

Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France). Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés

Fabrice Rey¹, Joëlle Riss², Frédéric Huneau² et Frédéric Prétou¹.

Introduction

Le département des Pyrénées-Atlantiques est un département privilégié au regard de la quantité de ses ressources en eau souterraine (et superficielle) disponibles. Les massifs pyrénéens bordant le sud du département, constituent en effet une réserve en eau qui, à une certaine échelle et dans le contexte climatique actuel, peut être considérée comme une ressource stratégique car abondante et de qualité. Dans le département, plusieurs systèmes aquifères sont déjà exploités, certains renfermant des quantités d'eau très importantes. Parmi ces ressources, celles des chaînons béarnais font d'ores et déjà l'objet de prélèvements par le biais d'une quinzaine de captages ; cinq d'entre elles fournissent 10 % de l'eau potable du département. Les chaînons béarnais, au nombre de trois, sont constitués de terrains aquifères karstiques ou fissurés de nature calcaire et/ou dolomitique du Mésozoïque (Fig. 1). Les réservoirs peuvent présenter une forte vulnérabilité aux pollutions de surface qu'il faut pouvoir caractériser avant d'envisager d'amplifier l'exploitation des ressources (particulièrement pour l'alimentation en eau potable). Par ailleurs, la complexité géologique des chaînons et l'intense karstification des calcaires rendent difficile l'obligatoire – au regard de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 – et nécessaire délimitation des bassins versants d'alimentation des sources et, par conséquent, leur protection. Cette nécessité s'est illustrée, il y a peu de temps, à l'occasion de la pollution accidentelle de l'une des sources des chaînons et cela en raison d'une définition incomplète et non actualisée de son périmètre de protection.

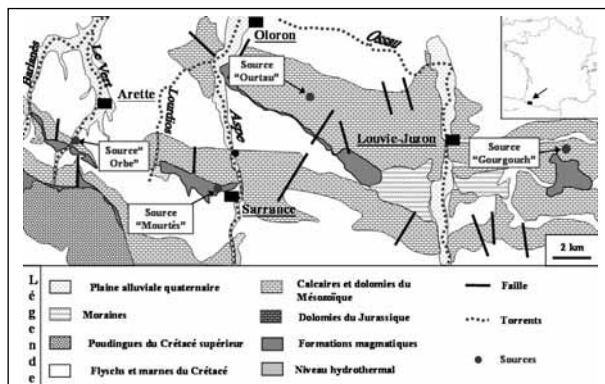


Figure 1. Cadre géologique de l'étude.

L'esprit de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 qui avait prévu l'instauration de périmètres de protection autour des captages d'eau potable a été repris et prolongé par les directives européennes (WFD 2000/60/CE et NDC/2006/118/EC) qui demandent, en particulier, aux États membres d'atteindre d'ici à 2015 le bon état chimique et quantitatif des ressources en eaux. C'est dans ce contexte que, en partenariat avec le Conseil régional d'Aquitaine, le Conseil général des Pyrénées-Atlantiques et l'Agence de l'eau Adour-Garonne, l'Université Bordeaux 1 et le cabinet CETRA³ ont mené une étude des ressources en eau dans les chaînons béarnais en choisissant quatre de leurs sources.

Approche pluridisciplinaire : méthode durable pour les ressources en eau

Les quatre sources émergent de l'un ou l'autre des trois chaînons (Fig. 1) : ce sont les sources de l'Ourltau et Gourgouch (premier chaînon), des Mourtès (deuxième chaînon) et de la Fontaine d'Orbe (troisième chaînon). Trois des quatre sources (Ourltau, Mourtès et Orbe) sont utilisées pour l'alimentation en eau potable de communes plus ou moins importantes : Oloron-Sainte-Marie, sous-préfecture du département (plus de 10 000 habitants), Sarrance (300 habitants) et Arette (1 500 habitants). L'eau de la source Gourgouch approvisionnait, quant à elle, une salmoniculture jusqu'à sa fermeture en 2006. La source de la Fontaine d'Orbe a été, en 2002 et 2003, l'objet de recherches approfondies et le lieu de nombreuses expérimentations (Rey, 2003). Les résultats obtenus lors de cette première phase ont été, depuis, complétés par de nouveaux travaux (Rey, 2007).

