

# Evaluation des ressources en eau souterraine des aquifères carbonatés sous couverture sur le secteur de Béziers – Réalisation de 2 forages de reconnaissance Rapport final

htb-2

d7-hta

.89 3740,46 -625.5

BRGM/RP-64541-FR février 2015

de-hia





# Evaluation des ressources en eau souterraine des aquifères carbonatés sous couverture sur le secteur de Béziers – Réalisation de 2 forages de reconnaissance

Rapport final

BRGM/RP-64541-FR février 2015

P. Fleury, B. Dewandel, B. Ladouche, E. Le Goff, avec la collaboration de R. Coueffé, A. Bitri, K. Samyn



**Approbateur :** Nom : A. Blum thes

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9 001:2000.





**Mots clés** : karst sous couverture, ressource en eau, Béziers, hydrogéologie, forage, interprétation d'essais de pompage, isotopes, datation

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Fleury, P., Dewandel, B., Ladouche, B., Le Goff, E., avec la collaboration de Coueffé, R., Bitri, A., Samyn, K., 2015. Evaluation des ressources en eau souterraine des aquifères carbonatés sous couverture sur le secteur de Béziers – Réalisation de deux forages de reconnaissance. Rapport « final ». BRGM/RP-64541-FR, 160 p, 56 ill., 5 ann..

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Ce projet intitulé « Evaluation des ressources en eau souterraine des aquifères carbonatés sous couverture sur le secteur de Béziers » est identifié par le BRGM sous le code PSP11LRO1. Il a pour objectif d'apporter de nouveaux éléments de compréhension sur la nature et le fonctionnement des aquifères carbonatés sous couverture sur le secteur de l'Agglomération de Béziers Méditerranée. En effet, ce type d'aquifère est méconnu à ce jour et il existe peu d'informations à l'échelle mondiale sur la reconnaissance de ces systèmes en particulier par rapport à leurs capacités aquifères. Un projet de recherche a été réalisé en 2009 (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse – BRGM, Rapport BRGM/RP-56980-FR), sur le Sud-Est de la France afin d'identifier les grands secteurs favorables. Ce dernier concluait que le choix des secteurs à prospecter devrait se faire à partir de la reconnaissance des structures profondes, mais aussi en associant ces structures avec le développement potentiel de la karstification. Ce développement étant fonction de l'histoire géologique, il nécessite de bonnes connaissances géologiques régionales.

Ce projet résulte d'une convention de Recherche et Développement partagés entre la Communauté d'Agglomération Béziers Méditerranée (CABM) et le BRGM. Il s'agit d'un projet de recherche cofinancé par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, la CABM et le BRGM. La première phase de ce projet a consisté à retraiter et interpréter des profils sismiques afin de déterminer les grands secteurs favorables pour l'implantation d'ouvrages de reconnaissance à partir de l'identification des couches carbonatées. Les sites d'implantation des forages ont étés validés à partir de la localisation de ces entités (profondeur), de leur potentiel de karstification (mise à l'affleurement au cours de l'histoire géologique) et des informations hydrogéologiques locales. Ces travaux réalisés en 2011 et 2012 sont consignés dans le rapport intermédiaire du projet (BRGM/RP-60640-FR).

Deux secteurs à fort potentiel ont alors été identifiés, il a ainsi été décidé de réaliser un ouvrage de reconnaissance sur chacun des sites. Le premier est localisé au Sud-Ouest de Béziers, le second au Sud-Est de Béziers.

Afin de préciser les lieux d'implantation des ouvrages sur ces secteurs, une prospection par méthode sismique réflexion a été mise en œuvre. Elle a permis de positionner plus précisément les deux secteurs pour l'implantation de l'ouvrage, par rapport à la structure des formations reconnues (profondeur du toit des calcaires potentiellement karstifiés) et des objets géologiques rencontrés (réseau de faille notamment).

Sur le premier site à proximité de la Chapelle « Notre Dame de la Consolation » au Sud-Ouest de Béziers, secteur Bayssan, la reconnaissance par forage a été effectuée sur les calcaires jurassiques dits de la Galiberte entre les mois d'aout et octobre 2014. Ces calcaires sont localement sous faible recouvrement sédimentaire (quelques dizaines de mètres). Malheureusement cet ouvrage (code BSS : 10394X0168/CHAPEL) n'a pas recoupé de venue d'eau significative. A la fin de la foration à 205 m de profondeur le débit était d'environ 10 m<sup>3</sup>/h. Aussi, au vu de ce faible débit, il a été décidé de ne pas poursuivre les investigations sur l'ouvrage.

Le second site sur le secteur de Cabrials au Sud-Est de Béziers, a permis d'étudier l'aquifère karstique développé dans les calcaires du Crétacé, localisé sous environ 145 m de couverture sédimentaire (marnes du Miocène). L'ouvrage (code BSS : 10401X0367/CABRIA) a atteint 252 m de profondeur. Une zone à forte karstification (réseau de fractures ouvertes et conduits

décimétriques) a été recoupée au toit des calcaires (147-152 m), occasionnant le drainage d'une importante ressource en eau. A l'issue de la foration le débit au soufflage à 250 m était supérieur à 200 m<sup>3</sup>/h. Des essais hydrauliques (pompage par paliers et longue durée au débit de 165 m<sup>3</sup>/h) ont été réalisés du 15 au 27 décembre 2014. Ces derniers ont été accompagnés d'un suivi physicochimique.

L'interprétation des essais de pompage montre que l'aquifère capté a une transmissivité de l'ordre de 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s, et qu'il est soumis à des effets de drainance et/ou situé à proximité d'une limite alimentée. Le modèle mathématique fracture verticale avec une limite alimentée (Gringarten + une limite alimentée) s'est révélé pertinent pour reproduire l'évolution du rabattement observé lors des essais de pompage.

Les paramètres de calage permettent d'estimer la demi-longueur de fracture (égale à 40 m) et mettent en évidence l'impact d'une limite alimentée se faisant ressentir au bout de 250 min de pompage.

Par la suite le modèle a été utilisé pour estimer le débit d'exploitation de l'ouvrage. Les résultats montrent que le forage de Béziers Est-Cabrials a une très bonne potentialité, bien au-delà des débits qui ont été testés. En théorie, le débit d'exploitation maximal se situerait aux alentours de 275 m<sup>3</sup>/h pour un rabattement maximal de 140 m. Cependant, en pratique l'ouvrage n'a été testé que jusqu'à 180 m<sup>3</sup>/h (dernier palier de débit) ce qui ne permet pas de se prononcer pour des débits supérieurs. En l'état actuel des connaissances sur cet ouvrage, il est conseillé un débit d'exploitation maximal de 180 m<sup>3</sup>/h (pompage 24h/24, 7j/7), ce qui représente un prélèvement annuel aux alentours de 1,58 Mm<sup>3</sup>. A ce débit, le niveau d'eau devrait rapidement stabiliser vers 71 m de profondeur permettant d'assurer un fonctionnement correct de la pompe.

Par ailleurs le suivi physicochimique mis en place lors du pompage longue durée révèle la présence d'une eau anormalement chaude (26°C-27°C) et fortement minéralisée (conductivité = 2,7 mS/cm) et légèrement carbo-gazeuse (5 à 6% de CO<sub>2</sub> dissous). Les eaux du forage Cabrials sont chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes selon la classification de Piper. Les teneurs en chlorures (468 mg/l) et sodium (274 g/l) mesurées sont supérieures aux normes de potabilité (<200 mg/l pour ces paramètres). L'origine de la salinité a été précisée par l'approche multi-isotopique mise en œuvre, la salinité des eaux apparait liée au pôle halite du Trias salifère situé sous le Jurassique. Dans ce contexte, les résultats géochimiques indiquent que le réservoir crétacé dans lequel est implanté le forage est en lien avec l'aquifère jurassique sous-jacent, ce dernier reposant sur les évaporites du Trias. Ce transfert pourrait être favorisé par l'accident décrochant sénestre mis en évidence préalablement à l'ouest de l'ouvrage (Coueffé et al., 2011). La signature isotopique de l'eau ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{2}H$ ) témoigne d'une absence d'échanges isotopiques de type évaporation ou échange avec le CO<sub>2</sub> gazeux d'origine profonde. La signature isotopique de l'eau apparait bien expliquée par les eaux de pluie du climat actuel (pas de mise en évidence d'effet paléo-climatique, l'eau s'est donc infiltrée après la dernière glaciation du Wurm datée à -12 000 ans). La présence de CO<sub>2</sub> dissous dans les eaux ne permet pas l'utilisation de l'activité carbone 14 pour la datation des eaux. Toutefois, les eaux prélevées en début de pompage apparaissent anciennes (infiltrées avant 1950) d'après les informations apportées par les gaz dissous (CFC/SF6) et comme l'indique l'absence de tritium. Le pompage semble avoir mobilisé une faible fraction (<5%) d'eau plus récente compte tenu des valeurs mesurées en fin de pompage. L'âge apparent de la composante récente mobilisée par le pompage ne peut pas être évalué précisément.

