

Caractérisation par infiltrométrie sous pression contrôlée de l'influence des macropores sur l'infiltration d'eau dans les sols non saturés

Rafael Angulo-Jaramillo, Liliana Di Pietro, P. Lutz

► **To cite this version:**

Rafael Angulo-Jaramillo, Liliana Di Pietro, P. Lutz. Caractérisation par infiltrométrie sous pression contrôlée de l'influence des macropores sur l'infiltration d'eau dans les sols non saturés. Colloque PNRH 2000, May 2000, Nice, France. hal-02766704

HAL Id: hal-02766704

<https://hal.inrae.fr/hal-02766704>

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.

CARACTERISATION PAR INFILTROMETRIE SOUS PRESSION CONTROLEE DE L'INFLUENCE DES MACROPORES SUR L'INFILTRATION D'EAU DANS LES SOLS NON SATURES.

Rafael ANGULO-JARAMILLO⁽¹⁾, Liliana DIPIETRO⁽²⁾, Pascale LUTZ⁽¹⁾

(1) LTHE, UMR 5564 CNRS-INPG-IRD-UJF, Grenoble, (2) INRA Avignon

Mots Clés : infiltration, macropores, conductivité hydraulique, sorptivité capillaire, infiltrométrie sous pression contrôlée.

INTRODUCTION

Les transferts d'eau dans les milieux poreux considérés comme continus, homogènes et présentant une microporosité unimodale, sont correctement modélisés par la théorie de Darcy-Richards. Cependant, la porosité des sols présente généralement une distribution de taille de pores variant de quelques micromètres jusqu'à quelques centimètres. Une telle hétérogénéité de l'espace poral (macropores, fissures, racines, canaux) est à l'origine d'écoulements préférentiels rapides dont l'impact est considérable pour la protection des eaux souterraines.

Les macropores sont des structures présentes dans les sols (Avery, 1973 ; Thomasson, 1978) et de nombreux facteurs sont à leur origine. Les pores formés par la faune du sol sont principalement de forme tubulaire, de diamètre compris entre 1 et 50 mm. Ils sont le plus souvent concentrés près de la surface du sol, et peuvent augmenter de manière considérable la perméabilité du sol. Childs et al., (1957) donnent à un sol argileux une conductivité hydraulique de même ordre de grandeur que celle associée habituellement à des graviers de part la présence d'un réseau de macropores de diamètre compris entre 2 et 50 mm créé par des fourmis. Les pores formés par les racines des plantes sont aussi de forme tubulaire et peuvent représenter 35 % du volume d'un sol forestier ; ce pourcentage diminuant cependant avec la profondeur (Aubertin, 1971). La structure de tels réseaux de macropores dépend des espèces des plantes et des conditions de leur croissance. De nombreux auteurs (Aubertin, 1971 ; Beasley, 1976 ; Mosley, 1979, 1982) ont mis en évidence leur rôle fondamental dans les écoulements, même sous conditions insaturées. Les fissures constituent également des réseaux de macropores et peuvent se former par rétrécissement de sols argileux suite à une diminution de la teneur en eau (séchage, dessiccation), par des cycles de gel/dégel, ou par altération chimique de matériaux stratifiés. Les réseaux de fissures sont liés au climat mais aussi à l'utilisation du sol (Dasog and Shashidhara, 1993). D'autres macropores, appelés tuyaux naturels, peuvent se former sous l'action érosive de flux d'eau, lorsque les forces exercées sur les particules excèdent la compétence structurale du sol (Zaslavsky and Kassif, 1965). De telles conditions ont lieu généralement seulement au sein de matériaux hautement perméables et non cohésifs, soumis à d'importants gradients hydrauliques.

L'infiltrométrie sous pression contrôlée (Angulo-Jaramillo et al., 2000) est un outil intéressant pour l'étude de l'infiltration au voisinage de la saturation. Il permet, entre autres, la discrimination entre l'écoulement dans l'ensemble macropores-matrice et écoulement dans la matrice uniquement, par l'application de l'eau à des hauteurs de pressions inférieures à (loi de Laplace) :

$$h_o = - \frac{2\sigma}{\rho_w g r_p} \quad (1)$$

où σ est la constante de tension superficielle de l'eau (73 mN/m), ρ_w la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la gravité et r_p le rayon des pores définissant le seuil de discrimination.

