

CASPAR : Caractérisation des Aquifères Semi-Profonds ARmoricaains

Bulletin d'information annuel Projet CASPAR N° 3



Sommaire :

- Les eaux souterraines dans les roches de socle
- Les objectifs de CASPAR
- Caractérisation détaillée
- Modélisations
- Qu'avons-nous appris de plus ?



Établissement public du ministère chargé du développement durable



Les eaux souterraines dans les roches de socle

- Rappel du contexte du projet

Les régions de socle (granite et roches métamorphiques) sont caractérisées en général par de modestes ressources en eau souterraine circonscrites à la sub-surface au sein du profil d'altération, soit dans les 60 à 100 premiers mètres. Les débits des forages y sont relativement faibles, quelques m³/h en moyenne.

Cependant, au cours des 15 à 20 dernières années, quelques forages profonds, jusqu'à 300 m, ont été réalisés en Bretagne. Certains d'entre eux, comme ceux du projet RAPSODI*, ont rencontré des structures perméables significatives avec des débits supérieurs à 80 m³/h très en dessous des horizons de sub-surface classiquement exploités. L'objectif du projet CASPAR est de préciser la nature de ces zones productives profondes, d'identifier leurs relations avec les eaux souterraines de surface et leur fonctionnement.

Le projet CASPAR porte sur les questions que posent les aquifères « profonds » dans les forma-

tions de socle, et s'inscrit dans une collaboration entre le BRGM et l'Observatoire des Sciences de l'Université de Rennes (OSUR) sur la caractérisation plus générale de ces milieux complexes (projets GEOFRAC & C I N E R G Y, thèses de doctorat sur ces systèmes aquifères, etc.).

CASPAR crée une dynamique autour de questions scientifiques impliquant, outre le BRGM et l'OSUR, des équipes de chercheurs de l'Université du Mans, l'Université de Brest et de l'Université Paris VI (SYSIPHE).

* Recherche d'Aquifères Profonds dans le Socle du Départ. de l'Ille-et-Vilaine. Projet financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, la Région Bretagne, le départ. de l'Ille-et-Vilaine, le SMG35 et le BRGM.

Les objectifs du projet CASPAR

Les objectifs et questions scientifiques de CASPAR sont:

- de caractériser la nature, l'origine, la géométrie et les propriétés de ces structures perméables profondes. Dans le cas de CASPAR il s'agit d'une structure sub-verticale,
- de préciser leur rôle sur les écoulements des eaux souterraines et leur capacité à « déclencher » des réactions chimiques,
- d'identifier les connexions entre aquifères de sub-surface et profonds,
- et de contribuer à déterminer si ces structures sont favorables vis-à-vis d'une exploitation durable tant d'un point quantitatif que qualitatif.

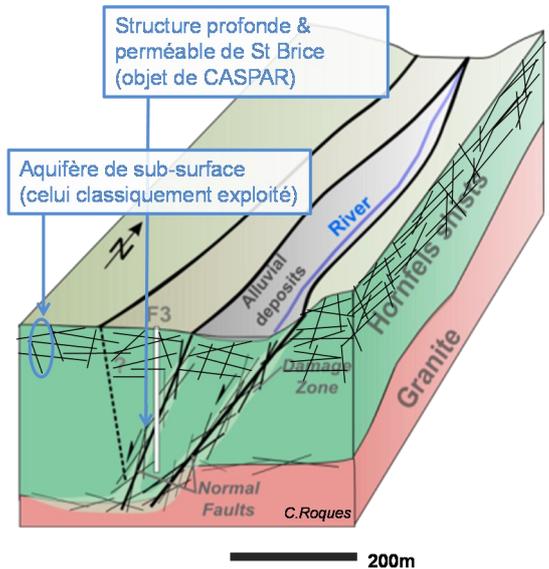


Schéma géologique du site de Saint Brice-en-Coglès, site étudié en détail dans CASPAR

Editorial

Le projet CASPAR a démarré début 2010. Au cours de cette troisième année de projet, d'autres expérimentations de terrain ont été réalisées notamment sur le site de St Brice: pompages, mesures physiques en forage, expérimentations géophysiques, prélèvements pour la chimie des eaux, etc. Mais ce sont surtout les premières modélisations géochimiques et hydrodynamiques qui ont permis d'améliorer le schéma conceptuel du fonctionnement de cet aquifère profond et de discuter de son éventuelle exploitation et de sa protection.

