

## **Impact du compartiment fracturé sur le temps de réponse des bassins : apports de la datation des eaux**

### **Impact of the fractured reservoir on catchment response time: groundwater dating inputs**

**Virginie Vergnaud-Ayraud<sup>(1)</sup>, Luc Aquilina<sup>(1)</sup>, Thierry Labasque<sup>(1)</sup>, Ben Abbott<sup>(1)</sup>,  
Camille Vauthier<sup>(1)</sup>, Jean-Raynald de Dreuzy<sup>(1)</sup>, Tamara Kolbe<sup>(1)</sup>, Zahra Thomas<sup>(2)</sup>,  
Laurent Ruiz<sup>(2)</sup>, Gilles Pinay<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Observatoire de Rennes, Université Rennes1-CNRS

<sup>(2)</sup> Agrocampus, Rennes

Contact : [Luc.aquilina@univ-rennes1.fr](mailto:Luc.aquilina@univ-rennes1.fr)

Les milieux fracturés sont caractérisés par une forte compartimentation déjà bien documentée. Si la partie altérée proche de la surface est la partie la plus exploitée, la partie fracturée plus profonde est moins bien connue. En particulier, son rôle dans les écoulements de surface reste méconnu. En conséquence, le temps de réponse des bassins versants en milieu fracturé ne peut être décrit simplement par un temps moyen, la compartimentation générant une distribution des temps de résidence ; D'un bassin à l'autre, pour un temps de résidence moyen équivalent, une distribution différente va pourtant engendrer des dynamiques assez différentes. Ce point est particulièrement important pour analyser l'impact de mesures visant à faire évoluer les pratiques de surface (mesure agri-environnementales ou mise en place d'un périmètre de captage par exemple). L'analyse des gaz dissous et les mesures de « datation » des eaux qui en découlent permettent de mieux appréhender la dynamique globale des réponses des bassins versants et en particulier le rôle des compartiments profonds.

## **I. METHODOLOGIE**

### **I. 1 CFC et SF<sub>6</sub>**

L'estimation des temps de résidence des eaux souterraines peut être obtenue sur les 60 dernières années par analyse des CFC (Chlorofluorocarbones) et du SF<sub>6</sub> (hexafluorure de soufre). Le principe repose sur l'équilibre chimique des eaux souterraines lors de la recharge avec l'atmosphère, ce qui permet l'enregistrement par les eaux souterraines des concentrations atmosphériques de ces gaz anthropiques. L'analyse en GC-ECD (chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur d'électron) permet de quantifier les traces (pmoles par litres) de ces composés dans les eaux de façon à pouvoir recalculer les concentrations atmosphériques d'équilibre et les comparer ensuite aux chroniques atmosphériques (Ayraud, 2006, Busemberg et Plummer 1992). Cette comparaison permet dans un premier temps d'obtenir un « âge apparent » qui implique une circulation sans mélange (circulation piston assimilable à un comportement captif). Une bonne connaissance du milieu hydrogéologique permet ensuite de raffiner cette estimation en termes de distribution d'âges (mélanges de lignes d'eau de temps de résidence différents) plus proche de la réalité et de la complexité des circulations des eaux souterraines.

## I. 2 Autres gaz dissous

D'autres gaz dissous sont des indicateurs hydrogéologiques de premier ordre. A partir d'analyse en microchromatographie en phase gazeuse un certain nombre de gaz dissous peuvent être analysés sur des échantillons d'eau souterraine. Parmi eux le néon et l'argon permettent de déterminer les températures de recharge c'est à dire la température à laquelle l'eau s'est infiltrée et équilibrée dans le milieu souterrain. La concentration en gaz dans ces eaux d'infiltration est conditionnée par la loi de solubilité dans laquelle la température et la pression (altitude) sont des facteurs déterminants. Le néon et l'argon ne sont pas influencés par des processus biologiques et ont des concentrations stables dans le temps. Leurs concentrations constituent un géothermomètre qui permet d'identifier des eaux qui se sont rechargées à des températures moyennes différentes de celles observées sur le site (paleo-recharge, recharge en altitude..). Cette utilisation a permis par exemple de caractériser des recharges lors du dernier glaciaire ().

