

Rôle des caractéristiques physiques des sols sur la distribution spatiale du ruissellement le long du versant.

*D. Heddadj***, C. Gascuel-Odoux*, S. Cros-Cayot* et P. Curmi**

**INRA, Science du Sol, Rennes*

***INRA, Alger*

Résumé

Dans le contexte armoricain, le ruissellement de surface est étudié, bien qu'il ne représente qu'une fraction mineure de l'écoulement : c'est en effet le vecteur privilégié des polluants liés aux particules de sol. Le ruissellement est lié à l'intensification agricole dans une région où les sols sont de faible stabilité structurale, et sont donc sensibles à la battance et à la prise en masse. Une analyse de la distribution spatiale du ruissellement, le long du versant et au cours d'une année, réalisée grâce un ensemble de collecteurs répartis sur le versant, est présentée. Cette analyse est reliée à un ensemble de mesures physiques d'infiltrométrie réalisées par TRIMS. Ces mesures sont réalisées à différents niveaux de pente, à différentes périodes, sur et sans passage de roue. Elles montrent que la conductivité hydraulique varie notablement sur le versant et au cours d'une année culturale. Cette technique de mesure, qui concerne tout le domaine proche de la saturation, permet de connaître la gamme porosité concernée par ces variations spatiales et temporelles et de discuter des processus mis en jeu.

mots-clés : ruissellement, infiltrométrie, couche labourée, variations spatiales et temporelles, versant, massif armoricain

Abstract

In the Armorican Massif, the overland flow is studied despite it is a minor hydrological component, because it is the major vector of pollutants absorbed on soil particles. The overland flow is due to an intensive agriculture in a region where soils present a low structural stability. The space and time distribution of overland flow along the hillslope and during a year is studied by means of a network of overland flow collectors. The results are related to soil physical properties consisting in infiltrometer measurements by means of a trims. These measurements are performed at different positions on the slope and and at different period of the year. They really show consistent space and time variations. Moreover this technic that determine the domain of the macroporosity concerned by these variations, allow to discuss in the processes.

Key-words : overland flow, infiltrometer, ploughed horizon, space and time variations, hillslope, Armorican Massif

Introduction

Dans le Massif Armoricaïn, 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. En effet, le ruissellement de surface est un vecteur privilégié pour le transfert des polluants liés aux particules de sols (phosphore, pesticides...).

Dans ce contexte, le ruissellement de surface est principalement lié à l'intensification agricole, avec un développement de systèmes de culture où la couverture végétale est parfois absente, parfois partielle, où les engins agricoles passent plus fréquemment. Les sols sont limoneux et présentent une faible stabilité structurale ; ils sont sensibles à la battance et au tassement. L'érosion induite est surtout une érosion diffuse (Gascuel-Oudoux et al., 1991; Le Bissonnais et Gascuel-Oudoux, sous presse,) ; elle n'entraîne pas d'effets érosifs majeurs de type ravine ou coulée boueuse sauf évènement exceptionnel et site très vulnérable.

L'étude du ruissellement et de l'érosion a donc pour premier objectif de caractériser les flux de surface qui sortent de la parcelle ou du versant et vont alimenter le réseau hydrographique. Elle vise également à préciser les transferts de surface au sein du versant. Ceux-ci induisent une redistribution, un tri des particules le long du versant qui peuvent créer des zones de dépôt privilégiées dans le versant.

Les questions abordées sont de deux ordres. D'une part, on essaie de connaître la distribution spatiale des flux de ruissellement le long d'un versant au cours d'un cycle cultural. D'autre part, on tente de mettre en relation cette distribution spatiale des flux avec celle des constituants et des caractéristiques physiques de l'horizon de surface. Cette analyse prend donc en compte des variations dans l'espace et le temps. Les échelles étudiées sont celles d'une portion de versant et d'une année culturale.

