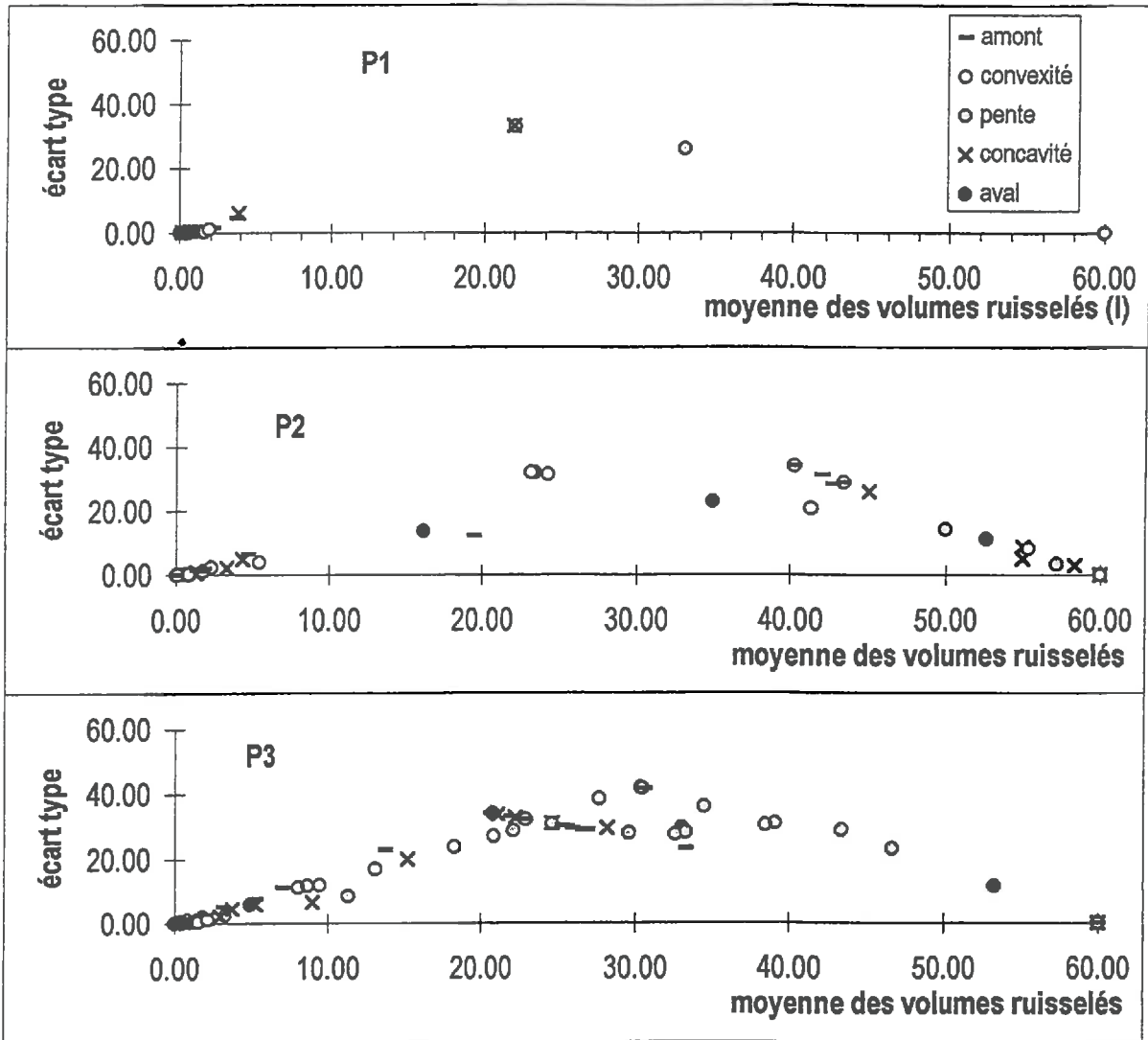


Figure VI.3 : l'écart type en fonction de la moyenne des volumes ruisselés des trois dispositifs d'un même niveau topographique

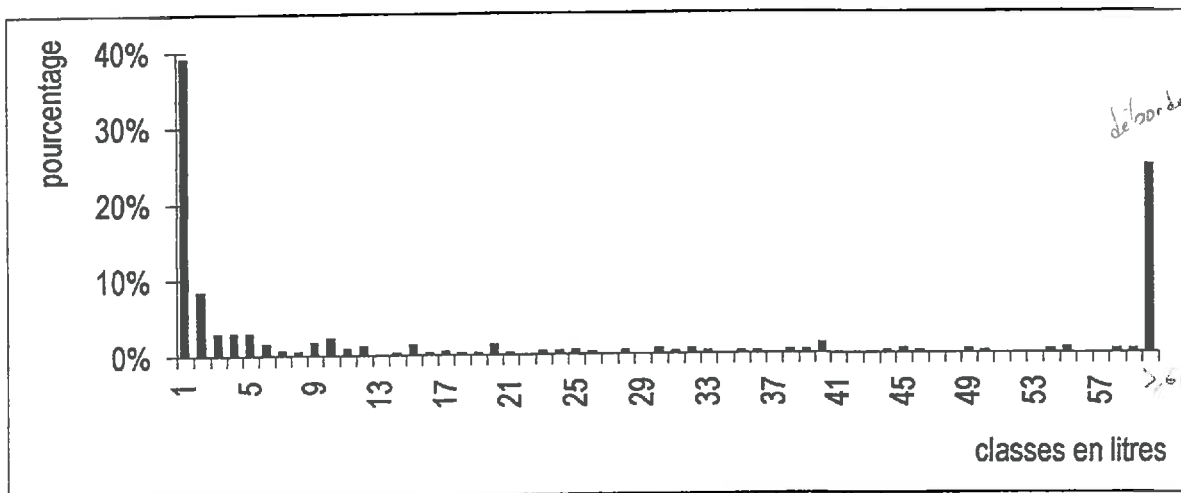


Figure IV.4 : histogramme de fréquence des volumes ruisselés ; Rennes, 1994-1995

En considérant le volume ruisselé de chaque niveau de pente, selon ces trois classes, il est alors possible de délimiter les distances sur le versant, parcourues par l'eau en surface. GALLIEN (1994) indique des volumes ruisselés, au Pays de Caux, de 206 litres (minimum) à 5150 litres (maximum) pour 20 m² et 5150 à 17350 litres pour 500 m², soit un rapport des volumes égaux au rapport des surfaces.

L'histogramme permet d'évaluer l'importance des trois classes de volumes ruisselés :

- Les volumes inférieurs à 1 litre correspondent à la classe la plus importante (plus du tiers de la population, soit 39%) ;
 - les volumes compris entre 1 et 10 litres représentent à peine un quart des relevés par dispositif (23 %) ;
- les volumes compris entre 10 et 60 litres représentent 38 % des relevés de l'année culturale, dont 25 % supérieurs à 60 litres.

Sur le versant, au cours de la première période, 25 % des dispositifs ont débordé. L'analyse d'au moins un débordement par événement, (tableau IV.1) indique que les pourcentages sont relativement importants en deuxième période (67% des événements analysés) et en troisième période (52%). La proportion des dispositifs débordés par rapport à l'ensemble des dispositifs ruisselants (tableau IV.1) reste toutefois acceptable puisque comprise entre 2,7 % (première période) et 20 % (deuxième période).

La taille du totalisateur (60 litres), apparaît donc acceptable. L'alternative, certes beaucoup plus lourdes à mettre en oeuvre, serait d'avoir un partiteur permettant d'avoir une idée des volumes plus important. Cependant, la fiabilité du partiteur testé (CAYOT, 1993) est faible. Cette solution a donc été abandonnée.

	Période	événements comprenant au moins 1 dispositif de débordé				
par événements	P1	25 %				
	P2	67 %				
	P3	52 %				
		< 1l	1<VR<10l	VR> 10l	VR> 60l	$\frac{VR>60}{VR>1} \%$
par dispositif	P1	73 %	15 %	12 %	10 %	2,7 %
	P2	27 %	17 %	55 %	34 %	20 %
	P3	32 %	24 %	44 %	26 %	19 %

tableau IV.1 : % du nombre d'événement où au moins un dispositif a débordé ; % par classe de volumes ruisselés

☞ Une averse ou un train d'averse provoquant des volumes ruisselés supérieurs à 1 litre, pour au moins un dispositif installé sur la parcelle, est appelé événement ruisselant. De même, un dispositif dont le volume ruisselé est supérieur à 1 litre est défini comme dispositif ruisselant.

1.1.3. Analyse par position dans le versant

Dans cette analyse, le rôle de chaque niveau de pente est discuté sans prendre en compte la variabilité dans le temps. La répartition du ruissellement peut être calculée pour les 5 niveaux de pente selon quatre classes (tableau IV.2) ou d'une manière plus précise pour chaque inter-rang (tableau IV.3).

population	niveau	0-1 l	1 - 10 l	> 10 l	total	débordé
130	amont	38 %	23 %	39 %	100 %	20 %
123	convexité	41 %	20 %	39 %	100 %	24 %
122	pente	34 %	28 %	38 %	100 %	22 %
132	concavité	34 %	24 %	42 %	100 %	30 %
130	aval	49 %	11 %	40 %	100 %	25 %

tableau IV.2 : % par classe de volumes ruisselés en fonction du niveau de pente

La variabilité le long du versant semble faible. Néanmoins, on distingue : (1) l'aval où le ruissellement est nul pour 50 % des relevés et rarement «local» (11% des relevés). La réponse à l'aval, dans 74% des cas, est sensiblement «débordé» ou «nul» ; (2) la concavité où les débordements sont les plus fréquents ; (3) de l'amont jusqu'à la pente, paraissant relativement homogène.

La comparaison de la réponse des trois inter-rangs choisis par niveau de pente a été analysée (tableau IV.3). Le ruissellement est aussi fréquent sur les 3 inter-rang (R++++), mais non équivalent. Les différences entre les inter-rangs d'un même niveau de pente diminue d'amont jusque dans la pente et de la concavité jusqu'en aval du versant. Ces variations sont en partie liées à la fréquence des ruissellements. En effet, les dispositifs sont fréquemment pleins au point amont et au niveau de la concavité, et vides à l'aval de la parcelle.

Pour l'ensemble des niveaux, les inter-rangs ne peuvent pas être considérés comme identiques. MOHANTY & al (1994) montrent que les variabilités de la conductivité

hydraulique sur un même niveau de pente sont importantes. Le ruissellement varie donc d'un inter-rang à l'autre.

Pour chaque période, l'occurrence du ruissellement par relevé est calculée (tableau IV.4).

En première période, la variabilité est faible dans la pente, au point de concavité et à l'aval. Bien qu'elle ne soit pas forte en haut et en bas du point de convexité, elle est relativement plus grande à l'aval de ce point.

Au cours des deuxième et troisième période, la variabilité entre les trois inter-rangs est importante pour les 5 situations topographiques.

1.1.4. Analyse temporelle

Lorsque les différents niveaux topographiques sont confondus (tableau IV.1), on voit que la première période est caractérisée par un faible ruissellement alors qu'au cours des périodes 2 et 3, les valeurs de ruissellement sont proches. Ces deux périodes sont caractérisées par : (1) environ le tiers des relevés sont inférieurs à 1 litre ; il n'y a pas ruissellement ; (2) un tiers à un quart des relevés conduisent à identifier un ruissellement conséquent sur l'ensemble du versant.

Si l'on observe pour chaque position dans le versant, l'évolution de l'occurrence de ruissellement, des trois inter-rangs, en fonction du temps (tableau IV.4), il apparaît que : (1) quel que soient les inter-rangs et le niveau de pente, le ruissellement est plus important en deuxième et troisième période ; (2) les fortes occurrences de ruissellement s'observent dans la pente au cours de la deuxième période et sur l'ensemble du versant durant la troisième période.

Cette analyse confirme le découpage de l'année culturale en trois périodes :

- La première période est marquée par un faible ruissellement ;
- Au cours de la deuxième période, le nombre de débordements est relativement important ;
- Au cours de la période hivernale, le ruissellement est conséquent sur l'ensemble du versant.

Les différences entre les trois périodes portent sur la répartition des valeurs le long de la pente.

position	AMONT			CONVEXITE			PENTE		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R+++	23%	2%	61%	21%	2%	58%	30%	9%	33%
R++	18%	32%	11%	30%	14%	2%	23%	14%	7%
R+	23%	25%	2%	7%	40%	0%	2%	35%	16%
3R+	5%	5%	5%	5%	5%	5%	12%	12%	12%
3R0	16%	16%	16%	28%	28%	28%	26%	26%	26%
1 PL	16%	20%	5%	9%	12%	7%	7%	5%	7%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	80%	80%	80%	67%	67%	67%	63%	63%	63%

position	CONCAVITE			AVAL		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R+++	27%	41%	7%	9%	27%	25%
R++	5%	11%	32%	5%	9%	14%
R+	30%	9%	16%	27%	5%	7%
3R+	18%	18%	18%	14%	14%	14%
3R0	14%	14%	14%	36%	36%	36%
1 PL	7%	7%	14%	9%	9%	5%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	68%	68%	68%	50%	50%	50%

ANNEE CULTURALE

Légende

- R+++ volume ruisselé > aux volumes ruisselés des deux autres inter-rangs voisins
- R++ volume ruisselé compris entre les deux autres volumes des deux inter-rangs voisins
- R+ volume ruisselé < aux deux autres volumes des deux inter-rangs voisins

- 3R+ les trois volumes égaux
- 3R0 tous vides ou < 1 litre
- 1 PL volume ruisselé > à 1 litre ; les deux autres vides
- R++++ = R+++ + R++ + R+ + 1PL

Tableau IV.3 : importance du ruissellement en fonction des trois inter-rangs par niveau de pente ; Rennes, 1994-1995

position	AMONT			CONVEXITE			PENITE		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R++	30%	0%	20%	10%	0%	0%	10%	0%	20%
R+	0%	20%	10%	10%	10%	0%	0%	20%	0%
3R+	10%	10%	10%	10%	10%	10%	20%	20%	20%
3R0	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
3R-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	10%	0%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	40%	30%	20%	10%	50%	40%	30%	20%	40%

position	CONCAVITE			AVAL		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R++	40%	0%	0%	0%	0%	0%
R+	10%	10%	0%	0%	0%	0%
3R+	10%	10%	10%	10%	10%	10%
3R0	40%	40%	40%	80%	80%	80%
3R-	0%	30%	30%	10%	10%	0%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	50%	50%	40%	20%	20%	20%

IV.a PERIODE 1

position	AMONT			CONVEXITE			PENITE		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R++	63%	0%	50%	25%	0%	0%	63%	0%	0%
R+	13%	13%	25%	13%	13%	13%	0%	38%	13%
3R+	0%	0%	0%	13%	13%	13%	25%	25%	25%
3R0	13%	13%	13%	38%	38%	38%	13%	13%	13%
3R-	13%	25%	13%	0%	0%	0%	0%	13%	13%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	75%	25%	53%	38%	13%	83%	38%	38%	38%

IV.b PERIODE 2

position	CONCAVITE			AVAL		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R++	13%	25%	13%	0%	38%	38%
R+	0%	25%	63%	50%	0%	25%
3R+	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3R0	13%	13%	13%	38%	38%	38%
3R-	0%	0%	0%	13%	13%	13%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	13%	38%	13%	13%	50%	38%

position	AMONT			CONVEXITE			PENITE		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R++	27%	4%	8%	24%	4%	68%	28%	16%	48%
R+	35%	42%	8%	40%	8%	4%	36%	12%	4%
3R+	4%	4%	0%	0%	0%	0%	4%	4%	16%
3R0	4%	4%	4%	16%	16%	16%	20%	20%	20%
3R-	23%	27%	4%	16%	20%	12%	8%	0%	8%
total	169%	165%	188%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	35%	35%	38%	40%	24%	80%	40%	20%	60%

position	CONCAVITE			AVAL		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
R++	8%	17%	8%	15%	35%	27%
R+	46%	4%	42%	8%	12%	15%
3R+	27%	27%	27%	19%	19%	19%
3R0	4%	4%	4%	35%	19%	13%
3R-	12%	0%	12%	8%	8%	8%
total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
R++++	46%	31%	46%	42%	62%	54%

IV.c PERIODE 3

Tableau IV.4 : importance du ruissellement en fonction des trois inter-rangs par période ; Rennes, 1994-1995

1.2. Discussion

Au cours de la première période, l'apparition des premiers ruissellements se localise préférentiellement à l'amont de la parcelle, en liaison avec l'apparition plus précoce de la croûte structurale (chapitre III). Ce ruissellement faible et local (volume compris entre 1 et 10 litres) induit une croûte de dépôt par plaque (chapitre III). Les averses suivantes engendrent un ruissellement plus conséquent (volume > à 10 litres). Il n'y a jamais de sortie directe d'eau ruisselée vers le cours d'eau. Le tableau IV.5 indique que : (1) au point amont et au point de concavité, le ruissellement apparaît rarement sur les trois inter-rangs ; (2) au point de convexité et au niveau de la pente, la réponse est binaire : il y a ruissellement sur les trois inter-rangs ou pas du tout. La variabilité de la conductivité hydraulique du sol peut être importante pour des inter-rangs situés à une même position dans le versant (MOHANTY & al, 1994).

- Au cours de la deuxième période, un fort ruissellement est plus fréquent dans la convexité de versant et dans la pente qu'à l'aval. Les averses, souvent de forte intensité, provoquent une redistribution le long du versant, sans sortie de la parcelle, pour la majorité des événements. L'eau de ruissellement s'infiltré dans les concavités de bas de versant, de façon privilégiée, à l'exception des événements orageux violents. Au cours de ceux-ci, les volumes ruisselés sont importants, provoquant du ruissellement à l'aval, toutefois plus faible qu'en amont. Au cours de ces averses, l'intensité de la pluie est supérieure à la conductivité hydraulique du sol (chapitre III et § 1.3). L'infiltration est importante sur l'ensemble de la parcelle et plus particulièrement au point de concavité. La variabilité des réponses entre inter-rangs d'un même niveau est faible (tableau IV.5).
- Au cours de la troisième période, le sol est quasi-nu, recouvert de quelques résidus de récolte, et la surface du sol est «semi-fermée» puisque la croûte est remaniée par une action biologique importante (chapitre III). A l'inverse de la deuxième période, un fort ruissellement est fréquent à l'aval ainsi que sur la pente et en amont. Le ruissellement a lieu sur l'ensemble du versant pour au moins la moitié des événements pluvieux étudiés. La variabilité du ruissellement entre les trois inter-rangs d'un même niveau de pente est forte en amont et dans la convexité, moindre dans la pente et relativement faible dans la concavité et en aval de la parcelle (tableau IV.5).

Le versant peut être scindé en deux domaines : le domaine amont, jusqu'au point de concavité et le domaine aval, à partir du point de concavité.

niveau	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	
amont	16%	25%	23%	36%	Classe 1 : aucun ruissellement < 1 litre 2 : du ruissellement sur 1 inter-rang 3 : du ruissellement sur 2 inter-rang 4 : du ruissellement sur 3 inter-rang
convexité	28%	9%	28%	35%	
pente	26%	9%	16%	49%	
concavité	14%	16%	28%	42%	
aval	36%	11%	16%	36%	

tableau IV.5 : variabilité des réponses des inter-rangs selon le niveau de pente ; Rennes, 1994-1995

1.3. Modèle statistique simple de genèse du ruissellement

L'objectif consiste à mettre en évidence les facteurs de genèse du ruissellement et plus particulièrement de situer les risques de ruissellement engendrés par une averse définie par sa hauteur (mm) et par son intensité moyenne horaire maximum (mm/h) ; on tente de mettre en évidence les seuils de ces facteurs.

Plusieurs hypothèses peuvent être formulées : le ruissellement, est-il lié aux caractéristiques pédologiques ; est-il lié à la topographie ; aux deux facteurs à la fois?

Le modèle de base

BUFALO & NAHON (1992) proposent un modèle basé sur une relation entre la hauteur de l'averse considéré (P) et la durée des périodes sans ruissellement (Td). L'ajustement de ce modèle aux moyennes des données du versant par date, donne l'équation suivante :

$$P = 3 Td^{0,4} , \text{ valable pour } Td < 35 \text{ jours}$$

avec, P : la hauteur de l'épisode pluvieux considéré en mm

Cette courbe seuil convient jusqu'à Td inférieur à 35 jours, hormis les valeurs de la première période qui correspondent à un état du sol où la rugosité est importante

Recherche de classe de volume par niveau de pente en fonction du cumul pluviométrique

Quatre classes sont distinguées en fonction du nombre de dispositifs par niveau de pente ayant un volume ruisselé supérieur à 1 litre : soit ①, les trois volumes sont inférieurs à 1 litre ; ②, deux volumes sont inférieurs et un supérieur à 1 litre ; ③, un volume est inférieur et deux supérieurs à 1 litre ; ④, les trois volumes sont supérieurs à 1 litre. La représentation par niveau de pente et par période en fonction de Q se distingue suivant la période :

(1) au cours de la première période, au point de convexité et de pente, l'intensité de l'épisode est un facteur déterminant de la genèse du ruissellement ; inversement, au point de concavité et à l'aval, Q semble plus déterminant ;

(2) durant la deuxième période, le facteur déterminant semble être l'intensité de l'événement pluvieux ;

(3) le facteur déterminant de la troisième période semble être le cumul pluviométrique de l'événement.

Modification du modèle de base en fonction :

- des paramètres de l'averse

A partir de ces résultats, le modèle de BUFALO & NAHON a été modifié et testé sur la moyenne des 15 valeurs de volume ruisselé par date : I en fonction de Td, P en fonction de Td, puis P*I en fonction de Td, pour les trois périodes (fig. IV.5), avec I égal à l'intensité de l'averse. On définit trois classes : C0, pour les volumes moyens, par date, inférieurs à 1 litre ; C1, pour les volumes moyens compris entre 1 et 10 litres ; C2, pour les volumes moyens compris entre 10 et 60 litres.

P*I s'est avéré le facteur le plus pertinent pour distinguer les non-ruissellements des ruissellements. P*I est défini comme le facteur statistique (FP). Les deux premières périodes répondent à la même courbe (fig. IV.5a), soit $FP = 24,5 Td^{0,2}$. Ce seuil diminue fortement au cours de la troisième période : $FP = 4,2 Td^{0,45}$ (fig. IV.5b).

- des paramètres du sol

Le facteur Td représente la durée séparant deux événements qui induisent du ruissellement. C'est un indicateur de l'état hydrique du sol. Les données TDR, à 5 et 11 cm de profondeur (cf chap. III), sont utilisées pour représenter le facteur Td ; La valeur en pourcentage volumique d'humidité du sol est faiblement à moyennement corrélée avec la valeur Td ($R^2=0,2$ à 5 cm et $0,3$ à 11 cm, au printemps et en été ; $R^2=0,35$ à 5 cm et $0,6$ à 11 cm, en automne et en hiver).

Si l'on modifie le modèle en remplaçant Td par l'humidité du sol à 5 ou à 11 centimètres, il apparaît que les ruissellements et les non-ruissellements des deux premières périodes sont mieux distingués avec FP et l'humidité volumique à 5 centimètres (fig IV.6a) ; au cours de la troisième période, ils sont bien séparés avec P en fonction de l'humidité à 11 centimètres (fig. IV.6b).

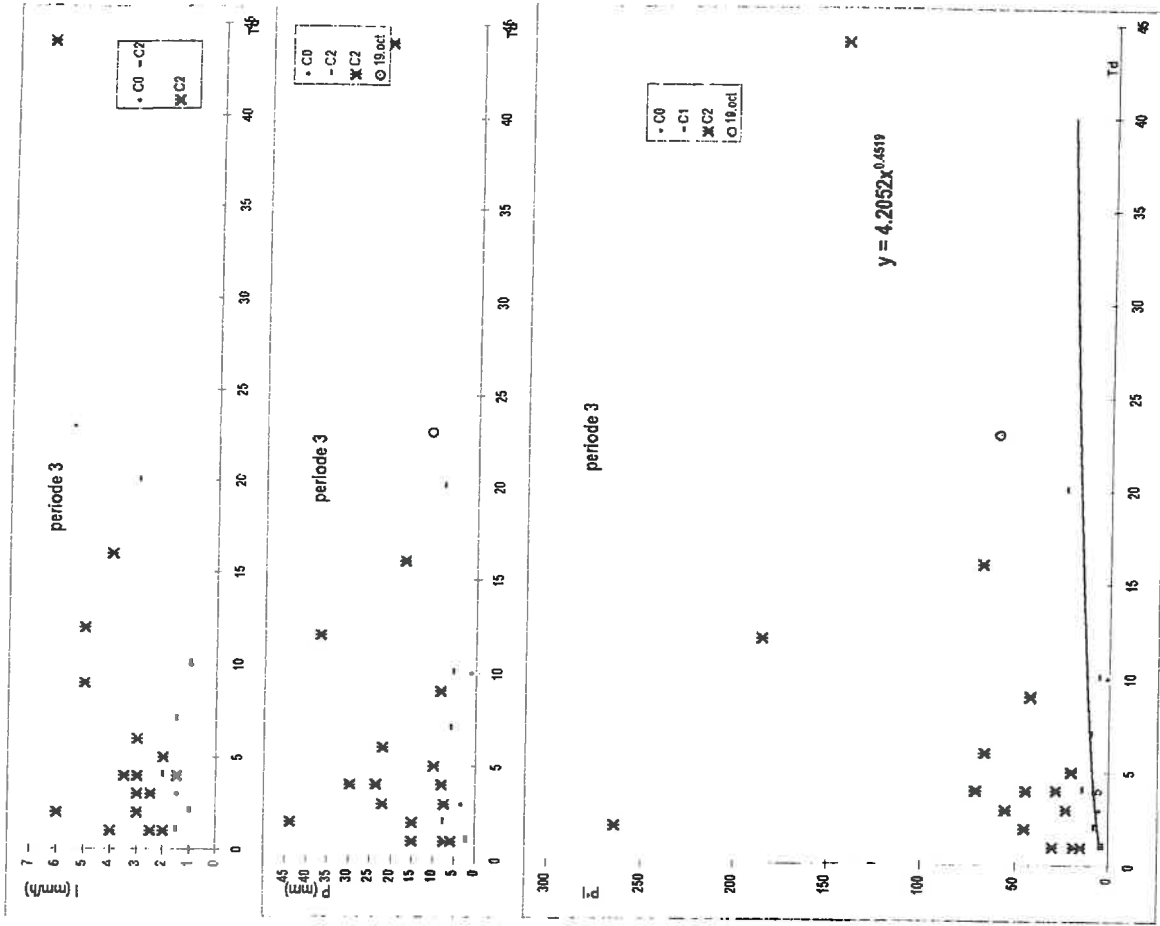


Figure IV.5 (a et b) : modèle statistique simple

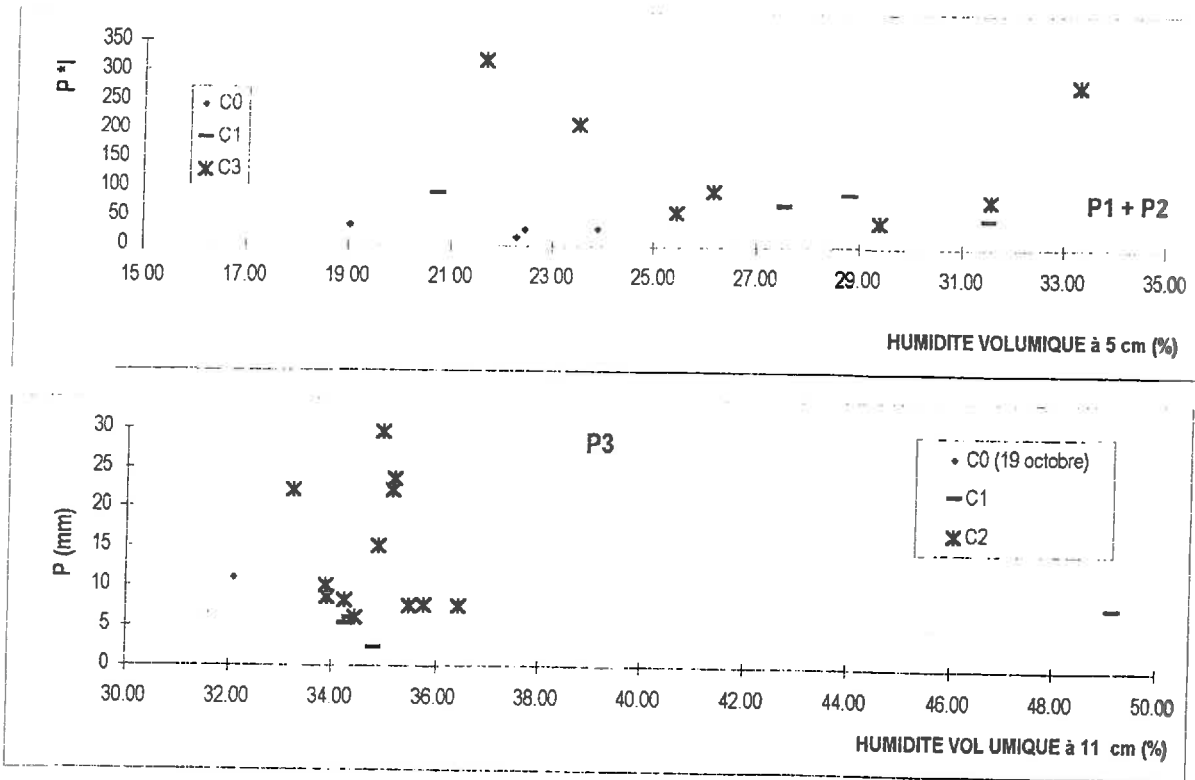


Figure IV.6 a et b : Modèle statistique simple de P*1 en fonction de l'humidité volumique à 5 cm et à 11 cm

Application du modèle aux points aval et amont

Ces modèles ont été appliqués aux volumes ruisselés recueillis au point aval et au point de pente maximum, en prenant en compte de la moyenne des trois dispositifs par niveau de pente pour une date. Les différents modèles en fonction Td ne fournissent pas d'estimation intéressante.

- A l'aval, il n'y a pas de ruissellement quelle que soit l'intensité de pluie. L'eau est «stockée» en flaques et s'infiltre du fait de la rugosité du sol. Le modèle « $I = f(HV 5 \text{ cm})$ » permet de séparer correctement les non-ruissellement, des faibles et forts ruissellement, en deuxième période. En troisième période, on retiendra le modèle « $P=f(HV 11 \text{ cm})$ », (fig. IV.7a).
- Dans la pente, en première et deuxième période, le modèle « $I=f(HV 5 \text{ cm})$ » est le meilleur estimateur. Durant la troisième période, le modèle « $P=f(HV 11 \text{ cm})$ » est retenu, (fig.IV.7b).

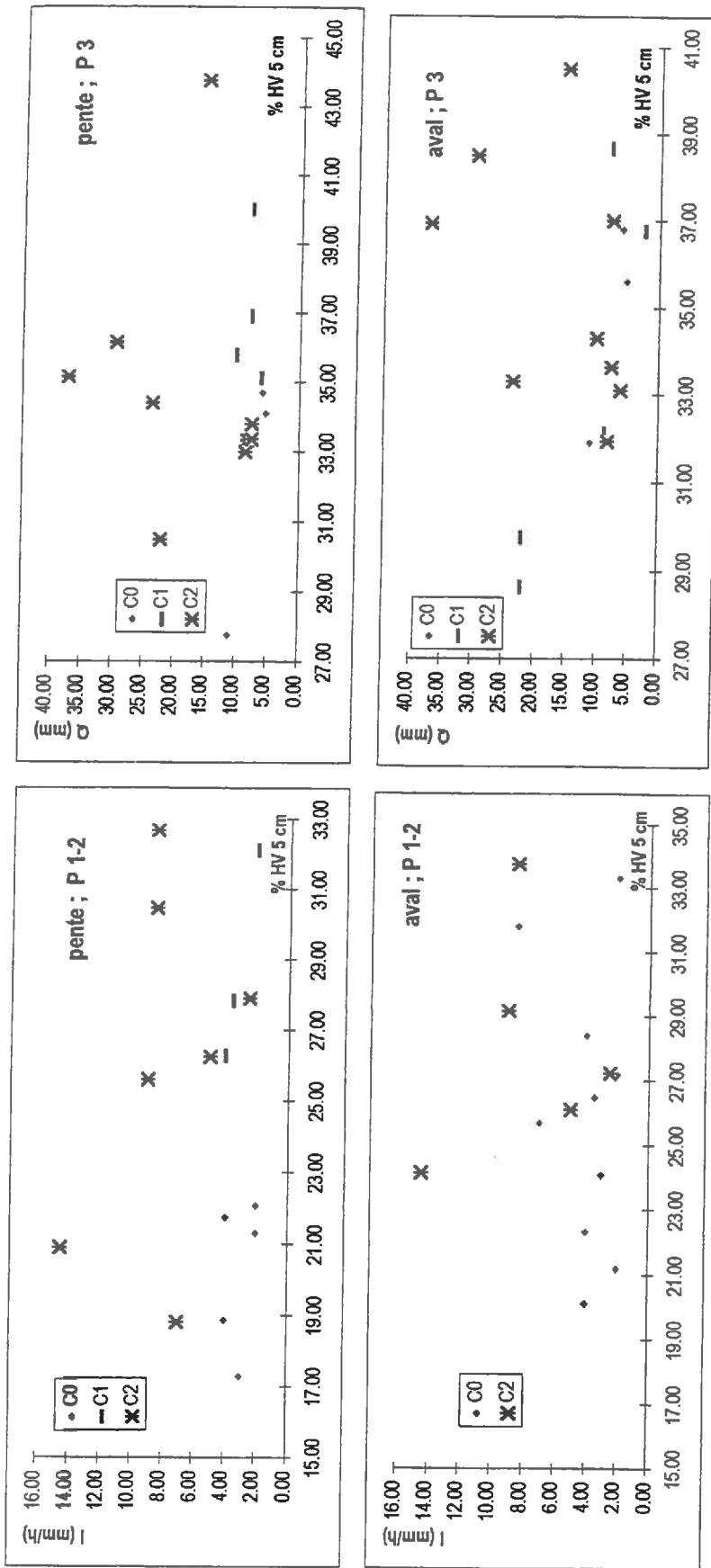


Figure IV.7 : application du modèle statistique au point aval (a) et au niveau de pente (b) ; Rennes, 1994-1995

Conclusion

☞ Le ruissellement se produit pour des seuils plus faibles pour la deuxième période que pour la première.

Au cours de la deuxième période, les seuils d'intensité et d'humidité du sol sont plus élevés à l'aval que dans la pente. Ce résultat semble en contradiction avec les résultats de conductivités hydrauliques obtenus en fin de première période (cf chap. III). La conductivité hydraulique est peu différenciée en début du cycle cultural selon la position topographique.

☞ La rugosité en surface du sol, indirectement liée à la topographie (chapitre III), et l'intensité de l'averse en regard de la conductivité hydraulique, seraient les facteurs importants de la première période.

☞ Au cours de la deuxième période, le déclenchement du ruissellement dépendrait plus de la pente locale et, secondairement, de l'intensité de l'averse au regard de la conductivité hydraulique.

☞ Durant la troisième période, les principaux facteurs sont le cumul de l'averse considérée et l'état hydrique du sol correspondant aux cumuls des événements précédents.

«Ce modèle statistique avantage : utilisation simple à partir de données banale
inconvenient : utilisation en contexte armoricain.

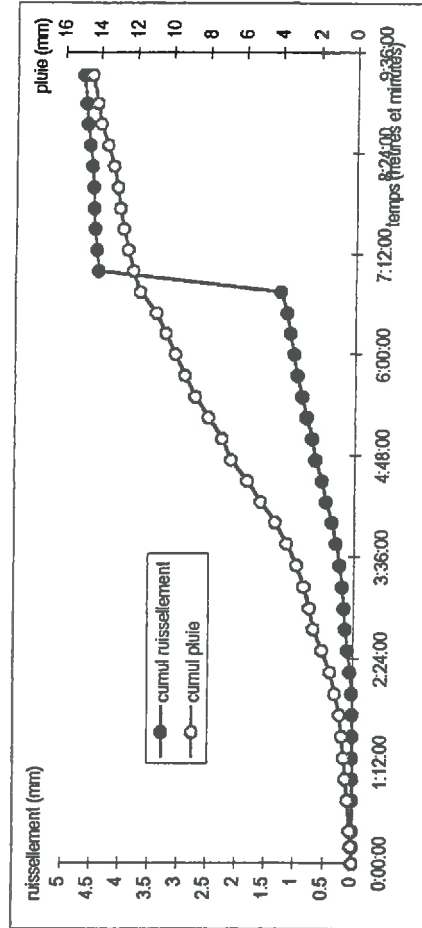
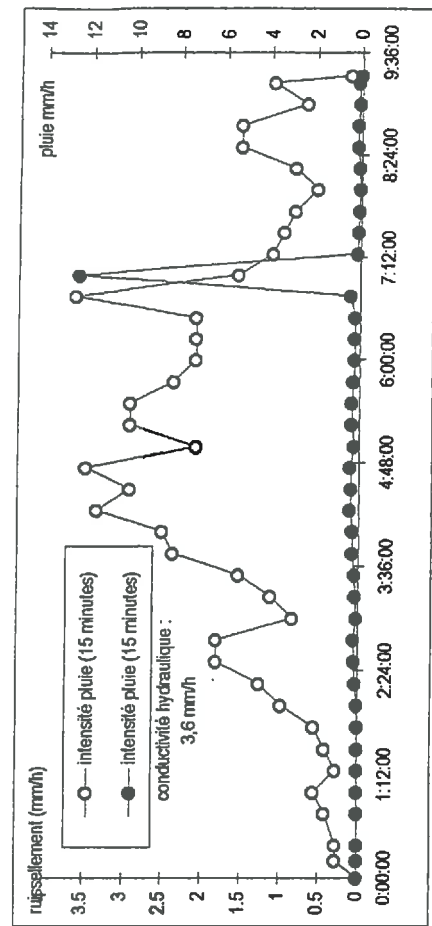
Serait lus interreant d'utiliser l'intensité limite et pluie d'imbibition. Ex avec données enregistrer.

*La version non
objets avait
la même*

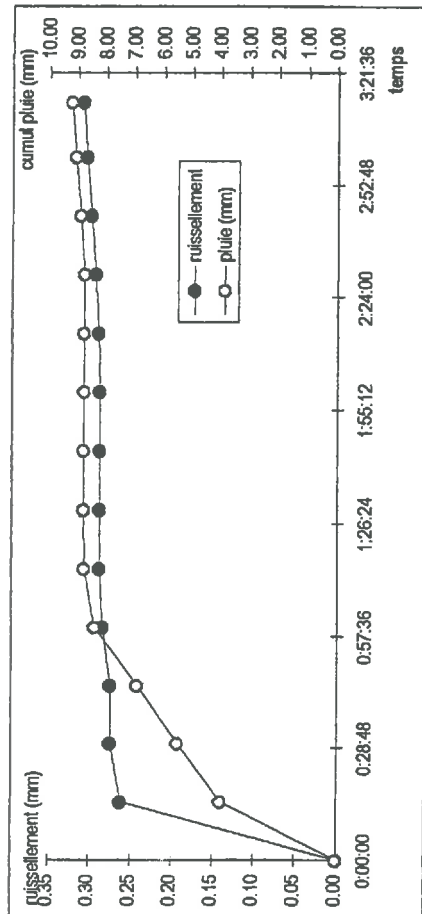
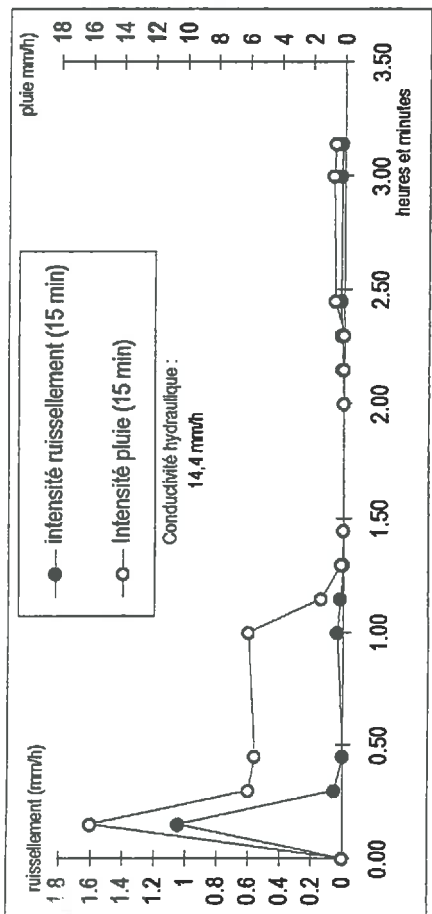
Analyse des déclenchements (ajouter pluie imbibition et intensité limite)

Ces résultats sont confirmés par l'enregistrement simultané du ruissellement et de la pluie au pas de temps de la minute. Les intensités présentées sont calculés sur 15 minutes. Une averse d'été et un train d'averses d'hiver ont été analysés (fig. IV.8). Ces enregistrements correspondent au point de convexité.

Au cours de l'averse du 31 juillet 1994, le ruissellement a lieu lorsque l'intensité de la pluie, calculée sur 15 minutes, a atteint et dépassé la valeur de la conductivité hydraulique (14,4 mm/h). L'effet du cumul pluviométrique est alors faible. En effet, si l'intensité pluviométrique passe au dessous de cette valeur, le ruissellement cesse. Le ruissellement apparaît fugace et de type Hortonien. Le pas de temps de 15 minutes semble suffir pour expliquer le déclenchement du ruissellement ; cependant, les valeurs d'intensité calculées sur 2 et 3 minutes offrent le maximum d'information (fig.IV.9).



HIVER, 29 décembre 94



ETE, 31 juillet 94

Figure IV.8 : Intensité de pluie et déclenchement du ruissellement ; deux exemples, Rennes

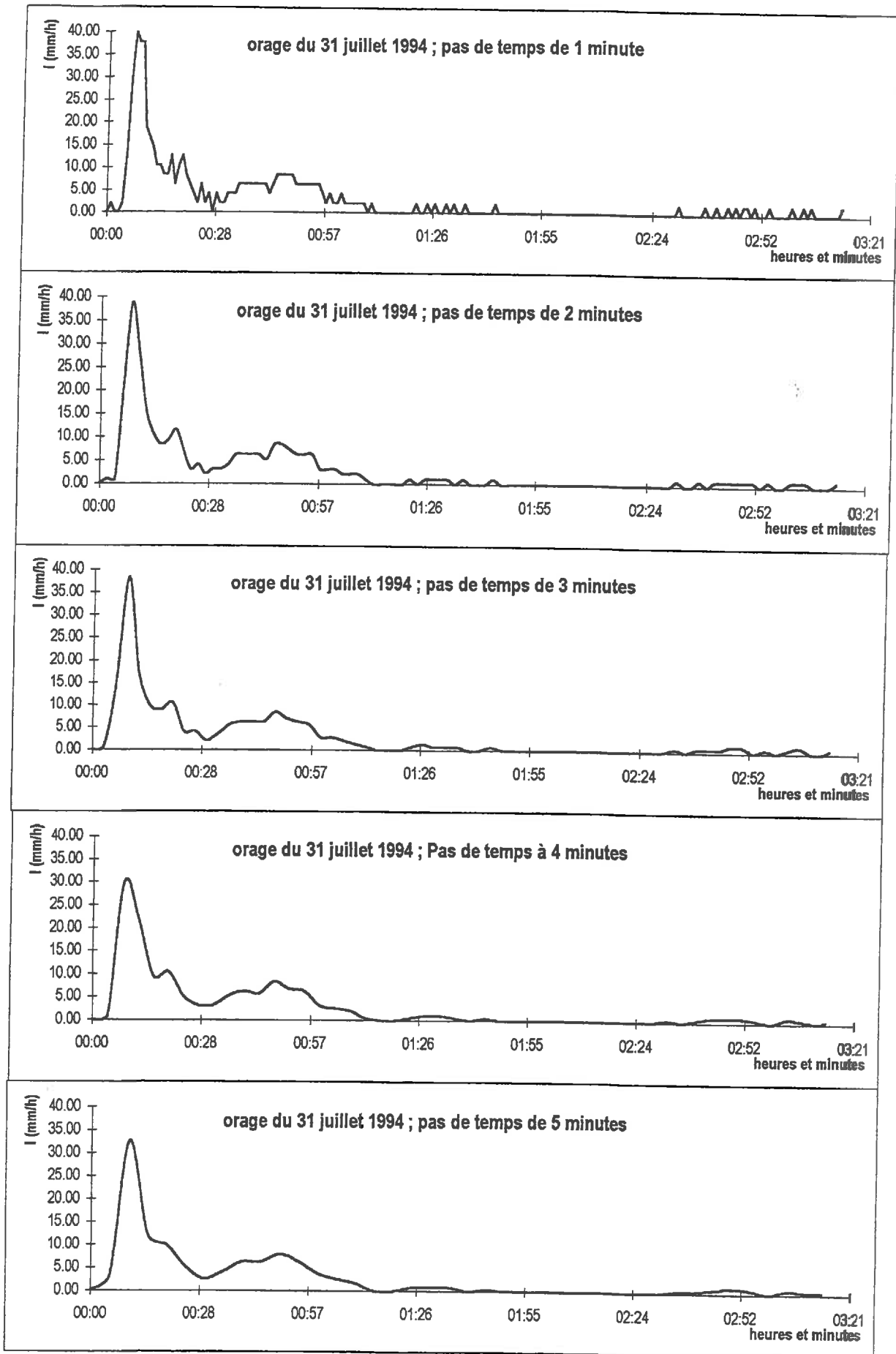


Figure IV.9 : représentation de l'intensité en mm/h calculé à partir de 5 pas de temps, ETE

Au cours de l'averse du 29 décembre, le ruissellement débute faiblement. L'importance du flux augmente lorsque l'intensité de l'événement pluvieux, calculée sur 15 minutes, dépasse la valeur de la conductivité hydraulique (3,6 mm/h). L'état hydrique du sol joue un rôle important puisqu'un faible ruissellement apparaît bien que l'intensité de la pluie ne dépasse pas la valeur de la conductivité hydraulique. Le flux de ruissellement augmente rapidement lorsque l'intensité est supérieure à la valeur de la conductivité hydraulique. Les deux types de processus, ruissellement hortonien et ruissellement par saturation semblent intervenir. Cependant, on peut envisager qu'au cours de cette averse, seul le processus de ruissellement hortonien intervient, car : (1) seulement, une partie de la pluie ruisselle ; (2) pour les averses hivernales, le pas de temps de 15 minutes, pour calculer les valeurs d'intensité, apparaît trop important ; en effet, les valeurs des pics d'intensité diminuent fortement de 1 minute à 5 minutes (fig IV.10).

Néanmoins, d'autres enregistrements indiquent l'apparition du ruissellement avec des intensités moyennes sur 15 minutes ne dépassant pas une valeur de 2 mm/h ; les valeurs d'intensité calculées sur une minute atteignent 4 mm/h seulement deux fois au cours de cette averse de 4 heures. Pourtant le ruissellement existe. Il apparaît à partir de 0,6 mm de pluie (exemple du 11 février 94, fig. IV.11). L'état hydrique est alors important (33 à 35 % à partir des mesures TDR, chapitre III). Le coefficient de ruissellement est alors de 37%. Il s'agit bien d'un ruissellement par saturation.

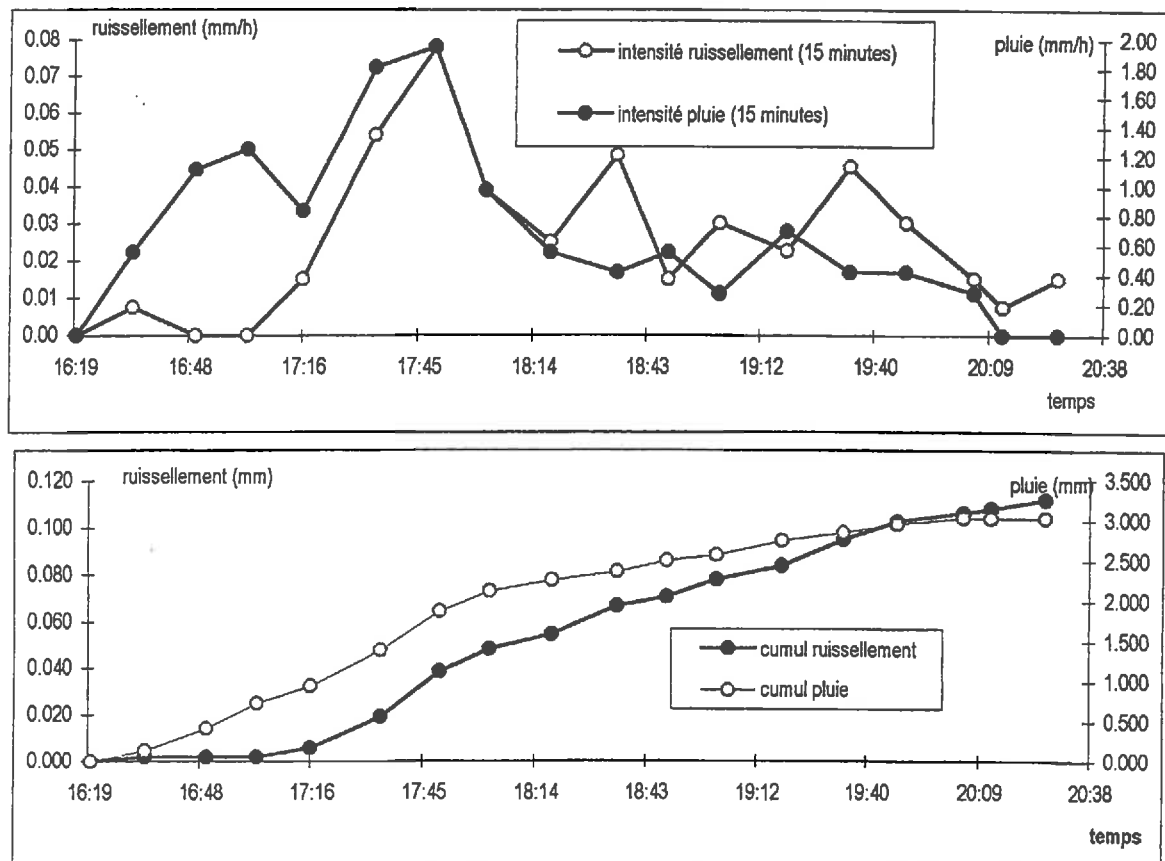


Figure VI.11 : pluie et ruissellement au pas de temps de 15 minutes, 11 février 1995 ; Rennes

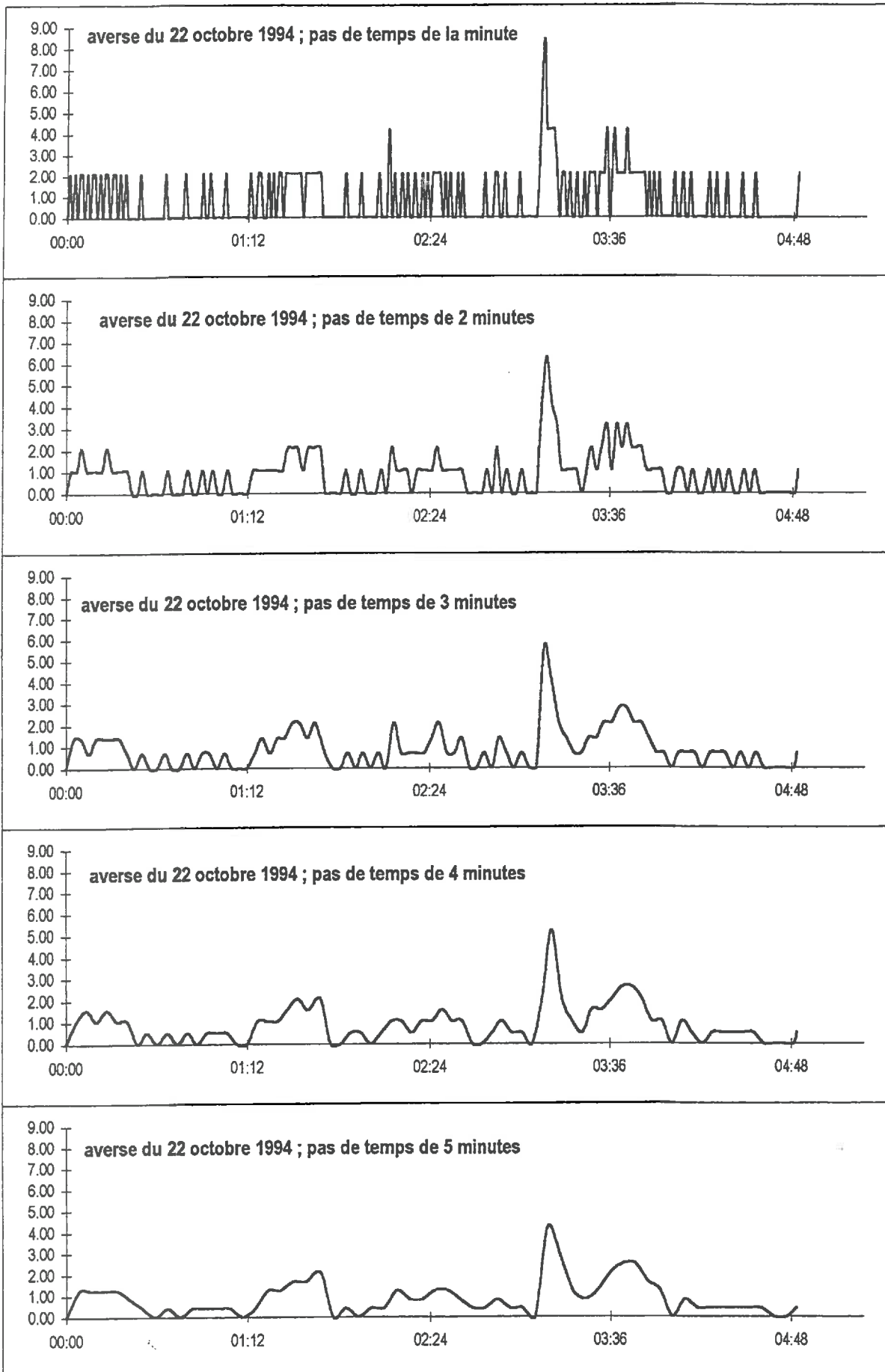


Figure IV.10 : représentation de l'intensité en mm/h calculé à partir de 5 pas de temps, en fonction du temps en heure, HIVER

1.4. Conclusion

Les trois phases sont distinctes du point de vue des mécanismes de ruissellement et de la distribution spatiale des flux.

Durant la *première période*, la croûte structurale s'établit, plus rapidement en amont de la parcelle par rapport à l'aval, en fonction du cumul pluviométrique (chapitre III). Tant que cette croûte structurale n'est pas établie, le ruissellement est nul, quels que soient l'intensité et le cumul pluviométrique de l'averse. Les premières averses, fréquentes et d'intensité faible à forte (9 mm/h d'intensité moyenne horaire maximum pendant la période étudiée) ne produisent aucun ruissellement ou un ruissellement «local», sur une courte distance.

ruissellement nul ou seulement local, fonction de la fermeture progressive de la surface du sol et de l'intensité de l'averse.

Durant la *deuxième période*, les pluies sont peu fréquentes mais d'intensité parfois élevée. Si l'intensité de l'averse est supérieure à la conductivité hydraulique à saturation, il y a ruissellement sur le versant. Des sorties d'eau hors de la parcelle peuvent alors avoir lieu, pour les événements extrêmes.

ruissellement localement important (domaine amont) à généralisé selon l'intensité de l'averse, de type hortonien.

Les pluies ayant lieu après la récolte de la culture (période 3), fréquentes, avec des cumuls pluviométriques importants et d'intensités faibles provoquent une saturation progressive du versant, saturation préférentielle à l'aval, et induisent un ruissellement à la fois hortonien et par saturation. De ce fait, le ruissellement est important dans la concavité et sur le replat aval en raison d'un sol plus vite saturé en eau, du fait de sa teneur en eau initiale et de sa plus faible conductivité hydraulique à saturation (chapitre III).

ruissellement localement conséquent (concavité et replat aval) à généralisé, hortonien et par saturation, selon la conductivité hydraulique et l'intensité des précipitations, selon les cumuls pluviométriques des trains d'averses.

Les caractéristiques climatiques et la forte anthropisation du milieu donnent dans le contexte d'étude, un poids important au cumul pluviométrique. Cependant, les paramètres empiriques P_i (pluie d'imbibition) et I_l (intensité limite) dépendent à la fois des états de surface et de l'état hydrique des sols mesurés ou évalués (CASENAVE,).

2. RESULTATS SUR LES AUTRES PERIODES ET D'AUTRES SITES D'ETUDE

2.1. Résultats sur les sites de Naizin : comparaison avec celui de Rennes

Les deux parcelles de Tocplouz et de Kerjos, situées sur le bassin versant du Coët Dan (chapitre II) ont fait l'objet d'un suivi de 6 mois, de mai à octobre 1994.

Cette comparaison avec le site de Rennes doit se faire avec prudence ; malgré des similitudes de topographie et de culture, des différences importantes existent : d'une part, la chronique climatique, d'autre part, les sols et la situation dans le versant puisque l'aval des deux parcelles de Naizin bordent directement le ruisseau (chapitre II).

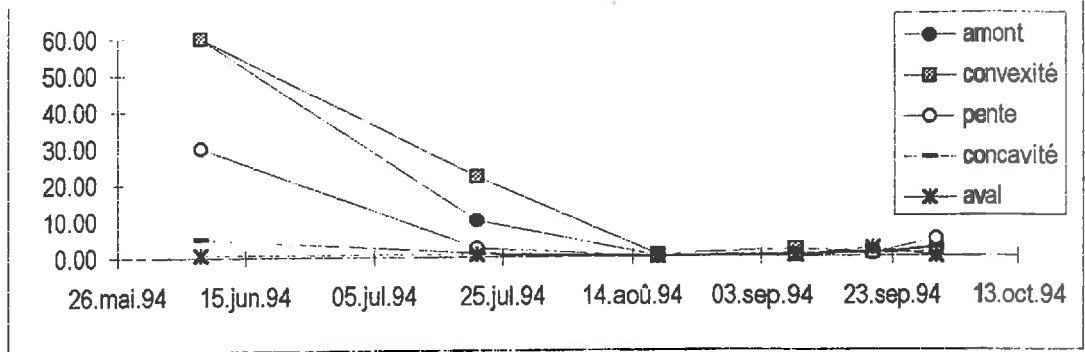
Des chroniques de ruissellement par niveau de pente ont été établies (fig. IV.12) pour chacun des sites.

2.1.1. Le site de Tocplouz

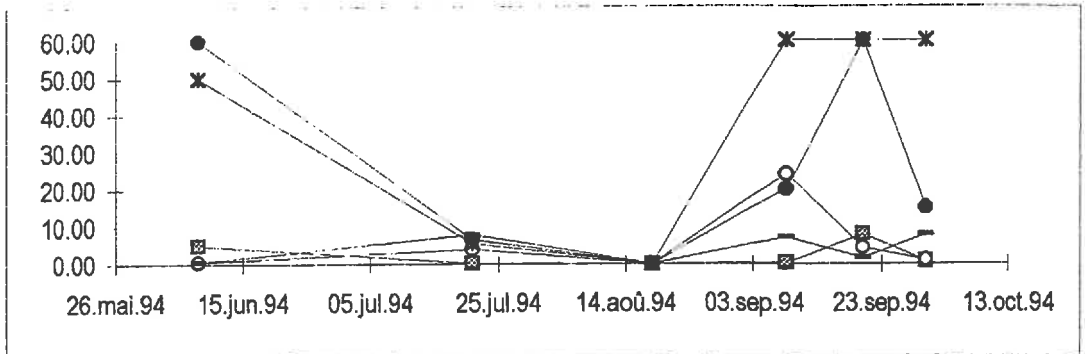
Le ruissellement est faible. Il n'apparaît qu'à l'amont et sur la pente (fig. IV.12 et tableau IV.6). Seuls les événements pluvieux d'une intensité moyenne horaire supérieure à 10 mm/h induisent un ruissellement. En septembre, les intensités moyennes horaires sont inférieures à cette valeur ; le ruissellement est nul sur l'ensemble de la parcelle. Le ruissellement apparaît être fonction de l'intensité de l'averse, dans cette partie amont du versant.

- Similitude

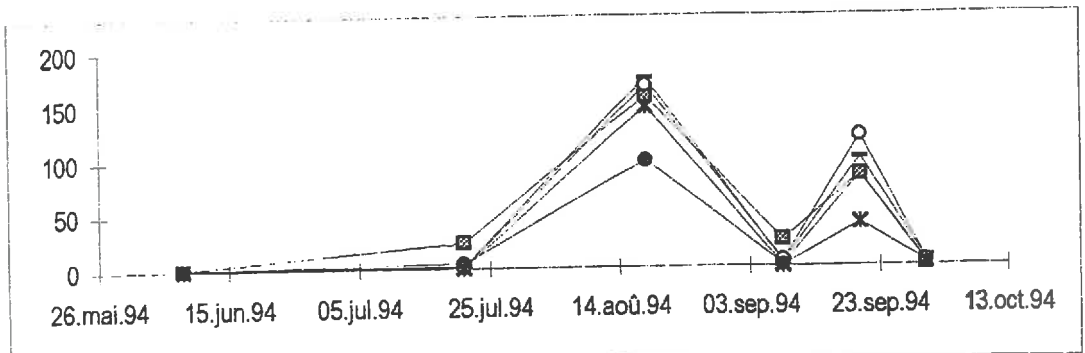
Les mécanismes semblent identiques à ceux de Rennes, avec un ruissellement plus fréquent en amont qu'en aval de la parcelle (tableau IV.6).



TOCPLOUZ



KERJOS



RENNES

Figure IV.12: chronique des volumes ruisselés cumulés ; Naizin et Rennes, 1994

- Différence

Aucun ruissellement n'a été observé en aval : le ruissellement généré en amont ou dans la convexité s'infiltré lors de son cheminement ; on peut penser que la conductivité hydraulique à saturation est plus importante en aval qu'en amont.

Le ruissellement n'apparaît qu'au cours des averses d'intensité supérieure à 10 mm/h ; c'est un seuil supérieur à celui de la parcelle de Rennes.

	AMONT			AVAL	
RENNES					
< 1 litre	1	1	1	1	3
1 à 10 litres	3	1	3	3	0
10 à 60 litres	0	2	0	0	1
débordé	2	2	2	2	1
TOCPLOUZ					
< 1 litre	3	1	3	2	5
1 à 10 litres	1	3	2	4	1
10 à 60 litres	1	1	1	0	0
débordé	1	1	0	0	0
KERJOS					
< 1 litre	1	4	3	2	1
1 à 10 litres	1	2	2	4	1
10 à 60 litres	2	0	1	0	1
débordé	2	0	0	0	3

tableau IV.6 : occurrence des ruissellements pour les différents niveaux de pente ; Naizin et Rennes, 1994-1995

2.1.2. Le site de Kerjos

Le ruissellement apparaît au point amont et au point aval (fig. IV.12 et tableau IV.6). Il est nul ou quasi-nul dans la pente. Les averses d'intensité moyenne horaire supérieure à 5 mm/h provoquent le ruissellement, parfois sur l'ensemble du versant.

- Similitude

Les mécanismes sont proches de ceux de Rennes, hormis au point aval et à la concavité (tableau IV.6). Le ruissellement apparaît au cours d'averses d'intensité moyenne horaire supérieure à 5 mm/h.

- Différence

Les caractéristiques des points de concavité et de replat aval sont particulières, puisqu'ils sont peu perméables et constitués de matériaux de remblais. Les sorties d'eau directes existent alors, pour chaque averse ruisselante (83% des relevés, tableau IV.6).

2.1.3. Discussion

Pour les trois sites, l'histogramme de fréquence des volumes ruisselés pour tous niveaux de pente confondus, est similaire (fig. IV.13). Les forts ruissellements semblent moins fréquents à Naizin qu'à Rennes (tableau IV.6). Il faut sur Naizin, des seuils climatiques plus élevés pour observer des niveaux de ruissellements comparables à ceux observés sur Rennes

A Kerjos, le ruissellement ne semble pas obéir aux mêmes règles de distribution spatiale qu'à Rennes, selon la topographie, puisqu'on observe en aval un ruissellement fréquent.

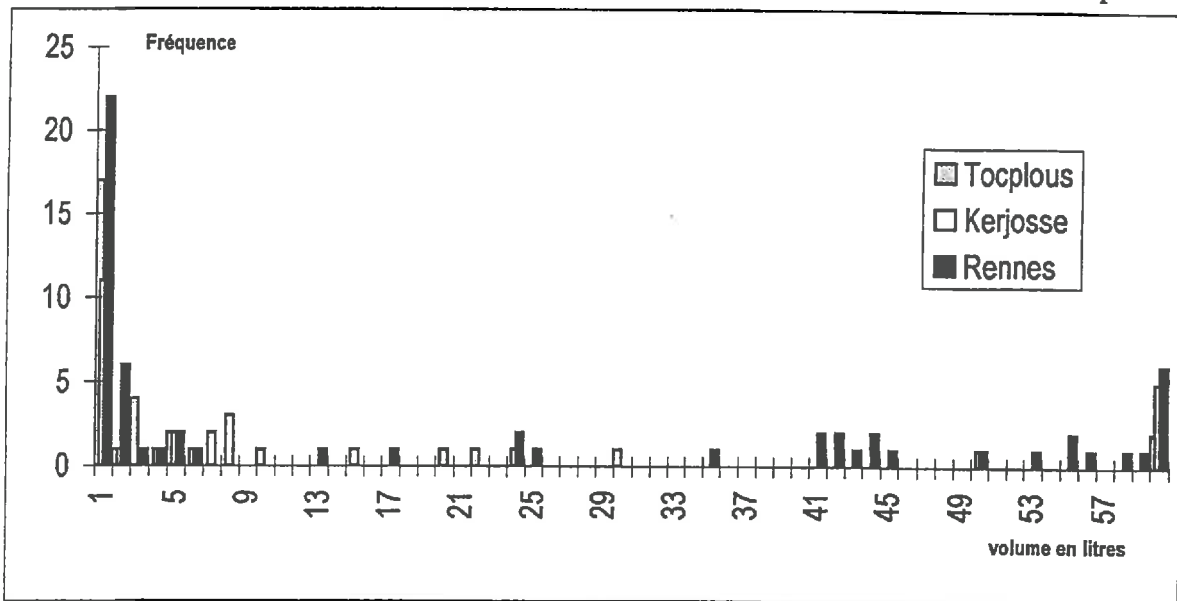


Figure IV.13 : histogramme de classe de volume ruisselé ; Naizin et Rennes, 1994

2.1.4. Conclusion

La concavité et le replat aval peuvent fonctionner de façon opposée selon les possibilités d'infiltration du sol au niveau de ces deux points. Les caractéristiques pédologiques et topographiques de la concavité et du replat aval des parcelles jouent un rôle primordial sur l'apport d'eau de ruissellement au ruisseau. Les risques sont accrus pour les parcelles proche du ruisseau, dont le sol à l'aval est battant et peu perméable ou dont la concavité est peu marqué, le replat aval court.

2.2. Comparaison avec d'autres cultures : petits pois, phacélie et sol nu

2.2.1. Rennes, culture de petits pois

L'article : «Spatial variations of overland flow and sediment transport on an agricultural field», GASCUEL-ODOUX C., CAYOT S. & DURAND P., accepté dans Earth Surface Processes présente les données et les résultats de cette période (Annexe).

Les données concernent la période de février à juin 1993, comportant 21 jours de pluie dont 3 présentent une intensité moyenne horaire supérieure à 5 mm/h (fig. IV.14). Le volume maximum des fûts totalisateurs est de 25 litres.

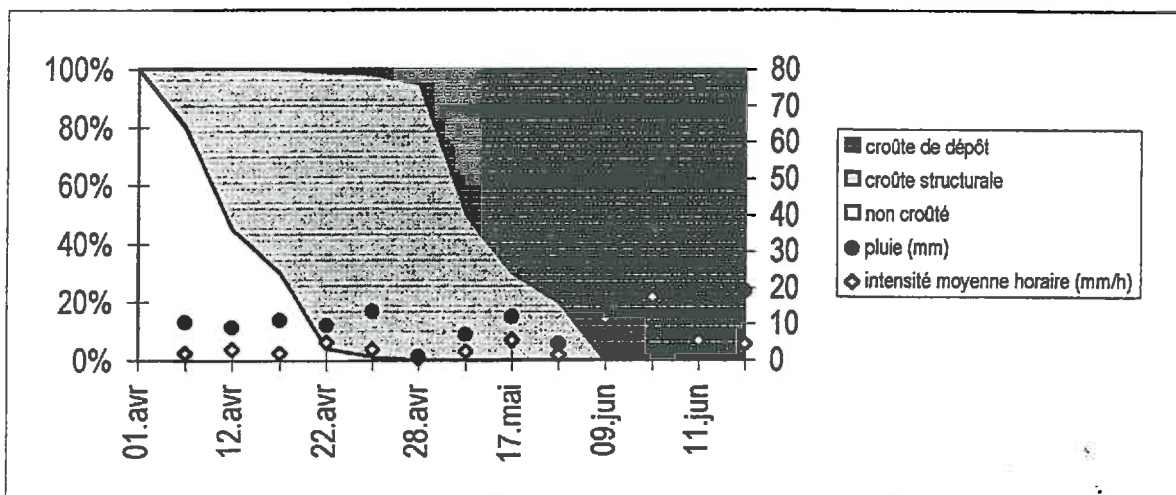


Figure IV.14 : évolution des états de surface, du cumul pluviométrique et des intensités moyennes horaires des averses ; Rennes, 1993

Le ruissellement est nul, au cours de la première période, malgré le recouvrement faible du sol par la culture, en l'absence de croûte de battance (fig. IV.15).

Au cours de la deuxième période, seules les averses d'intensité moyenne horaire supérieure à 10 mm/h, provoquent un ruissellement. Le couvert végétal et la croûte de battance sont alors bien développés. Les volumes ruisselés sont plus importants en amont et dans la pente. A partir du point de concavité, les volumes d'eau restent faibles, voire nuls. Le ruissellement reste diffus sur l'ensemble de la pente, sans phénomène de concentration. L'infiltration de l'eau de ruissellement au cours de son cheminement est importante. Les eaux de ruissellement s'infiltrent quasi-totalement au point de concavité de la parcelle.