L'étude des quatre systèmes hydrogéologiques, donnant naissance à ces sources, a été réalisée grâce à une approche pluridisciplinaire, utilisant des méthodes aussi variées que complémentaires. De nombreuses campagnes de géologie de terrain ont tout d'abord été entreprises. Elles ont permis de mesurer de manière systématique la fracturation des massifs carbonatés et de cartographier chaque site afin d'en déduire la structure et l'organisation spatiale. Ces levés de terrain ont été complétés par la réalisation d'une trentaine de panneaux électriques dont les dispositifs de mesure ont été adaptés

1. Cabinet CETRA, 12 rue de l'Artisanat - 64110 Laroin

2. GHYMAC, Université Bordeaux 1, Avenue des facultés - 33405 Talence Cedex

3. Cabinet d'études techniques, rurales et agricoles.

aux hétérogénéités du sous-sol (dispositif en dipôle-dipôle ou pôle-pôle et variation de l'espace inter-électrode). Enfin, les paramètres physico-chimiques (conductivité, température, pH, débit et ions majeurs) des eaux ont été mesurés de manière hebdomadaire durant deux cycles hydrologiques complets (2004-2005 et 2005-2006). En parallèle, des sondes de mesure multi-paramètres (Hydro-Lab MS5) ainsi que des pluviomètres automatiques (OTT) ont été installés sur les différents sites. La conductivité, la température, le pH, la turbidité et la pluviométrie ont ainsi été enregistrés à un pas de temps horaire durant plus d'une année. L'application des méthodes de la cartographie, de l'auscultation géophysique, de l'analyse structurale, le suivi hydrochimique et, ce qui est parfois oublié mais essentiel, l'observation naturaliste, sont à la base d'un ensemble de données qualitatives et quantitatives pour l'étude duquel les auteurs ont eu recours aux méthodes de l'analyse statistique et de l'analyse des données.

Les objectifs ont visé à une compréhension actualisée du fonctionnement hydrogéologique des aquifères des chaînons béarnais afin d'optimiser, de sécuriser et de pérenniser leur exploitation eu égard à leur importance stratégique pour l'alimentation en eau potable des Pyrénées-Atlantiques. L'approche pluridisciplinaire mise en œuvre et appliquée à l'étude des quatre sources (la Fontaine d'Orbe, l'Ourtau, les Mourtès et Gourgouch) est présentée ci-dessous : elle comprend la description de l'évolution du contexte climatique régional qui influence la recharge des ressources en eau souterraine, l'étude de la géométrie (dépendante de la structure géologique) et le fonctionnement hydrodynamique des aquifères carbonatés locaux.

Évolution climatique dans les chaînons béarnais

L'évolution climatique à l'échelle du globe est un sujet particulièrement sensible à l'heure actuelle. La hausse des températures, largement constatée à l'échelle du globe (GIEC4, 2007), a et aura de nombreuses conséquences directes ou indirectes sur l'environnement qu'il soit considéré comme naturel ou déjà anthropisé. Dans la région des chaînons béarnais, l'étude statistique de l'évolution des paramètres climatiques telles que les précipitations, la température et l'évapotranspiration potentielle a montré des tendances tout à fait comparables à celles observées à l'échelle mondiale.

