



HAL
open science

Biogéochimie isotopique des interactions biosphère-atmosphère

Thierry Bariac, Philippe Biron, S. Cayet, Claude Doussan, Richard Joffre,
Olivier Marloie, G. Najjar, P. Richard, Serge Rambal, J.M. Sánchez-Pérez

► **To cite this version:**

Thierry Bariac, Philippe Biron, S. Cayet, Claude Doussan, Richard Joffre, et al.. Biogéochimie isotopique des interactions biosphère-atmosphère. Colloque PNRH 2000, May 2000, Nice, France. hal-02768527

HAL Id: hal-02768527

<https://hal.inrae.fr/hal-02768527>

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.

BIOGEOCHIMIE ISOTOPIQUE DES INTERACTIONS BIOSPHERE-ATMOSPHERE

Thierry Bariac¹, Philippe Biron^{1,5}, Sébastien Cayet¹, Claude Doussan², Richard Joffre³, Olivier Marloie⁴, Georges Najjar⁵, Patricia Richard¹, Serge Rambal³, José Miguel Sanchez-Perez⁵

- 1 : LBI, UMR 7618 CNRS-UPMC-INRA, 4, Place Jussieu, 75252 Paris
- 2 : Science du Sol, INRA Montfavet, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon.
- 3 : CEFÉ, CNRS, Rte de Mende, 34033, Montpellier.
- 4 : Bioclimatologie, INRA Montfavet, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon.
- 5 : CEREG, UMR 7007 CNRS-ULP, 3 rue de l'Argonne, 67083, Strasbourg

Mots-clés : eau, évapotranspiration, feuille, oxygène 18, deutérium.

géochimie - continuum sol plante atmosphère

1. Introduction

La signature isotopique des précipitations continentales est de plus en plus utilisée pour la reconstitution des paléoclimats ou pour la détermination de l'origine de l'eau en période de crue. L'analyse de l'excès en deutérium des précipitations, à partir de la comparaison entre teneurs isotopiques mesurées et calculées à l'aide des modèles de circulation générale atmosphérique, met en évidence un résidu élevé que l'on cherche à expliquer, entre autres, à l'aide d'un recyclage de la pluie infiltrée dans les sols par l'évapotranspiration. Or, la prise en compte de ce recyclage dans ces modèles (par exemple, NASA-GISS, Jouzel et al., 1987, ECHAM, Hoffmann et al., 1998) conduit à différentes hypothèses qui semblent *a priori* difficilement acceptables à l'échelle locale :

- Les signatures isotopiques de l'eau absorbée par les racines et de l'eau mobilisée par les remontées capillaires seraient identiques à celles des précipitations. Cette hypothèse néglige le fractionnement isotopique lié à l'évaporation de la pluie infiltrée dans le sol.
- La vapeur d'eau issue de la transpiration de la plante aurait la même signature isotopique que l'eau d'absorption racinaire : cette vapeur ne subirait donc pas de fractionnement isotopique par rapport à l'eau qui alimente la plante.
- La vapeur issue de l'évaporation de l'eau dans le sol aurait la même signature isotopique que celle de l'eau mobilisée par les remontées capillaires : cette vapeur ne subirait donc pas de fractionnement isotopique par rapport à ces remontées capillaires.
- Dans les deux derniers cas, ces hypothèses impliquent que l'eau des feuilles et l'eau des couches superficielles du sol puisse atteindre un état isotopique stationnaire et s'y maintenir.
- La vapeur d'eau continentale injectée dans l'atmosphère générale d'origine océanique serait issue principalement de la transpiration (Rozanski et al., 1982) : ceci suppose, dans l'atmosphère au-dessus d'un couvert végétal, que l'on soit capable, d'une part, de distinguer le flux de vapeur en provenance de la plante de celui issu du sol et d'autre part, que ce dernier soit négligeable.

Ce sont ces différentes hypothèses que nous cherchons à tester à l'échelle locale afin de voir ce qui est transposable dans les modèles à des échelles plus globales.

2. MATERIELS ET METHODES

L'interprétation du traçage isotopique de la vapeur d'eau passe par une caractérisation des signatures de l'eau (phase liquide, phase gazeuse) dans le continuum sol-plante-atmosphère. Ceci ne peut pas se faire directement en conditions naturelles en raison de la dilution immédiate de la vapeur issue des différentes sources (sol, plante) dans l'atmosphère régionale et de la difficulté d'interprétation qui en résulte.