1 - Matériels et méthodes

Le site expérimental

La parcelle agricole choisie (Fig. 1) constitue une portion de versant de forme convexo-concave dont la morphologie est représentative du contexte armoricaïn. Cette parcelle de 280 mètres de long sur 100 mètres de large, présente dans sa partie centrale un gradient de pente de 4,5%. Les sols sont limoneux, bruns faiblement lessivés. Ils sont relativement homogène le long du versant. Ils présentent une très légère hydromorphie sous l'horizon de labour dans la concavité aval. Cette parcelle ne présente aucune forme d'érosion concentrée de type incision ou ravine.

Cette parcelle est cultivée en maïs, dans le sens de la pente. Le maïs a été semé en avril, traité courant juin, et récolté fin novembre. A l'issue de la récolte, la parcelle a été laissée en l'état, avec quelques résidus de culture en surface. Le labour n'a eu lieu qu'en avril suivant. Le suivi du ruissellement a donc pu être mené au cours d'un cycle cultural complet, sans perturbation pour les mesures effectuées.

Les mesures de ruissellement

Elles ont été réalisées à l'aide d'un réseau de 15 dispositifs répartis sur la parcelle (Fig. 1) : trois dispositifs sont installés à cinq niveaux de pente régulièrement espacés. Les trois