Il existe en effet, depuis la seconde moitié du XX^e siècle, une tendance à la hausse, très hautement significative d'un point de vue statistique, des températures atmosphériques moyennes annuelles aux stations météorologiques de Pau-Uzein, d'Oloron-Sainte-Marie et

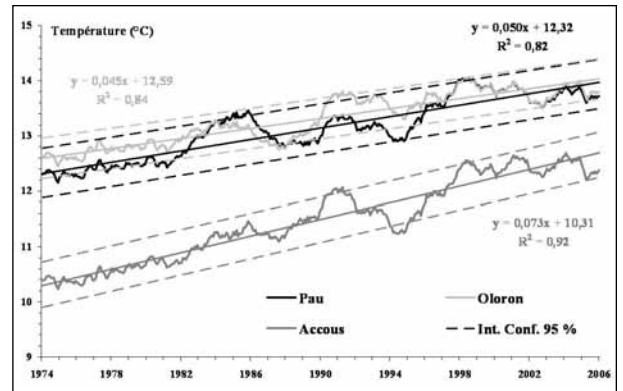


Figure 2. Évolution de la température atmosphérique moyenne depuis 1974 dans la région des chaînons béarnais.

d'Accous, stations qui encadrent les chaînons béarnais. Elles augmentent de 0,03 °C/an (valeur estimée pour chacune des trois stations) au cours des cinquante dernières années (soit + 1,5 °C) et de 0,06 °C/an pour la période 1974-2006 (soit + 1,8 °C, Fig. 2), ce qui montre une accentuation du phénomène climatique à partir de cette date.

La hausse des températures atmosphériques a par ailleurs une influence directe sur l'évolution de l'évapotranspiration potentielle annuelle qui en outre n'est calculée que depuis les années cinquante à la station de Pau-Uzein ; l'analyse statistique réalisée dans ce travail montre une hausse (très hautement significative) de l'ETP⁵ de 3,3 mm/an de 1955 à 2006 et de 4,8 mm/an de 1974 à 2006. Aux augmentations de la température et de l'évapotranspiration potentielle vient s'ajouter une variation dans les précipitations moyennes annuelles entre les années 1974 et 2006 avec une légère tendance à la baisse due à la période 1984-1991. Les variations annuelles de ces trois paramètres climatiques sont particulièrement dues à celles de certains mois de l'année, qui présentent une hausse des valeurs de la température et de l'ETP et une baisse concomitante des cumuls de précipitations. C'est le cas des mois de mars et de mai qui appartiennent généralement aux périodes de recharge des aquifères souterrains mais dont le bilan hydrique est devenu déficitaire depuis, respectivement, les années 2003 et 1992. Ces tendances, semblables pour chacune des trois stations encadrant les chaînons béarnais, peuvent être considérées comme le reflet de l'évolution climatique régionale.

Géométrie des systèmes aquifères

Après ce premier constat concernant le contexte climatique régional, les résultats des mesures des plans de fracturation des massifs carbonatés et des panneaux électriques ont apporté de nouveaux éléments à la connaissance de la structure géologique des chaînons

4. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

5. Évapotranspiration.

béarnais. Les massifs carbonatés jurassico-crétacés des chaînons présentent de très nombreux plans de discontinuité. Parmi les mesures réalisées sur les quatre sites, trois familles de fractures influencent systématiquement le découpage du paysage et du réseau hydrographique des chaînons béarnais : F1 : N010°E à N040°E et un pendage moyen de 75°NE ou SW à 90°, F2 : N150°E à N175°E et un pendage moyen de 30°NE à 45°NE, F3 : N100°E à N120°E et un pendage moyen de 30°SW à 45°SW.

Le levé topographique de certaines cavités souterraines explorées par les spéléologues (CARST⁶, 1986) montre que les réseaux karstiques de la région sont bien développés selon ces familles de fractures. La cohérence structurale, observée en surface et en profondeur aux environs de chacune des sources, permet d'émettre l'hypothèse que cette structuration spatiale peut être étendue à l'ensemble des réservoirs des chaînons béarnais. Les panneaux électriques, positionnés pour la plupart à la limite sud de l'aquifère de la Fontaine d'Orbe, ont permis de définir la géométrie des contacts géologiques (Fig. 3) et plus particulièrement d'identifier la présence d'un niveau argileux épais et continu d'est en ouest le long des structures aquifères carbonatées et des formations magmatiques (ophites) qui les bordent. Ce niveau est caractérisé par des valeurs de résistivité électrique très faibles (inférieures à 50 Ω.m, Fig. 3) qui contrastent avec celles des massifs calcaires, dolomitiques et ophitiques (supérieures à 1 000 Ω.m).