Les gaz dits « réactifs » :  $N_2O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  sont des gaz très liés aux processus biogéochimiques. Ils sont de bons indicateurs des processus d'oxydo-réduction qui existent dans le milieu souterrain et de leur évolution. Ils peuvent mettre en évidence le développement de conditions très réductrices (présence de méthane) ou d'identifier des processus biogéochimiques comme la dénitrification via la production de  $N_2O$  ou de  $N_2$  (Ayraud et al., 2006). D'autres gaz comme l'hélium ou le radon sont liés à la production depuis la roche. Alors que l'hélium caractérise des temps de production très importants, le radon avec sa demi-vie courte (3.8 jours) et sa source fortement liée aux roches cristalline, est souvent un bon indicateur de la contribution de la partie cristalline connectée et circulante (Cook, Lamontagne, Berhane, & Clark, 2006).

## II. COMPARTIMENTATION DES AQUIFERES DE SOCLE ET TEMPS DE RESIDENCE A L'ECHELLE REGIONALE

### II. 1 Compartimentation géologique et temps de résidence

Classiquement les aquifères de socles sont divisés en trois zones : les altérites, le compartiment fissuré/fracturé et la roche saine. Entre les altérites et la zone fissurée/fracturée une zone intermédiaire appelée zone de transition est parfois identifiée (Ayraud et al., 2008). Au niveau hydrogéologique, les deux premiers compartiments sont à ce jour intensément étudiés et documentés. Les propriétés générales de ces deux compartiments peuvent être fortement modifiées par la présence de structures géologiques comme les failles ou les discordances entre deux roches pouvant agir comme de véritables drains ou au contraire comme des barrières (Bense & Person, 2006; Caine, Evans, & Forster, 1996; Roques et al., 2014).

Les études réalisées à l'échelle du massif Armoricaïn (Ayraud et al., 2008) montrent que l'« âge » apparent CFC de l'eau (ou son temps de résidence) est fortement dépendant du compartiment géologique concerné (figure 1). Ainsi dans la zone altérée en dehors des zones de recharges où les eaux sont récentes (0-5 ans), les âges moyens apparents s'échelonnent de 10 à 25 ans indiquant des vitesses assez faibles de 0.4 à 1.25 m/an dans ce compartiment ce qui est cohérent avec la texture plutôt argileuse et les perméabilités faibles rencontrées dans cette zone. Plus en profondeur le temps de résidence moyen augmente de manière significative avec la profondeur. Les vitesses observées peuvent atteindre 1,5 à 3 m par an et certaines des eaux échantillonnées ont des temps de résidence apparent supérieurs à 50 ans. On peut également noter que les circulations sont fortement perturbées par l'exploitation pour l'eau potable (ici l'exemple du site de Ploemeur, 1 million de  $m^3$ /an) (Leray et al., 2014). Ce point reste néanmoins à documenter par le suivi d'autres exemples.

