



HAL
open science

Outils de connaissance de la ressource en eau dans les milieux de socle – expériences de suivi d’aquifères bretons

Luc Aquilina, Olivier Bour, Thierry Labasque, Véronique de Montety, Tanguy Le Borgne, Philippe Davy, Hélène Pauwels, Benoît Dewandel

► To cite this version:

Luc Aquilina, Olivier Bour, Thierry Labasque, Véronique de Montety, Tanguy Le Borgne, et al.. Outils de connaissance de la ressource en eau dans les milieux de socle – expériences de suivi d’aquifères bretons. Dix-septièmes journées techniques du Comité Français d’Hydrogéologie de l’Association Internationale des Hydrogéologues, Nov 2010, Toulouse, France. 7 p. hal-00549663

HAL Id: hal-00549663

<https://brgm.hal.science/hal-00549663>

Submitted on 22 Dec 2010

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.

Outils de connaissance de la ressource en eau dans les milieux de socle – expériences de suivi d'aquifères bretons

Luc AQUILINA ⁽¹⁾, Olivier BOUR ⁽¹⁾, Marc LAURENCELLE ⁽¹⁾, Thierry LABASQUE ⁽¹⁾, Véronique DE MONTETY ⁽¹⁾, Tanguy LE BORGNE ⁽¹⁾, Philippe DAVY ⁽¹⁾, Hélène PAUWELS ⁽²⁾, Benoit DEWANDEL ⁽²⁾

⁽¹⁾ CAREN-OSUR ; Université Rennes 1 – CNRS ; ⁽²⁾ Service EAU, BRGM

Luc.aquilina@univ-rennes1.fr, olivier.bour@univ-rennes1.fr, thierry.labasque@univ-rennes1.fr,
veronique.de-montety@univ-rennes1.fr, tanguy.le-borgne@univ-rennes1.fr, philippe.davy@univ-rennes1.fr,
h.pauwels@brgm.fr, b.dewandel@brgm.fr

I. INTRODUCTION

Les aquifères de socle constituent une part importante des substrats géologiques en France. Ils constituent de ce fait une ressource en eau non négligeable. Le caractère très hétérogène de ces formations rend leur fonctionnement particulièrement difficile à appréhender. Bien que des progrès aient permis de mieux comprendre le lien entre la structure géologique et la structure hydrogéologiques, les connaissances restent très limitées en ce qui concerne leur exploitation. Le rôle de l'exploitation dans l'évolution des aquifères de socle pose encore de nombreuses questions qui trouvent leur écho dans les paramètres de la DCE.

A partir de plusieurs exemples situés en Bretagne, nous présenterons un état des lieux de la vision actuelle de ces aquifères et des outils qui permettent d'en réaliser la description. Nous présenterons deux sites qui ont permis de mieux contraindre les évolutions possibles tant en termes de mélanges entre les masses d'eau qu'en termes d'évolution chimique de ces dernières. Ces sites font l'objet de suivis importants qui permettent d'accéder à un niveau de connaissance peu fréquent.

II. ETAT INITIAL DES AQUIFERES DE SOCLE

Le BRGM a développé ces dernières années une description des aquifères de socle à partir de leurs propriétés géologiques et hydrogéologiques [1,2]. L'altération des formations géologiques joue un rôle particulièrement important en permettant le développement d'un aquifère de surface dans les altérites. A la limite entre la zone d'altérites et le socle sain, se développe également une zone de fracturation plus importante qui joue un rôle hydrogéologique. L'analyse de données sur plusieurs aquifères où la limite entre altérites et socle sain est connue a permis de mettre en évidence le rôle important d'un point de vue chimique et biologique de cette limite qui correspond à une zone d'abattement des teneurs en nitrates [3] (Fig. 1).