La présence systématique d'argiles aux limites sud des quatre aquifères étudiés a une conséquence majeure d'un point de vue hydrogéologique. Elles agissent en effet comme un écran imperméable aux écoulements souterrains et dessinent ainsi les contours des bassins d'alimentation des sources dans la région des chaînons béarnais ; ces limites sud sont soulignées de façon très remarquable par la présence de nombreux abreuvoirs dans les zones traditionnelles de pâture. Cette conclusion a été confortée par les résultats de traçages effectués principalement sur le site de la Fontaine d'Orbe dans des pertes rencontrées tout au long du contact argileux des ophites et des calcaires.

Les résultats montrent en effet que ce niveau argi-

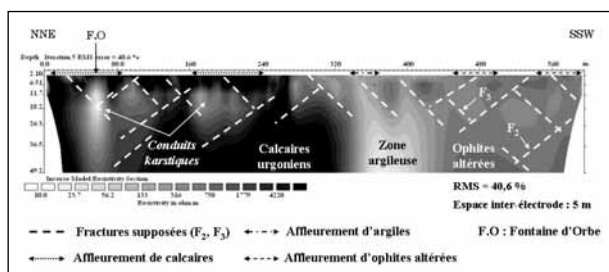


Figure 3. Image de résistivité du 3^{ème} chaînon béarnais (dispositif pôle-pôle).

eux, cartographiquement associé aux ophites, oriente de manière préférentielle les écoulements souterrains. Les images de résistivité électrique laissent supposer que les ophites (dolérites), traditionnellement attribuées au Trias, sont intrusives dans les formations carbonatées jurassiques et crétacées et qu'elles pourraient donc être d'âge post-Crétacé. La découverte d'un discret mais très bel affleurement non loin de la Fontaine d'Orbe, montrant le contact des calcaires et des ophites, a renforcé cette idée. L'étude pétrographique, encore en cours, des échantillons prélevés à cet endroit semble en effet bien montrer que les ophites sont intrusives dans des calcaires datés du Barrémien, au moyen de microfossiles.

À ces arguments, viennent s'ajouter les résultats d'analyses isotopiques du couple ³⁴S/¹⁸O réalisées sur les eaux de chacune des quatre sources. Les teneurs obtenues montrent que les sulfates, provenant certainement de la dissolution du gypse et de l'anhydrite contenus dans les argiles, sont compatibles avec une origine magmatique et hydrothermale. Ces résultats, encore inédits, permettraient d'expliquer l'association systématique des argiles et des ophites visible sur les affleurements et déjà cartographiée (cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM). Ces observations, si elles devaient être confirmées, remettraient en cause une partie de l'évolution géodynamique pyrénéenne et pourraient expliquer le caractère séléniteux de l'eau des sources étudiées et d'une majorité des points d'eau des chaînons béarnais. L'ensemble de ces résultats a permis d'établir un modèle conceptuel pour l'aquifère de la Fontaine d'Orbe (Fig. 4) transposable aux autres systèmes de la région des chaînons béarnais.