Cette considération nous a imposé de conduire différentes expérimentations au sein d'un réacteur biogéochimique de type « RUBIC » afin d'avoir un accès direct aux relations de type

source-produit. En effet, dans ce réacteur, le dispositif de régulation du déficit de pression de vapeur saturante ne fait appel qu'à une seule source de vapeur, celle qui est issue de l'évaporation.

En conditions naturelles, nous avons échantillonné différents compartiments du continuum sol-plante-atmosphère sur trois sites : Montfavet/Vaucluse/INRA, Vaujoirres/Loiret/CNRS, Grignon/ Yvelines/INRA. Après prélèvement, l'extraction de l'eau est effectuée par distillation sous vide de type « Rayleigh », soit au laboratoire (matrices minérale et organique), soit directement sur le site de prélèvement (vapeur). Les analyses isotopiques sont réalisées classiquement par équilibration isotopique H_2O-CO_2 (^{18}O , 50 μl d'eau) ou par réduction de l'eau sur de l'uranium (2H , 10 μl d'eau).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Caractérisation de la vapeur d'eau issue de la transpiration par sa signature isotopique.

Lors d'une première expérience conduite dans le réacteur « RUBIC », nous avons effectué un suivi de l'évolution temporelle de :

- La signature isotopique de l'eau foliaire (2 niveaux, feuilles entières et parties apicales).
- La vapeur d'eau issue de la transpiration (2 niveaux, phase gazeuse par prélèvement direct et vapeur totale par piégeage partiel à point de rosée ou par piégeage total cryoscopique).

Les résultats obtenus montrent que l'atteinte d'un état isotopique stationnaire dans le réservoir d'eau foliaire provoque celle d'un état analogue dans la vapeur transpirée, dont la valeur est imposée par la teneur isotopique de l'eau d'alimentation de la plante. Ceci confirme la notion d'état isotopique stationnaire utilisée par le modèle isotopique de l'évaporation (Craig et Gordon, 1965) et valide également le dispositif expérimental utilisé pour le prélèvement de la vapeur d'eau. La détermination de la signature de l'eau d'alimentation et l'identification de la nature de l'état isotopique au sein du réservoir foliaire permettent de déterminer la signature de la vapeur d'eau transpirée et donc de répondre à l'un de nos objectifs qui est de caractériser la source « transpiration ». Cependant, différents problèmes sont encore à résoudre : détermination du signal d'entrée dans la plante/feuille et représentativité de la signature du réservoir d'eau foliaire vis-à-vis de la transpiration.

Au cours de cette première expérience, l'utilisation du dispositif « RUBIC » nous a également permis d'étudier différents aspects théoriques et expérimentaux de la méthodologie des droites d'évaporation, méthodologie couramment utilisée en hydrologie isotopique. En conditions contrôlées, nous avons réalisé un pseudo-équilibre isotopique liquide-vapeur (« pseudo-équilibre », car obtenu en l'absence d'échange de matière) entre l'eau d'alimentation du réservoir foliaire soigneusement préservé de l'évaporation et la vapeur du réacteur. Ceci entraîne la conséquence suivante : dans un diagramme $\delta^2H-\delta^{18}O$, les teneurs qui caractérisent les états isotopiques de l'eau foliaire n'évoluent plus qu'en fonction d'une seule droite d'évaporation au lieu de se répartir suivant les deux droites (transitoire et stationnaire) classiquement observées. De plus, dans le cas des échantillons prélevés dans la partie apicale de la feuille, l'intersection de cette droite d'évaporation avec la droite des eaux météoriques donne accès à la signature de l'eau d'alimentation de la feuille avant toute évaporation. Ceci n'est pas vérifié dans le cas de l'eau extraite des feuilles entières : on peut donc en conclure que seule la composition isotopique de l'eau de la partie apicale de la feuille caractérise l'évaporation. La coexistence de deux réservoirs à histoires géochimiques différentes au sein de la feuille entière (cf. paragraphe 3.3) exclut de pouvoir déterminer la signature isotopique de l'eau d'alimentation par cette méthode.