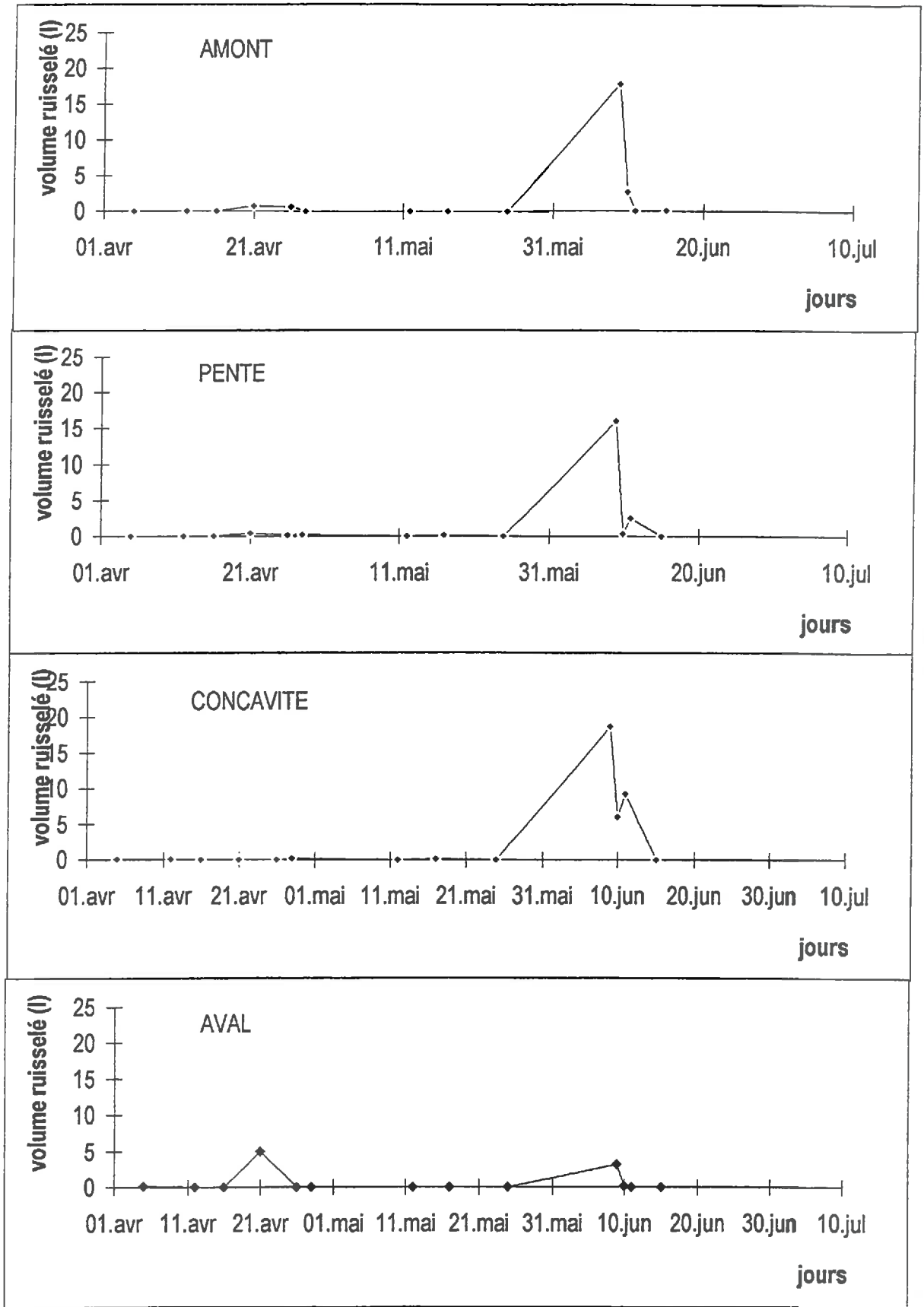


Figure IV.15 : chronique des volumes ruisselés ; pois, Rennes, 1993

- Similitude

Les mécanismes obtenus sont proches de ceux sur maïs :

- la redistribution des eaux à la surface du sol est notable, avec genèse de ruissellement en amont et infiltration à l'aval ;
- l'infiltration de l'eau existe principalement au point de concavité de la parcelle.

- Différence

Les différences concernent la fréquence du ruissellement à l'aval de la parcelle et l'importance des volumes ruisselés.

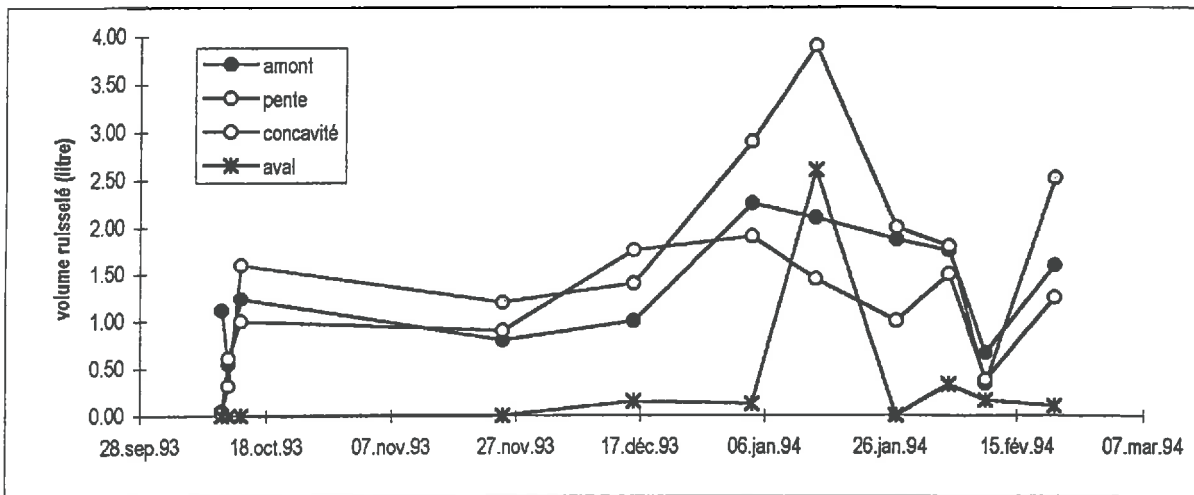
- Les volumes ruisselés sont plus faibles avec la culture de petits pois. Cette culture recouvre rapidement la surface du sol, avec un taux de recouvrement de 100 %, alors que le maïs a un taux de recouvrement maximum de 70% (MOSIMANN, 1991). Le recouvrement de la surface du sol permet de limiter l'énergie des gouttes de pluie, soit une réduction de l'intensité de l'averse. D'autres explications peuvent être évoquées : (1) la géométrie de la plante est différente ; le système racinaire est plus important ; la tige ne concentre pas l'eau de pluie (2) le travail du sol est moindre et le nombre de passages est plus limité (annexe) ; (3) le microrelief ne forme pas de «chenaux» et le flux d'eau ruisselée s'étend sur une plus grande surface. Cette situation est reconnue comme une situation culturale, climatologique et hydrologique moyenne. ?

- Pour la même période (printemps), le ruissellement apparaît pour des intensités moyennes horaires de 10 mm/h, valeurs bien supérieures à celles qui provoquent du ruissellement sur la parcelle cultivée en maïs (7 mm/h)

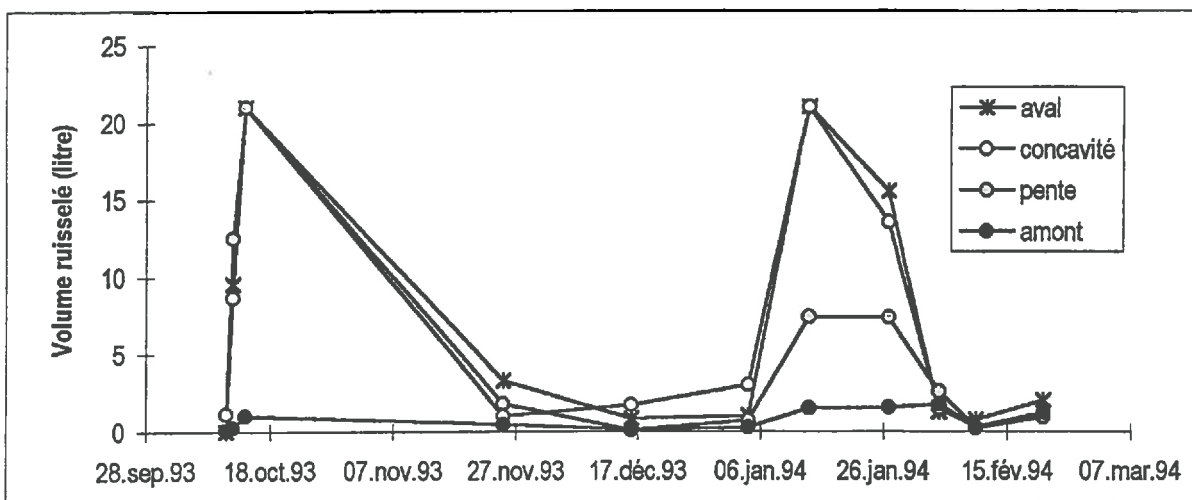
2.2.2. Rennes, culture de phacélie

Les données concernent la parcelle de Rennes et la période d'octobre 1993 à février 1994. Quatre dispositifs ont été installés sur 4 niveaux de pente différents (chapitre II). Onze averses, ont eu lieu au cours de cette période d'étude ; ces averses présentent des intensités moyennes horaires, inférieures à 6 mm/h et des hauteurs pluviométriques importantes (fig. IV.16).

Le ruissellement est faible, volumes inférieurs à 4 litres (fig. IV.16). Les volumes sont fortement liés aux hauteurs pluviométriques des averses et à l'humidité du sol (influence des averses qui précèdent l'événement analysé). Le ruissellement est faible à nul au point de concavité : un seul événement pluvieux provoque du ruissellement à l'aval, et



Rennes, phacélie



Rennes, sol nu

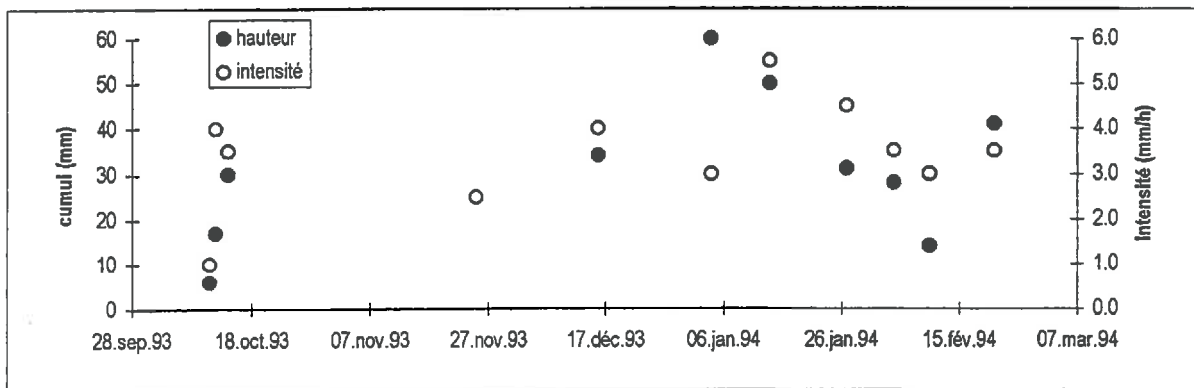


Figure IV.16 : chronique des volumes ruisselés (litre) et caractéristiques des pluies ; Rennes, 1993-1994

d'ailleurs sur l'ensemble du versant. Les volumes les plus importants apparaissent dans la pente.

- Similitude

Le ruissellement est lié aux cumuls pluviométriques. Le point de concavité et surtout le replat aval constitue une zone d'infiltration préférentielle.

- Différence

Les volumes ruisselés sont beaucoup plus faibles, bien que les valeurs maximales d'intensités moyennes horaires et de hauteurs pluviométriques soient comparables pour les deux périodes étudiées (6 mm/h et 55 mm). Le ruissellement à l'aval de la parcelle est quasiment absent, sauf pour un événement.

2.2.3. Rennes, sol nu

Au cours de la même période d'octobre 1993 à février 1994, dix dispositifs sont installés sur sol nu à 10 niveaux de versant

Les mécanismes de ruissellement observés sur sol nu sont comparés à ceux obtenus sur chantier de maïs (Rennes, 1995) et sous culture de phacélie. Ils permettent ainsi d'établir : (1) l'effet du cumul pluviométrique au cours d'une autre période ; (2) l'effet de la culture sur le cumul pluviométrique, induisant du ruissellement.

Les volumes sont au minimum 4 fois supérieurs à ceux existants sous phacélie (fig IV.16). Le ruissellement existe sur la pente, la concavité et le replat aval. L'eau sort de la parcelle. Trois événements pluvieux induisent un ruissellement sur l'ensemble du versant.

- Similitude (avec le chantier de maïs)

Les mécanismes sur sol nu sont identiques à ceux observés sur chantier de maïs. Le ruissellement apparaît sur l'ensemble du versant et sort à chaque averse ruisselante hors de la parcelle.

- Différence

Elle est liée à la fréquence des averses et aux cumuls pluviométriques des deux périodes comparées. Les processus observés à l'aval sont fortement réduits lorsque le sol est recouvert par la phacélie.

Au cours de la troisième période, l'utilisation d'une inter-culture permet de limiter les écoulements superficiels en favorisant l'infiltration.

2.2.4. Conclusion

L'analyse des données permet d'établir l'effet d'une culture.

☞ Quelles que soient les périodes, l'effet de la culture semble fonction de son recouvrement à la surface du sol et ou, de son développement racinaire. En effet, ces caractéristiques limitent la vitesse et le volume ruisselé en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol. L'infiltration est favorisée car : (1) l'énergie des gouttes de pluie est amoindrie par le développement foliaire, appelé «effet ombrelle» (ELLISON, 1948), retardant la formation de l'état de battance et limitant le déclenchement du ruissellement sur le sol ; (2) la vitesse du flux est limitée par le nombre de plantes, avantageant les transferts vers le sol par les racines ou par l'effet indirect de l'activité biologique comme les conduits de vers de terre. Le système racinaire augmente la porosité des horizons de surface (ROOSE, 1977 ; VAN ASCH, 1980). Cet effet de la culture est observé avec la culture de petits pois (printemps), comme avec la phacélie (hiver). Il semble que l'infiltration est d'autant plus possible en bas de versant que le volume est faible. Elle devient impossible, si le volume ruisselé augmente.

☞ En première et deuxième période, le ruissellement est fortement induit par l'intensité de la pluie. Le recouvrement du sol par la culture et la géométrie du système foliaire semble alors déterminant pour favoriser l'infiltration. Au cours de la troisième période, le ruissellement est en partie lié aux hauteurs pluviométriques de la pluie ; le développement racinaire, l'activité biologique peut alors favoriser les transferts vers le sol.

2.3. Conclusion

Ces résultats permettent d'affirmer

- la décomposition du versant en deux parties distinctes :
 - dans le domaine amont, la genèse et la propagation du ruissellement est en relation avec des seuils d'intensités pluviométriques dépendant des caractéristiques des états de surface : conductivité hydraulique à saturation, couvert végétal, microrelief. Ces seuils d'intensité sont les intensités limites, II.
 - dans le domaine aval, à partir de la concavité, l'infiltration semble dépendre du cumul pluviométrique, de l'état hydrique du sol, des caractéristiques physiques de l'horizon

et de l'organisation de la porosité biologique (racine, vers de terre...). On retrouve ici la notion de pluie d'imbibition, P_i .

Le ruissellement est lié au site, en relation avec la distribution spatiale des sols et de leurs caractéristiques physiques, et en relation avec l'occupation du sol et des caractéristiques culturelles déterminant les caractéristiques du potentiel matriciel de l'horizon de surface. Le ruissellement résulte de l'interaction entre ces caractéristiques et la chronique climatique.

- La décomposition de l'année culturale en trois périodes :

- Au cours de la première période, le ruissellement est rare en relation avec une rugosité du sol importante ; le ruissellement en aval et donc les sorties directes de l'eau vers le cours d'eau sont réduites, voire inexistantes.

- Durant la deuxième période, il y a infiltration privilégiée dans la concavité de bas de versant selon un seuil dépendant de la topographie locale, de l'intensité de la pluie et des caractéristiques de la surface et de la couche de labour. En effet, que ce soit d'un point de vue topographique ou pédologique, ces zones d'infiltration privilégiées ne fonctionnent plus en tant que telles lorsque le ruissellement de versant est important.

Pendant la période hivernale, une saturation des premiers centimètres du sol ou de l'ensemble du profil induisent du ruissellement. Celui-ci a lieu sur toute la parcelle et alimente ainsi, directement le cours d'eau.

3. SYNTHÈSE

3.1. Cas d'un système drainant non hydromorphe en surface

Ce cas correspond à la parcelle de Rennes. Il serait simplificateur de généraliser ces résultats à l'ensemble des parcelles situées en sol non hydromorphe. Mais ces données intéressent celles qui comportent des caractéristiques pédologiques proches de notre site comme un faible pourcentage de matière organique et de colloïdes minéraux et une morphologie concave à l'aval de la parcelle.

Un sol plus riche en matière organique serait moins battant et l'apparition du ruissellement en serait à la fois retardée et diminuée.

3.1.1. Première période

Le ruissellement est local, faible sur le versant, très réduit au point de concavité et nul sur le replat aval. Il apparaît aux endroits de fermeture de la surface du sol et crée alors des plaques de croûte de dépôt, çà et là.

L'apparition du ruissellement est alors liée pour l'ensemble du versant, à l'intensité des événements pluvieux et, localement, à la vitesse de fermeture du sol. Localement des croûtes structurales, puis sédimentaires se forment, en fonction de la rugosité initiale. Elles permettent une inter-connection des flaques. A l'échelle du versant des variations faibles en matière organique et en fractions granulométriques fines induisent une formation plus rapide des croûtes sur le versant qu'en aval.

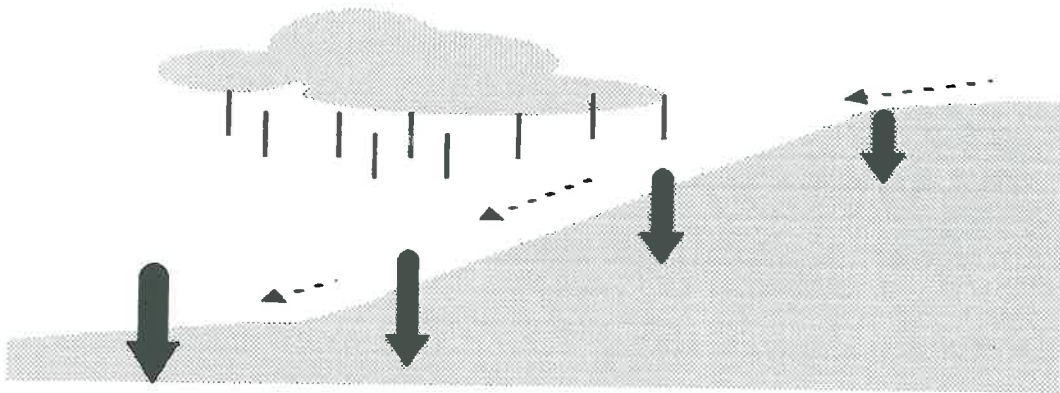


Figure IV17 : schéma de l'apparition du ruissellement le long du versant au cours de la première période.

3.1.2. Deuxième période

Le ruissellement apparaît dès l'amont et s'accroît fortement au niveau de la pente maximum. Le point de concavité limite la propagation du ruissellement vers l'aval, en réduisant la vitesse du ruissellement. Au cours d'orages violents, une part d'eau de ruissellement se propage au-delà de ce point, vers le replat aval, pour sortir de la parcelle. Ces événements sont rares, caractérisés par de fortes intensités pluviométriques

La genèse du ruissellement apparaît liée, pour l'ensemble du versant, à l'intensité des événements pluvieux et aux facteurs locaux : pente locale et conductivité hydraulique du sol.

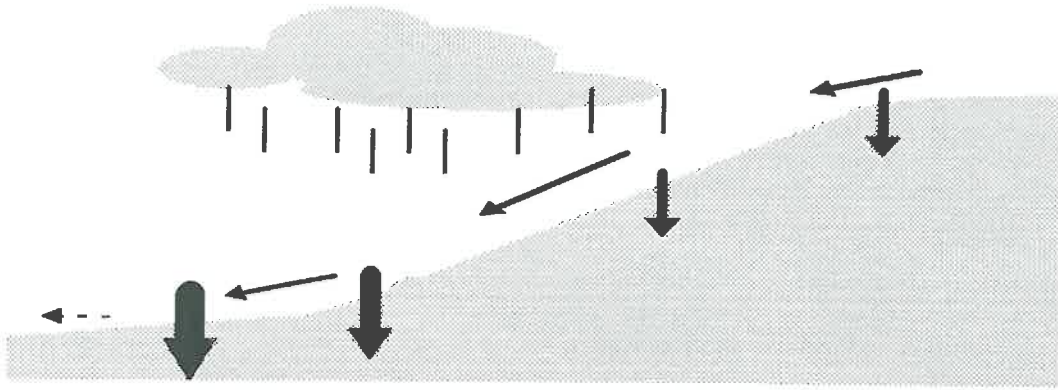


Figure IV18 : schéma de l'apparition du ruissellement le long du versant au cours de la deuxième période.

3.1.3. Troisième période

L'infiltration au point de concavité et sur le replat aval peut être fortement réduite, du fait de la saturation initiale du sol et des caractéristiques physiques de la couche de labour. Le ruissellement se forme alors au niveau de cette partie de versant. Le ruissellement s'accroît de l'amont à l'aval. Il contribue à une alimentation fugace, mais notable du ruisseau, dont l'importance dépend beaucoup des averses antérieures, de l'averse considérée et de l'occupation du sol par des inter-cultures.

Le ruissellement dépend surtout des hauteurs pluviométriques. Le sol est saturé du bas de la parcelle vers l'amont selon les cumuls pluviométriques et l'état hydrique initial.

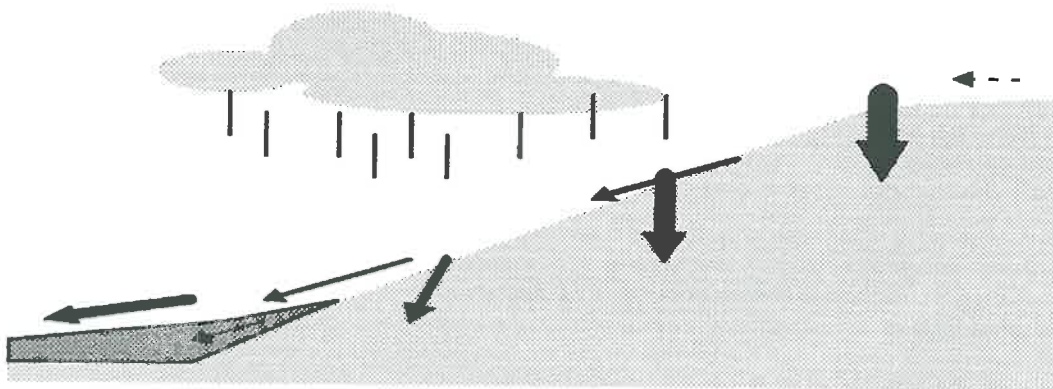


Figure IV19 : schéma de l'apparition du ruissellement le long du versant au cours de la troisième période.

3.2. Cas d'un système pédologique allant d'un sol drainant vers un sol hydromorphe en surface

Les parcelles correspondantes sont celles situées sur le bassin versant du Coët Dan. Le cas 1 correspond à la parcelle située à Tocplouz et la parcelle du cas 2 est celle de Kerjos. Les résultats ne permettent d'analyser que la deuxième période.

3.2.1. Deuxième période, système 1

Le sol est non battant, d'après l'indice de RIVIERE ; IB est inférieur à 1.4.

Un schéma analogue à celui de Rennes est proposé : un ruissellement important a lieu à l'amont et sur la pente ; aucun ruissellement n'est observé à l'aval. L'absence de dispositif sur la partie du versant caractérisée par une hydromorphie dès la surface ne permet pas de juger de cette portion du versant mais il est possible que le ruissellement apparaisse sur cette surface de manière identique au cas 2.

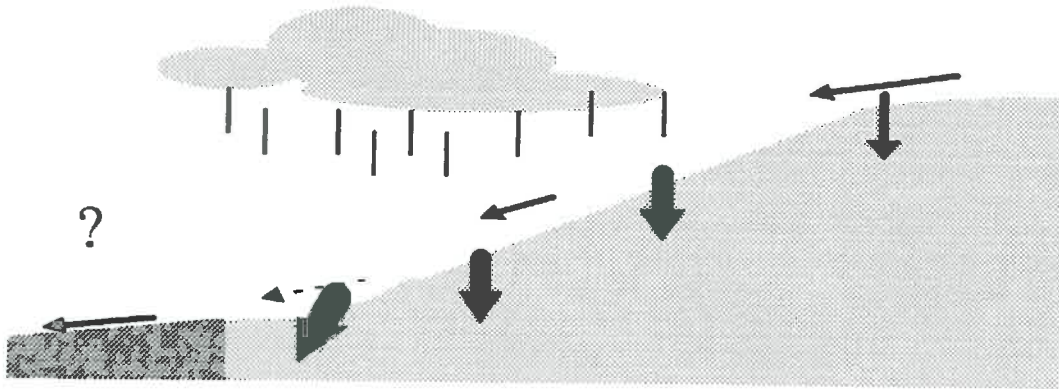


Figure IV20 : schéma de l'apparition du ruissellement le long du versant au cours de la deuxième période.

3.2.2. Deuxième période, système 2

Les valeurs des indices $R=1.28$ (REMY J.C. & MARIN-LAFLECHE A., 1974) et $IB=1.71$ (RIVIERE J.M.) indiquent que le sol est non battant (inférieur à 1.4) avec l'indice R et assez battant avec l'indice IB (entre 1.6 et 1.8).

Dans ce système, l'aval est caractérisé par une zone très battante et peu perméable. Les mécanismes de ruissellement répondent alors aux cumuls pluviométriques et aux intensités des pluies, dans cette partie du versant.

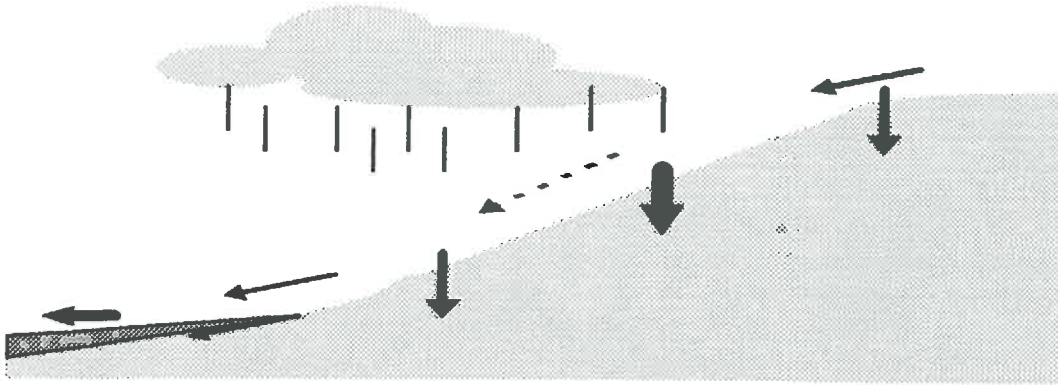


Figure IV21 : schéma de l'apparition du ruissellement le long du versant au cours de la deuxième période.

3.2.3. Hypothèses sur la première et la troisième période

Durant la première période, le ruissellement est supposé nul en amont et sur la pente de la parcelle, car la croûte de battance n'est pas développée : les sols ne sont pas ou peu battants. Le ruissellement ne peut apparaître qu'en aval de la parcelle liée en partie à la saturation du sol en eau, en relation avec le cumul pluviométrique.

Durant la troisième période, on doit vraisemblablement opter pour un ruissellement par saturation à l'aval en relation avec le cumul pluviométrique. La grande différence avec la parcelle de Rennes, est la position de la parcelle sur le versant qui induit une saturation en eau du sol à l'aval de la parcelle plus rapide et plus fréquente.

3.3. Conclusions

Les distributions spatiales et temporelles du ruissellement sur un versant complexe de forme convexo-concave peuvent être décrites selon un schéma général (fig. IV.22). Les deux mécanismes de ruissellement hortonien et de ruissellement par saturation coexistent au cours de la deuxième période. Le ruissellement par saturation se limite aux zones de bas fond où l'hydromorphie apparaît dès la surface. Le ruissellement hortonien se localise de l'amont jusqu'à la pente et il apparaît au cours des averses d'intensité supérieure au seuil d'infiltrabilité des sols. L'infiltration est forte au point de concavité et limite fortement la contribution des ruissellements au ruisseau dans la plupart des averses.

Au cours de la période hivernale, il y a surtout ruissellement par saturation. Les pluies au cours de cette période sont de faibles intensités et les trains d'averses nombreux se

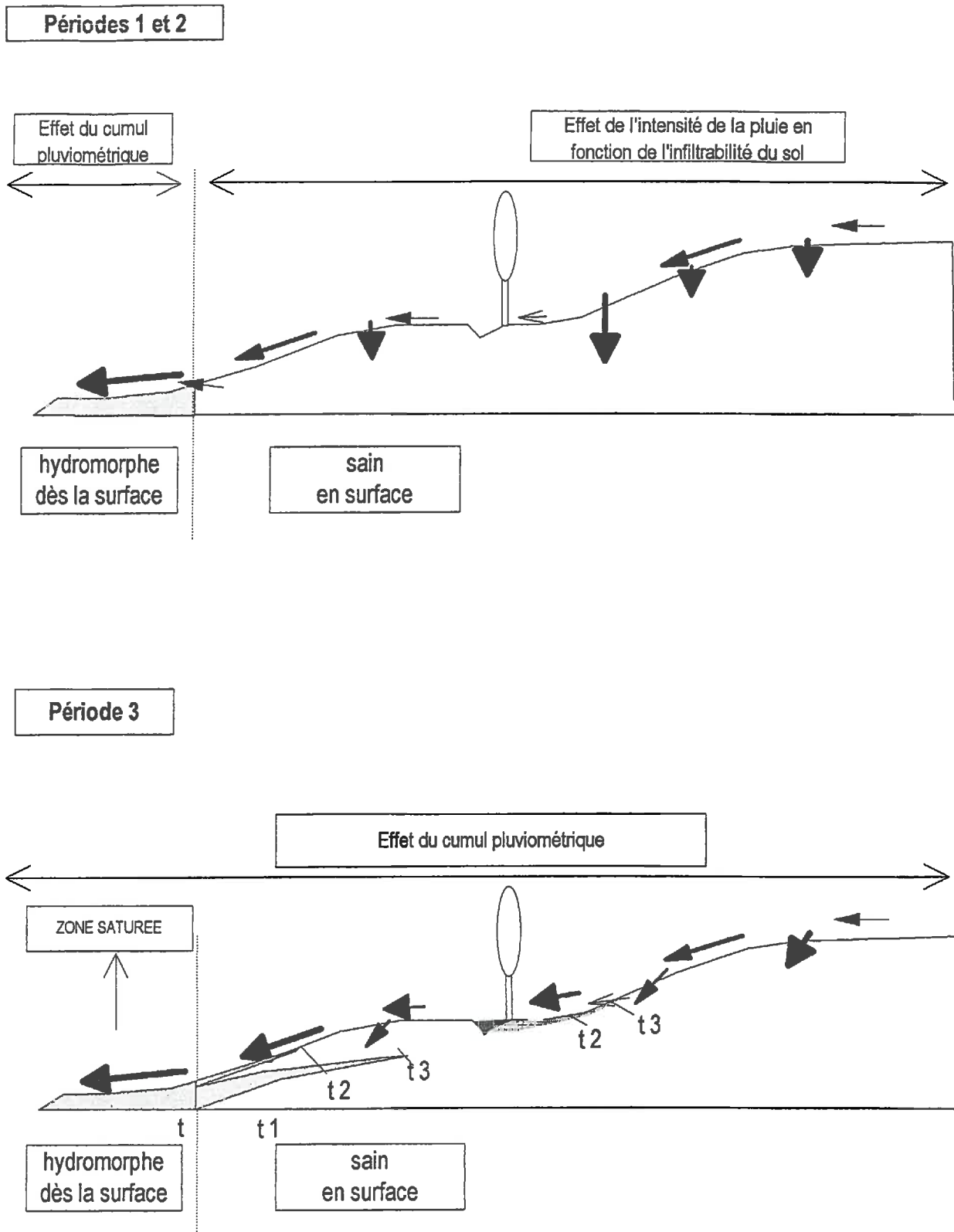


Figure IV.22 : schéma général du ruissellement sur le versant
 (la taille des flèches indiquent l'importance du volume ruisselé)

caractérisent par des cumuls pluviométriques importants. Ces derniers délimitent la surface de sol où le ruissellement apparaît. Sur la figure, les différentes phases t_1 , t_2 et t_3 indiquent l'ampleur que peut prendre la saturation du versant en fonction des cumuls pluviométriques.

CONCLUSION

La portée de ces résultats est fortement liée à la méthode (chapitre II) qui comporte des limites, liées en particulier la taille du totalisateur et à la non-limitation des surfaces contributives amont de chaque dispositif. Les volumes ruisselés sont grossièrement estimés. Le calcul d'un coefficient de ruissellement est entaché d'erreur. Seuls les événements faibles à moyens permettent une estimation relativement fiable du ruissellement. Néanmoins, les résultats obtenus permettent deux analyses de la distribution spatiale et temporelle du ruissellement et de hiérarchiser les situations à risque : en été, sous pluies modérées, la concavité représente un ralentisseur notable du ruissellement, mais inefficace au cours des pluies orageuses ; en hiver, la concavité n'est plus une zone privilégiée d'infiltration, en relation avec les teneurs hydriques initiales du sol, les cumuls pluviométriques, le tassement et la prise en masse.

Le modèle statistique élaboré à partir des résultats de Rennes et les schémas conceptuels montrent que :

- l'humidité du sol utilisée reflète bien les chroniques climatiques antérieures et le ressuyage du sol (BRYAN & CAMPBELL, 1980), en relation avec la culture et les travaux culturaux. Si le ruissellement est de type hortonien, l'intensité pluviométrique est le facteur déterminant. Si le ruissellement est de type ruissellement par saturation, le facteur déterminant est la hauteur pluviométrique. Ainsi, le facteur P^*I permet d'établir une courbe seuil valable dans différentes situations et à différentes échelles. Cette courbe varie en fonction des risques de ruissellement de la période et de la zone de versant étudiée. Ainsi, il serait nécessaire de coupler des méthodes, telles que tensiométrie, traceur (rhodamine) et sondes, afin de déterminer les seuils de chaque facteur ; les deux points, amont et aval, doivent être équipés.

- le versant présente des sous-systèmes fonctionnels en relation avec des unités cartographiques.

Chaque unité est homogène du point de vue de l'infiltrabilité et peut donc être caractérisée par une valeur moyenne, significative pour une période définie par le travail du sol.

La modélisation de l'organisation des sols couplée au système cultural pourrait alors aboutir à une modélisation du ruissellement sur le versant.

Cependant, une généralisation serait hâtive en terme de risque à partir de ces différents facteurs tels que la matière organique et le taux de colloïdes minéraux, couplés à la topographie. Ils sont évidemment importants mais l'analyse de risques ne peut se faire qu'au cas par cas. L'hétérogénéité spatiale - des sols ; des systèmes de culture ; des pratiques culturales - vis à vis des risques de ruissellement est un facteur incontournable, et difficilement appréciable par une valeur moyenne (CROS-CAYOT & GASCUEL-ODOUX, 1996).

Les transferts d'eau sont couplés aux transferts de particules, qui induisent des tris granulométriques, minéralogiques et de solutés et aux transferts de solutés. Ils sont appréciés dans les chapitres V et VI.

TRANSPORTS SOLIDES

Les transports solides dépendent à la fois de la stabilité structurale du sol, du démantèlement du sol par l'activité biologique, des conditions climatiques et des caractéristiques du ruissellement. Le ruissellement est, en effet, le vecteur des particules de sol.

Au cours des deux premières périodes (printemps ; été), de mai à octobre, l'érosion hydrique dépend de l'intensité des pluies en relation avec les états de surface du sol. Si la stabilité du sol est faible, les eaux de ruissellement sont relativement concentrées en particules solides, voire très chargées pour des épisodes de forte intensité. Les zones de départ sont la convexité de versant et la pente rectiligne. La concavité et le replat aval sont souvent des zones de dépôt. La compétence du ruissellement induit une redistribution des charges solides sur le versant, sans exportation notable vers le cours d'eau.

Pendant la période hivernale, la concentration en charges solides de l'eau de ruissellement est faible. Les particules les plus fines sont transportées tout le long du versant. La concavité et le replat aval ne sont plus des zones de dépôt. Il y a fréquemment un lavage de la surface du sol, selon un continuum du versant jusqu'au ruisseau.

INTRODUCTION

Ce chapitre caractérise les transports solides associés au ruissellement.

Les processus sont analysés en détail sur la parcelle de Rennes. Les résultats sont comparés aux valeurs mesurées sur d'autres cultures (Rennes) et sur les deux autres parcelles du bassin versant de Naizin.

On cherche ici, à préciser les zones du versant et les périodes sensibles aux transports solides sur une année culturale. On tente d'établir un bilan annuel des transports de surface et les caractéristiques minéralogiques et chimiques des particules, en relation avec la topographie et la pédologie du versant.

Ce chapitre se découpe en quatre parties .

- Le premier chapitre expose la méthode de prélèvement des échantillons, les valeurs de concentrations en charges solides et des caractéristiques granulométriques qui en découlent.
- Le deuxième chapitre aborde les mécanismes à l'échelle de l'événement pluvieux, en prenant en compte la turbidité des eaux de ruissellement et leurs caractéristiques, en fonction du ruissellement, des pluies et de la topographie.
- Le troisième chapitre tente d'établir un bilan d'érosion, en distinguant la redistribution à l'intérieur du versant des sorties hors de la parcelle, ceci afin de définir les zones sources, des zones puits, selon la topographie.
- Le quatrième chapitre traite des facteurs déclenchants et des hypothèses sur les mécanismes d'érosion.

1. ANALYSE DES MESURES

1.1. Rappel sur la méthode de prélèvement

Après chaque averse et pour chaque dispositif, une aliquote d'eau de ruissellement et de charges solides (250 ml en 1993 ; 500 ml à partir de 1994) est prélevée. Le prélèvement, du fond vers le sommet du totalisateur, s'effectue après homogénéisation du volume total contenu dans le fût totalisateur.

Le volume contenu dans l'aliquote a été estimé à partir d'une règle étalonnée au préalable. Pour peser la charge solide séchée, les pots, en polypropylène, ont été placés dans une étuve. La température de l'étuve est de 40 °C pour les échantillons analysés ensuite par

rayons X, sinon de 100°C. Après refroidissement, les pots sont pesés. Le poids des charges solides contenu dans l'aliquote est rapporté au volume prélevé par aliquote.

La concentration de charges solides ainsi obtenue (g/l) est appelée CS

$$CS = \frac{P_{cs}}{V_a} \quad \text{avec}$$

- P_{cs} (g), le poids de charges solides obtenues par aliquote
- V_a (l), le volume contenu dans l'aliquote

1.2. Qualité des mesures

Avant d'exploiter ces données, il est nécessaire de discuter de la qualité et de la signification des mesures. Deux types de biais apparaissent :

- Si le dispositif ne déborde pas, la concentration en charges solides de l'eau ruisselée, notée CS1, est mal estimée ; ce biais systématique est fonction, entre autre, de la technique de prélèvement par aliquote.
- Si le dispositif déborde, un biais, liée au débordement s'ajoute. La concentration en charge solide de l'eau ruisselée est notée CS2 ou CS3, suivant la méthode d'estimation retenue.

1.2.1. Biais systématique

Cette erreur est de deux types :

- l'approximation de lecture du volume ruisselé, de 1 à 10 % (chapitre II).
- l'erreur liée aux prélèvements d'aliquotes, après mélange.

LANG (1992) indique des valeurs de concentration entre 1 et 187 g/l dans des eaux ruisselées obtenues au cours de simulation avec 300 litres d'eau de pluie. Les valeurs obtenues à Rennes semblent anormalement élevées (annexe). Les mesures effectuées au laboratoire (annexe) indiquent que la technique d'échantillonnage par aliquote surestime la concentration en charge solide à partir de volumes supérieurs à 20 litres (fig V.1). En effet, une concentration théoriquement égale à 50 g/l est environ égale à 100 g/l avec un volume de 40 litres (fig.V.2). Avec des volumes plus importants, «l'erreur» commise est plus forte et doit être prise en compte à partir de concentrations égales à 10 g/l. La dispersion des valeurs est faible. Une correction est proposée en prenant en compte le volume ruisselé à partir de 20 litres et la concentration à partir de 10 g/l. La correction correspond à une fonction exponentielle :

$$CS1 = (1,34e^{-0,02VR}) * CS$$

$$CS1 = CS$$

CS : donnée brute > 10 g/l
 et
 20 l < VR < 60 l : volume mesurée

CS1 : valeur corrigée

CS : donnée brute < 10 g/l
 et

VR < 20 l : volume mesurée

CS1 : valeur corrigée

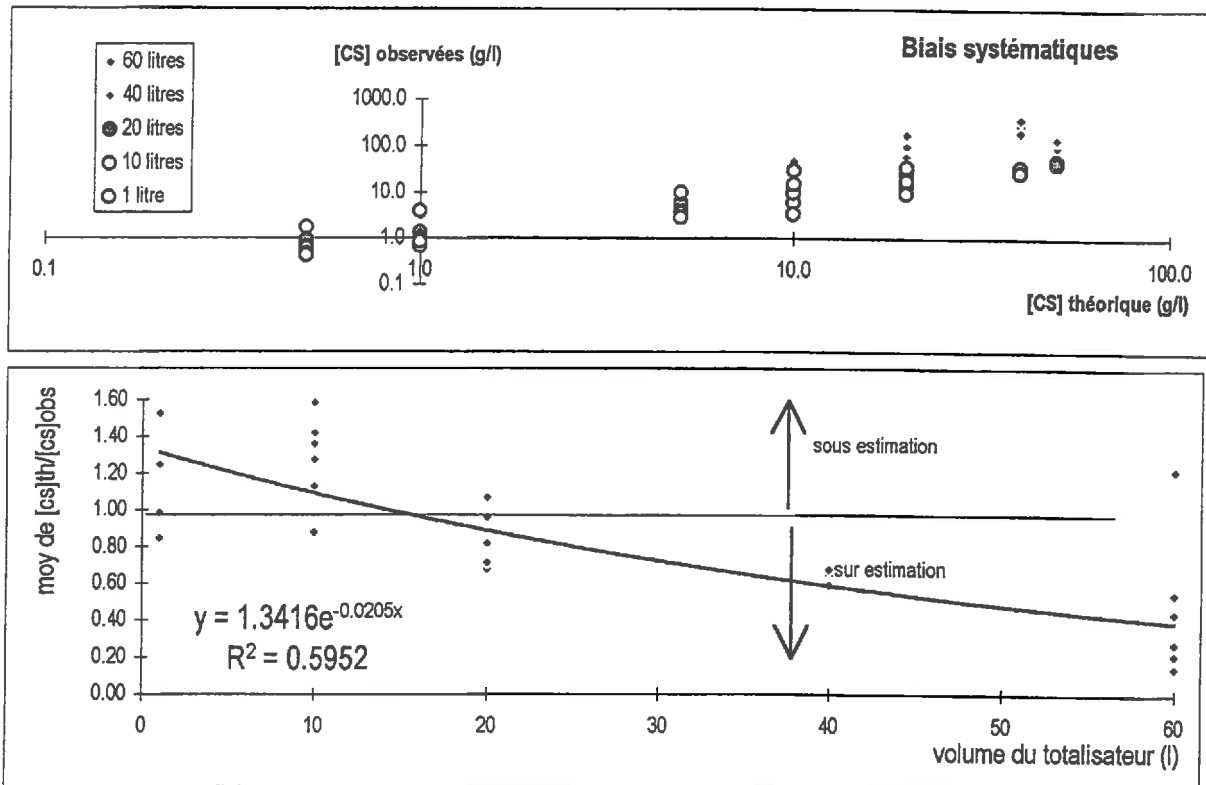


Figure V.1 : estimation de l'erreur commise avec la technique de recueil par aliquote ; proposition d'une droite de correction

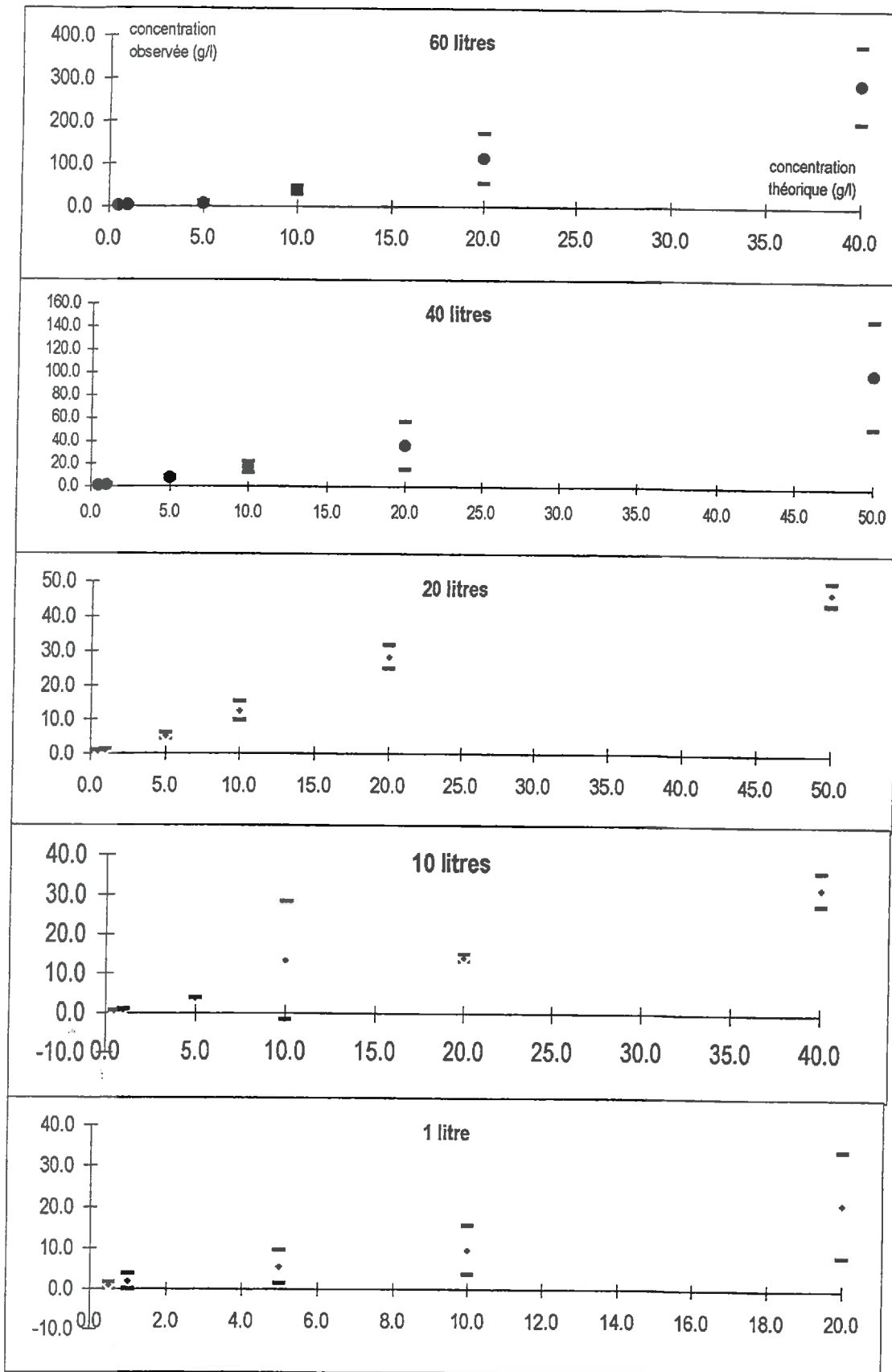


Figure V.2 : concentration observée en fonction de la concentration théorique pour différents volumes ruisselés

1.2.2. Biais lié au débordement

Ce biais concerne 27 % des données. En nombre d'averses provoquant un débordement dans au moins un dispositif, il apparaît au cours de : 2 averses sur 7 en première période ; 6 averses sur 9 en deuxième période ; 16 averses sur 22 en troisième période. Il semble donc indispensable de l'apprécier.

Cependant, il est plus délicat à estimer. En effet, la concentration des particules solides transportées par ruissellement évolue au cours de l'averse (ROOSE, 1980). Cette concentration dépend à la fois de la désagrégation et du détachement de particules sous l'action des pluies (HUDSON, 1957), de la vitesse du flux de ruissellement (HJULSTORM, 1935) et de sa turbulence (nombre de Reynolds). De plus, la charge solide est composée de colloïdes minéraux, de particules de la taille des limons fins et grossiers et parfois de la taille des sables fins et grossiers, dont la vitesse de sédimentation est très différente. Au cours des débordements, il y a une perte non négligeable de particules fines.

Deux difficultés interviennent :

- l'estimation du volume d'eau débordé ;
- l'estimation de la quantité de charges solides non recueillie.

Ces valeurs sont estimées par événement pluvieux et par dispositif.

Estimation du volume d'eau débordé

Il est possible d'estimer un volume de ruissellement, en considérant la surface contributive amont du dispositif, les caractéristiques de la pluie et en fixant un coefficient de ruissellement probable. Deux stratégies sont envisageables : soit rechercher un majorant ; soit estimer au mieux le volume ruisselé. Pour fixer les coefficients de ruissellement, trois références sont disponibles :

① au cours de la deuxième période, de juin à début août 1994, des microparcelles de 10 m² ont été installées à mi-pente, sur la parcelle de Rennes. Une averse a provoqué un débordement ; les valeurs de coefficient de ruissellement varient entre 0,4 et 9,5 %, suivant les averses (tableau V.1) (FARRIE, 1994).

	mai 1994			juillet 1994		
date	16	25	26	17	24	27
% CR	1,8	0,4	1,0	7,7	> 6,8	9,5

Tableau V.1: coefficients de ruissellement estimés à partir de micro - parcelles (FARRIE, 1994).

② les volumes ruisselés ont été enregistrés au pas de temps de la minute, sur la pente, à partir d'une sonde à ultrasons; les enregistrements existent pour un évènement de la deuxième période et pour quelques averses au cours de la troisième période ; on considère qu'au cours de cette dernière, lorsque le ruissellement commence, toute la pluie ruisselle ; les coefficients de ruissellement varient entre 3 et 32 %, suivant les averses (tableau V.2).

mois	07	09												10			11		12	
date	31	10		13	14	15	19	20	22	23	24	19	23	25	4	5	28	29		
%CR	3	12		4	6	5	6	6	5	5	5	6	6	7	5	6	5	32		
mois	01			02			03													
date	2	17	26	8	11	3	7													
%CR	3	6	4	2	4	3	6													

tableau V.2: coefficients de ruissellement estimés à partir des données de sonde à ultrason.

③ les travaux réalisés dans le Pays de Caux, dans un contexte climatique proche, permettent d'évaluer des ordres de grandeur du coefficient de ruissellement à partir de microparcelles fermées de 1 m² à 500 m² (GALLIEN, 1994 ; CHAPLOT, 1995). Ces travaux indiquent des valeurs variables en fonction des pentes, des échelles considérées, de l'intensité et de la hauteur de l'averse (tableau V.3).

pente	2%	4%				
surface considérée (m ²)	1	1	20		500	
Intensité pluie (mm/h)	1.6	1.6	< 5	> 5	< 5	> 5
Coefficient de ruissellement	35%	40%	10%	35%	2%	25%

Tableau V.3: coefficients de ruissellement obtenus par GALLIEN (1994) ; Pays de Caux.

Le sol de la parcelle de Rennes a des caractéristiques granulométriques et structurales (chapitre II et III) comparables à celles des sites d'étude du Pays de Caux. Les intensités et cumuls pluviométriques sont proches des caractéristiques présentées par GALLIEN. Le taux de couverture du sol est inférieur à 70% en juillet et maximum en août ,

soit de 75%. Cependant, ces valeurs paraissent élevées, si on les compare aux résultats obtenus par FARRIE et ceux obtenus à partir de la sonde (hormis l'averse du 29 décembre 1994).

En définitive, les coefficients de ruissellement sont fixés différemment selon :

- les niveaux topographiques pour le même événement ;
 - l'inter-rang en fonction la fréquence de débordement de chaque dispositif ;
 - les événements pluvieux, en fonction de leurs caractéristiques pluviométriques ;
- On choisit donc au cas par cas, un coefficient de ruissellement.

A. Stratégie pour estimer au mieux le volume débordé

En première période:

(1) Il est fixé au point amont, à partir des coefficients de ruissellement de FARRIE (1994). Le volume ruisselé est calculé par :

$$VR = CR * \text{largeur de l'inter-rang} * \text{distance amont} * Q$$

avec le coefficient de ruissellement (CR) en %, la largeur de l'inter-rang et la distance amont en mètre et Q, le cumul de l'événement, en mm.

On considère que la surface amont contributive au dispositif contribue entièrement au ruissellement. Si le volume obtenu est inférieur à 60 litres, le coefficient de ruissellement est réajusté de proche en proche.

(2) Les coefficients de ruissellement, aux quatre autres situations topographiques, sont plus faibles. L'infiltration est importante (chapitre I). Le volume ruisselé de l'amont fixe un ordre de grandeur du volume d'eau. De plus, le nombre de dispositifs débordés indique l'importance des phénomènes.

A partir des conclusions du chapitre IV, on décide d'attribuer à la pente un volume supérieur à celui de l'amont, et d'attribuer aux deux points aval des valeurs fortement inférieures.

(3) Il est réajusté en comparant les averses entre elle, notamment par rapport aux intensités et cumuls. On s'appuie alors sur les travaux de GALLIEN (1994) qui montre que le coefficient de ruissellement est fortement dépendant de l'intensité des événements.

La même méthode d'estimation des coefficients de ruissellement est utilisée pour les données de la deuxième période. La différence se situe au niveau du premier point où l'on s'appuie également sur les résultats des tableaux V.1 et V.2.

Au cours de la troisième période, le principe reste identique. Néanmoins, on considère que les deux points aval ont des valeurs de coefficient de ruissellement identiques et que les volumes ruisselés sont importants (cf chap. IV). Le coefficient de ruissellement prend alors en compte toute la surface amont au dispositif.

Les estimations du coefficient de ruissellement pour les trois périodes sont résumées (tableau V.4).

b. Stratégie pour estimer un volume majorant

Les cinq niveaux ne sont plus pris en compte. On distingue seulement deux domaines : l'amont et l'aval (chap. IV). Les coefficients de ruissellement sont fixés à partir des résultats de GALLIEN (1994), ces phénomènes étant plus conséquents au Pays de Caux que sur ce site.

- Au cours des averses de mai 94, une valeur de 10% est fixée pour le «domaine amont» et une valeur de 2 % pour le «domaine aval». Pour l'amont, on se réfère aux intensités inférieures à 5 mm sur 20 m² de GALLIEN. En aval, on intègre l'importance de l'infiltration sur notre parcelle, en utilisant les valeurs de GALLIEN pour des parcelles de 500 m².

- Au cours des épisodes violents de juillet à septembre, on utilise le même principe, mais en se référant aux valeurs du tableau V.3 dont les intensités sont supérieures à 5 mm/h. En amont jusque dans la pente, on fixe un coefficient de ruissellement de 35 %. En aval, on fixe un coefficient de ruissellement de 25 %.

- pour la période hivernale, on fixe une valeur de 25 % du coefficient de ruissellement pour les dispositifs au-dessus et en dessous de la convexité, de 15 % à l'aval ; on utilise les maxima des valeurs estimées ;

Coefficient de ruissellement (%)

date	I (mm/h)	P (mm)	DISPO>	aval	convex	pente	convex	aval	convex	pente	convex	aval	convex	mont
16.mai.94	7	30	10		1	3	3	3	1.5%	2.0%	3.0%		3.0%	7.0%
25.mai.94	8.5	9.5	2			1	1			3.0%	4.0%			
17.jul.94	4	23	1				1				5.0%			
24.jul.94	14.5	22	12	2	3	3	2	4.5%	5.0%	9.0%	10.0%			11.0%
28.jul.94	9	10.5	4	1	1	1	1	3.5%	4.0%	7.0%	9.0%			
09.aou.94	5	11.5	7		2	1	3		3.0%	4.0%	6.0%			12.0%
09.sep.94	2.5	17	10	1	2	3	2	2.0%	2.5%	4.0%	5.0%			10.0%
13.sep.94	8.5	33	8		1	3	2		1.5%	3.0%	4.2%			6.0%
09.nov.94	6.5	22	1			1				2.3%				
15.nov.94	3	22	2			1				7.5%				23.5%
07.déc.94	3.5	8.1	4	1	1	1		2.0%	3.0%	3.0%				7.0%
18.déc.94	5	8.5	1											
29.déc.94	4	7.5	3	1	1									
30.déc.94	2.5	7.5	5	2	1	1		3.0%	3.0%					11.0%
17.jan.95	5.5	17	5	2	1	1		7.0%	7.0%	9.0%				27.5%
19.jan.95	6	44	11	2	2	3	1	2.0%	2.0%	2.5%				7.0%
21.jan.95	3	23.5	7	2	3	1		1.5%	2.0%	2.6%	4.0%			9.0%
27.jan.95	2.5	22	15	3	3	3	3	2.0%	2.0%	2.0%				6.0%
30.jan.95	1.5	29.5	9	3	3	2		11.0%	11.0%	13.0%	15.0%			15.0%
01.fév.95	3	15	8	3	3	1		11.0%	11.0%	13.0%				15.0%
13.fév.95	2	10	1		1			5.0%	5.0%	5.0%				13.5%
14.fév.95	2.5	6	4	2	2				13.5%					
27.fév.95	5	37	7	3	3			45.0%	45.0%					
02.mar.95	3	7.6	4	2	1			2.0%	2.0%					6.5%
07.mar.95	2.5	15	7	3	3			5.0%	5.0%					21.0%
								3.0%	3.0%					11.0%

Tableau V.4 : évaluation de coefficient de ruissellement aux différents niveaux de pente et en fonction des averses ; Rennes

Une deuxième correction de la concentration en charge solide est alors envisagée. Elle correspond à CS2.

$$CS2 = \frac{CS1 * VR}{VRtotal}$$

avec

Cas a : CS2a

Cas b : CS2b

- CS1 (g/l), la valeur corrigée par l'erreur de la technique par aliquote

- VR (l), le volume d'eau recueillie dans le totalisateur, soit 60 litres.

- VR total.

Cas a : volume ruisselé estimé

Cas b : volume ruisselé majorant

Cette correction ne prend pas en compte le poids des particules fines exportées. En effet, le temps de sédimentation des limons fins et des particules de la taille des argiles est respectivement de 4 minutes 48 secondes et de 8 heures, à 20°C, sur une hauteur de 10 cm. Le ruissellement dure généralement quelques minutes à quelques heures, et le débordement du fût est rapidement atteint, entraînant les particules les plus fines.

Estimation des pertes de particules de la taille des argiles et des limons fins

On suppose que la concentration en charge solide de la taille des argiles et des limons fins est constante au cours de l'évènement.

La granulométrie des particules solides recueillies dans le totalisateur correspond :

- aux fractions fines (taille des argiles et des limons fins) qui ont eû le temps de sédimenter, soit celles contenues dans les 60 litres ;

- aux fractions grossières (taille supérieure aux limons grossiers) qui ont été transportées jusqu'au totalisateur, soit l'ensemble des particules de cette taille transportées par ruissellement. En effet, l'eau ruisselée arrive directement dans le totalisateur puis s'échappe par l'espace ménagé pour l'entrée du tube à base carrée.

Pour estimer le départ préférentiel des colloïdes minéraux et des limons fins, on envisage le poids respectif en gramme (Pa, Plf, Plg, Psf et Psg) des différentes fractions de la charge solide pour chaque période (& 2.1.2) à partir du volume ruisselé maximum

(VRmax), pour les deux cas envisagés précédemment pour le calcul de la concentration en charge solide (CS1).

Le poids des charges solides à la fois exporté et recueilli dans le totalisateur est alors égal à :

$$P_{CS\text{ corrigé}} = (P_{lg} + P_{sf} + P_{sg}) + (P_{Ea} + P_{Elf})$$

avec

$$P_{Ea} = \frac{(P_a * VR_{\text{max}})}{VR}$$

$$P_a = \% \text{Argile} * CS1 * VR$$

$$P_{Elf} = \frac{(P_{lf} * VR_{\text{max}})}{VR}$$

$$P_{lf} = \% \text{Limon fin} * CS1 * VR$$

$$P_{lg} = \% \text{Limon grossier} * CS1 * VR$$

$$P_{sf} = \% \text{sable fin} * CS1 * VR$$

$$P_{sg} = \% \text{sable grossier} * CS1 * VR$$

VR correspond au volume mesuré à partir du totalisateur jusqu'à une valeur maximum de 60 l.

VR max est le volume estimé à partir des coefficients de ruissellement.

Pa, Plf, Plg, Psf et Psg sont les poids respectifs des différentes fractions granulométriques contenues dans le totalisateur.

Pea et Pelf sont les poids totaux des fractions fines (recueillies + exportées).

La concentration en charge solide correspond à :

$$CS3 = \frac{P_{CS\text{ corrigé}}}{VR_{\text{max}}}$$

avec

Pcs corrigé (g), le poids de charges solides estimé en tenant compte de l'exportation en particules de la taille des argiles et des limons fins

avec CS3a, calculée à partir des volumes «approximatifs» estimés et CS3b calculée à partir des volumes maxima estimés.

1.3. Discussion

- Les valeurs CS1, CS2 et CS3 sont-elles majorantes ou minorantes?

La figure V.3 présente les modifications effectuées des valeurs brutes, à partir des distributions.

De CS à CS1, les corrections ne touchent que les fortes valeurs de concentration, mais ne semblent pas modifier fortement la répartition selon un histogramme de classe. Ce calcul est indispensable pour l'ensemble des volumes ruisselés supérieurs à 40 litres et dont les concentrations en charge solide sont supérieurs à 20 g/l. Cette erreur est inhérente à la technique d'échantillonnage par aliquote.

De CS1 à CS2, la concentration en charge solide est d'autant plus diminuée que le volume ruisselé estimé est grand. CS2 est donc un minorant. De plus, la perte en charge solide est d'autant plus importante lorsqu'elle se compose d'une majorité de fractions fines. Les concentrations ainsi estimées sont des estimations minimums puisqu'elles ne prennent en compte que les pertes en eau. On dilue ainsi, le poids de la charge solide recueillie dans un volume bien supérieur, avec CS2a supérieur à CS2b.

De CS2 à CS3, on prend en compte le poids des fractions granulométriques susceptibles de ne pas être recueillies. Cette hypothèse n'est pas complètement juste. En effet, ROOSE (1980) montre que la turbidité des eaux est maximum au cours du régime transitoire du ruissellement et diminue, au cours d'une deuxième phase, pour atteindre un régime permanent (fig.V.4). Ainsi, en s'appuyant sur les charges solides recueillies dans le totalisateur, nous calculons trop de perte. CS3 apparaît alors comme une valeur majorante, où CS3a est supérieur à CS3b. Néanmoins, selon la proportion de fractions fines par rapport aux fractions grossières, CS3 est la valeur qui semble la plus proche de la concentration réelle des eaux de ruissellement, comparée à CS2.

- Quels valeurs retenir?

CS est une valeur brute que l'on ne retiendra pas. Elle est doublement erronée : erreur sur aliquote et forte concentration des charges solides en fonction des pertes en eau et en particules liées aux débordements.

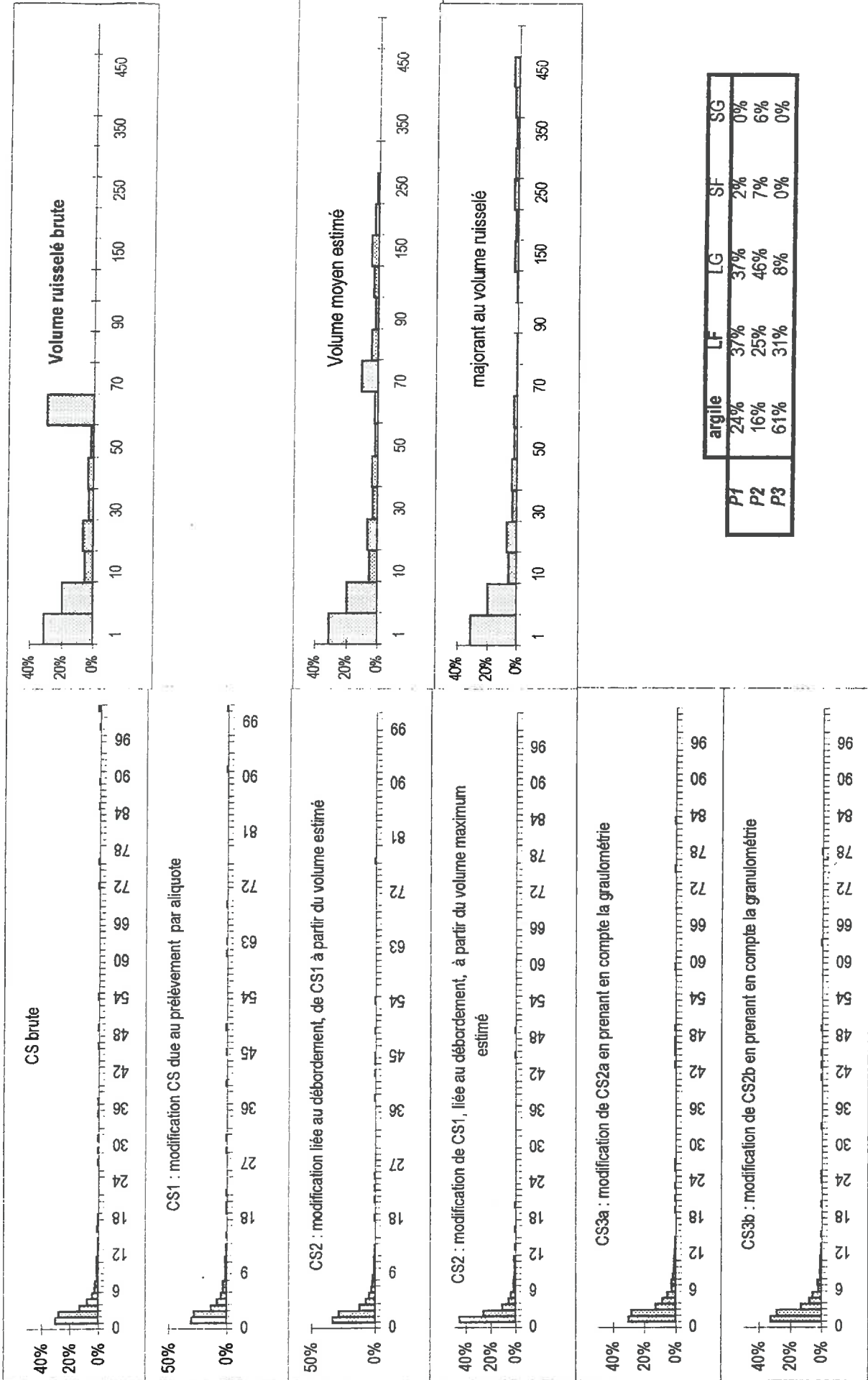


Figure V.3 : étapes de modifications et de corrections des valeurs brutes

CS1 pourrait cependant permettre des comparaisons par niveau de pente, si l'on représente des classes de concentration. Les données semi-quantitatives sont alors utilisées comme des valeurs qualitatives.

Cependant, CS2 et CS3 semblent être le couple à utiliser puisqu'il représente une fourchette minimum et maximum (fig.V.5). Il semble alors plus judicieux de retenir :

- pour les concentrations en charge solide, CS3a, comme valeur maximum, et CS2b comme valeur minimum. La concentration exacte en charge solide se situe entre ces deux valeurs ;

- pour le poids de charge solide, $CS3b \cdot VR_{max}$, comme valeur maximum, et $CS2a \cdot VR_{estimé} = CS2b \cdot VR_{maximum}$, comme valeur minimum.

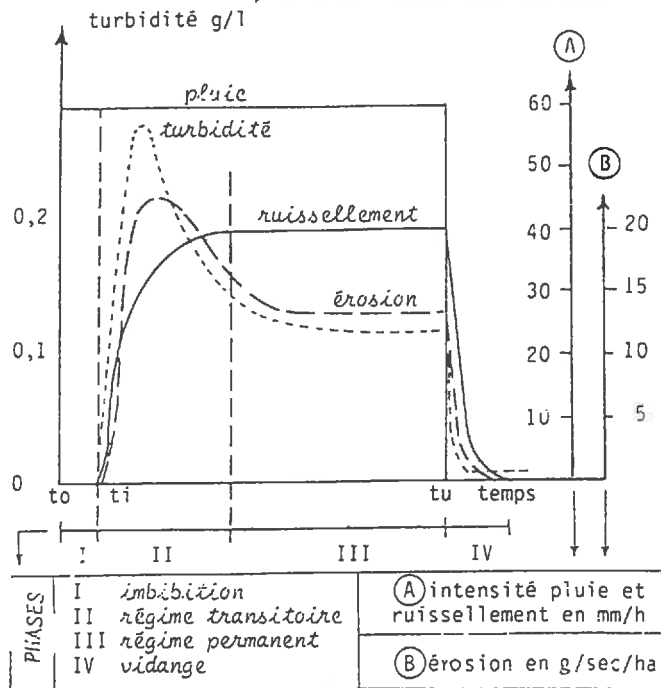


Figure V.4 : représentation graphique d'une averse simulée constante montrant les variations de turbidité des eaux de ruissellement (ROOSE, 1980)

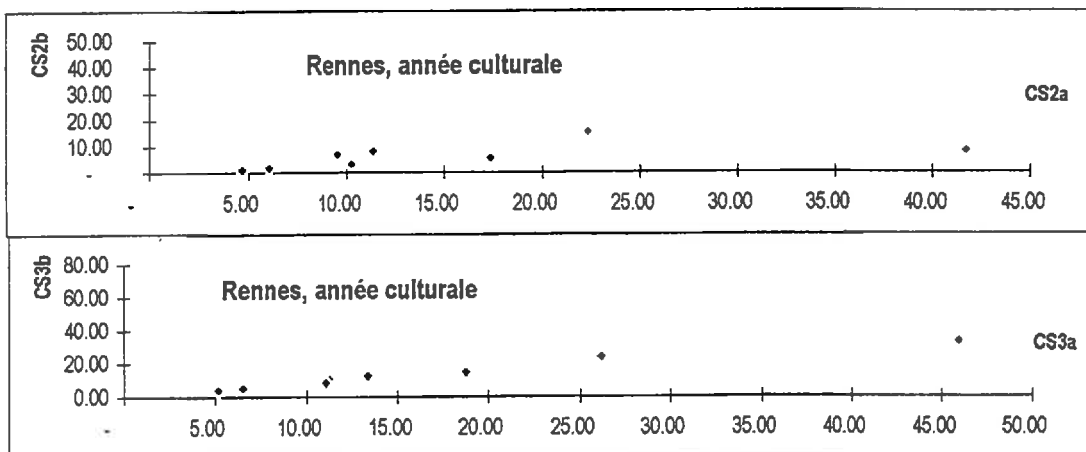


Figure V.5 : comparaison des concentrations en charges solides, calculées avec un volume estimé ou un volume majorant

• Conséquence sur les résultats

Les deux valeurs retenues (CS2 et CS3) nous renseignent sur l'importance des transports solides, si elles sont rapportées à un poids. En effet, la concentration masque l'information du poids de particules transportées par le flux (fig. V.6). Le poids de charges solides sera calculé à partir de CS3b et CS2b avec le volume maximum, comme par exemple pour l'estimation des bilans pour une période ou une portion de parcelle.

