



**HAL**  
open science

## Mécanismes et dynamique des écoulements préférentiels et du lessivage rapide des polluants

Liliana Di Pietro, Patrick Bertuzzi, Laurent Bruckler, J.C. Gaudu, Dalila Mohrath, Stephane Ruy, Patrick Andrieux, Olivier Huttel, Gwenn Trotoux, Marc Voltz, et al.

### ► To cite this version:

Liliana Di Pietro, Patrick Bertuzzi, Laurent Bruckler, J.C. Gaudu, Dalila Mohrath, et al.. Mécanismes et dynamique des écoulements préférentiels et du lessivage rapide des polluants. Colloque PNRH 2000, May 2000, Nice, France. hal-02771283

**HAL Id: hal-02771283**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02771283>**

Submitted on 4 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MECANISMES ET DYNAMIQUE DES ECOULEMENTS PREFERENTIELS ET DU LESSIVAGE RAPIDE DES POLLUANTS

L. DI PIETRO, P. BERTUZZI, L. BRUCKLER, J.C. GAUDU, D. MOHRATH, S. RUY<sup>(1)</sup>, P. ANDRIEUX, O. HUTTEL, G. TROTOUX, M. VOLTZ<sup>(2)</sup>, R. ANGULO-JARAMILLO, R. HAVERKAMP<sup>(3)</sup>, M. SCHLAVON<sup>(4)</sup>, B. AMBROISE, V. AUZET, J. SANCHEZ PEREZ, M. TRAUTMANN<sup>(5)</sup>, P. GERMANN<sup>(6)</sup>, H. FONTA, J.P. LUC<sup>(7)</sup>

(1) Science du Sol, INRA Avignon ; (2) Science du Sol INRA Montpellier ; (3) LTHE Grenoble ; (4) Sols et Environnement ENSAIA/INRA Nancy ; (5) CEREG Strasbourg ; (6) Institut de Géographie, Université de Berne, Suisse, (7) GRGE, ENSA Montpellier.

**Mots clés :** Ecoulements préférentiels – Modélisation cinématique-dispersive – Propriétés hydrodynamiques au voisinage de la saturation

## I - INTRODUCTION

La plupart des sols présentent une structure hétérogène organisée en une hiérarchie continue d'échelles. Cette hétérogénéité structurale induit des processus discontinus dans l'espace et dans le temps. Les écoulements préférentiels d'eau et le lessivage rapide des polluants sont des exemples d'hétérogénéité fonctionnelle présentant une grande importance vis-à-vis des enjeux environnementaux. La théorie de Darcy-Richards n'est pas apte à prédire les flux rapides, car elle repose sur l'hypothèse d'un volume élémentaire représentatif quasi-invariant par translation à l'échelle macroscopique. Ainsi la conductivité hydraulique n'est pas définie pour l'ensemble du milieu en présence de grands pores. Au voisinage de la saturation ces grands pores sont fonctionnels et donc les méthodes traditionnelles d'estimation de la conductivité hydraulique ne sont plus applicables. Une approche conceptuelle, fondée sur les lois de conservation de la masse et sur l'hypothèse que le flux d'eau ne dépend que de la teneur en eau, conduit à une équation des ondes cinématiques pour décrire l'écoulement de l'eau dans les grands pores. Quand les pores capillaires sont saturés, cette équation cinématique ajuste bien le front d'humectation rapide en infiltration. Inversement lorsque la microporosité n'est pas complètement saturée, des effets dispersifs apparaissent reflétant la dissipation de l'énergie par des effets capillaires. Dans ce cadre et lors des deux années de projet, nous avons étudié la dynamique et les mécanismes des écoulements rapides dans les sols structurés et avons formulé une extension du modèle cinématique pour tenir compte de la dispersion du front d'humectation due à la diffusion capillaire. Pour rendre cette modélisation opérationnelle, on a développé, testé et comparé des méthodes d'estimation des propriétés hydrodynamiques en se fondant sur l'approche darcienne pour la gamme des basses et moyennes teneurs en eau et sur l'approche des ondes cinématiques au voisinage de la saturation. Nous avons réalisé des expériences sur des colonnes de sols non remaniés en laboratoire et sur des placettes in situ pour caractériser les mécanismes des écoulements latéraux sur le fond de la couche labourée d'un sol de Montpellier et pour étudier les mécanismes de lessivage rapide de deux pesticides dans un sol typique du plateau lorrain (Nancy). Quelques premières applications des techniques de tomographie électrique et acoustique ont été testées pour cartographier les écoulements en temps réel.

