

# PNRH GEOPHYSIQUE – HYDROLOGIE 99 : UN PREMIER COMPTE-RENDU DES EXPERIMENTATIONS MENEES SUR LE SITE INRA D'AVIGNON

Campagnes de terrain :

Yves/ALBOUY<sup>1</sup>, Stéphanie/CABRERA<sup>1</sup>, Christian CAMERLYNCK<sup>2</sup>, Michel DIETRICH<sup>3</sup>,  
Claude DOUSSAN<sup>4</sup>, Nicolas FLORSCH<sup>5</sup>, Stéphane GARAMBOIS<sup>6</sup>, Sophie HAUTOT<sup>7</sup>, Laurence  
JOUNIAUX<sup>8</sup>, Eric MARMET<sup>2</sup>, Michel MENVIELLE<sup>9</sup>, Hervé PERROUD<sup>6</sup>, Dominique  
ROUSSET<sup>6</sup>, Lazlo SZARKA<sup>9</sup>, Pascal TARITS<sup>7</sup>

Rédaction :

Y. Albouy<sup>1</sup>, C. Camerlynck<sup>2</sup>, C. Doussan<sup>4</sup>, N. Florsch<sup>5</sup>, J.P. Pozzi<sup>8</sup>, D. Rousset<sup>6</sup>

<sup>1</sup> IRD - Laboratoire de Géophysique - 32 avenue H. Varagnat - 93143 BONDY cedex

<sup>2</sup> "Sisyphé" -Géophysique Appliquée - UPMC - Boîte 105 - 4 place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05

<sup>3</sup> LGIT- Univ. Joseph Fourier - BP 53 - 38041 Grenoble Cedex 9

<sup>4</sup> INRA - Science du sol - Domaine St Paul - Site Agroparc - 84914 Avignon cedex 9

<sup>5</sup> CLDG - Univ. de la Rochelle - Av. Marillac - 17042 La Rochelle cedex 01

<sup>6</sup> IGP - Univ. de Pau et des Pays de l'Adour - BP 576 - Avenue de l'Université - 64012 Pau Cedex

<sup>7</sup> UBO - IEM - Place Nicolas Copernic - 29280 Plouzane

<sup>8</sup> ENS - Laboratoire de Géologie - Ecole Normale Supérieure 24, rue Lhomond, 75231 Paris cedex 05

<sup>9</sup> CETP - 4 Avenue de Neptune - 94107 Saint-Maur Cedex

**Mots-clés** : tomographie électrique, polarisation spontanée, géoradar, imagerie électromagnétique, sismique.

## I - INTRODUCTION

La finalité du programme « Géophysique – hydrologie 1999 » prolongeant des études antérieures en 1997/98 (cf. article de Pozzi et al. dans ce volume) est de détecter et quantifier, grâce à des outils géophysiques, le cheminement des écoulements dans le sous-sol et d'en décrire la variabilité spatiale et temporelle. En 1999, une parcelle expérimentale de l'INRA - Avignon a été choisie pour mettre en œuvre des méthodes géophysiques multiples et complémentaires dans le but de réduire les incertitudes d'interprétations inhérente à chaque méthode ; l'objectif étant d'avoir une description aussi fine que possible des structures souterraines, qui conditionnent l'écoulement de l'eau et également d'essayer de suivre la dynamique de (voire quantifier) ces écoulements par un suivi géophysique temporel. Enfin, pour ces différentes méthodes géophysiques, il est prévu d'améliorer les outils d'interprétation des données, voire de comprendre de façon plus fondamentale le signal enregistré. Les résultats présentés dans ce rapport sont encore préliminaires, la campagne intensive de terrain s'étant déroulée fin novembre 99, l'ensemble des données acquises n'est pas encore complètement exploité.

## II - MATERIEL ET METHODES

*Le site expérimental* : le site est une parcelle expérimentale de l'INRA - Avignon d'une superficie d'environ 2 hectares. Ce site est relativement bien connu jusqu'à environ 2m de profondeur quant à ses caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques. Il est constitué d'un sol limono-argileux d'origine alluvionnaire d'une épaisseur de 0.7 à 2m surmontant une formation de galets de la Durance. Le niveau de la nappe varie sur l'année entre 4 m et 5-6 m sous la surface. Les mesures géophysiques ont été réalisées après récolte de la culture de maïs implantée sur ce champ. D'autre part, des cases lysimétriques (d'une surface de 9m<sup>2</sup> sur 2m de profondeur) remplies d'un sol sablo-limoneux et limono-argileux sont également utilisées pour un suivi temporel à une échelle intermédiaire entre le laboratoire et le terrain pour la quantification des flux en non-saturé.