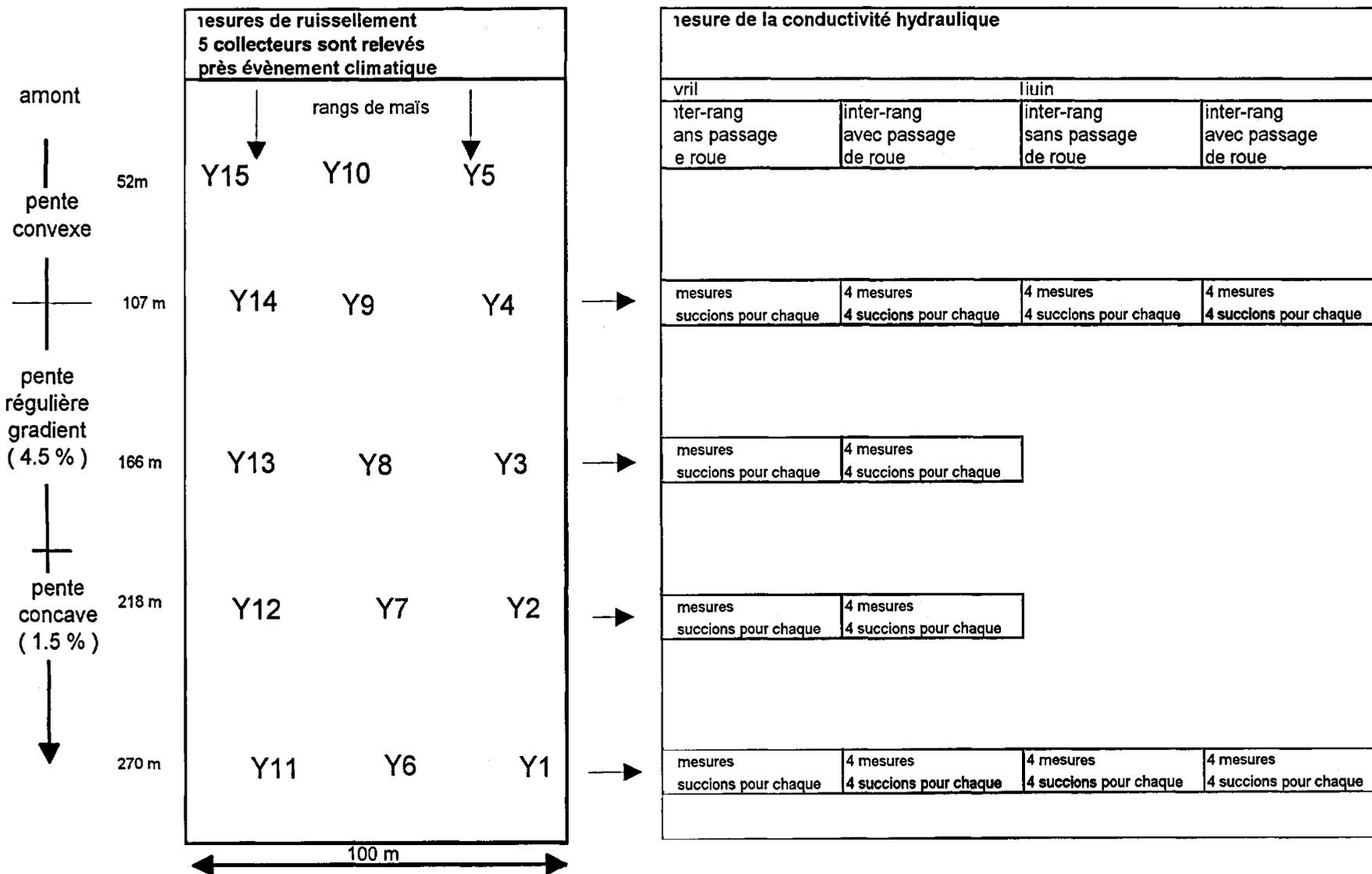


Figure 1 - Schéma du dispositif expérimental pour les mesures de ruissellement et d'infiltrométrie

dispositifs d'un même niveau de pente donnent une idée de la variabilité spatiale à un niveau de pente donné. Les cinq niveaux de pente permettent d'aborder la distribution spatiale des flux selon des niveaux clés de la topographie : 1) en amont, en fin de plateau ; 2) après la convexité amont ; 3) dans la partie linéaire de pente maximum ; 4) dans la concavité aval ; 5) en fin de parcelle. L'implantation des dispositifs est choisie de façon à ne pas perturber les interventions culturales nécessaires, les inter-rangs n'étant pas tous utilisés pour les traitements et la récolte.

Le dispositif utilisé (Cayot, 93 ; Gascuel et al., sous presse) est constitué d'un collecteur triangulaire large de 0.7 mètres qui intercepte toute l'eau ruisselant depuis l'amont entre deux rangs de maïs. Ce collecteur est relié par une gouttière carrée jusqu'à un container totalisateur de 60 litres. Celui-ci est relevé après chaque événement pluvieux, dont la hauteur est supérieure à 4 mm ou dont l'intensité est supérieure à 2,5 mm/h. On dispose ainsi de chroniques de ruissellement par averse et par niveau de pente. Seules les valeurs moyennes par niveau de pente et par saison sont analysées ici.

Les mesures de conductivité hydraulique

Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un infiltromètre à disques -TRIMS, Triple Ring Infiltrimeter at Multiple Suctions- (Ankeny et al., 1990 ; 1991). Cette méthode permet de mesurer la conductivité hydraulique à un potentiel donné. En effectuant des mesures pour différents potentiels, on a accès à la courbe $K(h)$, conductivité hydraulique, K , en fonction du potentiel, h . Cette courbe permet d'analyser les transferts dans le domaine proche de la saturation qui correspond aux conditions de transfert lors de la genèse du ruissellement. En comparant les mesures sur différents sites, et en faisant l'hypothèse du modèle capillaire, on peut apprécier les domaines de la macroporosité concernés. Ce type d'étude a déjà été réalisé pour estimer l'incidence du tassement des sols sur les transferts de l'eau (Mohanty et al., 1994).

La mesure par TRIMS est réalisée à la surface du sol, sur un lit de sable fin qui aplanit la surface et permet de réaliser des mesures sans destruction de la surface. La mesure intègre les premiers centimètres du sol et une surface circulaire de 80 mm de diamètre correspondant à celle du disque utilisé. Le disque, une fois positionné sur le sol, n'est pas déplacé pour effectuer les mesures correspondant aux quatre potentiels, ce qui limite les effets de la variabilité spatiale.