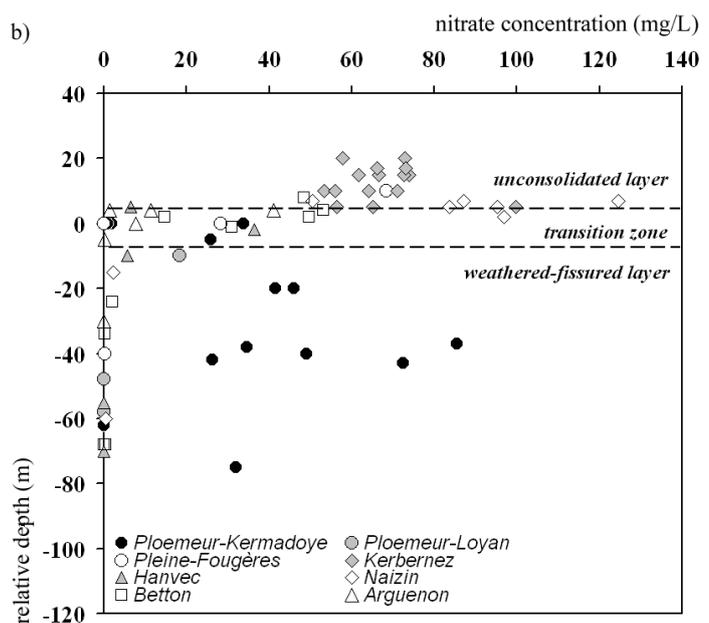


Figure 1 – Evolution des concentrations en nitrates dans les aquifères de socle en fonction d'une profondeur relative à l'interface milieu fissuré / milieu fracturé [3]

La partie plus profonde des aquifères de socle peut également permettre des productions d'eau non négligeables du fait de zones de fracture ou de filons de nature différente de l'encaissant. Ce type de ressources est aujourd'hui encore peu exploité bien que plusieurs exemples en Bretagne montrent les potentialités de ce type de structures. Le site de Ploemeur (Morbihan) est situé à proximité d'un accident particulièrement important, le cisaillement sud-armoricain, le long d'une faille d'orientation N120 qui recoupe la limite entre un pluton granitique hercynien et une formation de micaschistes (Fig. 2). Ce site a été mis en exploitation en 1991 et fait l'objet d'un suivi géochimique et hydrogéologique très détaillé depuis 2003, il appartient au réseau national des sites hydrogéologiques (réseau H+, <http://hplus.ore.fr>). Un second site situé légèrement plus à l'ouest (commune de Guidel, Morbihan), dans le même type de structures, vient de faire l'objet d'explorations nouvelles et montre que les potentialités de ces structures géologiques peuvent être généralisées. Ce site permet d'avoir une vision claire de l'état initial d'un aquifère avant mise en exploitation et peut être comparé avec l'évolution observée depuis 20 ans dans le site de Ploemeur [4].