*Les méthodes utilisées* : Un panel de méthodes géophysiques a été déployé sur le site de type cartographie ou imagerie locale, qui se sont succédées dans le temps, sur une semaine, du 22 au 27 novembre 99 :

- tout d'abord, un levé cartographique de la résistivité apparente par prospection électromagnétique provoquée (prospection Slingram) avec les appareils EM38, EM31, EM34



qui ont une profondeur d'investigation de l'ordre 1,5m, 6m et 15m resp. en mode dipôles magnétiques verticaux.

- Sur la base de cette cartographie, une implantation multiélectrode (112) a été réalisée pour une cartographie électrique verticale sur 2 transects 2D (orientés NS et EW, et se croisant sur une anomalie positive de conductivité sensiblement circulaire). Le dispositif des électrodes est de type dipôle-dipôle avec un inter-électrode de 1m. Une tentative d'étude 3D (tomographie électrique) avec ces 112 électrodes (réparties en 17 lignes de 16 électrodes, dispositif pole-pôle) a également été réalisée sur une autre anomalie positive de conductivité, recoupée par le profil EW. Les mesures et l'acquisition des données électriques sont faites par un résistivimètre Syscal R2 et son convertisseur DC/DC 800 V.
- Au centre du dispositif électrique 3D ont été ensuite réalisés une coupe en sismique réfraction et un essai sismo-électrique (mesure des potentiels d'électrofiltration engendrés par l'ébranlement sismique).
- Des mesures en géoradar (en point milieu commun) ont également été faites au voisinage de l'extrémité sud du profil NS.
- Enfin, une prospection en Polarisation Spontanée s'est déroulée en dernier. Cette prospection a été reconduite en mars 2000, avec un nouveau relevé cartographique de conductivité apparente avec l'EM38 pour voir l'évolution temporelle de ces paramètres. En effet, en novembre suite à des précipitations de pluie et de neige, l'humidité du sol était importante, alors que fin mars, c'est plutôt une situation de sécheresse qui prévalait sur le site.
- Des mesures d'humidité du sol et température du sol jusqu'à 1m de profondeur, des variables climatiques (ETP Penman, vent, température de l'air...) ont également été faites sur le site.

D'autre part, à proximité de la parcelle expérimentale, les cases lysimétriques ont été équipées d'électrodes de mesure de Polarisation Spontanée à diverses profondeurs dans les deux types de sols de ces cuves. Des tensiomètres et TDR permettent de suivre l'état de l'eau dans le sol, ainsi que les flux hydriques entre 30 et 40 cm de profondeur (en drainage ou infiltration). La dynamique temporelle de ces différents paramètres est suivie pour étudier les relations entre flux hydrique en non-saturé et potentiel spontané. Le dispositif est suivi depuis Décembre 99.

### III - RESULTATS ET DISCUSSION

#### • Cartographie par électromagnétique provoquée

Les levées cartographiques de conductivité apparente par prospection Slingram donnent des allures similaires pour les relevés avec l'EM31 (mode vertical ou horizontal) et l'EM38 en novembre 99 (Figure 1). En considérant un modèle de terrain à deux couches (conductrice en surface et résistante en profondeur) et en privilégiant l'homogénéité latérale des propriétés électriques, l'inversion des conductivités apparentes permet de reconstituer l'épaisseur de sol conducteur surmontant les galets de Durance (Figure 2). Un levé de la conductivité apparente avec l'EM38 refait en mars 2000, après une période de sécheresse hivernale prononcée, donne une carte qualitativement équivalente à celle de novembre 99, mais avec des conductivités divisées par 4 en gros par rapport à novembre, qui peut s'expliquer par l'humidité du sol bien plus faible en mars (Figure 3).