L'objectif de cette recherche est la détermination des caractéristiques hydrodynamiques effectives d'un sol partiellement saturé avec macropores, et de quantifier l'impact des macropores de géométrie connue sur l'infiltration d'eau dans un sol partiellement saturé en comparant l'écoulement dans le milieu avec et sans macropores.



Figure 1 : Infiltromètre quart de disque ($r = 60 \text{ mm}$) (a), et dispositif pour la création de macropores artificiels ($r_p = 1 \text{ mm}$) (b).

MATERIEL ET METHODES

Le matériau étudié est un sable fin, appelé S31 (Silice & Kaolin, Barbières, Drôme) de granulométrie inférieure à $200 \mu\text{m}$ ($d_{50} = 100 \mu\text{m}$), et préparé en laboratoire sous forme d'échantillons contenus dans une boîte de $15 \times 15 \times 18 \text{ cm}^3$ (Fig. 1a), présentant ou non des macropores de 2 mm de diamètre et espacés de $1,5 \text{ cm}$. Les macropores ont été créés par un dispositif fabriqué au LTHE permettant d'obtenir une macroporosité représentant $0,89\%$ du volume total de l'échantillon (Fig. 1b). La pression capillaire des macropores est -15 mm selon la loi de Laplace (Eq. 1). Les essais d'infiltration, renouvelés deux fois pour chaque pression hydraulique négative ont été réalisés à l'aide d'un infiltromètre quart de disque, de rayon de 60 mm , placé dans un coin de la surface de la boîte (Fig. 1a), permettant de mesurer les lames d'eau infiltrées au cours du temps aux pressions imposées -70 , -40 , -20 , -5 et 0 mm de colonne d'eau. Par ailleurs, un système de réflectrométrie dans le domaine temporel (TDR) a aussi été utilisé dans le but de suivre l'évolution de la teneur volumique en eau pendant et après chaque essai à une profondeur d'environ 2 cm sous la surface du disque.

En régime transitoire, la sorptivité, S_o , et la conductivité hydraulique, K_o , sont estimés à partir de l'expression analytique décrivant l'infiltration tridimensionnelle, $I(t)$, à partir d'une source circulaire (Haverkamp et al., 1994 ; Vandervaere et al., 1997, 2000a, b) exprimée aux temps courts par :

$$I(t) = S_o \sqrt{t} + \left[\frac{\gamma S_o^2}{r \Delta \theta} + \frac{2 - \beta}{3} K_o \right] t \quad (2a)$$

et aux temps longs par :

$$I(t) = \left[K_o + \frac{\gamma S_o^2}{r \Delta \theta} \right] t + \frac{S_o^2}{2 K_o (1 - \beta)} \ln \left(\frac{1}{\beta} \right) \quad (2b)$$

où r désigne le rayon du disque, $\Delta \theta$, le changement de teneur volumique en eau sous le disque, et γ et β des paramètres supposés constants ($\gamma \approx 0.75$ et $\beta \approx 0.6$).

A partir des caractéristiques hydrodynamiques S_o et K_o , d'autres grandeurs, appelées caractéristiques fonctionnelles, peuvent être déduites. On définit alors un rayon de pore

caractéristique, représentatif d'une dimension moyenne de pore hydrauliquement fonctionnel à la pression h_0 (White and Sully, 1987):

$$\lambda_m = \frac{\sigma K_o \Delta\theta}{\rho_w g b S_o^2} \quad (3)$$

RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'infiltration cumulée en fonction du temps s'effectue d'autant plus rapidement que $|h_0|$ est faible (milieu d'autant plus saturé) (Fig. 2a), avec une augmentation sensible de la lame infiltrée à $h_0 = 0$. Les macropores semblent ne pas être hydrauliquement actifs à $h_0 = -70$ mm et $h_0 = -20$ mm (Fig. 2b) ; en revanche, ils semblent le devenir à $h_0 = -5$ mm et à $h_0 = 0$ mm (infiltration plus rapide en présence de macropores). En effet, les courbes d'infiltration sont similaires à $h_0 = -20$ mm, et la présence des macropores provoque une légère augmentation de la vitesse d'infiltration à $h_0 = -5$ mm et $h_0 = 0$ mm.