Le protocole (Fig. 1) comporte des mesures à deux périodes de l'année. En fin de saison agronomique, soit début avril 1995, 128 mesures de conductivité ont, au total, été réalisées. C'est une période où la croûte de battance et la prise en masse de l'horizon de surface sont les plus développées. Les mesures sont réparties de la façon suivante :

- Deux inter-rangs de maïs ont été choisis, l'un étant affecté par des passages d'engins agricoles, l'autre non.
- Pour chaque inter-rang, quatre niveaux de pente ont été retenus.
- A chacun d'eux quatre mesures réparties sur 1 m² ont été réalisées, ceci de façon à pouvoir estimer fidèlement des valeurs moyennes de conductivité hydraulique par niveau de pente.
- Les mesures ont été réalisées, successivement, à des succions de 1, 3, 6 puis 15 hPa.

Afin de comparer les évolutions temporelles, une seconde série de mesures a été réalisée fin juin 1995, en début de culture suivante, alors qu'une croûte structurale était déjà formée. Cette seconde série de mesure a été plus réduite.

Deux inter-rangs ont été de même pris en compte, mais seulement à deux niveau de pente -aval et versant- et à trois succions. Pour chaque site, quatre mesures ont été réalisées, de même que précédemment. Au total 48 mesures ont permis de caractériser la conductivité hydraulique lors de cette seconde série de mesures.

2 - Distribution spatio-temporelle des flux de ruissellement

La chronique du remplissage des containers après chacune des averses et tout au long de l'année met en évidence une dynamique spatiale et temporelle du ruissellement. L'analyse des données se simplifie en considérant deux saisons climatiques correspondant à des caractéristiques de pluies et des états hydriques différents. Quatre classes de ruissellement sont distinguées arbitrairement pour analyser ces données. Elles correspondent cependant à certaines conditions de transfert :

- 1) le container est vide ; il n'y a pas ruissellement ;
- 2) le container contient moins de 10 litres ; le ruissellement est local ou intermittent ;
- 3) le container contient plus de 10 litres mais n'a pas débordé ; le ruissellement est conséquent ;
- 4) le container a débordé ; une lame d'eau continue se forme à la surface du sol de façon relativement durable.

Tableau 1 - Répartition des occurrences de ruissellement (en %) selon quatre classes, en fonction de la distance à l'amont (en mètre). Valeurs moyennes calculées par niveau de pente.

	hiver					été					été	hiver
distance/amont	52	107	166	218	270	52	107	166	218	270	moyenne	moyenne
vide	34	51	29	30	44	47	39	36	40	69	46	38
< 10 litres	27	16	32	28	16	23	17	23	25	6	19	24
plein	16	24	14	9	7	8	9	10	12	15	11	14
débordé	23	8	25	33	36	22	35	31	23	10	24	25

Les résultats (Tableau 1) montrent que les occurrences de ruissellement ne sont pas réparties de façon très différentes selon les deux périodes considérées, lorsque les différents niveaux de pente sont confondus, ceci malgré de fortes différences entre les deux périodes climatiques distinguées. Durant les deux périodes, on observe qu'environ la moitié des événements climatiques n'induit pas de ruissellement ; qu'un quart des événements conduit à un ruissellement conséquent, faisant intervenir le versant dans son ensemble.

Les différences entre ces deux périodes portent sur la répartition des occurrences de ruissellement le long de la pente. En période estivale, la proportion de containers débordés n'est que de 10 % à l'aval alors qu'elle est de 35% dans la convexité de versant. A l'inverse, en période hivernale, la proportion de containers débordés est de 36% à l'aval alors qu'elle n'est que de 8% dans le versant. En période estivale, les averses orageuses sur un sol relativement sec induisent une redistribution des flux le long du versant, sans sortie vers le ruisseau, dans la majeure partie des événements climatiques, l'eau s'infiltrant de façon privilégiée dans la concavité de bas de versant. A l'inverse, durant la période hivernale, l'eau s'infiltré mieux sur le versant qu'à l'aval et conduit à des ruissellements fréquents et importants de bas de versant alimentant ainsi de façon notable le ruisseau.