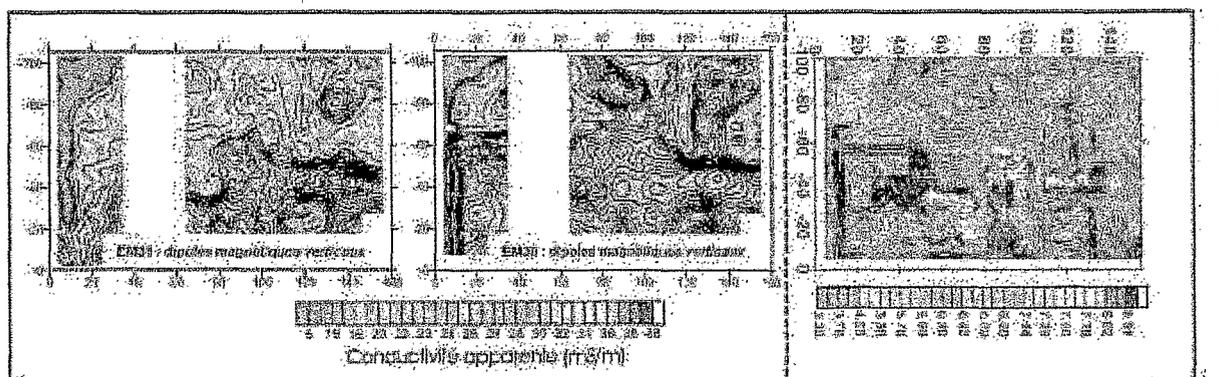


Figure 1 : Cartographie de la conductivité apparente EM38 et EM31 du site expérimental en novembre 99 et mars 2000.

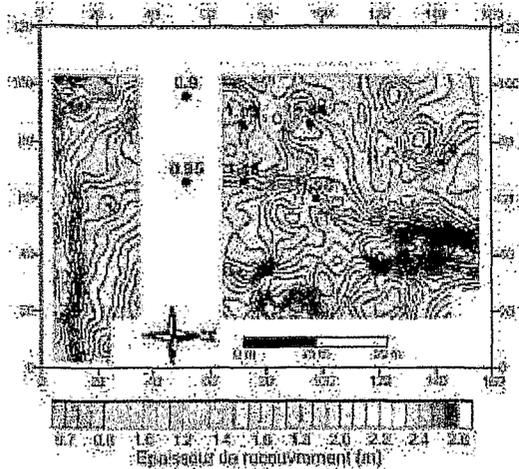


Figure 2 : Épaisseur de la couche superficielle conductrice issue de l'inversion des données de résistivité apparente du mois de novembre 1999.

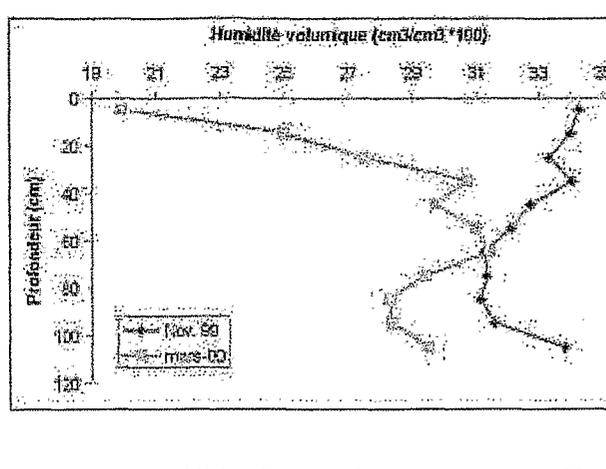


Figure 3 : Humidité volumique du sol en Novembre 99 et Mars 2000. Profils effectués à proximité du transect électrique 3D.

La prospection menée avec l'EM34 montre des structures profondes d'orientation différente. Ces résultats sont en cours d'interprétation.

• Tomographie électrique 2D et 3D

La disposition des électrodes sur les profils NS et EW en 2D a permis de garantir une résolution optimale, en particulier dans les niveaux superficiels. Les résultats des mesures en pseudo-coupes de résistivité apparente des 2 profils sont présentés figure 4. On note en particulier que les niveaux 2 et 3 de l'acquisition électrique multinode présente une excellente corrélation avec les données de l'EM31. L'inversion de ces données électriques (pour retrouver la résistivité des différentes couches de terrain) avec le logiciel res2dinv est présentée figure 5. Il est mis en évidence 3 zones (Figure 5) :