Caractéristiques physico-chimiques des eaux et fonctionnement hydrogéologique

Les caractéristiques chimiques des eaux des quatre sources sont issues de l'étude de l'évolution de leurs paramètres physico-chimiques et isotopiques, mesurés durant deux cycles hydrologiques complets. Les concentrations en

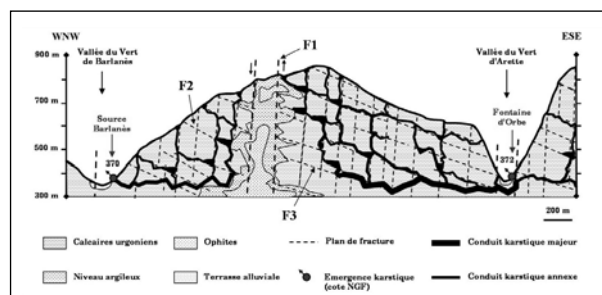


Figure 4. Schéma conceptuel de l'aquifère de la Fontaine d'Orbe.

ions majeurs ont permis de mettre en évidence deux faciès chimiques majeurs : l'un bicarbonaté calcique à la Fontaine d'Orbe (3^{ème} chaînon) et à Mourtès (2^{ème} chaînon) et l'autre bicarbonaté calcique magnésien à Ourtau et Gourgouch (1^{er} chaînon). Les concentrations en magnésium sont dues à la présence de dolomies du Bathonien-Oxfordien qui constituent en partie les bassins d'alimentation, particulièrement dans le cas des premier et second chaînons.

Ce résultat a été mis clairement en évidence d'une part, par analyse statistique multidimensionnelle (analyse en composantes principales et classification hiérarchique) réalisée sur l'ensemble des données disponibles : soit une série à onze variables et quatre cent trois individus (Fig. 5) et, d'autre part, par l'étude de la relation entre les teneurs en ions magnésium et calcium ($[Mg^{2+}]$ et $[Ca^{2+}]$). Cette relation, couramment utilisée pour distinguer les types d'eau, montre une quasi indépendance des teneurs pour les sources de La Fontaine d'Orbe et des Mourtès et une corrélation positive et significative pour les deux autres sources. Pour ces deux dernières, les coefficients de régression linéaire de la droite $[Mg^{2+}] = f([Ca^{2+}])$ sont égaux à 0,35, ce qui peut être proposé comme une caractéristique des sources émergentes des aquifères de nature calcaire et dolomitique des formations jurassiques des chaînons béarnais.

La structuration géologique des chaînons béarnais permet de prévoir que le faciès de l'eau des sources y sera donc de l'un ou l'autre des deux faciès : bicarbonaté calcique pour les réservoirs urgoniens et liasiques et bicarbonaté calcique magnésien pour les réservoirs jurassiques. L'analyse statistique descriptive des paramètres physico-chimiques et des ions majeurs a permis de distinguer deux types de fonctionnement hydrodynamique parmi les quatre systèmes étudiés.

Le premier, correspondant à un comportement karstique (sources de la Fontaine d'Orbe et de l'Ourtau), présente de fortes variations annuelles de la minéralisa-

tion et de la température ; cette variabilité est bien marquée par des coefficients de variation (rapport de l'écart-type d'un paramètre à sa moyenne) élevés. Le second, de type carbonaté fissuré (Mourtès et Gourgouch), montre à l'inverse des valeurs très stables quelle que soit la période hydrologique. Ce résultat a été confirmé par l'étude de la distribution des fréquences des valeurs de conductivité (plurimodale dans le cas d'un aquifère karstique et unimodale dans l'autre cas, Fig. 6) et par les variations des teneurs en $\delta^{13}C$ mesurées au cours de périodes hydrologiques distinctes.

À l'étiage, les eaux des quatre sources présentent un $\delta^{13}C$ identique avoisinant -13‰ ($\pm 0,2$). En revanche, suite à de forts cumuls de précipitation les teneurs en $\delta^{13}C$ baissent de 1‰ aux sources karstiques et augmentent de 1‰ aux sources issues d'aquifères fissurés dans le même temps (Fig. 7).