Ces résultats peuvent s'interpréter selon l'état d'humidité du versant et l'importance des événements climatiques, très différents dans les deux périodes considérées : le sol plus humide en bas de versant se sature plus facilement et explique ainsi le ruissellement hivernal de bas de versant. Cependant ces résultats peuvent également être expliqués par des variations dans le temps et dans l'espace des propriétés du sol, montrant une faible conductivité hydraulique des sols en hiver et en bas de versant.

3 - Distribution spatio-temporelle des caractéristiques physiques de l'horizon de surface

La distribution des constituants le long du versant montre une légère augmentation de la teneur en argile et de la teneur en matières organiques dans la concavité aval de bas de versant, corrélativement à une diminution de la teneur en limons grossiers. Ces variations sont cependant assez faibles. Dans l'horizon labouré, la teneur en argile passe de 16 à 18%, et celle en matières organiques de 1,8 à 2,2%.

Les mesures de conductivité hydraulique sont représentées sous la forme de courbes $K(h)$.

La comparaison des mesures effectuées en fin de cycle cultural montre (Fig. 2) :

- une diminution des valeurs de conductivité hydraulique le long du versant. Celles-ci diminuent le long du versant, très régulièrement dans un inter-rang tassé par le passage des engins agricoles, plus irrégulièrement si l'inter-rang ne correspond pas à un passage de roue. Cette diminution est notable jusqu'à une succion de 6 hPa, elle est négligeable au delà. Cette diminution de la conductivité de l'amont à l'aval est d'amplitude nettement plus importante lorsque le sol n'a pas subi de tassement. Le versant apparaît alors plus différencié que lorsqu'il y a passage d'engins.
- La conductivité hydraulique est plus faible lorsque le sol a subi un tassement par des engins agricoles. Cette diminution, certes prévisible, affecte de façon très importante la porosité la plus grossière, correspondant à une succion de 1 hPa, de façon moins importante la porosité correspondant à des succions plus fortes. Il n'y a pas de différence significatives pour des succions de l'ordre de 15 hPa.

La comparaison des valeurs obtenues en début de cycle cultural (Fig. 3) montre que la différenciation soit le long du versant, soit suivant l'effet du passage d'engins est relativement faible par rapport à celle observée en fin de cycle cultural. La localisation des mesures dans le versant ou suivant le passage des engins n'a donc pas beaucoup de conséquence sur la valeur de la conductivité hydraulique. La parcelle apparaît relativement homogène.

La comparaison des mesures obtenues en fin de cycle cultural avec celle obtenue en début de cycle montre (figure 3) :

- une forte diminution de la conductivité hydraulique dans le temps, du début à la fin du cycle cultural. Cette diminution affecte toute la gamme de succions étudiée.
- Cette diminution est environ deux fois plus forte lorsque la mesure est sur passage de roue que sans passage de roue. Même dans ce dernier cas, la diminution de la conductivité hydraulique est tout à fait remarquable.
- Cette diminution est plus importante à l'aval que sur le versant, en particulier lorsque l'on est sur un inter-rang tassé par des engins agricoles.

