

**Fonctionnement hydrodynamique  
et écoulements de crue sur versants :  
variabilité, agrégation et passage à l'échelle du bassin**

**Anne-Julie SCHIPMAN, Jean-Pierre VANDERVAERE,  
Luc DESCROIX, Stéphane BOUBKRAOUI**

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement  
LTHE BP 53 - 38041 GRENOBLE Cedex 9

*Rapport de synthèse - octobre 2000*

*Coordonnateur : J.-P. Vandervaere*

## I. INTRODUCTION

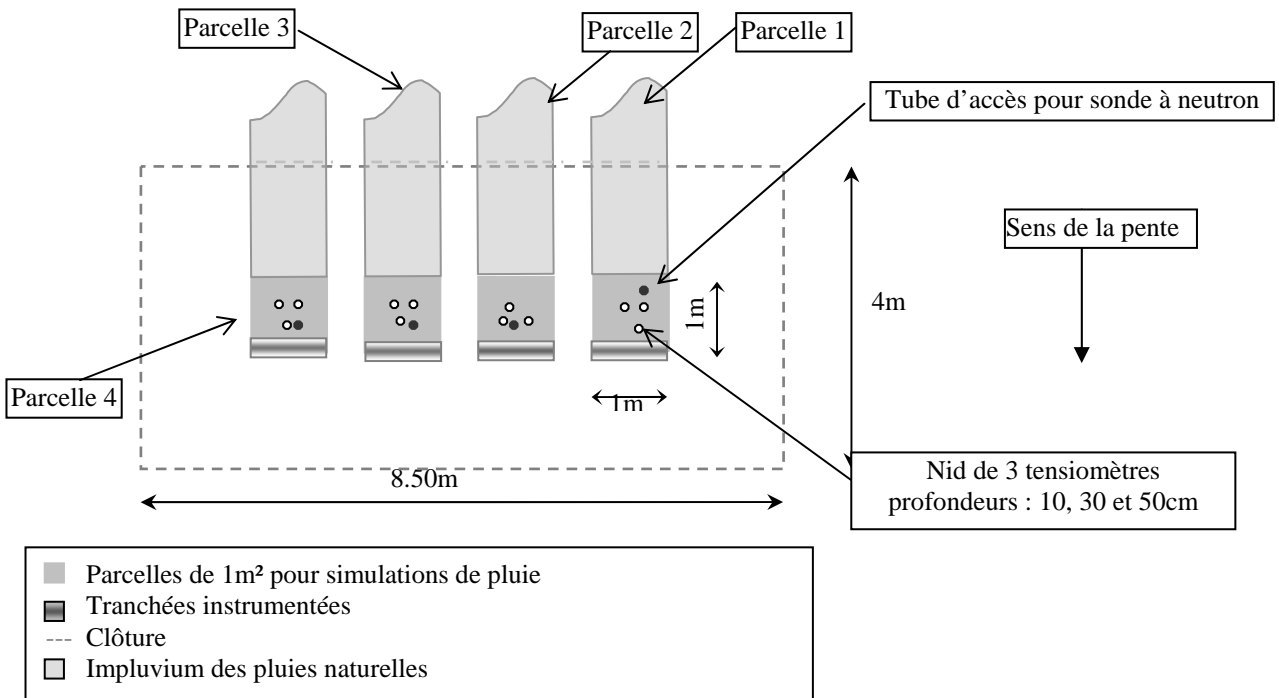
La part du territoire français susceptible d'être inondée est de l'ordre de 5 à 7 %. La lutte contre les inondations doit donc retenir toute l'attention des aménageurs en général et des spécialistes de l'assainissement agricole ou urbain en particulier (Faby, 1999). Néanmoins, les études et recherches menées à ce jour concernent, soit des bassins versants dits "naturels", peu anthropisés, soit des bassins versants urbains. Or, de nombreux bassins péri-urbains sont constitués de surfaces mixtes, rurales et urbaines, en proportion variable et en évolution souvent rapide, sous la pression foncière notamment. La modélisation des crues doit donc s'attacher à comprendre et quantifier le rôle des divers éléments constitutifs des versants et bassins versants en tant que producteurs et/ou conducteurs d'écoulement afin de prévoir l'évolution du risque.

