



HAL
open science

Optimisation de méthodes diélectriques pour l'hydrologie

J.P. Laurent, A.V. Auzet, S. Boubkraoui, Nathalie Bréda, G. Buchholtz, Andre Chambarel, Andre Chanzy, L. Delage, G. de Rosny, J. Eysseric, et al.

► **To cite this version:**

J.P. Laurent, A.V. Auzet, S. Boubkraoui, Nathalie Bréda, G. Buchholtz, et al.. Optimisation de méthodes diélectriques pour l'hydrologie. Colloque PNRH 2000, May 2000, Nice, France. hal-02771869

HAL Id: hal-02771869

<https://hal.inrae.fr/hal-02771869>

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.

OPTIMISATION DE MÉTHODES DIÉLECTRIQUES POUR L'HYDROLOGIE

*J.P. Laurent¹, A.V. Auzel², S. Boubkraoui¹, N. Bréda³, G. Buchholtz⁴, A. Chambarel⁵,
A. Chanzy⁶, L. Delage⁷, G. De Rosny⁸, J. Eysseric⁴, P. Ferrari⁹, E. Ferry⁵, J.C. Gaudu⁶,
Y. Lefevre³, H. Quinones⁷, P. Ruelle⁷, J.M. Sánchez-Pérez², J.L. Thony¹, P. Todoroff¹⁰*

¹LTHE, UMR5564 CNRS-INPG-IRD-UJF, BP53 38041 Grenoble Cedex 9.

²CEREG, EP2037 CNRS-ULP-ENGEES, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg Cedex.

³INRA, Ecophysiologie Forestière, 54280 Champenoux.

⁴Division Technique de l'INSU, 77 av. Denfert Rochereau, 75014 Paris.

⁵LHC, UAPV, 74 rue Louis Pasteur, 84029 Avignon Cedex 1.

⁶INRA, Science du Sol, Domaine St. Paul, 84914 Avignon Cedex 9.

⁷CEMAGREF, URE Irrigation, 361 rue J-F Breton BP 5095, 34033 Montpellier Cedex 1.

⁸LED, Université Paris VII, Case 7071, 75251 Paris Cedex 05.

⁹LAHC, Université de Savoie, 73376 Le Bourget-du-Lac, Cedex.

¹⁰CIRAD-AMIS, 2477 av. du Val de Montferrand, BP 5035 34032 Montpellier-Cedex 1.

Mots-clés : TDR, Sonde Capacitive, Teneur en Eau, Mesure, Sol.

I - INTRODUCTION

Notre projet a été conçu pour contribuer à l'optimisation des méthodes diélectriques qui sont utilisées en hydrologie pour mesurer des *profils de teneur en eau* dans les sols en vue d'établir des *bilans hydriques*. Ces méthodes se sont beaucoup développées ces dernières années car elles représentent une alternative possible à la "sonde à neutrons" dont l'utilisation est de plus en plus sévèrement réglementée et dont on prévoit l'interdiction pure et simple à plus ou moins longue échéance. De nombreux matériels et systèmes d'acquisition et de traitement sont maintenant proposés à notre communauté et il devenait urgent au niveau français d'en évaluer les performances et de s'investir scientifiquement et technologiquement dans leur développement.

Les méthodes diélectriques sont ainsi nommées car elles visent toutes à mesurer la *permittivité électrique* communément appelée (à tort...) "constante diélectrique". Ce paramètre physique est en effet très sensible à la teneur en eau : la permittivité relative de l'eau est de l'ordre de 80 alors qu'elle est comprise entre 4 et 10 pour la plupart des minéraux. Ceci explique que l'on puisse déterminer une teneur en eau à partir d'une mesure de permittivité. Pour cela, on doit disposer d'une *relation de calibration* qui peut être empirique comme le célèbre "polynôme de Topp" [Topp & al., 1980. *WRR* 16(3) : 574-582] ou à base plus physique [27-30]. Sur le plan de leur technologie, les méthodes diélectriques se répartissent en deux classes : elles peuvent utiliser un traitement purement fréquentiel du signal comme les *sondes capacitives* ou, au contraire, opérer exclusivement dans le domaine temporel comme c'est le cas pour la TDR - "Time Domain Reflectometry" - dont le principe de base consiste à repérer les réflexions successives d'un échelon de tension de très court temps de montée (20 à 200ps) se propageant le long d'un guide placé dans le sol. Un des premiers objectifs de notre projet a été de comparer expérimentalement ces deux types d'instruments aux méthodes neutroniques et gravimétriques dans des conditions de terrain aussi variées et contrôlées que possible.