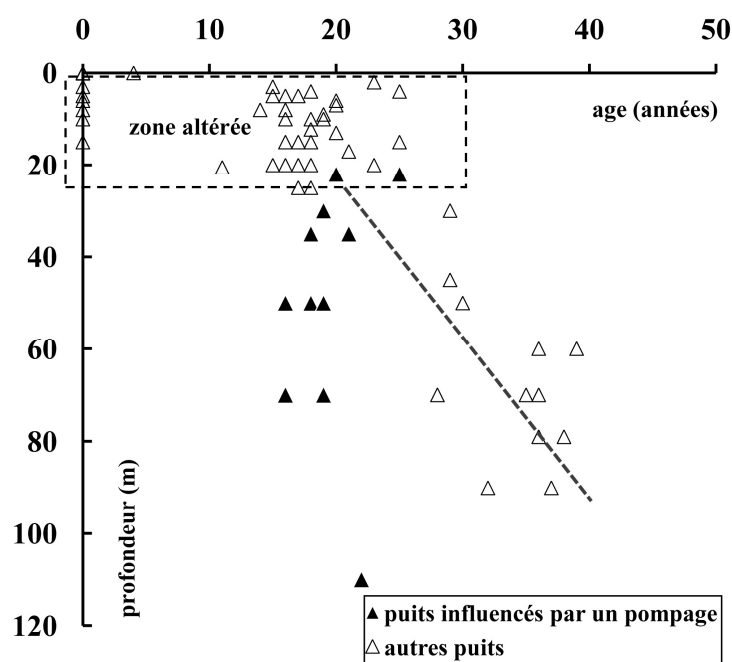


Figure 1– Evolution des âges apparents CFC dans le massif Armoricaïn  
(Vergnaud –Ayraud et al, 2008)

## II. 2 Historique des concentrations en nitrates

### II.2.a – Reconstitution des concentrations en nitrates dans les eaux de la recharge

Les concentrations en nitrates dans les eaux de recharge ont été reconstruites à partir des âges apparents des eaux souterraines étudiées à l'échelle du massif Armoricaïn. En effet on peut en premier abord considérer que une fois la zone non saturée traversée, les nitrates ne présentent pas de facteurs de retard significatif par rapport à l'eau (au contraire des pesticides). Les eaux dans lesquelles une dénitrification était suspectée ont été écartées. Cette reconstitution (figure 2b) montre une augmentation forte des concentrations en nitrates entre les années 1970 et 1990 cohérentes avec l'évolution des pratiques agricoles et l'utilisation de fertilisants minéraux (Aquilina et al., 2012). Cette chronique a ensuite permis de caractériser la dynamique des compartiments des eaux souterraines (bas ADES) qui ont été séparés en trois compartiments : (1) valeurs maximales assimilées à la partie superficielle de la nappe et à des transferts très rapides (inférieurs à quelques années), (2) valeurs moyennes du compartiment altéré, et (3) valeurs moyennes du compartiment fracturé profond (figure 2a).

### II.2.b – Historique des concentrations dans la Vilaine

Pour comparer les chroniques des concentrations en nitrate des eaux de surface avec la courbe reconstruite des concentrations dans la recharge, on s'est focalisé sur la rivière Vilaine qui représente plus d'1/3 de la surface de la Bretagne (10 400 km<sup>2</sup>). Les données utilisées proviennent de la base du ministère de l'écologie qui relève mensuellement 52 stations à l'échelle de la Bretagne. Les données utilisées sont celles de l'exutoire de la Vilaine juste avant le barrage d'Arzal. De cette chronique mensuelle existant depuis 1971 ont été calculé la moyenne annuelle, le maximum hivernal (proche du 90<sup>ème</sup> percentile) et la moyenne annuelle estivale (avril à octobre). Toutes ces données ont été lissées sur 3 ans.

### II. 3 Contribution du compartiment profond

On observe (figure 2b) que le pic des concentrations maximales en rivière est quasi contemporain du pic de concentration des nitrates dans les eaux de la recharge mais à un niveau de concentration quasiment deux fois plus faible (50 mg/L dans la Vilaine pour 80 à 100 mg/L dans les eaux de recharge). L'étude plus détaillée (voir Aquilina et al, 2012 pour plus de détails) permet d'estimer que le réservoir principal alimentant la rivière en hiver est un réservoir superficiel à temps de transfert très rapide (inférieur à quelques années) de 60 à 65% en hiver (20 à 25% en période estivale.). Cependant, le réservoir fracturé plus profond et à temps de résidence plus long (>25 ans) contribue également de manière importante à hauteur de 25 à 40% en hiver. Durant l'été, la contribution rapide diminue à 20 à 25% mais la contribution des eaux souterraines profondes et anciennes reste élevée à 30 à 60%.

D'après ce jeu de données il apparaît que l'enjeu de l'amélioration des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines se joue à deux niveaux. D'une part, les maxima hivernaux qui peuvent répercuter rapidement une diminution de pression anthropique, ce qu'on observe depuis les années 90. D'autre part et à l'inverse, les eaux souterraines profondes et relativement anciennes qui sont actuellement de bonne qualité car rechargées avant 1980 mais dont les concentrations en nitrates pourraient augmenter lentement si aucun processus biogéochimique n'a un impact suffisant sans qu'on puisse réellement limiter cette augmentation.