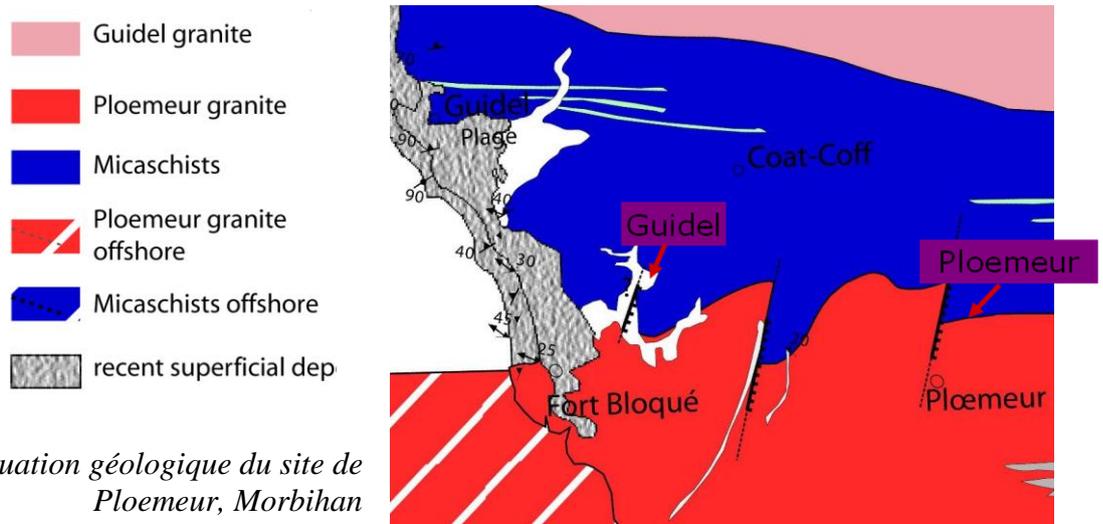


Figure 2 – Situation géologique du site de Ploemeur, Morbihan

De la même manière, nous avons pu réaliser le suivi d'un second site (Betton, Ille et Vilaine) qui a fait l'objet d'un forage à une profondeur de plus de 100 m, en parallèle à un captage existant dans la zone altérée. Ce site a pu être caractérisé avant le début du pompage en 2006 et il fait l'objet d'un suivi chimique détaillé depuis la mise en place de l'exploitation [5].

III. OUTILS DE DIAGNOSTIC

Les sites présentés ont fait l'objet d'investigations poussées sur le rôle des structures géologiques [6, 7, 8, 9]. D'un point de vue physique, outre les tests classiques, des tests d'interférence ont été réalisés et modélisés [10, 11]. Ces sites ont également permis le développement de techniques de mesure des flux au sein des puits.

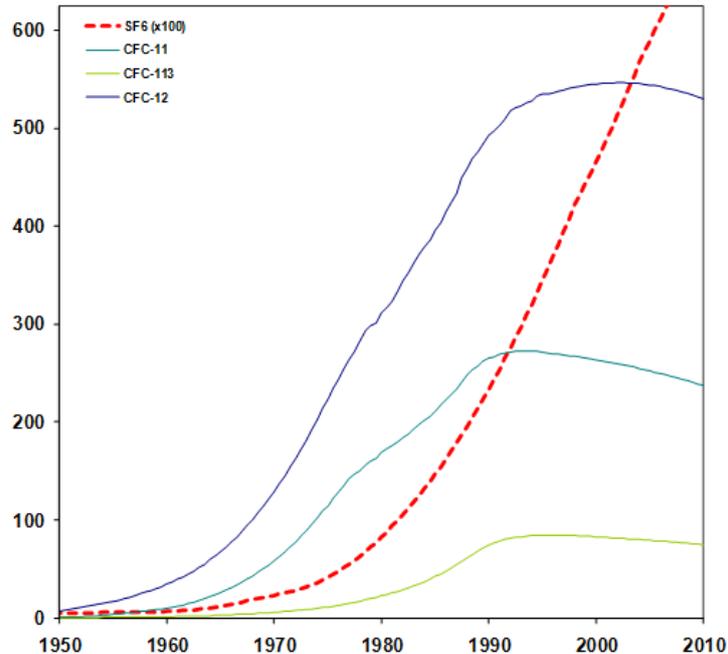
D'un point de vue chimique, sur certains des captages, des analyses isotopiques détaillées ont été menées pour définir l'origine des éléments chimiques contenus dans les eaux [12, 13, 14, 15, 16]. Certains aspects seront détaillés un peu plus loin. Des analyses de chimie (éléments majeurs, éléments traces) permettent de suivre l'évolution des mélanges et des réactions chimiques au sein des masses d'eau et permettent également de suivre un paramètre important pour l'exploitation : le caractère plus ou moins réducteur des eaux. En effet, certains éléments (fer, manganèse) sont particulièrement sensibles à ce paramètre.