Un deuxième objectif était de pousser plus loin les possibilités de la TDR, notamment en mettant en œuvre des techniques d'*inversion* [20, 23] pour déterminer directement des *profils* et non plus seulement des teneurs en eau *locale* ou *moyenne* comme c'est le cas le plus souvent avec les méthodes diélectriques. En fait, il s'est avéré que cette dernière préoccupation a suscité et structuré

la plupart des développements que nous avons entrepris – et continuons d'entreprendre – dans le cadre du PNRH : la qualité insuffisante des appareils TDR de terrain actuels pour un usage "non-standard" nous a conduit à proposer de concevoir un nouvel instrument. C'est l'objet du projet *SAPHyR* [17] qui a été financé en 1999 par l'INSU et dont le développement est pris en charge au sein de sa division technique par J. Eysseric et G. Buchhotz. Par ailleurs, les diverses tentatives d'inversion réalisées sur nos données de terrain ont permis d'identifier un certain nombre de problèmes liés à la nature physique et minéralogique des sols considérés. Globalement, tout cela a contribué à l'émergence au sein de notre groupe d'une véritable approche modélisatrice, à la fois, de la chaîne d'acquisition, du capteur et de la mesure elle-même.

II - MATERIELS ET METHODES

Soutenus financièrement par le PNRH depuis 1997, nous avons eu le souci de compléter et/ou de mettre à jour l'équipement dans le domaine de la mesure diélectrique de chacune des équipes participantes. Le Tableau 1 recense les matériels maintenant disponibles au sein de notre groupe. Ceux-ci nous ont permis de réaliser les expériences de terrain répertoriées dans le Tableau 2.

Matériel :	Descriptif :	Equipes :
SoilMoisture TRASE	Mesure TDR : - Sondes "courtes" (10 à 60 cm) bitiges ou tritiges : teneur en eau moyenne. - Sondes bitiges "longues" (->1.2m) : inversion - Sondes coaxiales (laboratoire)	Cemagref, Montpellier CIRAD, Réunion INRA, Avignon INRA, Nancy LTHE, Grenoble
Tektronix 1502 B/C	Idem ci-dessus	LTHE, Grenoble CIRAD, Réunion
Imko TRIME	Mesure TDR : - Sondes "courtes" tritiges : 8 ou 15cm. - Sonde "Tube" Ø 40mm : profils jusqu'à 3m de profondeur.	CEREG, Strasbourg INRA, Nancy LTHE, Grenoble
ESI Moisture Point	Mesure TDR : - Sondes bitiges courtes. - Système à diodes : mesures de profils par segments jusqu'à 7 zones et 2.5m de profondeur	INRA, Nancy
Campbell CS615	Sondes TDR bitiges de 20 cm pilotables par les centrales Campbell	Cemagref, Montpellier
SDEC HMS9000	Sonde capacitive : mesures locales de la teneur en eau. Interface analogique (4-20mA) et RS232	INRA, Avignon LTHE

Tableau 1 : Systèmes de mesure diélectrique de la teneur en eau disponibles au sein du projet.

En parallèle avec cette intense activité de terrain, des calibrations permittivité/teneur en eau ont été réalisées en laboratoire en utilisant une méthodologie originale développée conjointement par le LTHE (T. Zakri, J.P. Laurent) et le CEMAGREF (L. Delage). Un protocole a également été mis en œuvre pour étalonner les sondes "Tube" TRIME : INRA, Nancy (Y. Lefèvre) et Avignon [13]. Par ailleurs, un important travail a été réalisé sur la conception des sondes TDR : optimisation d'un système de tiges TDR gainées pour éviter les pertes par conduction en courant continu, sondes tubulaires (LTHE : S. Boubkraoui, J.P. Laurent, J.L. Thony), transitions optimisées sur le plan électrique par le LAHC (P. Ferrari) [1].