L'étude des équilibres calco-carboniques et plus particulièrement de la relation linéaire $\text{Log } pCO_2/ISc$ a également permis de les distinguer selon les valeurs du coefficient de régression : d'une part, les sources d'origine karstique avec un coefficient égal à $-0,8$ et, d'autre part, les sources issues d'un aquifère fissuré avec un coefficient égal à -1 . L'ensemble de ces résultats converge et conduit à la proposition selon laquelle il existe deux types de fonctionnement hydrodynamique dans les chaînons béarnais : l'un de type fissuré et l'autre karstique.

Les systèmes de la Fontaine d'Orbe et de l'Ourtau, bien qu'étant tous deux karstiques, ne réagissent cependant pas de la même manière à un événement pluvieux du fait d'un réseau de conduits karstiques organisé différemment. Pour le premier aquifère, une hausse ou une baisse de la conductivité est observée en fonction de l'antécédent hydrologique du système. Cette réaction est interprétée comme la vidange, due à un effet de chasse dans le système, de conduits karstiques annexes au

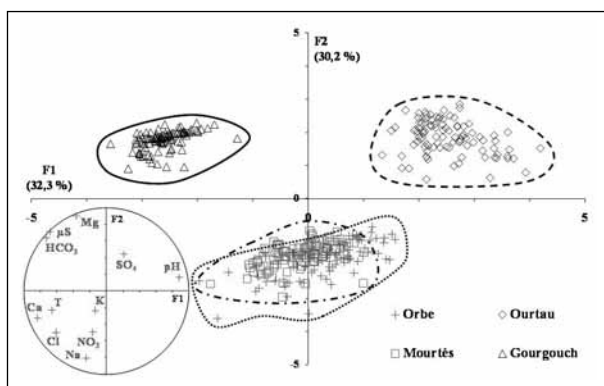


Figure 5. Cercle des corrélations et diagrammes des individus ($n = 403$) sur le plan F1-F2 (62,5%).

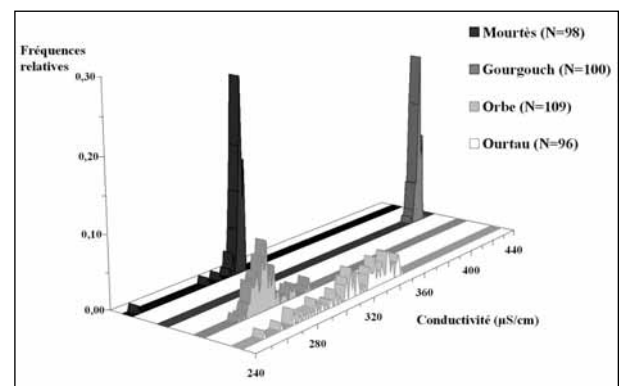


Figure 6. Distribution des fréquences relatives des valeurs de conductivité des quatre sources ($N =$ taille de l'échantillon).

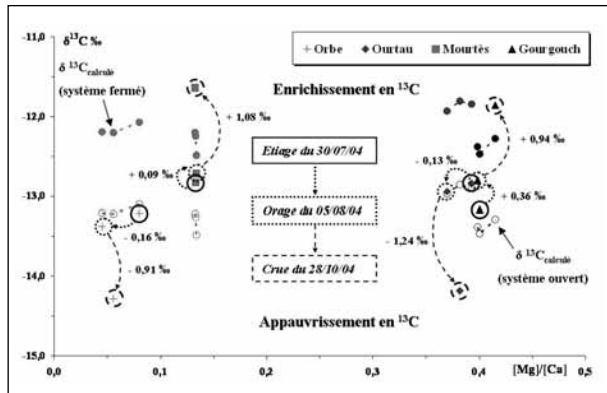


Figure 7. Évolution des périodes en ^{13}C au cours de différentes périodes hydrologiques.

système principal de drainage et situés dans la zone non saturée. Pour le second, la conductivité de l'eau diminue systématiquement après un épisode de pluie, indiquant une infiltration rapide et le mélange des eaux météoriques dans la zone saturée du système.