3.2. Caractérisation de l'eau d'alimentation de la plante/feuille par sa signature isotopique.

Une deuxième expérience, réalisée en conditions naturelles (Grignon, Yvelines, INRA), montre que la teneur isotopique de l'eau du collet (maïs) évolue dans le temps. Ces teneurs diminuent au cours de la journée, puis reviennent à l'état initial (plus concentré en isotopes lourds) au cours de la nuit. La répartition de ces teneurs dans un diagramme $\delta^{18}O-\delta^2H$ démontre que :

- Les états initiaux et finaux de l'eau du collet présentent une signature marquée en isotopes lourds par l'évaporation.
- L'eau, du collet, au cours de la journée, présente une signature de plus en plus caractéristique du processus de la condensation (position des points voisine de la droite des eaux météoriques).

Les teneurs isotopiques de l'eau du sol mesurées à un même niveau ne montrent pas d'évolution significative durant la même période. Nous avons donc cherché à identifier le processus responsable de cette évolution : échanges isotopiques xylème-phloème au sein de la tige (« effet plante ») et/ou, en fonction de la demande évaporatoire, évolution de la quantité d'eau absorbée dans le sol à différentes profondeurs différemment marquées en isotopes lourds (« effet sol ») ?

Une troisième expérience réalisée en culture hydroponique préservée de l'évaporation démontre l'existence d'un gradient isotopique dans l'eau des différents organes aériens d'une plante. Ces résultats peuvent être expliqués par la présence de deux flux hydriques dans ces organes aériens : la sève brute, dont le traçage isotopique est contrôlé par celui de l'eau de la solution et la sève élaborée, dont le traçage est imposé par la transpiration. Les prélèvements intègrent les deux types de sève et produisent ainsi les teneurs isotopiques intermédiaires observées entre le collet et les feuilles.

Une quatrième expérience a été réalisée sur des collets de plants de maïs cultivés en culture hydroponique de façon à imposer un signal d'entrée homogène à la plante. Les résultats montrent que la teneur en oxygène 18 de l'eau du collet reste très stable ($\pm 0,2\%$) au cours du temps et identique à celle de l'eau de la culture. Il n'y a donc pas de fractionnement isotopique lors de l'absorption racinaire. La teneur de l'eau du collet est donc représentative du signal d'entrée dans la plante et sa mesure permet de s'affranchir de l'hétérogénéité isotopique de l'eau dans le sol et dans les racines. En conditions naturelles, on peut supposer que l'évolution de la quantité d'eau absorbée à différentes profondeurs dans le sol au cours de la journée provoque l'évolution isotopique de l'eau du collet. À un flux de transpiration élevé correspond le prélèvement d'une quantité d'eau plus importante en profondeur et donc l'arrivée d'une eau au collet, moins concentrée en isotopes lourds du fait de l'absence d'évaporation du sol dans les couches profondes (= signature isotopique des pluies). L'accès à la composition isotopique de l'eau du collet rend donc possible la détermination d'une zone « moyenne » d'absorption racinaire et le suivi de son évolution spatio-temporelle. Cela n'est rendu possible que par l'existence d'un réseau racinaire sur tout le profil de sol et de gradients hydrique et isotopique développés dans le sol.

Lors d'une cinquième expérience, cette hypothèse a été vérifiée en conditions contrôlées (dispositif racinaire éclaté) par la réalisation d'un déficit hydrique croissant (-0,25MPa à -1,50MPa) dans l'un des compartiments racinaires par adjonctions successives de PolyÉthylèneGlycol et par marquage isotopique différencié des solutions racinaires. À l'état isotopique stationnaire, nous savons que la signature de la vapeur transpirée est identique à celle de l'eau du collet : dans ces conditions, cette signature reflète donc l'existence d'un mélange d'eau, identifié au niveau du collet, entre des solutions racinaires à teneurs isotopiques différentes et sous potentiels hydriques différents. La signature de la vapeur transpirée (et donc celle de l'eau du collet) évolue en fonction des flux isotopiques issus des compartiments racinaires : ceci permet de déterminer la proportion d'eau issue de chaque compartiment à partir d'une équation de mélange à deux pôles. Les résultats de cette expérimentation montrent qu'il faut atteindre -1,5MPa, pour que la plante ne prélève l'eau que dans le compartiment où la dépense énergétique est la plus faible.