Les mécanismes qui contrôlent le devenir à court terme des eaux de pluie se partageant en ses composantes infiltration, interception, ruissellement de surface et évapotranspiration sont encore insuffisamment compris. Une meilleure connaissance de la contribution des écoulements rapides aux débits de pointe de crue serait souhaitable. Une part importante des questions posées pour améliorer la modélisation hydrologique des bassins versants se place donc à l'échelle du versant (on entend ici par "versant", toute unité relativement homogène, prairie, zone boisée, zone urbanisée, etc., non coupée par un linéaire et non nécessairement connectée au réseau hydrographique). Il semble clair que le comportement global du bassin ne peut être que le résultat des processus se déroulant dans les versants qui le constituent. Parvenir à agréger le comportement des versants pour en inférer celui du bassin est donc un enjeu majeur en hydrologie. On ne saurait y répondre de manière réaliste qu'en se fondant sur un équilibre entre l'observation expérimentale et la modélisation. Dans notre étude, l'accent sera mis sur la quantification de la variabilité des écoulements en vue d'une modélisation stochastique à base physique du fonctionnement de ce type de bassin versant.

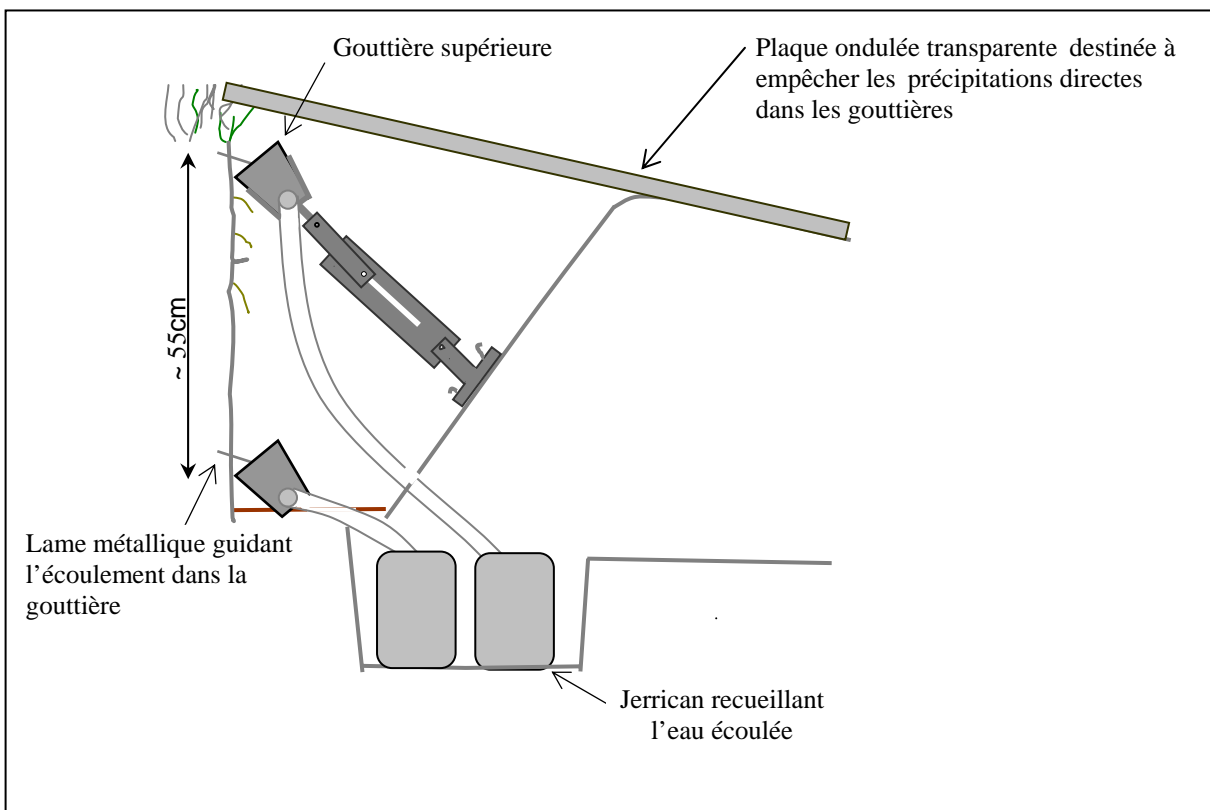
## II. MATERIELS ET METHODES

Réparti sur trois communes de l'agglomération grenobloise, Herbeys, Brié et Eybens, le bassin versant (BV) du Verderet couvre une superficie d'environ 15 km<sup>2</sup> encore majoritairement agricole mais où l'urbanisation (environ 13 % aujourd'hui) va croissant (CETE, 1994). Des crues assez importantes se sont produites sur ce bassin (décembre 1991 notamment) qui ont motivé la construction d'un bassin de rétention (18000 m<sup>3</sup>) sous la forme d'un vélodrome situé en amont immédiat de la commune d'Eybens, à l'exutoire du BV. La construction de bassins supplémentaires situés plus en amont est actuellement envisagée.

