

# RUISELLEMENT, INFILTRATION ET DYNAMIQUE DES ETATS DE SURFACE DU SOL : ROLE DES HETEROGENEITES LOCALES SUR LES CHEMINS DE L'EAU.

A.V. Auzet (1), P. Andrieux (2), R. Angulo-Jaramillo(3), T.Bariac (4) J. Boulègue (5),  
L.-M.Bresson (6), F.Darboux (7), M. Esteves (3), C. Gascuel-Oudoux (7), M.J. Kirkby (9),  
Y. Le Bissonnais (10), B. Ludwig (11), O<sup>de Vries</sup>/Planchon (8), S. Roulier (3)

(1) CEREG, UMR7007 CNRS-ULP Strasbourg, (2) UMR Science du Sol INRA-ENSA Montpellier, (3) LTHE UMR 5564 CNRS-INPG-UJF-ORSTOM Grenoble, (4) LBI UMR 7618 CNRS-INRA-UPMC Paris, (5) LGM CNRS-UPMC Paris, (6) INRA Grignon, (7) INRA Rennes (8) IRD Dakar, (9)Geography Univ Leeds, (10) INRA Orléans, (11) INRA Laon.

**Mots clés : infiltration, ruissellement, microrelief, dégradation structurale.**

## INTRODUCTION

La répartition de l'eau arrivant au sol entre ruissellement et infiltration est une question clé pour la progression des connaissances des fonctionnements hydrologiques et la modélisation spatialisée à l'échelle de versants ou de bassins versants. Les états de surface du sol (états hydriques et structuraux, microrelief) exercent un contrôle sur cette partition, sur les chemins empruntés par l'eau, particulièrement en surface et dans la zone non saturée, avant son arrivée éventuelle dans les nappes ou les réseaux hydrographiques. Ils influencent ainsi fortement les flux d'eau et de matières associés (sédiments et polluants).

Le premier objectif du projet RIDES « Ruissellement, Infiltration, Dynamique des Etats de Surface » était de mettre en commun la réflexion et de coordonner les efforts menés dans ce domaine par différentes équipes, de manière largement transversale du point de vue disciplinaire et méthodologique.

Les principales questions traitées concernent la caractérisation des états de surface (structure et microrelief) et la quantification des effets sur les paramètres de l'infiltration et de l'hydraulique du ruissellement.

## MATERIELS ET METHODES

### *Infiltrométrie*

L'organisation du système poral en surface associée aux différents types d'états de surface a une incidence importante sur les propriétés hydrodynamiques. Trois types de méthodes ont été utilisées sur différents sites et lors de différentes campagnes.

A l'échelle locale, des mesures ont été effectuées à l'aide d'infiltromètres à disques permettant une caractérisation hydrodynamique à proximité de la saturation pour caractériser des faciès de croûtes structurales et de croûtes sédimentaires (Estèves et al., 2000 ; Roulier et al., ce volume).

A l'échelle de parcelles, des simulations de pluie ont été effectuées sur des sols et des conditions de surface très contrastés, avec différents types de simulateurs, sur des surfaces de 1m<sup>2</sup> (Leonard et Andrieux, 1998 ; Salles et al., ce volume), 10m<sup>2</sup> (Lecomte, 1999) et 50m<sup>2</sup> (Estèves et al., à paraître). L'infiltration est calculée à partir de l'intensité des pluies et du ruissellement.

En outre, des mesures ont été effectuées sur des parcelles de dimensions réduites (1 à 10<sup>3</sup> m<sup>2</sup>) sous pluies naturelles.

D'autre part, l'utilisation de traceurs (Oxygène 18, Rhénium, Deutérium) a été utilisée pour

- déterminer les fractions d'eau mobile et les caractéristiques hydrodispersives des croûtes et du sols sous-jacent (Roulier, 1999 ; Roulier et al., 1999)
- d'identifier les chemins de l'eau à la surface du sol.

### *Microrelief*

Deux approches complémentaires ont été développées pour comprendre le rôle du microrelief sur la dynamique du ruissellement.