En parallèle, lors de ces essais, un suivi des niveaux d'eau sur les ouvrages localisés à proximité captant des aquifères superficiels a été réalisé. Ce suivi a montré l'absence d'impact de l'essai de pompage d'une durée de cinq jours sur ces ressources superficielles.

## Sommaire

Introduction9				
1.	Choix des sites d'implantation des ouvrages : campagne sismique haute résolution	. 11		
	<ul> <li>1.1. MISE EN ŒUVRE DES LIGNES SISMIQUES</li> <li>1.1.1. Secteur de Bayssan - Béziers Ouest</li> <li>1.1.2. Secteur de Cabrials (Béziers Est)</li> </ul>	11 12 18		
2.	Forage de Béziers Ouest	23		
	2.1. DESCRIPTION DES ECHANTILLONS PRELEVES	24		
3.	Forage Béziers Est - Cabrials	29		
	3.1. COUPE DE FORAGE ET STRUCTURE DE L'AQUIFERE	29		
	<ul> <li>3.2. DIAGRAPHIES</li> <li>3.2.1. Examen endoscopique</li> <li>3.2.2. Les diagraphies de production naturelle.</li> <li>3.2.3. Les diagraphies en pompage.</li> <li>3.2.4. Diagraphies différées</li> <li>3.2.5. Apport de la diagraphie : conclusions.</li> </ul>	33 34 35 35 36 36		
	<ul> <li>3.3. REALISATION DES ESSAIS DE POMPAGE</li> <li>3.3.1. Essai par paliers de débit</li> <li>3.3.2. Essai de longue durée</li> </ul>	39 41 42		
	<ul> <li>3.4. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DE LA RESSOURCE</li></ul>	51 51 51 65 66		
	3.5. IMPACT DE L'ESSAI DE POMPAGE SUR L'ETAT QUANTITATIF DES EAUX SOUTERRAINES A PROXIMITE DE L'OUVRAGE	. 69		
4.	Conclusion et perspectives	.73		
5.	Bibliographie	.75		

### Liste des illustrations

Illustration 1. Echelle des temps géologiques et sédimentation régionale12	2
Illustration 2 : Localisation des lignes sismiques 1 et 2 du secteur de Bayssan (Béziers Ouest) sur fond géologique à 1/50 00013	3
Illustration 3 : Interprétation de la ligne sismique 1 (secteur de Bayssan, Béziers Ouest) avec report des principaux éléments identifiés pour l'attribution stratigraphique des unités sismiques. En bas, coupe géologique des premiers mètres de terrains sous la surface topographique servant au calage stratigraphique des unités sismiques	4
Illustration 4 : Interprétation ligne sismique 2 avec report des principaux éléments identifiés pour l'attribution stratigraphique des unités sismiques (Secteur Bayssan, Béziers Ouest)	3
Illustration 5 : Propositions de zones pour l'implantation du forage du secteur de Bayssan (Béziers Ouest) et implantation retenue	3
Illustration 6 : Localisation de la ligne sismique 3 acquise dans le secteur de Cabrials (Béziers Est) et des données disponibles (ligne sismique B9 et puits pétroliers B1, B2 et B3)	9
Illustration 7 : Log géologique simplifié des sondages B1, B2 et B3, avec position en profondeur des cibles calcaires	)
Illustration 8 : Interprétation de la ligne sismique 3 avec report des principaux éléments identifiés pour l'attribution stratigraphique des unités sismiques (secteur Cabrials, Béziers Est)	1
Illustration 9 : Proposition de zone pour l'implantation du forage Béziers Est et secteur retenu 22	2
Illustration 10. Forage Béziers Ouest (10394X0168/CHAPEL) 23	3
Illustration 11. Coupe géologique Béziers Ouest – Notre-Dame	5
Illustration 12. Coupe géologique Béziers Ouest - Notre-Dame et log du forage (FORADOUR)	3
Illustration 13. Relation entre la coupe géologique du forage Béziers Ouest – Notre-Dame et l'interprétation de l'image sismique	7
Illustration 14. Log du forage Béziers Est – Cabrials	)
Illustration 15. Coupe géologique Béziers Est - Cabrials (FORADOUR)	1
Illustration 16. Comparaison des forages Béziers Est – Cabrials et Béziers 1	R
Illustration 47. Mission service des disconnections sur la favore Décises Det Ostrials non l'Indes	)
Assistance	1
Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Beziers Est Cabriais par Hydro         Assistance.         Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres	1 5
Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Beziers Est Cabriais par Hydro         Assistance.         Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres.         Illustration 19. Résultats des diagraphies réalisées par Hydro Assistance sur le forage Béziers Est -         Cabrials.         37	4 5 7
Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Beziers Est Cabriais par Hydro         Assistance.	4 5 7
Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Beziers Est Cabriais par Hydro       34         Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres       35         Illustration 19. Résultats des diagraphies réalisées par Hydro Assistance sur le forage Béziers Est -       35         Cabrials       37         Illustration 20. Photographie annotée du matériel mis en place à Béziers Est - Cabrials pour les essais de pompage de décembre 2014.       40         Illustration 21. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage par paliers de débit (16/12/2014). Mesures automatiques et manuelles.       41	4 5 7 0
Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Bezlers Est Cabrials par Hydro       34         Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres       35         Illustration 19. Résultats des diagraphies réalisées par Hydro Assistance sur le forage Béziers Est -       35         Illustration 20. Photographie annotée du matériel mis en place à Béziers Est - Cabrials pour les essais de pompage de décembre 2014.       40         Illustration 21. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage par paliers de débit (16/12/2014).       41         Illustration 22. Résultats de l'essai par paliers de débit (Béziers Est-Cabrials, 16/12/2014).       42	2 4 5 7 0 1 2
Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Bezlers Est Cabrials par Hydro       34         Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres       35         Illustration 19. Résultats des diagraphies réalisées par Hydro Assistance sur le forage Béziers Est -       35         Cabrials       37         Illustration 20. Photographie annotée du matériel mis en place à Béziers Est - Cabrials pour les       37         Illustration 21. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage       40         Illustration 22. Résultats de l'essai par paliers de débit (Béziers Est-Cabrials, 16/12/2014).       41         Illustration 23. Interprétation de l'essai par paliers de débit sur Béziers Est-Cabrials.       42	4 5 7 0 1 2 2
Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Bezlers Est Cabrials par Hydro       34         Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres       35         Illustration 19. Résultats des diagraphies réalisées par Hydro Assistance sur le forage Béziers Est -       37         Cabrials       37         Illustration 20. Photographie annotée du matériel mis en place à Béziers Est - Cabrials pour les       37         Illustration 21. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage       40         Illustration 22. Résultats de l'essai par paliers de débit (Béziers Est-Cabrials, 16/12/2014).       41         Illustration 23. Interprétation de l'essai par paliers de débit sur Béziers Est-Cabrials.       42         Illustration 24. Evolution des niveaux et du débit durant l'essai de longue durée réalisé en décembre 2014 sur Béziers Est-Cabrials.       43	4 5 7 0 1 2 3
Assistance.       34         Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Beziers Est Cabrials par Hydro       34         Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres       35         Illustration 19. Résultats des diagraphies réalisées par Hydro Assistance sur le forage Béziers Est -       37         Illustration 20. Photographie annotée du matériel mis en place à Béziers Est - Cabrials pour les       37         Illustration 21. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage       40         Illustration 22. Résultats de l'essai par paliers de débit (Béziers Est-Cabrials, 16/12/2014).       41         Illustration 23. Interprétation de l'essai par paliers de débit sur Béziers Est-Cabrials.       42         Illustration 24. Evolution des niveaux et du débit durant l'essai de longue durée réalisé en décembre 2014 sur Béziers Est-Cabrials.       43         Illustration 25. Evolution de la conductivité et de la tempèrature, Béziers-Est Cabrials lors de l'essai de longue durée.       44	4 5 7 2 2 3 4

Illustration 52. Niveau piézométrique mesuré au piézomètre de la carrière du Biterois.	71
Illustration 53 : Chroniques des concentrations des CFC et SF <sub>6</sub> dans l'air (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov)	154
Illustration 54. Modèle de transfert couramment utilisé pour interpréter les resultats CFCs (d'après Maloszewski et Zuber, 1982)	156
Illustration 55 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF6	157
Illustration 56 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF <sub>6</sub>	157

### Liste des annexes

Annexe 1	Rapport diagraphie Hydro Assistance	. 79
Annexe 2	Analyses chimique Laboratoire Carso (sur le Forage Cabrials)	113
Annexe 3	Résultats des analyses chimiques et isotopiques	123
Annexe 4	Diagramme de Piper	147
Annexe 5 CFC et SF	Principe de la méthode de datation de l'âge apparent des eaux par l'analyse des Gaz	151

### Introduction

Ce projet de recherche intitulé « Karst sous couverture Béziers » et identifié par le BRGM sous le code PSP11LRO11, a pour objectif d'apporter de nouveaux éléments de compréhension sur la nature et le fonctionnement des aquifères carbonatés sous couverture. En effet, ce type d'aquifère est méconnu à ce jour et il existe peu d'informations à l'échelle mondiale sur la reconnaissance de ces systèmes en particulier par rapport à leurs capacités aquifères. Un projet de recherche a été réalisé en 2009 (AE RMC – BRGM, Rapport BRGM/RP-56980-FR), sur le Sud-Est de la France afin d'identifier les grands secteurs favorables. Ce dernier concluait que le choix des secteurs à prospecter devrait se faire à partir de la reconnaissance des structures profondes, mais aussi en associant ces structures avec le développement potentiel de la karstification. Ce développement étant fonction de l'histoire géologique, il nécessite de bonnes connaissances géologiques régionales.