Ce suivi est complété par l'analyse des gaz dissous dans l'eau. Cette analyse possède trois applications : d'une part certains gaz permettent de caractériser d'éventuelles activités biologiques (CO_2 , CH_4 , O_2 , N_2O , N_2). Par ailleurs, certains gaz (Néon, Argon, Azote) permettent de déterminer la quantité d'air incluse lors du processus de recharge de l'aquifère et la température lors de cette dernière. Enfin, la détermination de gaz anthropiques d'origine industrielle (différents CFC, CCl_4 , SF_6), permet de déterminer un temps de résidence de l'eau dans le milieu souterrain [17, 18, 3] (Fig. 3).

Cette analyse s'avère particulièrement importante pour la modélisation des aquifères pouvant être exploités. Bien que la méthode se soit avérée délicate à utiliser durant les années 2000, la décroissance observée des CFC depuis quelques années permet à nouveau de travailler sur des eaux récentes et donne à nouveau un intérêt fort à cette méthode.

La détermination des temps de résidence est basée sur une analyse des concentrations en gaz dissous dans les eaux. Ces gaz sont des gaz anthropiques émis par l'activité industrielle (aérosols, réfrigérants, gaines électriques...). Les composés les plus couramment utilisés sont les chlorofluorocarbones (CFC) qui ont été utilisés depuis les années 50. Leur concentration atmosphérique est bien connue et assez homogène à l'échelle du globe (Fig. 3a).

Lors du processus de recharge, l'eau souterraine s'équilibre avec l'atmosphère puis, dès qu'elle quitte la proche surface, elle conserve la 'mémoire' des concentrations atmosphériques. Lorsqu'on échantillonne un puits, on peut donc déterminer la concentration atmosphérique à partir des concentrations dissoutes et déterminer une année de recharge. Ce calcul implique de connaître les températures de recharge et la solubilité des gaz. Ces dernières sont connues et la température est estimée à partir des autres gaz (Néon, Argon) mesurés dans les eaux.



Suite au protocole de Montréal, l'utilisation des CFC a été interdite et on peut observer dans les courbes un plateau des concentrations qui rend la méthode moins efficace. Un second gaz le SF6 (Fig. 3a) peut être utilisé. Des analyses récentes montrent que la partie descendante des courbes de concentration permettent à nouveau une datation plus précise des eaux récentes.

Les données de temps de résidence n'ont pas de signification en soi hormis dans le cas d'un modèle piston qui n'est pas adapté à la plupart des situations rencontrées. Aussi, l'intérêt des données tient principalement à une détermination de la distribution des temps de résidence dans l'aquifère et à la possibilité d'injecter ces données dans un modèle soit simple de type boîte noire (Fig. 3b, modèle de l'USGS), soit dans des modèles plus complexes.