Pour conclure ce paragraphe, l'estimation de la fraction granulométrique des charges solides recueillies est discutée. Les fractions granulométriques sont mesurées sur les échantillons recueillis par aliquote. Les proportions des différentes tailles de particules sont alors plus ou moins inexactes, selon les différentes périodes et la composition granulométrique de l'échantillon. En effet, les particules de la taille des argiles et des limons fins sont sous-estimées ; en revanche, la part de limons grossiers, de sables fins et de sables grossiers sont sur-estimés. Elles peuvent être également corrigées en fonction des estimations des pertes.

Le pourcentage des différentes fractions granulométriques est alors égal à :

$$\% \text{ argile} = \frac{PEa * 100}{PEa + PElf + Plg + Psf + Psg}$$

$$\% \text{ limon fin} = \frac{PElf * 100}{PEa + PElf + Plg + Psf + Psg}$$

$$\% \text{ limon grossier} = \frac{Plg * 100}{PEa + PElf + Plg + Psf + Psg}$$

$$\% \text{ sable fin} = \frac{Psf * 100}{PEa + PElf + Plg + Psf + Psg}$$

$$\% \text{ sable grossier} = \frac{Psg * 100}{PEa + PElf + Plg + Psf + Psg}$$

Cette composition granulométrique corrigée est discutée en fonction de la composition initiale dans le paragraphe 2.1.2.

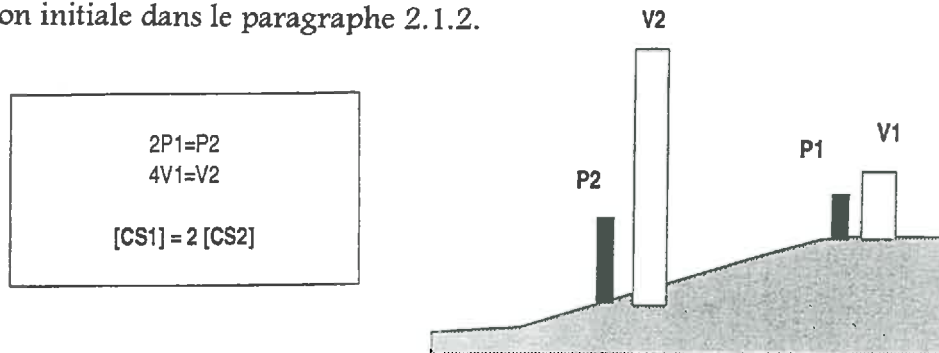


Figure V.6 : schéma de comparaison des données exprimées en poids ou en concentration

1.4. Conclusion

L'ensemble de ces corrections doit inciter à une utilisation prudente des données. Elles indiquent relativement bien des variations aussi bien spatiales que temporelles. Le but de ce chapitre est surtout de caractériser les sites du point de vue des mécanismes et des transports particuliers à l'intérieur d'un versant. Les bilans d'érosion qui sont tirés de ces données, sont des extrapolations à prendre avec prudence : les valeurs indiquées en gramme par m² et par an n'ont d'intérêt que pour une réflexion sur l'impact du ruissellement et sur les redistributions solides au sein du versant. En effet, la méthode retenue présente de grandes limites pour estimer la concentration en charge solide lorsqu'il y a débordement des totalisateurs

2. TURBIDITE DES EAUX DE RUISSELLEMENT

Les résultats de la parcelle de Rennes, au cours de l'année culturale 94-95, sont présentés dans le paragraphe 2.1. Les résultats obtenus sur d'autres sites ou d'autres périodes sont ensuite discutés dans le paragraphe 2.2.

2.1. Parcelle de Rennes, 1994 ~ 1995

2.1.1. Description des variations spatiales et temporelles des transports solides

Les trois périodes, P1, P2 et P3, mises en évidence dans les chapitres III et IV sont également utilisées.

La chronique des concentrations moyennes et du poids en charge solide, par niveau de pente et par date, montre (fig. V.7 et fig. V.8) une nette distinction entre les trois périodes.

Au cours de la première période (fig.V.7a et V.8a), trois averses seulement provoquent une érosion sur le versant. Les concentrations moyennes sont égales au plus à 35 g/l. L'érosion apparaît la plus importante dans le domaine amont. L'ensemble des particules mobilisées se dépose entre la pente et la concavité. Il n'y a pas de sortie hors de la parcelle.

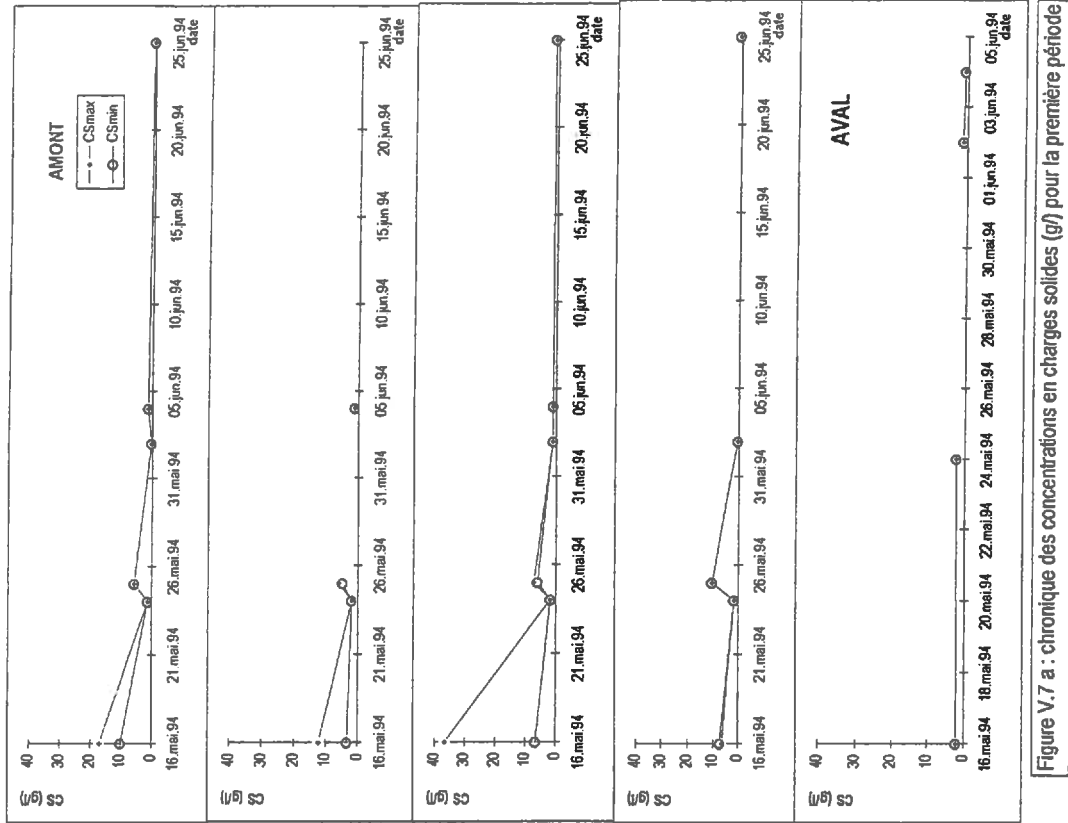


Figure V.7 a : chronique des concentrations en charges solides (g/l) pour la première période

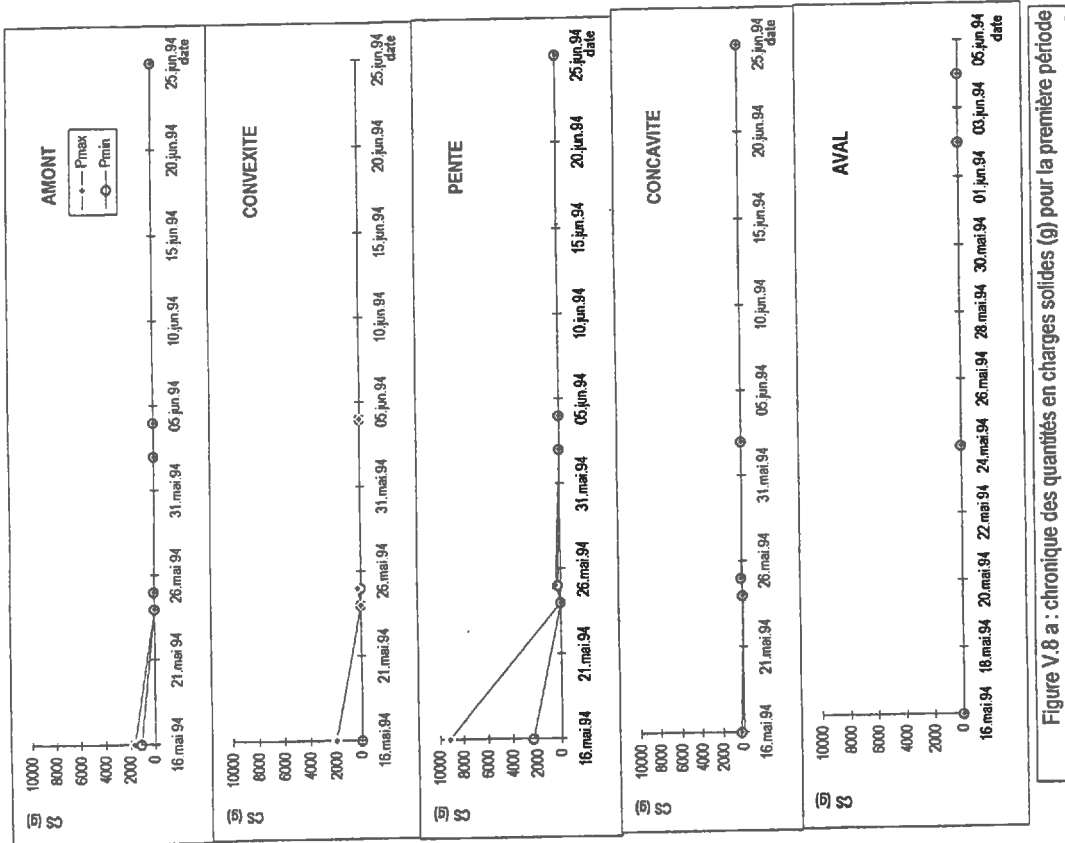


Figure V.8 a : chronique des quantités en charges solides (g) pour la première période

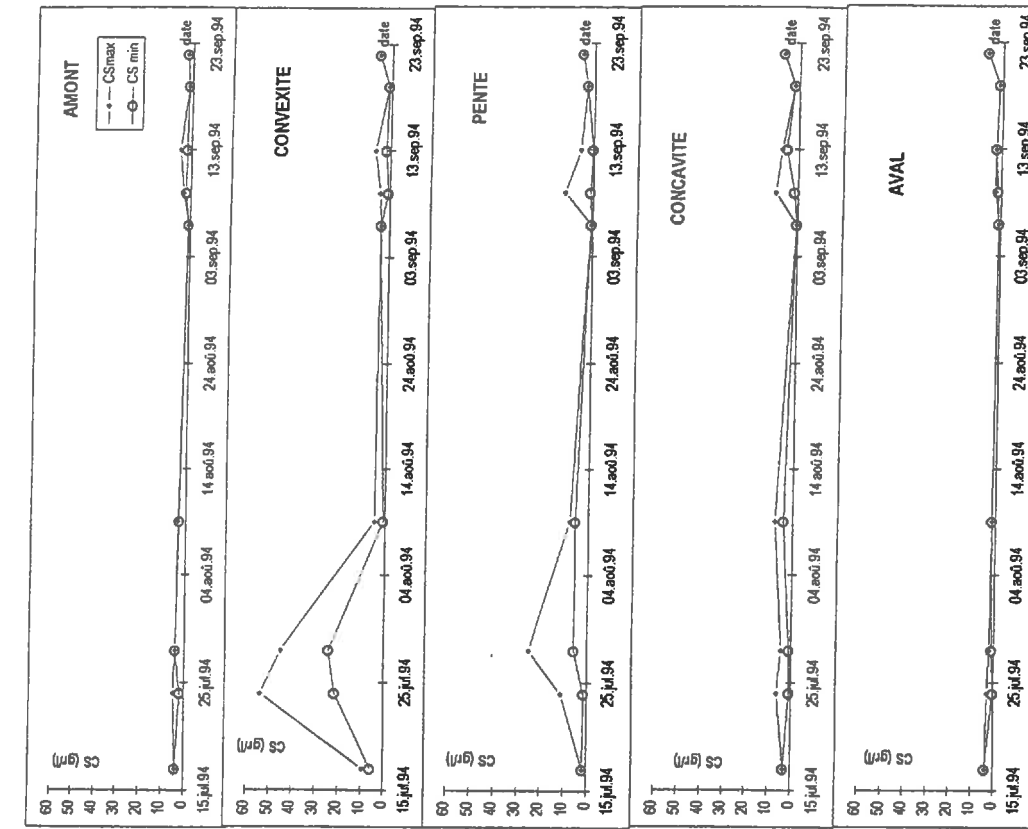


Figure V.7b : chronique des concentrations en charges solides (g/l) pour la deuxième période

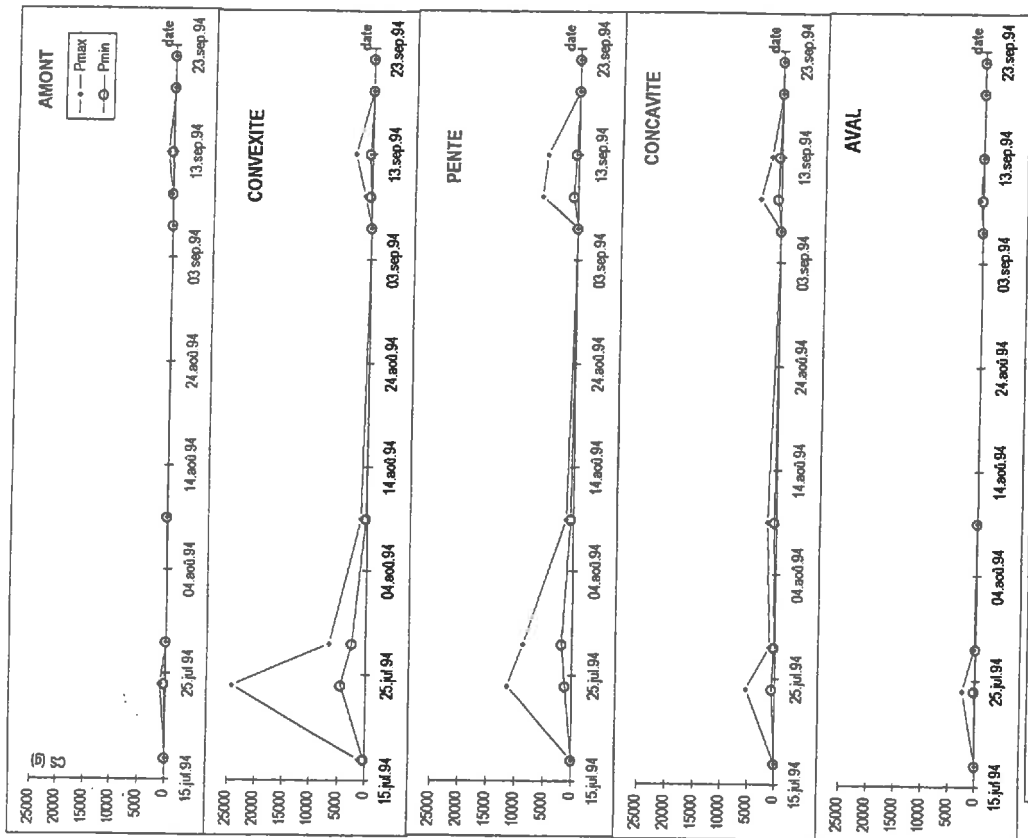


Figure V.8 b : chronique des quantités en charges solides (g) pour la deuxième période

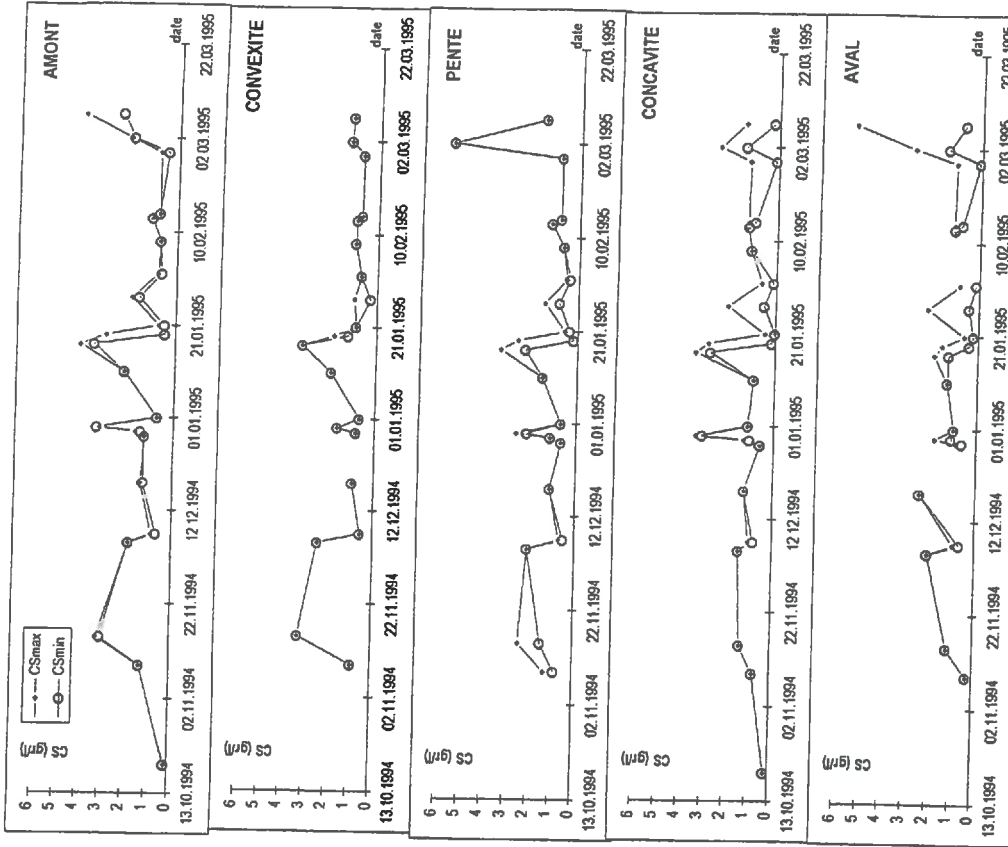


Figure V.7 c : chronique des concentrations en charges solides (gf) pour la troisième période

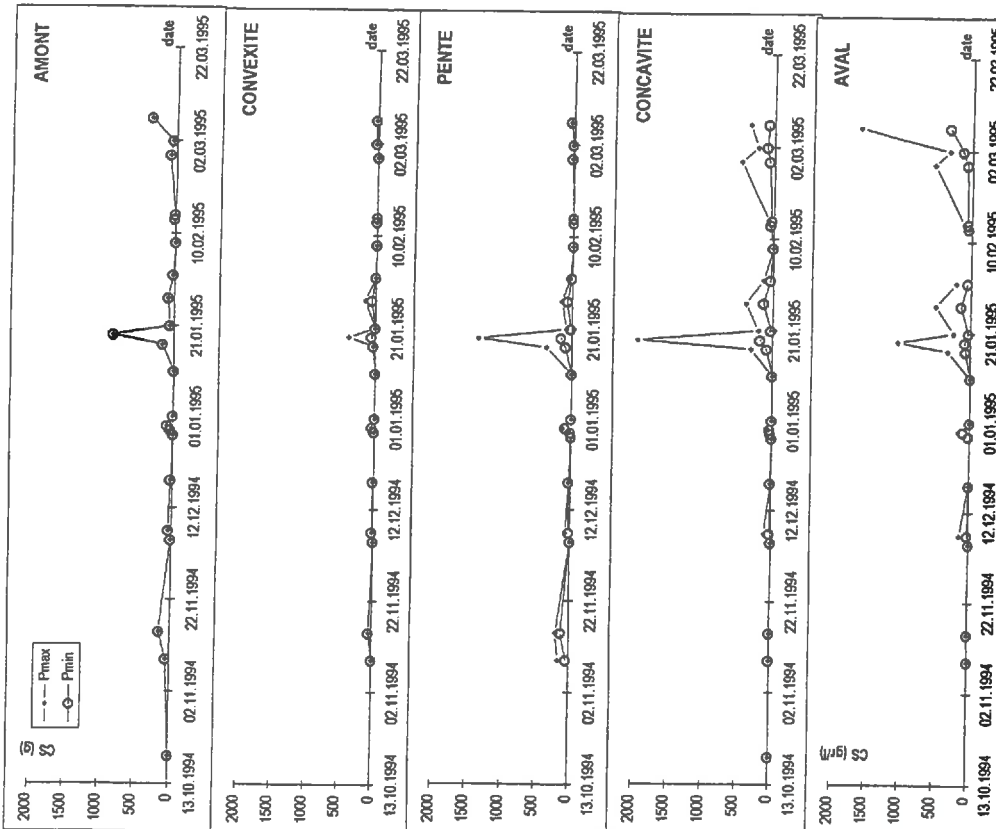


Figure V.8 c : chronique des quantités en charges solides (g) pour la troisième période

Durant la période estivale (fig. V.7b et V.8b), les concentrations moyennes vont de 5 à 60 g/l. Les valeurs les plus fortes sont relevées au point de convexité et les plus faibles, sur le replat aval. La redistribution à l'intérieur du versant est importante, en général, sans sortie à l'aval de la parcelle. Un seul événement orageux provoquent des transferts particuliers notables à l'aval. Au cours du mois de septembre, les concentrations ne dépassent pas 10 g/l, mais les particules sont mobilisées de l'amont jusque dans la pente et ne se déposent qu'à partir du replat aval. La concentration en charge solide, à la concavité, semble encore importante.

Pendant la période hivernale, les eaux sont faiblement concentrées. La concentration moyenne est au plus de 6 g/l.

L'effet de la topographie semble faible : les concentrations varient peu d'un niveau de pente à l'autre. Les sorties potentielles, hors de la parcelle ont lieu pour chaque averse ruissellante (fig.V.7c). Néanmoins, lorsque l'humidité du sol est importante (fin janvier à début février, chapitre III), les charges solides recueillies aux différents niveaux de pente ne sont pas égales. Le poids de particules (fig. V.8c) augmentent de l'amont à l'aval.

Les histogrammes de fréquence (fig. V.3) présentent une décroissance continue vers les concentrations les plus fortes. Il ne semble donc pas judicieux d'analyser ces mesures par classe de concentration.

2.1.2. Analyse spatiale

Les redistributions dans le versant semblent importantes (fig.V.9). La convexité est la zone qui semble «fournir» le plus de charge solide. Le dépôt se fait selon «un continuum» de la convexité jusqu'à l'aval. Ce résultat est valable aussi bien pour les valeurs de concentration que pour les valeurs en poids de particules. Il semble cependant, que le dépôt est plus important au point de concavité, lorsque les valeurs sont exprimées en poids.

2.1.3. Analyse des chroniques

Au cours de la première période, l'érosion est localisée de l'amont jusque dans la pente, en liaison avec l'apparition du ruissellement (chapitre IV). A l'aval, le ruissellement est nul, il n'y a pas de transfert particulaire. Le poids de particules semble lié au volume ruisselé. Le nombre de particules de sol libres à la surface est de plus en plus réduit, au fur et à mesure que la croûte de battance se forme.

Au cours de la deuxième période, le ruissellement est important dans la convexité et dans la pente, de même que les transferts de particules. La forte infiltration de l'eau en bas de versant provoque une diminution du ruissellement : les particules sont ainsi déposées. Seuls les événements pluvieux conséquents provoquent des départs potentiels de charges solides vers l'aval. Cette période est différente de la première période, car avec des averses identiques, les concentrations en charge solide, lors des averses estivales sont plus faibles ; le splash est moins efficace et la surface plus cohérente (croûte).

Au cours de la troisième période, les quantités de particules transportées sont environ 10 fois plus faibles qu'au cours des deux premières périodes. Les transports solides sont fréquents, allant jusqu'à l'aval de la parcelle.

L'intensité des averses et le volume ruisselé semblent des facteurs déterminant de l'érosion (fig. V.10).

2.2. Caractérisation de la charge solide

2.2.1. Granulométrie

La granulométrie de la charge solide transportée par ruissellement a été comparée avec la granulométrie de l'horizon de labour et avec celle des croûtes recueillies devant un dispositif des 5 niveaux de pente. Les échantillons de charge solide ont été collectés pour différents types d'averses estivales et hivernales, 3 en été dont 2 d'orage et 5 en hiver.

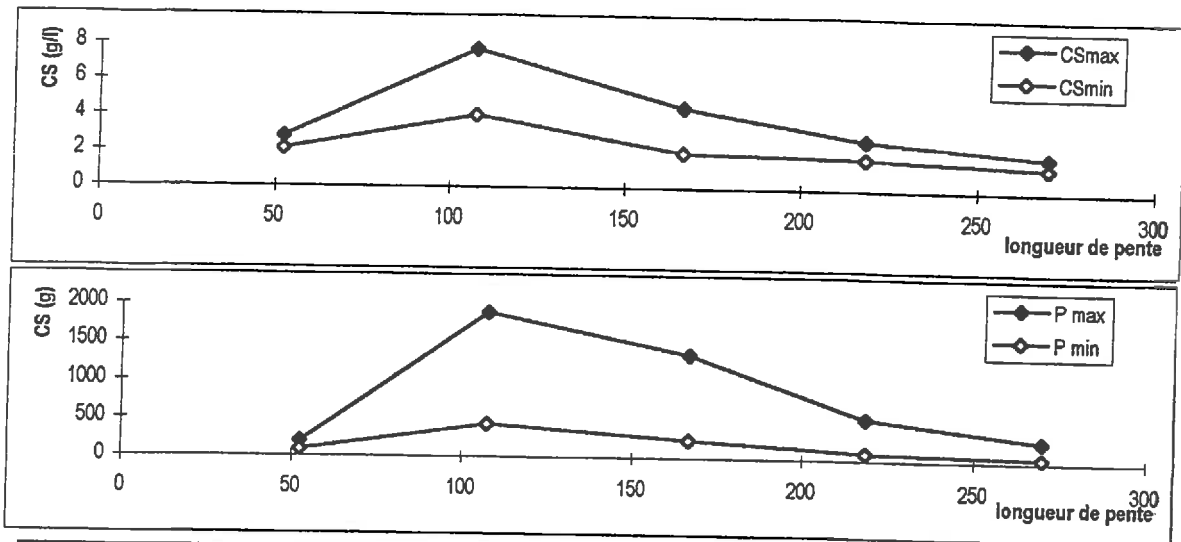


Figure V.9 : moyenne des valeurs minimum et maximum en fonction des longueurs de pente

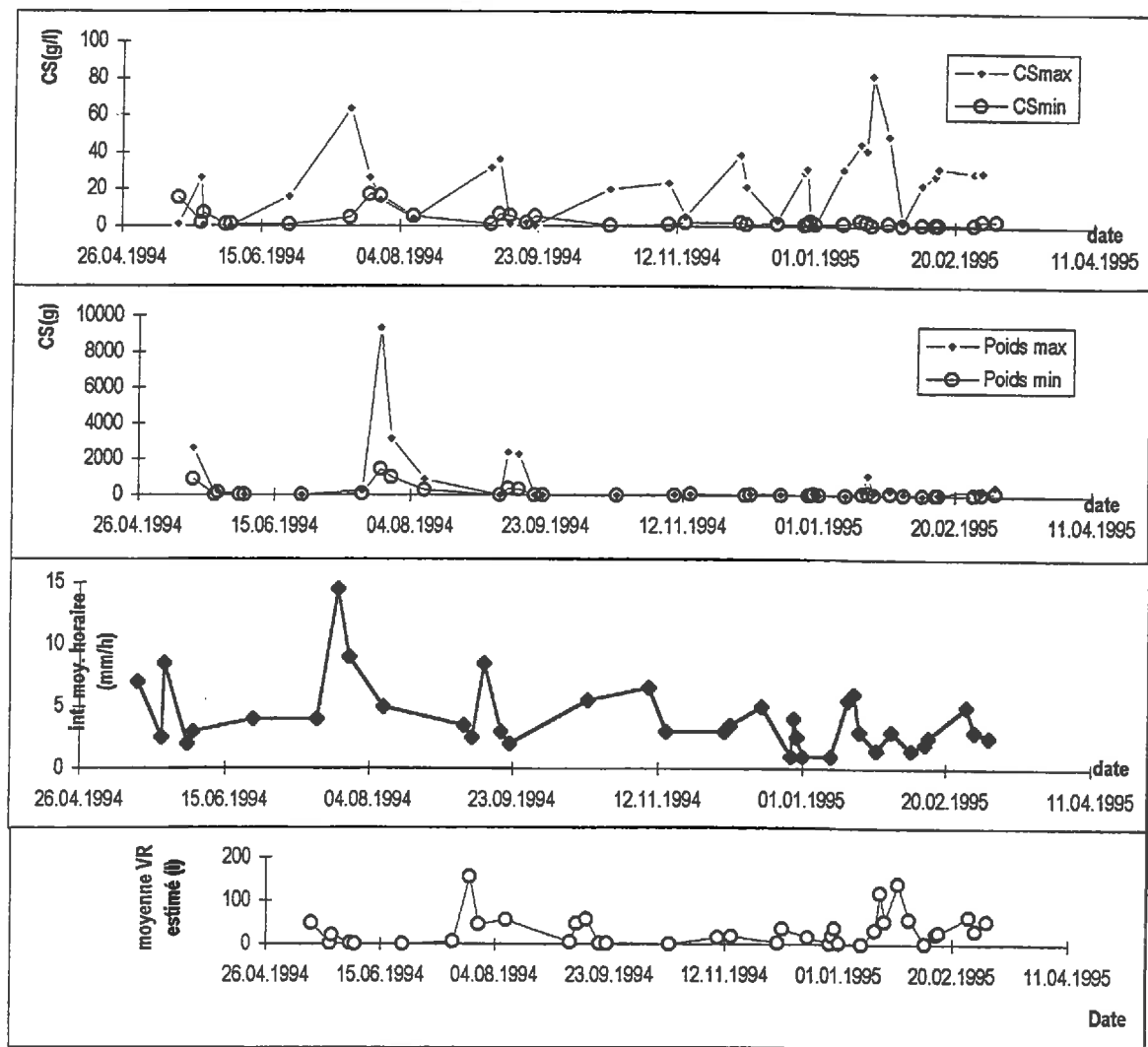


Figure V.10 : Moyenne des concentrations et des poids des charges solides en fonction du temps

Pour chaque site, deux valeurs sont indiquées. Elles correspondent respectivement d'une part aux résultats obtenus sur les particules prélevées dans le totalisateur et d'autre part, aux résultats modifiés si l'on considère les pertes en particules fines au moment des débordements du fût (§ 1).

Les échantillons de sol ont été prélevés sur le transect T2 (chapitre I).

Analyse temporelle

Elle se base sur la comparaison entre la valeur moyenne, calculée à partir des 5 niveaux, de la granulométrie des charges solides transportées par ruissellement et la valeur moyenne granulométrique de l'horizon de labour sur le versant (fig. V.11). Les premiers ruissellements se caractérisent par un transport préférentiel de particules fines (particules de taille argile et limon fin) par rapport au sol ; les particules plus grossières (particules de taille limon grossier et sable fin) sont peu transportées, voire laissées sur place (sables grossiers). Au cours des averses orageuses, la granulométrie des charges solides et celle du sol sont proches. Ces averses provoquent donc un transport de sol sans tri granulométrique. En hiver, seules les particules les plus fines sont transportées de manière privilégiée (taille argile), ainsi que la matière organique, puis les limons fins. Les particules de taille supérieure ou égale aux limons grossiers restent sur place sans être déplacées par ruissellement.

Analyse spatiale

Cette analyse ne concerne que les événements des 16 mai, 24 et 28 juillet ; elle va de la convexité à la concavité (fig. V.12). La quantité de charges solides recueillie au cours d'autres événements ne permettait pas de réaliser une analyse granulométrique par les moyens analytiques disponibles. Une moyenne de la granulométrie des particules pour chaque niveau de pente est calculée. La matière organique et la fraction des colloïdes minéraux et des limons fins et grossiers ne varient quasiment pas d'amont en aval. Les particules « fines » sont transportées de manière privilégiée sur l'ensemble du versant comparées à celles composant le sol. Les sables fins et les sables grossiers se trouvent préférentiellement de la pente jusqu'en concavité. Dans la pente et à l'aval, la granulométrie de la charge solide en sable est proche de celle du sol.

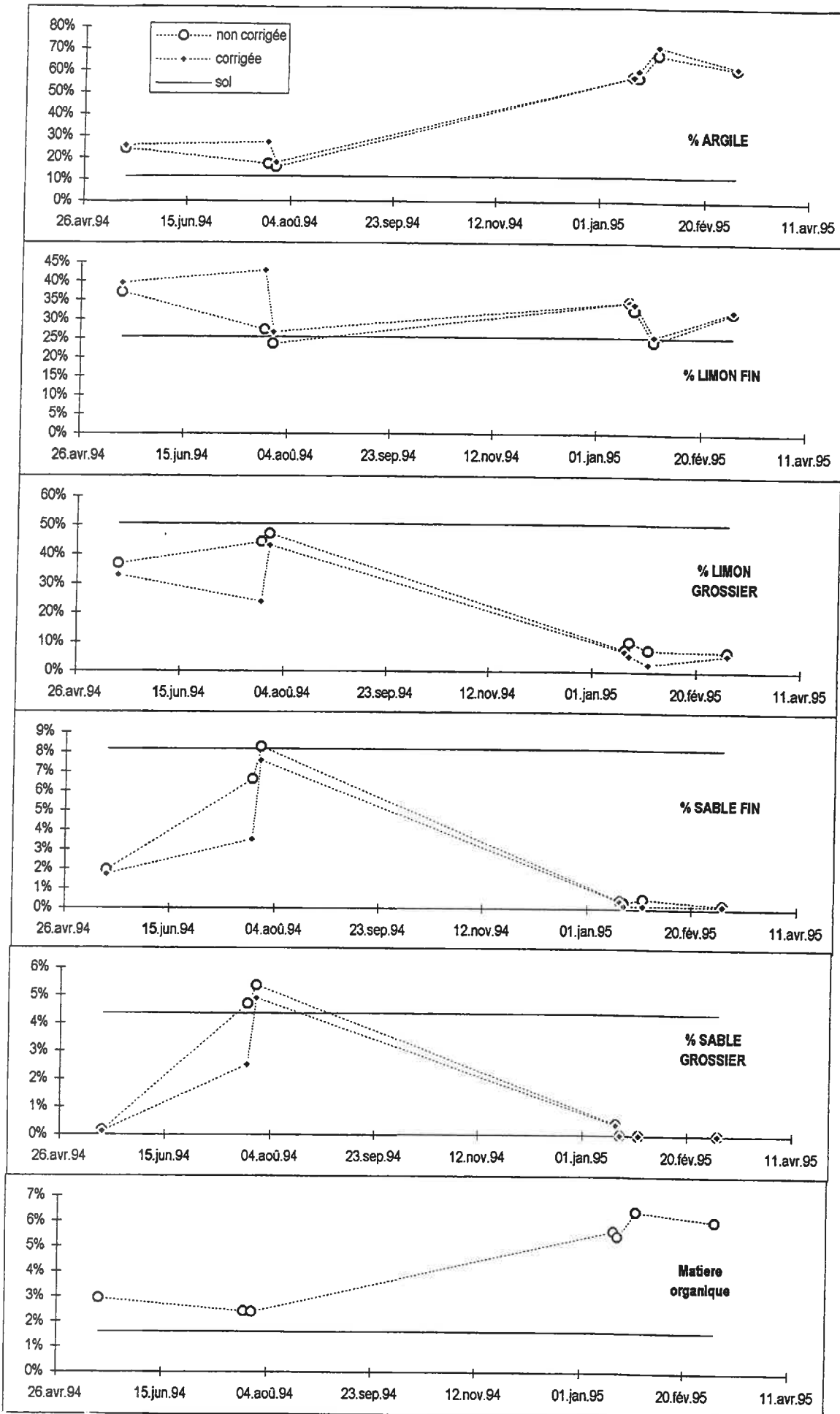


Figure V.11 : granulométrie des charges solides en fonction du temps ; RENNES, maïs, 1994-1995

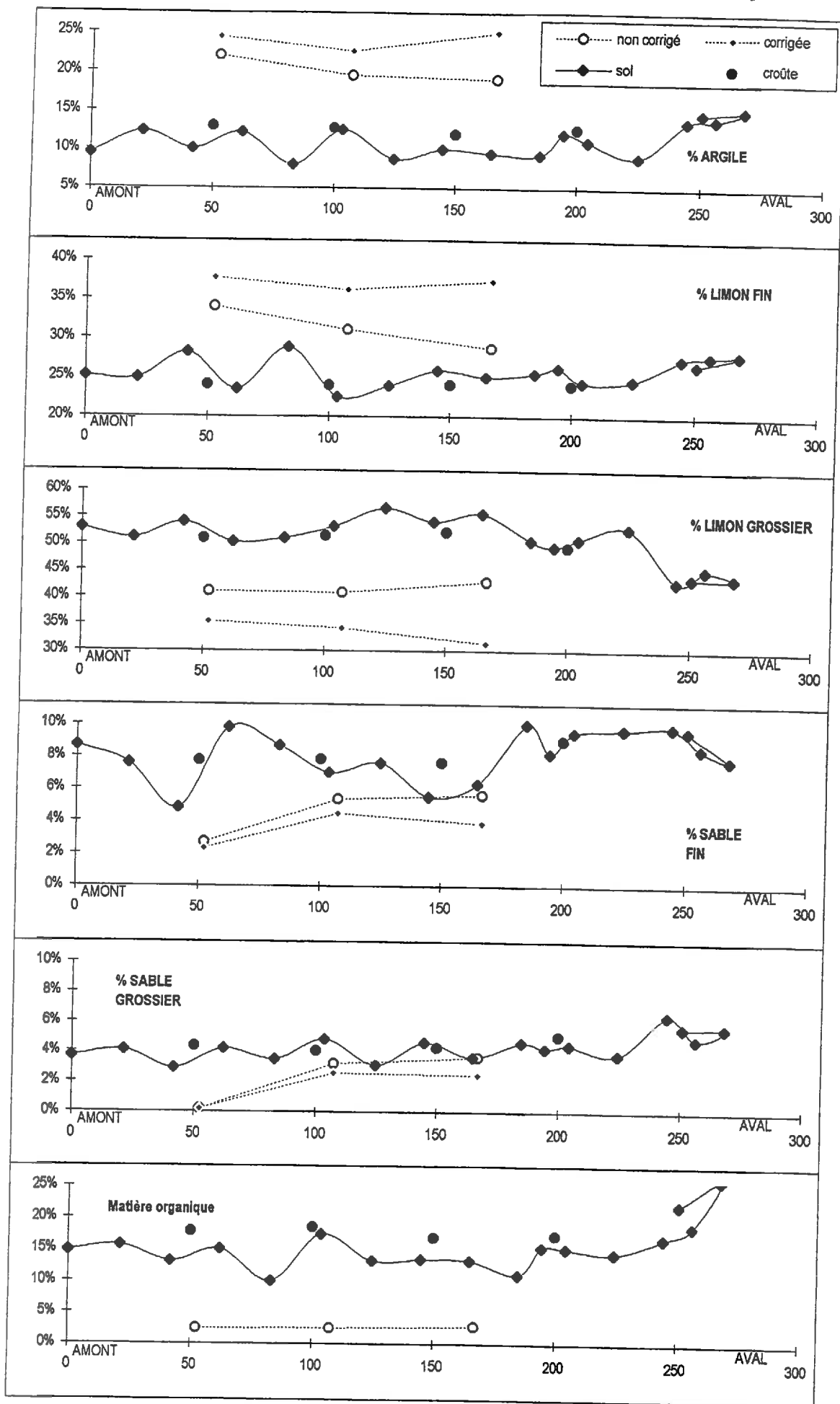


Figure V.12 : granulométrie des charges solides en fonction de la longueur de pente ; RENNES, maïs, 1994-1995

2.2.2. Par rayons X

Des analyses par diffraction ont été réalisées sur dix échantillons du 17 mai, 5 échantillons du 25 juillet, 5 échantillons du 28 juillet et 3 échantillons du 26 septembre 1994 (annexe). Les quantités de charges solides recueillies étant très faibles, des spectres d'argile n'ont pas pu être effectués. Seuls les diagrammes de poudre ont été réalisés. Toutes les distances réticulaires, en Å, entre les plans cristallins (hkl) du minéral, et leurs harmoniques sont diffractés. Ils renseignent sur les espèces minérales et sur leur degré de cristallinité. La quantification des pics d'argile et leur déterminisme sont délicats. Sur les diagrammes, une espèce minérale apparaît lorsqu'elle représente au moins 5% de matière.

Les minéraux identifiés sur les spectres sont identiques quelle que soit l'origine spatiale et temporelle de la charge solide.

On distingue (fig. V.13) :

- les pics caractéristiques du quartz (SiO_2), soit, 3,35 / 4,21 / 2,45 / 2,28 / 2,13 et 1,98 Å;

- les séries de 14 Å / 7 / 5 / 3,6 et 10 / 5 / 3,35 qui caractérisent respectivement la chlorite $((\text{Mg,Fe,Al})_3 \text{Mg}_3 [(\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2](\text{OH})_6)$ et l'illite $(\text{K}_x\text{Al}_2[\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}](\text{OH})_2)$ - muscovite ($x=1$) ; la muscovite contient généralement un peu de phengite et de paragonite ; l'aluminium est en partie remplacé par le fer et le magnésium dans la phengite, par le sodium dans la paragonite ; à partir de l'indice d'Esquevin (Ie) nous pouvons distinguer la composition de l'illite (tableau V.5) ; les valeurs calculées de Ie, à partir des hauteurs de pics, sont supérieures à 0,4 ; l'illite correspond donc à de la muscovite ;

- les réflexions de 7 / 3,56 / 2,33 peuvent être attribuées aux valeurs caractéristiques des espacements réticulaires de la kaolinite. Néanmoins, on ne retrouve pas les harmoniques et la valeur de 2,48 de forte intensité, égale à 9. GRIMALDI (1981) indique une analyse minéralogique de la fraction argileuse du matériau limoneux du Rheu. Dans cette étude, le pic de 7 Å n'est pas attribué à la kaolinite ;

- les pics se situant entre 3,18 et 3,20 sont attribués aux feldspaths avec l'orthose $((\text{Na,K})[\text{Si}_3\text{AlO}_8])$ à 3,18 / 4,02 / 3,8 et 6,44 ;

- les réflexions de 4,03 / 2,32 / 2,13 / 2,08 pourraient être attribuées aux oxydes d'aluminium, comme la diaspore.

Les oxydes de fer ne sont pas observés dans les diffractogrammes. Il pourrait y avoir une substitution partielle du fer par l'aluminium, le chrome, le manganèse ou le nickel (essentiellement dans la goethite) ; avec une substitution par l'aluminium, il y a rétraction de la maille et les raies caractéristiques des oxydes sont déplacées sur le diffractogramme.

Le pourcentage relatif des argiles, illite et chlorite, est calculé à partir des mesures de réflexion en mm (pic à 10 Å et 7 Å). Le pourcentage relatif de l'illite par rapport à la chlorite varie entre 25 et 56% (tableau V.5).

	17 mai	25 juillet	28 juillet	26 septembre
	Aval-----Amont	Aval-----Amont	Aval-----Amont	Aval-----Amont
% illite	25 / 43 / 56 / 50 / 50	50 / 43 / 56 / 63 / _	54 / _ / 40 / _ / 39	50 / 50 / 39
% chlorite	75 / 57 / 44 / 50 / 50	50 / 57 / 44 / 37 / _	46 / _ / 60 / _ / 61	50 / 50 / 61
Ie	0,5 / 0,7 / 0,4 / 0,4 / -	_ / _ / 0,5 / 0,4 / _	0,4 / _ / _ / _ / 0,7	0,7 / 0,5 / 0,9

Tableau V.5: pourcentage relatif des argiles et indice d'Esquevin

$I_e = I(\text{illite à } 5 \text{ \AA}) / I(\text{illite à } 10 \text{ \AA})$

valeurs de I_e : - de 0 à 0,15, biotite

- de 0,15 à 0,3, biotite et mica blanc ;

- de 0,3 à 0,4, phengite ;

- > à 0,4, muscovite.

Les valeurs varient entre 0,4 et 0,9, soit entre la phengite et la muscovite.

Variabilité temporelle :

Le pourcentage d'illite est d'environ 45%, celui de la chlorite, d'environ 55%. Les valeurs sont quasi constantes dans le temps. GRIMALDI (1981) trouve des valeurs identiques sur la fraction argileuse des sols du Rheu, entre illite et chlorite.

Variabilité spatiale :

Le pourcentage d'illite est globalement plus faible à l'aval. Cependant, il ne semble pas y avoir de logique par averse : pour les averses du 17 mai et du 25 juillet, la proportion d'illite décroît d'amont en aval, tandis qu'elle augmente d'amont en aval pour les averses du 28 juillet et du 26 septembre.

2.2.3. Par analyses totales

Treize échantillons de charge solide ont été analysés : le 17 mai et le 28 juillet, pour les 5 niveaux de pente ; le 26 septembre, au niveau de la pente et de l'aval ; le 11 janvier, pour un échantillon moyen de l'ensemble du versant (annexe).

Ces analyses sont réalisées par une méthode de fusion et d'influorescence, au centre de Recherche pétrographique et géochimique de Nancy. Les résultats sont présentés sous forme de liste d'oxydes et d'éléments traces, en pourcentage pondéral. Ces pourcentages d'oxyde sont modifiés en nombre de mole d'éléments pour 100 g de charges solides. Les traces sont exprimées en mmole par kilogramme.

Ainsi, on caractérise les teneurs moyennes des charges solides en éléments majeurs et en éléments traces. Les variabilités spatiale et temporelle des teneurs en éléments sont présentées. L'origine des éléments et leur comportement est rappelée en annexe 4d.

Résultats des analyses

Les analyses montrent que (tableau V.6) : les charges solides sont composées de 89 % de silicium, de 4,6 % d'aluminium, de 1,8% de magnésium, de 1,2 % de fer ; les pourcentages de calcium et de potassium sont respectivement égaux à 1 et 2%. Les pourcentages de sodium, de titane, de manganèse et de phosphore sont faibles, moins de 1% des éléments majeurs.

Les éléments traces représentent 0,1 % des charges solides. Ils sont composés, en ordre quantitativement décroissant, de zirconium et de barium, de vanadium, de chrome, de zinc et de rubidium, de strontium et de nickel. Les pourcentages de beryllium, de cobalt, de gallium, de niobium et thorium sont inférieurs à 1% sur l'ensemble des éléments traces.

Comparé à l'horizon de labour du sol de Naizin (TROLARD et ROUAULT, communication orale), et à défaut d'une analyse sur l'horizon de labour du sol de Rennes, il semblerait que les charges solides recueillies à Rennes contiennent plus de magnésium, de calcium, de phosphore, de cuivre, de gallium et de nickel ; inversement, les proportions d'aluminium, de fer, de sodium, de potassium et de vanadium sont moindres dans les charges solides que dans le sol auquel on se réfère. Il paraît cependant indispensable d'analyser le sol de Rennes aux différents niveaux de pente, avant d'interpréter abusivement ce résultat.

	Si	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Ba	Be	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Rb	Sr	Th	V	Zn	Zr
moyenne	1.105	0.057	0.014	0.001	0.023	0.013	0.006	0.013	0.011	0.001	2.928	0.217	0.181	1.680	0.498	0.214	0.146	0.450	1.146	0.677	0.042	1.938	1.372	3.238
max	1.318	0.082	0.022	0.002	0.033	0.022	0.009	0.017	0.012	0.002	3.600	0.310	0.255	2.116	0.562	0.320	0.162	0.647	1.638	0.755	0.049	2.850	2.000	4.930
min	0.909	0.039	0.008	0.001	0.013	0.008	0.004	0.009	0.009	0.001	2.300	0.110	0.108	1.342	0.280	0.137	0.131	0.298	0.756	0.629	0.036	1.220	0.760	1.920
écart type	0.130	0.013	0.004	0.000	0.006	0.004	0.002	0.003	0.001	0.000	0.408	0.067	0.043	0.257	0.096	0.057	0.010	0.109	0.276	0.035	0.004	0.524	0.406	1.000
% majeurs	88.8%	4.6%	1.2%	0.1%	1.8%	1.0%	0.5%	1.0%	0.8%	0.1%	20%	1%	1%	11%	3%	1%	1%	3%	8%	5%	0%	13%	9%	22%
% mineurs	1.2	10.2	0.05	0.001	0.001	0.001	0.01	0.06	0.012	0.0004	3.1	0.16	0.18	0.17	0.24	0.17	0.18	0.2	0.97	0.75	0.036	2.68	0.84	3.984
Neizlin, L.																								

total éléments	1.245
total mineur	14.666
mmol/kg	

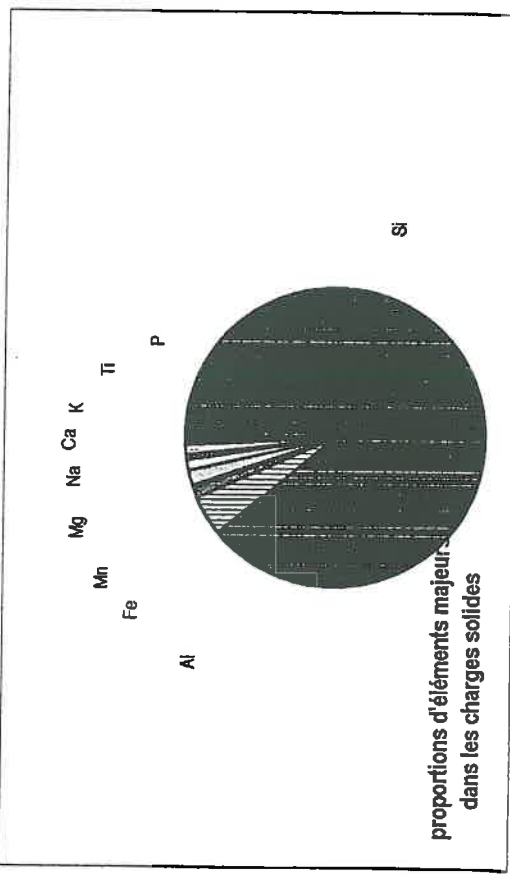
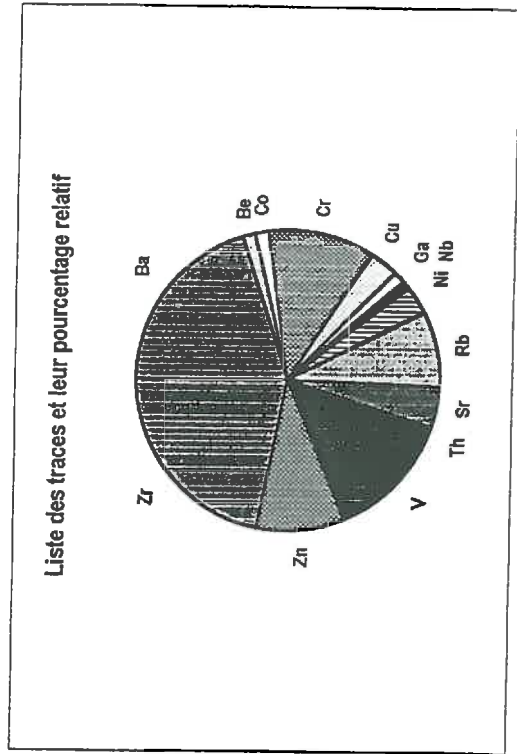
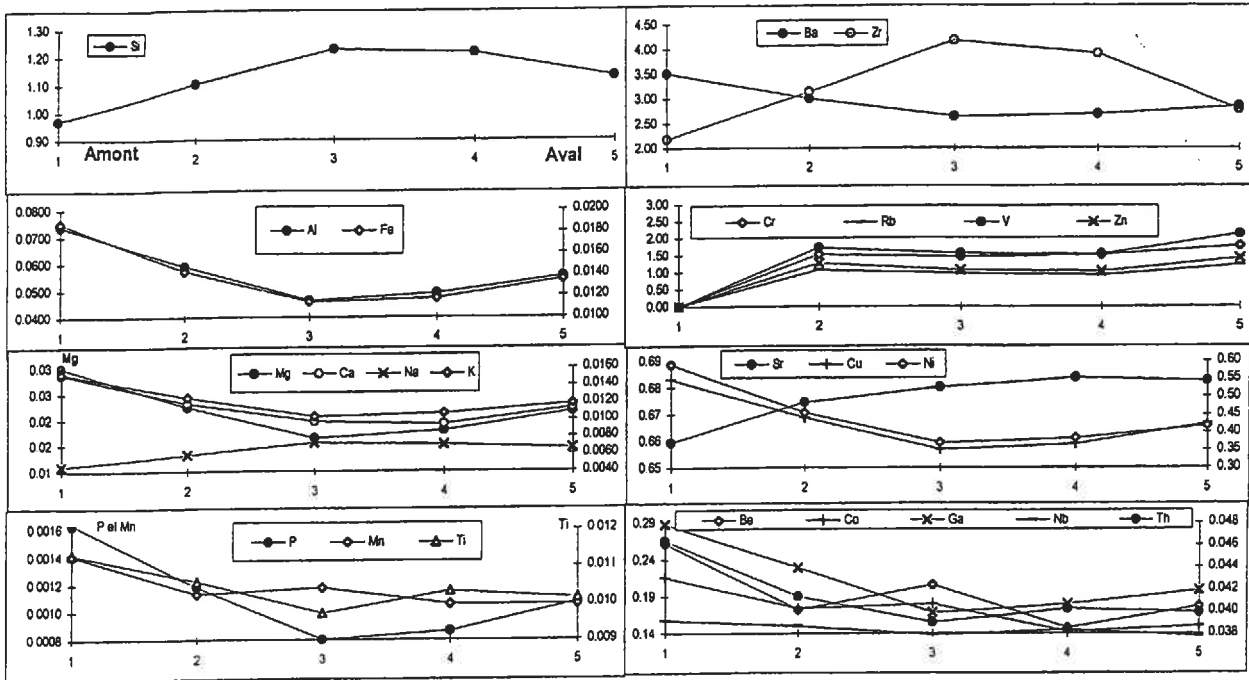


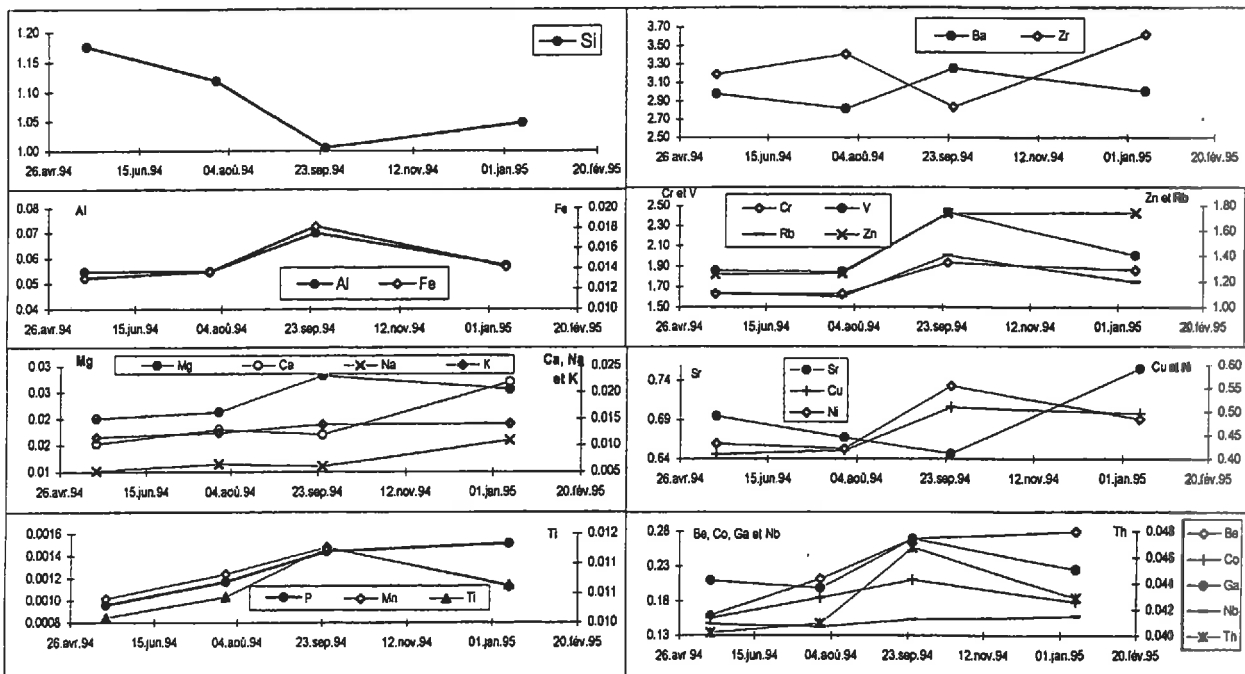
Tableau V.6 : composition moyenne en oxydes et éléments traces des charges solides, Rennes, 1994-1995.

ELEMENTS MAJEURS EN MOLE/100 g

ELEMENTS MINEURS EN MMOLE/1 kg



VARIABILITE SPATIALE



VARIABILITE TEMPORELLE

Figure V.14 : variabilités spatiale et temporelle des éléments majeurs et des traces.

Variabilité temporelle (fig. V.14) :

Pour les éléments majeurs, Si a des teneurs plus élevées en première période qu'au cours des deux autres périodes. Le phosphore augmente du début jusqu'à la fin de l'année culturale. Le manganèse et le titane sont croissants lors du printemps et de l'été ; ils diminuent en hiver. Les autres éléments majeurs présentent de teneurs relativement plus importantes en fin de deuxième période ou en troisième période pour le calcium et le sodium.

Pour les éléments mineurs, les évolutions temporelles diffèrent d'un groupe d'éléments à l'autre :

- certains éléments traces ne présentent pas de différences entre les trois périodes ; c'est le cas du barium, du zirconium, du gallium, du thorium, du cobalt, du vanadium et du nickel ;
- le chrome, le rubidium, le zinc, le cuivre augmentent en fin de deuxième période ; au cours de l'hiver, le nombre de moles reste important ;
- le beryllium et le thorium augmente du début à la fin de l'année culturale.

Cependant, on ne peut pas caractériser chaque période par des proportions bien définies de chaque élément.

Variabilité spatiale (fig. V.14) :

Spatialement, on peut distinguer deux domaines : le domaine amont, du point 1 à 3, du domaine aval, du point 3 à 5.

• Domaine amont :

- Les teneurs peuvent augmenter ; c'est le cas du silicium, du sodium, du zirconium, du chrome, du rubidium, du vanadium, du zinc, du strontium.

- Les teneurs peuvent diminuer ; c'est le cas de l'aluminium, du fer, du magnésium, du calcium, du potassium, du phosphore, du manganèse, du titane, du barium, du cuivre, du nickel, du beryllium, du cobalt, du gallium, du niobium et du thorium.

• Domaine aval :

- Les teneurs restent stables ; c'est le cas du sodium, du titane, du baryum, du strontium, du thorium, du beryllium et du niobium.

- Les teneurs diminuent ; c'est le cas du silicium, du manganèse, du zirconium et du cobalt.

- Les teneurs augmentent ; c'est le cas de la majorité des éléments, soient le fer, l'aluminium, le potassium, le magnésium, le calcium, le phosphore, le chrome, le zinc, le rubidium, le vanadium, le cuivre, le nickel et le gallium.

Les éléments apparaissent bien structurés dans l'espace, beaucoup moins dans le temps. Il semble que les éléments traces sont transportés de l'amont vers l'aval d'une manière diffuse, en parcourant de faibles distances, quel que soit l'évènement. A long terme, on peut supposer qu'ils peuvent s'accumuler dans les zones de concavité et être exportés hors de la parcelle lors d'évènements conséquents.

Les phases majeures peuvent correspondre aux minéraux de quartz, d'illite-muscovite, de chlorite, d'orthose et de diaspore. La phase argileuse peut être composée de microéléments inclus dans des réseaux silicatés. Les métaux traces peuvent donner naissance à des composés chimiques peu ou pas solubles : phosphates, sels organiques précipitant au voisinage d'argile, de matière organique, d'oxydes d'aluminium, de fer ou de manganèse.

Il est indispensable d'analyser les premiers centimètres du sol, le long d'une toposéquence afin de compléter cette caractérisation et pour évaluer les impacts de ces transferts d'éléments, notamment des éléments traces (cuivre, zinc) sur la qualité des sols.

2.3. Autres situations

2.3.1. Résultats sur les autres sites

Ces données correspondent aux deux parcelles de Tocplouz et Kerjos (Naizin), de fin mai à fin septembre 1994. Seulement 5 évènements ont été analysés.

Les corrections sur les charges solides (&1.2) n'ont pas pu être calculées. Aucune référence en microparcelle et aucune analyse granulométrique de la charge solide n'existe. Cette comparaison avec les données de Rennes est faite avec prudence car les résultats se réfèrent à des données climatiques différentes bien que du même ordre de grandeur (chapitre II).

Les transports solides (tableau V.7, fig. V.15) sont nettement plus faibles sur le bassin versant de Naizin que sur Rennes. Quelle que soit l'importance de l'averse, les concentrations sont généralement de l'ordre de quelques grammes par litre ; elles atteignent une vingtaine de grammes par litre, tout au plus, lors des ruissellements les plus importants.

Ces résultats sont cohérents avec la distribution spatiale des constituants des horizons de surface et avec les tests de stabilité structurale réalisés par LE BISSONNAIS, chapitre III.

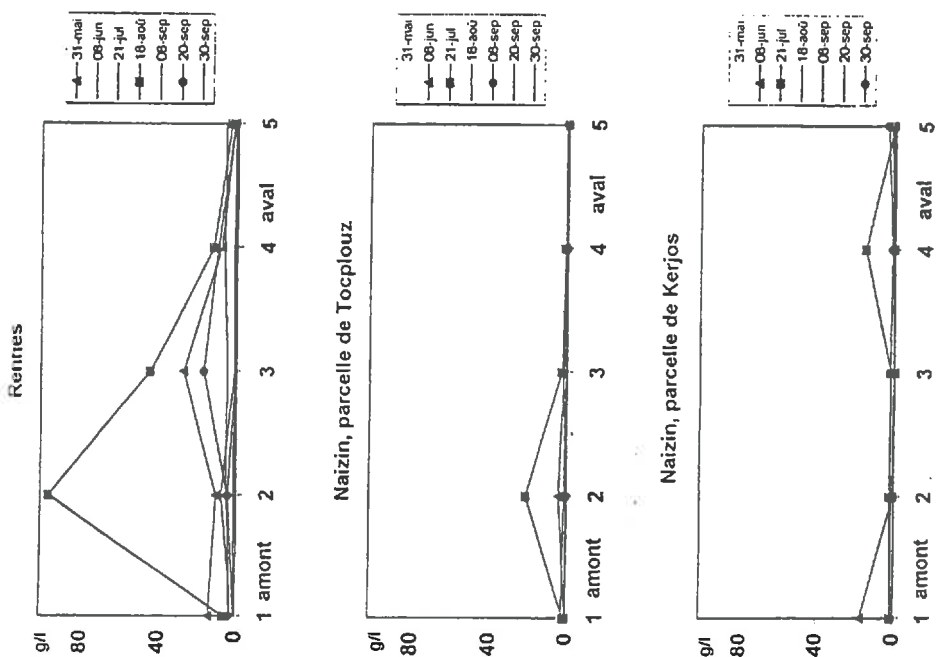


Figure V.16 : chronique des concentrations en charges solides en fonction de la topographie (g/l) ; Rennes et Naizin

Tableau V.7 : classes des concentrations en charges solides, en fonction de la topographie, Rennes et Naizin, 1994

position/topographie	amont	→	aval
< 1 g/litre	2	0	2
entre 1 et 10 g/litre	4	5	2
entre 10 et 50 g/litre	0	0	2
> 50 g/l	0	1	0
position/topographie	amont	→	aval
< 1 g/litre	4	3	3
entre 1 et 10 g/litre	2	2	3
entre 10 et 50 g/litre	0	1	0
> 50 g/l	0	0	0
position/topographie	amont	→	aval
< 1 g/litre	3	3	4
entre 1 et 10 g/litre	2	3	2
entre 10 et 50 g/litre	1	0	0
> 50 g/l	0	0	0

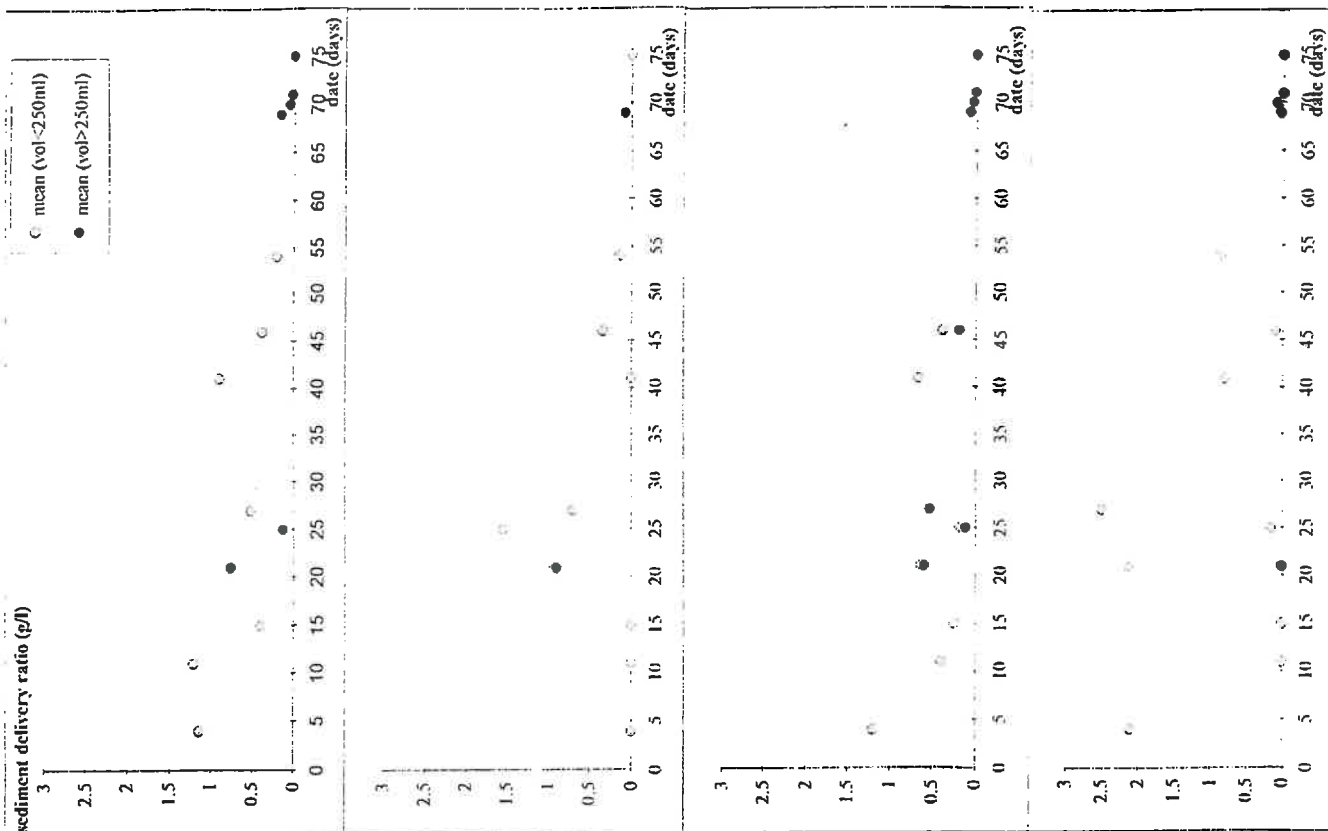


Figure V.15 : chronique des concentrations en charges solides (g/l) ; Rennes et Naizin

2.3.2. Résultats sur les autres cultures

2.3.2a. Culture de petits pois, Rennes

Ces données ont été recueillies de février à juin 1993. La concentration en charges solides (fig. V.16) diminue fortement au cours des premiers ruissellements, puis faiblement, pour les 4 niveaux de pente. Cette diminution semble apparaître plus rapidement en haut qu'en bas de versant. Elle apparaît liée à l'évolution des états de surface au cours du temps.

Tant que la croûte de battance n'est pas formée, la probabilité des eaux de ruissellement de «rencontrer» des particules libres en surface est importante. Une fois formée, le détachement par splash est réduit par le développement foliaire, de plus en plus conséquent dans le temps.

La diminution en charges solides de l'eau ruisselée, plus rapide en haut du versant qu'en aval, est sans doute un effet du développement plus rapide de la croûte (chapitre III). La diminution des concentrations en charge solide, en fonction du temps est le résultat à la fois de la formation de la croûte de battance et du développement foliaire.

Cette situation est à faible risque une fois la croûte formée et la culture développée. Les risques concernent donc une courte période, allant de l'implantation de la culture à celle de la formation de la croûte.