Ainsi, pour répondre aux besoins croissants en eau potable, la Communauté d'Agglomération Béziers Méditerranée (CABM) a envisagé, dans son schéma directeur d'alimentation en eau potable, d'étudier, entre autres, le potentiel aquifère des formations carbonatées profondes de son territoire. Ce projet résulte d'une convention de Recherche et Développement partagés entre le BRGM et la CABM. Il bénéficie d'aides financières de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (39,10 %) et de l'Europe (fonds FEDER à hauteur de 39,10 %), la CABM s'autofinançant à hauteur de 21,80 %. Le BRGM apporte une dotation d'un montant de 55 940 € HT.

Dans le cadre de ce projet, le BRGM est intervenu afin de réaliser l'étude scientifique comprenant plusieurs volets. Lors de la première phase du projet qui s'est déroulée en 2011 et 2012 (BRGM/RP-60640-FR), une étude géophysique (retraitement et réinterprétation de profils sismiques) a permis de localiser les grands ensembles carbonatés sur le secteur. Par la suite une synthèse des informations hydrogéologiques a permis de préciser des zones favorables présentant des intérêts hydrogéologiques à potentiel significatif.

Ainsi, deux secteurs jugés favorables ont été retenus. Le premier est à proximité du domaine de Bayssan au sud-ouest de Béziers, le deuxième à l'est de la zone d'activités de Montimaran sur le secteur de Cabrials au sud-est de Béziers.

La seconde phase du projet présentée dans ce rapport, concerne la caractérisation de la ressource en eau sur les deux secteurs précédemment cités. Le choix d'implantation des deux forages a été réalisé grâce à la mise en œuvre de profils sismiques haute résolution (avril 2012). Ils permettent de préciser localement sur les deux secteurs la géologie en profondeur. Au cours de l'année 2013, la CABM s'est chargée d'acquérir les autorisations auprès des propriétaires pour la réalisation des forages sur deux parcelles privées. Au cours du second semestre 2014, **deux forages de reconnaissance** réalisés par l'entreprise « FORADOUR », suivis d'essais de pompage sur l'un des sites ont été réalisés. Les travaux réalisés et les résultats des investigations de terrain sont présentés en partie 2 (forage Béziers Ouest – Bayssan, Notre Dame) et 3 (forage Béziers Est – Cabrials).

### 1. Choix des sites d'implantation des ouvrages : campagne sismique haute résolution

#### **1.1. MISE EN ŒUVRE DES LIGNES SISMIQUES**

La campagne sismique haute résolution avait pour objectif de caractériser localement sur les deux secteurs retenus, la profondeur du toit des calcaires mésozoïques (voir âge associé dans l'échelle des temps géologiques de l'Illustration 1) sous recouvrement cénozoïque (formations sédimentaires meubles) ainsi que la structure profonde des horizons carbonatés. Ce travail devait permettre de mieux définir le log prévisionnel des forages et ainsi affiner le coût de chacun des forages. Il devait également permettre de s'assurer que le choix du site d'implantation des forages répondait bien aux objectifs (définis lors du comité de Pilotage), à savoir un toit des calcaires à moins de 100 m de profondeur sur le premier secteur et moins de 150 m sur le second.



Illustration 1. Echelle des temps géologiques et sédimentation régionale.

La campagne d'acquisition sismique, mise en œuvre par le BRGM, s'est déroulée du 3 au 5 avril 2012, trois lignes sismiques hautes résolutions ont ainsi été réalisées (deux sur le secteur Bayssan - Béziers Ouest et une sur le secteur Cabrials - Béziers Est). Les résultats de cette campagne sont présentés ci-après distinctement sur les deux secteurs.

#### 1.1.1. Secteur de Bayssan - Béziers Ouest

Ce secteur a été étudié grâce à deux profils sismiques de direction nord-sud qui permettent d'examiner du point de vue structural, le flanc nord de la structure du dôme de la Galiberte.

Le profil sismique 1 le plus long (1 500 m) a été acquis afin de déterminer le plongement et la profondeur approximative du toit de la cible jurassique, laquelle affleure juste au Sud dans les carrières exploitant les calcaires kimméridgiens karstifiés (Illustration 2). Le second profil situé plus à l'Est mesure 550 m et doit permettre d'imager l'extrémité orientale du « dôme de la Galiberte ». Les deux lignes sismiques réalisées sont positionnées Illustration 2.



Illustration 2 : Localisation des lignes sismiques 1 et 2 du secteur de Bayssan (Béziers Ouest) sur fond géologique à 1/50 000.

La longueur du profil et la bonne qualité du signal sismique permettent d'imager les formations souterraines jusqu'à 300 m de profondeur (Illustration 3).



Illustration 3 : Interprétation de la ligne sismique 1 (secteur de Bayssan, Béziers Ouest) avec report des principaux éléments identifiés pour l'attribution stratigraphique des unités sismiques. En bas, coupe géologique des premiers mètres de terrains sous la surface topographique servant au calage stratigraphique des unités sismiques.

L'interprétation de cette ligne sismique permet de positionner le toit des calcaires jurassiques. L'image interprétée figure un plongement rapide des calcaires jurassiques sous 100 m de couverture tertiaire du fait du jeu des failles normales. Plus on se dirige vers le nord, plus la couverture sédimentaire est épaisse, et donc plus le coût de l'ouvrage sera élevé pour atteindre les calcaires. Il a ainsi été convenu en COPIL que la cible calcaire de ce premier ouvrage ne devait pas être à une profondeur supérieure à 100 m. De ce fait, le forage ne pourra pas être implanté au Nord du point 400.

L'image interprétée illustre par ailleurs que la couverture tertiaire a une épaisseur limitée au Sud du point 250. Sur le secteur 0-250 le rôle protecteur de la couverture est donc limité du fait de sa faible épaisseur. Pour ces raisons, la zone dans laquelle le forage répondrait aux critères optimaux pour l'implantation d'un forage, est localisée entre les points 250 et 400.

Enfin, la présence d'une faille autour du point 300 m, qui potentiellement constitue une zone de circulation préférentielle des eaux souterraines, définit plus précisément un secteur intéressant en vue de l'implantation du forage de Bayssan (Béziers Ouest).

Une seconde ligne sismique, longue de seulement 550 m, a été réalisée à l'Est du profil 1, au Sud du lieu-dit La Redonnière. Du fait de la proximité des premiers points d'enregistrement avec l'autoroute A9 (Illustration 2) et du fait de sa longueur limitée, l'image sismique obtenue est de moins bonne qualité.

L'image sismique permet toutefois d'examiner les structures géologiques jusqu'à environ 100 m de profondeur, avec des incertitudes plus importantes (Illustration 4).



Illustration 4 : Interprétation ligne sismique 2 avec report des principaux éléments identifiés pour l'attribution stratigraphique des unités sismiques (Secteur Bayssan, Béziers Ouest).

Ce profil souligne le faible recouvrement tertiaire des calcaires jurassiques (inférieur à 10 m) jusqu'aux environs du point 200. Tout le secteur compris entre l'autoroute (au Sud) et le point

200 doit être exclu du fait du faible pouvoir protecteur du recouvrement et de la proximité de l'autoroute (risques de pollution).

Une faille inverse est visible au niveau du point 250. Elle délimite une zone, qui s'étend entre les points 250 et 400, à partir de laquelle la couverture tertiaire se développe en épaisseur pour atteindre 50 m. Ce secteur parait plus propice (recouvrement suffisant pour la protection et répondant aux objectifs de profondeur maximale du toit des calcaires).

En résumé, l'acquisition et l'interprétation des deux lignes sismiques haute résolution sur le secteur de Bayssan (Béziers Ouest) permettent de mieux comprendre la structure et la géométrie des calcaires jurassiques affleurant au niveau du Dôme de la Galiberte.

L'image sismique souligne le plongement profond et rapide de ces calcaires vers le Nord (entre les points 200 et 700 du premier profil, les calcaires plongent d'environ 170 m) à la faveur notamment de deux failles normales à regard nord.

Vers l'Est, en accord avec les données existantes de forages et sondages proches (sondages 10394X0016/S, 10394X0055/B12, 10394X0014/S, et forage 10394X0058/111111 recoupant les calcaires sous seulement 10 m de couverture), le profil 2 image la prolongation orientale du dôme de la Galiberte sous faible recouvrement tertiaire (moins de 20 m).