Nos travaux de modélisation - coordonnés par A. Chanzy - ont d'abord porté sur la caractérisation de l'élément de volume de mesure de la sonde capacitive HMS9000. Un premier modèle en éléments finis 2D-Axisymétrique conçu par L. De Rosny (LED) puis implémenté dans l'environnement Matlab a été validé sur la base d'expériences de laboratoires [9, 19]. Une formalisation, toujours en éléments finis, du problème de la propagation d'un signal TDR a ensuite été proposée par A. Chambarel et E. Ferry (LHC-UAPV) à la fois avec une approche 2D en théorie des champs [6] et 1D en théorie des lignes [7]. En parallèle, P. Todoroff, dans le cadre de son post-doc, et P. Ferrari ont développé une représentation d'un système TDR quelconque (générateur + câble + sonde + sol) sous forme d'un schéma électrique équivalent dont on peut étudier le fonctionnement sous PSpice, outil de simulation standard en électronique. Dans ce cadre, chaque

anche de sol est représentée par une tronçon de ligne avec des paramètres électriques équivalents L , C et G directement reliés aux propriétés électriques du milieu : permittivité (propagation) et conductivité (pertes).

Année	Localisation :	Matériels, méthodes mis en œuvre :	Descriptif succinct, [Références] :
1997	Campus, Grenoble, LTHE	<u>TRASE</u> (sondes 1m), <u>TRIME Tube</u> , <u>1 tube neutronique</u> , Gravimétrie.	Pelouse. Test de la procédure d'inversion TDR_SSI développée par le LTHE. [16, 18, 20]
1997	Parcelles "Alpilles", INRA, Avignon	<u>TRASE</u> (sondes 1m), <u>Sonde à neutrons</u> , Gravimétrie.	Parcelles cultivées. Test de TDR_SSI.
1997	Station de Lavalette, CEMAGREF	<u>TRASE</u> : sondes 0.6, 0.9 et 1.2m, <u>1 tube neutronique</u> , Gravimétrie.	Sol nu. Test de TDR_SSI [8]
1998	Parcelle CIRAD, St. Pierre, Ile de la Réunion	<u>TRASE</u> : sondes tritiges "buriable" (tritiges 20cm) enterrées, sonde bitige 1m.	Canne à sucre irriguée, test de la méthode d'inversion LPA développée par le CIRAD [23].
1998	Station de Lavalette, CEMAGREF, Montpellier	<u>TRASE</u> : bitige non gainée 1m, bitiges gainées DWTC et SEC 0.7m, <u>1 tube neutronique</u> .	Champ de maïs irrigué par aspersion. Comparaison profils neutroniques et obtenus par TDR_SSI [14].
1998	INRA Avignon, Domaine de St. Paul	<u>TRASE</u> : sondes buriable enterrées, bitiges non gainées 0.6, 0.9 et 1.2m. sondes capacitives HMS9000.	Sol nu. Comparaison mesures locales TDR et capacitives et profils TDR_SSI.
1998	Site de l'Illwald, CEREG	<u>TRIME</u> : mesures de profils sur 1.4m avec la sonde tube. <u>TRASE</u> : sondes bitiges non gainées 1.2m et gainées DWTC 1.03m et SEC 0.7m.	Prairie très humide en bordure de rivière. Conductivité électrique élevée. Comparaison profils TRIME et TDR_SSI [12].
1999	INRA Avignon, Domaine de St. Paul	<u>Tube unique en polycarbonate</u> (profondeur : 1.1m) dans lequel étaient mesurés des profils <u>TRIME</u> et <u>neutronique</u> . <u>TRASE</u> : sondes buriable enterrées à 7 cotes, acquisition signaux sur sonde TRIME tube.	Champ de maïs irrigué par aspersion. Comparaison profils TRIME et neutronique avec des mesures TDR locales [13].
1999	Sites de l'INRA, Nancy	<u>Moisture Point</u> : canne 7 segments 1.5m, <u>TRASE</u> : bitiges non gainées 0.4 et 1m, gainées DWTC 1.2m et SEC 0.7m. <u>TRIME</u> : profils sonde tube 1.8m, <u>Tubes neutroniques</u>	Sites sous forêt. Soils hydromorphes pouvant être très humides. Teneur élevée en argile. Pompage racinaire sur des profondeurs importantes.
1999	Station de Lavalette, CEMAGREF, Montpellier	<u>TRASE</u> : 8 sondes "buriable" enterrées entre 0 et -1.4m, 3 bitiges gainées DWTC 1.2m, 3 sondes 0.7m NG, gainées SEC et DWTC, 2 tubes neutrons ; <u>CS615</u> : 4 sondes enterrées entre 0 et -0.9m.	Champ de maïs irrigué par gravité (irrigation "à la raie"). Comparaison mesures locales et profils obtenus par inversion (LPA, TDR_SSI). Suivi dynamique par CS615 [21].