- Une zone superficielle, de quelques dizaines d'ohm-mètres de résistivité, mais qui peut présenter des variations assez importantes, entre moins de 10 et plus de 60 ohm-mètres. Cette zone présente des épaisseurs comprises entre 1,5 et 3 m environ, sans variation brutale et s'étend au-delà de la couche labourée (30cm en labour classique à 60 cm en sous-solage). Ces variations de résistivité peuvent être liées à des variations minéralogiques (teneur en argile), à des variations d'humidité ou encore à des variations de concentration en électrolytes (nitrate...).
- Une zone intermédiaire de forte résistivité, d'épaisseur relativement constante (env. 4m). Cette zone présente des résistivités comprises entre 400 et 1000 ohm-mètres. Les plus fortes résistivités semblent généralement corrélées avec les anomalies négatives de résistivité de la zone superficielle, ce qui peut laisser craindre un artefact d'inversion, en l'absence de phénomène physique pouvant expliquer cette corrélation.
- Enfin une zone conductrice, débutant vers 6 m de profondeur et s'approfondissant de l'est vers l'ouest et du sud vers le nord. La résistivité comme la géométrie du toit de cette couche sont mal contraintes.

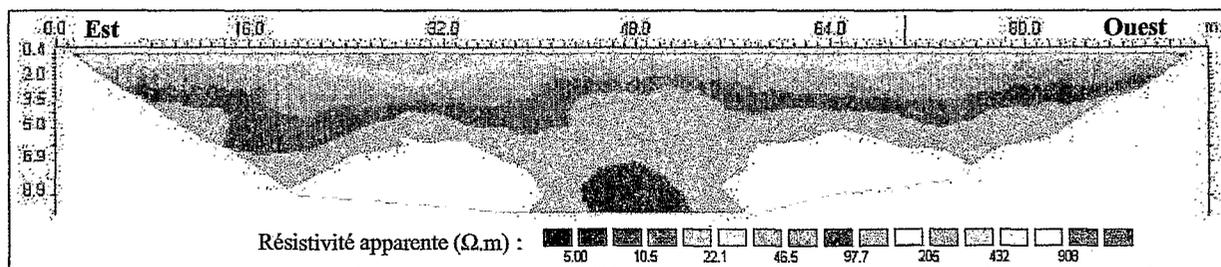


Figure 4 : Exemple de données de résistivité apparente d'un transect électrique 2D multinode (Est-Ouest ici)

Cette stratification globale était déjà connue par des sondages électriques verticaux mais la méthode utilisée ici permet d'obtenir une bien meilleure résolution latérale en particulier dans les niveaux superficiels et ainsi de localiser les hétérogénéités du sous-sol. D'autre part, malgré l'inversion

limitée à 2 dimensions, on note une très bonne corrélation des deux profils au niveau de leur intersection, ce qui valide la procédure.

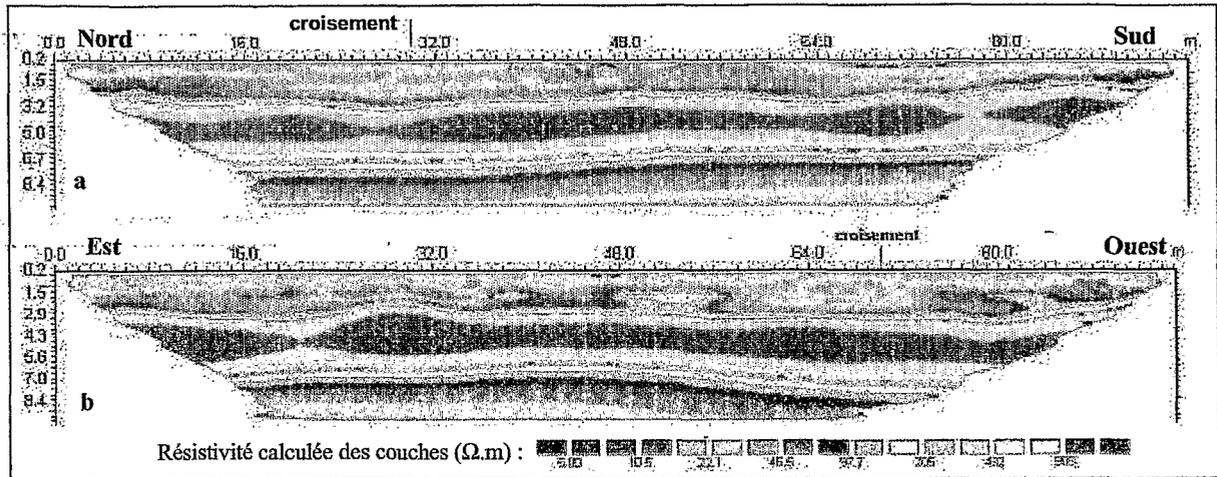


Figure 5 : Résistivité calculée par inversion des couches de sol d'un transect électrique Nord-Sud (a) et Est-Ouest (b).