2.3.2b. Culture de phacélie et sol nu, Rennes 1993-1994

Les concentrations en charge solide diminuent avec le temps (fig. V.17). Elles sont très faibles, inférieures à 1 g/l et augmentent modérément de la pente jusqu'à la concavité ; elles sont fortement réduites à l'aval, en relation avec un ruissellement faible (chapitre IV). Sur sol nu, les concentrations sont plus fortes mais cependant elles restent faibles, inférieures à 3g/l. Elles augmentent d'amont en aval et sont fortement liées à l'intensité de la pluie (fig. V.17).

Le bilan en poids de charge solide par date est de 4,91 grammes pour la phacélie (engrais vert) et de 183, 27 grammes pour le sol nu. La conclusion est évidente. Le bilan sur sol nu est de 37 fois supérieur à celui de la phacélie.

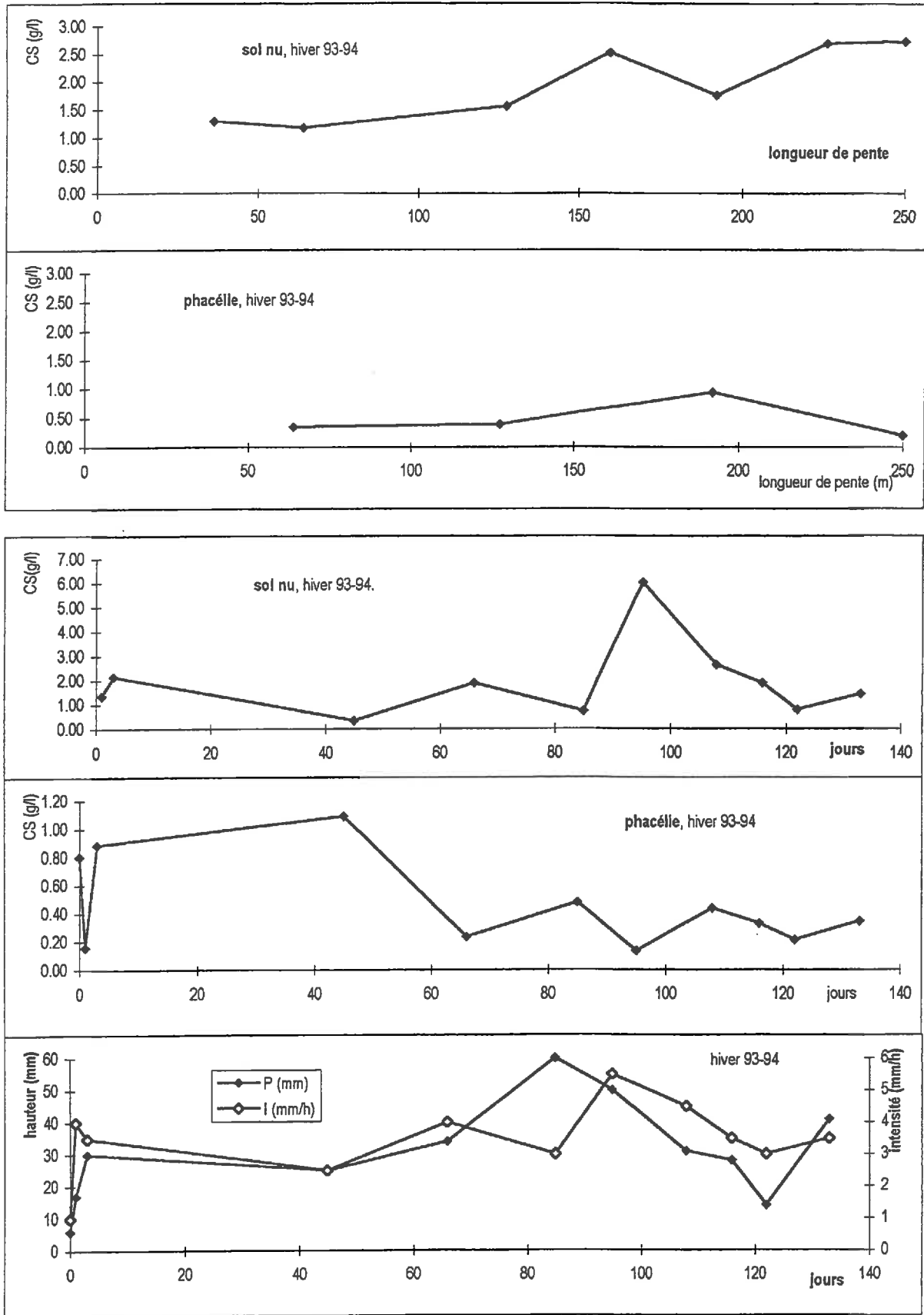


Figure V.17 : chronique des concentrations en fonction de la topographie et du temps ; Rennes

Les concentrations sur sol nu et celles obtenues sur le chantier de maïs (1994-1995) sont comparables. Les quantités de particules transportées en 1994-1995 restent grandes en relation avec de forts volumes ruisselés.

3. BILANS D'ÉROSION ET DE DÉPÔT

3.1. Bilan d'érosion, Rennes, 1994-1995

Cette vision semi-quantitative de l'érosion peut être enrichie par des valeurs cumulées en poids de particules rapportées à la distance amont des dispositifs. Les valeurs moyennes sont comparées en fonction des différents niveaux de pente et selon les trois périodes par comparaison au bilan sur l'année culturale.

Dans le texte et les tableaux de ce paragraphe, on définit : (1) «la parcelle» comme un ensemble allant de l'amont à l'aval ; (2) «le versant», comme un ensemble allant de l'amont jusqu'à la concavité. On assimile les valeurs obtenues sur le replat aval aux sorties potentielles de particules vers le cours d'eau. Les valeurs du «versant» sont assimilées aux redistributions dans le versant. Les valeurs «de la parcelle» correspondent au cumul des moyennes par averse.

- Comparer le «versant» à «l'aval», revient à comparer la redistribution des particules à l'intérieur de la parcelle avec les «sorties».

- Comparer «la parcelle» avec «l'aval», revient à identifier la part de ce qui sort par rapport à un transport moyen.

Les valeurs de concentration en charge solide correspondent à une averse donnée et à un dispositif dont la surface amont contributive peut être estimée (cf. chapitre 1). Les charges solides sont exprimées en g/m². Elles peuvent être utilisées afin d'estimer les transports par averse en fonction de la topographie. Des fourchettes de concentration maximales et minimales sont calculées (§1). Les valeurs sont cumulées soit pour la période considérée, soit pour la zone, soit pour le niveau de pente choisi. Elles sont alors divisées par le nombre de dispositifs : 15 pour l'ensemble de la parcelle, 3 par niveau de pente et 12 pour le versant.

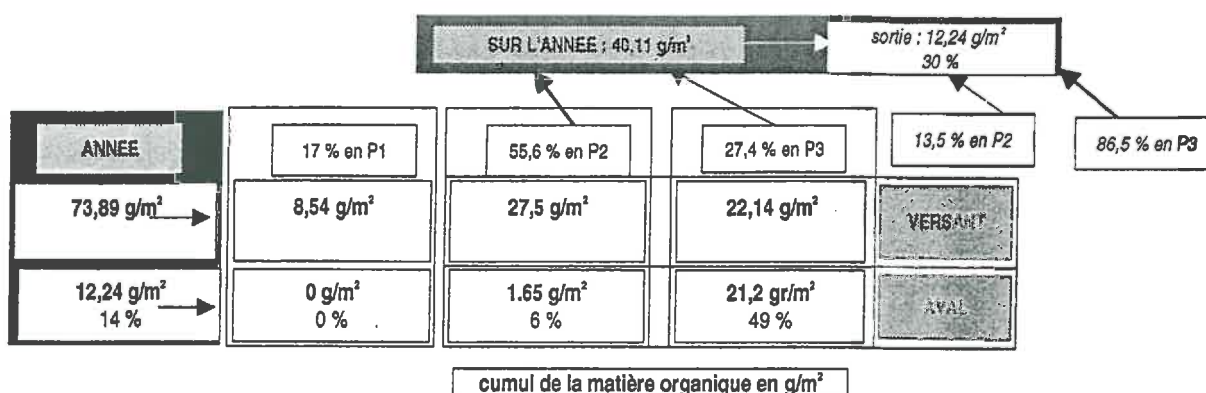
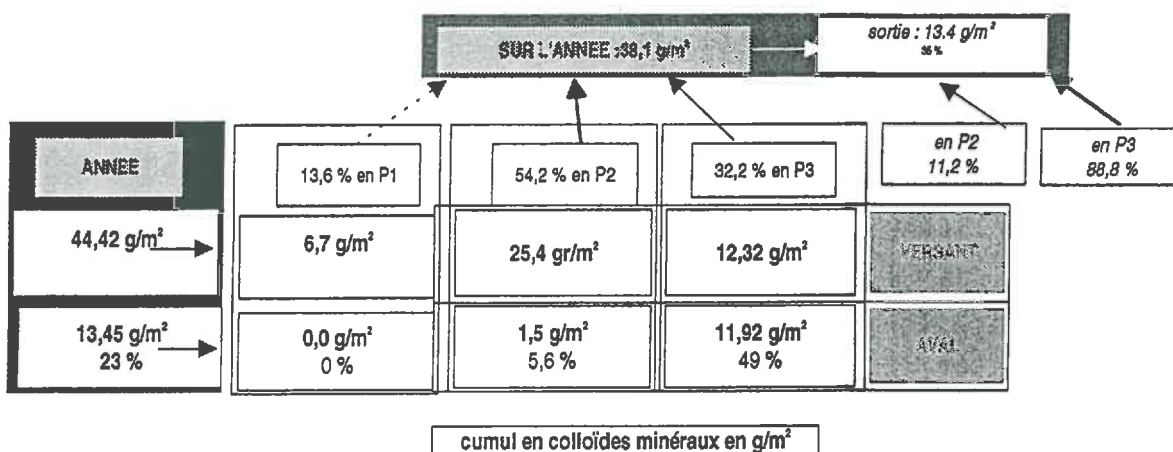
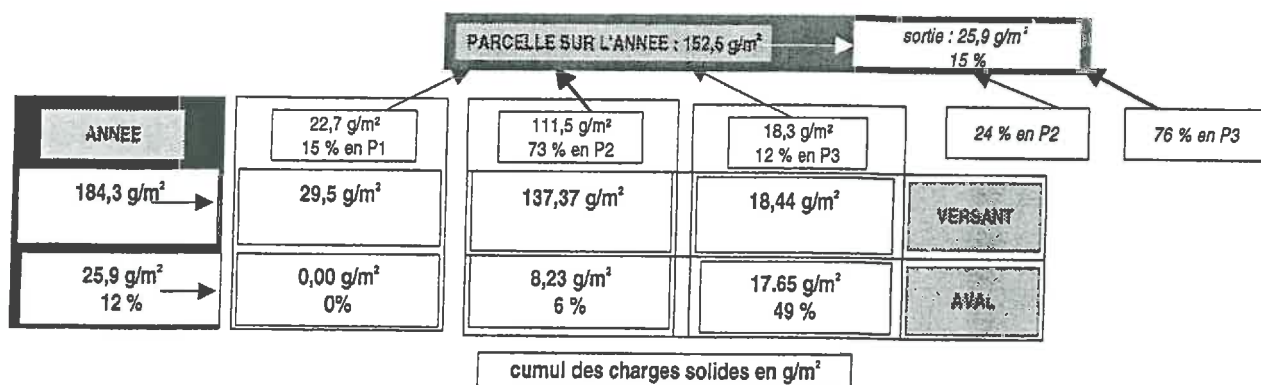


Tableau V.8 : bilan moyen en g/m² pour les charges solides, les colloïdes minéraux et de la matière organique pour différentes périodes et situation topographique

Ces calculs sont également réalisés sur les particules de taille argile et sur la matière organique. Une valeur maximum est obtenue à partir des concentrations maximales et des corrections sur le pourcentage des différentes fractions granulométriques (&1). Une valeur minimum est calculée à partir des concentrations minimales et des pourcentages des différentes fractions, sans prendre en compte les pertes d'argile et de limons fins.

Ces valeurs ne sont que des estimations et ne peuvent pas être considérées comme quantitativement exactes. Elles ont pour but d'essayer de quantifier la contribution des trois périodes définies dans les chapitres.

Sur l'année (tableau V.8), les transferts de particules de sol représentent une moyenne de 152 g/m² dont seulement 17% (25,9 g/m²) sortent de la parcelle. La contribution des différentes périodes sur ces transports de particules est de 15 % en première période, de 73 % au cours de la période estivale et de 12 % durant la période hivernale.

La part des sorties hivernales est de 76 % pour seulement 24 % en été et nul durant la première période. Les sorties estivales représentent à peine 6% des transferts qui ont lieu à l'intérieur de la parcelle ; celles liées à la période hivernale représentent 49 %.

☞ Les sorties restent donc très faibles par rapport à la redistribution au sein de la parcelle, mais non négligeables en hiver.

La contribution des trois périodes, pour le transport des colloïdes minéraux et de la matière organique (tableau V.8) est de 17 % pour P1, de 56 % pour P2 et de 27 % pour P3. En période estivale, le versant fournit des particules fines vers la concavité et le replat aval. La période hivernale contribue activement à la perte en particules fines et de matière organique du replat aval jusqu'au ruisseau.

Comparaison avec une toposéquence granulométrique réalisée sur la croûte de surface en fin d'année culturale (chapitre II):

Les analyses granulométriques (fig. V.18) de la croûte de surface et de l'horizon de labour, d'amont en aval, confirment les résultats obtenus le long du versant (fig. V.19). L'horizon de labour est défini comme l'état initial de la surface du sol, au début de l'année culturale. La croûte de surface représente le résultat des transferts particuliers sur l'année.

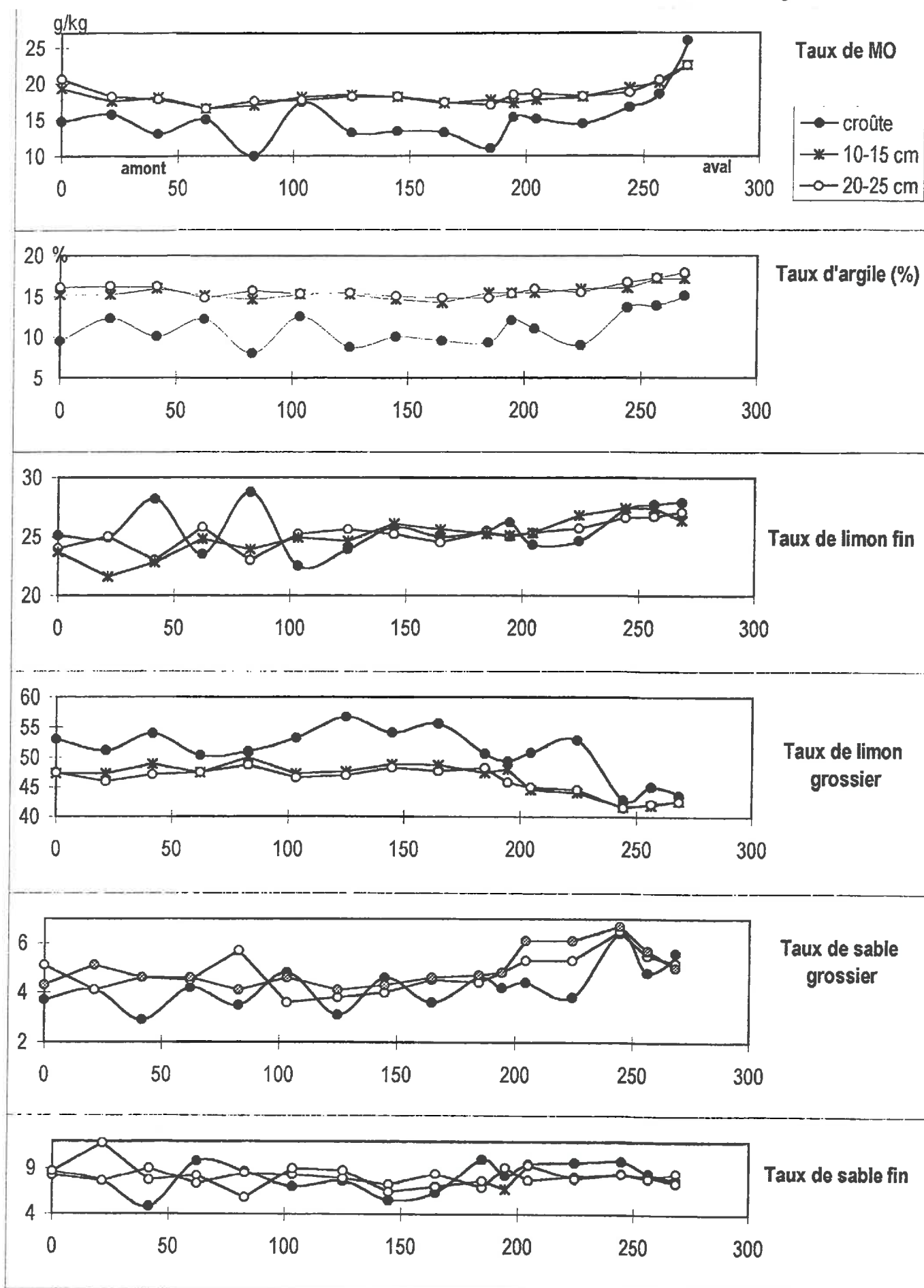
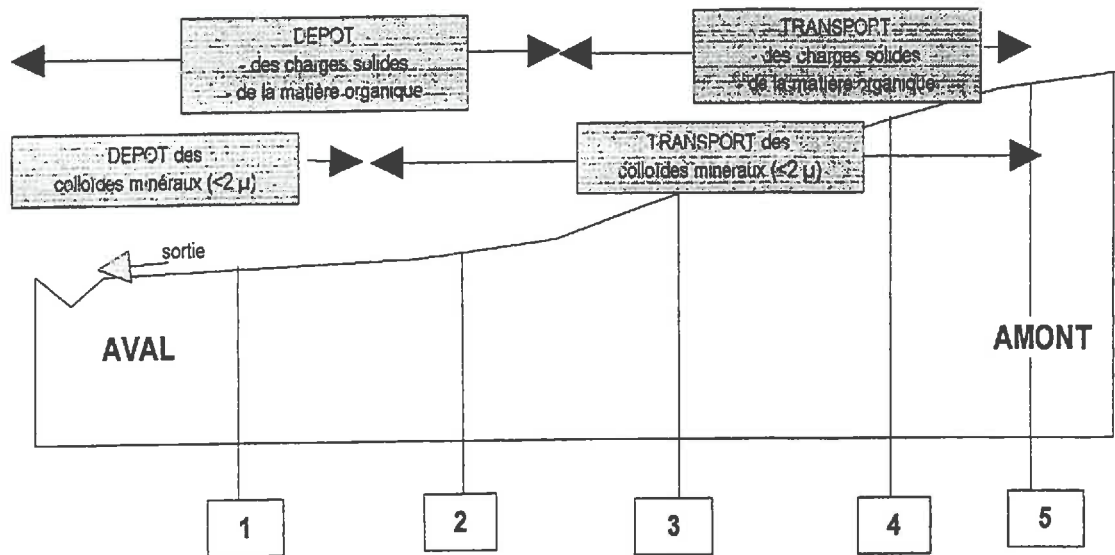


Figure V.18 : granulométrie (%) et teneur en matières organiques (g/kg) selon la toposéquence ; Rennes



en Kg

	1	2	3	4	5
CHARGE SOLIDE					
moyenne	4.9	10.6	25	24.7	4.6
min	1.7	3.4	7.5	9.2	3
max	8	18	42.5	40.2	6
ARGILE					
moyenne	3.2	5.9	5.7	5	1.6
min	0.8	0.9	1.6	2	1
max	4	5	9.8	8	2.2
MATIERE ORGANIQUE					
moyenne	2.3	3	6	4.8	1.5
min	0.7	1	2	1.6	1
max	3.8	5	10	8	2

Figure V.19 : résultats des transferts et des dépôts obtenus sur les charges solides, colloïdes minéraux et matière organique en fonction de la topographie, Rennes, 1994-1995

Ces analyses permettent d'individualiser l'aval du reste du versant. En effet, l'aval de la parcelle est enrichi en colloïdes minéraux et en matière organique comparé au versant. Après une année culturale, la croûte de dépôt est plus pauvre en colloïdes minéraux et en matière organique que le sol originel, sur l'ensemble de la parcelle. Elle présente un enrichissement en limons grossiers sur le versant, comparé à l'horizon de labour. On en conclut que : la majorité des particules les plus grossières reste sur place et présente des faibles différenciations le long de la pente ; les fractions fines ont été transportées, soit par ruissellement hors ou en limite de la parcelle, soit par infiltration vers les horizons sous jacents.

3.2. Bilan de dépôt, Tocplouz, 1993.

Une cartographie et une estimation de l'importance de dépôt a été rendue possible en septembre 1993 (CROS-CAYOT et GASCUEL-ODOUX, 1996). La parcelle, en prairie naturelle depuis de nombreuses années, a été cultivée en maïs en avril 1993. La succession des averses estivales, comprenant en particulier une forte averse orageuse, a entraîné une érosion notable de la parcelle. Un bilan saisonnier, à partir de la cartographie de ces dépôts, a pu être ainsi réalisé. Ces dépôts se situent aux moindres concavités, de chaque côté d'un axe de concentration (parcelle en forme d'entonnoir) (fig. V.20). Ils présentent une nette discontinuité avec l'horizon de labour, ce qui permet d'estimer localement leur profondeur, lorsqu'elle est de l'ordre du centimètre. L'épaisseur maximale est égale à une dizaine de centimètres. Ces dépôts sont noirs et très organiques. Ils présentent par endroit une fine pellicule brun indiquant qu'en amont et ponctuellement, un décapage de l'ensemble de l'horizon de labour a été possible.

Un échantillonnage selon une maille de 3 mètres dans l'axe topographique de la parcelle, et de 1 mètre dans la direction perpendiculaire, permet d'estimer ces dépôts à 15 dm³. En admettant une densité apparente d'au moins un point (1 g/cm³), l'estimation globale est de 15 tonnes, soit 3 tonnes par hectare.

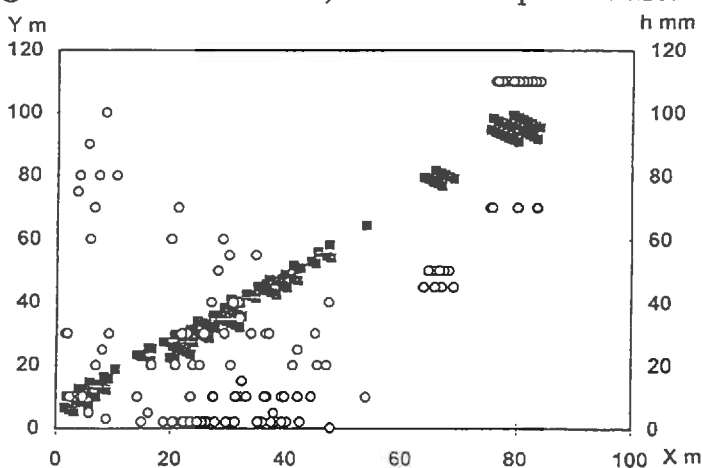


Figure V.20 : bilan de dépôt ; Naizin, 1993

4. REFLEXION SUR LES FACTEURS ET LES MECANISMES D'EROSION

4.1. Facteurs explicatifs (Rennes, 1994-1995)

L'intensité de la pluie semble le facteur le plus pertinent pour expliquer l'importance des particules entraînées par ruissellement, ce qui correspond à une érosion pluviale.

Si on distingue les trois périodes, sans prendre en compte les différents niveaux de pente, seule la deuxième période est corrélée linéairement avec l'intensité moyenne de la pluie. Ni l'intensité, ni le cumul des averses ne semblent intervenir au cours de la troisième période.

TRUMAN et BRADFORD (1993) indiquent que l'érosion sans rigole est corrélée avec l'intensité de la pluie selon une fonction puissance égale à $E=a*I^b$ avec a et b des constantes relatives aux propriétés du sol, I l'intensité de la pluie pendant la durée de la pluie. Il semble que ce modèle pourrait être applicable au poids de particules transportées par le ruissellement si les valeurs d'intensité de la pluie n'étaient pas des valeurs moyennes horaires (fig.V 21). Ces valeurs ne représentent pas l'agressivité de l'averse.

Par un modèle statistique simple (fig V.22), on peut distinguer les valeurs de concentration en charges solides inférieures à 5g/l et supérieures à 10 g/l. Le modèle relie le volume ruisselé en fonction de l'intensité moyenne horaire de la pluie. Le nombre de mesures n'est pas suffisant pour établir un réel modèle, de plus, on ne dispose que de valeurs semi-quantitatives. Les transferts de surface en hiver varient faiblement et créent un «bruit de fond» sur le modèle pour les valeurs inférieures à 5 g/l.

Nous n'aborderons pas les différents niveaux de pente. La variabilité spatiale du ruissellement est forte et induit des variabilités importantes, sur le versant, des valeurs de concentration en charge solide. Il serait impossible d'établir des relations entre pente, longueur de pente et concentrations en charge solide. Néanmoins, on représente une valeur moyenne du poids de particule par niveau de pente et par période, en fonction de la valeur locale de la pente au point considéré (fig.V.23). Il y a une bonne corrélation selon une fonction exponentielle pour la deuxième période. Au cours de cette période, la parcelle apparaît homogène : le sol est sec et la croûte établie sur l'ensemble du versant. L'érosion par la pluie augmente significativement avec l'angle de la pente (WISCHMEIER et al, 1958 ; LAL, 1976 ; CHAPLOT et al, 1996). L'interprétation de cette relation pente - érosion diverge selon les auteurs. BRYAN (1979) l'attribue à la nature du sol, HUANG (1995) à la vitesse du ruissellement,

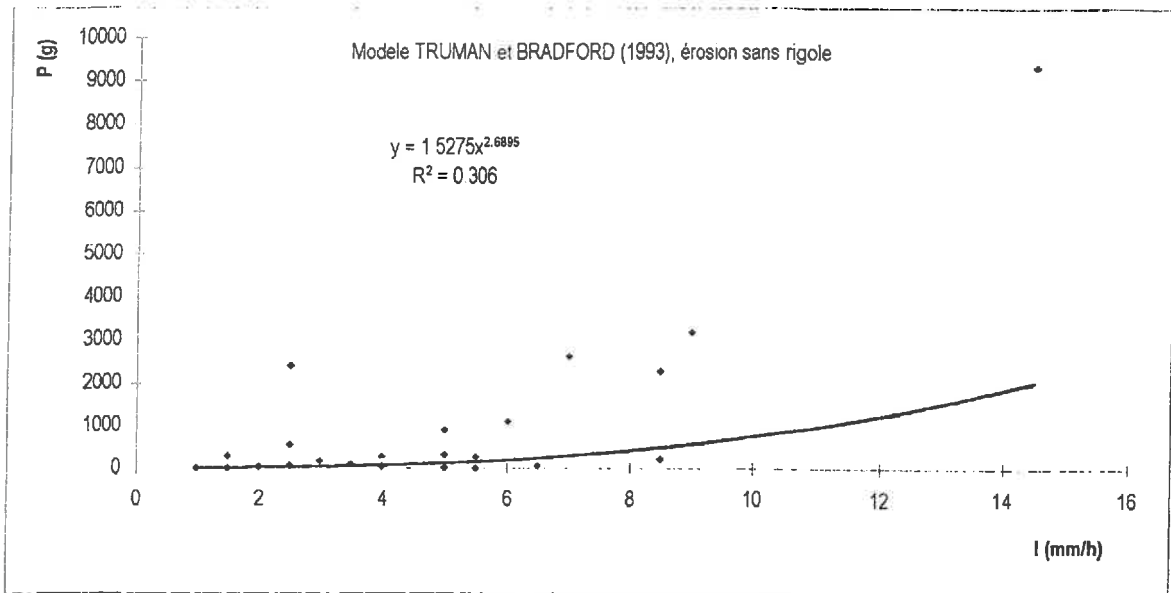


Figure V.21 : application du modèle de TRUMAN ET BRADFORD (1993)

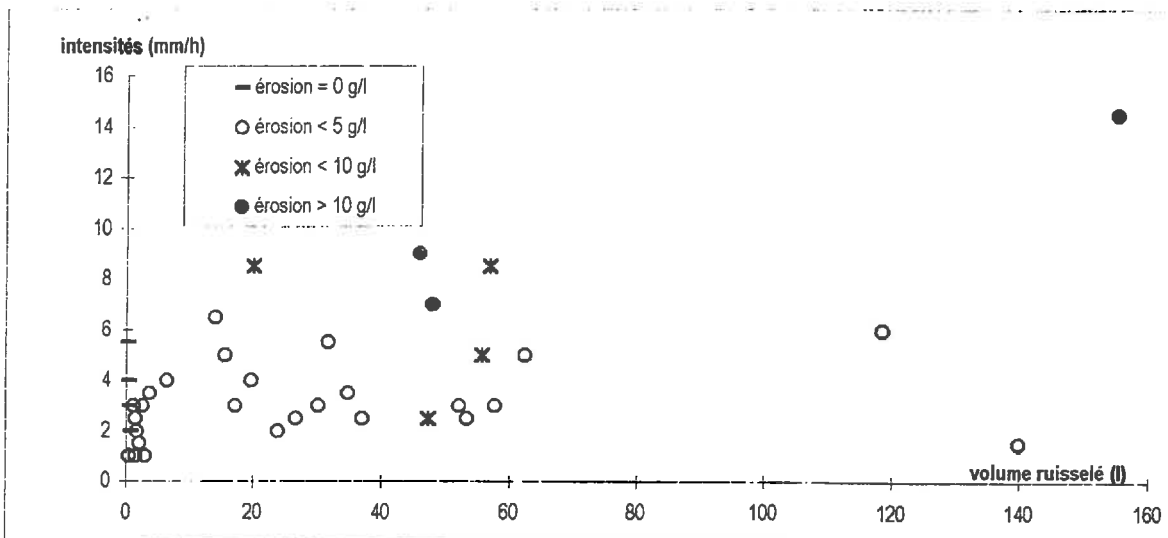


Figure V.22 : modèle simple statistique en fonction du volume ruisselé (l) et de l'intensité moyenne horaire

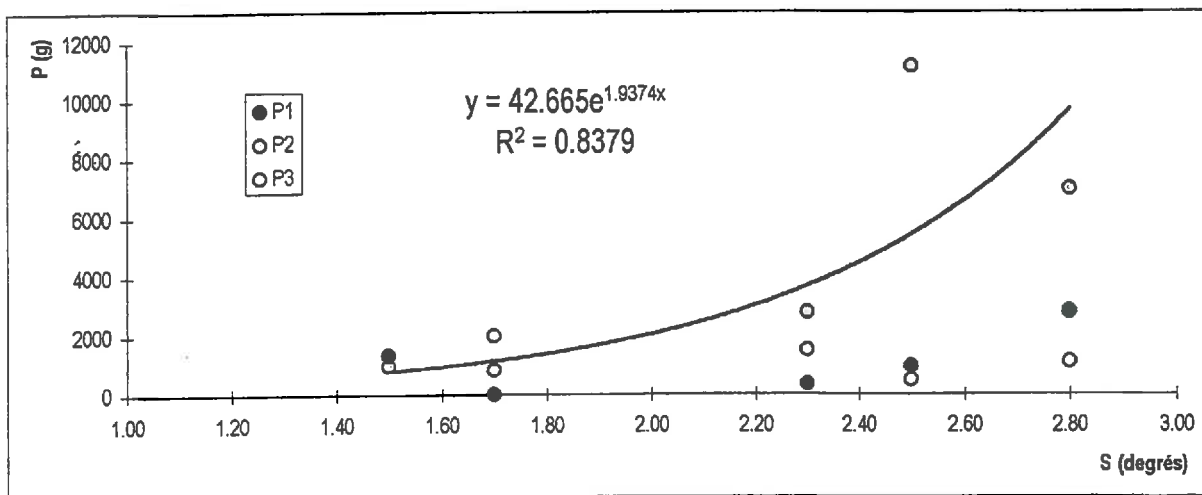


Figure V.23 : modèle simple d'estimation du poids de particules transportées par ruissellement en fonction du degrés de la pente

GUY et al (1987) aux caractéristiques des pluies et CHAPLOT et al (1996) à une diminution de la charge hydraulique.

La première et la troisième période n'apparaissent pas dépendantes de la valeur de pente, tout du moins pas aussi simplement. Au cours de la première période, le facteur topographique est lié indirectement aux caractéristiques physiques du sol : le versant n'est pas homogène. Durant la période hivernale, l'hétérogénéité du versant est plutôt de nature hydrique. L'aval de la parcelle est plus humide que le versant (chap. III).

Les modèles statistiques de prédiction de pertes en terre, tels que le WEPP (Nearing et al, 1989), le modèle de KINNEL (1988, 1991) ou celui de HAIRSINE et ROSE (1992), utilisent de nombreux paramètres difficilement ajustables à nos données.

4.2. Discussion

Dans le cas d'un sol où les croûtes de battance ou de dépôt ne sont pas formées, les particules de sol sont libres en surface. Les filets d'eau qui se créent, ont une compétence en général réduite dans un cas d'un sol drainant. En effet, l'infiltration est forte et l'on peut supposer que la distance parcourue par l'eau est courte. Ainsi, le flux n'atteint pas une vitesse suffisante pour transporter des particules grossières supérieures à la taille des sables fins, encore moins pour arracher les premiers centimètres du sol. La hauteur du flux est limitée et, en conséquence, sa turbulence (équation de manning). Au cours de la première période, d'après le diagramme de HJULSTROM (1935) (fig. V.24), la vitesse du flux est inférieure à 1 cm/s (cas de Rennes). Les premiers ruissellements transportent les plus fines particules, libres à la surface du sol ou émises par splash ; elles sont mises en suspension et transportées sur de faibles distances. L'eau ruisselée a alors une capacité de transport limitée. La topographie accentue un développement plus lent de la croûte à l'aval et qui, lui-même, limite la formation de ruissellement et donc du transport particulaire.

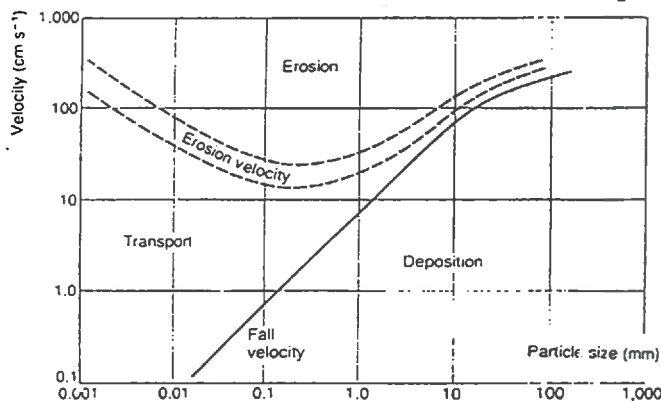


Figure V.24 : vitesses critiques de l'eau pour l'érosion, le transport et la déposition ; HJULSTROM (1935)

Dans le cas d'un sol encroûté en surface, les conditions de détachement, de transport et de dépôt sont reliées d'une part à la vitesse de l'écoulement d'eau et à la taille des particules (HJULSTROM, 1935), à l'impact de la pluie en fonction de la profondeur du flux (HAIRSINE et ROSE, 1991 ; KINNELL et CUMINGS, 1993) et d'autre part à la turbulence du flux (MANNING). Les auteurs distinguent l'érosion en ravine dominée par l'énergie du flux, de l'érosion inter-ravine dominée par l'énergie des gouttes de pluie. L'enregistrement d'un débit de ruissellement par la sonde placée en convexité est utilisé en formulant une hypothèse quant à la distance parcourue par l'eau. Si l'on considère que l'eau de ruissellement parcourt l'ensemble de la surface contributive amont au dispositif, la vitesse maximum du flux est d'environ 1,6 cm/s lors de l'averse du 31 juillet et de 0,4 cm/s en hiver. On peut donc émettre deux hypothèses :

- la première considère que le flux est laminaire ; le ruissellement ne peut transporter que les particules détachées soit par la battance de la pluie, soit libérées par l'activité biologique (turricules de vers de terre) ;
- la deuxième considère que le flux est turbulent et arrache les particules de sol, ou «use» la surface;

Que ce soit au cours des périodes 2 ou 3, la vitesse du flux et la composition granulométrique appliquée au diagramme de HJULSTROM montre que seule la battance de la pluie et l'activité biologique peuvent expliquer l'apport de charges solides dans l'eau. Aucune figure d'érosion n'a été relevée au cours de l'année culturale. Les pieds de maïs ont été dénudés au cours des événements orageux d'été. Ils pourraient expliquer les fortes concentrations de la deuxième période, ainsi que la similitude entre la composition granulométrique des charges solides et celle du sol. Durant la période hivernale, les concentrations sont très faibles. D'une part, l'augmentation du phosphore dans les charges solides au cours du temps et d'autre part, les valeurs de carbone organique plus fortes en hiver pourrait laisser supposer qu'une part de l'apport provient des turricules de vers de terre. Le nombre de turricules en surface est considérable, au cours de la troisième période.

Ces hypothèses sont en partie confirmées par les résultats obtenus sur les autres sites. En effet, lorsque la battance de la pluie est réduite soit par la protection de la culture (cas des petits pois et cas de la phacélie), soit par les caractéristiques climatiques (période hivernale, où l'intensité moyenne horaire de la pluie est faible), les concentrations en charge solide de l'eau sont de plus en plus faibles lorsque la croûte est de mieux en mieux formée. Cependant, en hiver, il serait hâtif d'imputer la totalité des charges solides égale aux turricules de vers de terre. En effet, avec le sol nu, les valeurs de concentration sont fortement reliées à l'intensité moyenne horaire de la pluie.

A Naizin, les transports solides sont faibles. Il faut noter néanmoins que l'érosion des sols existe (cf photos, chapitre I). Les parcelles de Kerjos et de Tocplouz avaient été choisies après avoir observé des micro-rigoles (annexe : matériel et méthode). Le bilan de dépôt de la parcelle de Tocplouz indique une valeur minimum des transports. Une hypothèse peut être faite pour expliquer l'érosion sur ces parcelles non encroûtées : les premiers centimètres de sol semblent pouvoir être arrachés lors des événements violents d'été ; le sol est sec ; la rapidité des flux ne permet pas à l'eau de s'infiltrer ; le flux se concentre, sa hauteur augmente ; la hauteur du flux et la rugosité du sol induisent un flux turbulent ; la vitesse, d'autant plus forte que les pentes et la longueur de pente sont grandes. La turbulence du flux de ruissellement provoque une érosion en «ravine» dans les axes de concentration, topographiques ou culturaux (rangs de maïs), et à l'aval des parcelles, proche du ruisseau. Il semble que si l'on modifie soit la longueur de pente, soit la technique culturale (plasticulture), un événement orageux peut provoquer des phénomènes d'érosion en ravine ou en rigoles comme c'est le cas sur le bassin versant de Naizin.

5. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Pour les schémas (§ 5.1, 5.2 et 5.3), seul le cas d'un système drainant est envisagé, à partir essentiellement, des données de Rennes (1994-1995).

5.1. Première période

Les valeurs de concentration restent moyennes ([CS] inférieures à 35 g/l), malgré le nombre important de particules libres en surface en début de période. Les transferts de surface sont réduits car :

- (1) les vitesses et les hauteurs du ruissellement sont faibles ;
- (2) la rugosité du sol est grande, avec un microrelief prononcé ;
- (3) la cohésion des particules de sol est d'autant plus importante que le sol n'est pas sec ;

La topographie ne semble pas intervenir directement, car il n'y a pas de propagation du ruissellement. Les caractéristiques physico-chimiques, liées indirectement à la topographie, induisent une forte infiltration de l'eau sur le versant. Les transports concernent majoritairement les particules fines (limons fins et colloïdes minéraux), voire les limons grossiers et les sables fins, en relation avec une vitesse de ruissellement faible, mais une forte disponibilité des particules.

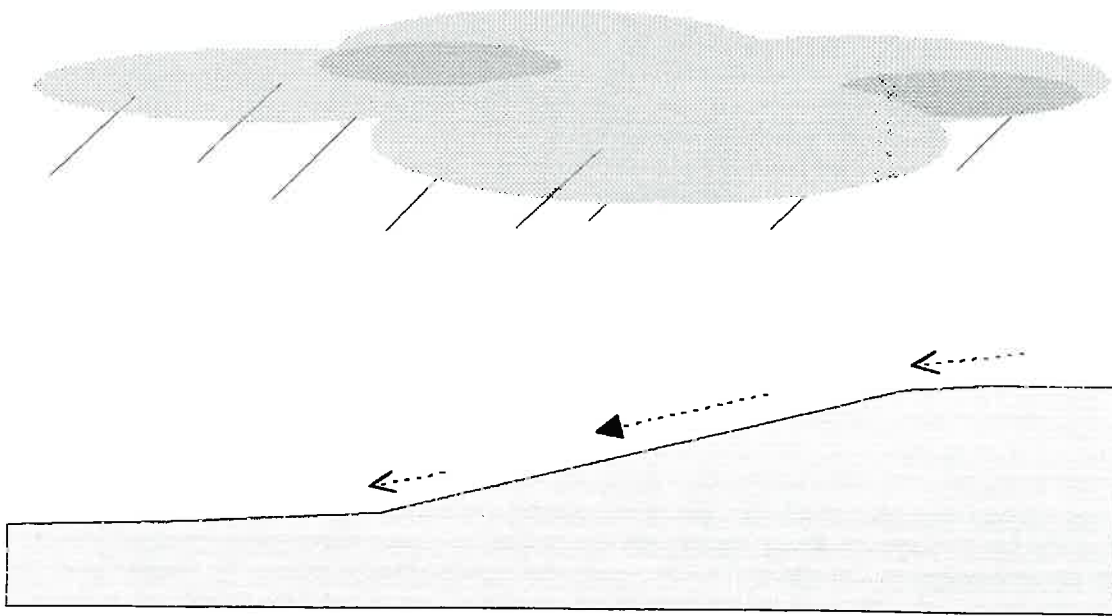


Figure V.25 : localisation le long du versant de l'importance des transports particuliers au cours de la première période

5.2. Deuxième période

Les croûtes de dépôt sont bien établies. Les transferts de particules sont importants dans la convexité et dans la pente et fortement réduits à l'aval. Néanmoins, les «sorties» existent au cours des averses orageuses de fortes intensités. Le point de convexité apparaît comme une zone érodée et l'aval comme une zone préférentielle de dépôt. Les redistributions au sein du versant sont importantes. Les sorties sont peu fréquentes sur l'ensemble de la période. Ainsi, à long terme, ces transferts pourraient avoir des conséquences non négligeables sur la pédogenèse et la morphologie du versant.

La granulométrie des charges solides recueillies au cours des deux violentes averses orageuses de juillet, est proche de celle du sol. La vitesse du ruissellement ne semble pas suffisante pour éroder le sol lui-même. Les pieds de maïs ont été dénudés mais aucune figure d'érosion n'a été observée. La pluie et la concentration de l'eau sur les tiges de maïs provoquent un «effondrement» du sol près des pieds de maïs ; (2) les particules de sol sont reprises par le ruissellement dont la vitesse est suffisante pour transporter des particules de la taille des sables grossiers, mais pas pour les arracher.

Le sol est sec et la croûte est bien formée sur l'ensemble du versant. La parcelle apparaît comme homogène. L'érosion est fortement liée à l'intensité de la pluie. En effet, la battance de la pluie, la vitesse du flux et sa turbulence sont induites par l'intensité de l'averse.

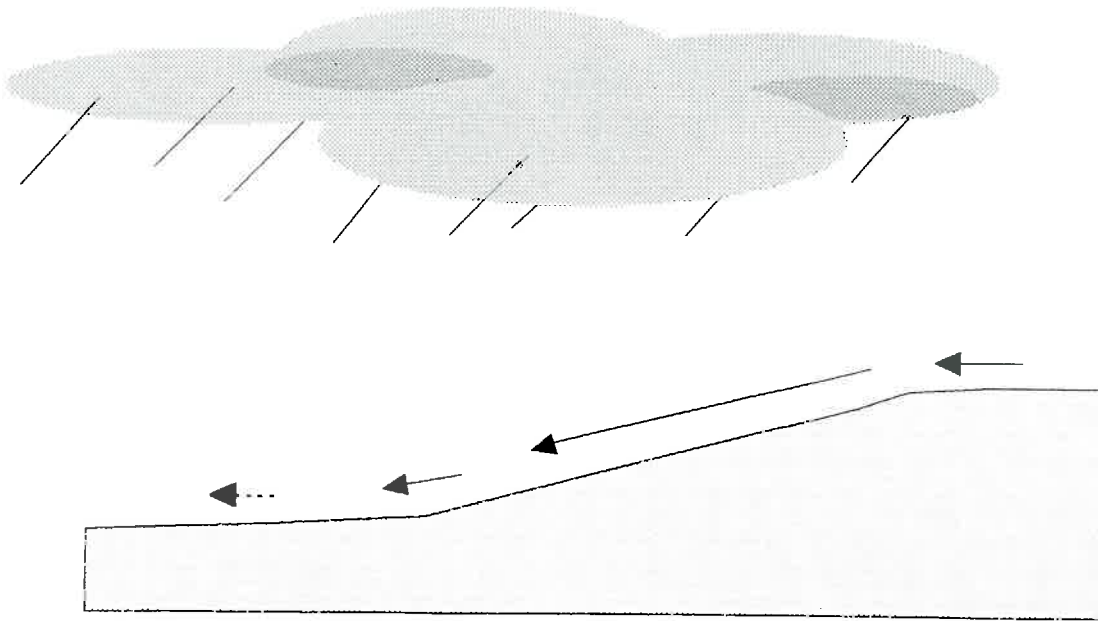


Figure V.26 : localisation le long du versant de l'importance des transports particulaires au cours de la deuxième période

5.3. Troisième période

Au cours des épisodes hivernaux, bien que le sol soit, en partie ou totalement nu, les caractéristiques pluvieuses de la période induisent un effet splash limité : (1) la pluie est peu érosive ; (2) les particules sont difficilement détachées, car le sol est humide et encroûté ; (3) les turricules de vers de terre sont nombreux en surface.

Les transferts particulaires sont faibles. Ils peuvent être liés : (1) à un faible décapage de la surface du sol par le ruissellement ; (2) aux transferts des turricules ; (3) à une faible érosion pluviale, par splash.

Les charges solides sont alors constituées de particules fines et contiennent une quantité importante de matière organique, comparée au sol. La présence de turricules de vers de terre doit favoriser les pertes en matière organique. La vitesse de sédimentation des particules de la taille des argiles et des limons fins ne permet pas leur dépôt, au cours de leurs transferts ; le ruissellement à l'aval induit une sortie régulière des particules vers le cours d'eau. Il semble de faible vitesse car il n'y a pas de figures d'érosion. Cette érosion est « sélective et fréquente ».

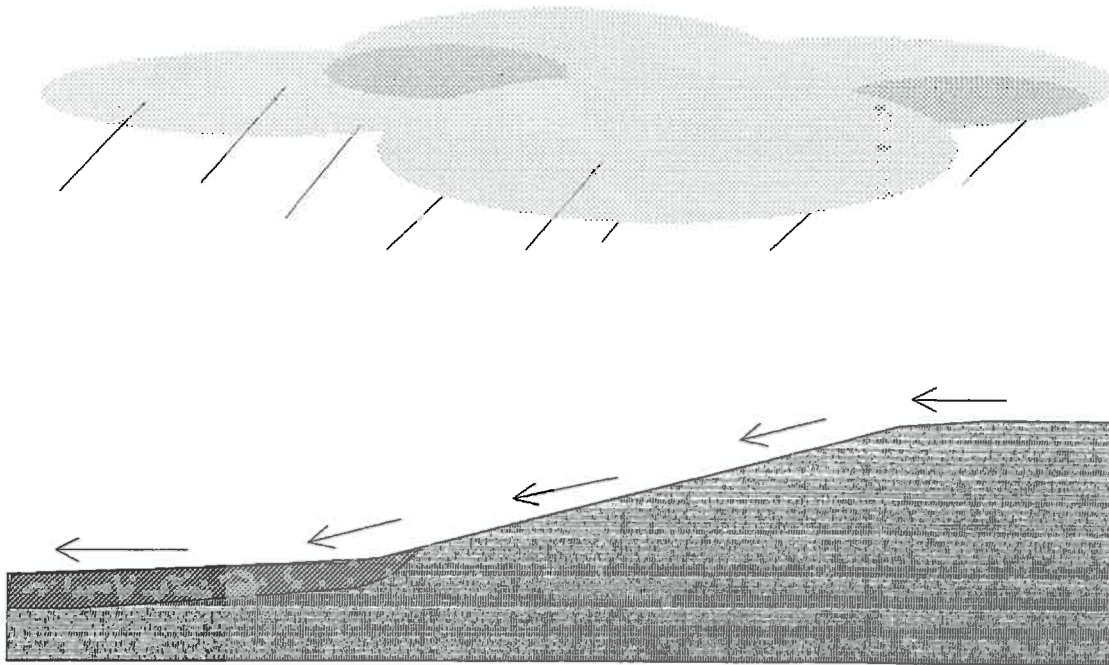


Figure V.27 : localisation le long du versant de l'importance des transports particuliers au cours de la troisième période

5.4. Conclusion

La redistribution des constituants au sein du versant n'est pas négligeable. A long terme, ces transferts de surface peuvent jouer un rôle sur l'hétérogénéité spatiale des sols et de leur fertilité. (Cf analyses totales)

Ces résultats indiquent par ailleurs que la topographie et le taux de matière organique ne sont pas les seuls facteurs déterminants de l'érosion des sols. L'analyse en terme de risque ne peut donc se résoudre par l'utilisation de ces deux seuls termes.

REFLEXIONS SUR LA CHIMIE DES EAUX

Les eaux sont faiblement concentrées : les concentrations en ions sont celles de la pluie, hormis un enrichissement en calcium, potassium, sulfate, phosphate et fluor. Trois composantes de l'origine des ions, sont déterminées : une composante marine, une composante continentale et une composante anthropique. Quatre familles chimiques sont déterminées en fonction de ces origines et de la solubilité des éléments. Elles varient temporellement en fonction des pluies et spatialement en fonction du sol. Il semble exister une relation entre la distance parcourue par l'eau et la concentration en ions provenant du sol. Le faible nombre d'analyses permet seulement une réflexion sur cette relation. Les processus majeurs expliquant la chimie des eaux de ruissellement sont le «rainout» et le «washout» des pluies ainsi que l'effet «lavage de la surface du sol».

INTRODUCTION

Le rôle du ruissellement dans la dynamique des transferts de polluants liés aux particules de sol, phosphore et produits phytosanitaires, entre autres, est connu. Ainsi, les résultats obtenus par l'équipe de l'ENSP, sur le site de Rennes, sont indiqués en annexe pour rappeler la complexité des transferts des produits phytosanitaires par ruissellement. Cependant, dans le contexte armoricain, peu de travaux ont traité de la variabilité de la chimie des eaux de ruissellement sur le versant. Les analyses réalisées permettent de caractériser la partie soluble de l'eau ruisselée et de rendre compte, en outre, des transports de solutés. De ce point de vue, il faut rechercher la liaison entre le compartiment «eau de pluie» et le compartiment «eau de ruissellement».

Ce chapitre reste une réflexion, ouvrant sur des hypothèses que le nombre de données recueillies ne nous permettent pas de confirmer.

La composition chimique des eaux ruisselées est analysée dans le premier paragraphe. Le deuxième paragraphe présente différentes familles chimiques tirées de l'analyse précédente selon leur origine et leur solubilité. Une étude complémentaire permet de mettre en évidence un autre processus expliquant la chimie des eaux de ruissellement. On tente de conclure d'une part, par une discussion sur les variations spatiales et temporelles, et d'autre part, par une réflexion sur la relation entre distance parcourue par l'eau et concentration en éléments de l'eau de ruissellement.

1. ANALYSE DE LA CHIMIE DES EAUX DE RUISSELLEMENT

1.1. Données disponibles, Rennes, 1993-1995

Les dates et la situation dans la parcelle des prélèvements pour analyses chimiques d'eaux ruisselées sur le site de Rennes sont indiquées sur le tableau VI.1. Le prélèvement est réalisé avant le recueil d'aliquote d'eau de ruissellement et de charges solides, et effectué à l'aide de flacons en PVC de 100 ml, à usage unique.

Pour l'analyse des anions, la solution est filtrée avec des filtres «millipores» à 0,45 μm de diamètre de pore sous pression d'air, puis stockée 1 à 2 jours maximum au réfrigérateur à 4°C, avant d'être analysée en chromatographie ionique (annexe 5b). Pour l'analyse des cations, la filtration des aliquotes est identique. Le stockage des aliquotes se fait à 4°C avant leur expédition au laboratoire d'analyse d'Arras (INRA).

Les analyses d'eaux, réalisées en 1993, sont écartées de la caractérisation chimique de l'eau pour deux raisons essentielles :

(a) les eaux filtrées ont été stockées de 2 à 6 mois sans être acidifiées ;

(b) le contexte cultural est différent ; en 1993, à Rennes, les eaux ont été prélevées sur la parcelle cultivée en pois protéagineux.

Cependant, elles seront comparées aux caractéristiques statistiques de l'eau de ruissellement. Seuls les anions ont été quantifiés, à partir de 12 aliquotes d'eau de ruissellement prélevés sur 2 dispositifs (amont et aval).

dates de prélèvement	position dans la parcelle	nombre de prélèvement
26 avril 1993	amont + aval	= 2
17 mai 1993	amont + aval	= 2
9 juin 1993	amont + aval	= 2
10 juin 1993	amont + aval	= 2
11 juin 1993	amont + aval	= 2
15 juin 1993	amont + aval	= 2
12 mai 1994	aval : n°6 concavité : n°7 pente : n°8 convexité : n°9 amont : n°15	1 +1 +1 +1 +1 = 5
17 mai 1994	aval : n°1, 6 et 11 pente : n°8 convexité : n°14	3 +1 +1 = 5
24 mai 1994	aval : n°1, 6 et 11 pente : n°8 amont : n°10	3 +1 +1 = 5
25 juillet 1994	aval : n°6 et 11 pente : n°8 amont : n°10	2 +1 +1 = 4
7 septembre 1994	aval : n°1, 6 et 11 pente : n°8 amont : n°10	3 +1 +1 = 5
9 septembre 1994	aval : n°1, 6 et 11 pente : n°8 amont : n°10	3 +1 +1 = 5
26 septembre 1994	aval : n°1, 6 et 11 pente : n°8 amont : n°10	3 +1 +1 = 5
12 décembre 1994	aval : n°1, 6 et 11 pente : n°8 amont : n°10	3 +1 +1 = 5
18 janvier 1995	aval : n°1 concavité : n°2 pente : n°3 convexité : n°4 amont : n°5	3 +1 +1 +1 +1 = 7
13 février 1995	aval : n°1 concavité : n°7 et 12 pente : n°8 convexité : n°14 amont : n°10 et 15 PLUIE	1 +2 +1 +1 +2 + PLUIE = 7
15 février 1995	aval : n°1, 6 et 11 pente : n°8 amont : n°15 PLUIE	3 +1 +1 + PLUIE = 5

Tableau VI.1 : données disponibles ; Rennes, pois, 1993 ; maïs, 1994-1995

1.2. Composition chimique des eaux de ruissellement et variabilité

Les eaux de ruissellement sont faiblement concentrées ; la charge totale est inférieure à 0,86 mmol/l ; la concentration des ions est très variable (figure VI.1 et tableau VI.2). Les coefficients de variation des concentrations des différentes espèces chimiques sont importants, de 70 % à 270 %.

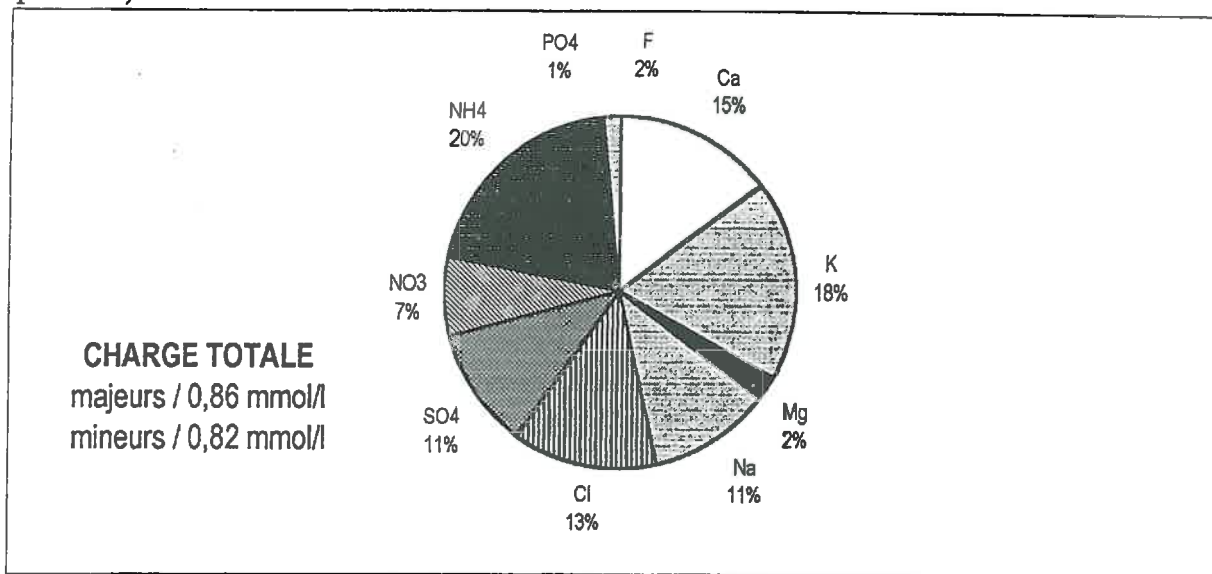


Figure VI.1 : Composition chimique des eaux de ruissellement ; Rennes, 1994-1995

mmol/l	Ca	K	Mg	Na	Cl	SO4	NO3	NH4	PO4	F
n	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Moy. arithmétique	0,13	0,14	0,02	0,09	0,11	0,09	0,07	0,19	0,005	0,014
écart type	0,10	0,12	0,01	0,07	0,07	0,07	0,13	0,30	0,136	0,033
minimum	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000
maximum	0,62	0,40	0,06	0,27	0,26	0,41	0,84	1,56	0,080	0,210
coef. de variation	0,796	0,809	0,701	0,732	0,663	0,786	1,87	1,63	2,725	2,317
distribution	<i>expon.</i>	<i>bimodale</i>	<i>log N</i>	<i>bimodale</i>	<i>bimodale</i>	<i>log N</i>	<i>expon.</i>	<i>expon.</i>	<i>expon.</i>	<i>expon.</i>

Tableau VI.2 : description statistique de la chimie des eaux de ruissellement ; Rennes, 1994-1995

Les ions ammonium, potassium, calcium et chlorure sont les espèces dominantes, puis le sodium, le sulfate et le nitrate. Les ions magnésium, fluorures et orthophosphates sont en plus faibles proportions, moins de 2%.

Les lois de distributions, indiquées en italique, sont proposées à partir des histogrammes de fréquence. Elles n'ont pas été testées. Cependant, il apparaît trois formes de distribution. Les ions dominants sont distribués, soit selon une loi d'allure log normale, soit selon une courbe bimodale indiquant une double origine. Les ions de plus faible concentration sont distribués selon une courbe bimodale ou d'allure exponentielle.

La moyenne des concentrations d'anions calculée sur les 12 analyses d'eau ruisselée prélevée à Rennes, en 1993, est égale aux concentrations de l'analyse d'un échantillon d'eau de ruissellement, prélevé en 1993 à Naizin, sur une parcelle de blé (Tableau VI.3) pour les nitrates, les phosphates et les sulfates. Ces moyennes sont plus fortes que celles obtenues sur les eaux prélevées à Rennes, au cours de l'année 1994-1995. Auparavant, la parcelle de blé avait subi un traitement fongicide. Ces fortes concentrations en chlorure, nitrate, phosphate et sulfate illustrent l'intérêt de suivre la qualité des eaux ruisselées spatialement et temporellement après des traitements effectués sur les parcelles.

anions	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄
Naizin, Blé	0,6	0,17	0,08	0,23

Tableau VI.3: analyse d'anions en mmol/l ; Naizin, 1993.

☞ Les variabilités temporelles et spatiales peuvent être importantes. Les valeurs moyennes calculées sur des périodes différentes ne sont pas comparables, alors que les valeurs maximales sont du même ordre de grandeur.

1.3. Relations hauteur de pluie, volume ruisselé et concentration en charge solide

Afin d'observer les relations entre les éléments et les facteurs «hydrologiques», les caractéristiques statistiques des 10 variables chimiques sont présentés en annexe 5c et un tableau de diagrammes de corrélation est présenté en annexe 5d. Les corrélations négatives des éléments peuvent être expliquées par les phénomènes de «washout et rainout». Le «washout» est défini par une incorporation de gaz, poussières ou aérosols par les gouttes lors de leur chute et le «rainout» par la composition initiale des nuages (WOLAVER & LIETH, in RODA 1983). La concentration moyenne des ions en fonction de la hauteur d'eau de la pluie a la forme d'une hyperbole (DURAND, 1989). Le «washout», correspondant à la branche fortement décroissante de l'hyperbole, pour les faibles hauteurs de pluie, est lié à l'incorporation de gaz, poussières et aérosols par les gouttes, et le «rainout», composition résiduelle pour les fortes hauteur de pluie, correspond à la composition initiale des nuages (WOLAVER & LIETH, 1972 in DURAND, 1989). Les éléments sont en général mal corrélés avec la hauteur de pluie, le ruissellement et la concentration en charge solide, mais des tendances ressortent.

Cl, NH₄, SO₄, NO₃ et PO₄ sont les éléments les mieux corrélés avec la hauteur pluviométrique de l'averse, le premier négativement et les quatre autres positivement. Pourtant, de nombreux points s'écartent des tendances.

La concentration en chlore est corrélée positivement avec le volume ruisselé à l'inverse des concentrations en NH₄, SO₄, NO₃ et PO₄. La corrélation avec les charges solides est négative, hormis pour le SO₄.

Les éléments liés à l'altération des minéraux, le potassium, le sodium, le calcium et le magnésium, sont mieux corrélés avec le volume ruisselé qu'avec la pluie. Seuls Na, Ca et Mg apparaissent corrélés aux particules solides. Ce sont des éléments liés à la CEC du sol. L'apport du sol semble dominant comparé à celui de la pluie.

- Le chlore, très soluble, semble avoir deux origines (figure VI.2a). La pluie constituerait l'apport majeur et le sol, la deuxième source, par lavage de la surface.
- NH₄ serait apporté par la pluie et l'action du sol serait négligeable. Cet élément a une distribution (figure.VI.2b) exponentielle, soit une seule origine. Il est fortement adsorbé sur le complexe d'échange et sa corrélation négligeable avec les particules du sol ne semble pas indiquer un apport du sol.
- SO₄ semble plus complexe. Deux origines se distinguent (figure.VI.2c), avec une contribution déséquilibrée de l'une par rapport à l'autre. Il intervient dans les cycles biologiques et est retenu par le sol. La pluie semble apporter une part majeure, mais le sol contribue à l'enrichissement de SO₄ dans l'eau de ruissellement d'une manière plus diffuse.

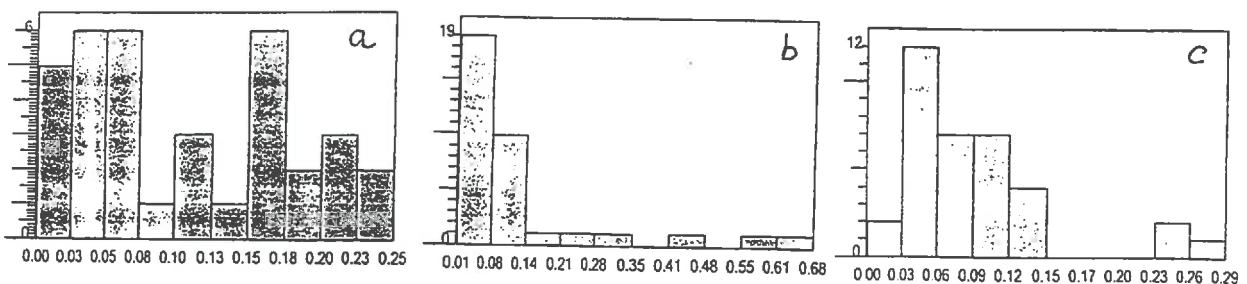


Figure VI.2 : histogramme de fréquence de la concentration en Cl (a), en NH₄ (b) et en SO₄ (c) ; Rennes, 1994-1995

- Le phosphate a un comportement proche de celui du sulfate. Il est mieux corrélé avec le volume ruisselé qu'avec les concentrations en charge solide, bien que ce soit un élément lié aux particules du sol. Il serait quasi totalement apporté par la pluie, au cours de la troisième période.
- Le nitrate est un élément très soluble. Il semble essentiellement apporté par la pluie.

2. FAMILLES CHIMIQUES

2.1. Relations entre éléments

Cette étude a été réalisée par l'analyse de matrices de corrélation, de régressions simples et d'analyse en composantes principales.

Les liaisons entre éléments ne sont pas simples (annexe 5d). Toutefois les matrices de corrélation (tableau VI.4) permettent de distinguer 3 associations. Elles sont proches des associations classiques utilisées dans la chimie des pluies (DURAND, 1989).

	Mg	F	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	K	Na	PO ₄	NH ₄	CS	VR	Pluie
Mg	1												
F	0,1	1											
Cl	0,68	0,25	1										
NO ₃	0	-0,25	-0,28	1									
SO ₄	0,16	0,04	-0,19	0,38	1								
Ca	0,7	0,27	0,38	0,15	0,3	1							
K	0,88	-0,09	0,7	-0,09	0	0,57	1						
Na	0,63	-0,11	0,6	0,13	0,31	0,29	0,64	1					
PO ₄	0,21	-0,02	-0,14	0,21	0,24	0,04	0,02	0,01	1				
NH ₄	0,18	-0,14	-0,23	0,22	0,42	0,011	-0,4	0,13	0,67	1			
CS	0	0,19	-0,28	0,09	0,56	0,09	-0,1	-0,2	0,019	0,03	1		
VR	0,15	0,22	0,14	0,03	0,03	0,33	0,15	-0,16	-0,1	-0,2	0,45	1	
Pluie	0,06	-0,14	-0,49	0,27	0,54	0,15	0,04	0,05	0,4	0,52	0,34	-0,06	1

Tableau VI.4 : matrice de corrélation entre les ions analysés ; Rennes, 1994-1995. (Seuil de 1% et taille de l'échantillon = 56)

☞ Mg, Na, K et Ca d'origine continentale (apport par le sol, produits d'altération)

☞ Cl, Mg et Na d'origine marine (apport par la pluie)

☞ NH₄, PO₄, NO₃ et SO₄ d'origine anthropique et le fluor, bien que ce soit un élément marginal qui apparaît rarement et toujours à des concentrations très faibles.

Une ACP à 9 variables et 315 individus (figure.VI.3 et annexe 5e) a été réalisée. Les 9 variables retenues sont le calcium, le sodium, le magnésium, le potassium, le chlorure, les orthophosphates, l'ammonium, le sulfate et le nitrate. Le premier axe représente les niveaux de concentration. Le deuxième axe oppose les éléments d'origine anthropique et les éléments d'origine double, pluie et produits d'altération, et le troisième axe différencie les éléments d'origine anthropique qu'ils soient solubles ou adsorbés. L'axe 2 dégage les individus correspondant au début du cycle cultural. Ils sont plus riches en éléments d'origine anthropique.

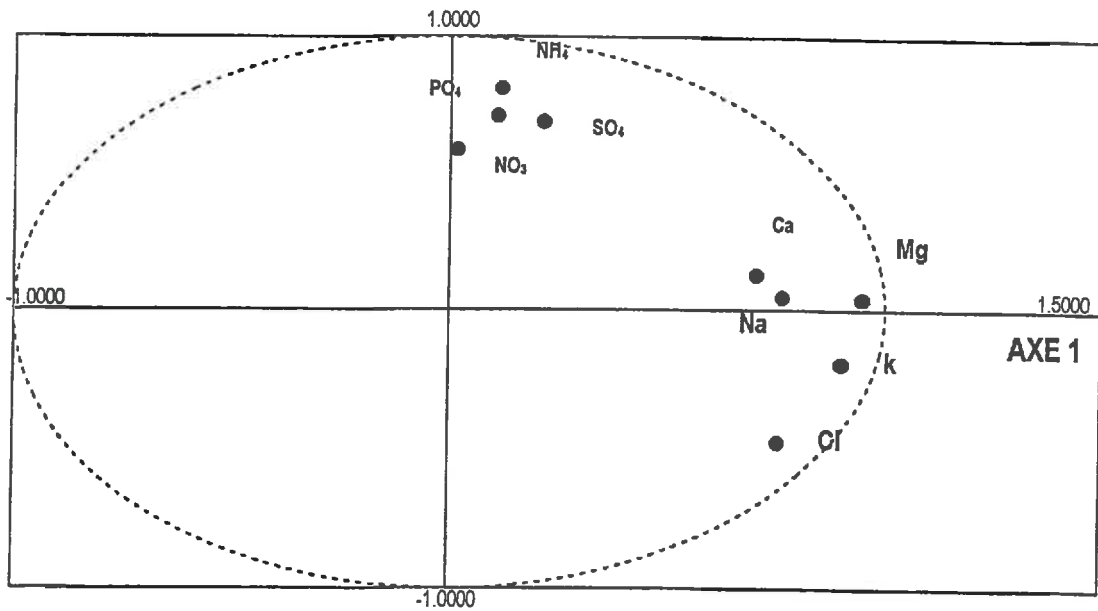


Figure VI.3 : ACP à 9 variables ; Rennes, 1994-1995

2.2. Origines des solutés de l'eau de ruissellement

Seulement deux pluies ont été analysées. Les résultats sont à interpréter avec beaucoup de prudence et sont donnés à titre indicatif. Les valeurs utilisées pour les différents calculs sont la moyenne des deux pluies, les valeurs moyennes des matières dissoutes dans l'eau de mer (LOMBARDA, 1956 ; VAN DER LEEDEN, 1990) et la valeur moyenne des sels dans l'eau de ruissellement sur 56 échantillons prélevés au cours de l'année culturale (Rennes).