## II - MATERIELS ET METHODES

### 1) Modèle cinétique-dispersif pour décrire l'infiltration en sols hétérogènes :

Il a été montré (Germann, 1985) que la relation entre les flux et la teneur en eau dans des macropores peut s'exprimer par la relation  $q = b\theta^a$ , où  $q$  et  $\theta$  sont, respectivement, le flux et la teneur en eau et  $a$  et  $b$  sont deux coefficients réels positifs. La combinaison de cette équation avec celle de continuité conduit à l'équation cinématique suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + c(\theta) \nabla \theta = 0$$

où  $c(\theta, r) = \frac{\partial q}{\partial \theta}$  est la vitesse du signal. La solution analytique de cette équation a été développée pour l'infiltration et le drainage d'un pulse carré (Germann, 1985). Elle indique que le pulse d'eau s'infiltré comme une onde de choc sans se disperser. Après arrêt de l'apport, la teneur en eau est nulle en surface et un front de drainage se développe derrière le front d'humectation. Le front de drainage voyage avec une vitesse supérieure à celle du front d'humectation. Quand ces deux fronts s'interceptent, la teneur en eau du pic du front d'humectation commence à décroître. Les paramètres  $a$  et  $b$  du modèle peuvent être obtenus par ajustement non linéaire à partir des hydrogrammes de drainage ou à partir des profils d'humidité (Di Pietro et Lafolie, 1991). L'analyse d'un grand nombre de données expérimentales (Germann et Di Pietro, 1996; Germann et al., 1997; Germann et Di Pietro, 1999) nous a permis de déterminer que la valeur du coefficient  $a$  (typiquement entre 2 et 15) permet d'estimer la susceptibilité d'un sol aux écoulements préférentiels ainsi que de prédire le drainage rapide quand la teneur en eau du sol est au voisinage de la saturation. Cette description implique que l'on ne considère pas des mécanismes dissipatifs à l'échelle de la description. D'un point de vue mathématique, les effets dispersifs apparaissent comme une dépendance implicite ou explicite du flux avec une ou plusieurs des dérivées de la teneur en eau. Dans ce dernier cas l'équation obtenue n'est plus de premier ordre. Les termes d'ordre supérieur reflètent les effets dispersifs lors de l'avancement du signal dans le milieu. D'un point de vue physique, l'infiltration dans des pores capillaires est à l'origine de la dispersion du front d'humectation rapide. En effet, pour des milieux possédant plusieurs échelles de taille de pores, la théorie des ondes cinématiques ne restitue pas toujours les débits réels à une profondeur donnée. Quant le débit d'entrée est faible, des processus de dissipation de type diffusif interviennent car seul les pores de taille intermédiaire sont fonctionnels. L'équation des ondes cinématiques ne peut pas dans ces conditions décrire la dispersion du front d'humectation car elle est fondée sur l'hypothèse que la relation entre le flux et la teneur en eau ne dépend pas des gradients d'humidité.

Nous formulons l'hypothèse que, en général, la relation entre le flux et la teneur en eau s'exprime par  $q = b\theta^a - w(\theta)\nabla\theta$ , où  $w(\theta)$  est un coefficient macroscopique de dispersion qui inclut les effets dispersifs à toutes les échelles inférieures à celle de description. En conséquence nous obtenons pour décrire l'infiltration rapide dans un sol hétérogène l'équation suivante.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial \theta} \nabla \theta = \omega \nabla^2 \theta$$

Pour des intensités d'apport d'eau élevées et/ou des fortes teneurs en eau du sol,  $w \ll c(\theta)$  et le terme diffusif peut être négligé. Dans ces conditions les paramètres  $a$  et  $b$  peuvent être estimés expérimentalement. Actuellement le coefficient  $w(\theta)$  ne peut être estimé que par inversion de l'équation. Sa signification et la relation de ce coefficient avec les coefficients de transport darciens (conductivité hydraulique et diffusivité) fait l'objet des nos recherches actuelles.