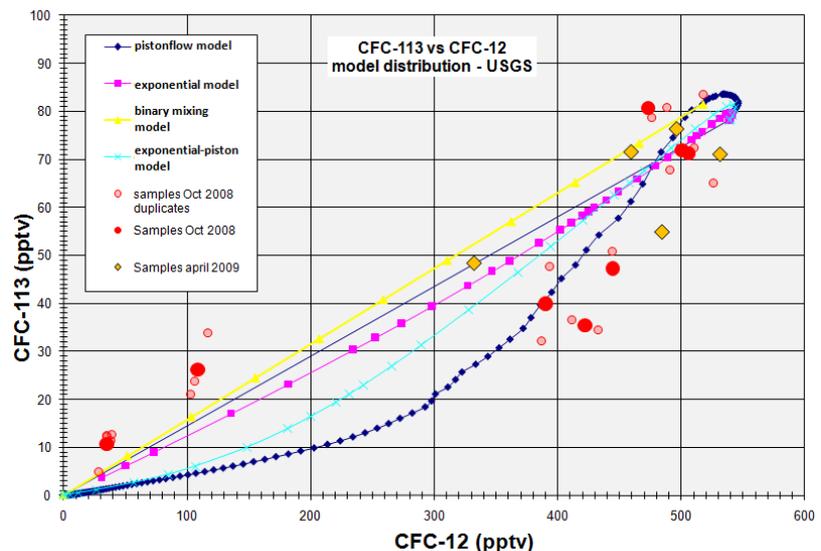


Figure 3 – Méthodologie de datation des eaux souterraines

IV. EFFET DE LA MISE EN EXPLOITATION : REACTIVITE CHIMIQUE

IV.I. Sites de Ploemeur et Guidel

La figure 4 présente l'évolution de certains paramètres qui font l'objet d'un suivi régulier par la mairie de Ploemeur. On peut voir qu'au cours des 20 années qui ont suivi la mise en exploitation du captage, celui-ci ne montre pas de stabilisation chimique. On peut remarquer par exemple que les teneurs en nitrates, bien que montrant des valeurs très basses par rapport aux valeurs initiales et aux valeurs observées à Guidel par exemple, ne montrent jamais de valeurs nulles. Ceci reste vrai, quelles que soient les variations des autres paramètres qui montrent une évolution majeure.

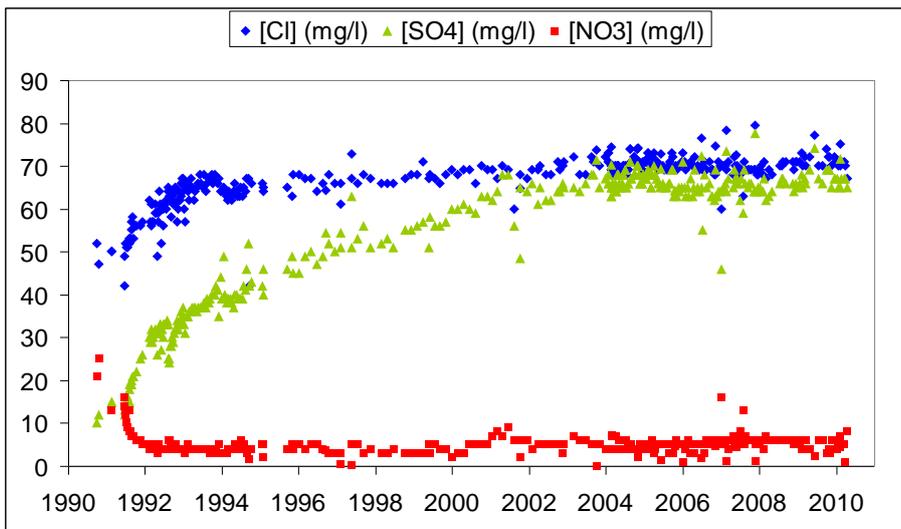


Fig. 4 – Evolution des concentrations dans le captage du site de Ploemeur, Morbihan

Une part de l'évolution présentée peut s'expliquer par la mise en place d'un milieu réactif en profondeur. Une réaction de dénitrification en l'absence d'oxygène et de matière organique (dénitrification autotrophe) est responsable de la chute des nitrates. Cette réaction est liée à une activité microbienne qui se développe suite à la mise en place du pompage [4]. Bien que les eaux qui circulent dans les forages conservent globalement des caractéristiques peu réductrices, les eaux contenues dans la microporosité de la roche constituent des milieux plus réducteurs qui permettent le développement de certaines réactions biogéochimiques particulières comme la dénitrification. La mise en place du pompage s'est traduite par une réorganisation et une diversification des chemins de l'eau et une sollicitation plus importante de la matrice.