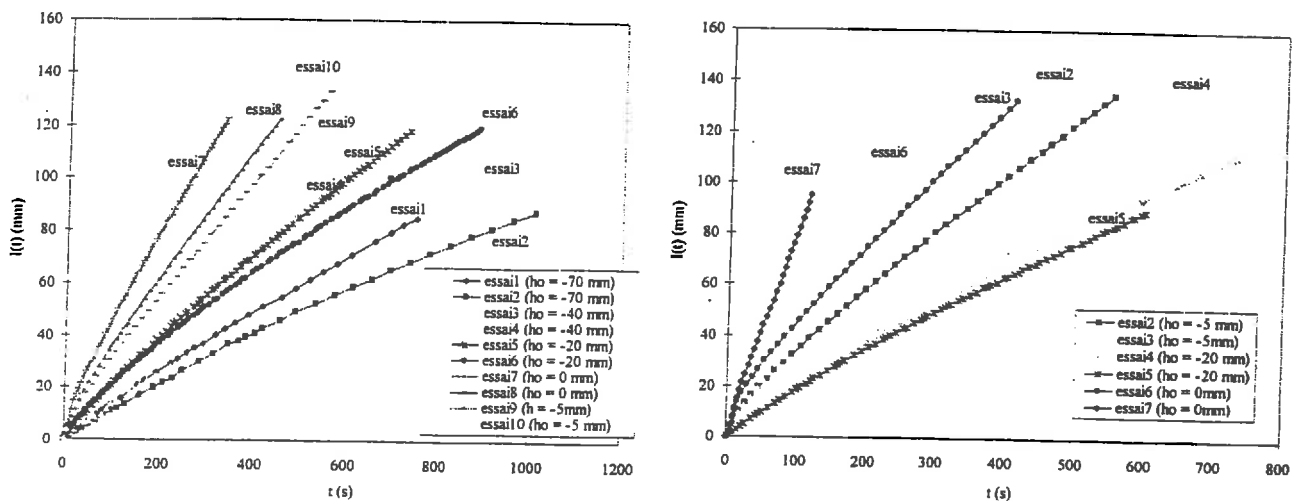


Figure 2 : Lames d'eau infiltrées en fonction du temps pour les différentes pressions appliquées en absence de macropores (a) et avec macropores artificiels (b), sable S31.

Pour chacun des essais réalisés, les valeurs de la conductivité hydraulique K_o et de la sorptivité S_o ont été déterminés par analyse de l'infiltration (Eqs. 2) aux temps courts et aux temps longs selon les méthodes décrites respectivement par Vandervaere et al. (2000a, b) et Roulier (1999). La taille caractéristique du rayon de pores hydrauliquement fonctionnel a aussi été estimée Eq. (3). Ainsi, la conductivité hydraulique du sable S31, sans macropores (Tableau 1), est comprise entre 0,029 et 0,149 mm/s ; K_o en fonction de h_0 présente une augmentation sensible à $h_0 \geq -5$ mm. La sorptivité estimée, S_o , est comprise entre 0,757 et 1,831 mm/s^{1/2}, montrant un effet capillaire important pour le sable, en particulier près de la saturation. De manière analogue, S_o en fonction de h_0 présente, une augmentation à $h_0 \geq -5$ mm. Le rayon hydrauliquement fonctionnel λ_m du sable S31 sans macropores varie peu avec h_0 (λ_m moyen = 0.127 ± 0.021 mm). Le sable S31 semble présenter un réseau poral uniforme et bien connecté et qui reste hydrauliquement actif à des pressions inférieures à la saturation. Les résultats obtenus pour le milieu dépourvu de macropores seront représentatifs de la matrice du sol.