## 2) Détermination des propriétés hydrodynamiques pour toute la gamme des teneurs en eau :

Pour des teneurs en eau faibles à moyennes l'équation de Richards décrit l'infiltration de l'eau, et au voisinage de la saturation le front d'humectation est décrit par une équation cinématique. Sous l'hypothèse qu'au voisinage de la saturation la relation flux-teneur en eau complète la courbe de conductivité hydraulique nous nous sommes attachés :

- d'une part, à améliorer l'estimation de la courbe de rétention hydrique et de la conductivité hydraulique sur des échantillons de sol non remaniés dans la gamme des basses à moyennes teneurs en eau. On a ainsi développé, testé et comparé trois méthodes de laboratoire différentes : méthode de drainage interne automatisé (CEREG), méthode WIND combinée à l'infiltrométrie par succion contrôlée (LTHE), cycle Wind en évaporation/infiltration (Avignon). Parallèlement une méthode de prédiction fondée sur la courbe de distribution de taille de pores est en cours de développement au LTHE. Elle sera testée sur les échantillons sur lesquels on a testé les méthodes de laboratoire (sable S31, sol brun de Nancy, sol alluvial calcaire de Montpellier).

- d'autre part, dans la gamme proche de la saturation une méthode de laboratoire a été développée pour estimer les paramètres cinématiques (Avignon).

### **3) Etude de la cinétique d'infiltration en couche labourée**

Pour étudier la circulation de l'eau en infiltration dans la couche labourée en présence d'une semelle de labour, on a prélevé des colonnes de sol non remanié et réalisé des expériences sur des placettes in situ, situés dans une vigne du domaine expérimental de La Valette (Montpellier). Les colonnes de sol ont été utilisées pour estimer les paramètres cinématiques au voisinage de la saturation. Le dispositif expérimental in situ a consisté en une placette de sol d'un m<sup>2</sup> de section entourée par un cadre de section carrée. On a simulé une pluie d'intensité constante durant des temps voisins de 1 h. Les infiltrations ont été suivies durant et après les pluies soit par des capteurs résistifs implantés dans le sol, soit par une combinaison de sondes TDR, capteurs capacitifs et un traceur. Un dispositif de collecte des eaux de ruissellement de surface et de sub-surface a permis d'estimer les hydrogrammes correspondants.

### **4) Etude des mécanismes de lessivage rapide de deux pesticides dans un sol brun de Nancy**

Trois colonnes de sol brun lessivé, de 30 cm de diamètre et 50 cm de profondeur, ont été prélevées dans le site expérimental de La Bouzule (Nancy). Des infiltrations d'eau et de deux pesticides (atrazine et trifluoraline) ont été réalisées. Le front d'humectation en fonction de la profondeur a été suivi avec des sondes TDR. Simultanément on a mesuré les hydrogrammes de drainage et la courbe d'éluion des pesticides. Deux méthodes ont été utilisées pour mesurer la concentration en pesticides dans les eaux drainées et pour doser les résidus dans les colonnes : une radioactif (C<sup>14</sup>) et l'autre à froid.

## **III - RESULTATS ET DISCUSSION**

### **1) La modélisation des écoulements préférentiels**

Nous avons réalisé la mise en œuvre numérique du modèle cinématique-dispersif par un schéma des éléments finis et travaillons actuellement sur l'inversion du modèle pour estimer le coefficient diffusif. Sa validation expérimentale repose sur la détermination des paramètres cinématiques, qui sont déterminés expérimentalement sur des échantillons de sols non remaniés et sur l'estimation du paramètre diffusif qui sera calculé par inversion. Les données acquises sur les colonnes de sol de Montpellier et de Nancy serviront à la validation du modèle. Au voisinage de la saturation, quand le terme diffusif est négligeable, nous avons montré que le modèle restitue bien les fronts d'humectation rapides. Par ailleurs, des essais du suivi en temps réel des écoulements par tomographie électrique (Avignon) et acoustique (Univ. De Berne) semblent des techniques prometteuses pour caractériser les écoulements rapides.