Ces données nouvelles fournissent de précieuses informations pour l'implantation du forage. L'Illustration 5, où figurent sous forme de rectangle de couleur les parcelles appartenant au domaine « public », présente les secteurs favorables à l'implantation. Ils sont définit à partir de l'interprétation des lignes sismiques et aussi de l'interpolation de la géologie en profondeur entre les deux lignes :

- un secteur restreint favorable à la réalisation d'un forage, sous la forme d'un polygone elliptique en trait plein. Ce secteur est défini comme la portion de ligne sismique 1 pour laquelle les calcaires paraissent être reconnus sous 20 à 60 m de couverture tertiaire, à proximité d'une faille normale importante;
- un secteur plus vaste, sous la forme d'un polygone elliptique en pointillés. Ce secteur matérialise la bordure sud des dépôts cénozoïques ennoyant le dôme de la Galiberte. L'épaisseur de la couverture tertiaire, définie par interpolation, y est évaluée à quelques dizaines de mètres.

Sur ces secteurs définis, il n'y a pas de parcelles appartenant au domaine public. La CABM a ainsi recherché une parcelle privée localisée à l'intérieur de l'éllipse en pointillée. La parcelle retenue est finalement située quelques dizaines de mètres au Sud de la partie orientale de l'ellipse, à proximité de la Chapelle Notre Dame de la Consolation (voir localisation Illustration 5). D'après les coupes sismiques interprétées, l'ouvrage devrait recouper les formations carbonatées à quelques dizaines de mètres de profondeur.



Illustration 5 : Propositions de zones pour l'implantation du forage du secteur de Bayssan (Béziers Ouest) et implantation retenue.

#### 1.1.2. Secteur de Cabrials (Béziers Est)

Une acquisition sismique, formant une ligne longue de 1300 m, a été réalisée sur le secteur de Cabrials, Béziers Est (Illustration 6).

D'orientation quasi-perpendiculaire à l'axe de l'anomalie gravimétrique positive de Béziers, l'image sismique obtenue, de bonne qualité, permet de visualiser les structures géologiques affectant les séries mésozoïques (en l'occurrence crétacées), jusqu'à une profondeur variant entre 150 m (à proximité de la D612) et 400 m (depuis le centre du profil jusqu'au Nord).

Trois sondages pétroliers profonds (profondeurs atteintes comprises entre 299 et 550 m) sont situés à proximité de cette ligne sismique (B1 – 10401X0066/B1, B2 – 10401X0067/B2 et B3 – 10401X0068/B3 sur l'Illustration 6 et l'

Illustration 8). Ces ouvrages ont servi à l'interprétation du profil sismique, en particulier au calage stratigraphique des principaux réflecteurs sismiques (logs simplifiés de ces forages sur l'Illustration 7).

De ces trois sondages, le puits B1, localisé au Sud-Est du premier point d'enregistrement, est celui pour lequel la couverture mio-pliocène est la moins puissante (145 m). C'est également sur ce même sondage que des pertes d'injections ont étés rencontrées tout au long de la foration du Crétacé calcaire. Les premières informations de karstification ont été observées dès 145 m dans les calcaires du Crétacé Inférieur. Sur les deux autres sondages, c'est le toit des calcaires du Crétacé supérieur qui a été recoupé à respectivement 165 et 211 m. Les éléments fournis montrent une karstification moins importante sur les calcaires du Crétacé supérieur. Compte tenu de ces informations, les calcaires du Crétacé inférieur semblent être les plus

intéressants pour notre étude, et représentent la cible du forage de reconnaissance pour ce secteur.



Illustration 6 : Localisation de la ligne sismique 3 acquise dans le secteur de Cabrials (Béziers Est) et des données disponibles (ligne sismique B9 et puits pétroliers B1, B2 et B3).



Illustration 7 : Log géologique simplifié des sondages B1, B2 et B3, avec position en profondeur des cibles calcaires.

L'interprétation de l'image sismique fournit les informations suivantes (Illustration 8) :

- du point 0 au point 300 du profil, les calcaires du Crétacé inférieur, reconnus dans le forage B1 dès 145 m de profondeur, sont recouverts de 150 à 180 m de Miocène ;
- plus au Nord (au-delà du point 350), à la faveur d'une faille normale, l'équivalent stratigraphique des calcaires du Crétacé inférieur se retrouve à plus de 300 m de profondeur, des calcaires du Crétacé supérieur s'intercalant entre le recouvrement miocène et les calcaires ciblés.



Illustration 8 : Interprétation de la ligne sismique 3 avec report des principaux éléments identifiés pour l'attribution stratigraphique des unités sismiques (secteur Cabrials, Béziers Est).

Compte tenu des données fournies par les sondages pétroliers (B1, B2 et B3) et de l'interprétation géologique de l'image sismique, le secteur favorable à l'implantation d'un forage de reconnaissance (représenté en pointillés sur l'Illustration 9 où figure l'emprise des parcelles du domaine « publique ») se situe entre le sondage pétrolier B1 et le point 300 du profil

sismique. Il englobe un périmètre restreint (figuré en train plein sur l'Illustration 9) défini autour du puits Béziers 1 pour lequel il y a un maximum de connaissance. L'ouvrage a été réalisé dans ce secteur, visiblement à proximité de B1 dont la position n'a toutefois pas été retrouvée sur le terrain. Le forage envisagé devrait recouper le toit des calcaires à une profondeur d'environ 140 - 150 m.



Illustration 9 : Proposition de zone pour l'implantation du forage Béziers Est et secteur retenu.

### 2. Forage de Béziers Ouest

Les travaux de forages ont été réalisés par l'entreprise FORADOUR, ils ont commencé fin aout 2014 à proximité de la chapelle Notre-Dame de la Consolation. La foration a débuté dans les niveaux marneux en Rotary diamètre 610 mm jusqu'à 29 m de profondeur, au niveau d'un banc calcaire massif. Un premier tubage acier de diamètre 508 mm a été mis en place et cimenté.

Après ce premier horizon calcaire d'environ 2 m d'épaisseur, la foration a repris en rotary diamètre 445 mm dans des horizons marno-calcaires jusqu'au toit des calcaires massifs situés à 48 m de profondeur. Un second tubage acier de diamètre 340 mm a été mis en place.

La foration s'est ensuite poursuivie en diamètre 219 mm dans les calcaires massifs jusqu'à 205 m de profondeur. L'ouvrage est resté en trou nu sur l'horizon 48 – 205 m. La coupe de l'ouvrage est présentée dans l'Illustration 11.



L'ouvrage a été déclaré en BSS, son code est : 10394X0168/CHAPEL.

Illustration 10. Forage Béziers Ouest (10394X0168/CHAPEL).

#### 2.1. DESCRIPTION DES ECHANTILLONS PRELEVES

Lors de la foration, des cuttings ont été prélevés et observés à l'œil nu et à la loupe binoculaire. Les observations des différents horizons sont synthétisées ci-dessous.

**De 0 à 9 mètres**, les cuttings correspondent à des argiles ocre-orange non carbonatées à éléments détritiques millimétriques à centimétriques siliceux, certains émoussés, d'autres non.

**De 9 à 10 mètres**, il s'agit d'un faciès argileux ocre, carbonaté à éléments détritiques allant jusqu'à 5 mm et présence de galets consolidés argileux.

**De 10 à 25 mètres**, les prélèvements sont des faciès marneux légèrement sableux de couleur grise avec quelques éléments détritiques de taille inférieure au millimètre.

**De 25 à 37 mètres**, il s'agit de faciès marneux légèrement sableux de couleur gris-beige avec localement des microfossiles.

**De 37 à 60 mètres**, absence de prélèvement, les cuttings ne se sont pas remontés (accumulation dans des vides au niveau de l'encaissant).

**De 60 à 205 mètres**, les cuttings correspondent à des calcaires gris microcristallins compacts (grains non visibles à l'œil nu). Dans certains niveaux (entre 151 et 170 mètres), les éléments des cuttings sont plus fins, une texture planaire suggère un faciès calcaire plus gréseux. Ces calcaires compacts sont entrelardés de microfissures (veines, passées ?) cimentées par des carbonates blancs opaques associés ou non à des ciments ocres carbonatés et plus rarement de fissures à calcite transparente. Entre 201 et 205 mètres, les faciès correspondent à un sable détritique très hétérogène à éléments millimétriques à centimétriques essentiellement carbonatés (faciès gris, bleu, transparents), les grains les plus fins sont émoussés, les plus grossiers plus anguleux. Ce faciès semble correspondre à un remplissage détritique karstique. Cette hypothèse est confortée par l'absence de prélèvement entre 190 et 201 mètres, ce qui pourrait correspondre à une cavité. Deux autres niveaux sableux sont présents à 121 mètres et entre 137 et 141 mètres. Ils sont d'aspects très différents : la fraction sableuse représente 40% avec de nombreux fragments anguleux de calcaires gris-bleu, la fraction fine est carbonatée. Ces niveaux pourraient correspondre à des faciès bréchifiés par une faille.

L'ensemble des informations recueillies est résumé dans les logs ci-après (Illustration 11 et Illustration 12).



Illustration 11. Coupe géologique Béziers Ouest – Notre-Dame.



Illustration 12. Coupe géologique Béziers Ouest - Notre-Dame et log du forage (FORADOUR).