Un site de prairie pâturée, situé sur le haut bassin, a été équipé au printemps 99 de la manière décrite ci-dessous et schématisée Figures 1 et 2.



**Figure 1. Plan d'expérimentation (vue de dessus)**



**Figure 2. Plan d'expérimentation (vue en coupe)**

- 4 parcelles de 1m<sup>2</sup> sont choisies, en bas de versant, alignées selon une direction perpendiculaire à la pente (20 % environ).
- Au droit du bord inférieur de chaque parcelle, une tranchée verticale est creusée jusqu'à la profondeur de 60 cm environ.
- Afin de guider les écoulements, deux plaques métalliques de 1m de longueur sont enfoncées légèrement dans le sol, l'une pour l'écoulement de surface (profondeur qq cm) et l'autre pour l'écoulement de subsurface (profondeur 50 cm) ; des gouttières guident ensuite ces écoulements dans des réservoirs. Les parcelles sont couvertes avec des tôles plastiques afin d'empêcher la pluie de tomber directement dans les systèmes de collecte.
- Trois tensiomètres pour chaque parcelle (profondeurs 10, 30 et 50 cm) permettent de suivre l'évolution du profil de pression d'eau dans le sol. Un tube permettant des mesures d'humidité volumique par sondage neutronique a été installé sur chaque parcelle en octobre 99.
- Un pluviographe, installé à proximité des parcelles, permet de reconstituer les hyétogrammes des événements pluvieux.

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

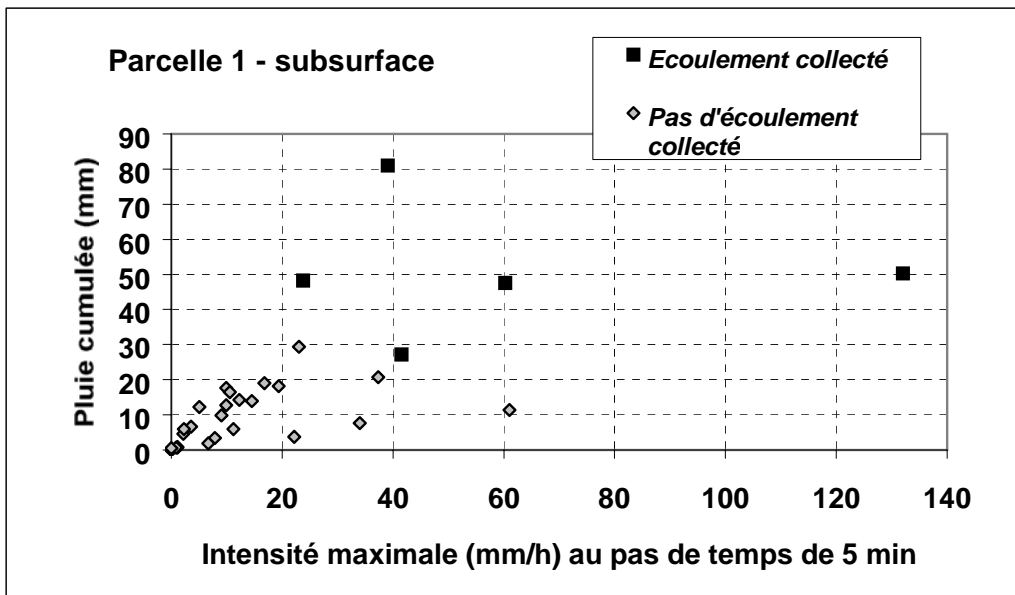
#### ***a) Le sol***

Une campagne de mesure de la conductivité hydraulique du sol,  $K_S$ , en surface de la prairie a été menée pendant l'été 98 en utilisant deux méthodologies différentes sur une grille de 25 points (Corbishley, 1999). Par infiltrométrie à disques (Vandervaere, 1995), en conditions légèrement non saturées,  $K_S$  a été estimée à **70 mm/h** et par la méthode du cylindre sous charge (Haverkamp et al, 2000), en conditions saturées,  $K_S$  a été estimée à **170 mm/h**.