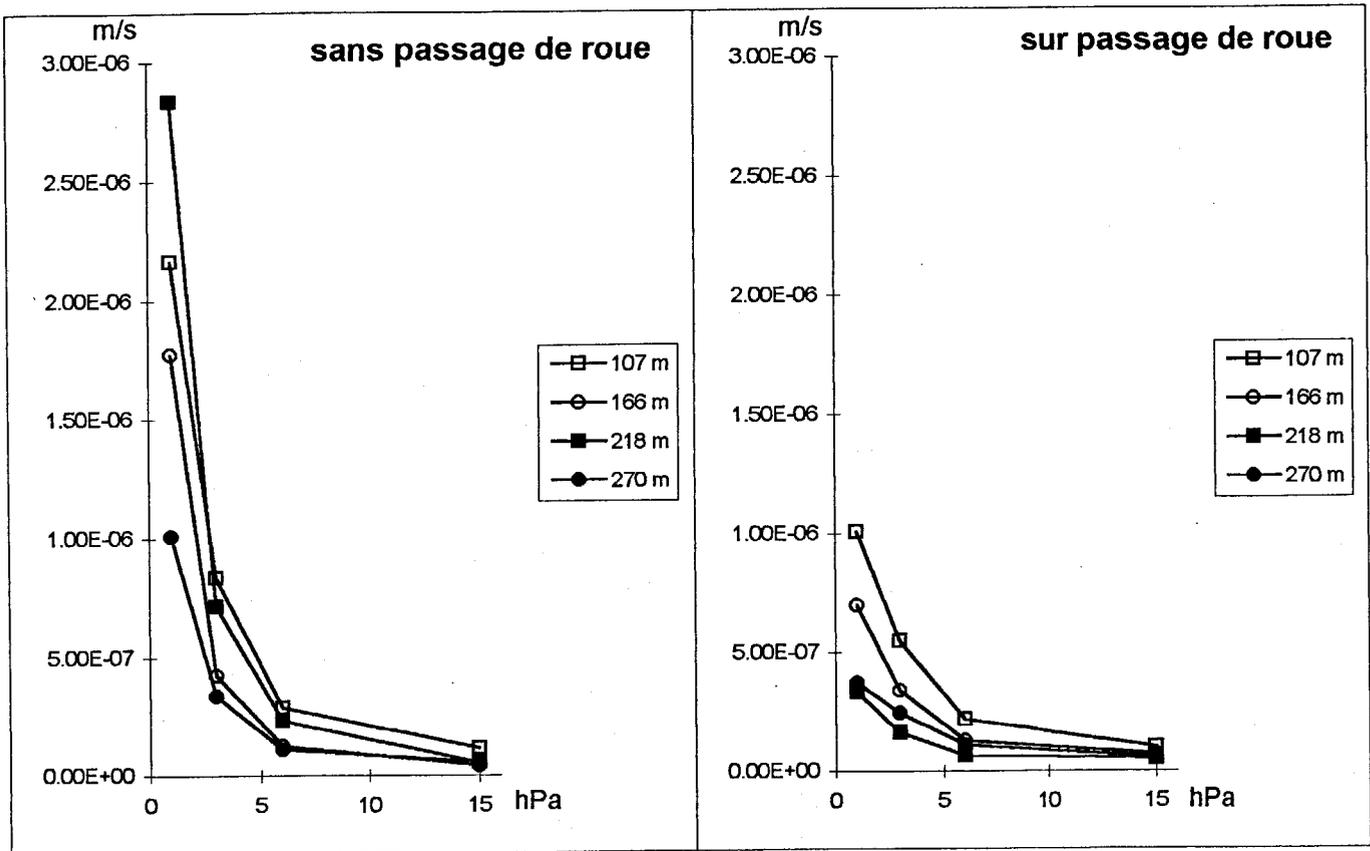


Figure 2 - Conductivité hydraulique (m/s) en fonction de la succion (hPa)
 Comparaison sur et hors passage de roue, en fonction de la distance amont.
 Mesures d'avril 1995, en fin de cycle cultural