L'exploitation de l'aquifère s'est également traduite par une modification globale de l'aquifère en termes de temps de résidence [3]. Alors qu'on observe de manière globale en Bretagne un accroissement du temps de résidence avec la profondeur, ce qui traduit un fonctionnement hydrogéologique global à l'échelle régionale, on observe sur Ploemeur des temps de résidence plus faibles dans la partie fracturée que dans l'aquifère des altérites. Cet élément montre que dans le cas de Ploemeur, les altérites qui surplombent l'aquifère jouent un rôle relativement secondaire dans l'alimentation de ce dernier.

IV.II. Site de Betton

Sur le site de Betton, la composition de l'eau pompée dans le forage à 100 m reste beaucoup plus stable que celle observée à Ploemeur. Néanmoins, on peut voir (Fig. 5) qu'au cours du temps, les concentrations en sulfate ont augmenté par rapport aux concentrations en chlorures. Ceci peut-être interprété comme une réaction d'oxydation de pyrite au sein du milieu. Elle traduit le fait que de l'oxygène est progressivement apporté depuis la surface vers le milieu plus profond. L'analyse des éléments traces métallique est donc particulièrement importante dans ce cas, du fait de leur présence au sein des minéraux sulfurés (arsenic, plomb, cadmium...).

V. EFFET DE LA MISE EN EXPLOITATION : FLUIDES PROFONDS

V.I. Sites de Ploemeur et Guidel

La comparaison entre les deux sites de Ploemeur et Guidel d'une part et l'analyse d'un forage profond (150 m) à Ploemeur d'autre part ont permis de montrer qu'une part de l'évolution observée au niveau du forage exploité de Ploemeur est liée à un large processus de mélange. Ce mélange se produit entre un premier pôle constitué par les eaux du site telles qu'on peut les observer à l'ouest de la zone faillée ou sur le site de Guidel, non encore exploité. Ces eaux présentent des concentrations en nitrates qui peuvent être élevées et des salinités faibles (Cl = 30 à 40 mg/L). Le second pôle est constitué par des fluides de salinité plus élevée (Cl = 90 mg/L) et qui présentent également de fortes concentrations en sulfates. Une anomalie de température associée à ces eaux montre que leur origine est assez profonde (au moins 300 m). L'analyse isotopique ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) indique que l'origine des solutés qui sont contenus dans ces eaux est probablement marine [13]. L'analyse des temps de résidence (CFC, ^4He) montre des temps de résidence important, bien au-delà des temps caractéristiques des aquifères en Bretagne [3].

V.II. Site de Betton

Dans le cas du site de Betton, des fluides de forte salinité (Cl = 600 mg/L) ont été mis en évidence lors de la foration de piézomètres profonds à proximité du forage d'exploitation, à des profondeurs de 80 à 100 m. Dans ce cas également, on peut observer que les eaux produites par le forage d'exploitation constituent un mélange entre les eaux de surface de l'aquifère et les fluides profonds identifiés dans l'un des piézomètres (Pz6, Fig. 5). Dans ce cas également, plusieurs rapports isotopiques et les concentrations de certains éléments indiquent qu'il s'agit d'éléments d'origine marine avec des temps de résidence importants.