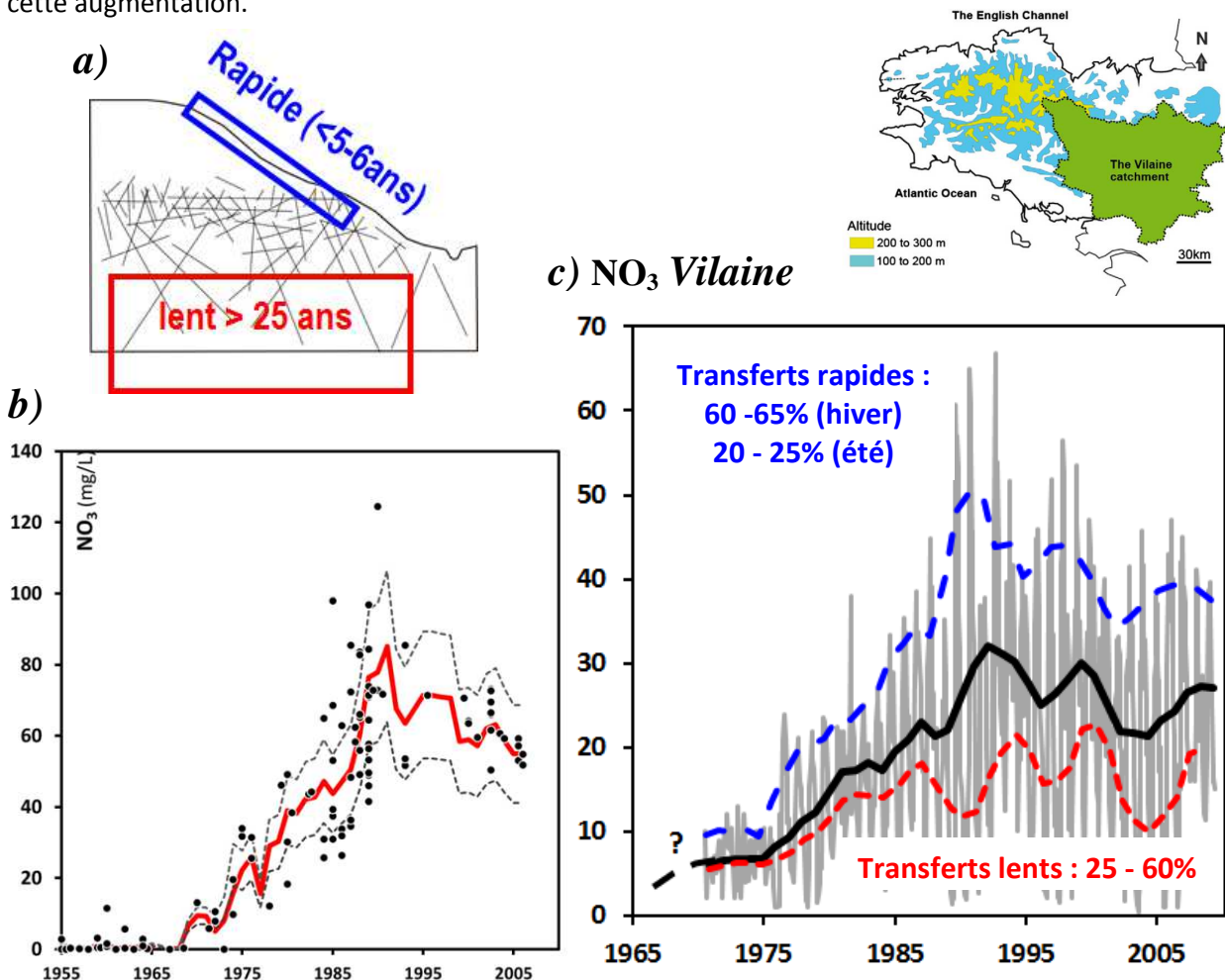


Figure 2 – a) schéma conceptuel simple des temps de résidence dans les aquifères de socle. b) Reconstitution des concentrations en nitrate dans les eaux de la recharge. c) Evolution des concentrations en nitrate dans la Vilaine (d'après Aquilina et al, 2012)