De 10 m à 37 m, les faciès marneux légèrement sableux avec présence de bioclastes correspondent vraisemblablement à la molasse Miocène connue à l'affleurement et en sondage dans la région de Béziers. En deçà de 37 m, on note une absence de prélèvement. L'épaisseur minimale de ce Miocène (27 m) apparaît supérieure à celle interprétée dans la coupe sismique (une dizaine de mètres, voir Illustration 13). A partir de 60 m, les calcaires gris correspondent au Jurassique supérieur connu à l'affleurement. Des zones possiblement faillées sont observées à 121 m et entre 137 et 141 m. La présence de zones karstiques attestée par des sables détritiques est notée vers 200 m.



Illustration 13. Relation entre la coupe géologique du forage Béziers Ouest – Notre-Dame et l'interprétation de l'image sismique.

Le niveau piézométrique s'établit à 32 m de profondeur. De faibles arrivées d'eau ont été rencontrées entre 95 et 100 m de profondeur. Une estimation du débit a été réalisée à partir de 2 méthodes :

- un soufflage à 205 m de profondeur ;
- un pompage de courte durée à l'aide d'une pompe mise en place à 70 m de profondeur.

Ces deux essais convergent vers un débit de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/h. La température de l'eau égale à 18 °C présente une légère anomalie thermique. La conductivité électrique est comprise entre 0,8 et 0,9 mS/cm. Un prélèvement d'eau a été réalisé en fin de travaux, les résultats sont présentés en annexe 3. Les eaux du forage Béziers Ouest - Notre-Dame présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien selon la classification de Piper (cf. Annexe 3). Les eaux karstigues présentent des teneurs en sodium et chlorure comparables (de l'ordre de 48 mg/l) et des teneurs significatives en Lithium (11.5 µg) et Barium (69 µg/l). Les eaux présentent une anomalie en sodium, lithium et Barium. Si l'on compare les résultats aux valeurs mesurées dans les eaux les karsts jurassiques avoisinant (Lithium<2 µg/l et Barium<15 µg/l, Aguilina et al, 2013). Ces résultats suggèrent que les calcaires jurassigues du secteur d'étude sont influencés par mélange avec des eaux de socles minéralisées. Les signatures isotopiques du strontium permettent également de corroborer l'existence d'un mélange avec des eaux de socle car le rapport <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr des eaux du forage Notre-Dame est très élevé pour des eaux karstiques issues de calcaire jurassique (cf § 3.4.2, Illustration 39). Dans ce contexte, la faille inverse identifiée précédemment (cf. Illustration 13) pourrait constituer le vecteur du faible flux d'eau minéralisée en provenance du socle sous-jacent.

Aussi, au vu des faibles débits, il a été décidé de ne pas poursuivre les investigations sur cet ouvrage.

## 3. Forage Béziers Est - Cabrials

#### 3.1. COUPE DE FORAGE ET STRUCTURE DE L'AQUIFERE

Les travaux de forage ont commencé mi-octobre et ont duré 2 mois. La foration a débuté dans des horizons sableux puis marneux en rotary 610 mm de diamètre. Ce premier horizon aquifère sableux a été isolé et cimenté à l'aide d'un tube acier de 508 mm de diamètre, profond de 29 m. De 11 à 144 m le forage a traversé les formations marneuses et a atteint le toit des calcaires massifs. La foration a été réalisée en diamètre 445 mm, un tubage acier cimenté de 340 mm de diamètre a été mis en place jusqu'à 147 m. La foration s'est ensuite poursuivie au Marteau Fond de Trou (MFT) en diamètre 219 mm jusqu'à 252 m de profondeur, profondeur finale de l'ouvrage. Une zone bien karstifiée a été recoupée entre 147 et 150 m drainant une ressource importante (évaluée à plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>/h par soufflage). Une zone de fracture élargie et de conduit décimétrique a été recoupée sur plusieurs mètres au niveau du toit des calcaires. Un réalésage au diamètre 311 mm a été ensuite réalisé dans ces formations jusqu'à 252 m. Les horizons calcaires restent en trou nu.

L'ouvrage a été déclaré en BSS, son code est : 10401X0367/CABRIALS.

Les cuttings du forage de Béziers-Est ont été observés à l'œil nu et à la loupe binoculaire, les observations relatives aux différents horizons sont consignées ci-dessous.

**De 0 à 3 m**, les cuttings correspondent à des limons faiblement sableux et carbonaté à rares éléments détritiques (Quartz) de taille millimétrique.

**De 4 à 7 m**, les échantillons sont des sables grossiers de la taille des arénites à éléments de quartz, calcaires et grès rouges dans une matrice ocre légèrement sableuse et carbonatée.

**De 7 à 150 m**, les fragments sont des argiles grises légèrement sableuses avec quelques fragments coquilliers; rares éléments détritiques – Marnes.

**De 151 à 180 m**, les fragments sont pour l'essentiel (80-85 %) des calcaires blancs, à blancgris, des fragments d'argiles fines grises (marnes) et quelques calcaires noirs (taille <mm).

**De 181 à 200 m**, les fragments comprennent pour l'essentiel nombreux fragments de calcaires blancs, à gris-beige (80-85%), quelques fragments (taille <mm) de calcaires noirs (15-20%).

**De 201 à 218 m**, les fragments sont constitués pour 50-60% de calcaires blancs-gris laiteux, pour 50-40% de fragments gris (marnes), et pour le reste de quelques fragments de calcaires noirs (taille inférieure au mm), quelques fragments infra millimétriques de roches noires indéterminées, quelques fragments coquilliers.

**De 219 à 252 m**, les fragments sont pour l'essentiel (>95%) des calcaires blancs-gris laiteux avec quelques fragments de calcaires noirs (taille inférieure au mm), quelques fragments de roches grises, quelques fragments de roches noires, quelques fragments coquilliers et quelques sulfures.

Les informations sont synthétisées dans le log géologique ci-dessous (Illustration 14).



Illustration 14. Log du forage Béziers Est - Cabrials.



Illustration 15. Coupe géologique Béziers Est - Cabrials (FORADOUR)

L'analyse des cuttings positionne le toit des calcaires à 150 m alors que sur le terrain le forage a recoupé le toit des calcaires des 146 m. La différence de profondeur est liée au mode d'échantillonnage des cuttings avec un décalage dans le temps entre la foration et la remontée des cuttings. Le toit des calcaires serait donc à 146 m de profondeur.

L'épaisseur des marnes miocènes d'environ 140 m est conforme avec celle reconnue dans le forage Béziers1 et légèrement inférieure à celle observée sur l'image sismique interprétée (environ 170 m). Entre 150 et 252 m, s'observent des calcaires blancs-gris. Des horizons plus marneux s'intercalent entre les bancs calcaires massifs aux profondeurs 150-180 m et 200-218 m. L'interprétation de ces niveaux marneux a été confrontée à celle proposée sur forage pétrolier de Béziers1 suite aux observations réalisées lors de sa réalisation.

Ainsi, dans le sondage de Béziers1, un carottage effectué entre les niveaux 145 et 162 m indique que les faciès rencontrés sont des calcaires blancs attribués à l'Aptien (Crétacé inférieur) à diaclases colmatées par des marnes bleu-vert. D'autres diaclases présentent des carbonates géodiques. Les diagraphies du forage de Béziers-Est et du forage B1 présentent une allure similaire entre 160 et 180 m avec des pics de résistivité reflétant la présence de zones plus marneuses. La diagraphie du forage B1 présente d'autres pics de résistivité entre 185-200 m, 210-220 m à 230 m et 240 m. Dans le forage de Béziers-Est, le pic de résistivité est atteint vers 200 m (voir Illustration 19). La corrélation des diagraphies, des faciès suggèrent une équivalence entre ces deux forages. Les passées marneuses observées correspondraient alors à des remplissages marneux de fractures ouvertes et petits conduits. Par ailleurs, l'inspection vidéo confirme sur cet horizon la continuité des bancs calcaires. Des traces de karstification importante sur les deux zones observées à la vidéo et la présence de marnes dans les cuttings confirment le remplissage par les marnes d'anciens réseaux karstiques.

La comparaison des descriptions lithologiques entre le forage BZ1 et les cuttings observés dans le forage Béziers-Est suggère une similitude de faciès. L'âge de cette formation est discuté. Elle est considérée aptienne dans le sondage BZ1. Selon Coueffé et al. (2011), un âge barrémoaptien ne peut être exclu bien que les sondages profonds analysés montrent l'absence quasisystématique du Crétacé inférieur.



Illustration 16. Comparaison des forages Béziers Est – Cabrials et Béziers 1.

Une première approximation du débit est obtenue à partir du soufflage à 250 m de profondeur. Lors de cet essai il y avait plus de 200 m<sup>3</sup>/h évacués. Compte tenu de ce débit important et de la nature bien karstifiée des premiers horizons calcaires rencontrés (vides importants), il a été décidé de ne pas procéder à la phase d'acidification et de réaliser directement les diagraphies et essais de pompage.

Les premières informations de terrain, montrent une charge hydraulique importante dans l'aquifère, avec des niveaux piézométriques du karst crétacé qui s'établissent à moins de 10 m de profondeur par rapport au terrain naturel. L'eau présente une forte anomalie thermique (température comprise entre 25 et 27°C) ainsi qu'une minéralisation importante (conductivité électrique corrigée à 25°C égale à 2,9 mS/cm) et quelques pourcents de CO<sub>2</sub> dissous.