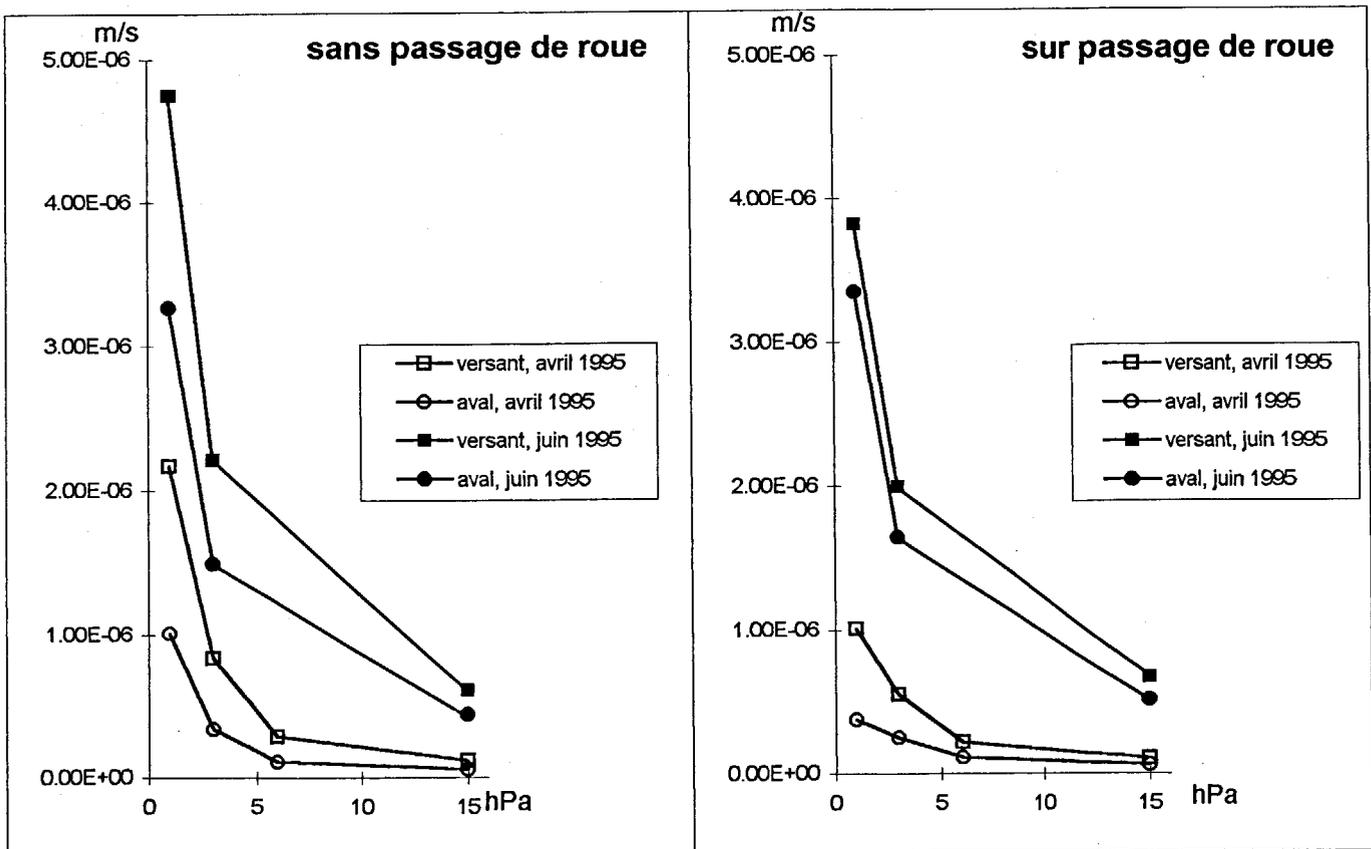


Figure 3 - Conductivité hydraulique (m/s) en fonction de la succion (hPa)
 Comparaison sur et hors passage de roue, début (juin) et fin (avril) de cycle cultural,
 et entre le versant et l'aval.