Lors du creusement des fosses, une forte hétérogénéité a été observée. La terre est bien brune et humifère en surface et plus argileuse en profondeur. La densité racinaire décroît progressivement jusqu'à 50 cm environ. A partir de 30 cm de profondeur, on trouve aussi bien des poches sableuses que des débris morainiques (granites, schistes) à des stades d'altération variés. Le sol reste assez humide, ce qui semble témoigner d'une alimentation en eau par l'amont.

La méthode du cylindre a été testée à diverses profondeurs afin d'avoir une idée du profil de conductivité hydraulique dans le sol. Les résultats montrent une forte décroissance avec la profondeur : la valeur de  $K_S$  chute à **5 mm/h environ à 50 cm de profondeur**. L'erreur sur les mesures ponctuelles est de l'ordre de 5 % mais la variabilité spatiale induit une erreur d'un facteur 2 sur la moyenne spatiale (Schipman, 1999).

#### ***b) Les événements pluvieux naturels***



**Figure 3. Recherche de la pluie d'imbibition (mm) et de l'intensité maximale (mm/h) provoquant l'écoulement (exemple pour la parcelle 1 en subsurface).**

Plusieurs événements pluvieux ont permis de collecter des écoulements, aussi bien en surface qu'en subsurface. Les conditions donnant lieu à écoulement ont été identifiées suivant une méthode proposée par Chevallier (1992) pour les régions à climat semi-aride. Chaque événement est porté sur un graphique portant en abscisses l'intensité maximale de la pluie (au pas de temps de 5 minutes par exemple) et en ordonnées le cumul de la pluie. Les événements ayant et n'ayant pas produit d'écoulement sont représentés par des symboles différents (Figure 3). Si l'ensemble des événements produisant un écoulement se regroupent dans le coin supérieur droit, on identifie alors une intensité minimale  $I_t$  et une pluie minimale  $R_i$  (pluie d'imbibition) conjointement nécessaires à l'occurrence de l'écoulement.

Les résultats donnés dans le Tableau 1 montrent qu'il faut une pluie d'au moins **10 mm** avec une intensité maximale au moins égale à **6 mm/h** pour déclencher le ruissellement de surface. Pour l'écoulement de subsurface, il faut au moins **24 mm** de pluie avec une intensité maximale d'au moins **21 mm/h** (Schipman et al., 2000). Ces valeurs sont en contradiction avec la conductivité hydraulique du sol en surface, estimée à au moins 100 mm/h. Il faut donc admettre que la très probable hétérogénéité de la conductivité du sol en surface liée à la présence d'une végétation bien développée induit des cheminements préférentiels de l'eau infiltrée et ruisselée ce qui permet d'observer du ruissellement à des intensités de pluie bien inférieures à  $K_s$ .

	Ruissellement de surface		Ecoulement de subsurface	
	$R_i$ (mm)	$I_t$ (mm/h)	$R_i$ (mm)	$I_t$ (mm/h)
Parcelle 1	<i>non identifié</i>	<i>non identifié</i>	28	7

Parcelle 2	10	7	19	16
Parcelle 3	10	7	20	25
Parcelle 4	11	4	27	30
<b>moyenne</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>24</b>	<b>21</b>
<b>CV (%)</b>	<b>6</b>	<b>35</b>	<b>18</b>	<b>54</b>

**Tableau 1. Pluie d'imbibition  $R_i$  et intensité maximale (au pas de temps de 5 minutes)  $I_t$  nécessaires à l'occurrence de l'écoulement.**

Par ailleurs, les résultats obtenus semblent très fortement liés à l'état hydrique initial du sol ainsi qu'à un effet de variabilité naturelle des propriétés hydrodynamiques entre parcelles, sans que l'on soit en mesure, pour l'instant, de séparer et quantifier ces deux effets. L'installation des tubes de mesure neutronique de teneur en eau (réalisée fin 1999) devrait permettre de disposer d'éléments de réponse sur cette question dans les prochains mois.