Tableau 2 : Campagnes de terrain réalisées dans le cadre du projet.

III- RESULTATS ET DISCUSSIONS

Quels que soient la technique considérée et l'instrument utilisé, nos résultats expérimentaux ont toujours montré une bonne cohérence entre mesures diélectriques locales *directes* (contact avec le sol sans isolation) et méthodes neutronique ou gravimétrique [2, 3, 5, 15, 21] même si l'on a souvent intérêt à utiliser une relation de calibration spécifique plutôt qu'un étalonnage standard constructeur. Ceci confirme la maturité atteinte par la technologie de la sonde capacitive [5], d'une part, et, d'autre part, démontre la grande robustesse du traitement temporel "classique" d'un signal TDR basé sur la détermination d'un temps de transit par rapport aux conditions de (mauvaise) propagation que l'on est susceptible de rencontrer dans un sol. La sonde "Tube" associée au système TRIME de Imko peut effectivement fournir une solution alternative pour la mesure de profils mais elle n'est certes pas exempte de défauts : i) la mise en place de tubes en matière plastique peut s'avérer délicate, voire impossible dans certains sols ; ii) la sensibilité aux variations de permittivité s'en trouve fortement réduite [13] ; iii) le signal peut être très perturbé par de mauvaises conditions locales de contact du tube polymère avec le sol [13]. Ceci peut conduire à des mesures erronées sans que l'on ait un moyen de contrôle ou même rendre impossible son exploitation par l'électronique de l'appareil. L'utilisation de sondes bitiges gainées peut permettre de rétablir la "lisibilité" d'un signal TDR lorsqu'on est confronté à des conductivités internes très élevées : sols très humides, présence

de solutés, argiles... [12]. Néanmoins, comme pour la sonde TRIME-Tube, la sensibilité est réduite et la relation de calibration est modifiée [14].

A condition de disposer d'un système TDR délivrant un signal "propre" – Tektronix, 1502 sur le terrain ou CSA803 en laboratoire comme au LAHC, par exemple – les techniques d'inversion que nous avons testées fonctionnent correctement tant que les pertes par conduction dans le milieu restent négligeables. Malheureusement, c'est rarement le cas dans des conditions de terrain ! Les outils de simulation que nous avons développés (Pspice et éléments finis) – couplés à une procédure d'optimisation adaptée comme les algorithmes génétiques [24] – devraient nous permettre de surmonter à terme ce problème. En attendant, nous avons pu les valider sur des milieux modèles : lignes "microrubans", milieux stratifiés très simples constitués d'air, d'eau, de billes de verre sèches ou saturées [10, 25].

IV- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Après un peu plus de trois ans de travaux, nous pensons avoir acquis une vision relativement claire des potentialités offertes par les méthodes diélectriques par rapport à la problématique de la mesure de la teneur en eau dans les sols. Nous mettons déjà à disposition de la communauté une partie des ressources que nous avons pu rassembler via le site Web du réseau MéDiTE : <http://lthe.hmg.inpg.fr/medite>. Nous comptons poursuivre cet effort de diffusion en le complétant par des publications dans des revues nationales et internationales.

En dehors de cela, les enjeux principaux de notre dernière de travail en commun dans le cadre de ce projet PNRH seront :

1. Développer un modèle 3D des mesures TDR et capacitives. Disposer d'un tel modèle serait utile pour estimer un volume de mesure, pour traiter de problème de l'influence d'une hétérogénéité dans le milieu ou pour simuler une mesure du type de celle de la sonde TRIME-Tube. Les outils proposés par le LHC pourront être utilisés pour aller dans cette direction ainsi qu'un certain nombre de logiciels de CAO en hyperfréquences récemment acquis par le LAHC.
2. Résoudre le problème de la prise en compte des pertes dans nos méthodes d'inversion.
3. Disposer d'un appareil TDR optimisé pour cette utilisation. C'est la finalité du projet SAPHyR. Actuellement, un premier prototype a été réalisé par la DT-INSU. Il est constitué d'un boîtier autonome d'acquisition et de commande couplé à une tête TDR HL1100 de Hyperlabs. Cette dernière devrait être remplacée à terme par un dispositif développé spécifiquement.