Les paramètres hydrauliques des échantillons présentant des macropores ont été estimés en supposant le milieu homogène ; les valeurs de K_o , S_o , et λ_m calculées (Tableau 2) doivent donc être attribuées à des "paramètres équivalents" de l'ensemble matrice-macropores, le milieu sans macropores étant représentatif uniquement de la matrice. La présence de macropores au sein du

sable S31 n'influence pas l'infiltration à $h_o = -20$ mm (Fig. 2b), mais provoque une légère augmentation de la vitesse d'infiltration à $h_o = -5$ mm et $h_o = 0$ mm. Cette constatation est confirmée par des valeurs de K_o plus importantes en présence de macropores (Tableau 2) à $h_o = -5$ mm et $h_o = 0$ mm (facteur multiplicatif de l'ordre de 5 pour $h_o = 0$ mm). De plus, un changement de pente sur la relation $K_o(h_o)$ est observé à $h_o = -5$ mm. Tous ces faits révèlent une activité hydraulique des macropores non négligeable pour $h_o \geq -5$ mm environ. Par ailleurs, la présence de macropores ne semble pas influencer de manière significative les valeurs de sorptivité. Enfin, les valeurs du rayon caractéristique des pores hydrauliquement fonctionnels présente une forte augmentation à saturation ($h_o = 0$).

Tableau 1 : Caractérisation hydrodynamique du sable S31 SANS macropores.

h_o (mm)	$\Delta\theta_{TDR}^a$	K_o (mm/s)	S_o (mm ^{5/2})	λ_m (mm)
-70 (essai1)	0.144	0.044	0.835	0.122
-70 (essai2)	0.155	0.029	0.757	0.105
-40 (essai3)	0.144	0.040	0.791	0.124
-40 (essai4)	0.184	0.052	1.134	0.101
-20 (essai5)	0.141	0.064	0.990	0.125
-20 (essai6)	0.160	0.051	1.000	0.110
-5 (essai9)	0.224	0.108	1.406	0.166
-5 (essai10)	0.204	0.096	1.461	0.124
0 (essai7)	0.238	0.149	1.831	0.143
0 (essai8)	0.215	0.119	1.498	0.154

a mesure de la teneur volumique en eau par TDR.

Tableau 2 : Caractérisation hydrodynamique du sable S31 AVEC macropores.

h_o (mm)	$\Delta\theta_{TDR}^a$	K_o (mm/s)	S_o (mm ^{5/2})	λ_m (mm)
-20 (essai4)	0.211	0.063	1.107	0.148
-20 (essai5)	0.200	0.066	1.025	0.171
-5 (essai2)	0.194	0.187	1.282	0.299
-5 (essai3)	0.228	0.237	1.302	0.432
0 (essai6)	0.237	0.402	1.771	0.412
0 (essai7)	0.191	0.603	1.691	0.545

a mesure de la teneur volumique en eau par TDR.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les essais réalisés, quoi que préliminaires, fournissent de renseignements au sujet du rôle des macropores sur l'infiltration d'eau. De telles structures semblent être hydrauliquement actives à partir de h_o supérieure à -15 mm, conformément à la loi de Laplace (Eq. 1). Dans le cas d'un milieu granulaire, comme le sable S31, l'introduction de macropores ne présente pas de variation significative par rapport au comportement de la matrice sans macropores pour l'infiltration à $h_o \leq -20$ mm (macroporosité égale à 0,89% du volume total du sol), d'où des courbes $I(t)$ similaires en absence et en présence de macropores à cette pression hydraulique. Ce n'est pas le cas à saturation ($h_o = 0$) où la présence de macropores augmente de manière significative la lame d'eau infiltrée et donc la conductivité hydraulique effective estimée K_o . La sorptivité capillaire, S_o , n'est pas modifiée significativement par la présence de macropores. Ainsi, seul l'écoulement dominé par la gravité sera modifié. A l'approche de la saturation, le rayon de pores hydrauliquement actifs augmente brusquement en présence de macropores.

Par la suite, les données présentées seront utilisées dans la modélisation de l'infiltration en prenant en compte les macropores. En première simplification, ce travail sera simplifié par la prise en compte de macropores de géométrie connue (ici, macropores verticaux parallèles de 2 mm de diamètre). Au niveau expérimental, ces essais pourront être complétés par la mesure de la distribution de la teneur volumique en eau mesurée par tomographie électrique résistive. En effet, l'infiltration mesurée à la surface ne donne qu'une indication intégrale du volume d'eau qui pénètre dans le sol, et pas d'indication sur la position du front, notamment autour des macropores.