### **2) Les propriétés hydrodynamiques pour toute la gamme des teneurs en eau**

Les résultats des méthodes développées pour la détermination des propriétés hydrodynamiques dans la gamme des basses à moyennes teneurs en eau, et les inter-comparaisons réalisées peuvent se résumer comme suit :

a) Méthode Wind en évaporation combinée à l'infiltrométrie à succion contrôlée (LTHE) : Le protocole est opérationnel. Les courbes de rétention et de conductivité hydraulique sur l'ensemble des sols testés ont été obtenues. Parallèlement une méthode de prédiction des ces relations a été développée. Ces relations peuvent être décrites analytiquement par 5 paramètres (deux de forme dépendant des propriétés texturales et trois de normalisation liés aux propriétés structurales du sol). L'hypothèse principale du modèle est qu'il existe une similitude de forme entre la distribution de taille des particules et la courbe de rétention en eau. Les sols utilisés pour tester les autres méthodes ont été analysés à l'aide de la porosimétrie à mercure. Actuellement on travaille sur le modèle capillaire permettant le passage de la courbe de distribution des pores vers la courbe de rétention en eau, seuls les paramètres de forme pouvant à l'heure actuelle être estimés avec précision.

b) Méthode Wind en cycle évaporation/infiltration (Avignon) : Les algorithmes numériques ont été adaptés du cas de l'évaporation au cas de l'infiltration. Le logiciel de traitement des données est opérationnel. Le test de la méthode sur des données d'infiltration simulées sur deux sols (sable et

limon argileux) indiquent que l'estimation de la courbe de rétention est robuste et que celle de la conductivité hydraulique est satisfaisante pour une gamme plus ou moins grande de teneur en eau, car sensible à la propagation des erreurs dues à la méthode, notamment dans le cas des faibles gradients de potentiel. Les résultats obtenus sur le sable S31 montrent que cette méthode permet d'accéder à l'hystérésis de la courbe de rétention. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux du LTHE. La méthode semble performante, mais la sensibilité aux erreurs, dans le cas des fortes humidités, limite la précision accessible pour la conductivité hydraulique.

c) MEDIA : méthode de drainage interne automatisée, (CEREG) : La méthode est opérationnelle. La mesure en continu du potentiel de pression à la base du sol, ainsi que la suppression des paliers trop importants sur la courbe de rétention permettent une résolution plus fine de la méthode inverse utilisée pour l'estimation des coefficients de transferts. On a étudié l'influence de l'importance des paliers de dépression appliqués à l'échantillon. Plus le pas de dépression est grand, plus il existe des irrégularités dans les relations étudiées. Inversement plus ces paliers sont petits, mieux est appréhendée la zone des fortes teneurs en eau. La comparaison des courbes de rétention hydrique et de conductivité hydraulique pour le sable S31, déterminées par MEDIA et par la méthode du LTHE coïncident parfaitement.

d) Méthode des ondes cinématiques au voisinage de la saturation : Pour compléter la caractérisation hydrodynamique des sols au voisinage de la saturation, une méthode fondée sur les ondes cinématiques a été développée (Avignon). Le protocole expérimental est performant ainsi que l'algorithme d'estimation des paramètres cinématiques. Une première courbe (sol de Montpellier) combinant la conductivité hydraulique et la relation flux-teneur en eau cinématique montre que l'on obtient une relation continue dans toute la gamme des humidités.

### **3) Etude de la cinétique d'infiltration en couche labourée sur un sol de Montpellier**

La méthodologie expérimentale développée pour étudier l'infiltration et les écoulements latéraux de surface et au fond de la couche labourée s'est avérée adaptée, mais susceptible d'améliorations. L'infiltration et le stockage de l'eau ont pu être caractérisés avec l'instrumentation utilisée. On a mis en évidence l'existence d'un écoulement préférentiel hypodermique. Cependant la cinétique complète, au cours de la totalité de l'épisode pluvieux, n'a pas pu être étudiée du fait d'un mélange avec des eaux de ruissellement de surface. Le dispositif est actuellement en cours de modification.

### **4) Caractérisation des pertes rapides de deux pesticides dans un sol de Nancy**

On a caractérisé expérimentalement le fonctionnement hydrique du sol brun de Nancy, montrant l'existence des écoulements préférentiels au delà de la couche travaillée. Les résultats, concernant l'entraînement des pesticides étudiés, indiquent que lorsque la pluie survient peu après l'application du produit, les pertes en pesticides par écoulements rapides en profondeur sont très importantes. La présence dans les eaux d'écoulement de la trifluoraline, produit fortement absorbé aux particules, ne s'explique que par un transfert des particules depuis la surface vers la profondeur à travers les macropores.