### **c) Les événements pluvieux simulés**

Un simulateur de pluie de type ORSTOM a été utilisé dans le cadre de ce projet. L'appareil permet de reproduire, sur une surface réduite, une averse dont les paramètres (intensité, cumul, énergie cinétique des gouttes) sont connus et peuvent être choisis assez proches de ceux des événements naturels. Une buse d'aspersion fixée sur un portique à 4 m de hauteur et animée d'un mouvement oscillant arrose une surface au sol d'environ 2 m<sup>2</sup>. Les écoulements, eux, sont collectés sur 1 m<sup>2</sup> seulement ce qui permet de limiter les effets de bord. La variation de l'angle de balayage du gicleur permet de régler l'intensité à la valeur souhaitée (entre 50 et 200 mm/h avec le gicleur utilisé).

Le hyétogramme de simulation a été choisi de manière à observer des écoulements mesurables en surface et en subsurface et en fonction des réserves en eau disponibles : on applique une pluie d'imbibition à 60 mm/h pendant 5 minutes puis une pluie intense à 115 mm/h pendant 19 minutes. Ces conditions correspondent à un événement rare, d'environ 40 mm, susceptible d'être à l'origine d'une crue sur le bassin. Suivant les parcelles, de trois à cinq simulations ont été faites avec végétation haute et de trois à cinq simulations avec l'herbe fauchée de manière à simuler l'état pâturé. L'analyse des résultats permet de dégager les observations suivantes :

4 On recueille en moyenne 2.5 mm (6 % du total précipité) en surface et 0.5 mm (1.5 %) en subsurface. La variabilité de ces hauteurs est très importante : le coefficient de variation est de **90 % en surface et 160 % en subsurface.**

4 Le premier filet de ruissellement s'observe au bout de 7 minutes tandis que le tensiomètre situé à 10 cm de profondeur réagit au bout de 8 minutes en moyenne.

4 Le ruissellement s'établit toujours sous forme de filets d'eau suivant des cheminements préférentiels, il semble donc illusoire d'espérer modéliser ce phénomène avec les équations classiques des écoulements à surface libre (Manning, St Venant).

4 La fauche de la végétation augmente les volumes recueillis de 2.4 à 3.8 mm, soit une **augmentation de 50 %**. Le **ruissellement double** (1.6 à 3.3 mm) et son coefficient de variation chute de 110 % à 60 %. **L'écoulement de subsurface est stable** (0.8 à 0.4 mm) mais son coefficient de variation chute de 200 % à 90 %. Le fauchage a donc deux effets assez bien marqués :

**i) une augmentation du volume écoulé en surface :**

**ii) une homogénéisation spatiale des écoulements des deux compartiments.**

4 Les données sont encore insuffisantes à l'heure actuelle pour estimer l'effet sur ces écoulements des conditions d'humidité du sol avant la pluie.

4 Enfin, il est à noter que l'écoulement de subsurface n'a jamais été observé sans qu'il y ait ruissellement de surface alors que l'inverse est possible.

Les interrogations en attente concernent :

- La dépendance des écoulements et de leur variabilité avec les caractéristiques de la pluie ;
- L'existence d'une intensité limite de ruissellement et son lien avec la conductivité hydraulique du sol en surface ;
- Le lien éventuel entre l'intensité limite "ruisselante" et l'état hydrique initial du sol.

Les prochaines simulations de pluie envisagées (printemps/été 2001) seront faites avec des **intensités variables** à l'aide d'un nouveau simulateur "allégé", mis au point au laboratoire, d'un usage plus facile in situ.

#### ***d) Traçage des écoulements***

Les outils géochimiques, de plus en plus utilisés en hydrologie depuis une dizaine d'années, permettent de mieux comprendre les cheminements de l'eau et donc, d'améliorer la connaissance des vitesses d'écoulement dans les bassins versants. L'état actuel des connaissances dans ce domaine aboutit au paradoxe suivant : l'essentiel de l'eau présente dans les volumes de crue est constitué d'eau "ancienne" (pré-existante à l'événement) présente dans la nappe alors que les vitesses de circulation dans le sol semblent difficilement compatibles avec la rapidité des ondes de crues observées. Les principales tentatives d'explication de ce paradoxe rencontrées dans la littérature sont de deux types : importance de l'écoulement de subsurface et

existence d'un effet "piston", l'eau nouvelle chassant l'eau ancienne qui participe ainsi à l'hydrogramme de crue.