Plusieurs réunions entre l'OSUR et le BRGM ont eu lieu ainsi qu'une réunion d'avancement à Rennes en février dernier avec les partenaires du projet qui ont permis de présenter ces nouveaux résultats scientifiques.

Bonne lecture,

B. Dewandel & L. Aquilina



Projet cofinancé par l'Union Européenne. L'Europe s'engage avec le Fonds européen de développement régional.



Animation du projet

Plusieurs réunions ont eu lieu entre le BRGM et l'OSUR afin de discuter de l'avancement et des résultats scientifiques du projet, et des dernières expérimentations réalisées sur le site de Saint Brice-en-Coglès.

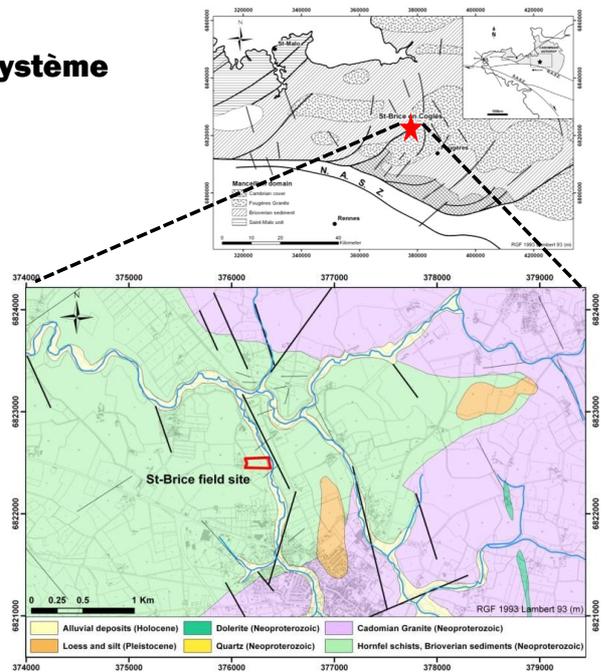
Une réunion d'avancement du projet s'est tenue à Rennes le 12 février 2013. Cette troisième réunion d'inter-visibilité entre les partenaires scientifiques et les co-financeurs du projet, a eu pour but de présenter les dernières réalisations faites depuis l'année dernière ainsi que les résultats majeurs. Un point sur les conventions a aussi été fait.

Tâches 1 à 4 : Caractérisation de la structure de l'aquifère « semi-profond » et de l'état naturel du système

Ces tâches sont aujourd'hui achevées. Elles se sont concrétisées par la réalisation de mesures géophysiques, géologiques, géochimiques et hydrogéologiques pour caractériser en détail la structure perméable sub-verticale du site de Saint Brice en Coglès. Trois forages de reconnaissance, dont un carotté de 250 m, ont été réalisés sur ce site ainsi qu'une série de sondages à la tarière (8) afin d'affiner la qualité des observations sur l'aquifère superficiel. Les autres sites -la Chapelle Janson et Liffré- représentatifs de l'horizon d'altération classique ont fait l'objet d'une acquisition de mesures moins détaillée (géologie, prélèvements d'eau, mesures en forages).



Prélèvements géologiques: carottes du forage de 250 m de profondeur réalisé à St Brice.



Structure tectonique majeure du massif Armoricain et du site de St Brice.

D'un point de vue géologique, le site de St Brice se situe dans un contexte de failles tectoniques d'orientation environ Nord-Sud (N160) héritées d'accidents de deuxième ordre datant de l'Hercynien (les failles majeures étant de direction ESE-ONO). Ces structures N-S ont pu être réactivées au Cénozoïque (compression alpine, N150). Les failles normales confèrent une structure en graben d'orientation globale N-S au site ; cf. figures de droite et de la page précédente. De plus, l'en-

semble des formations géologiques du site (cornéennes et intrusions de granite) ont subi l'altération supergène développant un profil d'altération de 50 à 60 m d'épaisseur comprenant quelques mètres de saprolite (<10m) suivi d'environ 50 m de zone fissurée. Le site de St Brice est aussi l'exutoire naturel d'un système aquifère profond, cette faille sub-verticale a donc une réelle capacité à drainer des écoulements régionaux profonds.