3.3. Détermination de la quantité d'eau foliaire mobilisée au cours de la transpiration.

Lors d'une sixième expérience conduite en conditions naturelles (Vaugoirres/Loiret), nous avons effectué un suivi temporel de la signature isotopique de l'eau des feuilles de plants de maïs (dix feuilles par plant). Cette signature est le résultat du mélange obtenu par distillation sous vide de deux réservoirs à histoire géochimique différente et donc à teneurs différentes en isotopes lourds : le réservoir (V_0), dont la composition isotopique est celle de l'eau du sol et le réservoir ($1 - V_0$) qui est marqué en isotopes lourds par la transpiration. À partir d'un modèle de mélange qui prend en compte les états isotopiques transitoires et stationnaires dans la feuille, il devient possible de calculer la valeur moyenne du terme V_0 et de suivre son évolution dans le temps. Cette évolution est directement contrôlée par celle du flux de transpiration : au sein du réservoir foliaire, la fraction d'eau marquée en isotopes lourds par la transpiration diminue au fur et à mesure que le flux de transpiration augmente. Il est à noter que la stationnarité isotopique de l'eau au sein du réservoir foliaire n'existe qu'entre 09h00 et 17h30 T.U.

3.4. Marquage isotopique de la vapeur par l'évapotranspiration en conditions naturelles.

Lors d'une septième expérience, la vapeur d'eau a été échantillonnée en conditions naturelles dans et au-dessus d'un champ de maïs (Grignon/Yvelines, Montfavet/Vaucluse, Vaujoirres/Loiret). Dans le couvert végétal, au cours de la journée, on enregistre systématiquement un enrichissement isotopique de la vapeur d'eau au sein du couvert lié à la transpiration. Cet enrichissement passe par :

- L'établissement d'un régime hydrique permanent au sein des sites de transpiration et atteinte d'un état isotopique stationnaire dans l'eau foliaire, puis, déplacement de cet état vers un autre, au cours de la journée en fonction de l'évolution, entre autres, du déficit de pression de vapeur d'eau.
- L'injection d'une vapeur d'eau transpirée dans l'atmosphère dont la teneur isotopique à l'état stationnaire demeure identique à celle de l'eau du collet et donc plus concentrée en isotopes lourds que la vapeur d'eau ambiante.

Dans la couche limite au-dessus du couvert, la dilution de la vapeur d'eau transpirée dans de la vapeur régionale d'origine océanique limite fortement l'enrichissement isotopique observé au sein du couvert. Dans un diagramme $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$, les échantillons de vapeur d'eau se répartissent suivant une droite de mélange entre deux pôles (collet, région). L'application de modèles couplés micrométéorologie-hydrochimie aux droites $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ établies à partir de cet échantillonnage de la vapeur d'eau doit permettre de calculer le flux de transpiration du couvert végétal et de valider ainsi l'un des modèles de transfert de gaz proposés dans la littérature. En effet, ces différents modèles couplés introduisent de façon différente le poids de la diffusion moléculaire et de la diffusion turbulente dans le calcul des résistances au transfert de la vapeur d'eau dans la couche limite (Merlivat et Jouzel, 1979). Les premiers essais que nous avons réalisés simulent de manière assez moyenne le flux de transpiration lors de l'application du modèle de Sverdrup, 1951, de Sheppard et du modèle de Kitaigorodskiy et Volkov, 1965. Par contre, la simulation est beaucoup plus satisfaisante dans le cas du modèle de Brutsaert (1975).

IV CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces différentes expériences ont permis de valider, en régions tempérées, certaines hypothèses utilisées dans les modèles isotopiques de circulation générale atmosphérique.

En effet, les diagrammes $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ ont montré que la signature de l'eau absorbée par les racines au cours d'un cycle nyctéméral évoluait entre celle de l'eau des couches superficielles du sol (pôle « évaporation ») l'évaporation et celles des couches profondes (« pôle condensation »). Mais au moment où la production de vapeur d'eau est maximale, la signature isotopique de l'eau du collet atteint celle des précipitations (pôle « condensation »). L'hypothèse d'une absorption de l'eau de pluie non évaporée qui s'est infiltrée dans le sol est donc partiellement validée pour une partie du cycle nyctéméral.

De plus, l'analyse de l'évolution temporelle de la signature de l'eau foliaire montre que ce réservoir n'atteint l'état stationnaire qu'au moment où la production de vapeur d'eau devient maximale : les expériences déroulées en conditions contrôlées démontrent la coïncidence entre l'atteinte de l'état stationnaire dans la feuille et dans la vapeur et confirment l'identité des teneurs isotopiques de la vapeur stomatique et de l'eau d'alimentation. L'hypothèse de la permanence de la stationnarité isotopique est donc également validée pour une partie du cycle nyctéméral.