Une approche expérimentale a consisté à mesurer des surfaces au cours de séquences de pluies naturelles ou simulées :

- en laboratoire grâce à un rugosimètre laser (Huang 1990a) permettant ainsi d'obtenir des modèles numériques d'altitudes de surfaces couvrant une superficie de  $2,5 \times 2,5 \text{ m}^2$  ;
- in situ grâce à un rugosimètre mono-aiguille piloté électroniquement ; le pas d'acquisition le long de profils est programmable de 1 à 5 cm ; la superficie couverte est adaptable de 1 à  $50 \text{ m}^2$  (Planchon et al, soumis).

Une première approche, purement numérique sur des surfaces artificielles générées numériquement, permet d'étudier par une technique de marcheurs le développement des connexions entre les dépressions et la propagation du ruissellement sur ces surfaces. Ce modèle calcule un coefficient de ruissellement et une distance de transfert de l'eau, qui mesure respectivement les flux d'eau sortant de la surface et la redistribution des flux d'eau (Darboux, 1999). Une seconde approche utilisant un modèle couplé (Infiltration/Ruissellement) à base physique a également permis d'étudier l'impact du microrelief sur le transfert du ruissellement dans une parcelle cultivée (Esteves et al., 1998).

### **Caractérisation des états de surface**

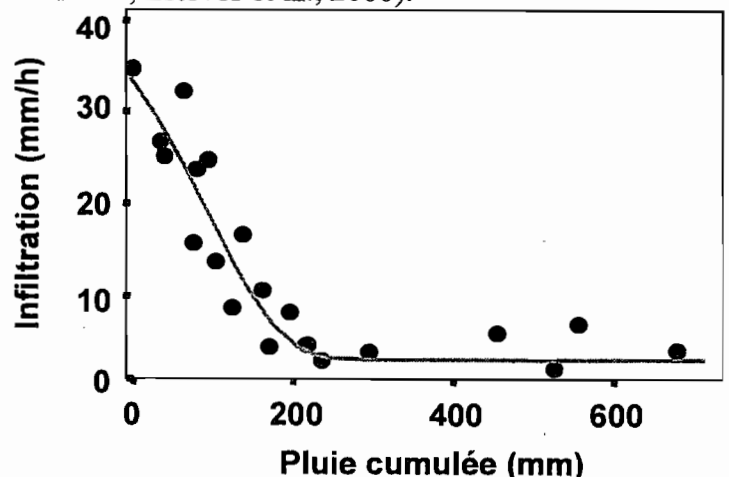
Un protocole standard de description des conditions de surface du sol a été élaboré à partir d'une analyse de la littérature et des méthodes utilisées par différents groupes (Auzet et al., 1998 ; Auzet, 2000). Il vise à établir une typologie. Fondé sur l'état actuel des connaissances, il est suffisamment simple pour permettre une caractérisation efficace, rapide et peu coûteuse de surfaces étendues, et doit permettre de tenir compte des variations spatiales et des évolutions. Il concerne les principaux points suivants : texture du sol – teneur en cailloux incluse -, croûtes (type et extension relative), végétation (type, couverture et nature du contact entre collet et sol), pratiques agraires et/ou activité biologique, macropores apparents en surface, microrelief, état hydrique, pente de la placette. Cette caractérisation peut aisément être menée sur des microparcelles de 60 cm par 40 cm, faciles à délimiter au moyen d'un double mètre pliant, et à photographier. Celles-ci sont choisies au sein d'unités considérées comme relativement homogènes du point de vue du sol, de la topographie et de l'occupation du sol. Elles doivent être représentatives du site.

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### **Effets de la dégradation de la surface du sol sur l'infiltration**

Les résultats obtenus sur des sols limoneux sensibles à la dégradation structurale confirment tous la baisse de conductivité hydraulique effective entre l'état fragmentaire, ouvert (agrégats libres entre eux, macropores entre les mottes) après un travail du sol et la fermeture progressive ou brutale du système poral en surface due à la formation des croûtes. Une bonne illustration en est donnée par la figure 1 qui montre l'évolution des valeurs d'infiltration en régime quasi permanent estimées à partir des hydrogrammes ruisselés enregistrés sous pluies naturelles à l'exutoire d'une parcelle de vigne désherbée mécaniquement. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles mesurées sur des états de surface identiques à l'échelle de  $1 \text{ m}^2$  (Léonard et Andrieux, 1998) avec un simulateur de pluie à aspersion (Salles et al., ce volume ; Esteves et al., 2000).