En se basant sur les rapports ioniques, du calcium avec le magnésium et des chlorures avec le magnésium, dans l'eau de mer, dans l'eau de pluie et dans l'eau de ruissellement, on peut estimer grossièrement la part des sels marins dans la pluie et la part des sels marins dans le ruissellement. La contribution des éléments d'origine marine dans l'eau de pluie apparaît importante (tableau VI.5), environ 37% de la charge totale (Références in DURAND, 1989), et relativement forte dans l'eau de ruissellement, 45% de la charge totale. La distance du site avec la Manche est de 60 km et avec l'Atlantique de

100 km.	F	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na	PO4	NH4	charge totale
pluie	0.00	0.14	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.12	0.00	0.09	0.47
ruissellement	0.01	0.11	0.06	0.09	0.12	0.02	0.15	0.09	0.01	0.16	0.82
mer		0.54		0.03	0.00	0.05	0.00	0.46			
	F/Cl		NO3/Cl	SO4/Cl	Ca/Cl	Mg/Cl	K/Cl	Na/Cl	PO4/Cl	NH4/Cl	
/ pluie	0.00	1.00	0.08	0.47	0.10	0.10	0.15	0.87	0.00	0.66	
*Clruis	0.00	0.11	0.01	0.05	0.01	0.01	0.02	0.09	0.00	0.07	0.37
apport pluie au ruissellement	0%	100%	13%	55%	9%	56%	11%	103%	1%	44%	45%
/mer		1.00		0.05	0.00	0.10	0.00	0.86			
*Cl pluie		0.14		0.01	0.00	0.01	0.00	0.12			0.14
apport mer à la pluie		100%		11%	2%	94%	1%	99%			29%

Tableau VI.5 : contribution des éléments d'origine marine dans la pluie et le ruissellement ; Rennes, 1994-1995

Le magnésium est considéré comme un élément d'origine mixte marine et continentale. Il est bien corrélé avec le calcium et le chlore alors que ces deux éléments ne le sont pas entre eux (figure.VI.4). Les valeurs dans l'eau ruisselée de Ca en fonction de Mg indique un enrichissement autre que par la pluie, l'eau de pluie étant elle aussi, enrichie par des apports autres que marins. Le nuage de point de Cl en fonction de Mg indique que ces trois eaux sont proches et confirme les résultats obtenus auparavant : Cl provient majoritairement de la mer ; Mg dans une moindre proportion.

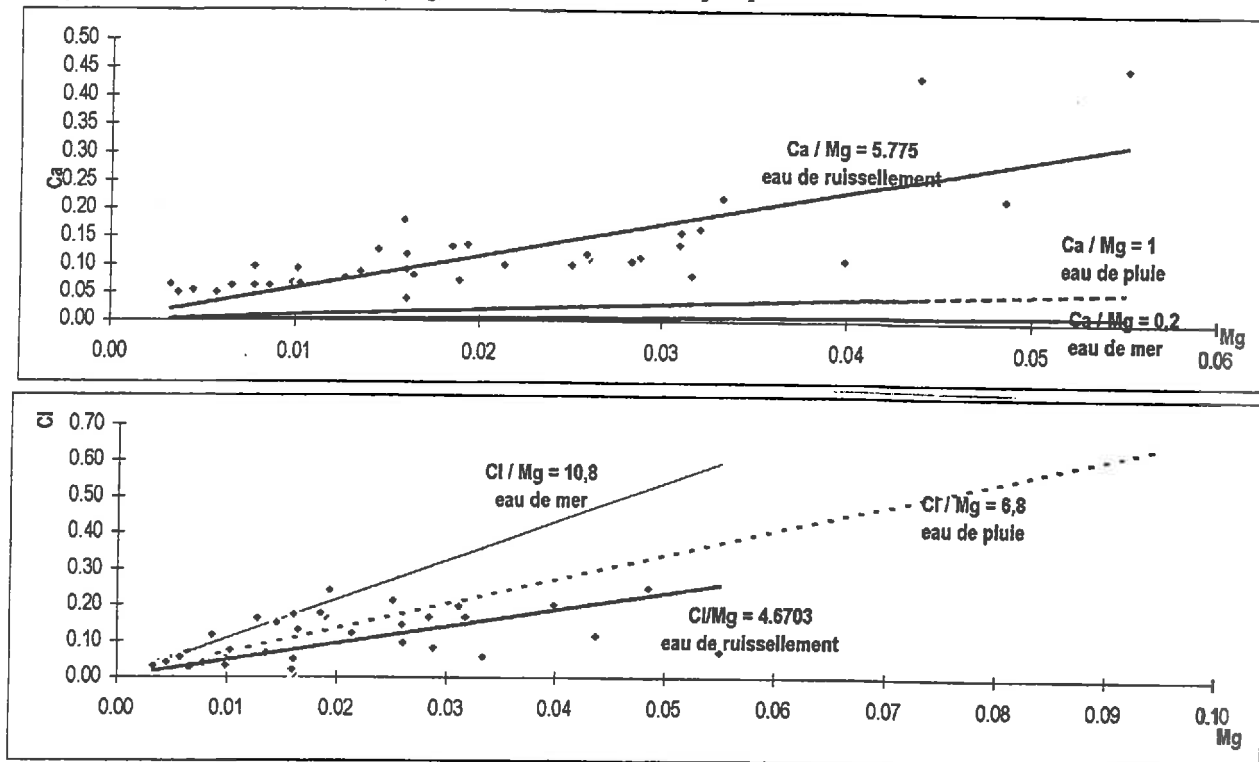


Figure VI.4 : rapport entre Ca, Mg et Cl dans l'eau de ruissellement, la pluie et l'eau de mer (mmol/l) ; Rennes, 1994-1995

Pour compléter ces résultats, on peut tenter d'évaluer les quantités d'éléments, réellement apportées par la pluie et par le sol, en comparant les rapports moyens des concentrations de chaque élément entre l'eau de ruissellement et l'eau de pluie. Le tableau VI.6 nous indique que les concentrations en chlore et en magnésium sont égales aux concentrations dans l'eau de pluie. NO₃, NH₄ et Na sont plus faiblement concentrés. SO₄, Ca et K sont issus majoritairement du sol.

dates	position	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	K	Na	NH ₄	VR (l)	PL(mm)	CS (g/l)
13.fév.95	amont	1.21	0.41	7.64	7.64	1.18	3.84	0.42	0.67	26	10	1.08
	convexité	0.27	0.00	3.57	3.57	0.50	2.72	0.30	0.44	4	10	0.97
	pente	0.84	1.00	5.71	5.71	1.37	7.45	1.13	0.67	2	10	1.30
	concavité	1.34	0.00	0.50	9.07	1.99	17.42	0.97	0.56	32.5	10	1.28
	aval	1.64	0.00	0.46	7.86	1.24	7.87	0.34	0.78	39	10	0.84
15.fév.95	amont	1.31	0.00	0.64	7.75	1.03	1.12	0.29	0.26	32	6	0.87
	pente	-	0.08	2.86	4.25	0.23	0.56	0.22	0.26	1.2	6	0.88
	aval	1.21	2.37	0.70	12.75	1.17	3.50	0.43	0.67	42	6	1.19

Tableau VI.6 : rapport des concentrations entre les eaux de ruissellement et de pluie ; Rennes, 13 et 15 février 1995

2.3. Variations spatiale et temporelle

Quatre grandes familles chimiques sont distinguées à partir des relations des éléments avec d'une part, la hauteur des pluies, le volume ruisselé et d'autre part, entre eux (figure. VI.5).

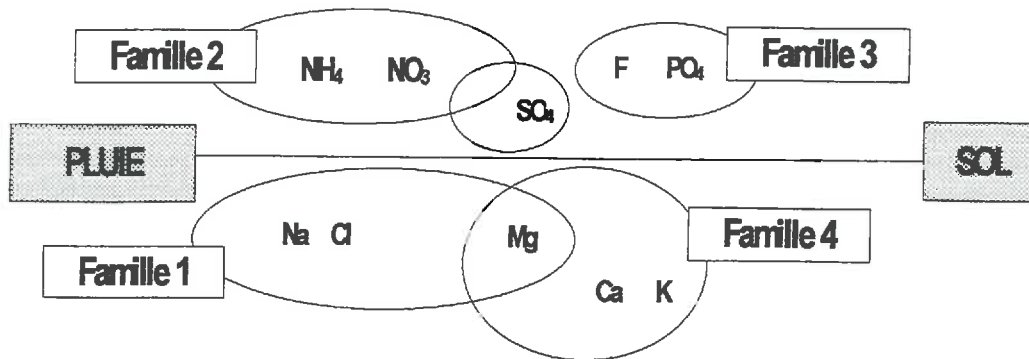


Figure VI.5 : schéma des quatre familles chimiques des eaux de ruissellement en fonction de leur origine.

La première et la deuxième familles correspondent aux éléments apportés par la pluie, respectivement ceux d'origine marine, et ceux d'origine anthropique. La troisième et la quatrième familles correspondent aux éléments apportés par le sol, respectivement ceux d'origine anthropique, et ceux d'origine continentale.

L'évolution temporelle et spatiale de ces quatre familles chimiques est la suivante (figure.VI.6) :

☞ Le chlore et le sodium évoluent de manière identique ; l'évolution de leur concentration est importante en fonction des averses, mais plus diffuse en fonction de l'espace, pour une même date. Leur concentration est plus forte en hiver. Au début de l'année culturale, la concentration en magnésium est égale voire supérieure à celle en hiver ; il semble, donc qu'il provienne essentiellement du sol au cours de cette période.

☞ le calcium et le potassium réagissent de manière inverse au chlore et au sodium ; on retrouve l'apport d'éléments (magnésium, calcium et potassium) par le sol au début de l'année culturale ; au cours de cette période, la concentration des trois éléments est importante sur la pente et en aval de la parcelle.

☞ le sulfate varie peu dans l'espace et dans le temps ; les concentrations de cet élément sont plus importantes en première période et très faibles au cours de la deuxième période ; le sulfate doit intervenir dans le cycle cultural ; il est fortement retenu par le sol et *in fine*, intervient peu au cours de la troisième période ;

☞ le nitrate et les ions ammonium sont bien localisés dans l'espace et dans le temps ; en ordre d'apparition par rapport au temps : NO_3 est apporté par la pluie. Les fortes concentrations à l'aval, au cours de la première période, peuvent alors être liées à un effet de lavage de la surface du sol ; NH_4 est plus concentré au cours de la deuxième période ; l'effet des pluvio-lessivats peut être à l'origine de cette augmentation de concentration dans les eaux de ruissellement ; les apports météoriques peuvent ponctuellement être importants ; les valeurs observées en Bretagne peuvent atteindre 15, 35, voire 50 kg/ha/an, en fonction des vents dominants et de l'existence d'atelier hors-sols (CHAUVIN & al., 1996) ;

☞ les orthophosphates, fortement liés aux particules de sol, sont très concentrés dans les eaux, au cours de la troisième période ; le transport de particules de sol, au cours de cette période, est importante ; cet élément aurait alors une origine double : le sol, au cours des événements orageux et la pluie, lorsque les transferts d'éléments sont réduits ; le fluor est un élément dont l'origine est mal expliquée ; il pourrait provenir d'une pollution industrielle ou anthropique (engrais).

La variabilité annuelle (tableau VI.2) des première et quatrième familles ainsi définies est moins élevée (< à 80 %) que celle de la troisième (> à 100 %) et celle de la deuxième (> à 200%).

☞ 4 familles chimiques et 4 origines

origine marine

Le chlore et le sodium analysés dans l'eau de ruissellement proviennent de l'océan. Environ 56 % du magnésium est d'origine marine.

origine complexe

La moitié des sulfates de l'eau de ruissellement proviennent de la pluie et 11 % seulement des sulfates dans l'eau de pluie proviennent de la mer. Ils ont une origine double dans l'eau de ruissellement : la pluie et le sol (origine anthropique?).

origine continentale

Le calcium et le potassium proviennent des produits d'altération, ainsi que la deuxième moitié du magnésium. Le potassium peut provenir lui-même de la fertilisation du sol.

Origine anthropique

Le fluor et les phosphates sont apportés par l'agriculture.

45% de la charge totale est apportée par la pluie.

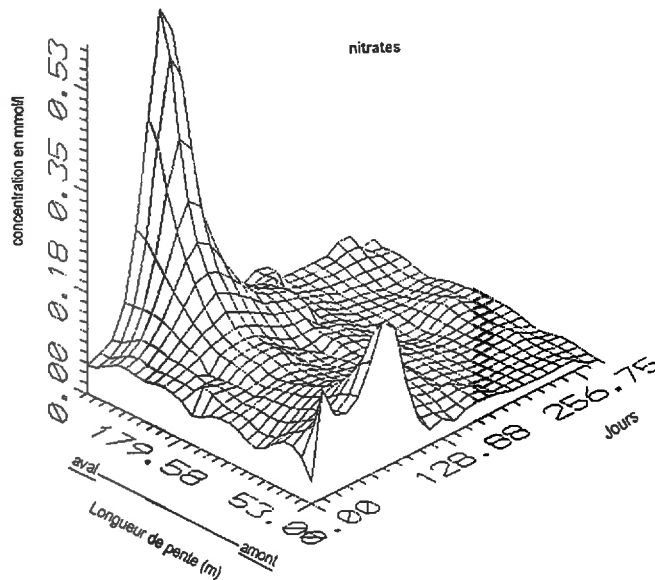
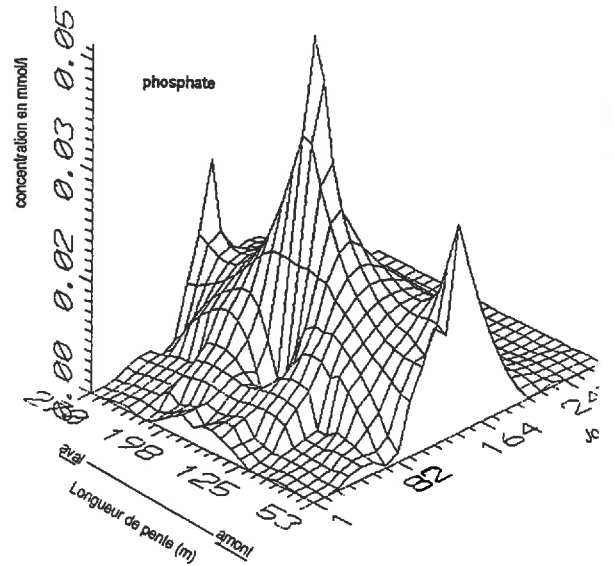
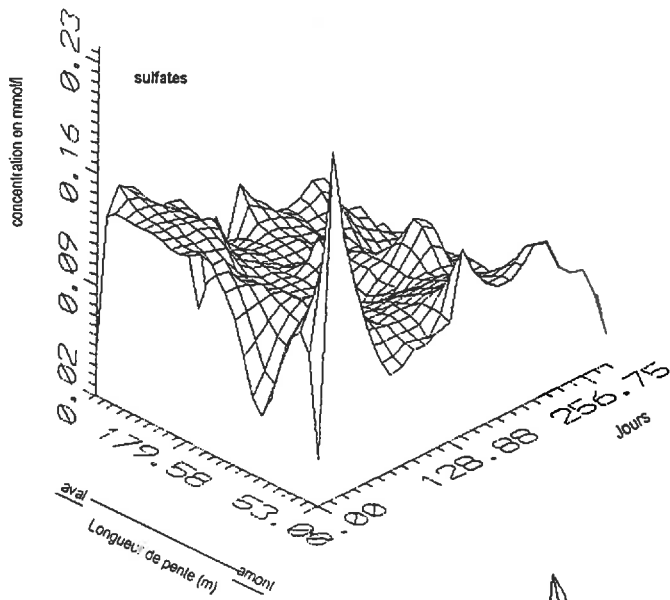
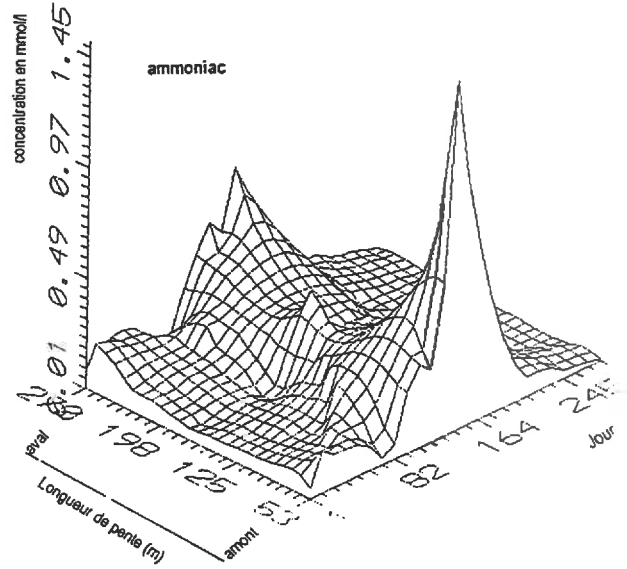
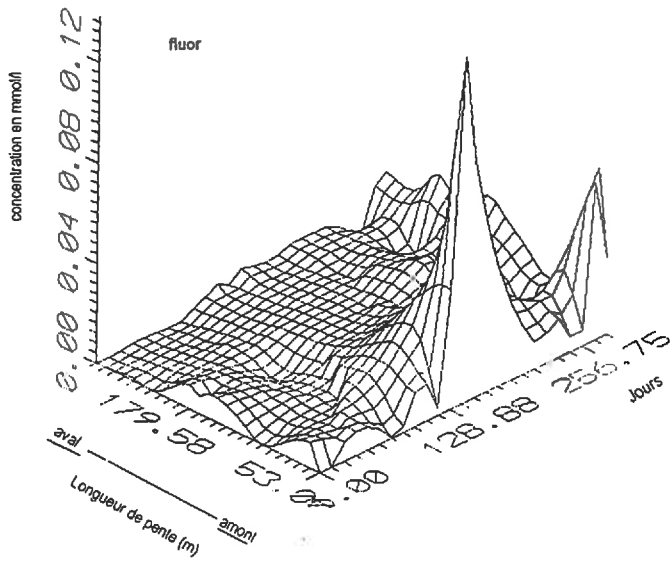
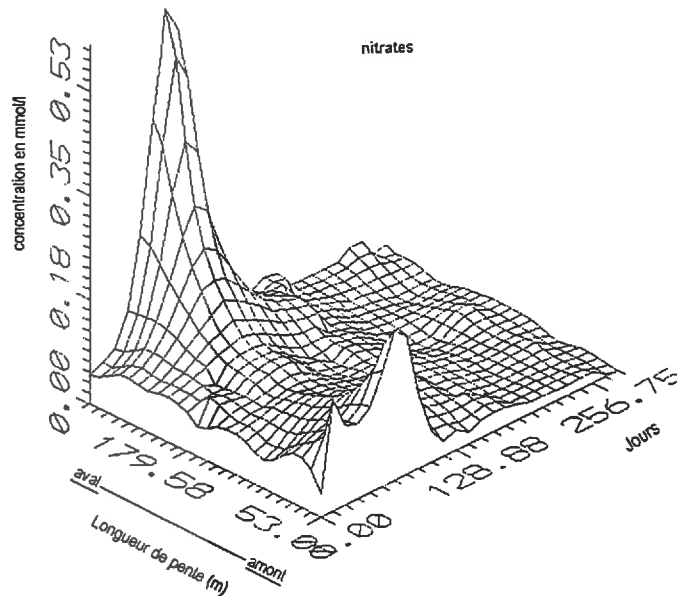
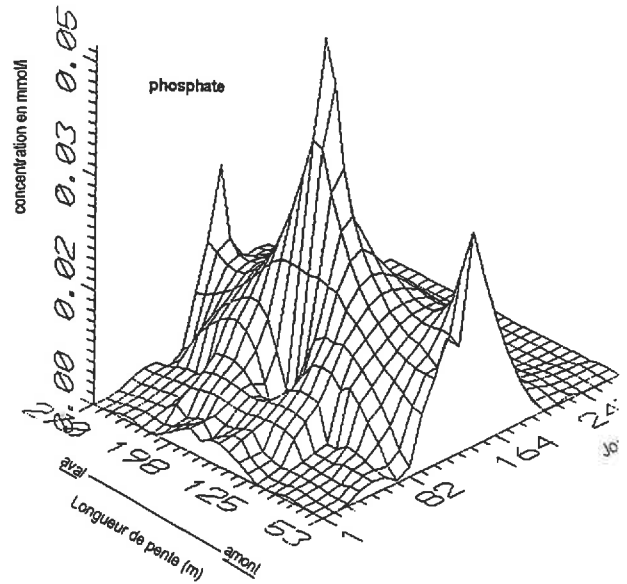
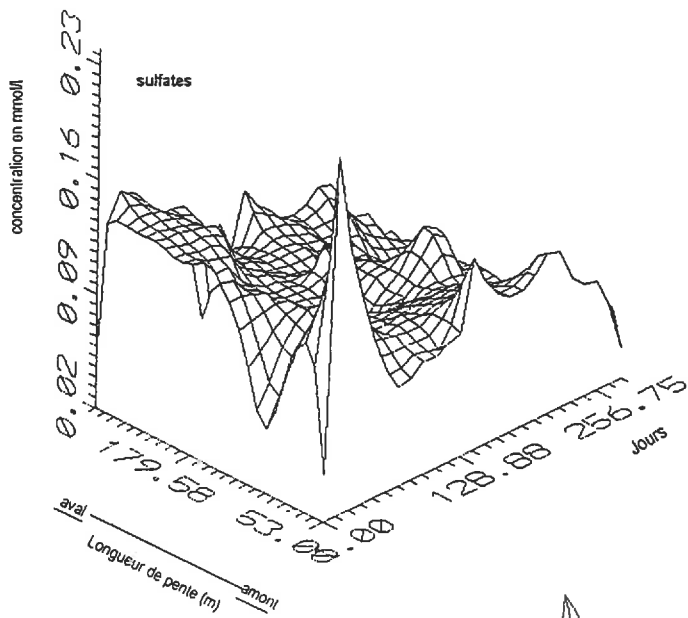
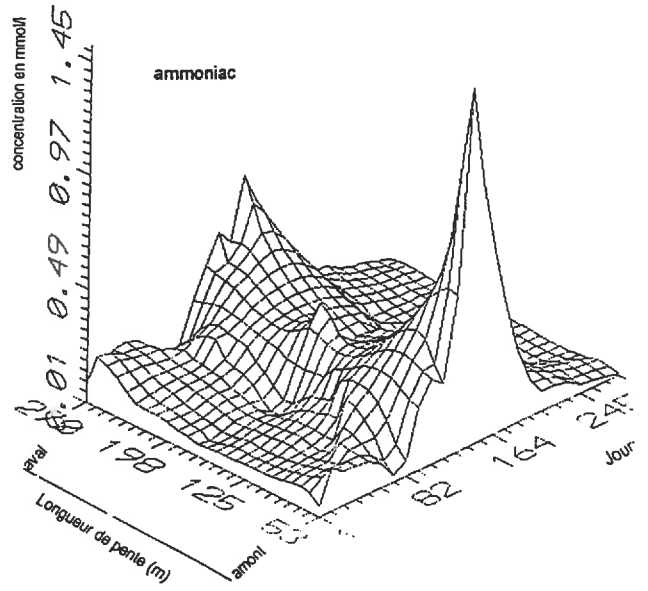
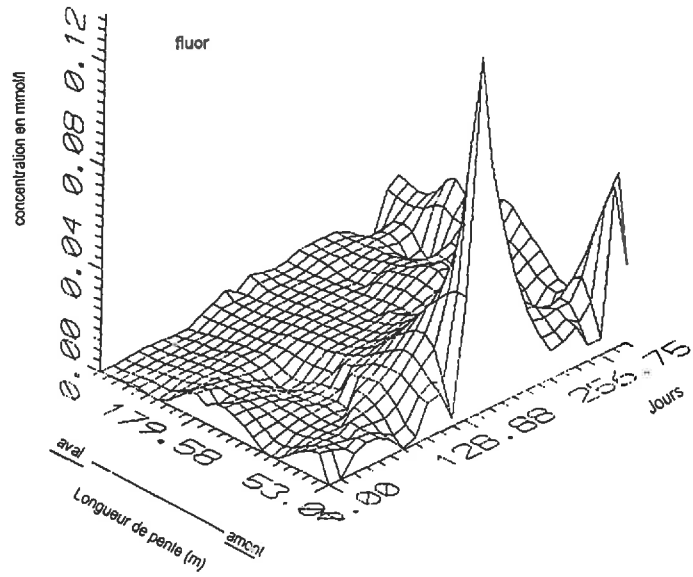


Figure VI.6 : variations temporelle et spatiale des différentes concentrations en anions et cations de l'eau de ruissellement ; Rennes, 1994-1995



3. ETUDE COMPLEMENTAIRE : une «Simulations de pluie» (CAYOT, 1993)

3.1. Protocole expérimental

Les 23 et 25 mars 1993, à Naizin, une simulation de pluie a été réalisée à partir d'eau distillée. La surface du sol était fissurée et quelques résidus de récolte recouvraient ça et là, la surface du sol.

La «simulation» s'est effectuée sur un inter-rang présentant une trace de roue, à 5 mètres en amont du dispositif, avec deux arrosoirs de 10 litres chacun, utilisés en alternance. La surface arrosée était de 0,70 m². Le volume d'eau distillée a été de 90 litres pour chaque arrosage avec une durée de 12 minutes pour le premier et 14 minutes et 40 secondes pour le deuxième. Ces caractéristiques indiquent des intensités moyennes horaires irréelles de 643 mm/h pour le premier et 500 mm/h pour le deuxième. Les seuls intérêts de cette «simulation» sont les données chimiques de l'eau ruisselée recueillie. Les eaux ruisselées ont été recueillies en fin de gouttière du dispositif. Les dix premiers échantillons sont des aliquotes de 100 ml et les aliquotes suivants sont des bouteilles de 1,5 litres.

La conductivité électrique, la composition ionique et le pH des eaux recueillies ont été mesurés.

Les analyses des anions ont été réalisées par chromatographie ionique, au laboratoire INRA-ENSAR de Science du sol (A. Regeard) à Rennes et les analyses des cations, par absorption atomique à flamme au laboratoire INRA d'Arras (annexe).

3.2. Variations au cours «des averses simulées»

- Les eaux recueillies sont faiblement acides. La valeur moyenne est de 6,21. Le pH des eaux recueillies au cours des deux arrosages ne présente pas de variations significatives dans le temps (figure.VI.7).
- La conductivité électrique permet une estimation de la teneur en sels dissous. Au cours du premier arrosage, elle décroît rapidement puis lentement jusqu'à croître à nouveau. Les valeurs obtenues sur les eaux de ruissellement de la deuxième simulation sont plus faibles. Les deux courbes ont la même allure.

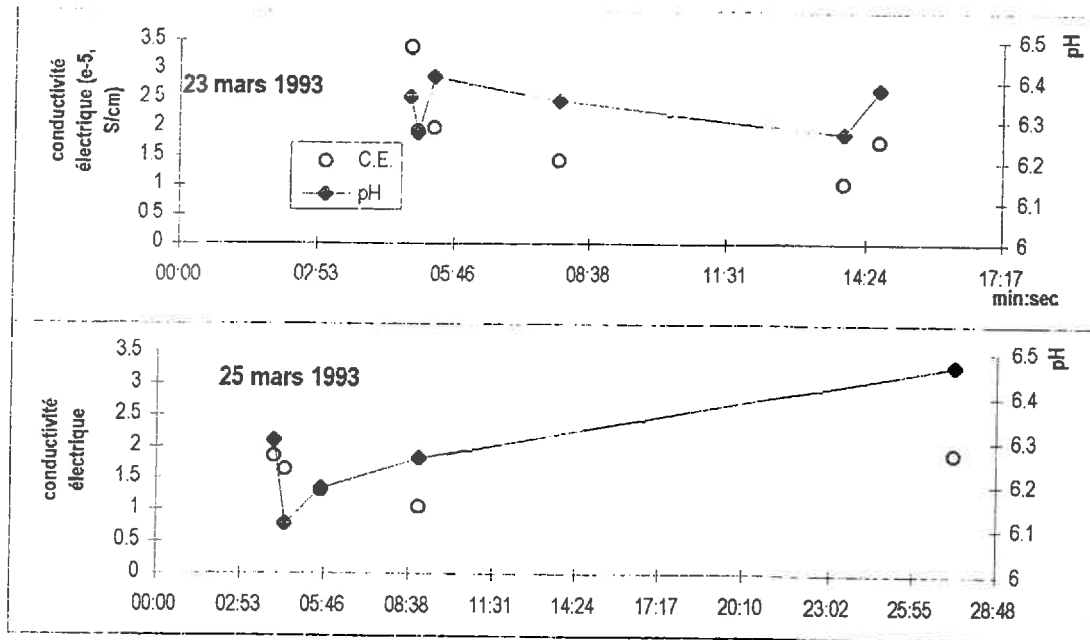


Figure VI.7 : variation temporelle du pH et de la conductivité électrique, au cours des deux simulations ; Naizin, 1993

- Onze échantillons choisis en fonction de ces valeurs ont été analysés. Les ions présents dans ces échantillons sont le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les chlorures, les nitrates, les sulfates et le phosphate dans le premier échantillon. Les premiers échantillons de chacun des arrosages ainsi que les derniers présentent les concentrations les plus fortes en anions et en cations. L'ion ammonium est à l'état de trace à l'exception de deux échantillons de la première simulation (figure. VI.8).

- **Relation avec le volume ruisselé et la vitesse de ruissellement**

Le volume ruisselé utilisé pour les diagrammes de corrélation est un volume d'eau cumulé. Les nuages de points des différents éléments en fonction du volume ruisselé sont de la forme exponentielle décroissante. Pour K, Mg, Na, Cl, NH₄, PO₄ et NO₃ la tendance est bien marquée. Pour Ca et SO₄, la tendance est moins bien représentée.

Seul le potassium est bien corrélé avec la concentration en charges solides.

Au cours du deuxième arrosage, le débit de ruissellement a été mesuré. La vitesse de ruissellement augmente lors des premiers prélèvements puis est relativement stable (figure. VI.9). La conductivité électrique de l'eau décroît en fonction de l'augmentation du débit selon une droite d'équation $Y = -0,1 X + 1,8$. Les 15 points sont faiblement corrélés ($R^2=0,64$).

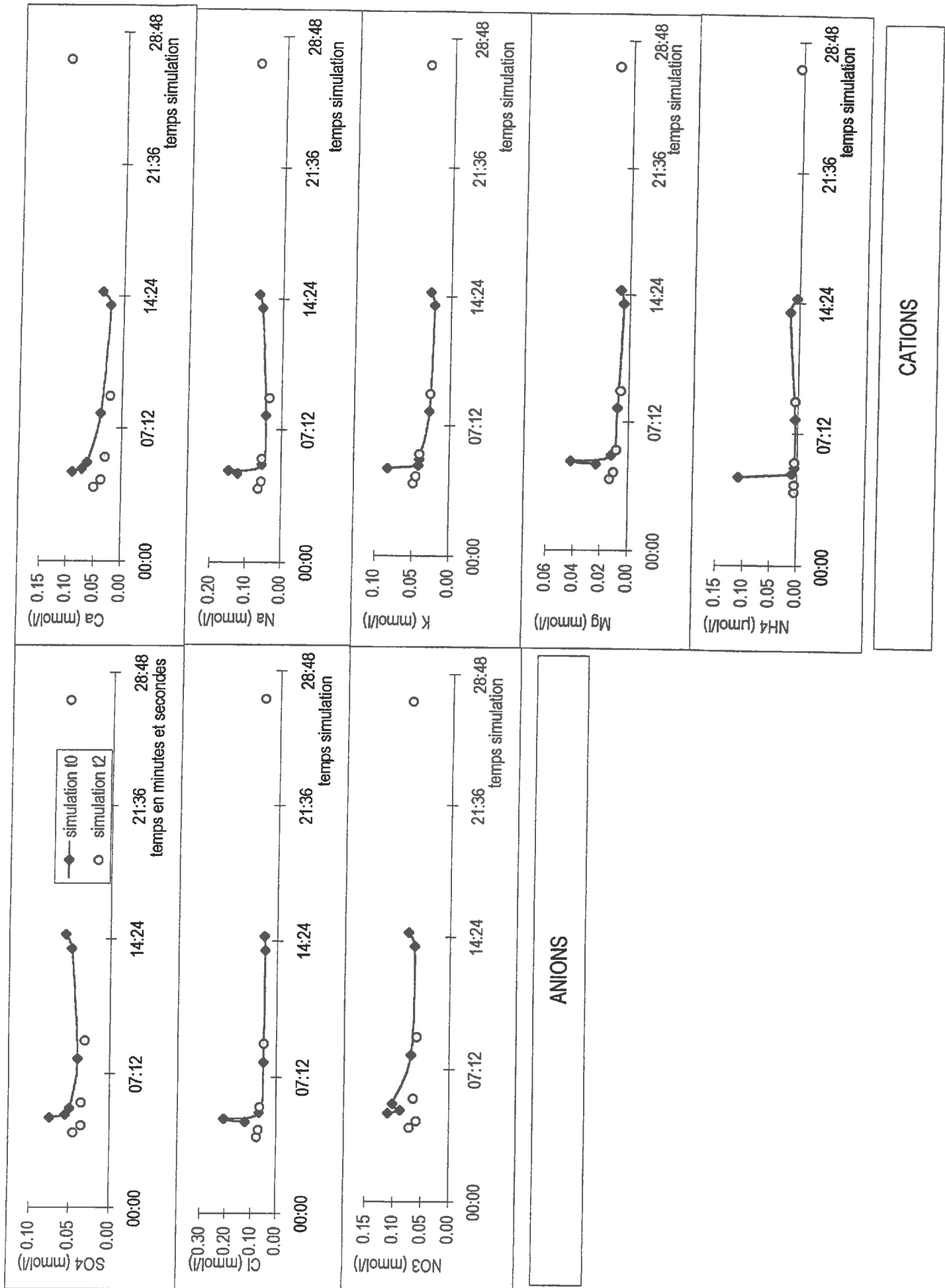


Figure VI.8 : évolution temporelle des concentrations en ions des eaux de ruissellement (temps en minute:seconde et

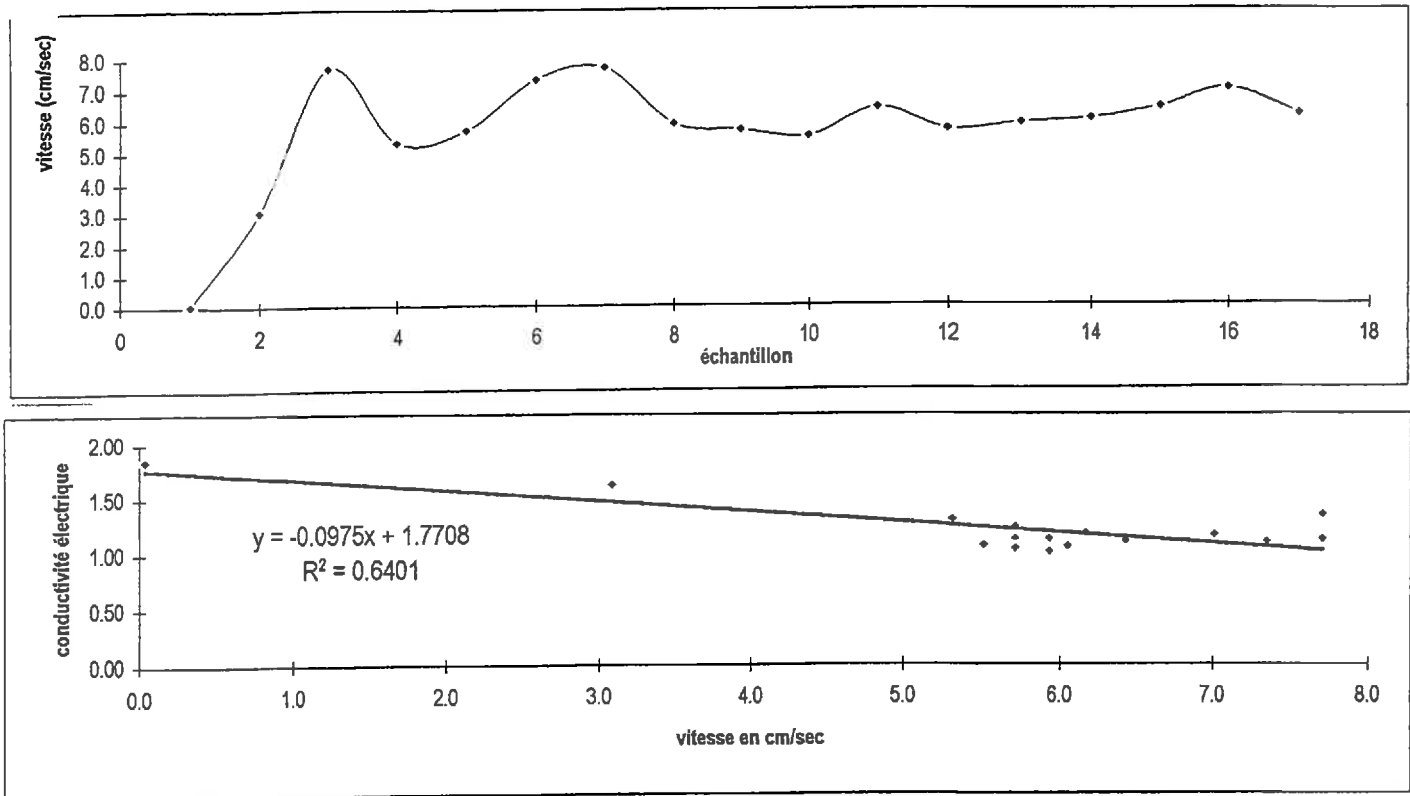


Figure VI.9 : vitesse du ruissellement et conductivité électrique de l'eau de ruissellement, au cours de la deuxième simulation de pluie ; Rennes, 1993

3.3. Discussion

- A l'échelle de l'averse, on peut considérer que, sans les apports ioniques par la pluie, les processus majeurs qui expliquent la chimie de l'eau ruisselée est le lavage de la surface (dissolution des éléments disponibles), fonction de la vitesse du ruissellement (figure. VI.9). Plus le temps de contact entre l'eau et la surface du sol est grand, plus la dissolution de solutés dans l'eau semble importante. Ainsi, une grande part des solutés dissous dans l'eau provient du début de ruissellement, expliquant l'allure décroissante des courbes obtenues au cours des deux simulations de pluie. (figure. VI.9).
- Si l'on raisonne maintenant sur des pluies naturelles, on peut émettre quelques hypothèses à l'échelle de l'épisode pluvieux. Deux cas sont identifiables :

☞ le ruissellement débute quasi-instantanément avec la pluie car :

- la situation est liée à une zone hydromorphe (cas Kerjos) ; le sol présente une quantité notable de sels potentiellement solubles à la surface ; les premières eaux de ruissellement seront fortement enrichies en sels («washout» + sels en surface) ; les eaux de

ruissellement suivantes (rainout + peu de sels provenant du sol) seront très faiblement concentrées ;

- la fréquence et la hauteur des pluies satureront rapidement les premiers centimètres du sol (cas janvier-février 1995, Rennes) ; la surface du sol «lavée» de nombreuses fois, présente peu de sels solubles ; la concentration en sels de l'eau de ruissellement est alors égale au «rainout» essentiellement ; la concentration en ions de l'eau de ruissellement sera très faible ;

☞ une part importante d'eau de pluie s'infiltrer avant le déclenchement du ruissellement ; la concentration en sels de l'eau de ruissellement est alors égale à celle du «rainout» et à la dissolution des sels à la surface du sol, plus ou moins forte selon la vitesse de l'eau à la surface du sol.

4. DISCUSSION

- Variations temporelles, liées aux pluies

Les chlorures et le sodium sont apportés en grande partie par les pluies, avec une origine marine. Les teneurs en chlorures sont plus élevées en période hivernale qu'en période estivale ; malgré le peu de données (P. DURAND), certaines pluies peuvent présenter des concentrations de l'ordre de celles observées dans le ruissellement en hiver. Ainsi, le ruissellement issu des pluies est moins concentré en Cl et Na en été. Du point de vue spatial, le niveau où les volumes ruisselés sont importants, est celui où la concentration de ces 2 ions est plus importante (amont et pente). Néanmoins, l'origine anthropique n'est pas à exclure, d'une part parce que l'histogramme de fréquence présente une distribution bimodale, et d'autre part, les produits de dégradation des produits phytosanitaires peuvent persister longtemps dans la couche labourée.

Pour les autres ions, une part provient du washout de la pluie et du lavage du sol ; la contribution du rainout aura ensuite, un effet dilution.

La source des différents éléments est fortement simplifiée dans cette discussion. Il semble évident qu'en mesurant la concentration d'un échantillon moyen d'eau de ruissellement sur une averse, il est impossible de distinguer la part de la pluie, «washout et rainout» et la part apportées par le sol. Les variations observées à cette échelle sont gommées.

- Variations spatiales, liées au sol

L'apport de ces éléments par le sol est lié aux ions disponibles en surface et aux possibilités de l'eau ruisselée à dissoudre ces sels (vitesse du flux en relation avec la solubilité des éléments et effet de lavage successif).

Avec un versant composé d'une pente et d'un replat aval, homogène du point de vue chimique, la concentration des sels dans l'eau doit être plus importante sur le replat que sur la pente. La vitesse du ruissellement est plus importante sur la pente que sur le replat aval.

Avec une pluie naturelle, les phénomènes sont plus complexes. La chimie de la pluie est différente d'une averse à l'autre et à l'intérieur même de l'averse. Selon l'apport de la pluie, le moment et le niveau où se déclenche le ruissellement, la concentration en sels de l'eau ruisselée ne peut pas nous renseigner sur la distance parcourue par l'eau. De plus si le versant n'est pas homogène chimiquement, le résultat à interpréter devient complexe.

- Réflexion sur les distances parcourues par l'eau ruisselée

Il doit être possible de suivre la distance parcourue par l'eau à partir des éléments apportés par le sol tels que le potassium ou le calcium, par comparaison au chlore considéré comme ayant un caractère conservatif (SCHULIN et al, 1987 ; VALLES, 1987).

Trois hypothèses peuvent être formulées pour interpréter ces analyses en terme de distance :

Hypothèse 1 : la concentration en potassium ou en calcium augmente avec la distance ; l'eau «lave» une surface plus grande de sol.

Hypothèse 2 : La dissolution de ces deux sels dans l'eau ruisselée augmente lorsque la vitesse est plus faible ; le temps de contact est plus important.

Hypothèse 3 : lorsque le sol est saturé (hiver), l'eau ruisselée se mélange en partie, avec l'eau présente dans le sol, soit par exfiltration, soit la lame ruisselée induit, dans certaines situations microtopographique, le déplacement de l'eau des pores superficiels.

Le chlore augmente au cours de l'année culturale et diminue avec la hauteur de la pluie. Les nuages de points des chlorures en fonction des ions calcium et potassium sont assez dispersés, mais la tendance générale montre que, plus les eaux sont concentrées en chlorures, plus elles sont concentrées en potassium et calcium. Cependant les relations de K/Cl et Ca/Cl semblent peu varier en fonction de la longueur de pente (figure.VI.10). La variabilité au niveau du maximum de pente est forte, comparée au point amont et au point aval.

Les concentrations du K et du Ca, ainsi que K/Cl et Ca/Cl sont exprimée pour chaque averse (figure. VI.11). Les premiers ruissellements indiquent un enrichissement plus ou

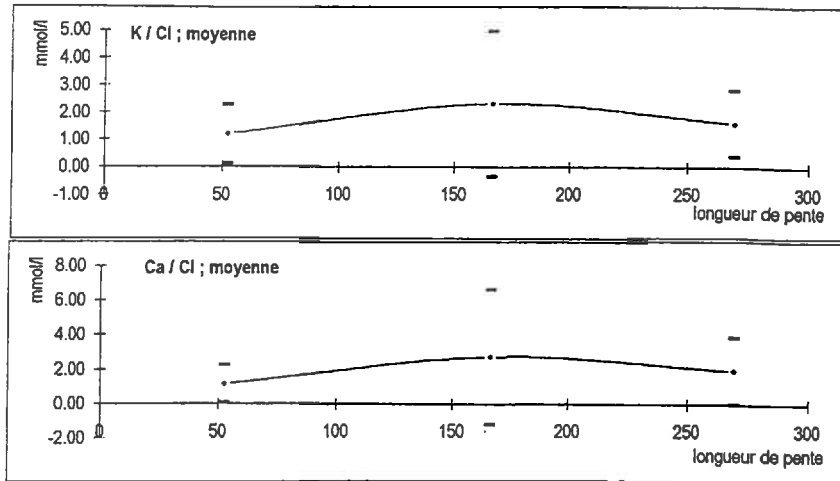


Figure VI.10 : longueur de pente (m) en fonction de K/Cl et Ca/Cl ; Rennes, 1994-1995

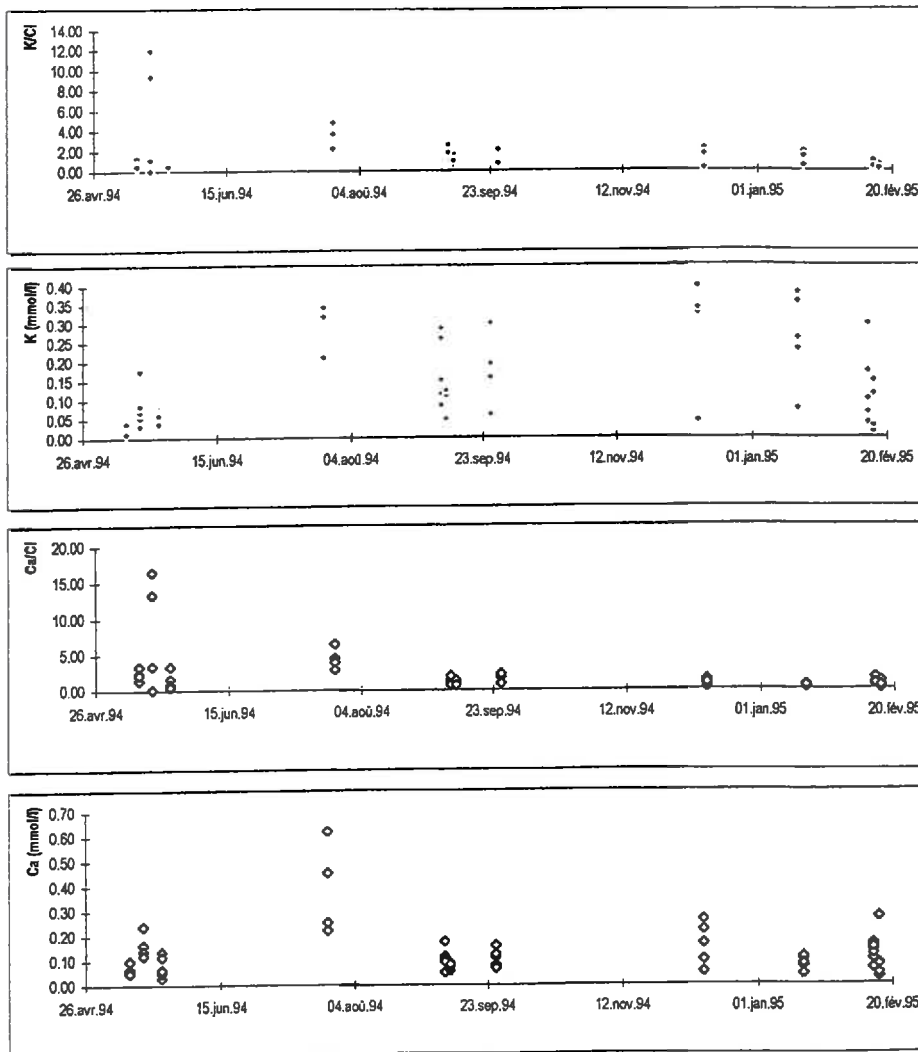


Figure VI.11 : variation temporelle de K, K/Cl, Ca et Ca/Cl ; Rennes, 1994-1995

moins marqués du K et du Ca. Le calcium a une concentration faible et peu contrastée de l'amont à l'aval à partir de septembre.

Le comportement du K par rapport à la longueur de pente s'inverse de septembre à fin janvier. En février, le ruissellement est plus important à l'aval et la concentration en K augmente de l'amont à l'aval.

K/Cl et Ca/Cl ont un comportement similaire. Au cours de la période estivale, les rapports augmentent jusqu'en milieu de pente pour décroître vers l'aval de la parcelle. A partir de septembre les valeurs des rapports ne varient quasiment pas en fonction de la longueur de pente. Il semble exister une relation entre distance parcourue par l'eau et vitesses, et la concentration en potassium et calcium.

En été, les vitesses sont grandes et les distances parcourues par l'eau sont importantes. En hiver, les vitesses sont petites et les distances courtes (connexions de flaques). Ils semblent que la distance parcourue par l'eau influence plus la concentration en éléments provenant du sol que la vitesse du ruissellement.

☞ On retiendra que :

- la chimie et les concentrations globales en ions de l'eau de ruissellement sont proches de celles de l'eau de pluie ; ce résultat confirme les hypothèses sur l'effet «dilution» du ruissellement dans le cours d'eau, au cours des crues ; cependant, l'effet lavage du sol n'est pas négligeable et laisse supposer que l'eau de ruissellement peut «véhiculer» des molécules issues des produits phytosanitaires, d'une manière non négligeable ;
- l'ACP (figure. VI.3 et annexe) met bien en évidence les différentes familles selon deux critères : leur solubilité et leur origine (pluie ou sol ; figure. VI.5) ;
- L'effet «rainout» et «washout» de la pluie apparaît un phénomène essentiel à prendre en compte dans toutes études spatiales et temporelles sur la chimie des eaux de ruissellement ; en effet, les variations dans le temps et dans l'espace sont importantes (figure. VI.6) ;
- la relation, soupçonnée, entre distance et concentration.

Ces premiers résultats aboutissent vers des perspectives d'étude de deux ordres :

- des analyses chimiques d'eaux de ruissellement et de pluie à pas de temps régulier de l'ordre d'une dizaine de minutes, afin de préciser les relations entre pluie et qualité de l'eau.

- des simulations à partir d'eau distillée sur différentes distances, pour établir les relations entre concentrations des éléments issus du sol et la distance parcourue. Cette simulation pourrait être couplée avec des mesures de vitesse de l'eau.

CONCLUSION GENERALE

I. LE CONTEXTE D'ÉTUDE

Dans le contexte du Massif Armoricaïn, les transferts de surface, à l'échelle du versant, ont fait l'objet de peu de travaux de recherche. En effet, c'est un contexte modéré, d'une part parce que les pluies sont peu agressives, les bassins versants sont relativement petits, et les longueurs de pente sont courtes, d'autre part parce que la cohésion du sol est relativement forte, en relation avec leur forte humidité, enfin, parce que les traces d'érosion sont souvent peu importantes. Néanmoins, les taux de matière organique sont parfois faibles ; le développement de cultures sensibles, tel que le maïs, implique une sensibilité accrue au ruissellement.

C'est ainsi qu'en hydrologie, on considère que le ruissellement est un ruissellement de zones saturées ou de surfaces imperméabilisées, et que le ruissellement de versant a un rôle hydrologique limité, voire nul :

- d'un point de vue quantitatif ; les volumes sont faibles ; les eaux ruisselées ont toutes les chances de s'infiltrer, au cours de leur cheminement ;
- d'un point de vue qualitatif ; l'eau de ruissellement est assimilée à de l'eau de pluie.

L'intérêt porté récemment au ruissellement est lié au pollution par les produits phytosanitaires dont l'un des vecteurs essentiels semble être le ruissellement.

II. RESULTATS SUR LA MÉTHODOLOGIE

Le «réseau de dispositifs» permet de caractériser un ruissellement effectif, intégrateur des différents effets d'échelle, par opposition au ruissellement local, mesuré sur des placettes normalisées. Les problèmes de transfert d'échelle sont ainsi abordés, du local au versant. Cette méthode intègre ainsi, les hétérogénéités spatiales, non prises en compte dans les extrapolations à partir de surfaces homogènes strictement délimitées.

Les mesures sont :

- * qualitatives, si la surface amont contributive de chaque dispositif n'est pas délimitée, donc imprécise ; les données sont alors entachées d'une grande variabilité et la comparaison d'un dispositif à l'autre n'est pas aisée et indique par là, l'importance relative de la surface amont ; l'information est alors typologique ;

* quantitatifs, si les axes d'écoulement sont clairement délimités afin d'approcher la surface contributive amont à chaque dispositif ; cependant, le nombre de débordements du totalisateur peut être fréquent ; les données sont alors semi-quantitatives, puisque la dimension du totalisateur ne permet pas de recueillir la totalité des eaux ruisselées ; aggrandir la capacité du totalisateur n'est pas une solution puisque (1) plus celui-ci est grand, plus les erreurs sur les concentrations en charge solide, par la technique d'aliquote, est importante ; (2) plus le dispositif est lourd, moins il est «spatialisable» en grand nombre sur le versant. Ainsi, la capacité de 60 litres du totalisateur peut être diminuée à une capacité de 30 litres puisque les volumes compris entre 30 et 60 litres représentent seulement 4 % des volumes ruisselés.

Pour caractériser le ruissellement à l'échelle du versant, il est possible :

☞ soit d'utiliser une méthode lourde, qui permet de recueillir la totalité des volumes d'eau ruisselée et des particules solides transportées ; on effectue des bilans à une échelle fixe ;

☞ soit on accepte un seuil de débordement, avec des données semi-quantitatives, qui permettent une vision spatialisée des processus de ruissellement à une échelle «modulable».

☞ Les acquisitions à pas de temps court, de l'ordre de quelques minutes, sont indispensables pour l'analyse des mécanismes de genèse du ruissellement, d'autant plus que les conductivités hydrauliques apparaissent souvent du même ordre de grandeur que les intensités des averses. Cette donnée nécessite d'être améliorée en ce qui concerne l'enregistrement des volumes ruisselés, essentiellement lorsque les eaux sont fortement concentrées.

III. RUISSELLEMENT, TRANSPORT DE PARTICULES ET CHIMIE DES EAUX

Seules les averses caractérisées par un cumul pluviométrique supérieur à 4 mm ou par une intensité supérieure à 2,5 mm/h en moyenne horaire ont été analysées car elles ont été considérées comme les seules permettant de générer un ruissellement. Cela représente 26 % de la précipitation annuelle.

✎ A l'échelle de l'averse et du m^2 , le ruissellement est de type hortonien au cours des averses estivales de forte intensité (type orage) et de type ruissellement par saturation au cours des périodes hivernales (averse de faible intensité et forte valeur d'humidité du sol en surface) pour une même situation topographique. En effet, en été, le ruissellement existe seulement pour des intensités au pas de temps de la minute supérieures à la valeur de conductivité hydraulique du sol proche de la saturation, alors qu'en hiver l'intensité peut être inférieure pour déclencher du ruissellement. Le déclenchement du ruissellement est donc un phénomène à seuil. Ce seuil est fonction de la pluie (intensité et cumul) et du sol (caractéristiques physiques et humidité). On utilise classiquement les notions d'intensité limite IL (critical rainfall intensity) et de pluie d'imbibition PI (preponding rainfall). Ici, la notion d'IL varie entre 2 et 4 mm/h et PI varie entre 5 et 10 mm en fonction des périodes considérées (été et hiver).

✎ A l'échelle de la saison et du versant, le ruissellement et les transports de particules ont été analysés :

✎ spatialement,

* en fonction de la position dans le versant ; la forme de la pente apparaît un critère important des transferts de surface, et la concavité comme le point clé ; le pourcentage et la longueur de la pente interviennent secondairement, en relation avec la position de la concavité par rapport au ruisseau ;

* en fonction de la nature physico-chimique du sol, en liaison avec la battance et de son état hydrique.

✎ temporellement ; trois périodes ont été définies en fonction des types de pluie, de l'état hydrique du sol et des paramètres physiques de la couche de surface ; deux situations semblent particulièrement critiques :

* la période estivale, quelle que soit la culture ; pour la plupart des précipitations (intensité moyenne horaire supérieure à 4 mm/h), il y a infiltration et dépôt dans la concavité du versant ; les transports dans le versant sont conséquents, ils représentent 94 % des transports au cours de cette période ; (1) si les intensités des averses sont fortes (intensité moyenne horaire supérieure à 9 mm/h) ou (2) si les ralentisseurs «dynamiques», de type topographiques (concavité et replat aval) ou de type pédologiques

n'existent pas, les transferts de surface alimentent directement le cours d'eau car la détention superficielle est faible ; au cours de ces averses, les concentrations maximums de charges solides atteintes sont de 60 g/l ; le sol est transporté sans tri granulométrique ; les stockages intermédiaires de bas de versant, créés par des averses moyennes, peuvent être repris par les plus fortes averses ;

* la période hivernale, lorsque le sol est nu et le tassement important ; les «sorties» du versant vers le cours d'eau peuvent être fréquentes, en relation avec la saturation des couches labourées ou de l'ensemble du sol ; les processus de ruissellement sont en partie liés à la saturation des couches superficielles puisque le ruissellement apparaît pour des valeurs d'humidité volumique du sol supérieures à 33% ; les particules transportées par ruissellement, dont la concentration dans l'eau ne dépasse pas 6 g/l, sont des particules fines ; elles correspondent soit à du splash, soit au lavage de la surface, dont d'abondants turricules.

☞ Les transferts de surface sont de courtes durées comparées aux événements pluvieux ; ils sont liés à des effets de seuil ; ces seuils varient fortement suivant les cultures et les sites.

☞ Le ruissellement et l'érosion sont des processus très variables dans l'espace et dans le temps ; le chemin de l'eau correspond à des flaques connectées entre elles ; dans le cas du maïs où le tracé de l'écoulement correspond à une ligne, le microrelief joue alors un rôle évident sur la propagation du ruissellement le long du versant. Les fortes variabilités des volumes ruisselés traduisent les facteurs locaux (microrelief, conductivités hydrauliques) qui déterminent les chemins préférentiels, l'importance des volumes et ainsi des distances de propagation. Les faibles variabilités traduisent l'importance des facteurs liés aux versants tels que les états de surface, la pente locale ou la saturation du sol. Ainsi, au printemps la variabilité des volumes ruisselés pour un même niveau de pente est faible et décroît de l'amont à l'aval. Les états de surface apparaissent déterminants. En été, elle est moyenne et croissante d'amont en aval en relation avec la pente locale et l'importance des chemins préférentiels. En hiver, elle est forte et décroissante d'amont en aval. Elle est liée à la saturation du sol en eau.

☞ Les concentrations de solutés dans l'eau de ruissellement évoluent spatialement si la composante chimique est liée aux sols (exemple des phosphates) et temporellement si la composante chimique est liée à la pluie (exemple des chlorures).

 A l'échelle de l'année et du bassin versant, les transferts de

surface existent mais restent faibles. 92 % des concentrations en charges solides de l'eau sont inférieures à 10 g/l. Pour les éléments particuliers, le versant comprend des zones sources et des zones puits. Elles ont été localisées par des bilans de transport et des bilans de dépôt.

Sur l'année, 1,5 t/ha de particules de sol sont déplacés par le ruissellement. 73% des 1,5 t/ha de sol sont véhiculés en été contre 12% en hiver. Sur ces 1,5 t/ha, 0,3 t/ha de sol arrivent dans le cours d'eau pour l'ensemble de l'année. 76% de ces transports vers le cours d'eau ont lieu au cours de l'hiver. Les apports estivaux dans le ruisseau sont ponctuels et moins fréquents. Cependant en été, les redistributions à l'intérieur du versant sont conséquentes.

Des dépôts importants existent dans les zones de ralentissements telles que les concavités, les replats en aval des parcelles ou encore les haies. Les zones de plateau et pente sont des zones de départ pour les particules de sol. A la fin de l'année culturale, la surface du sol sur l'ensemble du versant présente un appauvrissement en éléments fins (particules de sol de la taille des argiles) et de la matière organique.

IV. LES ENJEUX

Ils sont de deux ordres :

 un enjeu environnemental, vis à vis de la qualité des eaux du cours d'eau ;

* en effet, bien que le volume d'eau induit par le ruissellement hortonien soit limité, les phénomènes «de chasse de sédiments», au cours des orages ont certainement un impact sur la qualité des eaux, au niveau du ruisseau ;

* la chimie des eaux ruisselées apparaît proche de celle de la pluie, vis à vis des solutés ; néanmoins, le ruissellement est un vecteur privilégié du transport de particules de sol, en particulier des colloïdes minéraux et des matières organiques sur lesquels sont fixés certains polluants ; le problème des cinétiques d'échange entre l'eau et le sol et le problème des distances parcourues par l'eau et par les particules sont prépondérants pour évaluer l'impact du ruissellement sur la pollution du cours d'eau ;

☞ un enjeu agronomique et environnemental, vis à vis de la fertilité et de la qualité des sols ; le versant, en particulier les couches de surface, ne peuvent être considérées comme un système homogène et invariant au cours du temps. De nombreux travaux ont déjà montré ces variabilités temporelles. Les résultats sur les constituants du sol et les mesures physiques indiquent une forte hétérogénéité du versant qui s'individualise en deux parties : le domaine amont, du domaine aval, délimités par la concavité. Ces variations spatiales ont des implications directes, par la reprise des transports liés aux averses précédentes, et indirectes, par les diminutions de l'infiltrabilité, sur les transferts de surface. La redistribution des constituants au sein du versant, peut, à long terme, jouer sur des processus en chaînes et accentuer l'hétérogénéité du versant, en particulier, vis à vis de la matière organique, des colloïdes minéraux (inférieur à 2 μm) et des éléments traces.

V. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

☞ à court terme

* La physique des transferts devrait être approfondie, notamment, celui du déclenchement du ruissellement. Le rôle de la croûte, recourant aux organisations pelliculaires de surface, le rôle de la prise en masse, concernant l'ensemble de la couche labourée, ne sont que des hypothèses pour expliquer les valeurs de conductivités hydrauliques. Des démarches expérimentales complémentaires doivent être envisagées faisant appel à la micromorphologie, à l'analyse de la porosité, aux mesures physiques, à la tensiométrie et au relation entre le volume ruisselé et la distance parcourue par l'eau.

* La réflexion sur les processus géochimiques doit être poursuivie : (1) en approfondissant le problème entre distance parcourue par l'eau et son enrichissement en ions, (2) en analysant les échanges entre le sol, l'eau et les particules et (3) en déterminant l'impact sur la chimie des eaux ruisselées, des produits de dégradation issus des pesticides, qui peuvent persister en partie, d'une année sur l'autre, à la surface du sol.

☞ à long terme

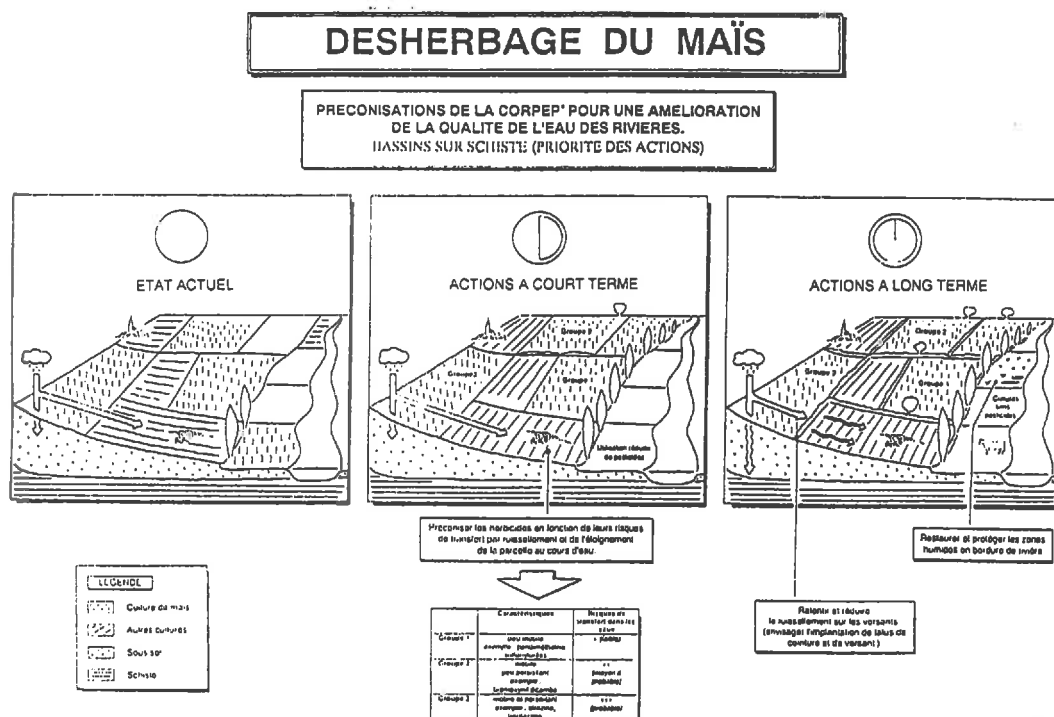
Il serait nécessaire d'établir un modèle du ruissellement et d'érosion, proche des processus présentés dans ce travail et au delà, de le tester à partir d'un nombre de données plus conséquent.

Cependant, à moyen terme, il est possible d'établir un modèle probabiliste par rapport au microrelief, puisque dans le cas simple du maïs, l'écoulement est égale à des lignes «de flaques connectées entre elles». Il doit par ailleurs, préciser les caractéristiques des pluies pour déclencher le ruissellement en fonction de l'état initial, pour permettre :

- * de tester le rôle des événements climatiques selon leur date de retour, sur le bilan de transferts de surface ;
- * de préciser le rôle de différentes échelles de rugosité, du microrelief jusqu'à la topographie du versant ;
- * d'établir le rôle de l'assolement dans le versant.

VI. IMPLICATION POUR LE DÉVELOPPEMENT

A partir de ces résultats sur les transferts de surface et de résultats de mobilité et persistance des molécules de produits phytosanitaires , GILLET (1995) a proposé un schéma, à l'échelle du bassin versant, des actions concernant entre autre la maîtrise des processus de ruissellement et d'érosion (fig. C). Il met en avant l'intérêt de «ralentisseurs dynamiques» à l'échelle de la parcelle ou du versant, tel que la concavité, l'assolement ou les haies, modifiant la rugosité du terrain à différentes échelles d'espace.



LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Le ruissellement et l'érosion hydrique dans le contexte armoricain

Figure I.1 : Processus de ruissellement de surface, d'après KÖLLA (1987)

Figure I.2 : Evolution de la teneur en eau dans le sol - (a) : mécanisme d'HORTON ; (b) mécanisme de DUNNE - et illustration de l'apparition du ruissellement de surface - (c) : mécanisme d'HORTON (1933) ; (d) mécanisme de DUNNE (1970), d'après ABOUJAOUDE (1991)

Figure I.3 : répartition spatiale des précipitations en Bretagne, d'après HOUBEN (1995)

Figure I.4 : répartition spatiale des teneurs en matière organique entre 1990-1994, en Bretagne, d'après WALTER & al. (1995)

Figure I.5 : évolution des teneurs en matière organique en Bretagne entre 1980-1984 et 1990-1994, d'après WALTER et al. (1995)

Figure I.6 : répartition des pentes supérieures à 5% en Bretagne, carte réalisée par BAQUE et SQUIVIDANT (Equipe spatialisation numérique, ENSAR) ; source MNT - IGN, au pas de 250 mètres. Les coordonnées Lambert sont indiqués sur le cadre

Figure I.7 : situation géographique en 1988 des cultures de maïs grain, d'après CANEVET (1992)

Figure I.8 : situation géographique en 1988 des zones légumières, d'après CANEVET (1992)

Chapitre II : Matériel et méthode

Figure II.1 : méthodes volumétriques

Figure II.2 : mini-pièges et pièges à sédiment (PLANCHON, 1991)

Figure II.3 : modification du dispositif de PLANCHON, proposé par ASSELINE (1991)

Figure II.4 : schéma du dispositif de recueil des eaux de ruissellement et de charges solides

Figure II.5 : schéma du dispositif d'enregistrement de flux de surface et enregistrement de pluie

Figure II.6 : schéma de l'utilisation des dispositifs de recueil des eaux de ruissellement

Figure II.7 : schéma de la définition de la zone contributive amont du dispositif

Figure II.8 : situation géographique des parcelles de Rennes et de Naizin

Figure II.9 : topographie de la parcelle de Rennes ; position des transects pédologiques et de la fosse pédologique ; sens de la culture

Figure II.10 : deux toposéquences pédologiques, Rennes

Figure II.11 : schéma de la fosse du plateau, parcelle de Rennes

Figure II.12 : caractéristiques physico-chimiques de la parcelle de Rennes

Figure II.13 : calendrier cultural, Rennes

Figure II.14 : conduite des cultures, Rennes

Figure II.15 : répartition par mois des excédents et déficits pluviométriques de 1994 - 1995 en fonction de la moyenne calculée sur 29 ans (1951 - 1980) ; Rennes

Figure II.16 : chronologie des intensités moyennes horaires, des hauteurs pluviométriques et de la durée des averses, 1994 - 1995 ; Rennes

Figure II.17 : valeurs d'intensités de pluie (mm/h) calculées selon 5 pas de temps ; 31 juillet 1994

Figure II.18 : valeurs d'intensités de pluie (mm/h) calculées selon 5 pas de temps ; 22 octobre 1994

Figure II.19 : calendrier cultural et expérimental ; Naizin

Figure II.20 : deux toposéquences pédologiques ; Naizin

Figure II.21 : caractéristiques physico-chimiques de la parcelle de Tocplouz

Figure II.22 : parcelle de Kerjos

Figure II.23 : caractéristiques physico-chimiques de la parcelle de Kerjos

Figure II.24 : répartition par mois des excédents et des déficits pluviométriques d'avril à septembre 1994 en fonction de la moyenne calculée sur 21 ans (1971 - 1992) ; Naizin

Figure II.25 : distribution par mois du nombre de pluie selon leurs hauteurs pluviométriques (mm) ; Naizin

Figure II.26 : distribution par mois du nombre de pluie selon leurs intensités moyennes horaires pluviométriques (mm/h) ; Naizin

Figure II.27 : chronologie des intensités moyennes horaires et des cumuls pluviométriques d'avril à septembre 1994 ; Naizin et Rennes

Chapitre III : Mesures physiques et suivis des états de surface

- Figure III.1 : cumul pluviométrique et humidités volumiques du sol à 5 et 11 cm de profondeur en fonction du temps ; Rennes
- Figure III.2 : moyenne d'humidités volumiques à 5 cm et 11 cm, pour l'été et l'hiver, en fonction du niveau de pente.
- Figure III.3 : valeur d'humidité volumique du sol à 15 cm et 30 cm de profondeur, sur rang et inter-rang de maïs, en fonction du niveau de pente, pour trois dates.
- Figure III.4 : moyenne d'humidités volumiques à 5 cm et 11 cm, pour l'année culturale, en fonction du niveau de pente.
- Figure III.5 : chronique des états de surface (F0, F1 et F2, d'après Boiffin, 1984) et chronique des cumuls pluviométriques
- Figure III.6 : résultats des tests de stabilité pour un échantillon moyen du sol de la parcelle de Rennes
- Figure III.7 : résultats des tests de stabilité pour trois échantillons de sol à trois niveaux de pente ; Tocplouz
- Figure III.8 : résultats des tests de stabilité pour trois échantillons de sol à trois niveaux de pente ; Kerjos
- Figure III.9 : résultats des tests de stabilité pour quatre échantillons de sol à quatre niveaux de pente ; Rennes
- Figure III.10 : valeurs de la conductivité hydraulique à saturation en mm/h sur des inter-rangs avec passage de roue et sans passage de roue, pour trois périodes de l'année culturale
- Figure III.11 : valeurs de la conductivité hydraulique à saturation en mm/h, en amont et en aval de la parcelle, avec et sans croûte de battance, sur un inter-rang sans passage de roue
- Figure III.12 : valeurs de densités apparentes en fonction de l'inter-rang et du temps.