### III. APPLICATION A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT

#### III. 1 Distribution des temps de résidence à l'échelle du BV

Le bassin versant étudié se situe à 10 km au Sud du Mont Saint Michel, sur le territoire des communes de Pleine-Fougères, Vieux-Viel et Trans-La-Forêt. Il fait partie d'un site d'observation du CNRS (Zone Atelier Armorique). D'une superficie d'environ 35 km<sup>2</sup>, il est parcouru par trois rivières principales, qui confluent en bas de bassin versant et se jettent finalement dans le Couesnon. Du Nord au Sud, la lithologie est contrastée, ce qui est à l'origine d'une discontinuité dans la topographie en milieu de bassin : le pluton granitique au Sud du bassin est à 100 m d'altitude, alors que les schistes de la partie nord sont à seulement 20 m d'altitude. Entre les deux, au niveau de la zone de contact avec le pluton, des cornéennes forment un talus d'environ 10 % d'inclinaison. Afin de comprendre les circulations hydrologiques globales, des prélèvements d'eau sont réalisés dans neuf puits répartis sur l'ensemble du bassin, et atteignant des profondeurs de 9 à 84 m.

Au sein du bassin versant, on peut distinguer trois catégories d'âges apparents : des eaux anciennes (avant 1956), des eaux récentes (postérieures à 1990) et des âges apparents compris entre 1971 et 1988 qui peuvent impliquer soit une très forte proportion d'eau d'un âge proche de l'âge apparent (situation proche du modèle piston), soit un mélange d'eaux d'âges très différents. La distribution spatiale des âges apparents estimés dans le bassin versant permet d'envisager un modèle de circulation profonde Sud-Nord impliquant trois boucles principales (figure 3).