## **IV - CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

L'ensemble du travail réalisé lors de deux années de projet nous a permis d'avancer dans la connaissance des mécanismes de transferts rapides dans les sols hétérogènes, de formuler un modèle prédictif, d'établir des protocoles de détermination des propriétés hydrodynamiques pour toute la gamme des teneurs en eau, de déterminer des méthodes adaptées au suivi des écoulements préférentiels en laboratoire et sur le terrain. L'état actuel des nos recherches nous permet de définir dans les différents domaines abordés, les orientations à suivre à l'avenir pour rendre l'ensemble de nos résultats opérationnels. Il en est ainsi de la comparaison des méthodes de détermination des propriétés hydrodynamiques au voisinage de la saturation qui devra être poursuivie comme devra l'être la validation du modèle prédictif formulé.

## **V -REFERENCES**

DI PIETRO, L. et F. LAFOLIE. 1991. Water flow characterization and test of a kinematic wave model for macropore flow in a highly contrasted and irregular double porosity medium. *J. of Soil Sci.*, 42 : 551- 563.

- GERMANN, P. 1985. Kinematic wave approximation to infiltration and drainage into and from soil macropores. *Transactions of the ASAE*, 28: 745-749.
- GERMANN, P. et L. DI PIETRO. 1996. When is porous media preferential? A hydromechanical perspective. *Geoderma*, 74: 1-21.
- GERMANN, P., L. DI PIETRO AND V. SINGH. 1997. Momentum of flow in soils assessed with TDR-moisture readings. *Geoderma*, 80: 153-168.
- GERMANN P.F. et L. DI PIETRO. 1999. Scales and dimensions of momentum dissipation during preferential flow in soils. *Water Resources Research* 35(5): 1443-1454.

Liste des publications (articles, congrès, thèses, rapports) auxquelles le projet a donné lieu