Chapitre IV : Caractérisation du ruissellement

- Figure IV.1 : chronique des volumes ruisselés, Rennes, maïs, 1994-1995
- Figure IV.2 : chronique des coefficients de ruissellement par niveau de pente ; Rennes, 1994-1995
- Figure IV.3 : moyenne des volumes ruisselés en fonction de l'écart type, calculée sur les trois dispositifs d'un même niveau de pente
- Figure IV.4 : histogramme de fréquence des volumes ruisselés ; Rennes, 1994-1995
- Figure IV.5 a et b : modèle statistique simple de Q^* en fonction de T_d
- Figure IV.6 a et b : modèle statistique simple du % d'humidité volumique en fonction de Q ou de Q^*
- Figure IV.7 a et b : application du modèle statistique au point aval et au niveau de pente maximum ; Rennes, 1994-1995
- Figure IV.8 : intensité de pluie et déclenchement du ruissellement ; deux exemples, Rennes
- Figure IV.9 : représentation de l'intensité en mm/h, calculé à partir de 5 pas de temps, en fonction des heures pour l'averse du 31 juillet 1994
- Figure IV.10 : représentation de l'intensité en mm/h, calculé à partir de 5 pas de temps, en fonction des heures pour l'averse du 22 octobre 1994
- Figure IV.11 : pluie et ruissellement au pas de temps de 15 minutes ; Rennes, le 11 février 1994
- Figure IV.12 : chronique des volumes ruisselés ; Naizin et Rennes, maïs, 1994
- Figure IV.13 : histogramme de classe de volume ruisselé ; Naizin et Rennes, 1994
- Figure IV.14 : évolution des états de surface, des cumuls pluviométriques et des intensités moyennes horaires ; Rennes, 1993
- Figure IV.15 : chroniques des volumes ruisselés ; Rennes, pois protéagineux, 1993
- Figure IV.16 : chronique des volumes ruisselés et des caractéristiques des pluies ; Rennes, phacélie et sol nu, 1993-1994
- Figure IV.17 : schéma de l'apparition du ruissellement le long d'un versant sain au cours de la première période
- Figure IV.18 : schéma de l'apparition du ruissellement le long d'un versant sain au cours de la deuxième période
- Figure IV.19 : schéma de l'apparition du ruissellement le long d'un versant sain au cours de la troisième période
- Figure IV.20 : schéma de l'apparition du ruissellement le long d'un versant sain et hydromorphe à l'aval au cours de la deuxième période ; système 1
- Figure IV.21 : schéma de l'apparition du ruissellement le long d'un versant sain et hydromorphe à l'aval au cours de la deuxième période ; système 2
- Figure IV.22 : schéma général du ruissellement sur le versant

Chapitre V : Transports solides

- Figure V.1 : estimation de l'erreur par la technique d'aliquote et correction proposée
- Figure V.2 : concentration mesurée en fonction de la concentration théorique pour différents volumes ruisselés

Figure V.3 : étapes de modifications et corrections des valeurs brutes
 Figure V.4 : représentation graphique d'une averse simulée constante montrant les variations de turbidité des eaux de ruissellement (ROOSE, 1980)
 Figure V.5 : comparaison des concentrations en charges solides, calculés par le volume estimé et par un volume majorant pour les trois périodes ; Rennes, 1994-1995
 Figure V.6 : schéma de comparaison des données exprimées en poids ou en concentration
 Figure V.7 : chronique des concentrations en charge solide (g/l)
 Figure V.8 : chronique des poids de charge solide (g)
 Figure V.9 : moyennes des valeurs maximum et minimum en fonction des longueurs de pente
 Figure V.10 : Moyenne des concentrations et poids des charges solides en fonction du temps
 Figure V.11 : granulométrie des charges solides en fonction du temps ; Rennes
 Figure V.12 : granulométrie des charges solides en fonction de la longueur de pente ; Rennes
 Figure V.13 : Diffractogramme de charge solide, du 17 mai et 28 juillet 1994
 Figure V.14 : variabilités spatiale et temporelle des éléments majeurs et des traces
 Figure V.15 : chronique des concentrations en charges solides (g/l) sur Rennes et Naizin, 1994
 Figure V.16 : chronique des concentrations en fonction de la topographie, pois, Rennes, 1993
 Figure V.17 : chronique des concentrations en fonction de la topographie et en fonction du temps, phacélie et sol nu, Rennes, 1993 - 1994
 Figure V.18 : granulométrie et % de matière organique en fonction de la toposéquence, Rennes, 1994-1995
 Figure V.19 : résultats des transferts et des dépôts obtenus sur les charges solides, colloïdes minéraux et matière organique en fonction de la topographie, Rennes, 1994-1995
 Figure V.20 : bilan de dépôt ; Naizin, 1993
 Figure V.21 : application du modèle de TRUMAN et BRADFORD (1993)
 Figure V.22 : modèle simple statistique en fonction de l'intensité moyenne horaire et le volume ruisselé (l)
 Figure V.23 : modèle simple d'estimation du poids de particules transporté par l'eau de ruissellement en fonction de la pente en degrés
 Figure V.24 : vitesses critiques de l'eau pour l'érosion, le transport et la déposition ; HJULSTROM (1935)
 Figure V.25 : localisation le long du versant de l'importance des transports particuliers au cours de la première période
 Figure V.26 : localisation le long du versant de l'importance des transports particuliers au cours de la deuxième période
 Figure V.27 : localisation le long du versant de l'importance des transports particuliers au cours de la troisième période

Chapitre VI : Réflexions sur la chimie des eaux

Figure VI.1 : composition chimique des eaux de ruissellement
 Figure VI.2 : histogramme de fréquence de la concentration en chlorure (a), en ammoniac (b) et en sulfate (c); Rennes, 1994-1995
 Figure VI.3 : ACP à 9 variables ; Rennes, 1994-1995
 Figure VI.4 : rapport Ca, Mg et Cl dans les eaux de ruissellement, de pluie et de mer; Rennes, 1994-1995
 Figure VI.5 : schéma des quatre familles chimiques des eaux de ruissellement en fonction de leur origine
 Figure VI.6 : variations temporelle et spatiale des différents anions et cations ; Rennes, 1994-1995
 Figure VI.7 : variation du pH et de la conductivités électriques au cours de deux simulations ; Naizin, 1993.
 Figure VI.8 : évolution temporelle des concentrations en ions des eaux, au cours de deux simulations de pluie ; Naizin, 1993
 Figure VI.9 : vitesse du ruissellement au cours de la deuxième simulation de pluie ; Naizin, 1993
 Figure VI.10 : variation de Cl, de K/Cl et de Ca/Cl en fonction de la longueur de pente
 Figure VI.11 : variation temporelle de K, Ca, K/Cl et de Ca/Cl

Conclusion générale

Figure C : schéma des actions de maîtrise des processus de ruissellement et d'érosion à l'échelle du bassin versant, d'après GILLET (1995).

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Matériel et méthode

Tableau II.1 : nombre d'orage : réseau climatologique d'Ille et Vilaine ; période 1951 - 1980 et station INRA du Rheu, période d'avril à septembre 1994

Tableau II.2 : comparaison des caractéristiques climatiques de Rennes et Naizin, pour la même période.

Chapitre III : Mesures physiques et suivis des états de surface

Tableau III.1 : situation dans le versant des mesures de conductivités hydrauliques, de densité apparente, de stabilité structurale, d'humidité et des photos d'états de surface à Rennes.

Tableau III.2 : Classe de stabilité, de battance et de ruissellement - érosion en fonction du diamètre moyen pondéral (MWD) ; d'après LE BISSONNAIS et LE SOUDER (1995)

Tableau III.3 : test statistiques des valeurs de conductivités hydrauliques en fonction de l'inter-rang et de la position dans le versant (GASCUEL-ODOUX)

Tableau III.4 : risque d'apparition du ruissellement et de l'érosion diffuse en fonction des caractéristiques physiques de la couche superficielle ; Rennes

Tableau III.5 : comparaison de Rennes et Naizin pour les risques d'apparition du ruissellement et de l'érosion diffuse à partir des tests de stabilité structurale

Chapitre IV : Caractérisation du ruissellement

Tableau IV.1 : % du nombre d'événement où au moins un dispositif a débordé ; % par classe de volumes ruisselés

Tableau IV.2 : % par classe de volumes ruisselés en fonction du niveau de pente

Tableau IV.3 : importance du ruissellement en fonction des trois inter-rangs par niveau de pente ; Rennes, maïs, 1994-1995

Tableau IV.4 : importance du ruissellement en fonction des trois inter-rangs par période ; Rennes, maïs, 1994-1995

Tableau IV.5 : variabilités des réponses par inter-rangs selon le niveau de pente ; Rennes, maïs, 1994-1995

Tableau IV.6 : occurrence des ruissellements pour les différents niveaux de pente ; Naizin et Rennes, 1994-1995

Chapitre V : Transports solides

Tableau V.1 : coefficients de ruissellement de parcelle de 10 m², calculés par FARRIE (1994)

Tableau V.2 : coefficient de ruissellement calculé à partir d'une sonde ; Rennes, 1994-1995

Tableau V.3 : coefficient de ruissellement obtenu par GALLIEN E.(1995)

Tableau V.4 : évaluation de coefficient de ruissellement aux différents niveaux de pente ; Rennes, 1994-1995

Tableau V.5 : pourcentage relatif en argile minéralogique des charges solides et indice d'Esquevin, Rennes, 1994-1995

Tableau V.6 : composition moyenne en oxydes et éléments traces des charges solides, Rennes, 1994-1995

tableau V.7 : classes de concentrations en charges solides, en fonction de la topographie, Rennes et Naizin, 1994

Tableau V.8 : bilan moyen en g/m² pour les charges solides, les colloïdes minéraux et de la matière organique pour différentes périodes et situation topographique

Chapitre VI : Chimie des eaux

Tableau VI.1 : données disponibles ; Rennes, maïs, 1994-1995

Tableau VI.2 : description statistique de la chimie des eaux de ruissellement ; Rennes, 1994-1995

Tableau VI.3 : analyse d'anions ; Naizin, 28 avril 1993

Tableau VI.4 : matrices de corrélation entre les ions analysés ; Rennes, 1994-1995

Tableau VI.5 : contribution des éléments d'origine marine dans la pluie et le ruissellement ; Rennes, 1994-1995

Tableau VI.6 : rapport des concentrations entre l'eau de ruissellement et l'eau de pluie ; Rennes, 13 et 15 février 1995

LISTE DES PHOTOS

Chapitre I : Le ruissellement et l'érosion hydrique dans le contexte armoricain

Photo I.1 : dépôt à l'aval d'une parcelle de maïs ; Naizin (56), septembre 1993

Photo I.2 : formation de griffes et de rigoles sur une parcelle de blé ; Naizin (56), 1993

Photo I.3 : formation de rigoles sur parcelle de maïs en plasticulture ; Meslin (22), juin 1993, photo de CHAUVIN, d'après LE REST (1996)

Chapitre II : Matériel et méthode

Photo II.1 : fosse pédologique sur le plateau de la parcelle de Rennes

Chapitre III : Mesures physiques et suivis des états de surface

Photos III.1 : surface de 5 sur 10 centimètres, photographiés au 5 niveaux de pente ; Rennes

série 1 : 10 mai 1994 / série 2 : 12 mai 1994 / série 3 : 18 mai 1994 / série 4 : 27 mai 1994 / série 5 : 17 juin 1994 / série 6 : 25 juillet 1994

photos III.2 : 3 juin 1994 / photos d'état de surface du replat aval, de la concavité, de la pente, de la convexité et de l'amont associées aux photos de surface de 5 sur 10 centimètres, photographiés au 5 même niveaux de pente

photos III.3 : surface de 5 sur 10 centimètres, photographiés au 3 niveaux de pente

Tocplouz : série 1 : 4 juillet 1994 / série 2 : 21 juillet 1994

Kerjos : série 3 : 4 juillet 1994 / série 4 : 21 juillet 1994

BIBLIOGRAPHIE

- ABOUJAOUDE, A. - 1989. Mécanique des milieux géophysiques et environnement. DEA, Grenoble.I, U.F.R. de mécanique, 47 p.
- ABOUJAOUDE, A. - 1991. Modélisation hydrologique de l'infiltration dans les sols encroûtés à différentes échelles spatiales. Thèse de doctorat de l'université de Grenoble I ; 218 p.
- ABRAHAMS, A.D., PARSONS, A.J. & LUK, S.H. - 1991. The effect of spatial variability in overland flow on the downslope pattern of soil loss on a semi arid hillslope, Southern Arizona ; CATENA (18), 255-270.
- AL-SIDDICK, M.A. - 1983. La couverture pédologique en forêt de Rennes : analyse morphologique de séquence et cartographie en courbes d'isodifférenciation à grande et petite échelles. Thèse Ing. Doct. ENSA Rennes. Univ. Rennes 1 Multigr. 125 p.
- ANDERSON, - 1990. Process studies in hillslope research. In subsurface flow, Anderson M.G. & Burt T.P. (eds), 365-400.
- ANONYME - 1989. Le réseau climatologique d'Ille et Vilaine, au 1 janvier 1989. 37 p.
- ARABI, M. - 1990. Influence de quatre systèmes de production sur l'érosion et le ruissellement à Medea (Algérie). III. Bilan de la campagne 1989-1990 de l'érosion en nappe, du ravinement et du mouvement de masse; 56 p.
- ARABI, M. - 1991. Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu méditerranéen à Médea (Algérie). Thèse de doctorat de l'Univ, de Grenoble III, 273 p.
- ASSELIN, J. - 1990. In Planchon (1991).
- AUZET, V. - 1987. L'érosion des sols dans les régions de grande culture : aspect agronomique. Ministères de l'environnement et de l'agriculture ; 60 p.
- AUZET, V., BOIFFIN, J., MAUCORPS, J. & OUVRY J. F. - 1988. an approach to the assessment of erosion risks on agricultural land in the Northern Paris Basin ; Soil erosion on agricultural land, edited by J. Boardman, I. D. L. Foster and J. A. Dearing.
- AUZET, V. - 1990. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects aménagements. Ministère de l'environnement et ministère de l'agriculture, 37 p.
- AUZET, 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 ; Soil erosion on agricultural land, edited by J. Boardman, Forster I.D.L. and Dearing J.A. (John Wileys and sons), 385-399.
- BARBIERO, L. - 1994. Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger. Origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Thèse de doctorat, ENSAR - INRA, 200 p.
- BARRY, R.G. - 1969. Evaporation and transpiration, in Chorley, R.J. (Ed), Water, Earth and Man, Methuen, London, 169-184.
- BEVEN, K.J. - 1978. The hydrological response of headwater and sideslope areas. Bull. Hydrol. Sci., 23? 419-438.
- BOARDMAN, J. - 1990. Soil erosion on the South Doxns : a review. In Boardman J., Foster D.L. & Dearing J.A. (eds), Soil erosion on Agricultural Land, John Wiley & sons Ltd, 87-105.

- BOIFFIN, J. & SEBILLOTE, M.** - 1976. climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champs. *Annales agronomiques*, 27 : 295 - 325.
- BOIFFIN, J. & MONNIER, G.** - 1982. Etats, propriétés et comportements des sols : recherche et utilisation des critères de fertilité physique. *Bulletin technique d'information* 370/372, 401-407.
- BOIFFIN, J.** - 1984. la dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Fertilité et système de production. Thèse de docteur - ingénieur Agronomie, INAPG, 320p.
- 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. & PEYRE, Y.** - 1986. Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux. INAPG/INA/Ministère de l'Agriculture, 154 p. + annexes.
- BOIFFIN, J. & BRESSON, L.M.** - 1987. Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique. In «Feodoroff N., Bresson L.M. et COURTY M.A. (eds), *Micromorphologie des sols*, AFES, Plaisir, 309-314.
- BOIFFIN, J. & PAPY, F.** - 1988. influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré ; II : évaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie*, 9, 745 - 746.
- BOIFFIN, J., EIMBERCK, M. & PAPY, F.** - 1988. influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion ; I : analyse du déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8, 663 - 673.
- BONELL, M. & WILLIAMS, J.** - 1986b. The generation and redistribution of overland flow on a massive oxic soil in a eucalypt woodland within the semi-arid tropics of north Australia. *Hydrological Processes*, 1, 31-46.
- BONELL, M. & WILLIAMS, J.** - 1987. Infiltration and redistribution of overland flow and sediment on a low relief landscape of semi-arid, tropical Queensland. *Forest Hydrology and Watershed Management, proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987*. N° 167.
- 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.
- BOWYER-BOWER, T. A. S.** - 1993. Effects of rainfall intensity and antecedent moisture on the steady-state infiltration rate in a semi-arid region ; *Soil Use and Management*, 9 (2), 69-76.
- BRADFORD, J.M. & HUANG, C.H.** - 1994. Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil & Tillage Research*, 31, 353-361.
- BRANDT, C.J. & THORNES, J.B.** - 1987. Erosional energetics. In Poesen J.W.A (1992).
- BRESSON, L.M.** - 1995. Habilitation à diriger des recherches.
- BROWN, R.B., KLING, G.F. & CUTSHALL, N.H.** - 1981. Agricultural erosion indicated by Cs 137 redistribution. II. Estimates of erosion rate. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 45, 1191-1197.
- BRYAN, R.B.** - 1979. The influence of slope angle on soil entrainment by sheetwash and rainsplash. *Earth Surf. Processes*, 4, 43-58.
- BRYAN, R.B. & CAMPBELL, I.A.** - 1982. Surface flow and erosional processes in semiarid mesoscale channels and basins. *International Association of hydrological Sciences Publication*, 137 pp., 112-133.

- BRYAN, R.B. & POESEN, J. - 1989. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 14, 211-231.
- BUFALO, M. & NAHON, D. - 1992. erosional processes of mediterranean badlands : a new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion. *Geoderma*, 52 : 133 - 147.
- BURCH, J., MOORE, I.D. & O'LOUGHLIN, E.M. - 1988. a contour - based topographic model for hydrological and ecological applications ; *Earth surface processes and landforms*, vol. 13, 305 - 320.
- CANEVET, - 1992 : Le modèle agricole Breton.
- CANN, C., DESTENAY, JONVEL, MAITRE, V. & VILLEBONNET, - 1993. Suivi de la qualité de l'eau. Etude menée sur le bassin versant du Coët Dan (Morbihan). Cemagref, 163 p.
- CANN, C. & VILLEBONNET, - 1994. Suivi de la qualité de l'eau. Etude menée sur le bassin versant du Coët Dan (Morbihan) ; deuxième année. Cemagref, 163 p.
- CANN, C. - 1995. Le transfert des triazines vers les eaux superficielles, CEMAGREF, 75 P.
- CARNET, C. - 1976. Premières données sur le rôle du bocage sur la distribution des sols et la circulation de l'eau dans les sols. In «des bocages, histoire, écologie, économie», compte rendu de la table ronde «Ecosystèmes bocagers» INRA, CNRS, Université de Rennes, 159-162.
- CARNET, C. - 1978. Etude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage. Thèse de l'Univ. De Rennes, mention Agronomie, 235 p.
- CARPENTIER, B. - 1992. La plasticulture du maïs. Forum maïs et environnement. Rennes, le 29 janvier 1992, 7 p.
- CASENAVE, A. & VALENTIN, C. - 1989. les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, 202 p.
- CAYOT, S. - 1993. Etude spatialisée du ruissellement à l'échelle de la parcelle. DEA Géosciences, filière pédologie ; Nancy I, 60 p.
- CHAPLOT, V. - 1995. Processus et déterminisme de l'érosion diffuse à différentes échelles spatiales. DEA Géosciences Nancy I, 41 p.
- CHAPLOT, V., LE BISSONNAIS, Y., BENKHADA, H., MOREL, V., EIMBERCK, M., FOX, D., LIGNEAU, L. & OUVRY, J.F.- 1996. Relation entre pertes en terre et inclinaison de la pente en situation d'érosion interrill de plein champs, 15 p. Colloque Réseau érosion.
- CHAUVIN, M., HOUBEN, V. & PLET, P. - 1996. Elaboration des programmes d'actions de la directive nitrate en Bretagne; Eléments de diagnostic et de préconisations; CRAb, 170 P.
- CHERY, P. - 1990. modélisation spatiale de la sensibilité au ruissellement et à l'érosion. Recherche sur la combinaison de données cartographiques du milieu (région Nord - Pas de Calais). DEA Paris V, SESCPF, 47 p.
- CHEVALLIER, P. & PLANCHON, O. - 1993. Hydrological processes in a small humid savanna basin (Ivory Coast) ; *Journal of Hydrology*, 151, 2-4.
- CHEVERRY, C. - 1994. La dégradation chimique des sols en Bretagne. Etude et gestion des sols, 1, 7-21.
- CHORLEY, R. J. - 1978. the hillslope hydrological cycle in hillslope hydrology ; Kirkby editor, John Wiley and sons, N.Y., 1 - 42.

- COPELAND, O.L. - 1965. Land use and ecological factors in relation to sediment yields. In «Soil Erosion», Kirkby M.J. & MORGAN R.P.C. (eds, Wileys).
- COSANDEY, C. & MUXART, T. - 1989. «Défrichements» et érosion : estimation du risque. Annales du Parc national des Cévennes, 4, Florac, 141-166.
- COULON, E. - 1986. Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux ; contribution à la connaissance des mécanismes de compactage. Thèse Un. Orleans, 242 p.
- CRAVE, A. - 1994. Quantification de l'organisation des réseaux hydrographiques. Thèse de l'université de Rennes, Sciences de la terre, 193 p.
- CRAVE, A. & DAVY, P. - sous presse. Scaling relationships and channel networks from two large magnitude watersheds in French Brittany ; Tectonics.
- CROS-CAYOT, S. & GASCUEL-ODOUX, C., 1996. Les transferts de surface. Ouvrage CORMORAN.
- CURMI, P. - 1993. Mémoire sur les titres et travaux scientifiques. INRA Science du sol Rennes. Habilitation à diriger des recherches. 12 p.
- DAIX, C. - 1991. analyse du ruissellement en fonction de la dynamique spatiale des états de surface du sol (approche à l'échelle du bassin versant élémentaire en Pays de Caux). Mémoire de fin d'étude, ENSAR, 35 p.
- DAROUSSIN, J. SOUCHERE, V. & KING, D. - 1994. Modelling effects of agricultural activities on runoff and talweg erosion. Proceedings of the 9th European Acr/Info User Conference, Paris, oct; 1994.
- DE PLOEY, J. - 1969. L'érosion pluviale : expériences à l'aide des traceurs et bilans morphogéniques. Acta Geogr., LOVANIENSIA, 7, 1 - 28.
- DE PLOEY, J., SAVAT, J. & MOEYERSONS, J. - 1976. The differential impact of some soil loss factors on flow, runoff creep and rainwash. Earth Surface Processes, 1, 151-161.
- DE PLOEY, J. & GABRIELS, D. - 1980. Measuring soil loss and experimental studies. In «Soil erosion», Kirkby M.J. & Morgan R.P.C. (Wileys eds).
- DE PLOEY, J. - 1981. Some laboratory techniques for investigating land erosion ; Erosion and sediment Transport Measurement (Proceeding of the Florence Symposium, June 1981) IAHS Publ. n° 133.
- DE PLOEY, J. - 1982. A stemflow equation for grasses and similar vegetation. Catena, 9 : 139-152.
- DE PLOEY, J. - 1984. Stemflow and colluviation : modelling and implications. Pédologie 34, 135-146.
- DE PLOEY, J. & POESEN, J. - 1985. Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In Richerds K.S., Arnett R.R. & Ellis S. (Eds), Geomorphology and soils, George Allen & Unwin, 99-120.
- DELAHAYE, D. - 1992. Approches spatialisées et analyses expérimentales des phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols. Application aux systèmes de production agricole du Calvados ; Thèse de doctorat de l'université de Caen (géographie).
- DEMMAK, A. - 1982. Recherche d'une relation empirique entre apports solides spécifiques et paramètres physico-climatiques des bassins : application au cas algérien. Water Resources, Int. Assoc. Hydrological Sci. Publ., n°144.
- DJOVORIC, M; - 1980. Slope effect on runoff and erosion. IN «Assessment of erosion», De Boodt M. & Gabriels D. (Eds, Wileys)

- DUNNE, -1970. Runoff production in a humid area. Agr. Res. Ser. US Dept; Agr., Washington, DC, 108p. In Chorley.
- DUNNE, T., ZHANG, W., & AUBRY, B.F. -1991. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, 27, 2271-2285.
- DURAND, P. - 1989. Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France). Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 162 P.
- DURAND, P., COLIN, N. & LELONG, F. - 1992. Anthropogenic and natural contributions of the rainfall chemistry of a mountainous area in the Cevennes National Park (Mont-lozere, Southern France). *Journal of Hydrology*, 130 (1992) 71-85.
- DURAND, P. & TORRES, J. - sous presse. Solute transfer in agricultural catchments: the interest and limits of mixing models. *Journal of Hydrology*.
- ELLISON, W.D. - 1944. Studies of raindrop erosion. *Agr. Eng.*, 25, 131-136 & 181-182.
- ELLISON, W.D. - 1947. Some effects of raindrops and surfaceflow on soil erosion and infiltration ; *Trans. Am. Geophys. Union*, 26, 415-429.
- ELLISON, W.D. - 1948. Erosion by raindrop. *Sci. Am.*, 179 (5), 40-45.
- EMMET, W.W. - 1978. Overland flow. Kirkby edition ; 145 - 176.
- EVANS, R. - 1980. Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls : an empirical viewpoint. In «Soil Erosion», Kirkby M.J. & Morgan R.P.C. (eds).
- FARRIE, A. - 1994. Transfert des pesticides par ruissellement. Suivi horizontal et vertical dans le sol de deux molécules sur des parcelles expérimentales. DAA ENSP.
- FIES, J.C. & STENGEL, P. - 1981. Densité texturale de sols naturels. II. Elements d'interprétation. *Agronomie* 1, 659-666.
- GABRIELS, - 1988. Use of organic waste materials for soil structurization and crop production: initial field experiment. *Soil Technology* 1, 89-92.
- GALLIEN, E. - 1994. Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse : inférence de l'occupation du sol et transfert d'échelle du m² à la parcelle. DAA ENSA Montpellier, 59 p.
- GALLIEN, E., LE BISSONNAIS, Y., EIMBERCK, M., BENKHADRA, H., LIGNEAU, L., OUVRY, J.F. & MARTIN, P. - 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agricultures*, 4, 171-183.
- GASCUEL-ODOUX, C. - 1984. Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse de doctorat, ENSMP, Fontainebleau, 235 p.
- GASCUEL-ODOUX, C. & MEROT, P. - 1986. Variabilité spatiale du transfert de l'eau dans le sol : utilisation du traçage et analyse géostatistique. *Journal of hydrology*, 89, 93-107.
- GASCUEL-ODOUX, C., CROS-CAYOT, S., CLEMENT, M., CURMI, P., GARNIER, F., HEDDADJ, D. & SEUX, R. - 1995. Le ruissellement et les transferts de surface. Colloque CORPEP, nov. 1995.
- GASCUEL-ODOUX, C., CAYOT, S. & DURAND, P. - 1996. Spatial variations of sheet flow and sediment transport on an agricultural field. *Earth Surface Processes*, vol. 21.
- GERLACH, T. - 1967. Hillslopes throughs for mesuring sediments movements. *Geom. Dyn.*, 4, 173 in Kirkby.

- GILLET, H. - 1995. Du diagnostic de la contamination des eaux à quelques propositions d'actions. Colloque «Qualité des eaux et produits phytosanitaires : du diagnostic à l'action», Rennes, 27 novembre 1995, 116-125.
- GOENADI, S.-1989. Influence du maïs, pris comme indicateur de l'évolution agricole sur le transfert pluie - débit d'un bassin versant expérimental. Thèse ENSAR (GR), 206 p.
- GOURRU, M. - 1992. Description spatiale des sols du BV de Naizin (Morbihan) ; mémoire de fin d'études . ENSAR, 43 p.
- GOVERS, G. & RAWLS, . - 1986. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. *Earth Surface Processes & Landforms* 11, 515-524.
- GOVERS, G. - 1985. Selectivity and transport capacity of thin flow in relation to rill erosion. *Catena*, 12, 35-49.
- GOVERS, G. - 1991. Time-dependency of runoff velocity and erosion, the effect of the initial soil moisture profile ; *Earth Surface Processes and landforms*, 16, 713-729.
- GRECO, J. - 1978. La défense des sols contre l'érosion, 183 p.. La maison rustique (eds).
- GREGORY, K.J. & WALLING, D.E. - 1973. Drainage basin form and process. In Kirkby, Arnold London (Ed).
- GRIMALDI, M. - 1981. Contribution à l'étude du tassement des sols : évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse de doctorat, ENSAR, 209 p.
- GRIVAUT, G. - 1995. Les produits phytosanitaires : une vaste gamme de substances, un marché en constante évolution, des utilisations variées. L'exemple de la Bretagne. Colloque «Qualité des eaux et produits phytosanitaires : du diagnostic à l'action», Rennes, 27 novembre 1995, 10-18.
- GUIHO, M; - 1995. Les reseaux de surveillance : résultats , Evolution. Colloque COREP, nov; 1995, 19-30.
- GUY, B.T., DICCKINSON, W.T. & RUDRA, R.P. - 1987. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. *Trans. ASAE*, 30, 1378-1386.
- GUYOT, G., MALET, P. & VERBRUGGHE, M. - 1974. Climat et aménagements en pays bocagé : Présentation climatique de la Bretagne et des années de mesure. INRA - Dir. Am. Rural et des structures, 67 p.
- HAIRSINE, P.B. & ROSE, C.W. - 1991. Rainfall detachment and deposition : sediment transport in the absence of flow - driven processes. *Soil sci. soc. am. j.* 55 : 320 - 324.
- HAIRSINE, P.B. & ROSE, C.W. - 1992. Modelling water erosion due to overland flow using physical principles. 1. Sheet flow. *Water resources research*, vol.28, n° 1, p. 237 - 243.
- HAMLETT, J.M., BAKER, J L., KIMES, S.C. & JOHNSON, M.P. - 1984. runoff and sediment transport within and from small agricultural watersheds. *Transactions of the ASAE*, 1325 - 1363, vol. 27 (5).
- HEDDADJ, D., GASCUEL-ODOUX, C., CROS-CAYOT, S. & CURMI, P. - 1995. Rôle des caractéristiques physiques des sols sur la distribution spatiale du ruissellement le long du versant. Colloque Réseau érosion.
- HEDDADJ, D., GASCUEL-ODOUX, C., CHEVERRY, C. & CURMI, P. - 1996. Etude des variations spatiales et temporelles de la conductivité hydraulique à l'échelle du versant. AFES, Rennes, avril 1996.
- HENENSAL, P. - 1986. l'érosion externe des sols par l'eau. Approche quantitative et mécanismes. Rapport de recherche LPC n°138, 20 - 61.

- HENIN, S. - 1938. Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse Paris, 70 p.
- HILLEL, D. - 1974. L'eau et le sol, principes et processus physiques. Leuven. Vander.
- HJULSTORM, F. - 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries. Bull. Geo. Inst. Univ. Uppsala 25, 221-527.
- HOFMAN, G., DE LEENHEER, L. & APPELMANS, F. - 1974. Relation ship between the aggregate instability and soil texture, organic matter content, pH, total porosity and pore size distribution. Med. Fac. Land Gent., 39 (4), 1622-1634.
- HORTON, R.E. - 1933. the role of infiltration in the hydrological cycle ; transactions of ASAE, 14, 446 - 460.
- HOUBEN, V. - 1995. Analyse des interactions sol-climat-plante, construction et spatialisation d'un modèle en composantes du rendement du blé en Bretagne. These de doctorat, ENSAR - INRA, 188 p.
- HUANG, 1995. Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas. Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 982-990.
- HUBERT-MOY, & MEROT, P. - 1995. Les transformations du paysage des dernières decennies ; les cas du bocage breton. Forum de la zone atelier hydrosystème «Bretagne», juin 1995, 19 p., 8-9.
- HUDSON, N.W. - 1957. The design of field experiments on soil erosion; J. Agric. Eng. Res., 2 (1), 56-65.
- HUDSON, N.W. - 1961. An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of subtropical rainfall. Rhodesia Science Association Proceedings 49, 14-25.
- INIZAN, C. - 1995. Le bocage breton et son intérêt dans la lutte contre l'érosion et les pollutions diffuses d'origine agricole.
- INTYRE, D.S. - 1958. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. Soil Sci., 85, 185-189.
- INTYRE, D.S. - 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. Soil Sci., 85, 5, 261-265.
- JUAN TORRES, J.L. - 1994. Transfert de nitrate et chemins d'eau dans un bassin-versant agricole Breton ; mémoire ENSAR-INRA, 88 p.
- KAO, C. - 1994. Le ruissellement en parcelle agricole en situation hivernale. Mécanisme de genèse et modélisation.
- KHEYRABI, D. & MONNIER, G. - 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. Ann. Agron. 19 (2), 129-152.
- KINNELL, P.I.A. - 1974. Splash erosion : some observation on the splash-cup technique ; Soil Sci. Soc. Am. Proc., 38, 657-660.
- KINNELL, P.I.A. - 1988. The influence of flow discharge sediment on sediment concentrations in raindrop induced flow transport. Aust. J; Soil Res., 26, 575-582.
- KINNELL, P.I.A. - 1991. the effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flow. Transactions of ASAE, vol. 34 (1), 161 - 168.
- KINNELL, P.I.A. & CUMMINGS, D. - 1993. Soil/slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow ; ASAE, 36 (2), 381-387.

- KIRKBY, M.J. - 1969. Erosion by water on hillslopes, in Chorley M.J. (eds), *Water, Earth & Man*; Methuen, 229-238;
- KIRKBY, M.J. - 1974. Surface wash at the semi-arid break in slope. *Z. für Geomorph., suppl.* Bd 21, 151-176.
- KIRKBY, M.J. - 1978. *Hillslope hydrology*; Kirkby edition, John Wiley and sons, N. Y., 309 p.
- KIRKBY, M.J. & MORGAN, R.P.C. - 1980. editors; *Soil Erosion*, John Wiley.
- KOLLA, E. - 1987. Estimating flood peaks from small rural catchments. *Journ. of Hydrology*, 95, 203-225.
- LAFFORGUE, A. - 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. ORSTOM, ser. Hydrol.*, XIV, 4, 299-344.
- LAFFORGUE, A. & CASENAVE, A. - 1980. Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. *La houille Blanche*, n° 4 - 5, 243-249.
- LAL, R. - 1975. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. *Tecch. Bull. IITA, Ibadan*, 1, 38 p.
- LAL, R. - 1976. Soil erosion on Alfisols in western Nigeria. III. Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*, 16, 389-401.
- LANG, R.D. - 1992. Accuracy of two sampling methods used to estimate sediment concentrations in runoff from soil loss plots; *Earth Surface processes and landforms*, vol. 17, 841 - 844.
- LARIVIERE & VERDOU - 1976. Contribution à l'étude climatologique de la Bretagne. Monographie de la météorologie nationale, ministère de l'agriculture; 82 p.
- LATTANZI, A.R., MEYER, L.D. & BAUMGARDNER, M.F. - 1974. Influences of mulch rate and slope steepness on interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Of Am. Proc.*, 38, 946-950.
- LE BISSONNAIS, Y. - 1987. Etude des mécanismes de mobilisation et de redistribution des particules sous l'action des pluies à la surface du sol. INRA, Orléans, doc. de travail, 11 p. + annexes.
- LE BISSONNAIS, Y. - 1988. analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies; thèse de l'université d'Orléans, INRA; 225 p.
- LE BISSONNAIS, Y. - 1990. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. *Catena sup.* 17, 13-28.
- LE BISSONNAIS, Y. & SINGER, M.J. - 1992. crusting, runoff and erosion response to soil water content and successive rainfalls; *Soil Science Society of American Journal*, 56, 1898 - 1903.
- LE BISSONNAIS, Y. & SINGER, M.J. - 1993. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California Soils; *Soil Science Society of American Journal*, 57, 224-229.
- LE BISSONNAIS, Y. & LE SOUDER, C. - 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et gestion des sols*, 2, 1, 43-56.
- LE BISSONNAIS, Y., RENAUX, B. & DELOUCHE, H. - 1995. Interactions between soil properties and moisture in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena* 25, 33 - 46.
- LE BISSONNAIS, Y. & GASCUEL-ODOUX, C. - 1996; L'érosion hydrique des sols cultivés. In : «Sols, interfaces fragiles», Nathan.

- LE REST - 1996. Paysan Breton n° 2142.
- LELEUX, - 1988. Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyse de terre. *Science du sol*, 26 (1), 29-40.
- LEOPOLD, L.B., EMMET, W.W. & MYRICK, R.W. - 1966. Channel and hillslope processes in a semi-arid area, New Mexico, US Geol. Surv. Prof. Paper, 352G.
- LEOPOLD, L.B., EMMET, W.W. & MYRICK, R.W. - 1967. On some variations in painting rocks. *Revue de Géom. Dyn.*, 4, 160-161.
- LEY, G.J., MULINS, C.E. & LAL, R. - 1989. Hardsetting behaviour of some structurally weak tropical soils. *Soil & Tillage Research*, 13, 365-381.
- LILLIARD, J.H., ROGERS, H.T. & ELSON, J. - 1941. Effects of slope, charcter of soil rainfall and cropping treatments on erosion losses from Dunmore silt loam. In «Soil Erosion», Kirkby M.J. & Morgan R.P.C. (eds, Wileys).
- LOMBARD, A.- 1956. Géologie sédimentaire. Les séries marines. Masson et Cie, 722 p.
- LORRE, E., ARLLOT, M.P., DUTERTRE, A., GERARD, J.P. & ZIMMERD, D. - 1994. Influence du drainage sur le ruissellement hivernal à l'échelle de la parcelle. SHF 23 ème journée de l'hydraulique, 87-93.
- LUDWIG, B. - 1992. l'érosion par ruissellement concentré des etres cultivées du nord du bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du BVE ; thèse de docteur de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 155 p.
- MAILLARD, A. & VEZ, A. - 1988. Influence du travail du sol et d'un engrais vert sur le blé d'automne et le maïs grain en rotation depuis 15 ans. *Revue suisse agricole*, 21, H6, 321-326.
- MARCENAC, F. - 1987. La chromatographie ionique. *Analy Quid*, 4.
- MATHIER, L., ROY, A.G. & PARE, J.P. - 1989. the effect of slope gradient and length on the parameters of a slope sediment transport equation for sheetwash. *Catena*, vol. 16, 545 - 558.
- MATHIER, L. & ROY, A.G. - 1993. Temporal and spatial variations of runoff and rainwash erosion on an agricultural field. *Hydrological process*, 7, 1-18.
- MC INTYRE, D. - 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sc.*, 85, 261-266.
- MEROT, P. - 1978. Bocages : sols et eaux. Le bocage en Bretagne granitique, une approche de la circulation des eaux. Thèse de doctorat de l'Univ. De Rennes, 196 p.
- MEROT, P. - 1993. contribution à l'étude du rôle dans le fonctionnement hydrologique de BV, vol 1 : synthèse des travaux ; mémoire pour l'obtention du diplôme de l'habilitation à diriger des recherches. INRA, Science du sol, Rennes : 76 p.
- MEROT, P., EZZAHAR, B., WALTER, C. & AUROUSSEAU, P. - 1995. Mapping waterlogging of soils using digital terrain models. *Hydrological Processes*, vol. 9, 27-34.
- MIMAUULT, S. - 1993. Les pratiques agricoles susceptibles d'engendrer une pollution nitrique sur le bassin versant de Naizin (56) : diagnostic et propositions. DAA Sciences et Techniques des Productions Vegetales, INAPG, 93 p.
- MOHAMOUD, Y.M., EWING, L.K. & BOAST, C.W. - 1990. small plot hydrology ; I. Rainfall infiltration and depression storage determination. *Transactions of ASAE*, vol. 33 (4).

- MOHANTY, B.P., ANKENY, M.D., HORTON, R. & KANWA, R.R.S. - 1994. Spatial analysis of hydraulic conductivity measured using discs infiltrometers. *Water Res. Research*, 30 (9), 2489-2498.
- MOLINIER, M., LE BRUN, J.C. & AUDRY, P.- 1990. Effet d'échelle observé sur le ruissellement dans le nord-est brésilien. *SEMINFOR* 4, 95-104.
- MONNIER, G. - 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 16, 327-400 et 471-534.
- MONNIER, G. & STENGEL, P. - 1982. Structure et état physique du sol//La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. In Boiffin J. (1984).
- MONNIER, G. & BOIFFIN, J. - 1985. Influence des conditions d'utilisation agricole des sols sur l'érosion par l'eau ; cas des systèmes de culture de l'Europe de l'ouest. 1-16.
- MONNIER, G., BOIFFIN, J. & PAPY, F., 1986. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées. Cas des systèmes de grandes cultures de l'Europe de l'Ouest. *Cahier de l'ORSTOM, série pédologique*, vol. XXII, n°2 : 123 - 131.
- MOORE, I.D. - 1981. Effect of surface sealing on infiltration ; *ASAE*, 24 (1561), 1546-1552.
- 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 Agr. Eng.*, 31 (4), 1098-1107.
- 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. - 1977. Soil erosion in the United Kingdom : Field studies in the silsoe Area 1973-75. In «Soil Erosion», Kirkby M.J. & Morgan R.P.C. (eds, Wileys).
- MORGAN, R.P.C. - 1979. Soil erosion. *Topics in Applied Geomorphology*. Longman.
- MOSIMANN, T. - 1991. Lutte contre l'érosion des sols cultivés ; Liebefeld-Berne (Ed), 184 p.
- MUSGRAVE, G.W. - 1954. Estimating land erosion - sheet erosion. *Hydrol. Pub.*, 1, 207-215.
- MUTCHLER, C. - 1963. Runoff plot design and installation for soil erosion studies. *Agricultural Research Service report*, Washington D.C., 41-79.
- MUTCHLER, C. & YOUNG, A. - 1980. In soil erosion edited by M.J. Kirkby and R.P.C. Morgan.
- NEAL, - 1938. The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion. *Mo. Agr. Exp. Sta. Res. Bul.*, 280.
- NEARING, M.A., FOSTER, L.J., LANE. & FINKNER, S.C. - 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water erosion prediction project technology. *Trans. ASAE*, 32, 1587-1593.
- OBERLIN, G.- 1990. Mesures et expérimentations en hydrologie. Colloque «des concepts et des outils en hydrologie». Paris, janv. 1990.
- ORHON - 1993. Importance du transfert des pesticides par ruissellement, contamination des eaux superficielles. Influence de la distance des épandages par rapport au ruisseau collecteur. mémoire ENSP.
- 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.

- PARSONS, A.J. & ABRAHAMS, A.D. - 1989. A miniature flume for sampling interrill overland flow. *Physical Geography*, 10, 96-105.
- PARSONS, A.J., WAINWRIGHT, J. & ABRAHAMS, A.D. - 1993. Tracing sediment movement interrill overland flow on a semi - arid grassland hillslope using magnetic susceptibility ; *Earth surface processes and landforms*, 18, 721 - 732.
- PENNOCK, & JONK, - 1990. Rates of soil redistribution associated with soil zones and slope classes in southern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sc.*, 70, 325-334.
- PEREZ, P. - 1994. Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du sud Saloum (Senegal). Du diagnostic à l'aménagement de la parcelle ; thèse de l'ENSA de Montpellier, 250 p.
- PIHAN, J. - 1976. Hydrologie de 2 bassins versants élémentaires granitiques bocager et ouvert in «Les bocages», table ronde CNRS. 586 p., 177-184.
- PIHAN, J. - 1979. Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France ; colloque sur l'érosion en milieu tempéré non méditerranéen, Colmar, 20-23 septembre 1978, 9-18.
- PINTA, M. - 1971. Spectrométrie d'absorption atomique. Application à l'analyse chimique - Tomes 1 et 2. Masson et Cie. ORSTOM.
- PLANCHON, O. - 1991. étude spatialisée des écoulements sur les versants et de leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion. Exemple de savane humide (côte d'Ivoire) ; thèse de doctorat, ORSTOM, 340 p.
- POESEN, J. - 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow volume. *Z. Geom. N.F. suppl.*, 49, 117-131.
- POESEN, J.W.A. - 1992. Mechanisms of overland flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragment. *Overland flow and sediment production*, 275-305.
- POSS, R., PLEUVRET, C. & SARAGONI, H. - 1989. Influence des réorganisations superficielles dans les terres de Barre (Togo méridional). *Cah. ORSTOM, ser. Pédologie*, vol. N°4, 405-415.
- PROFFIT, A.P.B., ROSE, C.W. & HAIRSINE, P.B. - 1991. rainfall detachment and deposition : experiments with low slopes and significant water depths. *Soil sc. soc. am. j.* : 325 - 332.
- QUINE, T.A. & WALLING, D.E. - 1993. Use of Cs 137 measurements to investigate relationships between erosion rates and topography. *Landscape sensitivity*, Thomas Alison (Ed), 31-48.
- QUINE, T.A., NAVAS, A., WALLING, D.E. & MACHIN, J. - 1994. Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near las Bardenas in the central Ebro river basin, Spain ; *Land degradation and rehabilitation*, vol 5, 41-55.
- REGARD A. - 1979. Methodes d'analyse minérale des eaux naturelles et des solutions du sol. Note technique du laboratoire de science du sol, n°1, 42 p.
- REMY, J.C. & MARIN-LAFLECHE, A. - 1974. L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Ann. Agron.*, 25 (4), 607-632.
- RIVIERE, J.M. - 1989. Méthode de caractéristion des sols : Méthode Tarrière. In «La terre, en jeu d'avenir», Journée Reg. D'agronomie, Pontivy, 30 nov. 1989, 4 p.
- ROBAIN, H. & BACHELARD, D. - 1985. Contribution à l'étude des sols de la forêt de fougères. Analyse structurale, caractérisation physique et chimique de certain volume pédologique. Mémoire de DAA Rennes, SDS, n° 367, 129 p.
- RODA, F. - 1983. Biogeoquímica de les aigües de pluja i de drenatge en algunes ecosistemes forestals del monteny. Tesi Doctoral, univ. Autònoma de Barcelona, 400 p.

- ROELS, J.M. & JONKER, P.J. - 1983. Probability sampling techniques for estimating soil erosion. *Jour. Soil Sci. Soc. Of Am.* 47, 1224-1228.
- ROLLAND, & LE BOZEC, A.- 1976. Etude du bassin versant de Naizin avant et après arasement de talus en zone schisteuse. Colloque CNRS «écosystèmes bocages 3 ENSAR.
- ROOSE, E. - 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales ; ORSTOM, coll. Travaux et Documents, 78, 108 p.
- ROOSE, E. - 1980. Dynamique actuelle des sols ferralytiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Thèse de doctorat, Univ. D'Orléans, 587 p.
- ROTH, C.H. & HELMING, K - 1992. Surface seal properties, runoff formation and sediment concentration as related to rainfall characteristics and the presence of already formed crusts ; *Soil Technology*, 5 (4), 359-368.
- ROTH, C.H. & JOSCHKO, M. - 1991. A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. *Z. Pflanzenernähr; Badenk.* 154, 101-105.
- RUELLAN, A. & DOSSO, M. - 1993. Regard sur le sol. Foucher Arpelf (Ed).
- SAVAT, J. & POESEN, J. - 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash.I. : The calculation of absolute data on detachability and transportability ; *Catena*, 8, 1-17.
- SCHULIN, R., VAN GENUCHTEN, M.T., FHULER, H. & FERLIN, P. - 1987. An experimental study of solute transport in a stony field soil. *Water Resources Research*, 23, 9, 1785-1794.
- SHARMA, K.D., SINGH, H.P. & PAREEK, O.P. - 1983 . Rainwater in filtration into a bare loamy sand ; *Hydrological Sciences Journal*, 28 (3), 417-424.
- SLATTERY, M.C. & BRYAN, R.B. - 1994. Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface ; *Catena*, 22 (1), 17-34.
- SOUCHERE, V. - 1995. Modélisation spatiale du ruissellement a des fins d'aménagement contre l'érosion de Talweg. Thèse INAPG, 189 p.
- SUTHERLAND, R.A. - 1994. Spatial variability of Cs 137 and the influence of sampling on estimates of sediment redistribution. *Catena*, 21, 57-71.
- TALLANDIER, - 1995. Discours d'ouverture du colloque CORPEP, 27 nov. 1995.
- THIBAUD, P. & WIDIATMAKA - 1990. Analyse structurale d'un versant granitique (massif de Quintin, Bretagne) : approche macroscopique, microscopique et physico-hydrigue. Mémoire de DAA SDS, n° 418, ENSA-INRA Rennes. 101 p.
- THIERSAULT, N. & RODRIGUEZ LADO, - 1994. Un modèle de prédiction de la distribution spatiale des sols hydromorphes à partir de critères topographiques. Mémoire de fin d'études, 73 p.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. - 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, 33, 141-163.
- TORRES, J.L. - 1994. Transfert de nitrate et chemins d'eau dans un bassin versant agricole breton. Mémoire ETSEA, Université de Leida, 90 p.
- TRAPPENIERS, - 1988. In Goenadi, 1989 «Influence du maïs, pris comme indicateur de l'évolution agricole sur le transfert pluie - débit d'un bassin versant expérimental».
- TRUMAN, C.C. & BRADFORD, J.M. - 1993. Relationships between rainfall intensity and the interrill soil loss-slope steepness ratio as affected by antecedent water content ; *Soil Science*, 156 (6), 405-413.

- VALENTIN, C. - 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez-Niger). Dynamique et conséquence sur l'économie de l'eau : Thèse 3ème cycle, Univ. Paris VII, Etudes et Thèse, ORSTOM, 1985, 259 p.
- VALENTIN, C. & BRESSON, L. M. - 1992. Morphology, genesis and classification of surface crust in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55, 225 - 245.
- VALLES, V. - 1987. Etude et modélisation des transferts d'eau et de sel dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. *Mem. Sci. Geol.* N°79, 148 p.
- VAN ASCH, T.W.J. - 1980. Water erosion on slopes and landsliding in an mediterranean landscape. Thesis, Geografisch Institut, Rijks Univ., Utrecht.
- VAN DER LEEDEN, F., TROISE, F.L. & TODD, D.K. - 1990. The water Encyclopedia second edition, Lewis Publishers, 808 p.
- VAN VLIET-LANOË, B. - 1995. Evolution of a pedosedimentary record in NW Europe during the last 150 ka. *C.R. Acad. SC., II*, 320 419-426.
- VOGT, H. - 1979. Colloque sur l'érosion des sols en milieu tempérée non méditerranéen ; Starsbourg-Colmar, sept. 1978, 251 p.
- WALTER, C. - 1990. Estimation des propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : Cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Ille et Vilaine (France). Thèse ENSAR, 172 p.
- WALTER, C., BOUEDO, T. & AUROUSSEAU, P. - 1995. Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leurs évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport final de la convention d'étude entre le conseil régional de Bretagne et l'ENSAR, 30 p.
- WENDT, R.C., ALBERTS, E.E. & HJELMFELT, A.T. - 1986. Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots; *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 50, 730-736.
- WIDIATMAKA - 1994. Signification fonctionnelle des traits morphologiques d'hydromorphie et de dégradation vis à vis du régime hydrique des sols. Bassin versant du Coët Dan (Naizin, Morbihan). Thèse de doctorat, ENSAR - INRA, 273 p.
- WILLIAMS, J. & BONELL, M. - 1987. Computation of soil infiltration properties from the surface hydrology of large field plots ; In : *Proceedings of the International Conference, development and application*, Yu-Si Fok (Ed), 272-281.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D.D. - 1958. Rainfall energy and its relation to soil loss ; *Trans. Am. Geophys. Union*, 39 (2), 285-291.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D.D. - 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland at the rocky montains. *Handbook n° 283*, Washington D.C.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D.D. - 1978. Predicting rainfall erosion losses - A Guide to conservation planning; *USDA Agric. Handb.*, Washington.
- WOLAVER, & LIETH, - 1972. In *Roda*, 1983.
- YODER, A. - 1936. Direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *Journ. Amer. Society of Agronomy*, 28, 337-351.

ANNEXE 1

MATERIEL ET METHODE

ANNEXE 1a : TESTS SUR LE COLLECTEUR

Mesure de la conductivité électrique à 20° C

Un résistivimètre permet d'obtenir la résistivité : R (ohm/cm), pour une température donnée : T (degré celsius).

La conductivité électrique (Siemens) pour une température T est donnée par la formule : $CT = 1 / R$

Pour pouvoir comparer les échantillons entre eux la conductivité électrique est ramenée à 20° C par la formule : $C.E. (20^{\circ}C) = CT * f$

f est un facteur de correction de la température.

La mesure de conductivité électrique permet d'obtenir rapidement une estimation de la teneur globale en sels dissous.

Test de pollution des matériaux constituant le dispositif, sur le terrain.

Type de l'échantillon	C.E. 20°C
eau distillée utilisée	4,7E-6
piège : passage 1	5,0E-6
piège : passage 2	1,4E-5

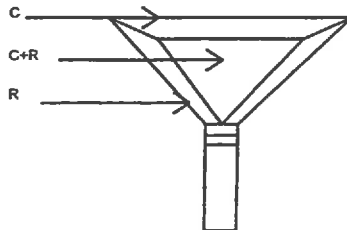


schéma du dispositif utilisé vu de dessus.

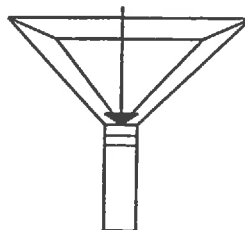


schéma de l'écoulement de l'eau du passage 1.

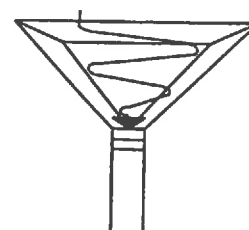


schéma de l'écoulement de l'eau du passage 2.

C : ciment
R : résine

Conductivité électrique de l'eau en fonction du temps, suivant les matériaux constituant le dispositif. Test au laboratoire.

type de lame	temps résiduel (min.)	R (ohm/cm)	T°C	C.E. 20°C
résine	1	3.60E+05	19	2.813
résine	2	4.50E+05	19	2.25
résine	3	4.55E+05	19	2.226
résine	4	4.55E+05	19	2.226
résine	5	4.55E+04	19	2.226
résine	6	4.53E+05	19	2.236
résine	7	4.52E+05	19	2.241
résine	67	5.29E+05	19.1	1.913
résine	147	4.90E+05	19.5	2.045
résine	187	3.25E+05	19.5	3.083
ciment	1	5.25E+05	19.5	1.908
ciment	2	6.00E+05	19.5	1.67
ciment	3	2.90E+05	19.5	3.455
ciment	4	1.60E+05	19.5	6.262
ciment	5	5.30E+04	19.5	1.89
ciment	6	2.30E+04	19.5	4.356
ciment	7	1.15E+04	19.1	8.798
ciment	67	9.70E+03	19	10.441
ciment	147	8.12E+03	19.4	12.363
ciment	187	2200	19.5	45.54
rien - eau distillée	1	5.55E+05	19.5	0.108
rien - eau distillée	2	5.55E+05	19.5	0.108
rien - eau distillée	3	5.55E+05	19.5	0.108
rien - eau distillée	4	5.55E+05	19.5	0.108
rien - eau distillée	5	5.55E+05	19.5	0.108
rien - eau distillée	6	5.55E+05	19.5	0.108
rien - eau distillée	7	5.55E+05	19.5	0.108
rien - eau distillée	67	7.61E+05	19.2	0.133
rien - eau distillée	147	7.40E+05	19.4	0.136
rien - eau distillée	187	3.70E+05	19.5	0.271

Analyse chimique après passage sur les dispositifs de recueil de eaux sur le terrain. (concentration en mmol/l).

Type d'échantillon analysé	«piège» passage 2	plaque ciment-résine
Na+	0.061	0.126
Ca2+	0.197	0.128
Cl-	0.075	0.04
NO3-	0.028	0.029
SO4-	0.052	0.155
F-	non quantifié	0.011

ANNEXE 1b : DETAIL DES POINTS DE SONDAGE RENNES

TRANSECT T1 - Description d'amont en aval

<u>Point n°1</u>	0-30 cm	horizon La - couleur 10YR4/3 - matières organiques 20 3% - pas de taches
	30-55	horizon E - couleur 10 YR5/4 - matières organiques pas de tache,
	55-60	horizon Bt transition - couleur 10YR5/6 - présence de racines mélangées,
	60	horizon C roche altérée, galets roulés.
<u>Point n°2</u>	0-30 cm	id. point n°1,
	30-55	horizon E - bouts de schiste - faible oxydation vers 40 cm,
	55-60	horizon Bt transition ,id.point n°1,
	60-90	horizon Bt texture limono-argileuse - couleur 10YR4/4, argile 20%, oxydation en limite B/C,
	110	horizon C, schiste.
<u>Point n°3</u>	0-30 cm	id. point n°2,
	30-40	horizon E, id point n°2,
	40-50	horizon Bt transition, idem point n°2,
	50-80	horizon Bt plus argileux et humide sauf dans la partie supérieure de l'horizon,
	80-120	horizon Bt/C,
	120	horizon C.
<u>Point n°4</u>	0-40 cm	horizon L,
	40-50	horizon E, couleur 10YR5/3, taches d'oxydation à 50cm,
	50-60	horizon Eg
	60-70	horizon Btg, couleur 10YR4/4, oxydation à 70 cm,
	80-100	horizon Bt, revêtement argileux à 100 cm sec et compact - taches blanches
<u>Point n°5</u>	0-35 cm	horizon La,
	35-50	horizon E, transition, traces d'hydromorphie,
	50-70	horizon Eg
	70-100	horizon Bt, pas d'hydromorphie.
<u>Point n°6</u>	0-30 cm	horizon La,
	35-60	horizon E, couleur 10YR4/3 - 10YR5/6,
	50-70	transition
	70-100	horizon Bt, faible hydromorphie à 100 cm.
<u>Point n°7</u>	0-30 cm	horizon La,
	30-60	horizon E, peu lessivé,
	30-110	horizon Bt, taches d'hydromorphie en limite d'horizon C.

TRANSECT T2 - Description d'amont en aval

<u>Point n°1</u>	0-30 cm	horizon La, couleur 10 YR4/3,
	30-45	horizon E avec présence de matière organique, couleur 10YR4/4,
	45-100	horizon Bt, couleur 10YR5/6 - à 90 cm transition vers C,
	100-105	horizon Bt/C,
	105	horizon Ct, blocage à 145 cm.
<u>Point n°2</u>	0-30 cm	horizon La,
	30-55	horizon E,
	55-80	horizon Bt, à 80 cm quartz, sable ,
	80-100	horizon Bt/C, accumulation d'argile, couleur 10YR5/8,
	100	horizon Ct, vers 100 cm plus sableux que talqueux, à 110 cm morceaux de schiste.

<u>Point n°8</u>	0-30 cm	horizon La,
	30-50	transition,
	50-70	horizon E,
	70-110	horizon Bt, couleur 7.5YR5/6, taches d'hydromorphie s'atténuant en limite d'horizon C.
<u>Point n°9</u>	0-40 cm	horizon La,
	40-60	transition, à 50 cm petite tache d'oxydation
	60-70	horizon Eg,
	70-100	horizon Btg, plus clair et sans tache en profondeur
	100	horizon C altérée de schiste.
<u>Point n°10</u>	0-35 cm	horizon La,
	35-50	transition, à 50 cm rares taches,
	50-60	horizon Eg,
	60-90	horizon Btgd, plus argileux et traces d'hydromorphie,
	90-115	horizon Bt/C hydromorphie plus marquée,
	115	horizon C altérée de schiste.
<u>Point n°11</u>	0-32 cm	horizon La,
	32-55	horizon Eg - taches d'hydromorphie,
	55-70	horizon Btgd, limons jusqu'à 70cm, hydromorphie,
	70-90	horizon Bt/C peu marqué,
	90	horizon C altérée de schiste.
<u>Point n°12</u>	0-35 cm	horizon La,
	35-50	transition,
	50-70	horizon Eg, de plus en plus hydromorphe vers la profondeur de l'horizon, taches d'oxydation,
	70-85	horizon Btg,
	85	horizon C altérée de schiste.
<u>Point n°13</u>	0-45 cm	horizon La,
	45-75	horizon E/Btg,
	75	horizon C altérée de schiste.
<u>Point n°14</u>	0-45 cm	horizon La,
	45-60	horizon E/Btg,
	60-85	horizon Btg/C, traces d'oxydation,
	85	horizon C altérée de schiste.
<u>Point n°15</u>	0-50 cm	horizon La, passage d'hydromorphie à 30 cm, (semelle de labour),
	50-85	horizon E/Btg,
	85-120	horizon Btg/C, hydromorphie à 85cm, plus argileux et compact,
	120	horizon C altérée de schiste.

<u>Point n°3</u>	inter-rang passage de roue, plus humide que points n°1 et 2.
	0-30 cm horizon La,
	30-70 horizon E,
	70-90 horizon Bt,
	90-120 horizon Bt/C,
	120 horizon Ct, vers 150cm texture mélangée.

<u>Point n°4</u>	plus humide dès la surface que points n°1, 2 et 3.
	0-30 cm horizon La,
	30-70 horizon E,
	70-110 horizon Bt, couleur 10 YR5/6, quartz vers 100 cm,
	110-175 horizon Bt/C, compact avec schiste et sable,
	175 horizon Ct, couleur 10YR6/4, talqueux, évoluée vers schiste.

<u>Point n°5</u>	0-30 cm horizon La, 30-60 horizon E, 60-130 horizon Bt, plus argileux, présence moindre du quartz, 130- horizon Bt/C.	<u>Point n°14</u>	arrêt sur cailloux à 140 cm. 0-30 cm horizon La, 30-60 horizon Eg, 60-120 horizon Btg, 120- horizon Bt/Cg, taches hydromorphes vers 70-80 cm, hydromorphie vers 90 cm.
<u>Point n°6</u>	0-30 cm horizon La, 30-90 horizon E, humidité à 70cm, 90-135 horizon Bt, 135-220 horizon Bt/C, 220- horizon Ct.	<u>Point n°13</u>	0-30 cm horizon La, 30-60 horizon Eg, humidité à 40 cm, 60-80 horizon Btg, hydromorphie à 60cm, 80-110 horizon Bt/Cg, présence d'eau à 90cm, quartz vers 80 et 100 cm, 110- horizon Ct.
<u>Point n°7 et 12</u>	0-30 cm horizon La, 30-90 horizon E, passage hydromorphe à 70cm, limons quartz et taches rayées vers 60-70 cm, 90-135 horizon Bt, 135-220 horizon Bt/C, 220- horizon Ct.	<u>Point n°18</u>	arrêt sur cailloux à 220 cm. 0-30 cm horizon La, 30-60 horizon Eg, taches d'hydromorphie à 50 cm, 60-80 horizon Btg, présence d'eau vers 60-70 cm, 80-140 horizon Bt/Cg, revêtement argileux à 90 cm. 140- horizon Ct.
<u>Point n°11</u>	arrêt à 185 cm sur schiste, 0-30 cm horizon La, 30-90 horizon E, 90-135 horizon Bt, 135-185 horizon Bt/C, 185- horizon Ct.	<u>Point n°19</u>	arrêt sur cailloux à 120 cm. 0-30 cm horizon La, 30-50 horizon Eg, hydromorphie à 50 cm, 50-70 horizon Btg, présence d'eau vers 60-70 cm, 70- horizon Bt/Cg, éléments grossiers à 70 cm.
<u>Point n°10</u>	arrêt à 150 cm sur quartz, 0-30 cm horizon La, 30-50 horizon E, 50-110 horizon Bt, 110-150 horizon Bt/C, 150- horizon Ct.	<u>Point n°20</u>	0-30 cm horizon La, 30-60 horizon Eg, présence d'eau vers 50 cm, 60- horizon Bt/Cg.
<u>Point n°8</u>	arrêt sur quartz à 200 cm. 0-30 cm horizon La, 30-50 horizon E, 50-110 horizon Bt, 110- horizon Bt/C,	<u>Point n°17</u>	0-30 cm horizon La, 30-50 horizon Eg, présence d'eau vers 50 cm, 50- horizon Bt/Cg. limoneux vers 60 cm, quartz vers 90 cm, altérite vers 120 cm.
<u>Point n°9</u>	arrêt sur quartz à 140 cm. 0-30 cm horizon La, 30-50 horizon E, 50-80 horizon Bt, 80- horizon Bt/C, à partir de 80 cm nombreux morceaux de schiste, humidité à partir de 90-100 cm, revêtement d'argile.	<u>Point n°21</u>	0-30 cm horizon La, 30-40 horizon Eg, hydromorphie vers 40 cm, 40- horizon Bt/Cg, altérite, sable à 100 cm.
<u>Point n°15</u>	arrêt sur quartz à 140 cm. 0-30 cm horizon La, 30-60 horizon E, 60-90 horizon Bt, 90- horizon Bt/C.	<u>Point n°22</u>	arrêt sur cailloux à 180 cm, 0-30 cm horizon La, 30-40 horizon Eg, présence d'eau vers 30-40 cm, 40- horizon Eg/C, altérite vers 90 cm.
<u>Point n°16</u>	arrêt sur quartz à 160 cm. 0-30 cm horizon La, 30-50 horizon Eg, 50-80 horizon Btg, 80-130 horizon Bt/Cg, passage de schiste et altérite vers 80 cm, 130- horizon Ct, présence d'eau vers 130-140, taches couleur rouille (schiste altéré ou oxydation).	<u>Point n°25</u>	0-30 cm horizon La, 30-40 horizon Eg, 40-60 horizon Eg/C, 60 horizon C, altérite vers 90 cm.
		<u>Point n°24</u>	0-30 cm horizon La, 30-35 horizon Eg, 35-60 horizon Eg/C, 60 horizon C.
		<u>Point n°23</u>	0-30 cm horizon La, 30-40 horizon Eg, légère hydromorphie vers 40 cm, 40-100 horizon Eg/C, 100 horizon C.

ANNEXE 1c : HISTORIQUE DE LA PARCELLE - RENNES

Bref historique des campagnes 1981 à 1993

Année	Culture	Amendements		Interculture
		calciqie (1)	humique (2)	
1981	Maïs		?	
1982	Blé		?	
1983	Trèfle violet			
1984	Trèfle violet	2.15 T/ha		
1985	Trèfle violet			
1986	Blé		70 T/ha	
1987	Maïs	2.20 T/ha		Blé
1988	Maïs		45 T/ha	
1989	Maïs			Blé
1990	Maïs	2.00 T/ha	50 m ³ /ha	RGI
1991	Maïs			Triticale
1992	Maïs	2.20 T/ha		
1993	Pois protéagineux		65 m ³ /ha	Phacélie

(1) en tonne de carbonate (VN = 55)

(2) T = tonnes de fumier - m³ = mètres cubes de lisier

Indications concernant les campagnes 1993 à 1995

Campagne 1993-94 - culture de maïs grain			
26 avril 1994	labour	tracteur 120 cv et charrue 5 corps	
27 avril 1994	préparation du lit de semence	tracteur 90 cv / cultivateur 3.60m tracteur 120 cv / herse rotative 3m	
	semis	tracteur 75 cv semoir pneumatique 6 rangs avec fertiliseur et micro granulateur	- variété CARANTEC 109.000 pieds/ha - engrais starter 18-46-00 100kg/ha (atrazine - aminotriazole - diuron) - terbuphos 240g/ha - insecticide ONCOL S 7 kg/ha (600g/ha de benfuracarbe)
1er juin 1994			- alachlore 3000 g/ha - atrazine 650 g/ha - cyanazine 700 g/ha
17 juin 1994	entretien de la culture	tracteur 55 cv et pulvérisateur 12m, 800l	- pyridate 700 g/ha
4 novembre 1994	moisson	moissonneuse batteuse 5 rangs 2 voyages avec tracteur 120 cv + remorque 13 T id. tracteur 90 cv + épandeur 11T id. tracteur 75 cv + remorque 6T rendement 66 quintaux secs/ha	
21 novembre 1994	broyage des tiges	tracteur et broyeur à axe horizontal 2,40m	
Campagne 1994-95 culture de maïs grain			
avril 1995			fumier 55 T/ha
4 mai 1995	semis	id - 94	starter 18-46-00 200 kg/ha (cf.94) imidachlopride 225 g/ha
2 juin 1995			nicosulfuron 30 g/ha sulcotrione 150 g/ha
18 juillet 1995			dicamba 70 g/ha

ANNEXE 1d : LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'ETAT DES PARCELLES - NAIZIN

Journée du 25/09/93

Nombre de parcelles observées : 5.

Suite à d'importantes pluies du mois de septembre, comportant des intensités supérieures à 5 mm/h.

A. Parcelle n°1 - Kerjos

- *Surface* : parcelles n° 100, 66 et 107.

- *Situation* : en amont du bassin versant - versant est.

- *Culture* : Culture de maïs cultivée perpendiculairement à la pente ou dans le sens de la pente (cf. carte).

- *Grande longueur de pente* : environ 500 m.

- *Topographie* : forme de cône - pente d'environ 5%.

- *Etat de surface en aval de la parcelle* :

- observation de matériel grossier transporté par ruissellement,
- croûte de dépôt constituée par une première couche de matériel de taille «sable» - d'une deuxième couche d'éléments fins de la taille des limons - épaisseur du dépôt de 1 à 10 selon l'endroit, (cm)
- zone d'incision importante,
- inter-rangs du maïs cultivés perpendiculairement à la pente peu «marqués»,
- passage d'eau de ruissellement directement de la parcelle en un point particulier.

B. Parcelle n°2 - Tocplouz

- *Surface* : parcelles n° 275 et 246.

- *Situation* : en amont du bassin versant - versant est.

- *Culture* : maïs cultivé dans le sens de la pente (cf. carte) ; parcelle auparavant en prairie.

- *Longueur de pente* : environ 250 m.

- *Topographie* : pente d'environ 5%.