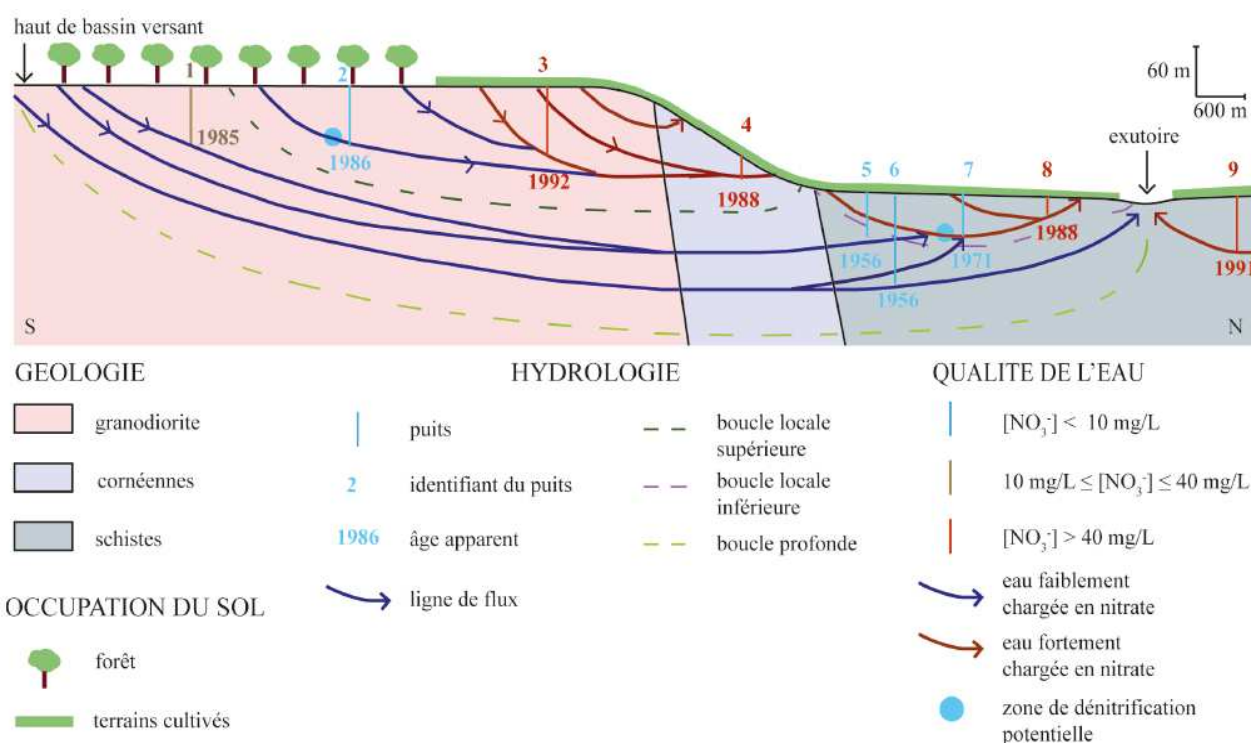
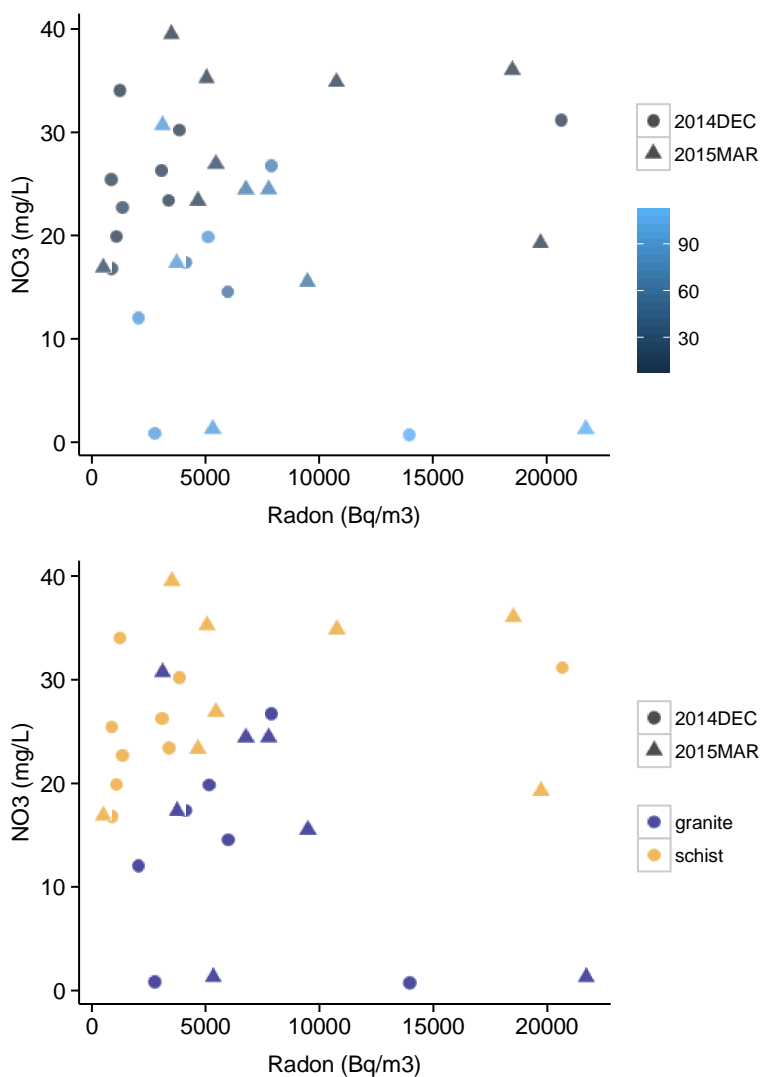


Figure 3 – Schéma conceptuel de fonctionnement du bassin versant de Pleine-Fougères (35)

### III. 2 Influence sur l'exutoire

La zone d'exutoire (partie aval de la figure 2) est constituée d'une rivière longée par une zone humide qui a fait l'objet de travaux pour caractériser le potentiel de dénitrification. L'analyse hydrochimique du site a montré la présence d'eaux profondes, très peu anthropisées (faibles concentrations en chlorures, absence de nitrate). Un bilan a permis de mettre en évidence une part de l'ordre de 30% de la partie profonde (Clement et al., 2003), ce qui est cohérent avec les résultats de l'étude à l'échelle régionale. Ce résultat est également cohérent avec le schéma de circulation issu des résultats de datation.