#### 3.2. DIAGRAPHIES

Les diagraphies ont été réalisées par l'entreprise Hydro Assistance le 11 décembre 2014 (Illustration 17). Le rapport des diagraphies est fourni en annexe 1. Les niveaux piézométriques avant la diagraphie étaient à 8,5 m. A partir de 218 m des éboulis obstruent la base du forage, les différentes sondes utilisées ont étés descendues jusqu'à cette profondeur. Les diagraphies suivantes ont été réalisées :

- Diagraphie de production naturelle :
  - Température, conductivité, flux : de 12 à 218 m.

- Diagraphie de production en pompage (pompe de diamètre 8", positionnée à 58 m de profondeur, débit pompé 105 m<sup>3</sup>/h) :
  - Température, conductivité, flux : de 12 à 218 m.
- Autres diagraphies :
  - Gamma-Ray : de 0 à 218 m.
  - · Résistivités RLLS et RLLD : de 147 à 218 m.
  - Diamétreur : de 0 à 218 m.



Illustration 17. Mise en œuvre des diagraphies sur le forage Béziers Est Cabrials par Hydro Assistance.

Les résultats synthétiques des diagraphies sont fournis dans l'Illustration 19.
### 3.2.1. Examen endoscopique

L'examen endoscopique de l'ouvrage a permis une observation de la roche en place ainsi qu'une localisation précise des zones de fissures et de conduits



Illustration 18). Une zone à forte karstification se situe entre 147 et 160 m (présence de petits conduits et fractures élargies).



Illustration 18. Photographies d'une zone bien karstifiée située entre 158.5 et 159.2 mètres

#### Diamétreur

Sur la partie tubée (juqu'à 147 m de profondeur) le diamétreur montre la régularité du tubage. Les zones de vides associées aux conduits karstiques et fractures sont bien imagées entre 147 et 162 m. D'autres zones de fractures / conduits sont identifiées à 182 m puis entre 211 et 218 m.

#### 3.2.2. Les diagraphies de production naturelle

Les profils enregistrés en régime statique révèlent l'existence d'un flux naturel transversal se produisant sur les zones productrices localisées entre 147-150 m et 157-162 m.

#### 3.2.3. Les diagraphies en pompage

Une mesure de flux a été réalisée à un débit de pompage moyen de 120 m<sup>3</sup>/h. La dépression produite par 1h de pompage (au début de la diagraphie) a permis de répartir la distribution des arrivées d'eau de la manière suivante :

#### - 43,8 % du débit sont produits entre 147 et 150 mètres ;

- 4,7 % du débit sont produits entre 150 et 157 mètres ;
- 26,2 % du débit sont produits entre 157 et 162 mètres ;
- 10,5 % du débit sont produits entre 162 et 218 mètres ;
- 14,8 % du débit sont produits entre 218 et le fond de l'ouvrage à 250 mètres.

On retiendra ainsi que 75 % du débit provient de la zone de conduit et fracture comprise entre 147 et 162 m.

## 3.2.4. Diagraphies différées

Les différents types de diagraphies différées réalisées dans le forage Béziers Est - Cabrials sont :

- gamma-ray (très bon marqueur de l'argilosité) ;
- résistivité (bon indicateur des changements de lithologie) ;
- CBL/VDL (contrôle cimentation).

Le profil obtenu par la diagraphie gamma-ray (très bruité), révèle la présence de deux milieux distincts, avec des valeurs plus fortes sur la partie tubée de 0 à 125 m qui diminuent progressivement de 125 à 145 m (profondeur du toit des calcaires) et restent ensuite sur des valeurs faibles jusqu'à 218 m. On observe ainsi le changement de lithologie avec les niveaux marneux dans la partie supérieure de l'ouvrage surmontant les calcaires.

Le profil obtenu par résistivité a, quant à lui, révélé des contrastes marqués entre les blocs calcaires et les niveaux karstifiés plus argileux. Des valeurs faibles de la résistivité sont obtenues sur les horizons 147-150 m, 157-162 m, 180-183 m, 188-191 m et 208-218 m et correspondent à des passées argileuses, révélatrices de l'existence de fissures ouvertes et de cavités où se sont agglomérés des sédiments de remplissage karstique de type marneux. Ces

niveaux karstifiés entrecoupent les horizons calcaires plus compacts (signal plus homogène de plus forte résistivité enregistré).

#### 3.2.5. Apport de la diagraphie : conclusions

Les diagraphies réalisées, montrent à la base du tube cimenté à 147 m de profondeur, la présence d'une zone fortement karstifiée associée à la présence de petits conduits et de fractures ouvertes. Cette zone de 15 m d'épaisseur draine une ressource importante dont la production représente les <sup>3</sup>/<sub>4</sub> des capacités de l'ouvrage. En dessous, les calcaires sont plus massifs avec toutefois quelques niveaux fracturés localisés autour de 182 et 218 m de profondeur. Ces niveaux ne sont toutefois pas associés à des venues d'eau massives. Les arrivées d'eau en dessous de 162 m semblent plus diffuses.

# HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Diagraphies

Commune : Béziers (34) Forage neuf "Sud-Est"



Illustration 19. Résultats des diagraphies réalisées par Hydro Assistance sur le forage Béziers Est - Cabrials



	11 déc	cembre 2014
Diamètre en X 100 Diamètre en Y	(mm)	400
400	(mm)	100
		Ē
1		ř –
1		L
1		F
1		
		<u>د</u>

# 3.3. REALISATION DES ESSAIS DE POMPAGE

Deux essais de pompage ont été réalisés, le 16 décembre (paliers) et du 17 au 26 décembre 2014 (longue durée). Le longue durée a débuté le 17 décembre et a duré 121 h (fin le 22 décembre), la remontée a été suivie du 22 au 26 décembre. L'objectif de ces essais est d'évaluer les propriétés de l'aquifère à proximité du forage Béziers Est – Cabrials. La mise en œuvre des essais de pompage a été réalisée par l'entreprise « FORADOUR », le BRGM en a assuré le suivi.

L'essai de pompage dit par paliers de débit (quatre paliers aux débits croissants de 100, 120, 150 et 185 m<sup>3</sup>/h d'une heure suivis d'une heure de remontée) a permis de déterminer les caractéristiques du puits, c'est-à-dire d'apprécier la qualité des échanges entre le forage et l'aquifère. L'essai de pompage de longue durée (121 h de pompage au débit moyen de 165 m<sup>3</sup>/h) a permis de caractériser les propriétés de l'aquifère. L'interprétation des essais de pompage a été effectuée d'une part à l'aide d'une analyse qualitative des courbes de rabattement, et d'autre part par des modèles mathématiques permettant de simuler les rabattements observés pendant et après le pompage.

Le matériel mis en place pour réaliser le pompage d'essai (Illustration 20) est décrit comme suit :

- une pompe immergée 63 KW de diamètre 10", mise en place au niveau de la chambre de pompage à 95 m de profondeur. Le débit nominal de la pompe est de 192 m<sup>3</sup>/h à 80 m ;
- un groupe électrogène d'une puissance de 400 kW et un câble électrique d'alimentation ;
- une colonne d'exhaure de 13 m en tubes acier raccordés par brides d'un diamètre de 112,5 mm;
- deux tubes guides en PVC en diamètre 25 mm pour la sonde de niveau autonome, installée à 80 m de profondeur, et pour les mesures piézométriques manuelles ;
- un piquage sur la colonne d'exhaure pour les prélèvements et l'alimentation d'un sceau dans lequel sont immergées les sondes pour les mesures de conductivité électrique, température et pH;
- un débitmètre électromagnétique monté sur la conduite d'exhaure entre longueurs droites normalisées avec un affichage muni d'une sortie analogique 4-20 mA ;
- et une vanne de régulation de débit.



Illustration 20. Photographie annotée du matériel mis en place à Béziers Est - Cabrials pour les essais de pompage de décembre 2014.

# 3.3.1. Essai par paliers de débit

# Descriptif

L'essai par paliers de débit a été réalisé le 16/12/2014. Quatre paliers de débit ont été réalisés. Le premier, au débit de **103 m<sup>3</sup>/h**, n'a duré que 20 minutes et a été arrêté brusquement en raison du démanchement du tuyau d'exhaure (entre la tête de puits et le débit mètre). Ce démanchement est lié à une surpression dans la conduite pour de trop faible débit. L'essai par paliers de débit a donc été poursuivi avec des débits plus importants. Trois autres paliers d'une heure interrompus par une heure de remontée des niveaux d'eau ont donc été réalisés. Ces paliers ont été conduits à **120 m<sup>3</sup>/h**, **150 m<sup>3</sup>/h et le dernier à 183 m<sup>3</sup>/h.** Le niveau statique initial avant le premier essai est situé à 8,46 m de profondeur.

Les niveaux d'eau dans l'ouvrage et les débits pompés ont été suivis en continu à l'aide d'enregistreurs. En parallèle, un suivi manuel des niveaux a été réalisé afin de vérifier la qualité des données des enregistreurs automatiques (Illustration 21). Les données manuelles et des enregistreurs automatiques sont confondues, les données automatiques sont donc de bonne qualité.