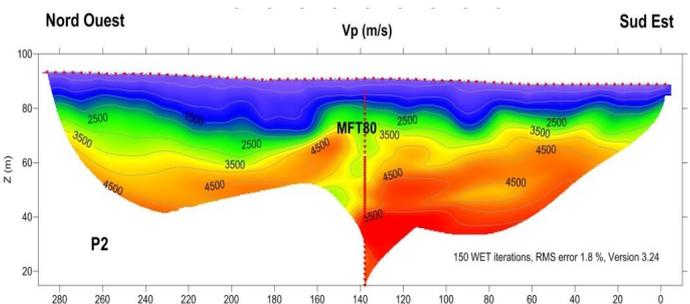
Tâche 5 : Caractérisation détaillée du site de Saint Brice-en-Coglès

Cette tâche 5 s'est achevée en 2012.

En 2011, elle fût concrétisée par la réalisation de tests par pompage sur le site de St Brice, dont un de 9 semaines au débit de 44 m³/h (forage F3) où seule la partie profonde de l'aquifère (tranche 83-217 m) a directement été sollicitée au moyen d'un « packer » gonflable. Nombreux relevés hydrogéologiques, diagraphiques (fluides, débit-métrie, etc.), géochimiques et isotopiques, datation des eaux, suivis géophysiques, etc., furent aussi réalisés.

En 2012, d'autres expérimentations non-prévues initialement ont été réalisées sur

le site afin de compléter l'information hydrogéologique (pompage sur MFT20 ; slug tests sur les tarières, tests hydrauliques à l'aide d'un débitmètre à impulsion de chaleur, essais de traçage), géochimique & datation (forages du site et divers points d'eau du bassin versant) et géophysique (gravimétrie, électrique, sis-



Mesures sismiques sur le site de St Brice: visualisation de la structure perméable (L. Longuevergne, en collaboration avec le projet GEOFRAC)

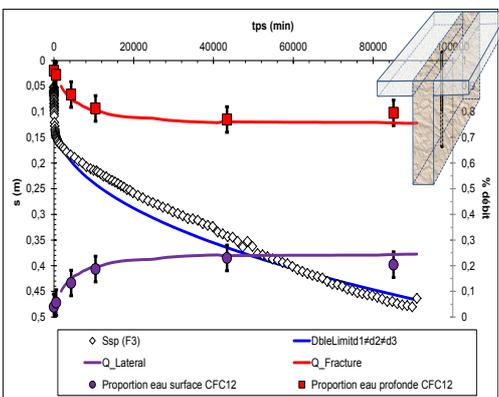
mique, EM34-31, radar, etc.) avec notamment pour cette dernière la participation de l'Université Paris VI (UMR 7619).

Tâche 6 : Interprétation des résultats

L'ensemble des données qui ont été acquises dans le cadre de CASPAR ont commencé à être interprétées et modélisées ce qui permet de préciser le fonctionnement de cette structure perméable sub-verticale et profonde.

Diagnostic, modélisation des essais, débit-métrie en forages, modélisation des traçages, profil de température, etc., sont autant d'informations qui permettent d'avoir accès à une description « physique » fine du site et des différents chemins d'eau.

Les tests par pompage ont été diagnostiqués - cette technique permet d'identifier les différents régimes d'écoulements pendant l'essai, puis modélisés.



Modélisation du rabattement et comparaison des flux calculés avec les datations CFC12 (pompage de 9 semaines sur le forage F3) ; aquifère en « T »

La modélisation des essais, notamment celle du pompage de longue durée, a été faite au moyen de modèles mathématiques classiques comme le modèle double porosité de Moench, et à l'aide d'un modèle numérique en régime permanent qui a permis d'estimer la contribution de la zone de faille pendant le pompage. De plus, le développement de nouveaux modèles mathématiques a été réalisé afin de modéliser les rabattements et les flux en milieux compartimentés : (1) aquifère rectangulaire surmonté d'un aquifère infini et (2) pompage au travers d'une structure verticale perméable drainant un aquifère de surface (aquifère en « T »). Ces derniers modèles ont notamment permis de comparer les flux en provenance des différents systèmes aquifères avec ceux estimés à partir de la géochimie (CFC12).