Figure 1 : évolution de l'infiltration avec la dégradation progressive de la structure du sol en surface sous l'effet des pluies cumulées. Parcelle de vigne désherbée mécaniquement par un labour, (bassin du Roujan, Hérault)



Les valeurs sont certes très différentes d'un sol à l'autre, mais la forme des relations obtenues par les différentes méthodes d'infiltrométrie in situ est similaire et concerne des échelles spatiales

de quelques cm<sup>2</sup> (la surface du disque d'un infiltromètre TRIMS) à celles de parcelles du m<sup>2</sup> à quelques centaines de m<sup>2</sup> (cf. Roulier et al., ce volume).

### ***Traçage des chemins de l'eau***

L'analyse des essais d'infiltration d'eau tracée avec l'infiltromètre TRIMS a montré que la teneur en eau mobile des croûtes structurales était supérieure à celle du sol sous-jacent. L'hypothèse est que la coalescence des agrégats, plus importante dans la croûte structurale que dans le lit de semence sous-jacent dans le cas présenté ici, améliore l'interconnexion du réseau poral (Roulier, 1999).

L'analyse du ruissellement sous simulation de pluie à l'eau tracée (Oxygène 18, Rhénium) confirme que l'ensemble de la surface – creux et bosses affectés respectivement par des croûtes sédimentaires et structurales – a subi une infiltration. Elle a en outre permis de montrer à échelle fine l'hétérogénéité de l'origine de l'eau qui a participé au ruissellement superficiel et les échanges à travers les croûtes, l'eau de ruissellement ayant une signature différente de celle de la pluie tracée (cf. Bariac, Boulègue et al., ce volume).

### ***Evolution du microrelief; effets sur les distances de transfert; prise en compte de l'effet des connexions sur le stockage et le ruissellement***

La rugosité de la surface du sol diminue progressivement avec la lame d'eau ajoutée. Les courbes de coefficient de ruissellement obtenues par le modèle de marcheurs appliqué aux surfaces mesurées montrent de forts contrastes dans l'évolution du déclenchement du ruissellement (Fig. 2). Dans un premier temps, l'apparition du ruissellement à l'aval est brutale (surfaces rain0 et rain1) et un seuil de déclenchement du ruissellement apparaît clairement au voisinage de la capacité de stockage. Pour des volumes ajoutés inférieurs à la capacité de stockage, il n'y a pas de transfert d'eau à l'extérieur de la surface. Les dépressions se remplissent sans se connecter à l'exutoire. Pour des volumes d'eau supérieurs à la capacité de stockage, toutes les dépressions sont remplies et connectées à la bordure; le ruissellement est généralisé à l'ensemble de la surface. Pour des surfaces plus évoluées (pluies 2, 3 et 4), ce seuil disparaît. L'apparition du ruissellement à l'aval est précoce, mais il faut des apports d'eau notablement supérieurs à la capacité de stockage pour que le ruissellement se généralise à l'ensemble de la surface. La connexion des dépressions à la bordure se fait donc de manière plus graduelle pour des surfaces évoluées. Cette dynamique de connexion des écoulements varie avec la taille du système, la succession des pluies, les caractéristiques statistiques de la rugosité (ratios entre rugosité locale et pente globale). La distance de transfert au sein de ces surfaces apparaît beaucoup plus sensible à la géométrie des surfaces que le seul coefficient de ruissellement (cf. également Darboux et al., ce volume). Les mêmes tendances sont observées en utilisant un jeu de données acquis par un rugosimètre moins précis mais sur une surface plus importante (Planchon et Darboux, soumis).