V - REFERENCES (Documents liés à des travaux effectués dans le cadre du projet)

- [1] ABISSET R., SERRES P., 1999. Réalisation d'une sonde de mesure des permittivités des sols, *Rapport de stage de fin d'études*, IUT Génie Electrique, UJF, Grenoble - LAHC, Chambéry.
- [2] AUZET A.V., LAURENT J.P., SANCHEZ-PEREZ J.M., PEREIRA DOS SANTOS L., THONY J.L., BIRON P., AMBROISE B., 1997. Test of TDR Methods to measure water content along soil profile in different experimental stations. *ASA, CSSA, SSSA Annual meeting*, Anaheim, Californie, 26-31 octobre 1997.
- [3] AUZET A.V., SANCHEZ-PEREZ J.M., 1997. Intercomparaison entre mesures neutroniques et TDR pour la mesure de profils de teneur en eau. *Intercomparaison between neutronic and TDR tube probe for field measurements of soil water content profiles*. 5th IAHS Scientific Assembly, Rabat, Maroc.
- [4] BLOM-HAGEN T., 1997. VisualTDR : a software for TDR signal analysis, *Masters Thesis / TFE Ingénieur*, NTNU, ENSENG, INP-Grenoble.
- [5] CHANZY, A., GAUDU, J.C., MOHRATH, D., RICHARD, G., CHADOEUF, J., BRUCKLER, L., STENGEL, P., 1998. Monitoring soil moisture at field scale using automatic capacitance probes, *European Journal of soil Science*, 49 (4) : 637-648.
- [6] CHAMBAREL A., FERRY E., 1999. Finite element formulation for the Maxwell's equations with space dependant electric properties, application to TDR probe, *rapport interne*, UAPV, Avignon.
- [7] CHAMBAREL A., FERRY E., 1999. Finite element formulation for electric lines with space dependant electric properties, application to TDR probe, *rapport interne*, UAPV, Avignon.