Le grand nombre d'électrodes (112) déployées sur le terrain a permis de faire une acquisition électrique en 3D. Cependant, suite à des incidents lors de l'acquisition, seule un peu plus de la moitié des données est exploitable. Les grandes lignes du modèle 3D sont comparables au 2D. L'exploitation de ces données est encore en cours.

• *Sismique réfraction et électro-sismique*

La sismique réfraction réalisée entre les électrodes 16 et 39 du profil électrique E-W montre également 3 terrains sub-horizontaux. Le premier, d'une épaisseur d'environ 2m10 présente une vitesse de propagation des ondes P de 350 m/s, typique d'un sol cultivé. Le second qui s'étend jusque vers 5m20 donne une vitesse de 750 m/s et correspond à la zone à forte résistivité électrique. Il surmonte une couche à 1800 m/s que l'on peut identifier comme une zone saturée en eau.

D'autre part, les signaux électro-sismiques ont été de trop faible intensité sur ce site (par rapport au bruit) pour pouvoir être correctement traités.

• *Géoradar*

Des mesures radar en point milieu commun ont été réalisées en septembre 99 au voisinage de l'extrémité sud du profil électrique NS. Ces mesures montrent une très forte atténuation des ondes radar dès les premières couches, limitant considérablement la pénétration (confirmant des mesures faites en 98). Cette atténuation est compatible avec les faibles résistivités électriques mesurées ultérieurement. Les indicatrices de réflexions obtenues entre 0 et 2 m de profondeur montrent des vitesses de propagation de 7 à 8 cm/ns et des réflexions situées à 1m10 et 2m de profondeur.

• *Prospection en polarisation spontanée*

Un exemple de transect de prospection PS (Nord-Sud) acquis en novembre 99 est présenté figure 6a. On note une anomalie négative d'environ 30 mV vers 130m. Pour confirmer ces anomalies une prospection PS a eu lieu mars 2000. (Figure 6b) dans des conditions d'humidité et de climat différentes de novembre. Il ressort qu'il existe un net gradient vertical de PS dans les premiers centimètres de sol (électrode en surface, 4cm et 10cm de prof.), montrant que la topographie va influencer le signal PS. L'origine de ce gradient vertical n'est pas connue (gradient d'humidité, évaporation ?). L'anomalie négative mise en évidence en novembre 99 devrait être vérifiée par des mesures en profondeur dans des conditions d'humidité comparables.

• *Polarisation spontanée et flux hydrique en non-saturé*

Les travaux récents de Thony et al. (1997 et ce volume) ont donné des indications très encourageantes sur l'existence d'une relation linéaire entre flux d'eau en milieu non-saturé et la différence de potentiel spontané. Pour analyser la stabilité/reproductibilité de cette relation sur d'autres types de sols et climat, des électrodes de mesure du potentiel spontané et du potentiel hydrique (à 30 et 40 cm) de profondeur ont été installées dans 2 cases lysimétriques remplies de sol limono-argileux et sablo-limoneux situées à proximité de la parcelle expérimentale. La figure 7

présente un exemple d'évolution du flux hydrique en non-saturé et de la PS pour le sol limoneux. Pour l'instant, on n'observe pas une bonne corrélation entre flux et PS. D'autre part, il existe des fluctuations brusques de plusieurs mV, d'origine inconnue, se superposant à des variations diurnes de PS plus ou moins liées à la température. Cependant, il faut noter que sur la période de mesure (depuis décembre 99), il n'a quasiment pas plu (précipitation maximum de 4 mm) et que l'évapotranspiration était faible également. (3 à 4 mm/jour max.), situation peu favorable à des gradients hydriques conséquents. Enfin, il semble qu'il puisse exister un problème de contact électrode PS-sol évoluant au cours du temps qui affecte les résultats ; effet qu'il sera nécessaire de vérifier. Des expérimentations sur colonne en laboratoire affineront la description des processus.