4 - Discussion et conclusion

Ces mesures de ruissellement et de conductivité hydraulique ne peuvent être directement reliées. Il faudrait pour cela mettre en oeuvre des démarches, soit expérimentales, soit de modélisation, permettant de déterminer les conductivités hydrauliques limitantes pour déclencher un ruissellement, en fonction des caractéristiques des pluies et de l'état de hydrique initial du sol. C'est une démarche qui est en cours de réalisation. Cependant, on peut remarquer que les conductivités hydrauliques sont les plus faibles à l'aval, en fin de cycle cultural et sur trace de roue, expliquant ainsi la fréquence des ruissellements dans cette période et cette situation topographique

La conductivité hydraulique, peu différenciée en début de cycle cultural selon la position topographique et selon la présence de trace de roue, se différencie nettement en fin de cycle cultural. Plusieurs explications peuvent être données.

En juin, l'état hydrique du sol est relativement sec et donc assez homogène compte tenu des faibles variations texturales de la parcelle. Dans ces conditions, l'impact du passage des engins sur la structure du sol est relativement faible, quelle que soit la position topographique. L'ensemble du versant est donc peu différencié.

En avril, après un cycle cultural complet, la différenciation du versant est plus forte, en particulier sur passage de roue. Ce résultat peut être attribuer au passage des engins agricoles, qui a lieu, lors de la récolte, à un état hydrique du sol relativement élevé. Cet état hydrique, légèrement différent de l'amont à l'aval, induit un tassement du sol nettement différencié selon la topographie, qui affecte les classes de pores les plus grossiers. On doit également attribuer ces variations spatiales à des considérations d'un autre type que celle liée aux engins agricoles. D'une part, l'importance du ruissellement, de l'érosion et de la sédimentation de bas de versant conduit à un développement différencié des croûtes de battance selon la topographie. D'autre part, des régimes hydriques différents ont conduit, au cours des cycles d'humectation et de dessiccation, à des processus de prise en masse dans l'horizon de labour d'amplitudes différentes selon la topographie. Ces processus affectent l'ensemble de la porosité étudiée. Ces deux dernières hypothèses recourant, l'une aux organisations pelliculaires de surface, l'autre à l'ensemble de la couche labourée, devront être confrontées à des démarches expérimentales complémentaires.

Des recherches sont en cours de réalisation, pour compléter cette approche. Elles font appel :

- à la micromorphologie et à l'analyse de la porosité. Ce suivi de la porosité est mené de même dans le temps et dans l'espace sur l'ensemble de l'horizon de labour ;
- à l'analyse des charges solides associées au ruissellement, permettant de définir les zones d'érosion et de dépôt selon la topographie.
- des démarches de modélisation précisant les caractéristiques des pluies pour déclencher le ruissellement, en fonction de l'état initial.

Ces approches ont pour but de préciser les mécanismes de déclenchement du ruissellement qui permettent in fine d'apporter des solutions techniques au problème de la maîtrise des flux de surface et de qualité des eaux.

Bibliographie

ANKENY, M.D., KASPAR, T.C. and HORTON, R., 1990 - Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 837-840.

ANKENY, M.D., AHMED, M., KASPAR, T.C. and HORTON, R., 1991 - Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 467-470.

CAYOT, S., 1993 - Etude spatialisée du ruissellement à l'échelle de la parcelle. Mémoire de D.E.A., INRA Rennes, 60 p.

GASCUEL-ODOUX C., BRUNEAU.P.et CURMI P.,1991- Runoff generation: assessment of relevant factors by using soil microtopography and micromorphology analysis. *Soil Technology*, 4, 209-219.

GASCUEL-ODOUX, C., CROS-CAYOT, S. et DURAND, P., 1996 - Spatial variations of sheet flow and sediment transport on an agricultural field. Accepté pour publication dans *Earth Surface Proc.*

LE BISSONNAIS Y.et GASCUEL-ODOUX C., 1996- L'érosion hydrique des sols cultivés. In: *Sols, interfaces fragiles*, Nathan. Sous presse.

MOHANTY, B.P., ANKENY, M.D., HORTON, R. et KANWAR, R.S., 1994 - Spatial analysis of hydraulic conductivity measured using disc infiltrometers. *Water Resour. Res.*, 30, 2489-2498.