- J] DELAGE L., 1998, Mise en œuvre d'une méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR, *rapport interne*, CEMAGREF, Montpellier.
- [9] DE ROSNY, CHANZY A., PARDE M., GAUDU J.C., FRANGI J.P., LAURENT J.P., 2000. Modelling of a Soil Moisture Capacitive Probe Response : Evaluation of a numerical approach. *Soumis à SSSAJ*.
- [10] FERRARI P., LAURENT J.P., TODOROFF P., 2000. Comparaison de modèles de propagation d'onde sur une ligne hétérogène pour le calcul de profils hydriques de sol, *JCMM'2000*, Paris, 22-24 Mars 2000.
- [11] GABRIEL A., 1998. Pré-étude d'un système TDR, *Rapport de stage*, ENSEA, Vélizy – DT INSU, Paris.
- [12] HAAS A., 1998. Contribution à l'intercomparaison de méthodes de mesure des profils hydriques du sol dans divers sites alsaciens. *Mémoire de maîtrise*, Géographie physique, ULP – CEREG, Strasbourg.
- [13] KROL M., 1999. Mesure de l'humidité des sols par une méthode TDR : Utilisation de la sonde TRIME pour la réalisation des profils hydriques, analyse des problèmes rencontrés. *Rapport de stage*, licence "gestionnaires de l'eau", Université d'Avignon – INRA, Science du sol.
- [14] LANDIER S., 1998. Etude sur l'obtention de profils hydriques avec la méthode TDR à l'aide de sondes gainées, *TFE Ingénieur*, ESIM, Marseille – CEMAGREF, Montpellier.
- [15] LAURENT J.P., AUZET A.V., CHANZY A., DELAGE L., PEREIRA DOS SANTOS L., RUELLE P., SANCHEZ-PEREZ J.M., 1998. Tests of a new TDR method to measure soil water content profiles, *EGS, XXIII General Assembly*, Nice, 20-24 April 1998, *Annales Geophysicae*, Vol. 16, Part. II, C525.
- [16] LAURENT J.P., PEIRERA DOS SANTOS L., 1998. TDR_SSI : une nouvelle méthode de détermination des profils de teneurs en eau dans les sols par inversion d'un seul signal de réflectométrie temporelle (TDR), *16ème Congrès Mondial de Science du Sol*, Montpellier, 20-26/08 1998.
- [17] LAURENT J.P., 1999. SAPHyR : Système d'Acquisition de Profils Hydriques par Réflectométrie. *Dossier de demande d'équipement INSU*, LTHE, Grenoble.
- [18] LAURENT J.P., 2000. Profiling water content in soils by TDR : experimental comparison with the neutron probe technique, *AIEA-TECDOC-1137*, AIEA, Vienna, Austria.
- [19] PARDE M., 1999. Modélisation d'une sonde capacitive : validation expérimentale du modèle, *Rapport de stage de Maîtrise de Physique*, Université Paris 7, INRA-Science du Sol, Avignon.
- [20] PEIRERA DOS SANTOS L., 1997. Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur eau dans les sols par inversion d'un signal TDR, *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [21] QUINONES H., 2000. Note sur le suivi par mesures TDR (Campbell CS615) sous maïs irrigué à la raie lors de la campagne 1999, *rapport interne*, CEMAGREF, Montpellier.
- [22] SÁNCHEZ-PÉREZ J.M., LAURENT J.P., BOHY M., AUZET A.V., THONY J.L., Evaluación de un nuevo método de caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR, *Estudios de la Zona No Saturada des Suelo*, Eds. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascon, ICIA, Tenerife, España.
- [23] TODOROFF P., 1998. Modélisation de la propagation de micro-ondes dans le sol afin de calculer un profil hydrique de sol par réflectométrie temporelle. *Thèse de doctorat*. Université de La Réunion.
- [24] TODOROFF P., LORION R., LAN SUN LUK J.D., 1998. L'utilisation des algorithmes génétiques pour l'identification de profils hydriques de sol à partir de courbes réflectométriques, *C.R. Acad. Sci.*, 327 : 607-610.
- [25] TODOROFF P., 1999. Mesure de profils hydriques de sols par réflectométrie dans le domaine temporel. *Rapport d'avancement*, Post-Doc LTHE-CIRAD-SDEC.
- [26] ZAKRI T., LAURENT J.P., 1997. Soil water content measurement by Time Domain Reflectometry : comparison between dielectric mixing law models and experimental measurements, *5th IAHS Scientific Assembly*, Rabat, Maroc, 23 April - 3 May 1997.
- [27] ZAKRI T., 1997. Contribution à l'étude des propriétés électriques de matériaux poreux humides en vue de l'estimation de leur teneur en eau par mesures diélectriques : modèles de mélanges et résultats expérimentaux. *Thèse de Doctorat*, INP-Grenoble.
- [28] ZAKRI T., LAURENT J.P., 1998. Comparison of mixing-laws models on soils TDR measurements data, *EGS, XXIII General Assembly*, Nice, 20-24 April 1998, poster, *Annales Geophysicae*, Vol. 16, Part. II, C528.
- [29] ZAKRI T., LAURENT J.P., 1998. Time domain reflectometry techniques for water-content measurement, *High Temperatures - High Pressures*, 30 : 19-23.
- [30] ZAKRI T., LAURENT J.P., VAUCLIN M., 1998. Theoretical Evidence of the Lichtenecker's mixture formulae based on the effective medium theory, *J. of Phys. D*, 31 : 1589-1594.