L'information amenée par la géochimie des eaux (majeurs, traces, datation – les isotopes sont en cours d'analyse) a permis de qualifier et quantifier les flux provenant des systèmes profonds et superficiels. Les datations montrent, en cohérence avec les tests hydrauliques, une connexion directe de la structure profonde avec les compartiments superficiels. Une contribution du compartiment de surface d'environ 25% dans les processus de mélange lors du pompage de 9 semaines a pu être estimée. Les essais de traçage ont également permis de confirmer et de quantifier la contribution des aquifères superficiels à la recharge du système.

Valorisation scientifique et communication (Tâche 6)

Le projet CASPAR commence à être reconnu et plusieurs actions de communication et de valorisation scientifique ont été réalisées :

- CASPAR est inclus dans le site Internet « SIGES Bretagne » <http://sigesbre.brgm.fr/CASPAR.html>

- « L'eau dans le sous-sol breton : une ressource importante à gérer et à protéger ». Festival des sciences (09/10/12); Mordelles (35)

« le site de Saint Brice est aussi un site d'enseignement »

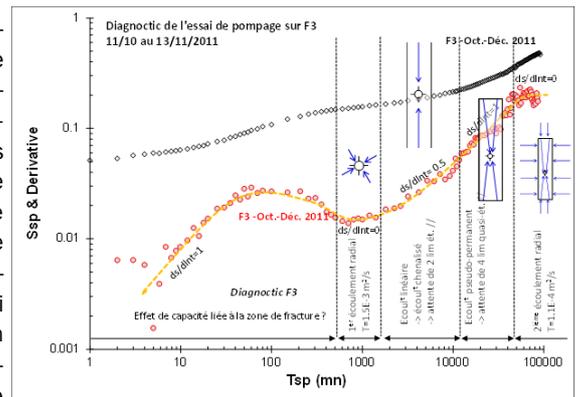
- 14^{ème} Carrefour des Gestions Locales de l'Eau, atelier « Eaux souterraines » 24/01/13, Bruz (35)

- Journées des doctorants (BRGM, 2012-2013; SDLM 2013)

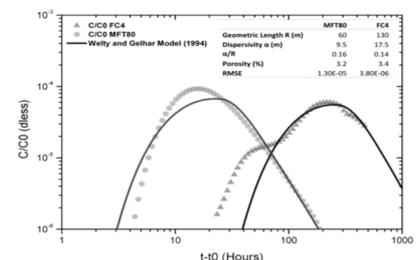
- Réunion d'avancement du projet et d'inter-visibilité avec les cofinanceurs, 12/02/2013

- Soutenance de thèse mi-parcours (C.Roques), soutenance finale est prévue en Oct.- Nov.2013

- Enseignement universitaire sur le site de Saint Brice (Géosciences, Rennes, Paris VI, etc.) : hydrogéologie de socle et de méthodes de



Diagnostic de l'essai par pompage de 9 semaines (St Brice forage F3): mise en évidence de la géométrie du système et de la connexion avec l'aquifère de sub-surface.



Modélisation des essais par traçage



Dispositif expérimental mis en place pour le suivi des traçages

prospection et d'imagerie géophysiques

- 3 publications communes dans les revues internationales *Journal of Hydrology* (Roques et al.), et *Hydrological Processes* (Dewandel et al.) sont en cours,

- et trois participation à congrès en 2012 (Roques et al.).

Cette tâche se poursuivra jusqu'à la fin du projet.



CASPAR est soutenu par :

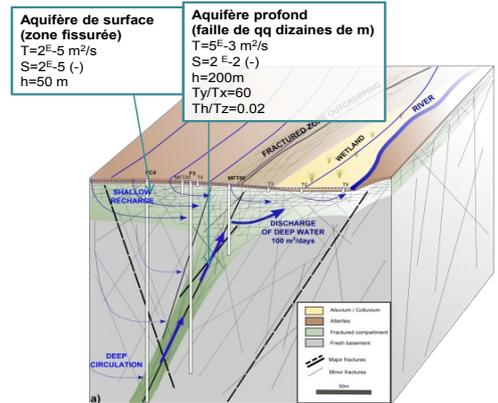


Résultats majeurs : qu'avons-nous appris de plus ?