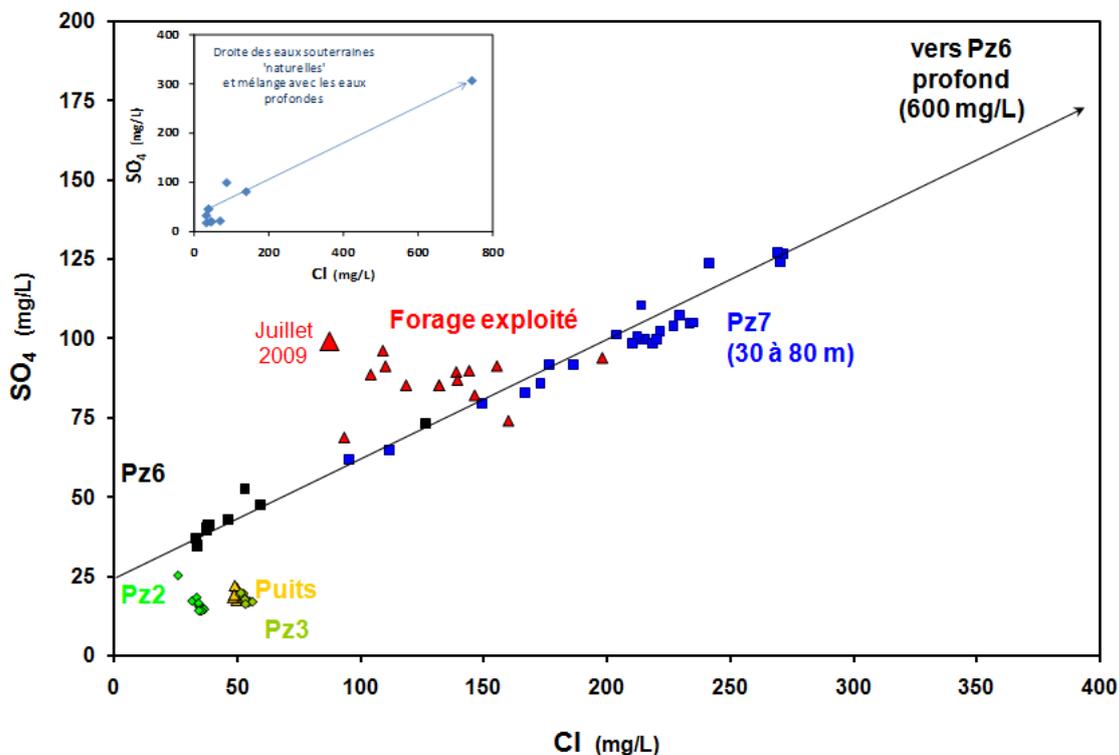


Figure 5 – Evolution des concentrations dans le captage du site de Betton, Ille et Vilaine
Pz2, Pz3 Puits : captages dans la zone altérée ; Forage exploité : forage à 107m ; Pz6 et Pz7 :
piézomètres profonds. Encart, mélange observé au sein du Pz6 depuis la surface vers la partie
profonde avec une forte salinité (600 mg/l)

VI. CONCLUSIONS

Les travaux menés en Bretagne ont permis de proposer un schéma de fonctionnement des aquifères de socle qui fonctionnent de manière très compartimentée. L'introduction d'une exploitation ne conduit pas nécessairement à la migration des eaux depuis la partie altérée de surface de l'aquifères vers la partie profonde. Au contraire, dans les deux exemples illustrés, on observe plutôt de fortes productions de la partie située sous le milieu fissuré. On observe en particulier la participation important de fluides profonds dont l'origine reste une question scientifique en suspens.

La compréhension de la nature géologique et chimique des différents compartiments de ces aquifères et la caractérisation de certaines réactions chimiques permettent de mieux définir les différentes masses d'eau qu'ils renferment. Les outils ainsi développés permettent de mieux répondre aux besoins exprimés par la DCE. En particulier, ils peuvent constituer une aide précieuse pour la délimitation des zones d'alimentation d'une part et dans le contrôle de l'évolution du gisement d'autre part.

Références bibliographiques :