- ALISHABI, O. 1998. Mesure de l'effet des macropores sur l'hystérésis de la courbe de rétention d'eau des sols. Caractérisation hydrodynamique à l'aide de la TDR et des minitensiomètres. *Mémoire de DEA Mécanique de Fluides et Transferts, Institut National Polytechnique de Grenoble*.
- ANGULO-JARAMILLO, R., C. ZAMMIT, O. ALISHABI, R. HAVERKAMP, H. DENIS et P. ROSS. 2000.. Relation between pore size and water retention curve on a soil manifesting hysteresis. *Soumis Soil Sci. Soc. Am. J.*
- BOHY M. 1998. Etude des caractéristiques hydrodynamiques des sols non saturés au moyen d'un système automatisé de caractérisation par drainage interne de l'échantillon. *Mémoire de Maîtrise, ULP Strasbourg*.
- BOHY M. 1999. Amélioration et test d'une méthode de drainage interne automatisée (MEDIA) pour la caractérisation hydrodynamique de monolithes de sol. *Mémoire de DEA., Fac. de Géographie et d'Aménagement. Université Louis Pasteur, Strasbourg*.
- BOHY M., J. SANCHEZ-PEREZ, F. LEHMANN, A. V. AUZET et B. AMBROISE. 1999. Caractérisation hydrodynamique de sols par une nouvelle méthode de drainage interne automatisée (MEDIA). *Colloque GFHN*.
- CANNAVO P. 1999. Caractérisation des pertes de pesticides dans un sol de Nancy : analyse expérimentale et numérique. *Rapport de projet de fin d'étude, Ecole de Mines d'Alès*.
- DI PIETRO L. 1998. Strategies for describing preferential flow : the continuum approach and cellular automaton fluids. In : (H.M. Selim and L. Ma eds.), *Physical non equilibrium in soils, Modeling and Applications. Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan*.
- DI PIETRO L. 1998. Effects of heterogeneities on soil water flow assessed by 3D lattice-gas simulations. *Congrès de l' American Soil Science Society, Baltimore 18-22 Octobre 1998*.
- DI PIETRO L. 1998. Modeling approaches to soil water flow in heterogeneous soils. Séminaire. *Department of Environmental Sciences. The State University, Rutgers, New Jersey, Octobre 23, 1998. Invité*.
- DI PIETRO L. et P. GERMANN. 2000. Evaluation of the kinematic wave approximation to describe soil-water preferential flow. *Special Publication Soil Sci. Soc. Am. J* (sous presse).
- FLAMMER I., A. BLUM, A. LEISER et P. GERMANN. 2000. Acoustic assesment of flow patterns in unsaturated soil. *Soumis au J. of Applied Geophysics*.
- FIEGEL F. 1997. Evaluation de l'infiltrabilité des sols dans le domaine non saturé : application de la méthode TRIMS à quelques sites de la Plaine d'Alsace. *Mémoire de Maîtrise, ULP Strasbourg*.
- GARRIGUES, E. 1998. Estimation de la courbe de rétention d'un sol : cas d'un matériau à double porosité. *Rapport de Maîtrise de Sciences et Techniques « Génie Sanitaire et Environnement », Université Paris XII, Val de Marne*.
- GERMANN P. et L. DI PIETRO. 1998. Scales of momentum dissipation during flow in soils. *Water Resources Research*. 35(5) : 1443-1454.
- HAVERKAMP, R., R. ANGULO-JARAMILLO, C. ZAMMIT, P. ROSS et Y. PARLANGE. 1999. Simple soil-water hysteresis prediction model based on geometrical scaling. *Soumis Soil Sci. Soc. Am. J.*
- KAPRELIAN A. 1999. Estimation des propriétés hydrodynamiques d'un sol par la méthode de Wind. *Mémoire DESS Eaux Souterraines, hydrologéologie chimique et physique. Université Joseph Fourier*.
- LEONARD, J. et P. ANDRIEUX. 1998. Infiltration characteristics of soil in mediterranean vignards in southern France. *Catena* 32 : 209-223.
- LUTZ, P. 1998. Influence des macropores sur l'infiltration d'eau dans les sols non saturés : caractérisation hydrodynamique par infiltrométrie sous pression contrôlée. *DEA Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble I.*
- ROULIER S. 1999. Caractérisation hydrodispersive in situ des sols non saturés par infiltration d'eau et de soluté. Cas de sols structurés et de sols hétérogènes. *Thèse en Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement. Université Joseph Fourier, Grenoble I.*
- SAUVETRE, J. 1998. Estimation des propriétés hydrodynamiques d'un sol en régime d'infiltration. Etude de Laboratoire. *DESS « Eaux souterraines – Hydrogéologie chimique et physique », Université Joseph Fourier, Institut Dolomieu, Grenoble I.*
- SORIA UGALDE, J. 1999. Etude de l'agrégation de deux sols pour la modélisation bidimensionnelle de l'écoulement non saturé d'eau : effets d'échelle et de texture dans le calcul du milieu équivalent. *DEA de Milieux Géophysiques et Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble I.*

55 500 - 11050

INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

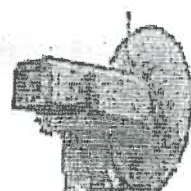
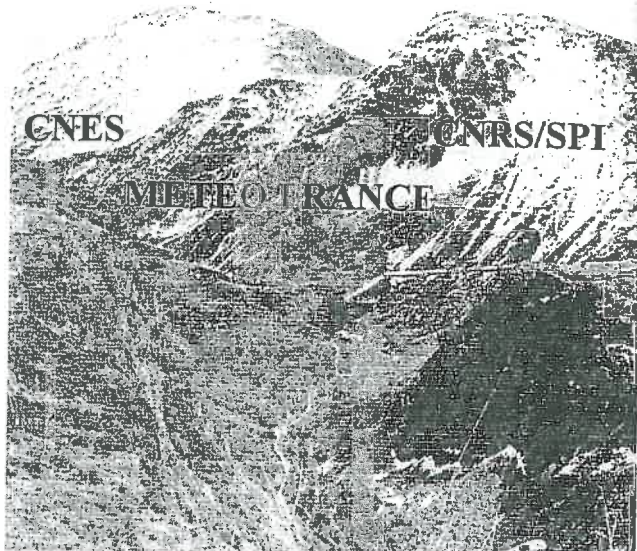
CNRS/SPI

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**