Dans le cas d'aquifère karstique, la turbidité, qui est la principale source de pollution (associée à une possible contamination bactériologique), accompagne généralement ces variations de minéralisation aux émergences. L'analyse des relations *conductivité/turbidité* a été abordée par le biais de la description des cycles hystérésis $\Delta C/T$ (de classe orthograde ou rétrograde) caractérisant le transport des phases dissoutes (conductivité) et particulières (turbidité) et des calculs d'autocorrélation définissant l'inertie des systèmes (effet mémoire, Mangin, 1984). Les résultats montrent que le transport des particules dans le cas de la Fontaine d'Orbe est une succession de mise en suspension et dépôt alors qu'il apparaît plus direct à l'Ourtau. Cette étude a donc permis de confirmer que le réseau de conduits karstiques de l'aquifère de la Fontaine d'Orbe était plus complexe que celui de l'Ourtau.

Conclusions et perspectives

Les résultats de l'étude sont donc à l'origine d'un recueil important de données sur les aquifères carbonatés des chaînons béarnais, tant du point de vue de la définition de leur géométrie et de leur aire d'alimentation que de la compréhension de leur fonctionnement hydrodynamique, essentielle à leur bonne gestion. Le contexte géologique, structural et climatologique des chaînons béarnais permet de généraliser les conclusions de cette étude aux différents aquifères des chaînons béarnais en prédisant leur comportement de type karstique ou fissuré, leur faciès bicarbonaté calcique à tendance magnésienne, leur spécificité séléniteuse, leur vulnérabilité au regard d'épisodes pluvieux et leur aire d'alimentation.

En conséquence, les informations apportées par cette étude pluridisciplinaire sur la caractérisation des ressources en eau souterraine de la région permettent de proposer un modèle d'étude des ressources en eau souterraine dans la région des chaînons béarnais (Rey, 2007) afin de répondre aux exigences émises dans la Directive Cadre Européenne 2000/60/CE.

Une caractérisation complète de la richesse et de la vulnérabilité des sources des chaînons béarnais devra être envisagée à court terme ; il est en effet nécessaire, en premier lieu, d'établir des bilans hydrologiques quantitatifs précis, ce qui demande à ce que des débits puissent être précisément mesurés ; ceci n'est, bien sûr, pas facile en milieu montagneux. Les préoccupations d'ordre sociétal exigent également que la cartographie de la vulnérabilité de ces sources soit réalisée et mise à disposition du public. Enfin, il semble utile de se donner les moyens d'améliorer notre connaissance des temps de séjour dans les systèmes hydrogéologiques en se fondant sur l'analyse des couples isotopiques ^3H - ^3He (pour les systèmes de type fissuré) et ^{18}O - ^2H (pour les systèmes karstiques). Il sera alors possible d'estimer l'évolution de la ressource en fonction de scénarii climatiques élaborés en relation avec l'évolution climatique à plus ou moins long terme.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien du Conseil régional d'Aquitaine, du Conseil général des Pyrénées-Atlantiques et de l'Agence de l'eau Adour-Garonne.

Références bibliographiques

- CARST (Centre Aturien de Recherche Sous Terre), 1986 : Revue Spéléo des Pyrénées Occidentales, n°5, 1^{er} trimestre, 2.2 à 2.12.
- GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques : les bases scientifiques physiques. Rapport du groupe de travail I, réunion de Paris du 29 janvier au 1^{er} février 2007.
- Mangin A., 1984 : Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrices et spectrales. *J. Hydrol.* 67, 25-43.
- Rey F., 2003 : Sources et captages d'eau dans les chaînons béarnais : cas de la Fontaine d'Orbe (Arette, Pyrénées-Atlantiques). Identification, à la lumière de données géologiques récentes, des traits structuraux nécessaires à la définition des limites du bassin versant. Diplôme d'Études Approfondies, École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, 49 p.
- Rey F., 2007 : Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais. Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 456 p.