- [1] Dewandel B, Lachassagne P, Wyns R, et al., 2006 - A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *J. of Hydrology*. 330/1-2, 260-284.
- [2] Dewandel B, Lachassagne P, Boudier F, et al., 2005 - A conceptual hydrogeological model of ophiolite hard-rock aquifers in Oman based on a multiscale and a multidisciplinary approach. *Hydrogeology Journal*, 13/5-6, 708-726.
- [3] Ayraud, V., L. Aquilina, T. Labasque, H. Pauwels, J. Molenat, A. C. Pierson-Wickmann, V. Durand, O. Bour, C. Tarits, P. Le Corre, E. Fourre, P. Mérot, and P. Davy, 2008 - Compartmentalization of physical and chemical properties in hard rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses, *Appl. Geochem.* 23/9, 2686-2707.
- [4] Tarits C., Aquilina L., Ayraud V., Pauwels H., Davy P., Touchard F. and Bour O, 2006 - Oxido-reduction sequence related to flux variations of groundwater from a fractured basement aquifer (Plœmeur area, France), *Applied Geochemistry*, 21/1, p 29-47.
- [5] Ayraud V., Aquilina L., Labasque T., Pauwels H., Pierson-Wickmann A.C., Gallat C., Aquilina A.M., 2006 - Physical, biogeochemical and isotopic processes related to rock heterogeneity of a shallow aquifer in crystalline rocks. *Biogeochemistry* 81-3, 331-347.
- [6] Le Borgne T., J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and O. Bour (2007), Characterization of the velocity field organization in heterogeneous media by conditional correlation, *Water Resources Research*, 43.
- [7] Le Borgne T., Bour O, Riley MS, Gouze P, Pezard PA, Belghoul A, Lods G, Le Provost R, Greswell RB, Ellis PA, Isakov E, Last BJ, 2007 - Comparison of alternative methodologies for identifying and characterizing preferential flow paths in heterogeneous aquifers. *Journal of hydrology* 345 (3-4) : 134-148.
- [8] Le Borgne T, Bour O, de Dreuzy JR, et al., 2004 - Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation. *Water Resources Research* 40/3.
- [9] Marechal JC, Dewandel B, Subrahmanyam K, 2004 - Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research* 40/11.
- [10] Le Borgne T., Bour O., Paillet F.L. and Caudal J-P., 2006 - Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. *Journal of Hydrology*, 328/1-2, 347-359.
- [11] Le Borgne, T., F. Paillet, L. O. Bour and Caudal J-P., 2006 - Cross borehole flowmeter tests for transient heads in heterogeneous aquifers. *Ground Water* 44/3, 444-452.
- [12] Negrel P, Pauwels H., 2004 - Interaction between different groundwaters in Brittany catchments (France): Characterizing multiple sources through strontium- and sulphur isotope tracing. *Water Air and Soil Pollution* 151/1-4261-285.
- [13] Pauwels, H., V. Ayraud-Vergnaud, L. Aquilina, J. Molénat, 2010 - The fate of nitrogen and sulfur in hard-rock aquifers as shown by sulfate-isotope tracing. *Applied Geochemistry* 25, 105-115.

- [14] Pierson-Wickmann A.C., Aquilina L., Weyer C., Molenat J. and Lischeid G., 2009 – Acidification processes and soil leaching influenced by agricultural practices revealed by strontium isotopic ratios. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 73-16, 4688-4704.
- [15] Weyer C., Lischeid G., Aquilina L., Pierson-Wickmann A.C., Martin C. 2008. Mineralogical sources of the buffer capacity in a granite catchment determined by strontium isotopes. *Applied Geochemistry* 23/10, 2888-2905.
- [16] Le Druillennec T., Ielsch G., Bour O., Tarits C., Tymen G., Alcade G., Aquilina L., 2010 - Hydrogeological and geochemical control of the variations of ²²²Rn concentrations in a hard rock aquifer: insights into the possible role of fracture-matrix exchanges. *Applied Geochemistry* 25, 345-356.
- [17] Vergnaud-Ayraud V., Aquilina L., Pauwels H. and Labasque T., 2008 - La datation des eaux souterraines par analyse des CFC : un outil de gestion durable de la ressource en eau. *Techniques, Sciences, Méthodes* 1, 37-44.
- [18] Labasque T., Ayraud V., Aquilina L., Le Corre P., 2006 - Dosages des composés chlorofluorocarbonés et du tétrachlorure de carbone dans les eaux souterraines : application à la datation des eaux. Cahier Technique de Géosciences Rennes, n°4.