Les conditions expérimentales rencontrées en conditions naturelles ont montré que la vapeur d'eau injectée dans l'atmosphère régionale n'était issue que de la transpiration (couverts végétaux à indice foliaire élevé) : l'évaporation de l'eau dans le sol est donc négligeable dans ces conditions.

Les travaux à venir concerneront la signature isotopique de l'eau dans le sol et de la vapeur issue de l'évaporation de celui-ci. On sait, par ailleurs, que l'évaporation de l'eau dans le sol a très rarement lieu en conditions de régime hydrique permanent : en conditions naturelles, cette eau ne peut donc pas présenter d'état stationnaire isotopique. Les premiers tests, réalisés en conditions contrôlées, ont montré qu'il existait un écart élevé entre la signature isotopique de la vapeur d'eau du sol, mesurée à l'état stationnaire et celle qui est prélevée en conditions transitoires. C'est donc à la caractérisation, puis à la modélisation de la signature de l'eau du sol que nous allons maintenant consacrer nos travaux (réacteur « RUBIC », milieu naturel) afin de pouvoir effectuer une séparation entre la transpiration et l'évaporation de l'eau dans le sol.

V REFERENCES

- BRUTSAERT, W. A., (1975).- A theory for local evaporation (or heat transfer) from rough and smooth surfaces at ground level, *Wat. Resour. Res.*, 11, 543-550.
- CRAIG, H. and GORDON, L., (1965).- Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In "Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures", C.N.R., Laboratorio di Geologia nucleare, E. TONGIORGI ed., Pisa, pp. 9-130.
- HOFFMANN, G., WERNER, M., and HEIMANN, H. (1998).- Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model : a study on timescales from days to several years. *J. Geophys. Res.*, 103, D14, 16871-16896.
- JOUZEL, J., KOSTER, R. D., SUOZZO, R. J., RUSSEL, G. L., WHITE, J. W. C. and BROECKER, W. S. (1987).- Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA-GISS GCM : The seasonal cycle for present-day conditions. *J. Geophys. Res.*, 92, 14739-14760..
- JOUZEL, J., KOSTER, R. D., SUOZZO, R. J., RUSSEL, G. L., WHITE, J. W. C., and BROECKER, W. S. (1991).- Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA-GISS GCM : Sensitivity experiments for present-day conditions. *J. Geophys. Res.*, 96, 7495-7501.
- KITAIGORODSKIY, S.A., AND VOLKOV Y. A. (1965).- On the roughness parameters of the sea surface and the calculation of momentum flux in the near water layer of the atmosphere., *IZV. Akad. Sci., USSR, Atmos. Oceanic Phys.* 12, 1317-1336.
- ROZANSKI, K. and SONNTAG, C. (1982).- Vertical distribution of deuterium in atmospheric water vapor., *Tellus*, 34, 135-141.
- SHEPPARD, P. A. (1958).- Transfer across the earth's surface and through the air above. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 361, 205-224.
- SVERDRUP, H. U. (1951). - Evaporation from the oceans, In "Compendium of Meteorology", *American Meteor. Soc.*, 1071-1081.

Thèses :

- ROCHE, C. (1999) - Analyses des interactions biosphère - atmosphère à partir du traçage isotopique naturel de l'eau et du gaz carbonique. « Allocation de Recherche MESR ». Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 201 pp.
- CAYET, S. Approche de l'extraction racinaire à partir de la méthodologie isotopique. « Allocation de Recherche MESR ». Soutenance prévue en septembre 2000.