02 87 1 - 41050

INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

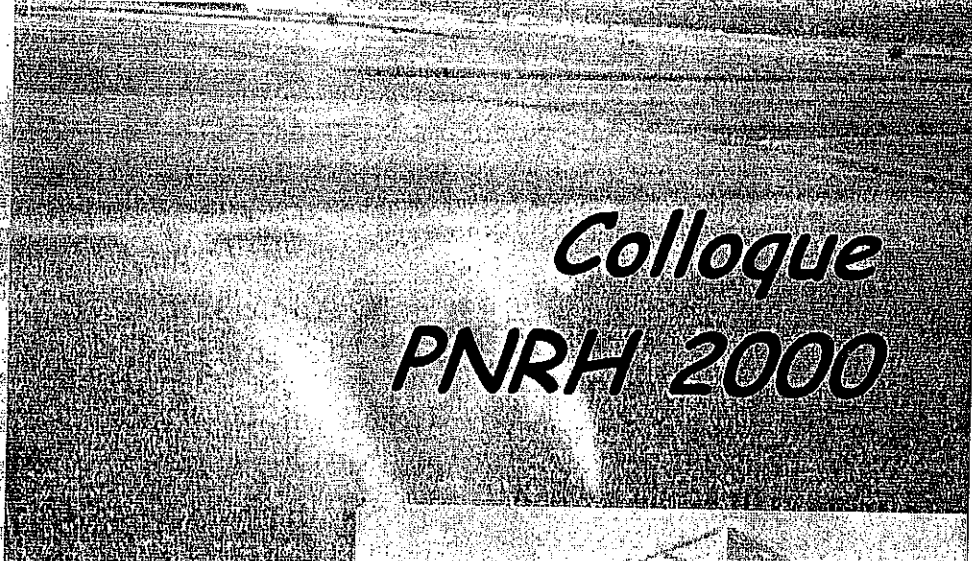
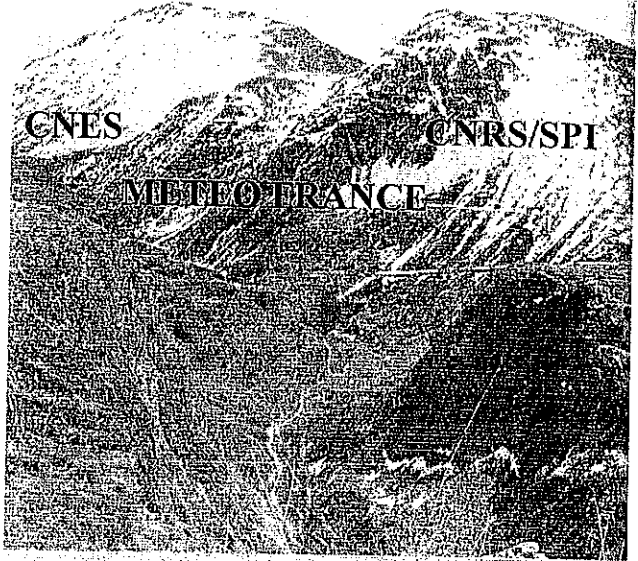
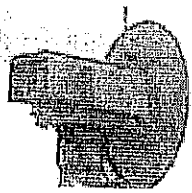
CNRS/SPI

INRA

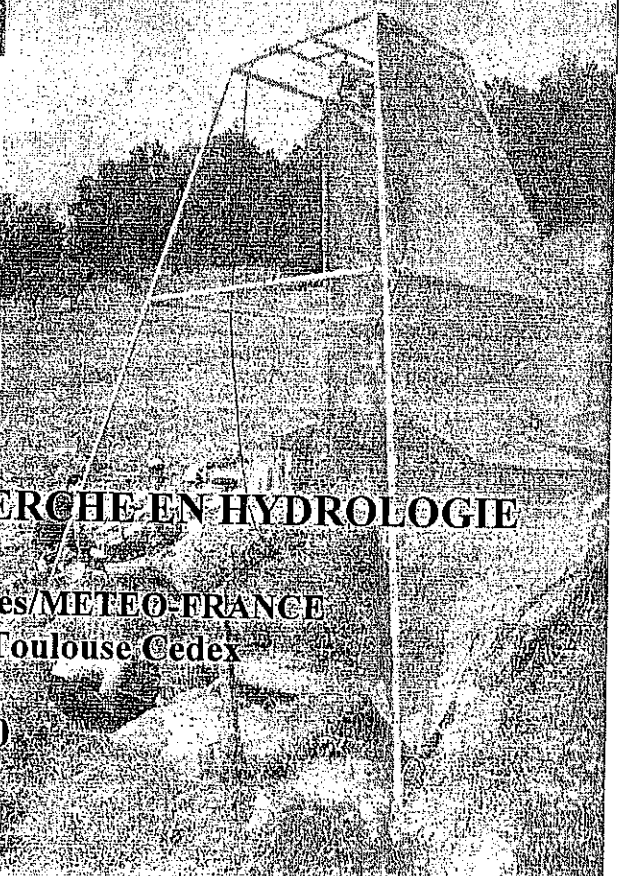
IRD

LCPC

METEOFRANCE



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