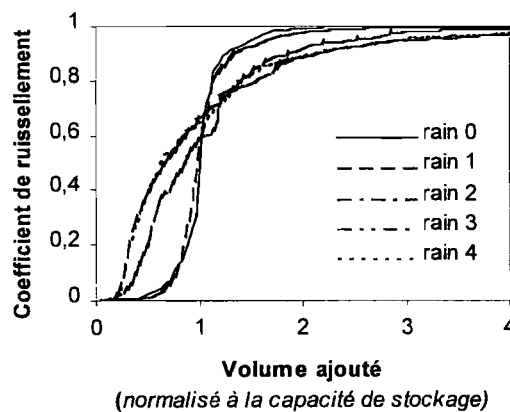


Figure 2 : Evolution du coefficient de ruissellement pour une gamme de surfaces correspondant à des pluies successives. (L'unité en abscisse correspond à l'ajout d'un volume d'eau égal à la capacité de stockage de la surface considérée.)

## **Caractérisation des états de surface du sol**

La comparaison critique de protocoles employés par différentes équipes a conduit à élaborer un protocole standardisé prenant davantage en compte les différents éléments permettant d'apprécier l'ouverture du système poral en surface et la structure du microrelief (Auzet, 1999). Le protocole mis au point est en cours de test dans différents sites. L'objectif est clairement de dégager des types de surfaces auxquels pourront être associées des distributions de paramètres de l'infiltration et du ruissellement.

## **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

La comparaison des estimations des paramètres de l'infiltration par différentes méthodes a permis de confirmer et de quantifier l'effet réducteur de l'infiltration de la fermeture de la surface liée d'abord à la fusion des agrégats sous l'effet des pluies successives et de relativiser cet effet dans le cas de sols dont l'état initial est déjà très dégradé. Les résultats obtenus dans différents sites semblent indiquer l'existence de seuils à partir desquels l'infiltration est très limitée : les états de surface correspondants et la diversité des conditions d'atteinte de ces seuils restent encore à préciser.

L'évolution du microrelief conduit à modifier très significativement la collecte de l'excès d'eau en surface et les distances de transfert. Là encore, il semble bien que pour une topographie générale donnée, différents types de géométrie du microrelief révèlent des contrastes importants dans la vitesse d'apparition du ruissellement à l'aval des parcelles et dans les distances de transfert. Ces résultats sont à mettre en relation avec les flux de sédiments.

Les premiers résultats des analyses géochimiques effectuées sur les eaux de ruissellement prélevées à l'aval de la parcelle de 5 m de long soumise à une pluie simulée à l'eau tracée semblent témoigner des échanges entre la surface du sol et l'eau de pluie, ce qui n'est pas sans incidence sur les transferts de produits dissous. La poursuite d'une telle approche, en la couplant davantage à l'étude de la microtopographie pourrait permettre de mieux caractériser des temps de résidence de l'eau à la surface du sol.

Les difficultés méthodologiques et métrologiques ne peuvent être ignorées : si plusieurs barrières, liées souvent à des différences de cultures disciplinaires et d'objectifs qui feront préférer une méthode à une autre, ont pu être identifiées, il n'en reste pas moins des freins importants qui ne seront pas facilement levés.

Si des progrès évidents peuvent être faits dans la caractérisation des états de surface du sol, la compréhension de leur dynamique devra s'attaquer à deux types de questions :

- la compréhension des déterminants des états initiaux des couches superficielles (structure, teneur en eau, microrelief) ; il existe des approches en domaine cultivé (Papy et Boiffin, 1988 ; Martin, 1999), mais à notre connaissance très peu pour les autres milieux ;
- la caractérisation microphysique des pluies simulées et naturelles et la qualification des simulateurs : trop peu de données sont disponibles, et les raisonnements basés sur les intensités moyennes sont devenus largement insuffisants (cf. Salles et al., ce volume)