Colloques

- BARIAC, T., SANCHEZ-PEREZ, J. M. , LUCOT, E., CAYET, S., GONZALEZ-DUNIA, J., BOUJAMLAOUI, Z., and RICHARD, P. (1996).- Water uptake by plants under different environmental conditions. In « Stable Isotopes and the Integration of Biological, Ecological and Geochemical Processes », Résumé paru dans « Proceed of the AAB-SEB-EBS Meeting ». Newcastle upon Tyne (9-11 july 1996).
- BARIAC, T., ROCHE, C., CAYET, S., RICHARD, P., SURUGUE, M. and MARIOTTI, A. (1998).- Isotopic composition of water from terrestrial plants: implications for water sources and water vapor. Colloque «European Geophysical Society», XXIII General Assembly, Nice, 20 - 24 avril 1998. Résumé publié dans « *Annales Geophysicae*, 16, II, 521.
- CAYET, S., BARIAC, T. and RICHARD, P. (1998).- Water uptake by plants in different environmental conditions. Colloque «European Geophysical Society», XXIII General Assembly, Nice, 20 - 24 avril 1998. Résumé publié dans « *Annales Geophysicae* », 16, II, 522.
- LADOCHE, B., BIRON, PH., NAJJAR, G., MILLET, A., HUON, S., RICHARD, P. and BARIAC, T. (1998).- The contribution of evapotranspiration to the enrichment of ¹⁸O and ²H and in the water vapor under natural conditions. Colloque «European Geophysical Society», XXIII General Assembly, Nice, 20 - 24 avril 1998. Résumé publié dans « *Annales Geophysicae* », 16, II, 525.
- SANCHEZ-PEREZ, J. M., BARIAC, T., LUCOT, E., AUZET, A.V., RICHARD, P. and TRAUTMANN, M. (1998).- Water movement from soil to root investigated through simultaneous measurement: soil water potential, root distribution and hydrological tracers. Colloque «European Geophysical Society», XXIII General Assembly, Nice, 20 - 24 avril 1998. Résumé publié dans « *Annales Geophysicae* », 16, II, 527.

33 84 1 11050

INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

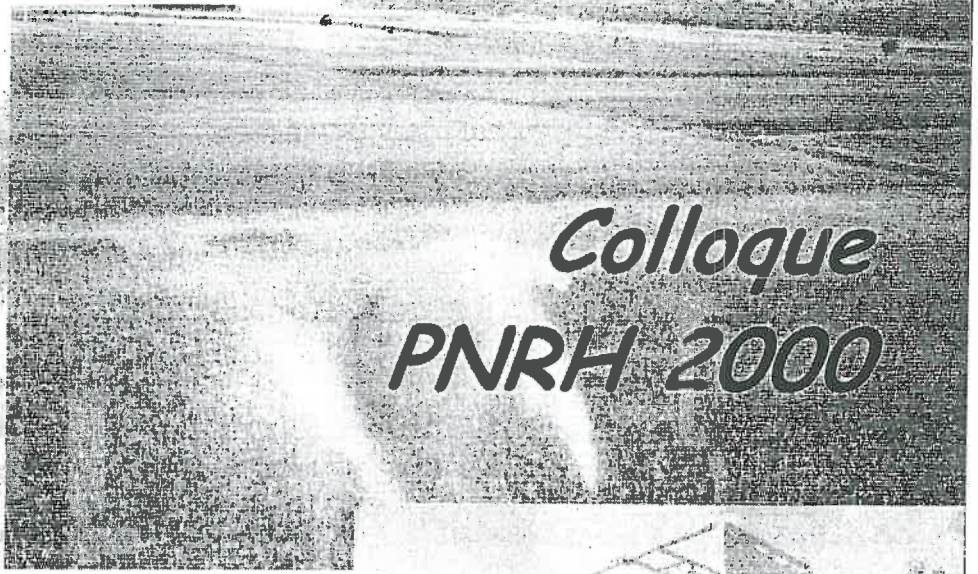
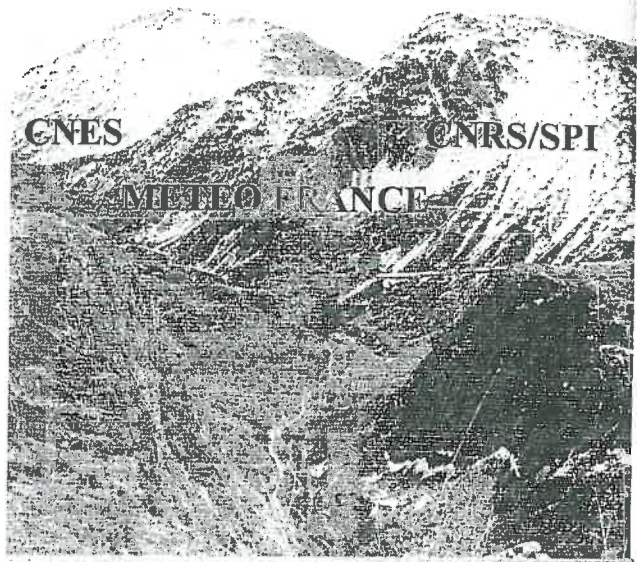
CNRS/SPI

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