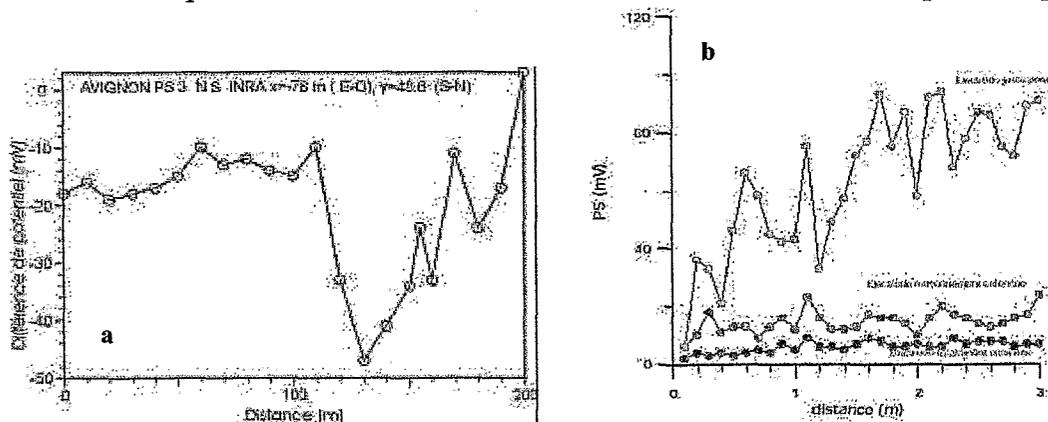


Figure 6 : Evolution de la PS mesurée en surface le long d'un transect Nord – Sud de la parcelle expérimentale en Novembre 99 (a) et Evolution de la PS sur un transect métrique en fonction de la profondeur d'enfoncement des électrodes en mars 2000 (b).

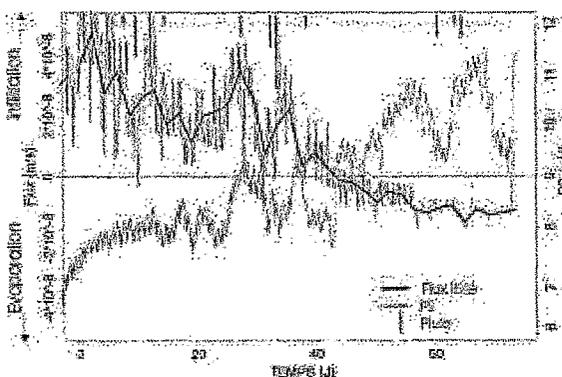


Figure 7 : Evolution du flux hydrique en non-saturé à 35 cm de profondeur dans le cas d'un sol limoneux et variations de PS mesurées entre 30 et 40 cm de profondeur (Temps 0 = 1 janvier 2000).

#### IV - CONCLUSION – PERSPECTIVES

Les résultats présentés sont encore préliminaires et doivent être testés quant à la cohérence entre les différentes méthodes. On voit cependant, d'une part, que la combinaison des différentes méthodes permet d'avoir une vue spatiale relativement détaillée du sous-sol et que, d'autre part, des évolutions temporelles net de paramètres géophysiques (polarisation spontanée, conductivité apparente mesurée à l'EM38) sont liées à des variables hydrologiques (humidité du sol, flux).

#### V – REFERENCES

- J.L. THONY, P. MORAT, G. VACHAUD, J.L. Le MOUEL, 1997, Field characterization of the relationship between electrical potential gradients and soil water flux, *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, 325, 317-321
- C. DOUSSAN, L. JOUNIAUX, 2000, Suivi temporel de la polarisation spontanée et du potentiel hydrique pour un sol limoneux et argileux de cases lysimétriques, *Société Géologique de France : Les potentiels spontanés en science de la terre*, Paris, 16 mars 2000, 8-9.
- C. CAMERLYNCK, 1999, Compte-rendu des prospections Slingram superficielles du site INRA Montfavet, *rapport*, 10p.
- N. FLORSCH, S. CABRERA, 2000, Compte-rendu de la prospection Slingram et tests de polarisation spontanée mars 2000, *rapport*, 7p.

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

INSU

CNRS

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