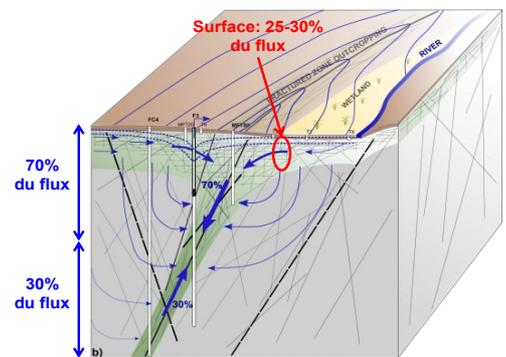
Le site de St Brice est implanté à l'aplomb d'un de ces accidents géologiques profonds du massif armoricain. Tout porte donc à croire que les propriétés hydrodynamiques, et notamment de débit, de cette structure sub-verticale profonde ne sont pas rares en Bretagne et dans les autres régions de socle. L'origine de cette zone de failles d'orientation N160 provient de l'héritage géologique Hercynien éventuellement réactivée au Cénozoïque. Un profil d'altération, épais d'environ 50-60 m s'est développé en surface –c'est l'aquifère superficiel-, mais s'est aussi enfoncé le long de cette structure perméable ce qui a très certainement magnifié ses propriétés hydrogéologiques.

Le site de St Brice est aussi l'exutoire naturel d'un système profond faisant remonter en surface des fluides anciens (env. 100 m³/j) via ces structures géologiques profondément enracinées (granite, failles). Cette structure profonde a donc une réelle capacité à drainer des écoulements régionaux profonds sur de grandes échelles de temps.

Les paramètres hydrodynamiques des différents aquifères ont aussi pu être estimées grâce à la modélisation des tests hydrauliques.



Structure des flux d'eau souterraine en écoulement naturel



Structure des flux d'eau souterraine en pompage

En pompage, le flux pompé est alimenté d'une part par l'aquifère fissuré-altéré de surface (tranche 0 – 60 m de profondeur) - c'est celui classiquement exploité en Bretagne- et d'autre part, par la partie profonde (>200 m). Les modélisations montrent qu'environ 70% du flux pompé transite via les 110 premiers mètres de la faille sub-verticale, le reste provenant de la faille profonde. La chimie des eaux montre une nette évolution vers le pôle des eaux de surface pendant le pompage associée à une forte réactivité du milieu (dénitrification). Puis pour les temps longs du pompage à un retour vers une signature proche de la signature profonde indiquant une contribution prépondérante des écoulements régionaux (compartiments latéraux a priori). En pompage, la structure profonde agit donc comme un axe drainant et alimenté par l'aquifère de surface et dans une moindre mesure par les compartiments latéraux.

En conclusion, les expérimentations ont permis de décrire remarquablement bien le fonctionnement hydrologique de ce système de failles, en quantifiant les apports des systèmes de surface et profond pendant le pompage, ce qui n'avait pas été réalisé ailleurs jusqu'à présent. Ces connexions étant mises en évidence, se pose donc la question de la pérennité de la ressource en cas d'exploitation. Question débit, un sur-pompage entraînera un abaissement du niveau d'eau dans les aquifères de surface, avec potentiellement à l'étiage une diminution – sans doute modeste- de la contribution de ce système de surface au débit d'étiage du cours d'eau.

Perspectives pour 2013, et après ?

Ces nouvelles expériences et modélisations apportent de nouvelles connaissances sur ces aquifères profonds et les prochains résultats de cette dernière année de projet devraient en amener d'autres notamment sur les processus géochimiques et les échanges entre aquifères profond et superficiel.

CASPAR et après ? Le site de St Brice est exceptionnel en raison de l'ampleur des données qui ont été acquises dans diverses disciplines des sciences de la terre (hydrogéologie, géophysique, géochimie, géologie, etc.), et parce qu'il est idéal pour étudier un cas type de faille sub-verticale, contexte qui peut être fréquemment rencontré en domaine cristallin. De plus, il est très

utilisé pour l'enseignement universitaire. Il apparaît donc important d'assurer la pérennité scientifique de ce site. Un nouveau programme CASPAR II alliant hydro-géophysique, hydro-géologie et aussi un aspect formation-communication pourrait voir prochainement le jour.

Pour plus d'informations

Benoît Dewandel
BRGM D3E/NRE
1039 rue de Pinville
34 000 Montpellier
Tél. : 04.67.15.79.82
b.dewandel@brgm.fr

Luc Aquilina
OSUR- Géosciences Rennes Univ.1
Av. du Général Leclercq
35 0424 Rennes
Tél. : 02.23.23.67.79
luc.aquilina@univ-rennes1.fr