Illustration 21. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage par paliers de débit (16/12/2014). Mesures automatiques et manuelles.

## Interprétation de l'essai par paliers de débit

Les essais de puits ou essais par paliers de débit sont destinés à estimer les pertes de charge quadratiques liées au puits. Elles se traduisent par un rabattement de pression additionnel dû à l'équipement du forage et/ou à la qualité des échanges hydrauliques entre le forage et l'aquifère. Ces essais ont été interprétés suivant la méthode de Jacob (Cooper et Jacob, 1946), où le rabattement, s, à la fin de chaque palier est décrit par la relation suivante :

#### s=BQ+CQ<sup>2</sup>

où B est le coefficient de pertes de charge linéaires (liées à l'aquifère ; en m<sup>-3</sup>.s), C le coefficient de pertes de charge quadratiques (liées au puits ; en m<sup>-5</sup>.s<sup>2</sup>), s le rabattement en m après un certain temps de pompage (en général 1 ou 2 heures) et Q le débit de chacun des paliers.

Le tableau de l'Illustration 22 présente les valeurs de débit des trois paliers de 60 min et les valeurs de rabattement après 1h de pompage correspondantes.

	B (1.1)	
	Debit	Rabattement apres
	(m³/h)	60 min (m)
Palier 1	120	25,28
Palier 2	150	36,19
Palier 3	183	50,7

Illustration 22. Résultats de l'essai par paliers de débit (Béziers Est-Cabrials, 16/12/2014).

L'interprétation de l'essai est fournie par l'Illustration 23. Le coefficient C, de l'ordre de 13 000 m<sup>-5</sup>.s<sup>2</sup> est attendu pour ce type de formation, il traduit de relativement bons échanges entre le puits et l'aquifère. B est plutôt faible (300 m<sup>-3</sup>s) ce qui traduit la bonne perméabilité de l'aquifère. Le rabattement au bout de 60 minutes de l'essai de longue durée est aussi reporté sur la figure, il se situe sur la courbe « s simulé » indiquant que ni développement, ni colmatage n'ont eu lieu après le dernier palier. Ces essais, y compris le tout premier palier à 103 m<sup>3</sup>/h, ont par la suite étés modélisés.



Illustration 23. Interprétation de l'essai par paliers de débit sur Béziers Est-Cabrials.

## 3.3.2. Essai de longue durée

## Descriptif

Cet essai s'est déroulé du 17 décembre au 26 décembre, en deux phases :

- une phase de pompage du 17 à 9h35 au 22 décembre à 11 h, d'une durée de 121 heures. Le débit a évolué entre 170 et 180 m<sup>3</sup>/h en début de pompage et a trés rapidement stabilisé vers 165 m<sup>3</sup>/h. Deux interruptions du pompage, 1h le 18/12 et 30 minutes le 20/12, ont eu lieu suite à des pannes de générateur ;
- une phase de remontée du 22 au 26 décembre (94 heures); une mesure manuelle a également été réalisée le 05/01/2015 (niveau = 8,32 m).

L'Illustration 24 présente les suivis automatiques et manuels de la profondeur du niveau d'eau et du débit de pompage durant l'ensemble des essais.



Illustration 24. Evolution des niveaux et du débit durant l'essai de longue durée réalisé en décembre 2014 sur Béziers Est-Cabrials. Mesures automatiques et suivis manuels des niveaux.

Durant l'essai longue durée, le niveau se stabilise rapidement vers 60-61 m de profondeur, soit un rabattement d'environ 52-53 m, pour un débit d'environ 165  $m^3/h$ .

La conductivité électrique (corrigée à 25°C) est restée stable à 2,9 mS/cm. La température a augmenté régulièrement et est passée de 25,5 à 26,5°C (Illustration 25). L'eau pompée a par contre toujours été laiteuse (marnes ou argiles en suspension) avec un peu de  $CO_2$  dissous (quelques pourcents).



Illustration 25. Evolution de la conductivité et de la tempèrature, Béziers-Est Cabrials lors de l'essai de longue durée.

Avant modélisation de l'essai et donc simulation du débit d'exploitation, l'essai a été diagnostiqué afin de caractériser le type d'aquifère sollicité.

## Présentation de la méthode de diagnostic des essais par pompage

La méthode mise en œuvre pour l'interprétation des tests hydrauliques réalisés sur le forage Béziers Est - Cabrials est décrite dans le schéma suivant (Illustration 26).



Illustration 26. Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai.

Le diagnostic repose sur l'interprétation de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements (d(s)/d(ln(t)) ; à la descente et/ou à la remontée), qui représente tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet *et al.*, 1983, 1989 ; Spane and Wurstner, 1993). L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère (et type de configuration forage-aquifère), il correspond un certain régime ou une succession de certains régimes d'écoulement qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck *et al.*, 1992 ; Schlumberger, 2002).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage de la dérivée afin d'augmenter le rapport signal sur bruit (engendré soit par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de la sonde de mesure des niveaux). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles. Par contre, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, comme c'est le cas ici, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul de la dérivée. On obtient ainsi une courbe type qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, pertes de charge, ...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fractures, double porosité, etc.), de sa géométrie (effet de limites) et des éventuelles relations entre l'aquifère capté et les aquifères de subsurface (effet de drainance par exemple). Enfin, une fois le diagnostic posé, l'estimation des paramètres de l'aquifère est réalisée à partir du modèle mathématique le plus approprié. Puis, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée.

A partir de la courbe des dérivées, il est déjà possible d'estimer les paramètres hydrodynamiques, en particulier la transmissivité de la formation captée lorsqu'un écoulement radial cylindrique est atteint.

#### Diagnostic et modélisation des essais sur le forage Béziers Est - Cabrials

Le diagnostic de l'essai a été réalisé à partir des données de rabattement normalisé de la descente (points rouges) et de la remontée (points bleus) de l'essai de longue durée (Illustration 27).

L'allure des courbes est similaire, leur analyse montre :

- du début de l'essai à environ 20 minutes : un effet de capacité de puits, pouvant refléter l'effet d'une fracture verticale ;
- de 20 à environ 200 minutes : un écoulement radial à partir du quel la transmissivité de l'aquifère est estimée à 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s ;
- et de 200 minutes à la fin de l'essai : la dérivée diminue, indiquant un stabilisation du rabattement. Cette stabilisation peut être liée à la présence de formations semi-perméables (effet de drainance) et/ou à la présence d'une limite alimentée qui pourrait être liée à un vide de karstique notable ou une zone très fracturée situé à proximité du forage.

Ce diagnostic montre que l'aquifère capté a une transmissivité de l'ordre de 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s, et qu'il est soumis à des effets de drainance et/ou situé à proximité d'une limite alimentée. Deux modèles mathématiques ont été utilisés pour reproduire les courbes de rabattement et de dérivée : modèle avec effet de drainance (type Hantush et Jacob) et, modèle fracture verticale avec une limite alimentée. Seul le deuxième modèle (courbes bleues pleines et en tirets, lllustration 27) a permis de reproduire fidèlement avec des paramètres réalistes les courbes de

rabattement et de dérivées. L'utilisation d'un modèle à effet de drainance (non présenté sur l'illustration) a donné de bon résultats et des valeurs d'emmagasinement supérieures à 0,9, ce qui est, même pour une interprétation au puits, bien trop important (on s'attend pour ce type d'aquifère à des valeurs inférieures à 10<sup>-3</sup>). Le modèle choisi pour interpréter l'essai est donc le modèle avec fracture verticale unique (solution de Gringarten, Gringarten et al., 1972) auquel a été ajouté l'effet d'une limite alimentée ; dans ce modèle la limite est orthogonale à la fracture. Les effets de puits, effet de capacité du puits et pertes de charges, ont aussi été intégrés à la modélisation. Les paramètres du modèle présenté en Illustration 27 sont fournis dans le tableau de l'Illustration 51.



Illustration 27. Diagnostic de l'essai de longue durée (17-22/12/2014), Béziers-Est Cabrials.

Les Illustration 28 etIllustration 29 présentent les résultats de la modélisation de l'essai par paliers de débit et du pompage de longue durée. Le modèle choisi reproduit convenablement le rabattement observé et sa dérivée. Les paramètres (Illustration 30) sont identiques dans les deux cas, aux pertes de charge quadratiques près (légèrement plus importante pour le longue durée mais sans différence significative). Aussi, la transmissivité de l'aquifère est évaluée à 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s et son emmagasinement à 8.10<sup>-4</sup>. Notons que la valeur de l'emmagasinement estimée au puits de pompage, même si réaliste, n'est pas forcement juste à cause des effets liés au puits (capacité, pertes de charge); seule l'observation du rabattement sur un piézomètre d'observation aurait permis une bonne estimation de ce paramètre. La demi-longueur de fracture est estimée à 40 m, et l'effet de la limite alimentée se fait ressentir au bout de 250 min de pompage. La distance à la limite (en m) est estimée à 274 m, cependant comme elle dépend de la valeur de l'emmagasinement, cette distance peut aussi être erronée ; par contre la distance en minutes est juste.



Illustration 28. Modélisation de l'essai par paliers de débit, Béziers-Est Cabrials16/12/2014 . Modèle : Gringarten+ limite alimentée.