RÉFÉRENCES CITÉES

- AUBERTIN G.M. (1971) - Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement - For. Serv. Res. Pap. NE (U.S.) 192PS, 33 pp.
- ANGULO-JARAMILLO, R., J.P. VANDERVAERE, S. ROULIER, J.L. THONY, J.P. GAUDET, AND M. VAUCLIN. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers : a review and recent developments. Soil and Tillage Res., (sous presse).
- AVERY B.W. (1973) - Soil classification in the soil survey of England and Wales - J. Soil Sci., 24 : 324-338.
- BEASLEY R.S. (1976) - Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watersheds to channel flow - Soil Sci. Soc. Am. J., 40 : 955-957.
- CHILDS E.C., COLLIS-GEORGE N. and HOLMES J.W. (1957) - Permeability measurements in the field as an assessment of anisotropy and structure development - J. Soil Sci., 8(1) : 27-41.
- DASOG, G.S., AND SHASHIDHARA, G.B. 1993. Dimension and volume of cracks in a Vertisol under different crop covers. Soil Sci., 156: 424-428.
- HAVERKAMP R., ROSS P.J., SMETTEM K.R.J. and PARLANGE J.Y. (1994) - Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. - Water Resour. Res., 30 : 2931-2935.
- MOSLEY M.P. (1979) - Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand - Water Resour. Res., 15(4) : 795-806.
- MOSLEY M.P. (1982) - Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand - J. Hydrol., 55, 65-92.
- ROULIER, S. 1999. Caractérisation hydrodispersive in-situ de sols non saturés par infiltration d'eau et de soluté: cas des sols structurés et de sols hétérogènes. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble 1, Grenoble, 267 p.
- THOMASSON A.J. (1978) - Towards an objective classification of soil structure - J. Soil Sci., 29 : 38-46.
- VANDERVAERE, J.P., C. PEUGEOT, M. VAUCLIN, R. ANGULO-JARAMILLO, AND T. LEBEL. 1997. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and micro-tensiometers. J. Hydrol., Spec. Issue HAPEX-Sahel, (188-189) : 203-223.
- VANDERVAERE, J.-P., VAUCLIN, M. AND ELRICK, D.E. 2000A. Transient flow from tension infiltrometers. 1. The two-parameter equation. Soil Sci. Soc. Am. J., under press.
- VANDERVAERE, J.-P., VAUCLIN, M. AND ELRICK, D.E. 2000A. Transient flow from tension infiltrometers. 2. Four methods to determine sorptivity and conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., under press.
- WHITE, I. AND SULLY, M.J., 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field saturation. Water Resour. Res., 23: 1514-1522.
- ZASLAVSKY D., KASSIF G. (1965) - Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soils. - Geotechnique, 15(3) : 305-316.