- *Etat de surface en aval de la parcelle* :

- croûte de dépôt constituée d'une première couche d'éléments fins de la taille des limons de couleur rouge - épaisseur du dépôt de 1 à 5 cm environ selon l'endroit - d'une deuxième couche constituée d'éléments riches en matière organique (couleur noire) de structure stable,
- zone d'incision importante,
- passage de l'eau de ruissellement directement de la parcelle au ruisseau en un point particulier.

C. Parcelle n°3 - Tocplouz 2

- *Surface* : parcelles n° 256 et 202.

- *Situation* : en amont du bassin versant - versant est.

- *Culture* : maïs cultivé dans le sens de la pente (cf. carte).

- *Longueur de pente* : environ 400 m.

- *Topographie* : pente d'environ 5%.

- *Etat de surface en aval de la parcelle* :

- griffes
- pas d'incision aussi importante que pour les parcelles 1 et 2.

D. Parcelle n°4 - Kerrol

- *Surface* : parcelle n° 433.

- *Situation* : en aval du bassin versant - versant est.

- *Culture* : maïs cultivé dans le sens de la pente (cf. carte).

- *Longueur de pente* : environ 100 m.

- *Topographie* : pente d'environ 5%.

- *Etat de surface en aval de la parcelle* :

- griffes
- pas d'incision aussi importante que pour les parcelles 1 et 2.

E. Parcelle n°5 - Naizin

- *Surface* : parcelle n° 513.

- *Situation* : en aval du bassin versant - versant ouest.

- *Culture* : maïs cultivé dans le sens de la pente (cf. carte).

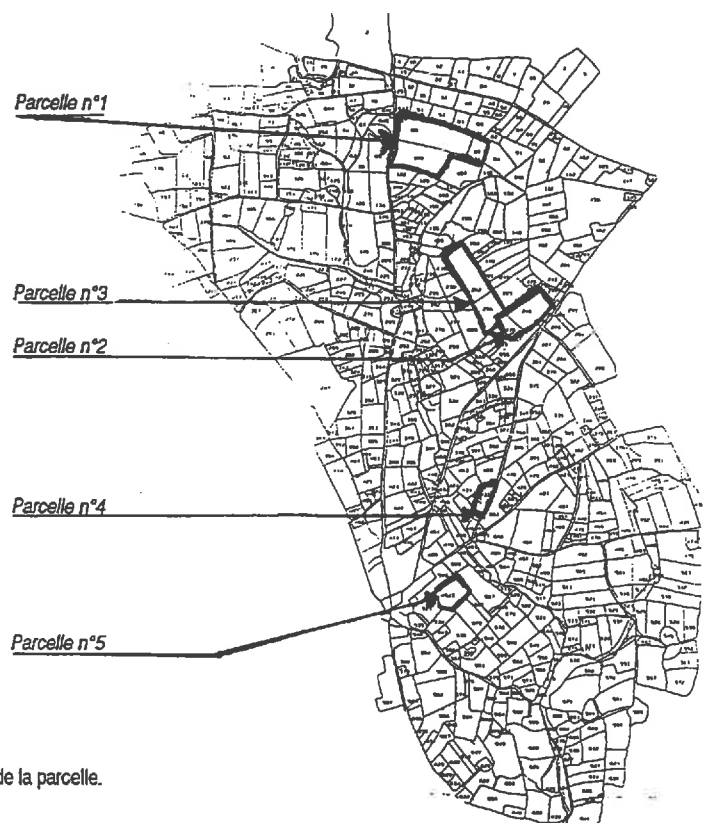
- *Longueur de pente* : environ 100 m.

- *Topographie* : pente d'environ 5%.

- *Etat de surface en aval de la parcelle* :

- incisions moins marquées que pour les parcelles 1 et 2,
- croûte de dépôt d'épaisseur environ 1 cm,
- eau de ruissellement s'infiltré au niveau de la haie qui borde l'aval de la parcelle.

CARTE DU PARCELLAIRE DE NAIZIN



ANNEXE 1e : DETAIL DES POINTS DE SONDAGE NAIZIN

Parcelle TOCPLOUZ : TRANSECT T1 - Description d'aval en amont

Culture de ray gras

Point n°1	arrêt sur cailloux 120 cm 0-30 cm horizon Lg - couleur 2.5Y2.5/1, 30-35 transition - couleur 2.5Y3/1, 35-70 horizon Eag - couleur 2.5Y7/1 - 2.5Y6/3 - présence d'eau vers 40 cm argileux et plus hydromorphe vers 60 cm, 70-90 horizon Btgd, 90-120 transition Btgd/C - couleur 5GY6/1 - présence de graviers.	Point n°9	arrêt sur cailloux à 95 cm, 0-30 cm horizon L - couleur id. point n°10, 30-50 horizon Ag, 60-70 horizon Btgd/C, revêtement argileux et schiste.
Point n°2	arrêt sur cailloux 90 cm 0-30 cm horizon Lg - couleur 2.5Y2.5/1 à 2.5Y3/1, 30-60 horizon Eag - couleur id. point n°1, 60-70 horizon Btgd - id. point n°1, 70-90 transition Btgd/C - couleur id. point n°1 - présence de graviers et revêtement argileux.	Point n°14	arrêt sur cailloux à 110 cm, 0-30 cm horizon L - couleur id. point n°11, 30-40 horizon Ag, 40-50 horizon Eag, 50-100 horizon Btgd/C, 100 horizon C.
Point n°4	0-30 cm horizon Lg - couleur id. point n°2, 30-55 horizon Eag - couleur id. point n°2, 55-80 horizon Btgd - couleur 2,5Y5/2 - 2,5Y5/1 2,5Y5/4, 80-110 transition Btgd/C - couleur id. point n°2. 110 horizon Cg	Point n°12	arrêt sur cailloux à 110 cm, 0-20 cm horizon L - couleur id. point n°12, 20-50 horizon Ag, couleur 5Y4/1, 50-60 horizon Eag, 60-100 horizon Btgd/C, 100-110 horizon C.
Point n°3	arrêt sur cailloux à 120 cm, 0-35 cm horizon Lg - couleur 2.5Y3/2, 35-57 horizon Eag - couleur id. point n°3, 57-85 horizon Btgd - couleur id. point n°3, 85-110 transition Btgd/C - taches de couleur 2.5Y5/6 - accumulation d'argile importante à partir de 85cm. 110 horizon Cg	Point n°16	0-30 cm horizon L - couleur id. point n°13, 30-50 horizon Ag, 50-70 tourbe, 70-115 horizon Ct, 115- horizon C.
Point n°6	0-30 cm horizon Lg - couleur id. point n°4, 30-50 horizon Eag - couleur id. point n°4, 50-90 horizon Btgd - couleur id. point n°4, 90-120 transition Btgd/C - couleur id. point n°4, 120 horizon Cg, couleur 10YR5/6 à 120 cm.	Point n°15	hydromorphie apparente à partir de 30 cm, profondeur 110 cm, 0-30 cm horizon L - couleur id. point n°14, 30-50 horizon Ag, 50-70 tourbe, 70-100 horizon Ct, couleur 5GY6/1, 100-110 horizon C, roche à 110 cm.
Point n°7	0-30 cm horizon Lg - couleur id. point n°5, 30-40 horizon Ag, 40-50 horizon Ea, 50-80 horizon Btgd - couleur id. point n°5, charbonneux, 80- transition Btgd/C - couleur id. point n°5,	Point n°17	hydromorphie apparente à partir de 20 cm, arrêt sur cailloux à 50 cm, 0-30 cm horizon L - couleur 5YR3/1, 30-40 horizon Ag, 40-50 tourbe, 50- horizon C.
Point n°8	0-30 cm horizon L - couleur id. point n°6, 30-40 horizon Ag, 40-50 horizon Ea, 50-70 transition Btgd/C - couleur id. point n°6,	Point n°13	hydromorphie faible vers 30 cm, profondeur 120 cm, 0-30 cm horizon L, 30-35 horizon Ag, 35-50 horizon Eag, 50-90 horizon Btgd/C, couleur 10YR5/6 90-120 horizon C.
Point n°5	arrêt sur cailloux à 120 cm, schiste altéré talqueux, 0-30 cm horizon L - couleur id. point n°7, 30-50 horizon Ag, 50-60 horizon Eag, couleur 2.5Y5/2, 60-70 transition Btgd/C - couleur 2.5Y6/2, 70- horizon C	Point n°20	arrêt sur cailloux à 35 cm 0-30 cm horizon L, 30-35 horizon Ag.
Point n°11	arrêt sur cailloux à 90 cm, 0-30 cm horizon L - couleur id. point n°8, 30-50 horizon Ag, charbonneux à env. 30-40 cm, 50-60 horizon Eag, présence d'eau à 50cm, 60 horizon Btgd,	Point n°19	arrêt sur cailloux à 40 cm 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Ag, matières organiques à 30 cm.
Point n°10	arrêt sur cailloux à 100 cm, 0-30 cm horizon L - couleur id. point n°9, 30-60 horizon Ag, 60 horizon Btgd/C,	Point n°18	arrêt sur cailloux à 40 cm 0-20 cm horizon L, couleur 10YR3/2, 20-40 horizon Ag.
		Point n°21	arrêt sur cailloux à 30 cm 0-30 cm horizon L, couleur 10YR4/3.
		Point n°24	arrêt sur cailloux à 30 cm 0-30 cm horizon L, matières organiques à 30 cm.
		Point n°23	arrêt sur cailloux à 85 cm 0-20 cm horizon L, 20-50 horizon Eg, 50- horizon Btgd/C.

<u>Point n°22</u>	arrêt sur cailloux à 90 cm 0-30 cm horizon L, couleur 10YR4/3 - taches 7,5YR5/6, 30-50 horizon Eg, couleur 2.5Y7/6, 50- horizon Btg/C, couleur 2.5Y6/8.	<u>Point n°38</u>	arrêt sur cailloux à 60 cm, 0-30 cm horizon L, 30-50 horizon Eg, 55 horizon Btg/C.
<u>Point n°25</u>	arrêt sur cailloux à 90 cm 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, taches rouges couleur idem point n°21, 40-90 horizon Btg/C.	<u>Point n°39</u>	arrêt sur cailloux à 55 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, 40 horizon Btg/C.
<u>Point n°28</u>	arrêt sur cailloux à 100 cm 0-30 cm horizon L, 30-60 horizon Eg, 50-90 horizon Btg/C, 90-100 horizon C.	<u>Point n°43</u>	arrêt sur cailloux à 50 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon E, 40-50 horizon Bt/C.
<u>Point n°27</u>	arrêt sur cailloux à 40 cm 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg.	<u>Point n°42</u>	arrêt sur cailloux à 85 cm, 0-25 cm horizon L, 25-45 horizon E, 45 horizon Bt/C, présence d'altérite.
<u>Point n°26</u>	arrêt sur cailloux à 40 cm 0-30 cm horizon L, couleur 10YR3/4, 30- horizon Eg.	<u>Point n°41</u>	arrêt sur cailloux à 45 cm, 0-30 cm horizon L, 30 horizon E,
<u>Point n°30</u>	0-30 cm horizon L, 30-45 horizon Ag, 45-50 horizon Eg.	<u>Point n°40</u>	arrêt sur cailloux à 50 cm, 0-25 cm horizon L, 25-30 horizon E, 30 horizon Bt/C.
<u>Point n°31</u>	arrêt sur cailloux à 70 cm - hydromorphie apparente à 70 cm, 0-30 cm horizon L, 30-70 horizon Ag.	<u>Point n°45</u>	arrêt sur cailloux à 60 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon E, 40 horizon Bt/C.
<u>Point n°29</u>	arrêt sur cailloux à 110 cm - hydromorphie apparente à 90 cm, 0-30 cm horizon L, 30-50 horizon Ag, 50-70 horizon Eg, 70 horizon Btg	<u>Point n°47</u>	arrêt sur cailloux à 60 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon E, 40 horizon Bt/C.
<u>Point n°33</u>	arrêt sur cailloux à 60 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, 40 horizon Btg.	<u>Point n°46</u>	arrêt sur cailloux à 50 cm, 0-30 cm horizon L, 30 horizon S/C,
<u>Point n°34</u>	0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, 40-65 horizon Btg, 65 horizon Ct.	<u>Point n°44</u>	arrêt sur cailloux à 50 cm, 0-30 cm horizon L, 30 horizon S/C,
<u>Point n°32</u>	arrêt sur cailloux à 110 cm, présence d'eau à 110 cm, 0-25 cm horizon L, 25-40 horizon Eg, 40-90 horizon Btg, 90 horizon Ct.	<u>Point n°48</u>	arrêt sur cailloux à 40 cm, 0-30 cm horizon L, 30 horizon S/C,
<u>Point n°36</u>	arrêt sur cailloux à 150 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, 40-65 horizon Btg, 65 horizon Ct - passages d'altérite et de sable.		
<u>Point n°37</u>	0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Ag, 40-45 horizon Eg, 45-65 horizon Btg, aspect talqueux vers 60 cm, 65-70 horizon Ct.		
<u>Point n°35</u>	arrêt sur cailloux à 70 cm, 0-30 cm horizon L, 30-45 horizon Ag, 45-55 horizon Eg, 55 horizon Btg/C, présence d'altérite.		

Parcelle KERJOS : TRANSECT T2 - Description d'aval en amont

Résidus de maïs

<u>Point n°1</u>	remblais 120 cm sur ancien sol, 0-30 cm horizon Z - couleur 2.5Y4/3 - taches 2.5Y4/2, 30-60 horizon Z - couleur 2.5Y6/4 - taches 5Y5/8 et 2.5Y6/1, 60-100 horizon Z - couleur 5Y2.5/1, 100-120 horizon Z, 120-130 horizon Ag, couleur 10 YR4/3, 130-140 horizon Btg/C - couleur 10YR6/6, 140 horizon Ct.	<u>Point n°14</u>	arrêt sur cailloux à 130 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, 40-60 horizon Btg, 60-120 horizon Btg/C, 120 horizon C.
<u>Point n°8</u>	0-90 cm horizon Z, 90-120 horizon Ag - couleur id. point n°1, 120-140 horizon Btg/C - id. point n°1, 140- horizon Ct.	<u>Point n°15</u>	0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, 40-70 horizon Btg, 70-120 horizon Btg/C, 120 horizon C.
<u>Point n°9</u>	0-90 cm horizon Z, 90-110 horizon Ag - couleur id. point n°2, 110-140 horizon Btg/C - couleur 5G4/1, 140- horizon Ct.	<u>Point n°10</u>	arrêt sur cailloux à 100 cm 0-30 cm horizon L, couleur 7,5YR4/3, 30-35 horizon Eg, couleur 10YR7/8, 35-55 horizon Btg, couleur 10YR6/8, 55- horizon Btg/C.
<u>Point n°7</u>	0-100 cm horizon Z, 100-120 horizon Ag - couleur id. point n°3, 120-130 horizon Eag, 130-160- horizon Btg/C - couleur id. point n°3 , 160 horizon Ct.	<u>Point n°16</u>	légèrement lessivé, 0-30 cm horizon L, 30-35 horizon Eg, 35-60 horizon Sg, 60-120 horizon Sg/C, 120 horizon C.
<u>Point n°2</u>	0-70 cm horizon Z, 70-90 horizon Ag - couleur 5Y2.5/1, 90-125 horizon Eag - couleur 5Y7/1 - taches 10YR6/8, 125-140- horizon Btg/C - couleur 10YR6/8 , 140 horizon Ct.	<u>Point n°18</u>	très légèrement lessivé, arrêt sur cailloux à 90 cm, 0-30 cm horizon L, 30- horizon Sg.
<u>Point n°4</u>	0-45 cm horizon Z, 45-60 horizon Ag - couleur id point n°5, 60-70 horizon Eag - couleur id point n°5, 70-80 horizon Btg, 80-140- horizon Btg/C - couleur id point n°5, 140 horizon Ct.	<u>Point n°17</u>	arrêt sur cailloux à 100 cm, 0-25 cm horizon L, 25-60 horizon S, 60-90 horizon S/C, 90 horizon C.
<u>Point n°6</u>	0-40 cm horizon Z, 40-60 horizon Ag - couleur id. point n°6, 60-90 horizon Eag - couleur id. point n°6, 90-120 horizon Btg/C - couleur id. point n°6, 120 horizon Ct.	<u>Point n°21</u>	arrêt sur cailloux à 80 cm, 0-30 cm horizon L, 30- horizon S.
<u>Point n°5</u>	0-50 cm horizon Z, 50-60 horizon Ag - couleur id. point n°7, 60-80 horizon Eag - couleur id. point n°7, 80-90 horizon Btg, 90-140 horizon Btg/C - couleur id. point n°7, 140 horizon Ct.	<u>Point n°19</u>	arrêt sur cailloux à 100 cm, 0-30 cm horizon L, 30-50 horizon S, 50-90 horizon C.
<u>Point n°3</u>	arrêt sur cailloux à 80 cm, 0-40 cm horizon Z, 40-60 horizon Ag - couleur id. point n°8, 60- horizon Btg/C - couleur id. point n°8.	<u>Point n°20</u>	arrêt sur cailloux à 110 cm, 0-30 cm horizon L, 30-70 horizon S, 70- horizon C.
<u>Point n°12</u>	arrêt sur cailloux à 120 cm, 0-55 cm horizon Z, 55-60 horizon Ag - couleur id. point n°9, 60-70 horizon Eg, 70-100 horizon Btg/C - couleur id. point n°9, 100-120 horizon C.	<u>Point n°22</u>	arrêt sur cailloux à 80 cm, 0-25 cm horizon L, 25-40 horizon S, 40- horizon C.
<u>Point n°13</u>	arrêt sur cailloux à 80 cm, 0-30 cm horizon Z, 30-40 horizon Ag - couleur id. point n°10, 40-50 horizon Eg, 50- horizon Btg/C - couleur id. point n°10.	<u>Point n°23</u>	arrêt sur cailloux à 90 cm, 0-30 cm horizon L, 30-55 horizon S, 55- horizon C.
<u>Point n°11</u>	0-30 cm horizon L, 30-40 horizon Eg, 40-70 horizon Btg, 70-130 horizon Btg/C, 130 horizon C.	<u>Point n°24</u>	arrêt sur cailloux à 70 cm, 0-25 cm horizon L, 25-60 horizon S, 60- horizon C.
		<u>Point n°27</u>	arrêt sur cailloux à 90 cm, 0-30 cm horizon L, 30-70 horizon S, 70-90 horizon C.
		<u>Point n°26</u>	arrêt sur cailloux à 100 cm, 0-30 cm horizon L, 30-70 horizon S, 70-100 horizon C.

<u>Point n°29</u>	arrêt sur cailloux à 90 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon S, 40- horizon C.	<u>Point n°32</u>	0-30 cm horizon L, 30-50 horizon S/C, 50-70 horizon C, plus sableux 70- roche.
<u>Point n°28</u>	arrêt sur cailloux à 50 cm, 0-30 cm horizon L, 30- horizon C.	<u>Point n°31</u>	arrêt sur cailloux à 70 cm, 0-30 cm horizon L, 30-40 horizon S/C, 40-70 horizon C.
<u>Point n°25</u>	arrêt sur cailloux à 110 cm, 0-30 cm horizon L, 30-35 horizon S/C, couleur 10YR4/4, 35- horizon C, couleur 2.5YR5/6, passages d'altérite.	<u>Point n°30</u>	arrêt sur cailloux à 90 cm, 0-30 cm horizon L, 30-65 horizon S/C, 65- horizon C.
<u>Point n°34</u>	0-30 cm horizon L, 30-35 horizon S/C, 35-160 horizon C, passages d'altérite.	<u>Point n°35</u>	0-30 cm horizon L, 30-40 horizon S/C, 40-105- horizon C, 105- roche.
<u>Point n°33</u>	0-30 cm horizon L, 30-50 horizon S/C, 50-70 horizon C, 70- roche.		

ANNEXE 1f

Stabilité de structure et indice de battance, d'après Rémy & Marin-Lafèche (1974)

Le risque de battance est estimé par le rapport :

$$R = \frac{1,5L_f + 0,75L_g}{A + 10MO}$$

Rémy et Marin-Lafèche considère que les limons fins (Lf) ont une action dispersante deux fois plus forte que les limons grossiers (Lg) alors que la matière organique (MO) a une action stabilisante sensiblement égale à 10 fois celle de l'argile (A).

L'échelle d'appréciation correspond à :

R > 2	très battant
1,8 à 2	battant
1,6 à 1,8	assez battant
1,4 à 1,6	peu battant
< 1,4	non battant

Stabilité de structure et indice de battance modifié, d'après Rivière (communication orale)

Le risque de battance des sols bretons est alors estimé par le rapport :

$$R = \frac{2L_f + L_g}{A + 10MO}$$

L'échelle d'appréciation est identique à celle indiquée précédemment

ANNEXE 2

MESURES PHYSIQUES ET SUIVI DES ETATS DE SURFACE

ANNEXE 2a : MESURES D'HUMIDITE VOLUMIQUE DU SOL A 5 cm et 11 cm (TDR)

RENNES		dispositif n°6		dispositif n°7		dispositif n°8		dispositif n°9		dispositif n°10	
date	CUMUL pluie	humid moyenne à 5 cm	humid moyenne à 11 cm	humid moyenne à 5 cm	humid moyenne à 11 cm	humid moyenne à 5 cm	humid moyenne à 11 cm	humid moyenne à 5 cm	humid moyenne à 11 cm	humid moyenne à 5 cm	humid moyenne 11 cm
17-mai-94	49	25.67	29.50	24.73	27.20	18.83	23.17	25.10	25.33	23.20	23.70
20-mai-94	56.5	21.20	25.87	21.53	26.63	22.07	27.80	22.40	28.43	24.37	30.13
24-mai-94	74.5	28.40	30.80	27.13	31.13	26.27	30.87	28.13	29.30	27.77	30.63
27-mai-94	104.5	31.80	38.13	33.07	33.83	30.47	35.13	30.60	35.60	31.93	35.20
02-jun-94	117	27.17	31.37	20.20	28.13	21.30	28.93	21.53	28.97	22.17	28.23
05-jun-94	125.5	24.07	29.47	25.07	27.73	17.30	27.37	27.20	26.70	25.90	30.57
26-jun-94	136.5	20.10	24.03	17.70	21.07	18.87	23.80	19.00	24.77	19.60	22.43
19-jul-94	153.5	22.33	21.57	20.07	22.53	21.73	20.60	20.03	25.00	19.50	26.53
25-jul-94	175.5	24.13	26.93	23.03	23.97	20.90	22.17	19.27	23.50	21.00	19.43
28-jul-94	186	29.17	25.80	26.67	26.97	25.60	23.93	24.00	24.53	25.37	23.80
09-août-94	205.5	26.10	27.40	26.83	25.83	26.23	28.23	26.40	25.87	21.60	23.93
07-sep-94	248.5	26.47	28.90	28.27	30.57	27.83	28.10	31.47	29.70	30.07	28.03
09-sep-94	259	27.23	29.83	31.80	33.03	27.90	31.03	30.47	30.77	29.53	27.47
16-sep-94	292.5	33.77	34.27	33.87	34.83	32.67	34.47	33.57	34.23	32.57	34.93
26-sep-94	328.5	33.33	33.17	30.50	34.53	32.10	33.77	31.47	33.17	30.27	35.07
19-oct-94	341	31.90	33.93	31.97	33.63	27.77	31.67	30.93	32.17	28.77	29.10
10-nov-94	413.5	28.63	34.00	29.30	32.60			30.23	33.63	32.77	32.70
17-nov-94	429	29.77	35.20	30.33	35.50	30.50	35.63	28.18	34.53	30.70	34.97
12-déc-94	470.5	31.93	34.60	34.27	35.70	33.33	34.67	27.57	31.47	33.67	34.87
18-déc-94	481.5	32.10	36.17	36.77	34.17	33.00	34.37	32.40	31.97	31.93	32.93
28-déc-94	491.5	35.60	33.57	34.33	34.57	34.10	34.37	29.80	33.35	33.67	35.50
29-déc-94	511.5	37.00	35.50	34.57		33.37		32.73		34.47	
30-déc-94	512.5	33.63	44.03	36.50	34.37	33.80	34.83	33.63	33.67	33.47	35.40
02-jan-95	520.2	38.67	58.63	40.07	50.70	40.03	47.37	40.63	45.40	42.93	43.73
17-jan-95	551.2		34.80		34.97		35.07		35.47		35.40
23-jan-95	580.7	33.30	34.20	34.80	36.00	34.40	35.00	36.77	35.97	31.63	34.80
30-jan-95	633.7	38.50	34.87	36.60	35.07	36.17	35.50	34.67	34.83	32.43	34.50
01-fév-95	646.2	40.50	34.33	40.10	34.83	43.77	35.03	35.70	34.77	34.60	35.50
08-fév-95	651.2	36.03	35.27	34.67	35.37	34.37	33.93	32.87	33.87	34.53	33.33
13-fév-95	667.7	34.30	32.43	37.80	34.60	35.80	34.03	33.10	35.30	31.90	33.10
14-fév-95	671.7	36.77	34.93	36.23	32.80	35.13	35.17	31.50	34.90	35.40	36.30
27-fév-95	711.7	34.87	33.10	35.90	36.13	35.63	35.17	33.07	37.87	32.80	33.70
03-mar-95	720.7	36.93	35.43	36.70	35.80	36.93	35.70	34.93	35.97	36.63	36.10
07-mar-95	741.7	38.63	35.70	34.33	35.47	33.67	34.87	34.40	33.93	31.77	35.17

**ANNEXE 2b : MESURES DE REESSUYAGE - RENNES
(GASCUEL-ODOUX)**

en % d'humidité volumique

15 cm	13/03/1995		21/03/1995		24/03/1995		28/03/1995		03/04/1995		07/04/1995	
	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang
1	35.7	31.7	35.4	29.2	33.8	29.8	34.35	32	36.75	31.4	36.85	32.95
2	36.55	33	37.05	33.6	34.75	28.8	35.75	29.8	35.8	31.05	35.55	29.35
3	36.7	31.3	37.1	35.5	34.1	32	35.7	33	36.45	32.4	36.4	33
4	36.35	33.9	36.95	37.6	34.6	34.9	36.45	35.95	35.75	31.3	35.95	35.3
5	37.25	35.5	36.25	34.3	34.25	33.6	35.6	36.5	36.35	30.45	35.2	33.25
6	35	29.8	36.4	35.3	33.45	30.6	35.7	32.55	36	31.95	35.3	32.95
7	35.95	32.3	36.35	37.1	32.75	33	36.4	32.8	35.1	30.85	35.55	29.9
8	36.3	34.2	37.45	36.6	34.65	30.7	36.65	31.25	36.3	30.75	36.55	31.9
9	36.45	32	37.7	35.2	34.55	33.9	35.5	33.6	35.9	29.25	35.75	30.9
10	36.9	33.3	38.4	33.5	35.15	29.6	36.1	29.7	35.85	31.6	35.65	31.4
11	36.95	31.3	36.9	36.7	35.25	29.5	35.7	30.65	37.6	32.3	36.85	33.05
12	36.7	29.8	37.65	35.4	35	32.6	36.05	32.2	36.7	32.25	35.6	33.2
13	36.55	31.6	37.35	34	35.5	30.1	36.7	30.25	36	31.5	36.9	29.95
14	36.75	34.8	37.6	34.5	35.6	32.9	34.3	35.85	36.7	33.3	36.4	30.25
15	36.25	35.2	36.6	33.9	35	30.6	36.4	32.35	37.25	31.55	36.7	32.25
16	37.05	32.4	38.4	35.4	35.4	30.7	36.8	32.75	36.55	32.5	36.55	31.5
17	38.05	34.6	37.85	38.1	36.6	32.6	37.4	36.55	35.85	35.75	37.85	35.65
18	38.25	35.2	39.4	36	36.1	31.2	35.25	35	36.6	35.1	37.45	32.85
19	37.15	34.8	38.3	33.7	36.4	33.4	37.9	33.8	37.9	33.85	38.45	32.85
20	38.45	37.2	38.45	33.9	36.05	35.2	36.05	34.5	37.8	32.4	36.95	31.4
21	37.5	34.9	38.6	34.1	35.5	32.4	36.65	31.6	37.3	31.95	37.4	35.05
22	37.35	35	38.65	37.4	35.65	33.3	36.6	35.9	36.35	34	36.55	35.05
23	37.05	36.6	33.4	37.6	32.25	34.3	35.2	33.7	33.8	35.25	31.45	34.45
24	36.35	34.6			32	31.1	36.6	33.2	34.6	36.35	34.7	34.85

30 cm	13/03/1995		21/03/1995		24/03/1995		28/03/1995		03/04/1995		07/04/1995	
	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang	inter-rang	rang
1	34.8	33.8	35.65	29.5	34.15	30.1	34.15	31.35	35.85	31.25	35	32.9
2	35.8	31.9	36.6	34.9	33.4	25.1	33.95	29.5	33.75	29.4	34.85	29.45
3	35.55	31.5	36.2	36.7	34.7	34.1	35	33.1	35.2	32.6	35.15	32.5
4	35.75	34	36.85	37.3	34.7	34.9	34.8	35.05	34.05	32.05	33.75	34.4
5	36.3	32.8	36.85	33.6	35.25	35	33.75	34.7	33.95	30.95	33.35	32.6
6	35.3	30.6	35.75	36.5	33.85	31.6	34.9	31.7	35.2	30.95	34.7	31.15
7	35.6	32	35.8	36.9	33.75	31.3	34.25	31.65	34.7	30.95	34	29.3
8	35.2	33.2	36.65	35.6	34.75	31.3	35.15	31.6	34.85	30.3	35.45	30.45
9	35.65	32.2	37.15	33.5	33.35	35.3	34.65	32.9	34.55	30.75	33.85	31
10	35.3	33.4	37.05	33.2	34.55	30.6	34.5	30.45	34.35	29.75	33.55	30.3
11	36.45	32.6	36.7	37.1	34.2	29.4	35.05	29.85	35.8	31.6	34.9	30.75
12	35.95	29.2	37.25	35.2	33.65	33	35	32.05	35.1	32.05	33.8	33
13	35.3	32	36.5	34.8	34.85	31.2	35.2	29.65	34.05	30.8	34.85	29.6
14	35.9	34.8	36.85	34.3	35.25	34.3	33.9	34	35.85	33.25	34.9	30.6
15	35.1	32.9	36.15	34.3	34.85	31.7	34.1	32.45	35.35	31.35	34.15	32
16	36.5	33.7	37.95	36.6	35	32.2	35.1	33.15	35.3	32.25	35.4	31.85
17	37.3	35.4	38.2	36.5	36.3	34.6	36.05	35.95	35.3	34	35	33.75
18	37.65	35	38.75	36.7	36.3	32.5	34.85	34	35.9	33.85	35.65	33.15
19	36.3	35.8	38.1	33.6	36.25	33.8	37.35	33.55	36.75	31.65	36.6	32.95
20	37.45	36.4	37.1	34.4	35.95	35.5	35.75	33.4	36	30.7	34.75	29.8
21	36.6	35.2	37.5	36.5	34.1	32.9	35.55	30.75	34.95	30.3	35.35	33.7
22	36.4	35.7	37.65	36.4	35.85	32.5	35.6	32.05	35	30.9	34.3	32.3
23	36.3	35.9	33.9	36.7	32.9	35.4	32.85	31.9	31.95	30.95	30.95	32.75
24	36.05	35.2			31.35	33.7	34.4	32.7	31.9	33.2	32.35	32.3

ANNEXE 2d : MESURES DE CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE RENNES (HEDDADJ)

exprimées en m/s

SERIE 1 : JUIN		SITE AVAL				SITE AMONT			
répétitio		K10	K30	K60	K150	K10	K30	K60	K150
Sans passage de roue	1	3.8476E-06	1.8629E-06		5.6561E-07	4.204E-06	1.7254E-06		4.5137E-07
	2	2.634E-06	1.1597E-06		3.2428E-07	5.0986E-06	2.1042E-06		5.5677E-07
	3	3.842E-06	1.5933E-06		4.2399E-07	5.8875E-06	3.0254E-06		7.5644E-07
	4	2.7478E-06	1.3485E-06		4.1418E-07	3.794E-06	1.9824E-06		6.5034E-07
Passage de roue	1	3.1434E-06	1.4492E-06		4.2447E-07	3.1364E-06	1.7002E-06		6.0198E-07
	2	2.8802E-06	1.4859E-06		4.9335E-07	3.5475E-06	1.8867E-06		6.524E-07
	3	4.0569E-06	1.8883E-06		5.5884E-07	4.3878E-06	2.1562E-06		6.69E-07
	4	3.3323E-06	1.7356E-06		5.6561E-07	4.2275E-06	2.2275E-06		7.4984E-07
SERIE 2 : OCTOBRE									
Sans passage de roue	1	1.7236E-06	8.3303E-07	3.5665E-07	2.3238E-07	2.8346E-06	1.5279E-06	6.6305E-07	3.2393E-07
	2	1.6721E-06	9.4914E-07	4.1062E-07	1.9816E-07	2.199E-06	1.0774E-06	4.2005E-07	2.0679E-07
	3	1.7137E-06	9.1915E-07	3.9548E-07	1.8217E-07	2.2709E-06	1.1429E-06	4.4576E-07	2.1431E-07
	4	2.1646E-06	9.9413E-07	3.9345E-07	1.8217E-07	1.6713E-06	9.1696E-07	4.1426E-07	2.2279E-07
Sans passage de roue sans croûte	1	2.0176E-06	1.1194E-06	4.9992E-07	2.6759E-07	3.2872E-06	1.7019E-06	6.2751E-07	2.3101E-07
	2	2.6943E-06	1.0808E-06	3.7388E-07	1.5675E-07	1.7648E-06	7.878E-07	3.2026E-07	2.049E-07
	3	1.3748E-06	8.3575E-07	4.2334E-07	2.1237E-07	1.5727E-06	9.7783E-07	4.6657E-07	2.359E-07
	4	4.458E-07	1.0507E-06	5.7918E-07	1.829E-07	1.4979E-06	8.4533E-07	4.0543E-07	2.0546E-07
Passage de roue	1	1.4845E-06	8.3291E-07	4.8187E-07	1.814E-07	1.5306E-06	8.5947E-07	4.013E-07	2.6452E-07
	2	2.1962E-06	1.2637E-06	4.8187E-07	1.814E-07	1.4104E-06	8.4585E-07	3.7351E-07	2.0646E-07
	3	2.3888E-06	1.8116E-06	9.373E-07	4.1705E-07	1.8425E-06	8.7797E-07	3.4453E-07	2.6522E-07
	4	2.1057E-06	1.1019E-06	4.9056E-07	3.1821E-07	1.7438E-06	9.4346E-07	3.9159E-07	2.2339E-07
SERIE 3 : AVRIL									
Sans passage de roue	1	1.1842E-06	4.0404E-07	1.3331E-07	5.6227E-08	3.248E-06	8.5344E-07	2.5392E-07	9.093E-08
	2	9.8147E-07	3.2621E-07	1.075E-07	5.9029E-08	1.6766E-06	8.2056E-07	3.0895E-07	1.2656E-07
	3	9.8147E-07	3.2621E-07	1.075E-07	5.9029E-08	2.1687E-06	9.1713E-07	3.0185E-07	1.1448E-07
	4	8.9082E-07	2.8475E-07	8.9291E-08	4.66E-08	1.5702E-06	7.5581E-07	2.9166E-07	1.2598E-07
Passage de roue	1	1.8631E-07	1.4167E-07	8.8585E-08	6.6656E-08	4.4269E-07	3.9889E-07	1.8517E-07	5.8677E-08
	2	4.1599E-07	2.188E-07	6.1198E-08	4.049E-08	1.0172E-06	5.4997E-07	2.2517E-07	1.0651E-07
	3	4.5013E-07	2.9079E-07	1.302E-07	6.7782E-08	1.3673E-06	6.2163E-07	2.1921E-07	1.2305E-07
	4	4.3788E-07	3.3283E-07	1.5552E-07	5.9444E-08	1.1969E-06	6.208E-07	2.4156E-07	1.1235E-07

**ANNEXE 2e : MESURES DE DENSITE APPARENTE - RENNES
(GASCUEL-ODOUX et HEDDADJ)**

	répétitio	Passage de roue			Sans passage de roue		
		juin	octobre	avril	juin	octobre	avril
Amont	1	1.541998408	1.380493631	1.363108264	1.325557325	1.206926752	1.328930092
	2	1.409474522	1.304896497	1.416384833	1.244785032	1.206807325	1.407233518
	3	1.496855096	1.378264331	1.477459913	1.130812102	1.178264331	1.357219592
	4		1.354737261	1.311423228		1.169028662	1.269565909
Convexité	1	1.375995223	1.338495223	1.251979469	1.120501592	1.181170382	1.253053754
	2	1.447890127	1.376632166	1.41121235	1.151512739	1.164808917	1.293041022
	3	1.45183121	1.3875	1.506823698	1.217595541	1.069267516	1.244618629
	4		1.373447452	1.561254128		1.071974522	1.289857956
Pente	1	1.438535032	1.438654459	1.497871325	1.157563694	1.191600318	1.294552978
	2	1.41397293	1.431488854	1.536306848	1.16361465	1.088216561	1.22034775
	3	1.347611465	1.450676752	1.548681017	1.214968153	1.113057325	1.29403573
	4		1.41580414	1.54147933		1.169307325	1.210917917
Concavité	1	1.471297771	1.417595541	1.53980822	1.315047771	1.132802548	1.326900887
	2	1.516839172	1.423686306	1.556678471	1.136146497	1.187619427	1.356662555
	3	1.460111465	1.423128981	1.55834958	1.158200637	1.145302548	1.268292683
	4		1.373765924	1.590458759		1.171058917	1.293200175
Aval	1	1.524363057	1.417595541	1.590697489	1.248367834	1.170780255	1.446663749
	2	1.470660828	1.420541401	1.573469144	1.261504777	1.107484076	1.399076911
	3	1.326910828	1.400039809	1.488123185	1.212181529	1.08343949	1.396411093
	4		1.371058917	1.510563801		1.17830414	1.414952453

ANNEXE 3

CARACTERISATION DU RUISSELLEMENT

ANNEXE 3a : VOLUMES RUISSSELES

RENNES CAMPAGNE 1993 : PETITS POIS

dispositifs		4	8	12	3	7	11	2	6	10	1	5	9
dist/rg2		264.00	264.00	264.00	198.00	198.00	198.00	132.00	132.00	132.00	66.00	66.00	66.00
date	pluie (mm)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)
05-avr-93	17.5	0.16	0.06	0.02	0.06	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
12-avr-93	9	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.15
16-avr-93	11	0.00	0.00	0.01	0.01	0.24	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09	0.12
22-avr-93	10	5.00	0.02	0.02	0.01	1.15	0.54	0.40	0.36	1.50	0.68	0.66	0.68
26-avr-93	14.5	0.02	0.08	0.01	0.01	0.90	0.25	0.16	0.01	0.11	0.65	0.37	0.50
28-avr-93	1	0.01	0.17	0.04	0.24	0.37	0.02	0.19	0.10	0.19	0.02	0.10	0.28
12-mai-93	7.5	0.00	0.08	0.03	0.01	0.11	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.05
17-mai-93	12.5	0.00	0.04	0.00	0.15	0.46	0.01	0.14	0.02	0.00	0.01	0.08	0.51
25-mai-93	4.5	0.03	0.00	0.02	0.03	0.06	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.06	0.03
09-jun-93	30	3.15	3.95	13.50	18.75	16.00	21.00	16.00	21.00	21.00	17.75	20.00	12.50
10-jun-93	7.5	0.16	0.50	0.21	6.00	1.35	12.25	0.36	21.00	6.75	2.70	1.50	11.00
11-jun-93	76	0.00	3.95	11.50	9.25	12.35	21.00	2.50	21.00	21.00	0.02	1.25	12.50
15-jun-93	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.38	0.00

RENNES CAMPAGNE 1993-1994 : PHACELIE - SOL NU

culture		Phacélie													
dispositifs		14	13	12	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dist/rg2		250.00	192.00	128.00	64.00	250.00	226.00	192.00	176.00	160.00	148.00	128.00	97.00	64.00	36.00
date	pluie (mm)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)
11-oct-93	6	0.00	0.03	0.05	1.12	0.01	0.13	0.08		0.04		1.13	1.45	0.10	0.12
12-oct-93	17	0.00	0.61	0.32	0.55	9.55	12.75	8.65		0.00		12.50	21.00	0.25	0.50
14-oct-93	30	0.00	1.00	1.60	1.24	21.00	21.00	21.00		10.00		21.00	21.00	1.00	1.50
25-nov-93	25	0.00	0.90	1.20	0.80	3.30	0.85	1.00		0.30		1.80	21.00	0.45	0.30
16-déc-93	34	0.15	1.75	1.40	1.00	0.85	0.50	1.70	0.17	0.75	4.00	0.10		0.12	0.53
04-jan-94	60	0.13	1.90	2.90	2.25	1.00	1.10	3.00	0.60	1.70	10.75	0.70	0.25	0.25	1.70
14-jan-94	50	2.60	1.45	3.90	2.10	21.00	14.25	21.00	21.00	14.25	21.00	7.40		1.50	21.00
27-jan-94	31	0.00	1.00	2.00	1.87	15.52	13.00	13.50	1.12	9.50	21.00	7.35		1.55	18.00
04-fév-94	28	0.33	1.50	1.80	1.75	1.25	1.75	1.50	0.65	1.50	12.75	2.60		1.75	2.00
10-fév-94	14	0.16	0.38	0.34	0.66	0.75	0.28	0.29	0.00	0.35	3.35	0.20		0.30	0.38
21-fév-94	41	0.10	1.25	2.52	1.60	2.00	0.64	0.98	0.28	1.46	17.00	0.90		1.21	5.36

ANNEXE 3a : VOLUMES RUISSÉES

dispositifs		1	6	11	2	7	12	3	8	13	4	9	14	5	10	15
date	dist/gr2	270.00	270.00	270.00	218.33	218.33	218.33	166.67	166.67	166.67	107.50	107.50	107.50	52.50	52.50	52.50
	pluie (mm)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)	V.R.(l)
	l(mm/h)															
17-mai-94	30	1.00	0.50	1.25	60.00	1.80	4.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
20-mai-94	17	0.25	0.20	0.40	0.30	0.40	0.15	0.40	0.25	0.20	0.35	0.30	0.45	0.35	0.10	0.35
24-mai-94	6.5	0.75	0.48	0.90	1.75	0.75	0.60	3.20	1.10	1.50	1.50	1.50	1.70	3.60	0.60	2.40
27-mai-94	20.5	0.10	0.10	0.08	11.00	0.20	0.40	31.00	8.00	60.00	3.10	3.00	60.00	9.00	1.40	0.90
02-jun-94	8.5	2	0.50	0.20	1.30	0.45	0.40	0.40	0.60	0.40	0.00	0.20	0.40	0.75	0.00	0.40
04-jun-94	9	0.50	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.50	0.40	0.10	0.25	0.80	0.10	0.75	0.00	0.10
25-jun-94	11	0.00	0.20	0.00	0.55	0.10	0.10	0.20	0.20	0.50	0.10	0.05	0.20	0.55	0.00	0.05
17-jul-94	17	0.10	0.50	0.50	0.50	2.00	1.50	0.50	0.50	1.20	2.10	7.60	60.00	1.00	1.00	12.00
24-jul-94	22	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	46.00	60.00	60.00	6.00	60.00
28-jul-94	10.5	15.00	30.00	60.00	60.00	45.00	60.00	60.00	60.00	60.00	45.00	18.00	60.00	28.00	10.00	11.00
09-août-94	11.5	40.00	59.00	59.00	60.00	60.00	55.00	60.00	60.00	58.00	60.00	60.00	60.00	60.00	10.00	58.00
06-sep-94	27	3.5	0.50	0.40	10.00	2.00	1.00	9.00	1.20	6.00	12.00	1.00	60.00	4.00	0.40	0.90
09-sep-94	17	3.5	0.40	10.00	60.00	60.00	15.00	60.00	60.00	60.00	60.00	1.00	60.00	60.00	1.00	60.00
16-sep-94	35.5	6.5	25.00	23.00	55.00	60.00	50.00	60.00	60.00	60.00	60.00	10.00	60.00	60.00	10.00	60.00
21-sep-94	24	0.70	0.50	1.75	1.70	0.70	1.30	3.00	1.70	0.50	0.75	1.00	Sonde	0.50	0.50	3.00
26-sep-94	25	2	0.40	0.60	5.00	4.00	0.80	5.00	1.00	0.80	1.00	0.60	"	0.80	1.20	3.00
19-oct-94	12.5	5.5	0.00	0.00	0.50	0.05	0.60	0.30	0.05	0.00	0.10	0.05	"	0.10	0.00	0.00
09-nov-94	22	2.25	1.50	15.00	15.00	10.00	2.00	9.00	60.00	5.00	1.50	5.00	"	40.00	0.20	1.00
15-nov-94	15.5	3	9.00	0.75	12.00	3.00	0.70	9.00	60.00	60.00	60.00	15.00	"	60.00	0.20	1.30
05-déc-94	8	3	0.40	0.30	0.40	3.75	2.00	1.75	1.00	1.75	0.80	0.00	"	0.80	0.30	20.00
08-déc-94	9	3.5	60.00	2.00	2.00	60.00	12.00	36.00	4.00	60.00	35.00	1.50	"	12.00	5.00	60.00
18-déc-94	10	5	0.10	4.00	0.60	38.00	7.00	10.00	1.60	55.00	16.00	0.20	"	5.00	4.00	60.00
21-déc-94	3.5	1.5	0.00	0.10	0.10	1.00	0.65	0.25	0.40	0.80	0.00	0.00	"	0.00	0.00	2.00
28-déc-94	5.3	2	0.00	0.30	0.30	1.50	0.50	0.30	0.30	0.00	0.00	0.00	"	0.00	0.00	2.00
29-déc-94	15	4	0.40	60.00	0.90	60.00	6.00	11.00	3.00	20.00	17.00	0.40	"	0.40	1.70	60.00
30-déc-94	6	2.5	60.00	40.00	1.00	60.00	2.50	54.00	3.50	60.00	55.00	0.40	"	7.00	11.00	60.00
02-jan-95	7.5	1	2.70	1.00	0.20	9.00	2.00	1.70	1.20	3.40	1.60	0.00	"	0.60	1.20	14.00
11-jan-95	1.3	1	0.40	0.50	0.50	1.50	0.75	0.30	0.50	0.40	0.50	0.25	"	0.30	0.20	0.10
17-jan-95	17	5.5	60.00	38.00	1.75	60.00	23.00	24.00	5.00	60.00	40.00	1.75	"	5.00	11.00	60.00
19-jan-95	44	6	60.00	20.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	17.00	"	60.00	60.00	60.00
23-jan-95	23.5	3	60.00	20.00	60.00	60.00	60.00	33.00	5.00	60.00	25.00	1.20	"	6.00	15.00	60.00
26-jan-95	22	2.5	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	10.00	60.00	60.00	0.75	"	10.00	10.00	60.00
30-jan-95	29.5	1.5	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	20.00	60.00	60.00	1.00	"	20.00	20.00	60.00
01-fév-95	15	3	60.00	60.00	0.50	3.20	5.00	6.00	3.00	60.00	18.00	1.00	"	1.00	5.00	60.00
08-fév-95	5.9	1.5	0.00	0.00	0.50	60.00	25.00	1.00	2.00	0.75	0.50	0.00	"	0.00	0.50	5.00
13-fév-95	10	2	39.00	32.00	0.00	60.00	6.00	1.00	2.00	préleveur	4.00	0.00	"	2.00	2.50	49.00
14-fév-95	3	2	0.00	3.50	7.00	5.00	6.00	0.30	0.40	"	1.00	0.00	"	0.30	0.30	3.00
15-fév-95	6	2.5	40.00	44.00	15.00	60.00	10.00	2.50	0.40	"	2.20	0.00	"	2.30	0.00	32.00
27-fév-95	22	5	60.00	60.00	60.00	60.00	30.00	30.00	30.00	"	10.00	4.00	"	35.00	35.00	35.00
02-mar-95	8	3	28.00	60.00	5.00	60.00	15.00	5.00	3.50	"	21.00	5.00	"	6.00	9.00	60.00
06-mar-95	7	2	0.20	0.75	5.00	5.00	0.00	0.00	2.00	"	2.00	0.00	"	1.00	1.00	60.00
07-mar-95	15	2.5	60.00	60.00	60.00	40.00	60.00	12.00	48.00	"	36.00	4.50	"	24.00	28.00	60.00

ANNEXE 3a : VOLUMES RUISSELES

NAZIN : SITES DE TOCPOLOUZ ET KERJOS : CAMPAGNE 1994 : MAÏS

Site			Tocplouz					Kerjos										
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5						
	dispositifs																	
	dis/rg2																	
date	pluie (mm)	I (mm/h)																
31-mai-94	0	0			305.00	194.40	250.00	305.00	47.00	115.00	47.00	305.00	240.00	200.00	153.74	115.00		
			V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)	V.R(I)
08-jun-94	45.5	9	0.00	0.00	0.75	30.00	5.00	0.00	0.00	60.00	60.00	50.00	0.50	0.50	5.00	0.00	0.00	0.00
21-jul-94	29	13.5	0.00	0.00	0.75	2.50	1.00	22.00	10.00	22.00	10.00	5.50	8.00	4.00	0.20	6.50	0.00	0.00
18-aoû-94	16.5	4	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.50	0.10	0.50	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
08-sep-94	48.5	7	0.30	0.90	0.30	0.40	0.90	2.10	0.50	2.10	0.50	60.00	7.00	24.00	0.10	20.00	0.00	0.00
20-sep-94	50.5	9.5	2.25	1.00	2.25	0.80	1.00	1.00	0.75	1.00	0.75	60.00	1.60	4.25	8.00	60.00	8.00	60.00
30-sep-94	67	10.5		2.50		4.70	2.50	2.00	1.00	2.00	1.00	60.00	8.00	1.00	0.75	15.00	0.75	15.00

ANNEXE 3b

EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS, VOL. 21, 843-851 (1996)

SPATIAL VARIATIONS OF SHEET FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT ON AN AGRICULTURAL FIELD

C. GASCUEL-ODOUX, S. CROS-CAYOT AND P. DURAND

INRA, Science du Sol, 65 Route de Saint-Brieuc 35042 Rennes Cedex, France

Received 14 June 1994

Accepted 3 October 1995

ABSTRACT

This paper presents the spatial and temporal variations of sheet flow and sediment transport on an agricultural field under natural rainfall. The study site is located in western France (Rennes, Brittany) where rainfall amount and intensity are moderate. It is a field of garden-peas presenting a convex-concave gentle slope where only sheet flow is observed. A network of simple, low-cost collectors is used to measure sheet flow and sediment transport along the slope and to estimate the spatial variability for a given position on the slope. The water and sediment discharge was measured for each rainfall event from February to June. The analysis of space and time variations according to the characteristics of the rainfall events, changes in vegetation and soil crusting shows that the sheet flow is low and the runoff coefficient decreases as the slope length increases. Infiltration is particularly active in concave parts of the hillslope whatever the characteristics of the rainfall events. Sediment transport decreases in time as the soil crusts and vegetation develops.

KEY WORDS sheet flow; sediment transport; topography; sheet flow collectors; Armorican massif

INTRODUCTION

Sheet flow, i.e. a thin, continuous sheet of water running on the soil surface, induces a spatial redistribution of water and particles on the slope and, therefore, of absorbed or dissolved molecules of fertilizers and pesticides. This redistribution determines the acquisition of water chemistry on the hillslope, and possibly preferential locations for infiltration or deposition that may induce soil toxicity symptoms such as are sometimes observed downslope (Auzet, 1987, 1990). Complex processes act along the hillslope, consisting of a succession in space of infiltration and overland flow generation, of sediment removal and deposition whose relative magnitude varies in time according to the characteristics of the rainfall events. The variations in space are related to microtopography and the local soil physical properties. This may be indirectly related to the macrotopography: for example soil sealing depends on slope steepness (Poesen, 1992). Macrotopography also directly affects these variations in space: for example, runoff decreases and infiltration increases as the slope length increases (Poesen and Bryan, 1989; Molinier *et al.*, 1991; Poesen, 1992). This scale effect was shown on homogeneous plots (Dulay and Ackerman, 1934; Mutchler and Greer, 1980).

Time and space variations of numerous factors such as the characteristics of the rainfall events, the soil surface, the soil moisture and the slope morphology must be taken into account to explain the spatial structure of overland flow and sediment transport. Several authors have studied the problem of spatial variations of overland flow and sediment transport according to the slope (De Ploey, 1969; Poesen, 1981; Mathier and Roy, 1993) and this remains a critical point in hydrological and hydrochemical modelling.

This paper presents a method for analysing the spatial variations of overland flow and sediment transport in an agricultural field under gentle climate and topography in western France (Rennes, Brittany). The experimental design consists of a network of simple, unbounded and non-overlapping plots. The amount of water and sediment by plot was measured after each rainfall event. This network allows measurements

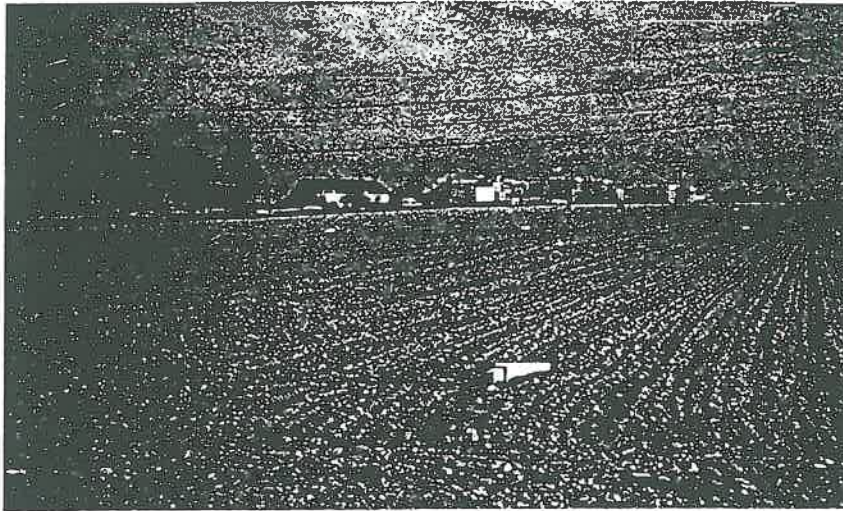


Figure 1. The study field at the beginning of the study period when the devices were being set up

both of the spatial variations according to the slope length and of the spatial variability for the same position on the slope. Only a few papers take this approach (Bonell and Williams, 1987; Williams and Bonell, 1987; Mathier and Roy, 1993).

MATERIAL AND METHODS

The study field is located near Rennes (Brittany, France). The area has a temperate Atlantic climate. The mean annual rainfall is about 750 mm. The mean rainfall intensity is always lower than 40 mm h^{-1} ; most of the time it is much lower, ranging from 0.1 to 5 mm h^{-1} on 168 days per year; rainstorms over 10 mm h^{-1} occur on only 17 days per year (Larivière and Verdou, 1976). The study field (Figure 1) presents a regular slope of about 4.5 per cent for 200 m, changing progressively to 1.5 per cent over the last 50 m, resulting in a slightly concave downslope element. The bedrock is composed of primary Brioverian shales. Soils are loamy, about 70 per cent loam, with low content of clay and organic matter, respectively about 17 and 2 per cent. The precise soil texture was determined between 10 and 20 cm in depth at three positions on the slope (Table 1) and shows that the finest textures are observed upslope and downslope. Soils are very sensitive to compaction with weak structural stability. Overland flow and sheet erosion result mainly from soil sealing and from compaction due to implement tracks (Bruneau and Gascuel-Odoux, 1990; Gascuel-Odoux *et al.*, 1991).

Cultivation consisted of garden peas that were sown in rows running directly downslope. The spacing between the rows was 18 cm. The microrelief combined two aspects. First, the wheel tracks induced slight

Table I. Soil texture, organic matter and pH measured at 10–20 cm in depth at three positions on the slope

	Clay	Silt		Sand		pH	Organic matter (%)
	< $2 \mu\text{m}$	2– $20 \mu\text{m}$	20– $50 \mu\text{m}$	50– $200 \mu\text{m}$	> $200 \mu\text{m}$		
Upslope	15.6	22.7	47.3	9.9	4.5	6.8	1.98
Midslope	14.7	26.1	47.9	7.2	4.1	6.4	1.81
Downslope	17.2	26.8	42.2	8	5.8	7.2	2.1

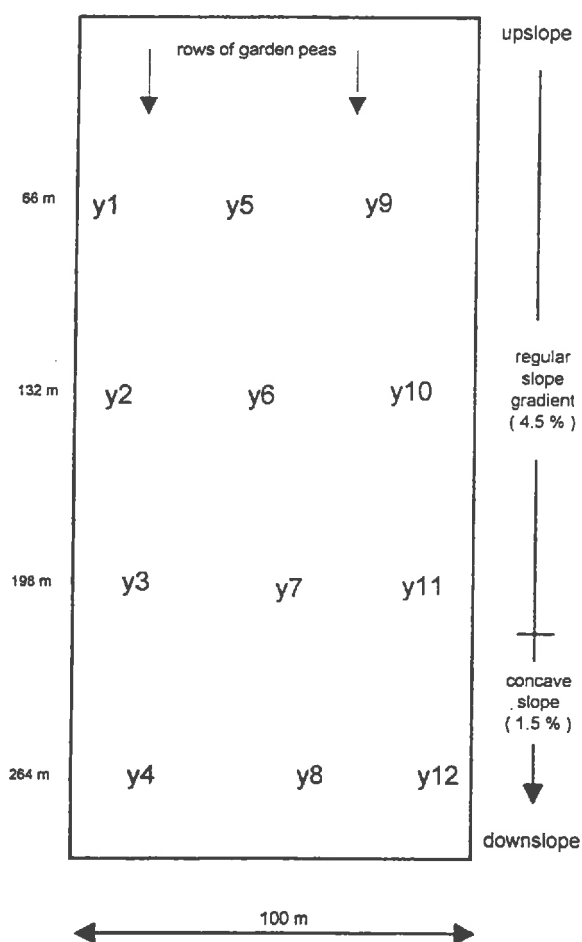


Figure 2. The network of unbounded and non-overlapping plots on the agricultural field

elevation differences of 2 to 3 cm every 4 m: these tracks were smoothed over during the sowing operations and were scarcely visible on the soil surface. Second, a clear elevation difference of 7 to 8 cm was caused by the cultivation rows but softened with time.

Twelve sampling points were chosen for collecting surface water and sediment: three sampling points were located at four regularly spaced positions on the slope (Figure 2). In detail, for each sampling point, the collector was set where the runoff was likely to be most important according to the soil surface aspect and in a row that would not be used by the tractor for subsequent herbicide spreadings. The distributors are usually very wide and the tractor does not take all the rows for spreading.

The collectors were designed to be cheap and easy to install and remove when required for crop harvesting and sowing. Each collector (Figure 3) comprises two PVC plates 0.7 m long forming an isosceles triangle. These plates are fixed vertically in the soil by a cement. This cement is covered by a quickly polymerized liquid resin to avoid disintegration of the cement by surface water. Unlike a former prototype design for tropical conditions (Planchon, 1991), the triangular collecting area is not protected by a resin because there is no risk of rilling in this context and because any resin would be taken off due to the high frequency of soil wetting and drying cycles. Moreover, this avoids any modification of the natural surface and allows the development of biological and fissural macropores. The two PVC plates are stuck to the bottom part of a gutter that is connected to a square, 50 cm long pipe by means of a wide rubber band. This square pipe leads to a 25 l container. This capacity was sufficient to minimize spillovers in the context of this study.

C. GASCUEL-ODOUX, S. CROS-CAYOT AND P. DURAND

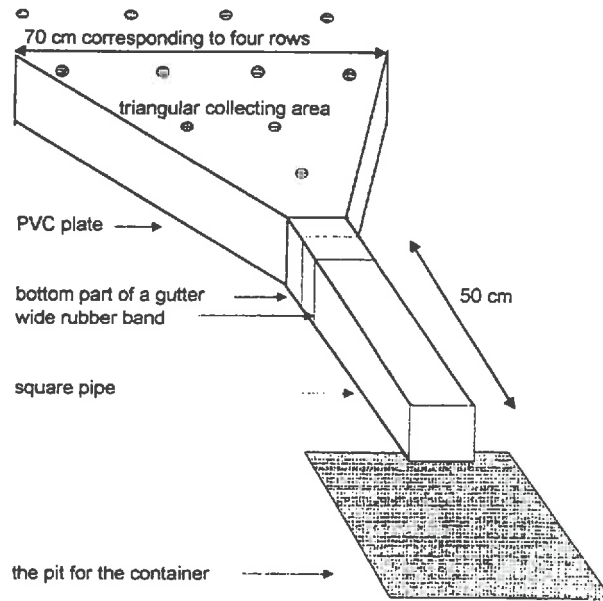


Figure 3. The device used for collecting water and sediment

The experimental design was monitored for five months, from February to June. This period had 21 wet days, three of them with a mean rainfall intensity higher than 5 mm h^{-1} (Figure 4). The amount of water collected was noted after each rainfall event. It corresponds to the runoff volume if there is no spillover. The sediment load was measured on the whole volume collected when it was lower than 250 cm^3 , otherwise on aliquots of 250 cm^3 after mixing the whole volume. The containers were emptied and cleaned after each rainfall event. A runoff coefficient was estimated for each collector and each rainfall event as the ratio between the collected volume and the volume of the rainfall event corresponding to the contributive upslope area for each collector. This area is estimated as the upslope length to the collector—66, 132, 198 or 264 m—multiplied by the width of the collecting area—0.7 m—which corresponds approximately to four seed rows. This runoff contributive upslope area is correctly estimated when the rows are running directly downslope and are well defined. It is typically the case for maize fields. Here, the estimation is less precise because flow paths did not necessarily correspond exactly to the rows, especially when the relief of the rows had softened with time.

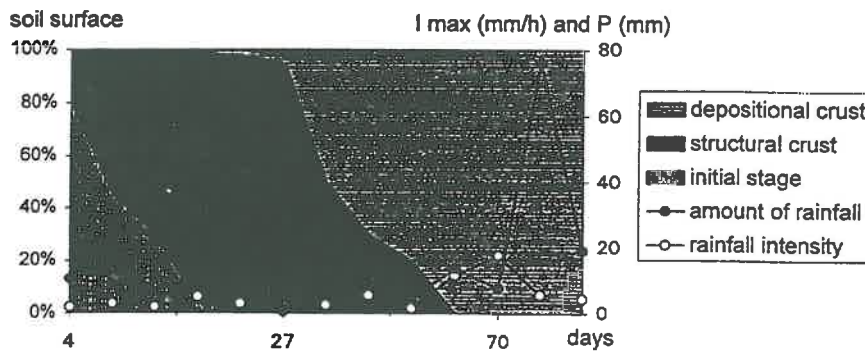


Figure 4. Amount of water by rainstorm (mm), maximum rainfall intensity (mm h^{-1}) and nature of soil surface during the study period

SPATIAL VARIATIONS ON AN AGRICULTURAL FIELD

847

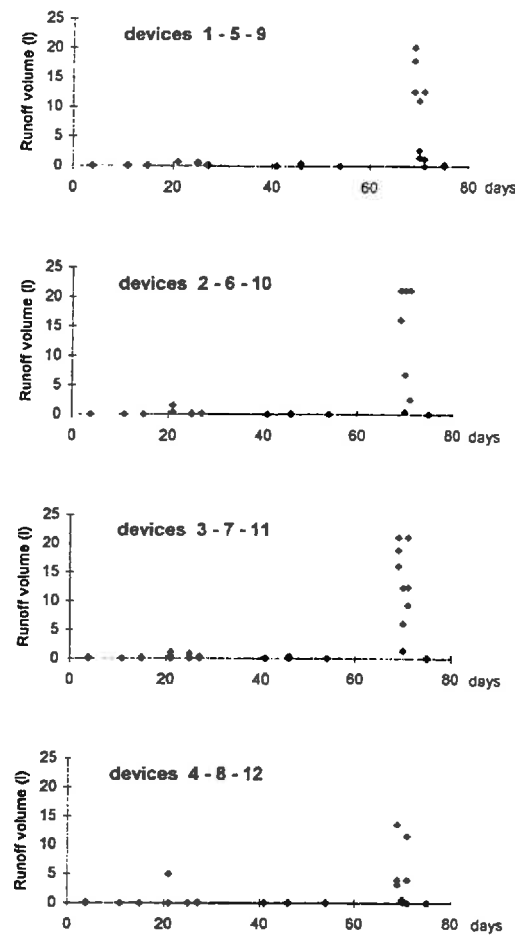


Figure 5. Runoff volume versus time and versus the position on the slope: three values for each corresponding to the three collectors located at the same position on the slope

The condition of the soil surface was described according to the classifications by Bresson and Boiffin (1990), Bresson and Valentin (1990) and Valentin and Bresson (1992) during the study period and at the four positions on the slope. Only three conditions have been distinguished: initial soil surface, structural crust and depositional crust (Figure 4). The proportions of soil surface covered by the different conditions for a given date are mean values for the whole field; no difference was observed between the different plots of the same position on the slope. A small difference was observed, though not precisely quantified, between the plots located at different positions on the slope: the soil surface crusting is slightly slower downslope than upslope, probably due to the variation of soil composition on the slope (Table I).

RESULTS

No runoff occurred as long as there was no crust at the soil surface and no heavy rain (Figure 5). A small and randomly distributed runoff was measured during April, corresponding to moderate rainfall intensity, an incomplete development of the soil surface crust and vegetation cover. Runoff was five to ten times higher in June when the rainfall intensity was high and the sealing crust was well developed, despite a continuous vegetation cover. The runoff volume depended both on the local slope steepness and the position on the slope. Runoff increased with slope length, though not proportionally: the runoff coefficient decreased

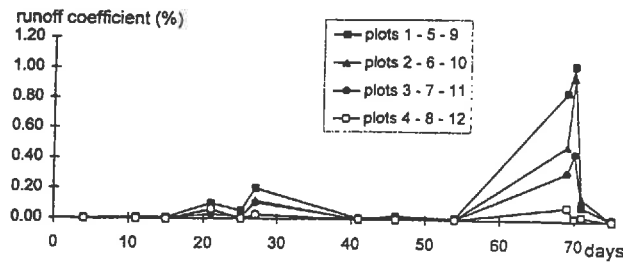


Figure 6. Runoff coefficient versus time and versus the position on the slope: mean values calculated for each set of three collectors located at the same position on the slope

with the slope length (Figure 6). It was almost halved from one position on the slope to the following. At the bottom, where the slope shape is concave, the runoff volume was small, or even nil.

The overland flow remained as a thin sheet flow on the hillslope without any location of concentrated flow according to the slope; infiltration of surface water en route downslope was important. Surface water did not flow out of the field but infiltrated in the concave downslope area. The logarithm of the mean and of the standard deviation, estimated from the measurements of the three collectors located at the same position on the slope during the whole study period, are linearly related (Figure 7): no scatter appears for the high values of runoff. This may be a particular feature of sheet flow as opposed to concentrated overland flow. In the case of sheet flow, the mean value for a given position on the slope, whatever its magnitude, is a good estimate of the overland flow. On the contrary, in the case of concentrated overland flow it would be difficult to estimate the mean value and the standard deviation by means of a regular network because of the high spatial variability during the heavier rainfall events, due to preferential surface flow pathways such as rills or gullies.

The sediment load was low and decreased during the study period (Figure 8). This decrease may be related to changes in the soil surface: first, the crusting, followed by the sealing crust, induced a decreasing erodibility of the soil surface for the range of observed overland flows: second, the vegetation cover increased, which decreased the raindrop detachment. The sediment load was higher downslope than on the hillslope at the beginning of the study period. These results must be considered with caution because of the difficulty in estimating the sediment load from samples. Lang (1992) showed that the sediment load is underestimated when it is measured on samples; this bias increases with the sediment load. This may partly explain the great scatter in the relationship between mean and variance for the sediment load measurements (Figure 9) compared to the relationship obtained for the runoff volume (Figure 7).

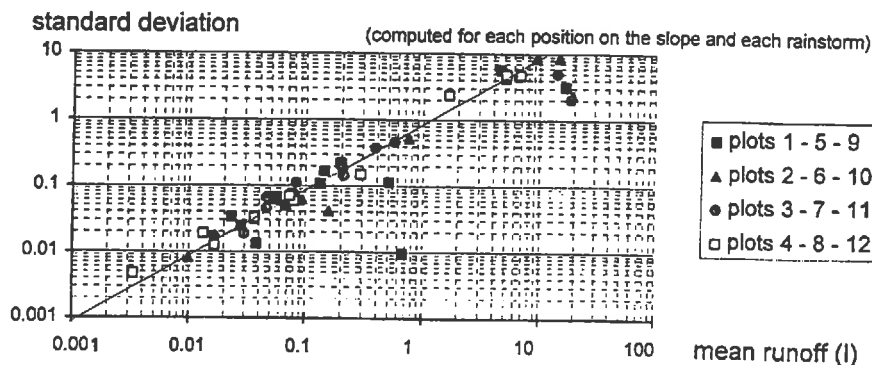


Figure 7. Standard deviation versus mean of the runoff volumes by event, for each set of three collectors located at the same position on the slope

SPATIAL VARIATIONS ON AN AGRICULTURAL FIELD

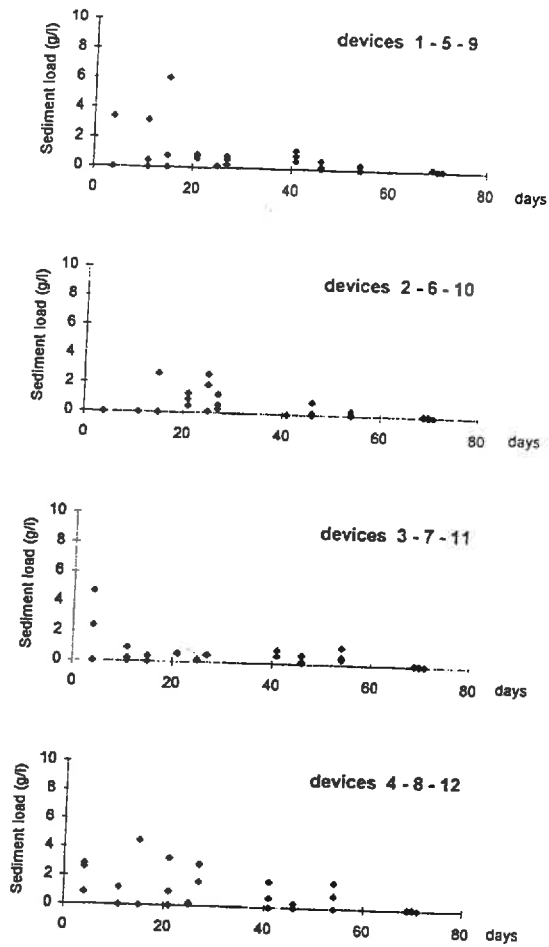


Figure 8. Sediment load versus time and versus the position on the slope: three values for each date corresponding to the three collectors located at the same position on the slope

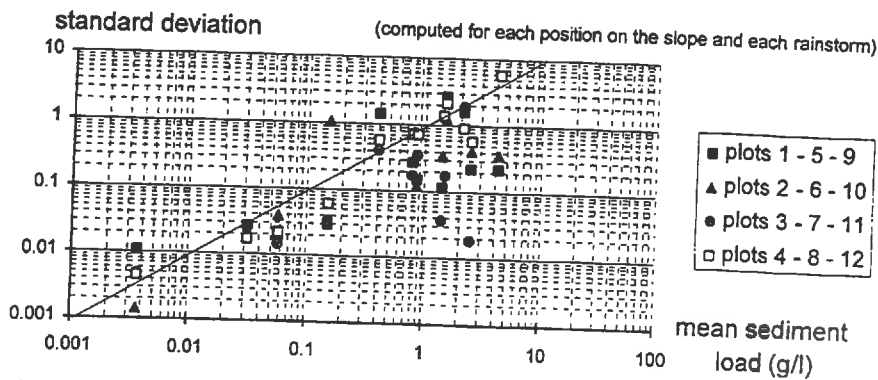


Figure 9. Standard deviation versus mean of the sediment load for the three collectors located at the same position on the slope

DISCUSSION AND CONCLUSION

The main limitation of the method used here for sheet flow measurements on hillslope is due to the unbounded upslope areas contributing to the runoff collected in the devices. The runoff coefficient is not determined accurately because these areas are not known precisely. However, in most agricultural fields the regular microrelief created by cropping, if it is parallel to the slope, allows a fairly good estimation of the contributive upslope area. The decisive advantage of the method is that it minimizes the cost and the installation time of the equipment, allowing distributed measurements through the cropping period and along the hillslope.