Nous avons commencé une série d'expériences de traçage sur le site expérimental en collaboration avec des géochimistes du Laboratoire de Biogéochimie Isotopique (LBI, Paris VI, interlocuteur T. Bariac) et du LGM (Paris VI, interlocuteur J. Boulègue). Quatre chercheurs de ces deux laboratoires sont venus participer à une première série d'expérimentations du 11 au 13 septembre 2000. Les traceurs retenus étaient l'Oxygène 18, d'une part, et le Rhénium, d'autre part, choisis pour leur innocuité et leur non réactivité avec les constituants du sol. Des échantillons d'eau écoulée ont été prélevés en surface et en subsurface ; les analyses par spectrométrie de masse sont en cours. Les premiers résultats semblent montrer une **nette différence de signature isotopique** entre les deux compartiments d'écoulement sous pluie simulée ce qui est tout à fait encourageant. Une seconde série d'expérimentations (fin octobre / début novembre 2000) consistera à faire, sous une pluie simulée non marquée, des apports d'eau marquée **sur des lignes** parallèles au captage (donc perpendiculaires à la pente) à différentes distances (15, 50 et 85 cm). Moyennant la possible déconvolution de l'hydrogramme d'avec la distance à l'exutoire, on pense accéder à des hydrogrammes, par classes de distance, de l'écoulement de surface et accéder à des **vitesse moyennes de ruissellement**.

Les résultats de ces divers traçages seront développés dans le rapport final.

#### **IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Après un an d'expérimentation, on dispose d'un jeu déjà important de données de ruissellement et d'écoulement subsurface sur un site de prairie, sous pluies naturelles et simulées. La première observation positive vis à vis de nos objectifs est donc celle de la faisabilité de la mesure, ce qui n'était pas acquis au départ. Un certain nombre d'observations ont pu être faites et qui devront être prises en compte pour toute tentative future de modélisation des écoulements de crue. Des collaborations sont en cours avec les services techniques de la ville d'Eybens afin d'appréhender le fonctionnement hydrologique du bassin dans son ensemble et, en particulier, de disposer de mesures de débit du Verderet, ce qui permettra de lier les observations locales au fonctionnement global du bassin. A terme, il est envisagé d'adapter le modèle conceptuel à base physique TOPMODEL (Saulnier, 1996) à une meilleure prise en compte des écoulements rapides de crue sur les petits bassins à topographie marquée.

#### **REFERENCES**

- CETE.** 1994. Etude hydrologique du bassin versant du Verderet. *Rapport CETE Méditerranée*.
- CHEVALLIER, P.** 1992. Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens. Mare d'Oursi, Haute-Volta. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. XIX, n°4, 253-297*.
- CORBISHLEY, S.F.,** 1999. A hydrological study of an Alpine meadow, Rhône-Alpes, France. B. Sc. thesis, University of Lancaster.
- FABY, J.-A.,** 1999. Facteurs explicatifs des crues et inondations. *Synthèses de l'Office International de l'Eau*.
- HAVERKAMP, R., BRAUD, I., ROSS, P. J., DESCROIX, L. et ZAMMIT, C.,** 2000. Beerkan: a quick method to determine in situ soil characteristic parameters. *Soumis à Soil Sci. Soc. Am. J.*
- SCHIPMAN, A.-J.,** 1999. Fonctionnement hydrodynamique des versants : mise en œuvre d'une approche expérimentale. *Mémoire de DEA "Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement", Université Joseph Fourier*.
- SCHIPMAN, A.-J., VANDERVAERE, J.-P., et DESCROIX, L.,** 2000. An experimental study of flood flows generation on an Alpine hillslope. *Soumis à Hydrol. Processes*.
- SAULNIER, G.-M.,** 1996. Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par Topmodel. *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble*.
- VANDERVAERE, J.-P.,** 1995. Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques. Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. *Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier*.