Un suivi couplé des concentrations en nitrate et en radon dissous mené dans le cadre d'un projet européen montre que les deux domaines géologiques et morphologiques du bassin versant peuvent être clairement identifiés.

Les zones granitiques, plus hautes en altitude sont marquées par des concentrations en radon plus fortes. A l'inverse, la partie schisteuse plus basse en altitude présente des concentrations en radon plus faibles mais qui restent très élevées et témoignent d'apports souterrains importants. Leur quantification reste à mener après une calibration d'une part des concentrations en radon des eaux souterraines et d'autre part du dégazage des rivières du bassin versant.

Figure 3– Concentrations en radon et en nitrate dans les rivières de Pleine-Fougères

### IV. Conclusion

Alors que les analyses chimiques sont courantes dans les études d'hydrogéologie, l'analyse des gaz dissous reste plus limitée. Les exemples donnés ici mettent en évidence le large potentiel de cet outil. Outre la détermination des temps de résidence, les températures de recharge et la réactivité biologique peuvent être caractérisés et apporter des informations sur le fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique des aquifères de socle.

## Références

- Aquilina, L., Vergnaud-Ayraud, V., Labasque, T., Bour, O., Molénat, J., Ruiz, L., ... Longuevergne, L. (2012). Nitrate dynamics in agricultural catchments deduced from groundwater dating and long-term nitrate monitoring in surface- and groundwaters. *The Science of the Total Environment*, 435-436, 167–78. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.028
- Ayraud, V., Aquilina, L., Labasque, T., Pauwels, H., Molenat, J., Pierson-Wickmann, A. C., ... Davy, P. (2008). Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. *Applied Geochemistry*, 23(9), 2686–2707. Retrieved from <Go to ISI>://000259930500013
- 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.
- Bense, V. F., & Person, M. A. (2006). Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers. *Water Resources Research*, 42(5). doi:10.1029/2005WR004480
- Caine, J. S., Evans, J. P., & Forster, C. B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025–1028. doi:10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2
- Clement, J. C., Aquilina, L., Bour, O., Plaine, K., Burt, T. P., & Pinay, G. (2003). Hydrological flowpaths and nitrate removal rates within a riparian floodplain along a fourth-order stream in Brittany (France). *Hydrological Processes*, 17(6), 1177–1195. Retrieved from <Go to ISI>://000182240300008
- Cook, P. G., Lamontagne, S., Berhane, D., & Clark, J. F. (2006). Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, southeastern Australia, using dissolved gas tracers Rn-222 and SF6. *Water Resources Research*, 42(10), n/a–n/a. doi:W10411 10.1029/2006wr004921
- Leray, S., de Dreuzy, J.-R., Aquilina, L., Vergnaud-Ayraud, V., Labasque, T., Bour, O., & Le Borgne, T. (2014). Temporal evolution of age data under transient pumping conditions. *Journal of Hydrology*, 511, 555–566. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.01.064
- Roques, C., Bour, O., Aquilina, L., Dewandel, B., Leray, S., Schroetter, J. M., ... Mougin, B. (2014). Hydrological behavior of a deep sub-vertical fault in crystalline basement and relationships with surrounding reservoirs. *Journal of Hydrology*, 509, 42–54. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.11.023
- Vergnaud-Ayraud, V., Aquilina, L., Pauwels, H., & Labasque, T. (2008). La datation des eaux souterraines par analyse des CFC : un outil de gestion durable de la ressource en eau. *TSM. Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural*, 1, 37-44.