The results show that a noticeable redistribution of the water over the land surface occurs for each rainfall event, even though an almost nil runoff is observed at the bottom of the field. Phases of runoff generation or infiltration can be located along the slope by calculating the differences in the mean values of amount of water collected for two successive positions. For the upslope elevations, differences are always positive while they are always negative downslope: there is an upslope overland flow generation and a downslope infiltration. However, although the infiltration is mainly located in the concave part of the slope, it also occurs all along the route of water transfer.

These results demonstrate that the runoff coefficients derived from bounded plot studies are not reliable for hillslope budgets. High values obtained for plot experiments cannot be extrapolated to the hillslope scale. Conversely, nil hillslope budgets may mask an important spatial redistribution of water by sheet flow. Here, this scale effect is first related to the downslope concavity that modifies the hydraulic heads in surface and the flow velocity. Second, it may be related to slight variations of soil even spares composition (Table I) and soil crusting according to the position on the slope, which could induce variations of soil hydraulic conductivity. Third, it may be related to the spatial heterogeneity of the soil surface—cracks or biological macroporosity, depression storage, non-crust area—which are both randomly distributed and transient as shown by the time variations of the amount of water in a given collector compared to the two others located at the same position on the slope: the longer the slope, the higher the probability for the sheet flow to meet such an area of high hydraulic conductivity.

The decrease through time of the sediment load is a function of crust and vegetation development, as often shown. Once the sealing crust is well developed and the vegetation covers soil surface, the sediment load remains low. Vegetation and sealing crust protect the soil surface from erosion processes, in this case of sheet and moderate overland flow. The values of the erosion rate are higher downslope than upslope at the beginning of the study period while the values of the runoff volume are lower downslope than upslope; this is not in agreement with Poesen's work (1992) who observed higher runoff upslope and downslope as opposed to midslope due to a slower development of the sealing crust in the steeper slopes. In only one case, the particle movement was not sufficient to form a depositional crust downslope. Further, the slight differences in texture may explain the slower development of the sealing crust downslope.

This study is the first phase of a programme on overland flow processes in cultivated areas in Brittany. It concerns only a short period of 5 months and a single field case. This will be extended to longer periods and different crops, especially maize which is likely to favour overland flow, and the winter period which induces saturation conditions. These first results showed two different risk factors for overland flow and sediment transport. The risk of overland flow and therefore of solute transfer depends strongly on the climatic conditions; the risk of sediment transport and therefore of sheet erosion depends on the nature of soil surface and the vegetation development: this relates to the short period from the crop sowing to the development of the sealing crust. For the two processes considered, the concave parts of the slope are likely to concentrate water and particles and thus associated pollutants. In this respect their environmental and hydrological role is critical. Further work is needed to study the textural, mineralogical and geochemical sorting that may coexist in time, related to the climate conditions and their consequences for the soil surface, and in space, related to the shape of the slope and the position to the stream, in order to understand the implications of water and sediment movement on pollutant transport on hillslopes.

SPATIAL VARIATIONS ON AN AGRICULTURAL FIELD

851

REFERENCES

- Auzet, V. 1987. *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grandes cultures: aspect agronomique*, Ministère de l'environnement et de l'agriculture, 60 pp.
- Auzet, V. 1990. *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grandes cultures: aspect aménagement*, Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de la forêt, 37 pp.
- Bonell, M. and Williams, J. 1987. Infiltration and redistribution of overland flow and sediment on a low relief landscape of semi-arid, tropical Queensland. *Proceedings of the Vancouver Symposium*, IAHS-AISH Publ. no 167, 199-211.
- Bresson, L. M. and Boiffin, J. 1990. 'Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field', *Geoderma*, 47, 301-325.
- Bresson, L. M. and Valentin, C. 1990. 'Comparative micro-morphological study of soil crusting in temperate and arid environments', *Trans. 14th Int. Cong. Soil Sci.*, VII, 238-243.
- Bruneau, P. and Gascuel-Oudou, C. 1990. 'A morphological assessment of soil microtopography using a digital elevation model on one square metre plots', *Catena*, 17, 315-325.
- De Ploey, J. L. 1969. 'L'érosion pluviale: expériences à l'aide de sables traceurs et bilans morphogéniques', *Acta. Geogr., Lovaniensia*, 7, 1-28.
- Dulay, F. and Ackerman, F. 1934. 'Run-off and erosion from plots of different lengths', *Journal of Agricultural Research*, 48, 505-515.
- Gascuel-Oudou, C., Bruneau, P. and Curmi, P. 1991. 'Runoff generation: assesment of relevant factors by means of soil microtopography and micromorphology analysis', *Catena*, 4, 209-219.
- Lang, R. D. 1992. 'Accuracy of two sampling methods used to estimate sediment concentrations in runoff from soil-loss plots', *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 841-844.
- Larivière and Verdou, 1976. *Contribution à l'étude climatologique de la Bretagne*. Monographie de la météorologie nationale, Ministère de l'agriculture, 82 pp.
- Mathier, L. and Roy, A. G. 1993. 'Temporal and spatial variations of runoff and rain wash erosion on an agricultural field', *Hydrological Process*, 7, 1-18.
- Molinier, M., Leprun, J. C. and Audry, P. 1991. 'Effet d'échelle observé sur le ruissellement dans le Nordeste Brésilien', *Seminfor IV "Le transfert d'échelle"*, ORSTOM, 95-104.
- Mutchler, C. and Greer, J. 1980. 'Effect of slope length on erosion from low slopes', *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 23, 866-876.
- Planchon, O. 1991. *Etude spatialisés des écoulements sur les versants et de leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion. Exemple de savane humide (Côte d'Ivoire)*, thèse de doctorat, ORSTOM, 340 pp.
- Poesen, J. 1981. 'Rainwash experiments on the erodibility of loose sediments', *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 285-307.
- Poesen, J. 1992. 'Mechanisms of overland flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rocks fragments', in: Parsons, A. J. and Abrahams, A. D. (Eds), *Overland flow hydraulics and erosion mechanics*, London, 275-305.
- Poesen, J. and Bryan, R. B., 1989. *Influence de la longueur de pente sur le ruissellement: rôle de la formation de rigoles et de croûte sédimentation*, Cahiers ORSTOM, Série Pédologie 25, 71-80.
- Valentin, C. and Bresson, L. M. 1992. 'Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils', *Geoderma*, 55, 225-245.
- Williams, J. and Bonell, M. 1987. 'Computation of soil infiltration properties from the surface hydrology of large field plots', in Fok, Yu-Si (Ed), *Proceedings of the international conference on infiltration, development and application*, 6-9 January 1987, 272-281.

ANNEXE 4

TRANSPORTS SOLIDES

ANNEXE 4a : DONNEES DE CHARGES SOLIDES

RENNES CAMPAGNE 1993 : PETITS POIS

dispositifs		4	8	12	3	7	11	2	6	10	1	5	9
date	dis/rq2	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l	C.S.g/l
	pluie (mm)	l(mm/h)											
06-avr-93	6	17.5	2	2.63	4.71	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.42
12-avr-93	9		3	0.00	0.95	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	3.18	0.00	0.45
16-avr-93	11		2	4.50	0.34	0.39	0.00	2.67	0.00	0.00	0.00	6.01	0.80
22-avr-93	10		5	0.98	0.62	0.61	0.54	0.93	0.46	1.31	0.80	0.89	0.61
26-avr-93	14.5		3	0.07	0.20	0.11	0.14	1.89	2.65	0.11	0.11	0.16	0.09
28-avr-93	1		0.5	1.68	0.55	0.51	0.52	0.56	0.28	1.26	0.77	0.23	0.58
12-mai-93	7.5		2.5	1.74	0.52	0.54	0.90	0.00	0.00	0.00	1.23	0.56	0.91
17-mai-93	12.5		5.5	12.50	0.11	0.18	0.61	0.16	0.85	0.00	0.18	0.58	0.05
25-mai-93	4.5		1.5	0.84	0.52	1.15	0.34	0.14	0.30	0.00	0.00	0.28	0.35
09-jun-93	30		11.5	0.04	0.04	0.09	0.08	0.09	0.09	0.05	0.12	0.18	0.18
10-jun-93	7.5		17.5	0.04	0.02	0.05	0.03	0.09	0.02	0.00	0.07	0.07	0.04
11-jun-93	76		5.5	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04
15-jun-93	19		4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.04

RENNES CAMPAGNE 1993-1994 : PHACELIE - SOL NU

culture		Phacelle											Sol nu			
dispositifs		14	13	12	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
date	dis/rq2	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	C.S. (g/l)	
	pluie (mm)	l(mm/h)														
11-oct-93	6		1	1.32	0.36	5.30	0.30	1.40		8.58		4.06	1.14	1.61	0.88	
12-oct-93	17		4	0.23	0.18	1.75	1.58	1.24		0.00		2.03	3.32	0.50	0.36	
14-oct-93	30		3.5	2.84	0.40	1.20	5.17	1.06		1.60		2.48	4.08	0.56	0.93	
25-nov-93	25		2.5	0.10	0.13	0.34	0.66	0.16		0.07		0.54	0.50	0.05	0.22	
16-déc-93	34		4	0.37	0.24	0.96	0.32	0.17		3.35		2.07		4.13	1.43	
04-jan-94	60		3	0.44	0.54	0.41	0.33	0.14		0.63		0.20		2.19	0.62	
14-jan-94	50		5.5	0.03	0.10	7.17	13.26	10.09		1.52		1.40		1.21	3.61	
27-jan-94	31		4.5	0.18	0.54	3.18	4.45	2.78		2.05		0.35		0.91	3.40	
04-fév-94	28		3.5	0.29	0.37	6.90	1.49	0.89		3.18		0.37		0.89	0.52	
10-fév-94	14		3	0.17	0.36	0.73	1.06	0.68		0.00		1.94		0.59	0.92	
21-fév-94	41		3.5	0.26	0.62	2.11	1.00	0.72		3.43		0.50		0.34	1.33	

dispositifs		1	6	11	2	7	12	3	8	13	4	9	14	5	10	15
date	disl/rg2	270.00	270.00	270.00	218.33	218.33	218.33	166.67	166.67	166.67	107.50	107.50	107.50	52.60	52.60	52.60
		[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l
		l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)	l(mm/h)
17-mai-94	30	2.87	1.28	2.25	9.44	2.26	10.46	13.59	120.64	154.36	28.72	16.91	48.70	71.04	36.31	30.55
20-mai-94	17	2.44	3.30	2.62	2.90	48.50	2.33	3.29	3.27	2.13	3.34	1.88	1.49	2.62	3.60	1.27
24-mai-94	8.5	1.90	1.51	2.72	1.78	1.36	1.49	1.95	1.12	2.47	3.19	1.05	2.00	1.50	1.90	0.83
27-mai-94	20.5				10.48	4.00	4.73	9.58	7.03	12.96	8.53	3.70	5.81	6.88	6.24	4.07
02-jun-94	8.5	1.13	0.50	1.20	0.45	2.10	0.88	1.05	1.03	1.00	1.80	1.57	2.17	0.26	0.80	1.27
04-jun-94	9	0.72	0.08	0.85	2.32	2.20	1.75	1.07	0.85	0.42	1.80	1.22	2.67	1.30		1.20
26-jun-94	11		0.15		0.54				0.60	0.94	0.70		0.20	0.45		
17-jul-94	17		4.40	3.05	2.34	2.30	4.75	1.19	1.33	2.91	12.48	3.00	30.90	0.82	7.32	3.60
24-jul-94	22		2.33	17.40	13.13	6.33	45.85	15.76	97.08	34.95	295.63	84.03	168.55	3.69	3.10	26.58
28-jul-94	10.5	1.32	1.33	3.64	15.63	1.45	5.69	150.69	3.02		88.58	4.18	223.82	2.98	5.31	
09-aou-94	11.5	0.82	0.72	3.04	8.32	4.19	10.68	8.22	6.24	9.93	5.23	2.42	6.80	2.08	4.00	4.33
06-sep-94	27	0.63		1.17	0.82	0.27	0.17	1.40	0.05	0.35	1.00	6.20		0.78	1.20	0.49
09-sep-94	17	3.45	3.60	0.53	53.98	5.12	2.55	75.04	11.40	17.49	7.98	0.80	4.63	2.03	5.40	2.35
16-sep-94	35.5	2.13	2.59	2.31	5.93	6.80	8.93	15.48	9.56	15.35	8.05	4.80	10.75	6.00	4.10	5.80
21-sep-94	24	1.11	2.57	0.58	0.40	4.48	1.25	1.10	1.25	6.40	0.70	1.62	Sonde	1.73	2.63	0.42
26-sep-94	25	4.90	10.53	3.76	4.76	9.96	5.40	6.82	3.75	4.55	7.29	3.38		4.50	1.82	0.76
19-oct-94	12.5		0.10		0.30		0.05	0.30			0.30			0.15		
09-nov-94	22	0.42	0.14		0.27	1.10	0.90	0.60	1.69	1.57	0.63	1.13		1.28		
15-nov-94	15.5	1.31	1.08		0.70	1.42	1.87	0.98		3.84		3.24		4.70		1.63
05-déc-94	8	1.00	2.80	2.49	1.05	1.37	1.96	1.49	2.49	2.27	2.44			1.42	2.63	1.47
08-déc-94	9	0.80	0.96	1.22	0.75	0.72	1.58	0.67	0.77	0.63	0.56			1.03	0.78	0.77
18-déc-94	10	2.47	2.60	2.31	0.93	0.88	1.87	0.60	1.34	1.44	0.95			1.72	1.50	0.85
21-déc-95	3.5															
28-déc-94	5.3			0.12	0.21	0.56	1.00	0.37	0.96						2.17	0.29
29-déc-94	15	0.40	0.82	1.51	1.07	0.88	1.89	0.58	1.14	1.73	0.78	0.88		2.10	1.66	1.09
30-déc-94	6	1.87	1.64	2.20	4.56	1.46	4.18	1.16	3.42	3.40	1.49	1.83		3.11	2.84	3.64
02-jan-95	7.5	0.98	0.82	1.38	1.76	0.64	0.95	0.49	0.68	0.90	0.68			0.77	0.69	0.65
11-jan-95	1.3	2.40	1.05	0.70	0.84	0.76	1.16	2.79	1.11	0.73	0.98	3.00		0.61	3.71	
17-jan-95	17	1.60	2.09	2.24	2.98	2.24	5.27	1.71	4.66	3.80	1.48	5.08		6.08	3.69	2.54
19-jan-95	44	2.05	1.88	1.06		2.26	3.82	1.32	3.30	3.60	1.40	2.40		3.10	3.24	3.00
23-jan-95	23.5	0.67	0.73	0.60	0.34	0.51	0.56	0.28	0.80	0.66	0.53	1.27		0.55	0.69	0.87
26-jan-95	22		2.32	4.00	0.96	1.43	4.22	0.58	1.58	2.51	1.05			1.75	1.62	2.29
30-jan-95	29.5															
01-fév-95	15	0.96														
08-fév-95	15	0.84	0.90	1.06	0.60	0.75	0.65	0.44	0.56	0.66	0.54	0.92		0.67	0.83	0.87
13-fév-95	5.9					0.89	1.34	0.40	1.03	0.75	1.01				0.53	0.93
14-fév-95	10	0.84	1.27	1.40		0.76	1.80	1.20	1.30	préleveur	0.97			1.10	1.25	0.91
14-fév-95	3	1.07	1.11	1.40	0.71	1.17	1.90	0.81	0.88		0.75			0.70		0.87
15-fév-95	6															
27-fév-95	22			1.40	0.71	1.17	1.90	0.81	0.88							
02-mar-95	8	1.07	1.11	1.40	0.71	1.17	1.90	0.81	0.88					0.70		0.87
06-mar-95	7	2.94	3.24	2.72	2.33	5.07	0.27	1.69	9.49		1.30			1.97	2.38	1.85
07-mar-95	15	1.81	11.25	10.38	0.90	1.51	1.98	1.53	1.64		1.13	1.36		1.60	2.16	8.53

ANNEXE 4a : DONNEES DE CHARGES SOLIDES

NAIZIN : SITES DE TOCPOLOUZ ET KERJOS : CAMPAGNE 1994 : MAÏS

Site			Tocplouz					Kerjos				
dispositifs												
dist/g2												
date	pluie (mm)	l(mm/h)	5	4	3	2	1	5	4	3	2	1
			[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l	[cs] g/l
31-mai-94	0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
08-jun-94	45.5	9	1.20	1.33	1.87	4.33	0.56	2.36	0.80	0.27	0.90	17.08
21-jul-94	29	13.5	0.23	1.60	3.00	21.56	1.73	0.88	15.11	1.98	2.70	1.70
18-aoû-94	16.5	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
08-sep-94	48.5	7	0.28	0.25	2.28	0.20	0.75	0.60	0.76	0.47		0.05
20-sep-94	50.5	9.5	0.09	0.31	0.70	0.67	0.31	1.85	0.83	0.18	0.43	0.28
30-sep-94	67	10.5		0.81	0.62	1.59	2.59	4.17	1.57	2.50	1.73	1.21

ANNEXE 4b : ESTIMATION DES BIAIS SUR LES MESURES EN CHARGES SOLIDES PAR LA TECHNIQUE DES ALIQUOTES

DESCRIPTION DU PROTOCOLE :

Avant l'expérience les aliquotes vides sont repesés, les opérations suivantes sont réalisées :

1. Le sol sec est tamisé au moyen de deux tamis de calibre 0,8 et 1 mm, puis pesé de manière à obtenir des échantillons conformes à la table ci-dessous. L'échantillon correspondant à la concentration étudiée est versé dans le totalisateur.
2. Le totalisateur est rempli du volume d'eau correspondant sur la table.
3. Le contenu du totalisateur est bien mélangé au moyen d'un agitateur.
4. Trois échantillons sont prélevés avec un aliquote après mélange au fond du totalisateur, geste effectué en remontant du fond vers la surface.
5. Le totalisateur et le becher ayant servi à la manipulation sont lavés après chaque utilisation correspondant à une concentration donnée.

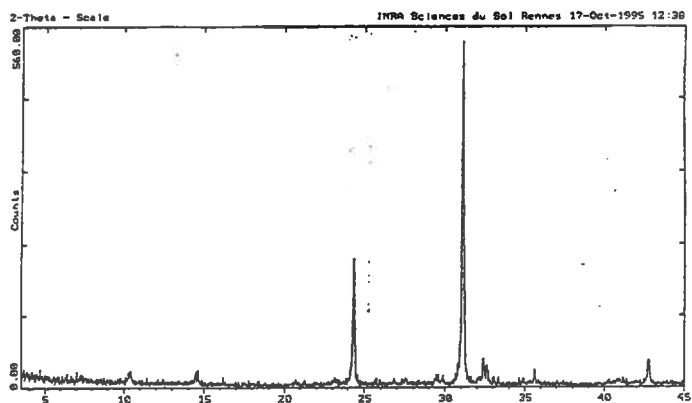
L'expérience est reproduite pour chaque couple concentration-volume de la table. Tous les aliquotes ainsi obtenus sont pesés, puis mis à l'étuve pour séchage.

Ils sont repesés après séchage afin d'obtenir le poids des charges solides ainsi prélevés.

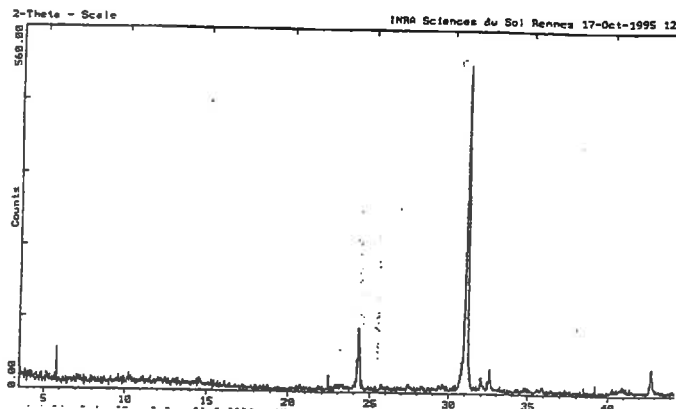
Table de détermination du poids des échantillon

		Volume d'eau dans le totalisateur en l.				
		1 litre	10 litres	20 litres	40 litres	60 litres
concentration de l'échantillon g/l	0,5 g/l	0,5	5	10	20	30
	1 g/l	1	10	20	40	60
	5 g/l	5	50	100	200	300
	10 g/l	10	100	200	400	600
	20 g/l	20	200	400	800	1.200
	40 g/l		400			2.400
	50 g/l			1.000	2.000	

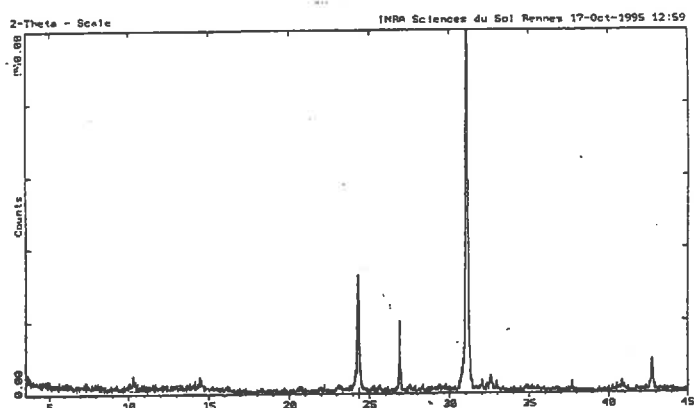
ANNEXE 4c : SPECTRES DE DIAGRAMMES-POUDRE



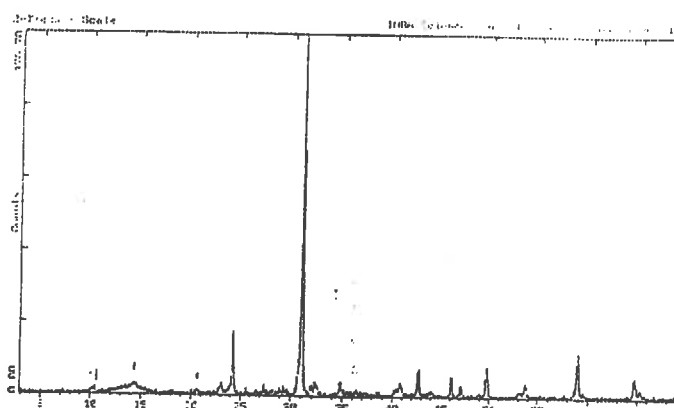
17 mai 1994 - AMONT



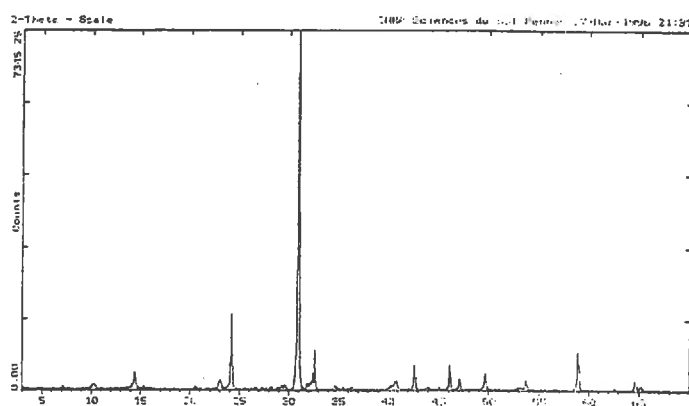
17 mai 1994 - CONVEXITE



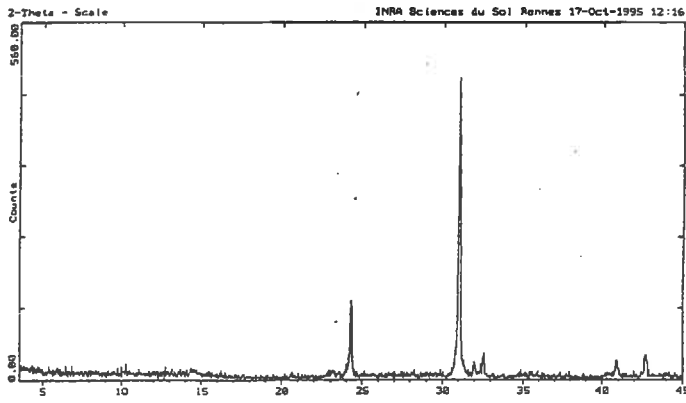
17 mai 1994 - PENTE



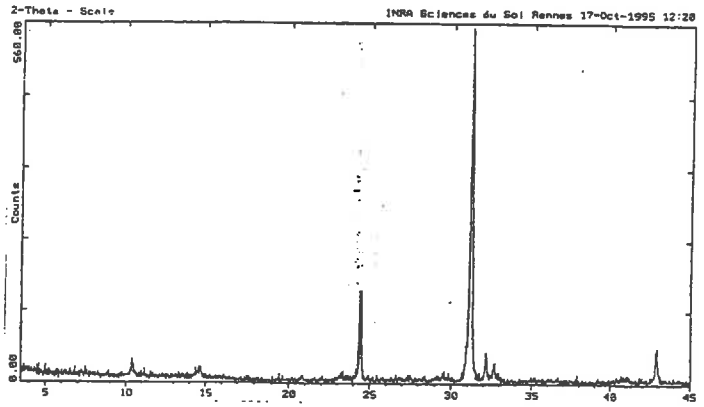
17 mai 1994 - CONCAVITE



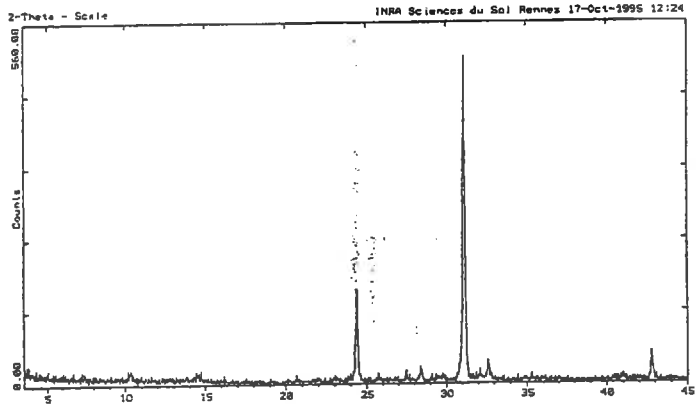
17 mai 1994 - AVAL



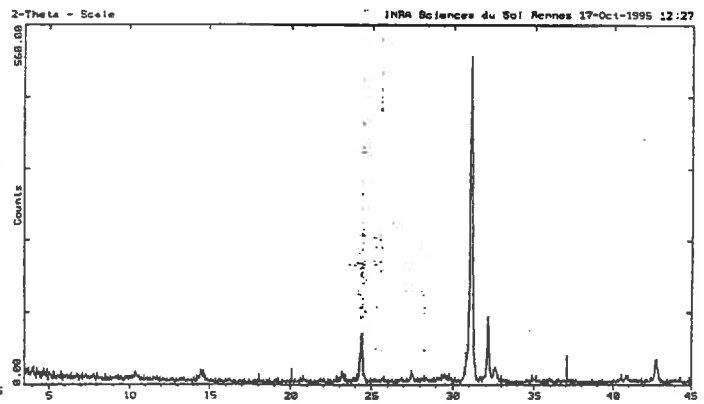
25 Juillet 1994 - AMONT



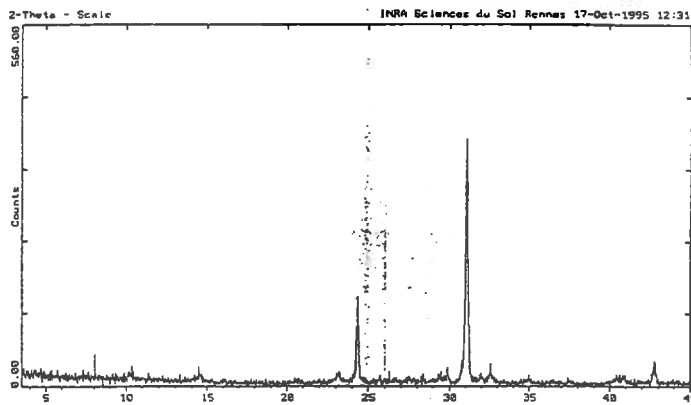
25 Juillet 1994 - CONVEXITE



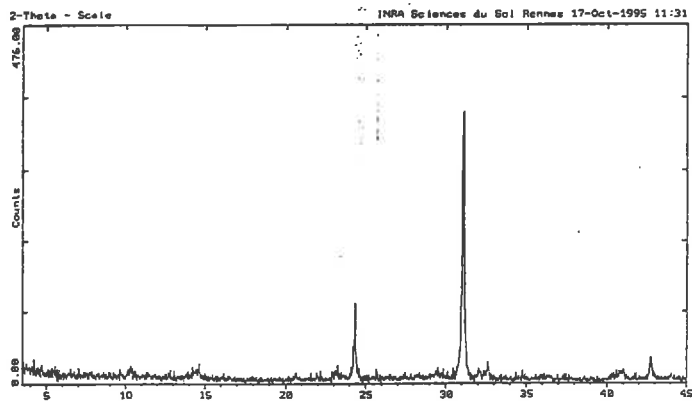
25 Juillet 1994 - PENTE



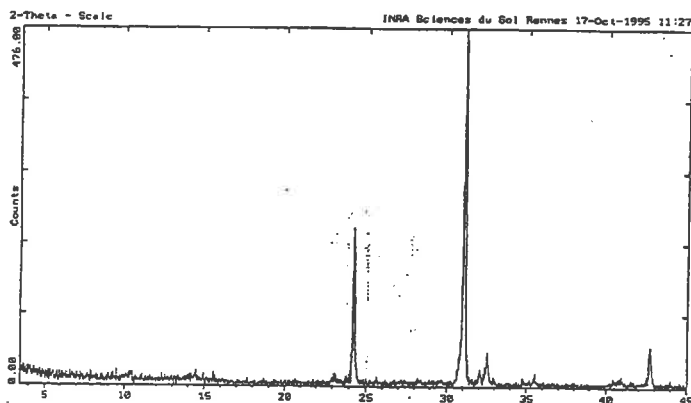
25 Juillet 1994 - CONCAVITE



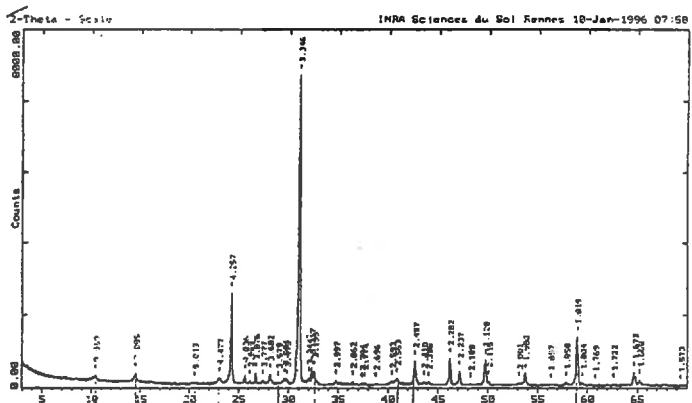
25 Juillet 1994 - AVAL



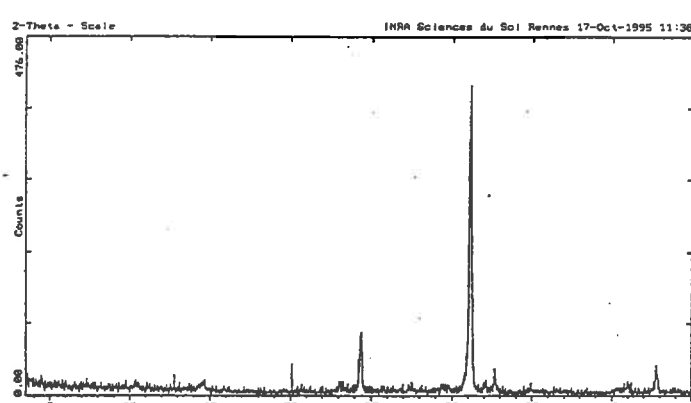
28 Juillet 1994 - AMONT



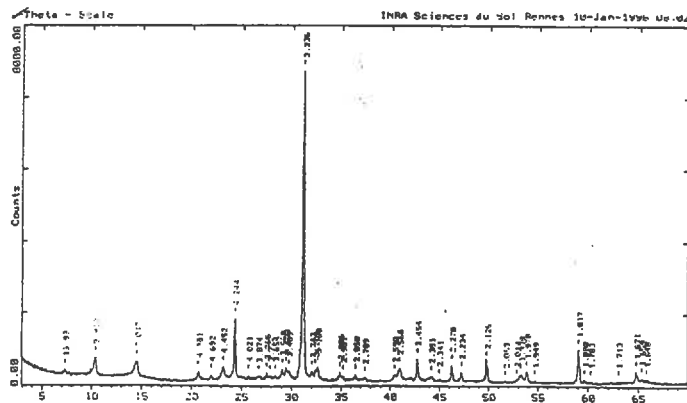
28 Juillet 1994 - CONVEXITE



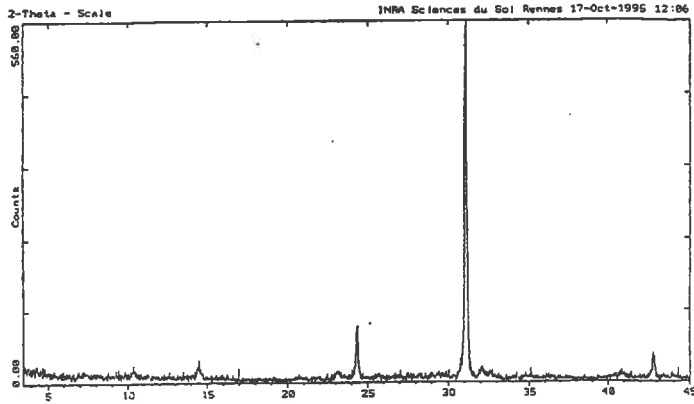
28 Juillet 1994 - PENTE



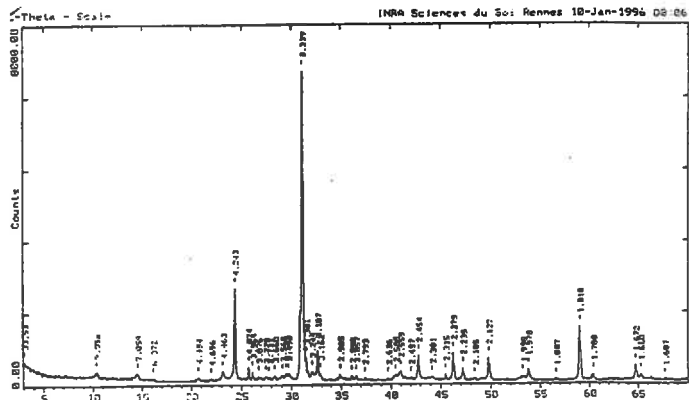
28 Juillet 1994 - CONCAVITE



28 Juillet 1994 - AVAL



26 septembre - AMONT



ANNEXE 4d : ANALYSE TOTALE DE CHARGES SOLIDE A PARTIR DE 13 ECHANTILLONS

date	niveau	Si	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Tl	P	Ba	Be	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Rb	Sr	Th	V	Zn	Zr
17-mai-94	aval	1.06	0.07	0.02	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	3.44	0.22	0.20	1.96	0.53	0.27	0.16	0.56	1.42	0.70	0.05	2.51	1.77	2.55
17-mai-94	concavité	1.10	0.06	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	3.24	0.16	0.18	1.87	0.46	0.25	0.15	0.51	1.29	0.68	0.04	2.24	1.55	3.00
17-mai-94	penne	1.32	0.04	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	2.51	0.13	0.11	1.36	0.28	0.15	0.14	0.30	0.82	0.71	0.04	1.22	0.76	4.33
17-mai-94	convexité	1.16	0.06	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	3.06	0.18	0.16	1.58	0.44	0.22	0.15	0.46	1.13	0.71	0.04	1.87	1.23	2.86
17-mai-94	amont	1.24	0.05	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	2.64	0.11	0.12	1.36	0.34	0.16	0.13	0.33	0.91	0.67	0.04	1.42	0.95	3.20
28-jul-94	aval	0.94	0.07	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	3.49	0.25	0.20	1.98	0.56	0.28	0.15	0.57	1.49	0.65	0.04	2.65	1.74	1.92
28-jul-94	concavité	1.10	0.05	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	2.77	0.19	0.17	1.67	0.42	0.21	0.15	0.40	1.12	0.67	0.04	1.98	1.27	3.27
28-jul-94	penne	1.26	0.04	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	2.49	0.26	0.25	1.45	0.31	0.14	0.13	0.34	0.76	0.67	0.04	1.34	0.82	4.57
28-jul-94	convexité	1.27	0.04	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	2.30	0.12	0.12	1.34	0.29	0.14	0.14	0.30	0.82	0.66	0.04	1.24	0.88	4.93
28-jul-94	amont	1.02	0.06	0.02	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	3.04	0.24	0.17	1.69	0.51	0.23	0.14	0.50	1.23	0.69	0.04	2.02	1.59	2.35
26-sep-94	aval	0.91	0.08	0.02	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	3.60	0.31	0.24	2.12	0.56	0.32	0.16	0.65	1.64	0.63	0.05	2.95	2.00	2.06
26-sep-94	penne	1.10	0.06	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	2.90	0.23	0.18	1.75	0.46	0.22	0.15	0.46	1.17	0.66	0.04	2.02	1.48	3.61
11-jan-95	versant	1.05	0.06	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	3.00	0.28	0.18	1.86	0.50	0.23	0.16	0.48	1.19	0.76	0.04	2.00	1.74	3.62

n mol/100g	majeur
ou mmol/kg	mineur

ANNEXE 5

CHIMIE DES EAUX

ANNEXE 5a : CONCENTRATION EN IONS DES EAUX DE RUISSELLEMENT - RENNES

		n° dis	lg. pente	vol ruissele	F	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na	PO4	NH4	
date	12/05/1994	6	270	0.25	0	0.0292	0.049	0.051	0.097305	0.007815	0.038361	0.042192	0.00019	0.09424	
jour		0	7	218	0.3	0	0.0399	0.07	0.136	0.05489	0.004525	0.019692	0.013484	4.93E-05	0.097012
pluie en m	11.5	8	167	0.3	0	0.0266	0.0445	0.052	0.062375	0.006581	0.020715	0.016964	0.00012	0.041577	
cumul pluie	11.5	9	108	0.5	0	0.031	0.046	0.057	0.06487	0.003291	0.01202	0.009569	3.52E-05	0.083153	
		15	53	0.35	0	0.0229	0.036	0.047	0.0499	0.003702	0.011764	0.016094	1.41E-05	0.063751	
		moyenne		0.34	0	0.02992	0.0491	0.0686	0.065868	0.005183	0.02051	0.019681	8.17E-05	0.075947	
date	18/05/1994	1	270	1	0.00300	0.0146	0.018	0.107	0.239521	0.020566	0.175694	0.210981	0.006277	1.089307	
jour		5	6	270	0.5	0.00279	0.0482	0.056	0.41	0.162176	0.014808	0.053194	0.056981	0.000444	0.191252
pluie en m	30	11	270	1.25	0.005843	0	0.054	0.221	0.139721	0.01234	0.068539	0.076555	0.000521	0.127502	
cumul pluie	42	8	167	60	0.027424	0.009	0.067	0.294	0.11976	0.016041	0.08465	0.022184	0.005298	0.127502	
		10	53	60	0.025792	0	0.063	0.143	0.11976	0.011106	0.032479	0.037408	0.000634	0.088697	
		moyenne		24.55	0.01297	0.01436	0.0516	0.235	0.156188	0.014972	0.082911	0.080818	0.002635	0.324852	
date	24/05/1994	1	270	0.75	0	0.0409	0.052	0.15	0.134731	0.011517	0.048335	0.063506	0.003325	0.055435	
jour		6	270	0.48	0	0.072	0.066	0.148	0.11477	0.014396	0.077234	0.07873	0.004579	0.083153	
pluie en m	17.5	11	270	0.9	0	0.0652	0.0768	0.102	0.02994	0.004525	0.06726	0.100913	0.00491	0.157991	
cumul pluie	67.5	8	167	1.1	0	0.055	0.104	0.0598	0.0499	0.005758	0.038617	0.07612	0.000444	0.030485	
		10	53	0.6	0	0.117	0.194	0.242	0.062375	0.008638	0.059843	0.272292	0.000423	0.202335	
		moyenne		0.766	0	0.07002	0.09856	0.14036	0.078343	0.008967	0.058258	0.118312	0.002736	0.105882	
date	25/07/1994	6	270	60	0	0.090444	0.4275	0.1135	0.251996	0.034551	0.339625	0.109613	0.000282	0.041577	
jour		74	11	270	60	0	0.14	0.837	0.12	0.621257	0.05306	0.316864	0.091779	0.000803	0.033261
pluie en m	22	8	167	60	0	0.071	0.104	0.098	0.454092	0.055117	0.342949	0.059156	0.000521	0.041577	
cumul pluie	159	10	53	46	0	0.0571	0.256	0.084	0.219561	0.033317	0.201987	0.045237	4.93E-05	0.030485	
		moyenne		45.3532	0	0.085713	0.344612	0.111172	0.32505	0.037002	0.253736	0.084819	0.000878	0.050557	
date	07/09/1994	1	270	0.5	0.006053	0.094	0.23	0.085	0.112275	0.019332	0.114061	0.07264	0.008968	0.393592	
jour		6	270	0.9	0.009896	0.131	0.147	0.196	0.172156	0.045656	0.286942	0.230535	0.044821	0.767781	
pluie en m	25.5	11	270	0.4	0.006159	0.06	0.053	0.051	0.0499	0.013162	0.150887	0.074815	0.038128	0.479517	
cumul pluie	230	8	167	1.2	0.006632	0.166	0.088	0.169	0.107285	0.028381	0.261623	0.222706	0.07813	0.626421	
		10	53	0.4	0.002948	0.049	0.0181	0.0977	0.092315	0.016041	0.085162	0.054371	0.018465	0.327065	
		moyenne		0.68	0.006338	0.1	0.10722	0.11974	0.106786	0.024515	0.179735	0.131013	0.037702	0.518876	
date	09/09/1994	1	270	0.4	0.003264	0.087	0.0466	0.04	0.05489	0.011106	0.049358	0.07177	0.008222	0.31321	
jour		6	270	60	0.010054	0.069	0.02	0.0201	0.06986	0.009872	0.105877	0.040017	0.000268	0.004712	
pluie en m	17	11	270	10	0.001242	0.068	0.035	0.0218	0.072355	0.009872	0.108434	0.037843	0.000373	0.088697	
cumul pluie	243.5	8	167	60	0.012422	0.067	0	0.025	0.087325	0.013574	0.109969	0.043062	0.000542	0.052664	
		10	53	60	0.010054	0.131	0.0548	0.061	0.082335	0.016453	0.123523	0.095259	0.001064	0.263316	
		moyenne		38.08	0.007407	0.0844	0.03128	0.03358	0.073353	0.012175	0.099432	0.05759	0.002094	0.14452	
date	26/09/1994	1	270	0.4	0.006106	0.092	0.0174	0.098	0.154691	0.038253	0.193596	0.142236	0.019311	0.961805	
jour		6	270	0.2	0.006948	0.067	0.041	0.147	0.10978	0.022623	0.15856	0.069595	0.012857	0.748375	
pluie en m	25	11	270	0.6	0.003685	0.0845	0.025232	0.086114	0.077345	0.025502	0.062657	0.052632	0.00131	0.332615	
cumul pluie	249.5	8	167	1	0.00758	0.0316	0.06	0.03	0.067365	0.009872	0.060811	0.016529	0.001085	0.135817	
		10	53	1.2	0.14	0.146	0.023	0.137	0.11976	0.025913	0.300496	0.201392	0.032858	1.56325	
		moyenne		0.68	0.032864	0.08422	0.033326	0.099623	0.105788	0.024432	0.155184	0.096477	0.013484	0.748375	
date	12/12/1994	1	270	0.5	0.003264	0.1875	0.0365	0.0643	0.0499	0.028324	0.043732	0.163549	0.000571	0.160763	
jour		6	270	60	0.014528	0.172	0.022	0.028	0.097305	0.024679	0.325303	0.065681	0.000423	0.027715	
pluie en m	8.1	11	270	2	0.019581	0.1965	0.0254	0.1865	0.261976	0.041955	0.327349	0.270552	0.002043	0.138589	
cumul pluie	382.6	8	167	4	0.015896	0.1555	0	0.1035	0.164671	0.032083	0.340136	0.197912	0.000493	0.024946	
		10	53	5	0.012633	0.2485	0.0163	0.1245	0.219561	0.048536	0.398445	0.194867	0.000127	0.088697	
		moyenne		14.3	0.01318	0.192	0.02004	0.10136	0.158683	0.034715	0.286993	0.178512	0.000731	0.088142	
date	18/01/1995	1	270	1.2	0	0.173	0.046	0.0625	0.03992	0.016041	0.075955	0.137886	0.000268	0.049892	
jour		2	218	1.75	0	0.167	0	0.0334	0.072355	0.018921	0.261623	0.106568	0.00019	0.033261	
pluie en m	17	3	167	23	0	0.213	0.031	0.046	0.0998	0.02509	0.357782	0.140061	9.16E-05	0.022174	
cumul pluie	457.1	4	108	40	0	0.2	0.0185	0.075	0.10978	0.039898	0.381566	0.144411	0.004967	0.022174	
		5	53	5	0	0.167	0.021	0.0946	0.082335	0.031672	0.232725	0.149195	0.000176	0.036033	
		moyenne		14.19	0	0.184	0.0233	0.0623	0.080838	0.026324	0.26193	0.135624	0.001138	0.032707	
date	13/02/1995	1	270	39	0.0225	0.2405	0	0.033	0.137226	0.019332	0.106644	0.042192	0.000261	0.019402	
jour		7	218	60	0.0245	0.222	0	0.036	0.162176	0.037019	0.299217	0.123532	0.000324	0.013855	
pluie en m	10	12	218	25	0.0265	0.171	0	0.036	0.154691	0.02509	0.173137	0.116137	0.001029	0.013855	
cumul pluie	598.1	8	167	2	0.015	0.1225	0.011	0.092	0.0998	0.021389	0.101018	0.140496	0.000261	0.016631	
		4	108	4	0.013	0.0395	0	0.018	0.062375	0.007815	0.036827	0.037408	4.93E-05	0.011087	
		10	53	2.5	0.205	0.167	0.009	0.095	0.11976	0.009872	0.038105	0.034363	7.05E-05	0.013855	
		15	53	49	0.022	0.188	0	0.069	0.147206	0.027147	0.065981	0.07003	4.93E-05	0.019402	
		moyenne		25.92857	0.046929	0.164357	0.002857	0.054143	0.126176	0.021095	0.117276	0.080594	0.000292	0.015443	
		PLUIE			0	0.1465	0.011	0.072	0.017465	0.01563	0.013554	0.123967		0.024946	
date	15/02/1995	1	270	40	0.0195	0.069	0	0.009	0.027445	0.000288	0.017646	0.00696	3.52E-05	0.016631	
jour		6	270	44	0.024	0.127	0	0.024	0.082335	0.013985	0.113549	0.050022	5.64E-05	0.013855	
pluie en m	6	11	270	42	0.028	0.256	0.071	0.084	0.271956	0.029204	0.14833	0.087429	0.000176	0.011087	
cumul pluie	608.9	8	167	1.2	0.007		0.0008	0.16	0.042415	0.002879	0.014833	0.024793	3.52E-05	0.013855	
		15	53	32	0.0255	0.163333	0	0.036	0.077345	0.012751	0.029666	0.032623	3.52E-05	0.013855	
		moyenne		31.84	0.0208	0.153833	0.01436	0.0626	0.100299	0.011821	0.064805	0.040365	6.76E-05	0.013855	
		PLUIE			0	0.125	0.01	0.056	0.00998	0.01234	0.026597	0.110918	0.000134	0.155215	

ANNEXE 5b : CHROMATOGRAPHIE IONIQUE - ABSORPTION ATOMIQUE : DESCRIPTION DES METHODES

• Principe

Cette méthode permet la séparation d'ions hydrophiles en milieu organique et d'ions hydrophobes en milieux aqueux ou organiques :

(a) la séparation des espèces a lieu sur une colonne échangeuse d'ions ; (b) la colonne de suppression neutralise chimiquement les ions de l'éluant afin de limiter les bruits de fond ; (c) un conductimètre détecte les ions présents ; (d) les résultats sont présentés sous forme de chromatogramme.

• Limites et avantages

- dans un contexte général

Cette méthode peut doser des composés variés qui nécessiteraient la mise en place de paramètres spécifiques (BARBIERO, 1995). La séparation d'ions organiques ou inorganiques est possible avec une grande sensibilité (FONTAINE, 1992). Elle permet de quantifier les anions de pK supérieur à 6 et de masse moléculaire supérieur à 1000 (MARCENAC, 1987). La colonne échangeuse est alors une colonne cationique et l'éluant est carbonaté. La quantification des cations est théoriquement possible en chromatographie ionique en utilisant une colonne anionique et de l'acide chlorhydrique dilué comme éluant. A. REGEARD indique que l'analyse des cations est précise et juste pour K⁺ et Mg²⁺, mais ne convient pas au dosage de CA²⁺ et essentiellement lorsqu'ils sont faiblement concentrés.

- dans le contexte de ruissellement

Les concentrations en anions et cations se sont révélées faibles dans les eaux de ruissellement analysées en 1993. Les cations ont alors été dosés par absorption atomique à flamme à ARRAS et les cations en chromatographie ionique à RENNES.

Deux problèmes d'analyse ont été abordés par A. REGEARD :

(1) les conditions opératoires standard ne convenaient pas aux caractéristiques chimiques des eaux de ruissellement ; une gamme de faible concentration a été réalisée avec l'éluant standard (NaHCO₃, Na₂CO₃) dont la concentration a été divisé par 2 ;

(2) le fluor et le chlore étaient perturbés par des anions organiques ; une deuxième série d'analyses a été réalisée en utilisant comme éluant le tétraborate de sodium (Na₂B₄O₇, 10H₂O), afin d'augmenter le temps de rétention du fluor et du chlore et de les distinguer correctement dans le chromatogramme ; une troisième série d'analyse était nécessaire car le fluor était toujours perturbé par des anions organiques ; la concentration de l'éluant (tétraborate de sodium) de la deuxième série d'analyse a été divisé par 2 ;

Pour chaque série d'analyse, les limites de détection varient. De plus, le tétraborate de sodium ne permet pas de quantifier l'ions sulfate. Les avantages et les limites de chaque série d'analyse sont résumés dans le tableau 1.

Série d'analyse	Eluant	[éluant]	limites de détection	AVANTAGE	INCONVENIENT
Standard	NaHCO ₃ Na ₂ CO ₃		F : $\mu\text{Mole/l}$ Cl : 9,1 $\mu\text{Mole/l}$ NO ₂ : 11 $\mu\text{Mole/l}$ NO₃ : 4,5 $\mu\text{Mole/l}$ SO₄ : 4 $\mu\text{Mole/l}$	limites de détection faibles pour NO ₃ et SO ₄	limites de détection trop importantes pour F, Cl.
M1	NaHCO ₃ Na ₂ CO ₃	standard/2	F : 25 $\mu\text{Mole/l}$ Cl : 8 $\mu\text{Mole/l}$ NO₂ : 9,8 $\mu\text{Mole/l}$ NO ₃ : 6 $\mu\text{Mole/l}$ SO ₄ : 11 $\mu\text{Mole/l}$	gamme de faible concentration pour F, Cl et NO ₂ aux conditions standards	F et Cl non séparés sur le chromatogramme des ions organiques
M2	Na ₂ B ₄ O ₇ , 10H ₂ O	1,94g/l	F : 10 $\mu\text{Mole/l}$ Cl : 7 $\mu\text{Mole/l}$ NO ₂ : 11 $\mu\text{Mole/l}$ NO ₃ : 22 $\mu\text{Mole/l}$	Cl bien séparé des anions organiques	a) F mal individualisé b) impossible de quantifier SO ₄
M3	Na ₂ B ₄ O ₇ , 10H ₂ O	1g/l	F : 10,5 $\mu\text{Mole/l}$ Cl : 7,5 $\mu\text{Mole/l}$	F et Cl bien séparés des anions organiques	Détectons impossible de NO ₃ et SO ₄

tableau 1 : limite et avantage de la chromatographie ionique des séries d'analyse

Autres analyses (Arras)

Les analyses des cations sont faites par absorption atomique de flamme

• Principe (REGEARD, 1979)

Il est fondé sur l'absorption de radiations atomiques en phase vapeur dans une flamme. Les atomes absorbent le rayonnement fourni par une source d'émission de même nature, à l'intérieur de la flamme. L'affaiblissement de la raie lumineuse est mesuré puisqu'il est proportionnel à la concentration de l'élément à doser. Une longueur d'onde donnée caractérise un élément spécifique.

• Limites

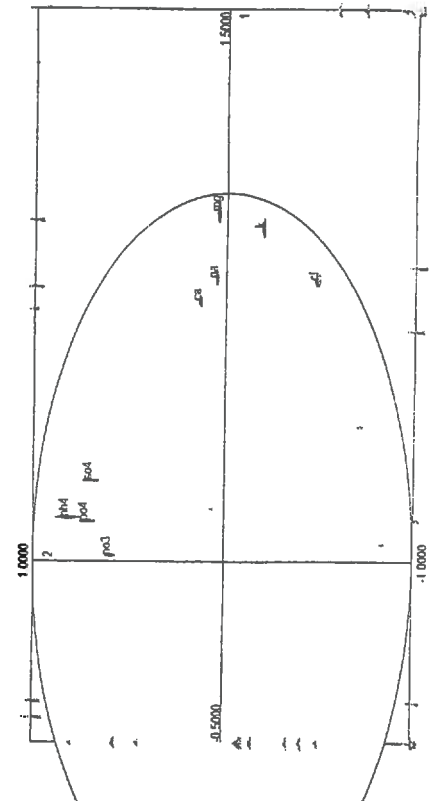
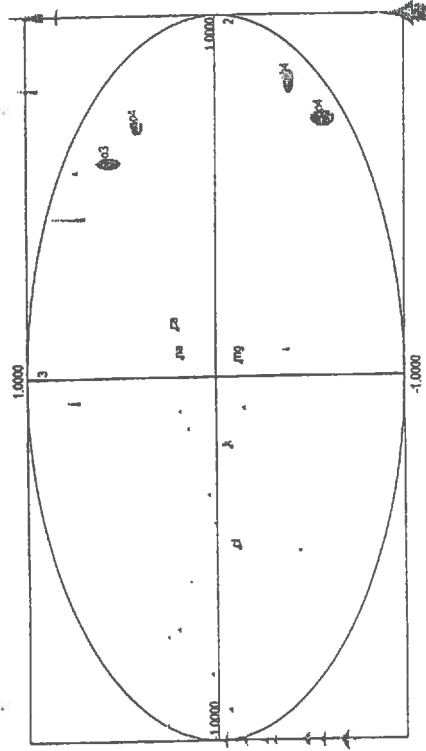
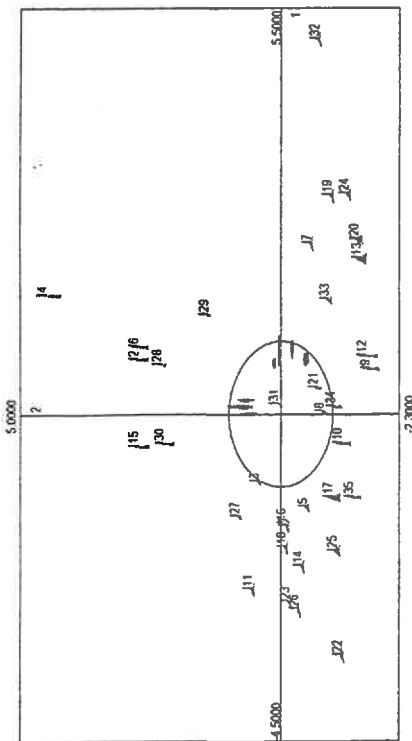
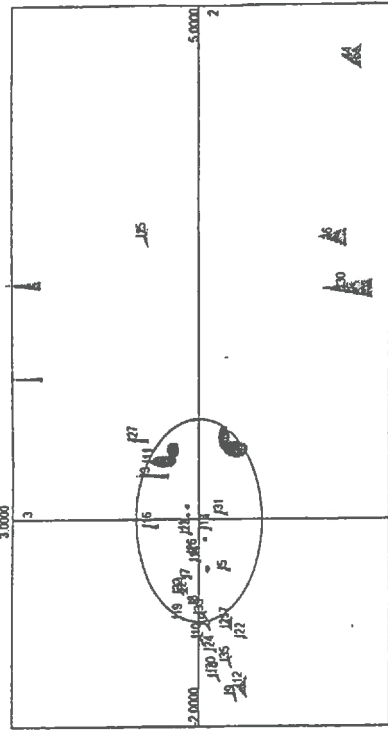
Cette méthode permet de doser le calcium, le magnésium, le silicium et l'aluminium, couramment. De nombreuses interactions existent entre les différents éléments.

ANNEXE 5c : CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DES SOLUTES

	Cl	Na	Mg	K	Ca	SO4	NO3	NH4	PO4	F
Taille de l'échantillon /56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Tendances centrales										
Moyenne	0.106	0.092	0.0204	0.144	0.125	0.094	0.068	0.190	0.0050	0.014
Mode	0.072	0.040	0.0102	0.111	0.046	0.099	0.008	0.010	0.0007	0.002
Médiane	0.090	0.070	0.0200	0.110	0.100	0.080	0.040	0.060	0.0000	0.010
1er quartile	0.050	0.040	0.0100	0.050	0.065	0.040	0.015	0.020	0.0000	0.000
3ème quartile	0.170	0.140	0.0300	0.245	0.150	0.120	0.065	0.180	0.0000	0.020
1er décile	0.020	0.020	0.0000	0.020	0.050	0.020	0.000	0.010	0.0000	0.000
9ème décile	0.200	0.200	0.0400	0.340	0.240	0.190	0.150	0.630	0.0200	0.030
1er centile	0.000	0.010	0.0000	0.010	0.030	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
99ème centile	0.260	0.270	0.0600	0.400	0.620	0.410	0.840	1.560	0.0800	0.200
Dispersion										
Minimum	0.000	0.010	0.0000	0.010	0.030	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
Maximum	0.260	0.270	0.0600	0.400	0.620	0.410	0.840	1.560	0.0800	0.210
Amplitude	0.260	0.260	0.0600	0.390	0.590	0.410	0.840	1.560	0.0800	0.210
IQR	0.120	0.100	0.0200	0.195	0.085	0.080	0.050	0.160	0.0000	0.020
Coefficient de variation	0.663	0.732	0.7007	0.809	0.796	0.786	1.867	1.630	2.7255	2.317
Variance	0.005	0.005	0.0002	0.014	0.010	0.005	0.016	0.090	0.0002	0.001
Variance estimée	0.005	0.005	0.0002	0.014	0.010	0.006	0.017	0.090	0.0002	0.001
Ecart type	0.070	0.067	0.0143	0.117	0.100	0.074	0.127	0.300	0.0136	0.033
Asymétrie										
Cy (Yulle)	0.063	-0.039	-0.0357	0.031	-0.416	-0.353	-1.129	-1.160		-0.429
Ck (Kelley)	-0.020	0.040	0.0000	-0.070	-0.045	-0.025	-0.035	-0.260	-0.0100	-0.005
Cp (Pearson)	0.487	0.769	0.7136	0.286	0.796	-0.064	0.477	0.570	0.3145	0.375
B1 (Pearson)	0.126	0.969	0.4565	0.552	8.160	3.417	19.832	6.960	13.7217	21.518
G1 (Fischer)	0.355	0.984	0.6756	0.743	2.857	1.849	4.453	2.640	3.7043	4.639
Aplatissement										
Ak (Kelley)	0.333	0.278	0.2500	0.305	0.224	0.235	0.167	0.130	0.0000	0.333
B2 (Pearson)	2.050	3.157	2.9055	2.148	13.212	7.657	25.419	10.140	18.2067	25.550
G2 (Fischer)	-0.950	0.157	-0.0945	-0.852	10.212	4.657	22.419	7.140	15.2067	22.550

ANNEXE 5e : DIAGRAMMES D'ANALYSE A COMPOSANTES PRINCIPALES
A 9 VARIABLES - RENNES 1994-1995

#	Valeur	Pourcent	Cumul
1	3.5025	38.92	38.92
2	2.2866	25.41	64.32
3	1.0652	12.06	76.38
4	0.7428	8.25	84.64
5	0.6345	7.05	91.69
6	0.3034	3.37	95.06
7	0.2581	2.87	97.92
8	0.1198	1.33	99.26
9	0.0670	0.74	100.00



	Q11	Poidslntr	CoordCor	Ctr	Axe 1	CoordCor	Ctr	Axe 2	CoordCor	Ctr	Axe 3	CoordCor	Ctr
mg	0.92	1.00	0.11	0.95	0.91	0.26	0.04	0.00	0.00	-0.13	0.02	0.02	0.00
cl	0.82	1.00	0.11	0.77	0.59	0.17	-0.47	0.22	0.10	-0.12	0.01	0.01	0.01
no	0.67	1.00	0.11	0.02	0.00	0.00	0.59	0.35	0.15	0.57	0.32	0.29	0.16
so	0.70	1.00	0.11	0.22	0.05	0.01	0.69	0.48	0.21	0.41	0.17	0.16	0.16
ca	0.57	1.00	0.11	0.71	0.51	0.15	0.14	0.02	0.01	0.21	0.04	0.04	0.04
k	0.86	1.00	0.11	0.91	0.82	0.24	-0.19	0.04	0.02	-0.07	0.01	0.00	0.00
na	0.63	1.00	0.11	0.77	0.60	0.17	0.06	0.00	0.00	0.18	-0.03	0.03	0.03
po	0.85	1.00	0.11	0.11	0.01	0.00	0.71	0.51	0.22	-0.57	0.33	0.30	0.30
ph	0.83	1.00	0.11	0.12	0.02	0.00	0.81	0.66	0.28	-0.39	0.15	0.14	0.14

ANNEXE 5f :
EXTRAIT DU COLLOQUE
'Qualité des eaux et produits phytosanitaires :
du diagnostic à l'action'
Rennes, le 27 novembre 1995

C. GASCUEL-ODOUX, S. CROS-CAYOT, M. CLEMENT,
 P. CURMI, F. GARNIER, D. HEDDADJ et R. SEUX

Des expérimentations sur le transfert des pesticides ont été menées, en relation avec la description des transferts d'eau et de charges solides et l'analyse des mécanismes associés. Ces expérimentations ont eu pour objectif de préciser les distances parcourues par quelques molécules, à la surface du sol, à partir de placettes de quelques m² traitées. Elles font suite à des résultats obtenus à l'échelle de bassins versants (Gillet et al., 1995). Elles ont été menées in situ, en conditions naturelles, sur la même parcelle que précédemment.

Une forte décroissance des concentrations dans les eaux de ruissellement en fonction de la distance à la zone traitée est observée (Orhon, 1993). Celle-ci indique qu'au cours des transferts à la surface du sol, les pesticides sont soit fixés en surface, soit entraînés dans le sol par l'infiltration de l'eau, au cours de la pluie. La part entre infiltration et ruissellement a pu être précisée, pour la période estivale et pour deux molécules, l'atrazine et le lindane (Farié, 1994). Les résultats montrent (Fig. 2) :

- une forte différence de comportement entre l'atrazine et le lindane. L'atrazine est en quantité nettement plus importante que le lindane, que ce soit dans les eaux de ruissellement ou dans le sol, à la surface ou en profondeur. Dans le cas du lindane, le transfert vertical est limité aux dix premiers centimètres. Ces résultats confirment que l'atrazine, molécule de plus forte solubilité, apparaît bien comme un produit beaucoup plus mobile que le lindane. Celui-ci reste fortement lié aux particules de sol et localisé en surface.
- les concentrations dans les eaux de ruissellement dépendent très fortement de la distance à la zone traitée. Elles dépendent également de l'importance du ruissellement qui permet une migration plus ou moins importante et sur une plus ou moins longue distance des produits.
- les concentrations dans le sol dépendent elles aussi très fortement de la distance à la zone traitée. Ces transferts latéraux semblent dus exclusivement à des transferts de surface, tout au moins pour ce qui concerne la couche de labour concernée par les mesures. Lors des épisodes de petite importance, les molécules migrent en surface et s'infiltrent à la fois.

Lors des épisodes plus importants c'est essentiellement une migration de surface qui a lieu et qui atteint des distances notables.

La période hivernale est en cours d'étude, de même que l'importance relative des termes d'infiltration (Chasseux, 1995). Ces résultats montrent néanmoins l'importance du terme distance à la zone traitée par rapport au risque de pollution. Ils ne permettent cependant pas d'extrapolation quantitative sur l'importance des flux de pesticides en surface, soit en terme de redistribution, soit en terme de flux sortant, lorsque l'ensemble d'un versant est traité. Ces aspects devront faire l'objet d'autres travaux.

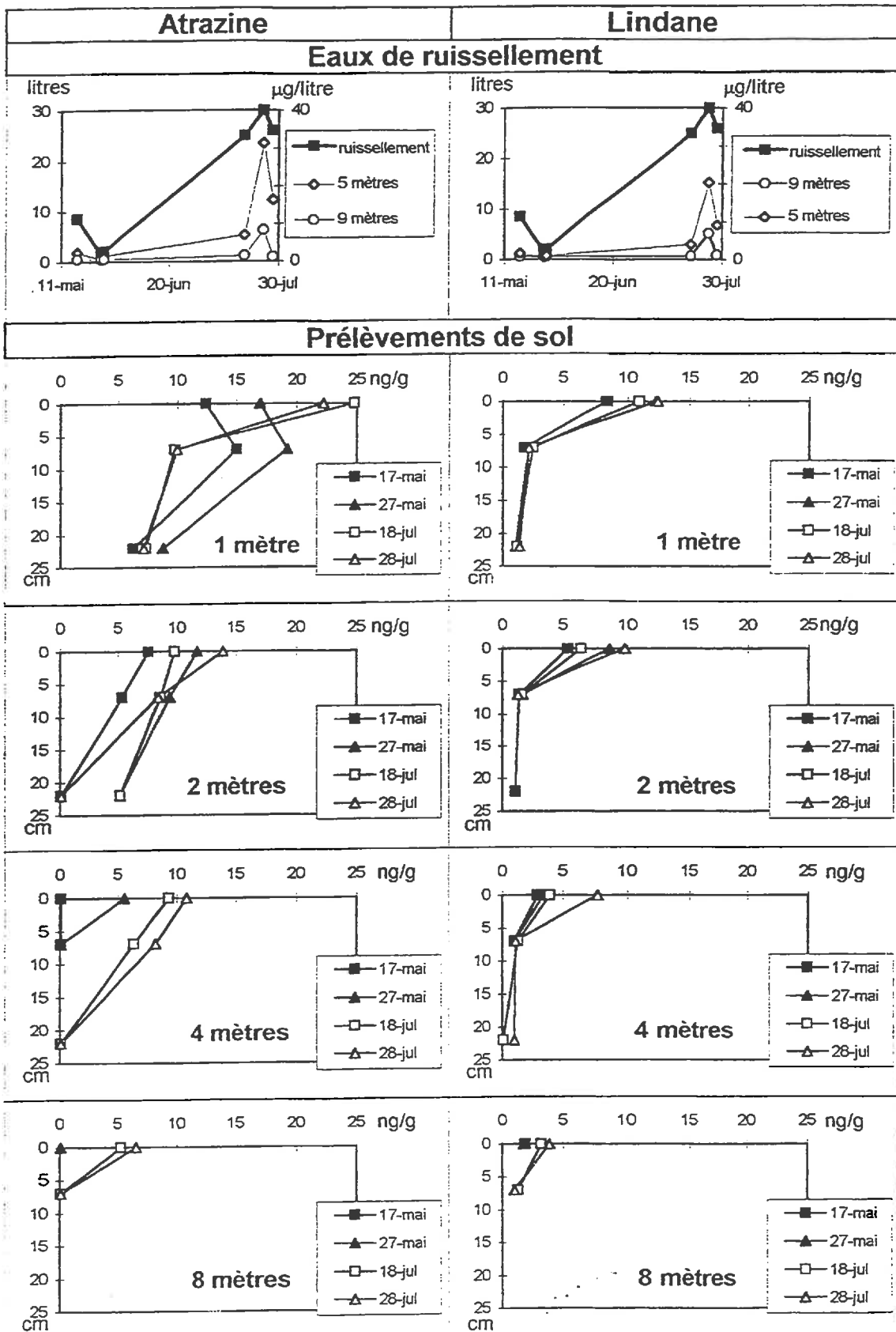


Figure 2 - Concentrations pour deux pesticides, l'atrazine et le lindane, en fonction de la distance à une source : dans les eaux de ruissellement, en fonction du temps ; dans le sol, en fonction de la profondeur de prélèvement et du temps (d'après Farié, 1994).