## **REFERENCES CITEES**

- AUZET A.V., 2000. Ruissellement, érosion et conditions de surface des sols à l'échelle de versants et petits bassins versants. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 79 p + annexes.
- AUZET A.V., AMBROISE B., ANDRIEUX P., ANGULO-JARAMILLO R., BARIAC T., BOULEGUE J., BRESSON L.-M., DARBOUX F., ESTEVES M., KIRKBY M.J., LE BISSONNAIS Y., LECOMTE V., LUDWIG B., GASCUEL-ODOUX C., PLANCHON O., POT V., RENAUX B., RICHARD P., ROULIER S., SANCHEZ-PEREZ J.M., 1998. Dynamic Hydrology of the Soil Surface. European Geophysical Society, XXIII General Assembly, Symp. HSC1-01. Nice, 20-24 April 1998. (P). *Annales Geophysicae*, vol. 16 Supplément II, C 521.
- BARIAC T., BOULEGUE J., LE BISSONNAIS Y., BRESSON L.-M., DARBOUX F., AUZET A.V., 2000. Caractérisation géochimique du ruissellement superficiel et des flux de subsurface. Actes du colloque PNRH 2000. Toulouse, 16-17 mai.
- DARBOUX F., 1999. Modélisations numérique et analogique du ruissellement. Effet de la rugosité sur les distances de transfert. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 170 pages.
- DARBOUX F., DAVY, P., GASCUEL-ODOUX, C., HUANG, C.H. (à paraître) Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. *Catena*, accepté.
- ESTEVES, M., NDIAYE, B., VANDERVAERE, J.P., LAPETITE, J.M., VAUCLIN, M., 2000. Characterisation of tillage and rainfall effects on cultivated soil. European Geophysical Society XXV, General General Assembly, Nice, avril 2000 ( poster).

- ESTEVEES, M. PLANCHON O., 1998. Effects of soil microtopography on overland flow and infiltration in cultivated plots (Abstr.). *Annales Geophysicae*, Suppl. II Vol. 16, C 523.(poster).
- ESTEVEES M., PLANCHON O., LAPETITE J.M., SILVERA N., CADET P. (à paraître) The "EMIRE" large rainfall simulator: design and field testing. In Anthony J. Parsons and Bruce Lascelles (Eds). *Rainfall simulation in geomorphology*. Earth Surface Processes and Landforms.
- HUANG C. AND J. M. BRADFORD, 1990. Portable laser scanner for measuring soil surface roughness – Soil Science Society of America Journal, 54: 1402-1406.
- LECOMTE V., 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Thèse ENGREF, spécialité Sciences de l'Eau. 212p. + ann.
- LEONARD, J., ANDRIEUX, P. 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32, 209-223.
- MARTIN P., 1999. Reducing flood risk from sediment-laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil & Tillage Research* 52 : 233-245.
- PAPY, F., BOIFFIN, J., 1988. The use of farming system for the control of runoff, erosion. In: K. Auerswald, Schwertman (Editors), *Workshop on soil erosion*. Soil Technology Series, pp. 29-38.
- PLANCHON O., DARBOUX F. (soumis) A fast, simple and versatile algorithm to fill in depressions in Digital Elevation Models In A.V. Auzet, J. Poesen and C. Valentin (Eds.) "*Soil pattern as a key factor of water and/or wind erosion*", *Catena special issue*
- ROULIER, S., 1999. Caractérisation hydro-dispersive in situ de sols non saturés par infiltration d'eau et de soluté. Cas de sols structurés et de sols hétérogènes. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 267 p.
- ROULIER, S., ANGULO-JARAMILLO, R., BARIAC, T., BRESSON, L.-M., AUZET, A.V., 1999. Utilisation de l'infiltrométrie et d'eau tracée pour la caractérisation hydrodynamique et hydrodispersive de la couche travaillée d'un sol limoneux. Programme PNRH-RIDES, Campagnes de mesures du 12 au 17 janvier 1998., Rapport 29 p.
- ROULIER, S., LUDWIG B., AUZET A.V., ANGULO-JARAMILLO R., BRESSON L.-M., FROT E., GAUDET J.P., RICHARD G., 2000. Conductivité hydraulique effective de sols sensibles à la battance en fonction des états de surface et du tassement. *Actes du colloque PNRH 2000*. Toulouse, 16-17 mai.
- SALLES C., ANDRIEUX P., ASSELINE J., COHARD P., 2000. Etalonnage de l'intensité et de la microphysique de la pluie produite par un simulateur de pluie. *Actes du colloque PNRH 2000*. Toulouse, 16-17 mai.