SS AVS - HB50

INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

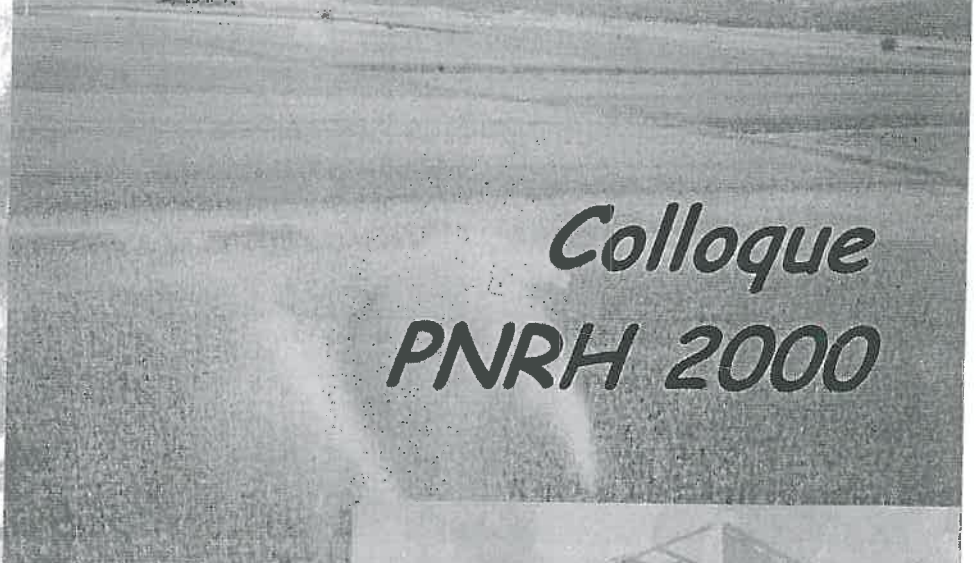
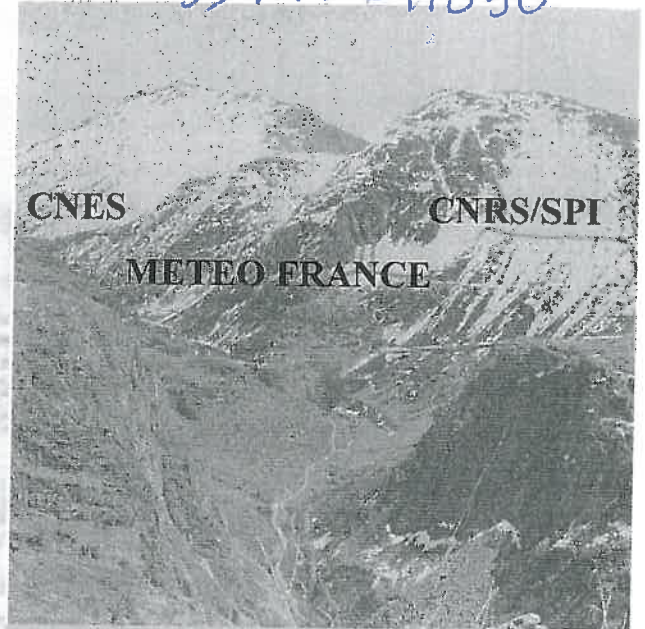
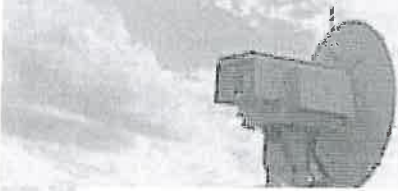
CNRS/SPI

INRA

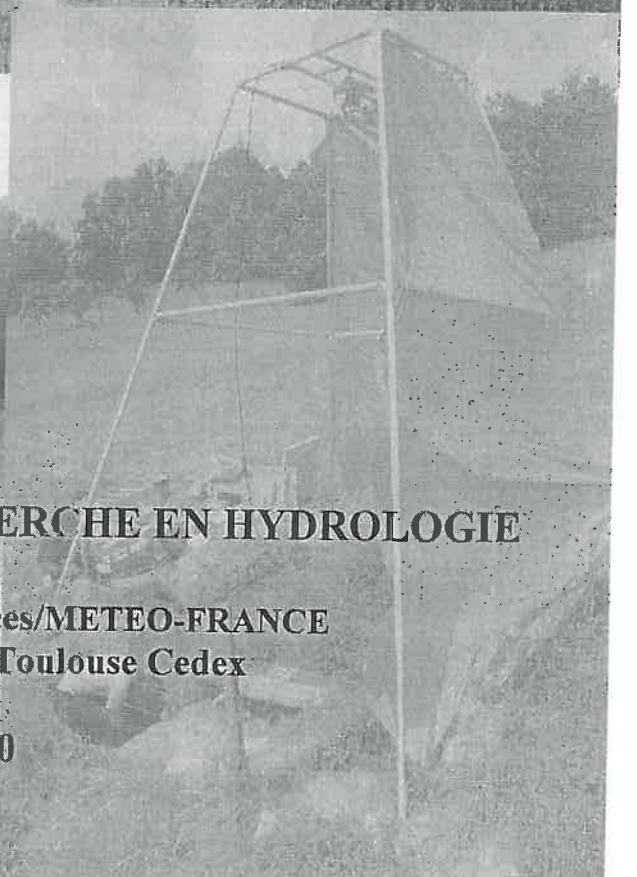
IRD

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