#### LISTE DES PUBLICATIONS AUXQUELLES LE PROJET A DONNE LIEU (outre celles déjà citées)

- ANDRIEUX P., LOUCHART X., VOLTZ M., BOURGEOIS T. 1996. Déterminisme du partage infiltration-ruissellement sur parcelles de vigne en climat méditerranéen.. In: *Colloque contribution des eaux souterraines au fonctionnement des hydrosystèmes, conséquences pour la gestion*, Comité national français de l'AIH, Avignon, 21 novembre 1995, Documents du BRGM, 256, 7-11, Orléans.
- DARBOUX F., DAVY P., GASCUEL-ODOUX C., 1999. A model for overland flow generation investigating roughness effects., AGU spring meeting, May 1999, Boston, USA. (résumé)
- DARBOUX F., DAVY P., GASCUEL-ODOUX C., 1999. Roughness and characteristic scale of overland flow. COST 623 Meeting, Soil Erosion and Global Change, 18-21 April, Leicester, UK. (résumé)
- DARBOUX, F., DAVY, P., GASCUEL-ODOUX, C., HUANG, C., 1998. Applying conditional walk model and percolation theory to surface flow and hillslope sediment transport processes. Congrès AISS, Montpellier, Août 1998. (poster, résumé).
- DARBOUX, F., DAVY, P., GASCUEL-ODOUX, C., HUANG, C., 1998. Soil surface morphology effects on overland flow triggering. European Geophysical Society, Nice, 20-26 avril 1998. (résumé)
- HUANG, C., DARBOUX, F., GASCUEL-ODOUX, C., DAVY, P., 1997. Evolution of microtopography and flow network in surfaces with depressions. AASA, Anaheim, USA, octobre 1997. (poster, résumé)
- PLANCHON O., CADET P., LAPETITE J.M., SILVERA N., ESTEVES M., (à paraître) Relationship between raindrop erosion and runoff erosion under simulated rainfall in the Sudano-Sahel. Consequences for the spread of nematodes by runoff.. In Anthony J. Parsons and Bruce Lascelles (Eds). *Rainfall simulation in geomorphology*. Earth Surface Processes and Landforms.
- PLANCHON O., ESTEVES M., SILVERA N., (soumis) Micro-relief induced by tillage: Measurement, modelling, and consequences on overland flow and erosion In A.V. Auzet, J. Poesen and C. Valentin (Eds.) "*Soil pattern as a key factor of water and/or wind erosion*", *Catena special issue*
- PLANCHON O., ESTEVES M., SILVERA N., LAPETITE J.M. (soumis) Raindrop erosion of tillage induced microrelief. Possible use of the diffusion equation. *Soil and Tillage Research*.
- ROULIER, S., ANGULO-JARAMILLO, R., GAUDET, J.P., BRESSON, L.M., BARIAC, T., AUZET, A.V., and GASCUEL-ODOUX, C., 1998. Field study of infiltration in crusted soils by using tension disc infiltrimeter and solute. American Geophysical Union, Fall Meeting. *EOS, Transactions, AGU*, Vol. 79 (45), F259.
- ROULIER, S., ANGULO-JARAMILLO, R., GAUDET, J.P., VAUCLIN, M., BRESSON, L.M., BARIAC, T., AUZET, A.V., 1999. Description of axisymmetric solute movement in crusted soils. European Geophysical Society 24<sup>th</sup> General Assembly, The Hague, Netherlands, 19-23 April, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 1 (2), p. 307.
- ROULIER, S., ANGULO-JARAMILLO, R., BRESSON, L.-M., AUZET, A.V. GAUDET, J.P., BARIAC, T. (soumis). Water transfer characterisation and mobile water content measurement in a loamy cultivated crusted soil. *Soil Science*.

*Le programme RIDES "Ruissellement, Infiltration et Dynamique des Etats de Surface" est soutenu depuis 1997 par le Programme National de Recherche en Hydrologie et depuis 1998 par le Programme National Sol et Erosion.*



INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

CNRS/SPI

INRA

IRD

LCPC

METEO FRANCE

*Colloque*  
**PNRH 2000**

**PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE**

Centre International de Conférences/METEO-FRANCE  
42, avenue Coriolis – 31 057 Toulouse Cedex

16-17 Mai 2000