Graphique du haut : rabattement observé et modélisé (s) en représentation log-log avec figuration des dérivées observées et modélisées (s' ; valeurs absolues). Graphique du bas : représentation arithmétique.



Illustration 29. Modélisation de l'essai longue durée, Béziers-Est Cabrials17-22/12/2014 . Modèle : Gringarten+ limite alimentée.

Graphique du haut : rabattement observé et modélisé (s) en représentation log-log avec figuration des dérivées observées et modélisées (s' ; valeurs absolues). Graphique du bas : représentation arithmétique.

	Cabrials_16/12/2014	
	(paliers)	Cabrials_17-22/12/2014
Rayon de l'ouvrage (m)	0,155	0,155
Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	1.00E-03	1.00E-03
Emmagasinement (-)*	8.00E-04	8.00E-04
demi-long. fracture verticale (m)	40,0	40,0
dist. lim. Alimentée (min)	250,0	250,0
dist. lim. Alimentée (m)*	273,9	273,9
Pertes de charge quadratiques (m <sup>-5</sup> s <sup>2</sup> )	12500	13000
Effet capacité (m)	0,4	0,4

Illustration 30. Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation de l'essai sur le forage Béziers Est-Cabrials (17-22/12/2014) ; modèle : Gringarten+ limite alimentée. \* la valeur indiquée (emmagasinement et distance aux limites en m) correspond à un paramètre de calage, sans forcément de signification physique.

## Simulation de débits d'exploitation

Le modèle mathématique utilisé pour la modélisation des essais (Gringarten + une limite alimentée) a été utilisé pour estimer le débit d'exploitation de l'ouvrage. A cet égard, huit débits ont été testés sur une période de 1 an (pompage 24h/24, 7j/7) : 150, 175,180, 200, 225, 250, 275 et 300 m<sup>3</sup>/h (Illustration 31 et Illustration 32). Notons que le modèle utilisé ne tient pas compte de la recharge par les précipitations. Il est donc possible que les niveaux simulés soient surestimés (estimation pessimiste par rapport à la réalité).

La profondeur du niveau admissible maximal, soit la côte de niveau d'eau à ne pas dépasser pendant le pompage, est fixée à 140 m de profondeur, ce qui laisse un espace pour la pompe compris entre 140 et 147 m, 147 m étant la base de la chambre de pompage. En terme de rabattement et en faisant l'hypothèse d'un niveau d'eau initial (c.à.d. sans pompage) aux alentours de 10 m de profondeur (8,4 m durant les essais), le rabattement maximum admissible est évalué à 130 m. C'est cette valeur qu'il ne faudra pas dépasser pendant les simulations. Les Illustration 31 et Illustration 32 présentent les résultats des simulations, et montrent que le forage de Béziers Est-Cabrials a une très bonne potentialité, bien au-delà des débits qui ont été testés.

En théorie, le débit d'exploitation maximal se situe aux alentours de 275 m<sup>3</sup>/h. Cependant, en pratique l'ouvrage n'a été testé que jusqu'à 180 m<sup>3</sup>/h (dernier palier de débit) ce qui ne permet pas de se prononcer pour des débits supérieurs. En l'état actuel des connaissances sur cet ouvrage, il est conseillé un débit maximal de 180 m<sup>3</sup>/h (pompage 24h/24, 7j/7), ce qui représente un prélèvement annuel aux alentours de 1,58 Mm<sup>3</sup>. A ce débit, le niveau d'eau devrait rapidement stabiliser vers 71 m de profondeur permettant d'assurer un fonctionnement correct de la pompe.

Si un débit d'exploitation supérieur à ce dernier était souhaité, il serait alors préférable de conduire d'autres tests (paliers et longue durée) dans la gamme de débits envisagés.



Illustration 31. Simulations du débit d'exploitation du forage Béziers Est-Cabrials ; modèle : Gringarten+ limite alimentée.

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Rabattement max au bout de 365 j (m)	dont pertes de charge liées au puits (m)	Estimation de la prof. du niveau d'eau au bout de 365 j (m)*	Prélèvements sur un an (Mm <sup>3</sup> )
150	46.54	22.57	56.54	1.31
175	58.69	30.72	68.69	1.53
180	61.27	32.50	71.27	1.58
200	72.08	40.12	82.08	1.75
225	86.74	50.78	96.74	1.97
250	102.64	62.69	112.64	2.19

Illustration 32. Synthèse des scénarios de débit. \* le calcul de la profondeur du niveau d'eau est basé sur une profondeur du niveau initial à 10 m. En gras, le débit d'exploitation maximal conseillé en l'état actuel des connaissances sur cet ouvrage.

# 3.4. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DE LA RESSOURCE

# 3.4.1. Données acquises

Deux échantillons d'eau ont été prélevés au cours du pompage longue durée en vue d'analyses chimiques et isotopiques. Les paramètres physico-chimiques sont rassemblés dans l'Illustration 33.

Nom	Date	Q (m3/h)	T (°C)	C (mS/cm)	рН	Eh (mV)	O2 (mg/l)	% Gaz*
F.Cabrials1	18/12/14 14h30	168	25.3	2.9	6.19	188	1.6	6
F.Cabrials2	22/12/14 09h00	172	26.5	2.8	6.15	172	0.6	5

\*Mesure du CO2 dissous au Karat (% volumique)

#### Illustration 33. Paramètres physico-chimique mesurées lors des prélèvements.

Les analyses effectuées sont : majeurs, traces, isotopes de l'eau (<sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H,<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O), isotopes du strontium (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr), du lithium (<sup>7</sup>Li/<sup>6</sup>Li) du bore (<sup>11</sup>B/<sup>10</sup>B), isotopes du sulfate (<sup>34</sup>S/<sup>32</sup>S, <sup>18</sup>O/<sup>2</sup>H), l'activité tritium et les gaz dissous CFC et SF6. Les résultats sont rassemblés en annexe 3. La présence de CO2 dissous dans les eaux ne permet pas l'utilisation de l'activité carbone 14 pour la datation des eaux, ces analyses initialement prévu dans le projet n'ont donc pas été réalisées.

En fin de pompage (22/12/14 à 10h), le Laboratoire Santé Environnement Hygiène de Lyon - CARSO a prélevé des échantillons en vue de l'analyse des phytosanitaires. Cette analyse a révélé l'absence de ces substances (voir annexe 2). A noté également qu'il n'y a pas de traces de nitrates, ni de pesticides.

Les eaux du forage Cabrials présentent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien selon la classification de Piper (cf. Annexe 3). Les teneurs en chlorures (468 mg/l) et sodium (274 g/l) mesurées sont supérieures aux normes de potabilité (qualité) sur l'eau brute (<200 mg/l pour ces paramètres).

# 3.4.2. Interprétation des résultats chimiques et isotopiques

## Avant-propos

Nous présentons dans ce paragraphe un éclairage géochimique sur le contexte hydrogéologique du secteur d'étude dans le but de préciser le schéma conceptuel de fonctionnement de la ressource en eau pompée par le forage de Cabrials. L'approche méthodologique consiste à replacer le contexte géochimique de l'aquifère (carbo-gazeux et thermal) dans le contexte régional proche en utilisant et valorisant les données chimiques disponibles sur les eaux des différents systèmes aquifères de la zone d'étude.

La caractérisation hydrogéochimique a été réalisée d'une part, sur la base d'une **A**nalyse en **C**omposantes **P**rincipales (ACP)<sup>1</sup> sur les résultats de cette étude et les analyses géochimiques disponibles sur les autres systèmes aquifère et d'autre part, par l'interprétation des diagrammes binaires qui permet la comparaison d'information apportées par deux éléments chimiques.

L'approche méthodologique repose dans un premier temps sur l'identification et la caractérisation de la signature de l'eau de recharge qui contribue à alimenter les aquifères. Dans un second temps elle permet la caractérisation de la « référence naturelle » qui n'a pas subie l'influence d'apports anthropiques afin de qualifier les processus de minéralisation de l'eau uniquement due à l'interaction eau-roche. L'approche d'interprétation des données géochimiques (éléments majeurs) repose sur l'utilisation de diagramme binaire permettant l'identification des pôles géochimiques et la mise en évidence des processus de mélanges d'eau, lorsqu'ils existent. Les informations apportées par chaque traceur sont ensuite confrontées les unes aux autres dans le but de conceptualiser le fonctionnement hydrogéochimique de l'hydrosystème étudié et d'identifier les principaux processus chimiques qui contribuent à expliquer les minéralisations observées. Cette analyse s'appuie également sur les informations isotopiques.

# Bilan des informations géochimiques disponible sur les différents types d'aquifère du secteur d'étude.

L'étude a consisté dans un premier temps en une compilation des données chimiques et isotopiques de la zone d'étude afin de définir les différents pôles géochimiques susceptibles d'expliquer le chimisme des eaux du forage Cabrials :

- aquifères du jurassique supérieur situés sous couverture et captés par les ouvrages profonds de Pézenas et Castillonne (Aquilina et al, 2002), aquifère jurassique thermal de Balaruc et non thermal de la masse d'eau (Aquilina et al, 2002, 2003, Ladouche et al, 2011, 2012)
- aquifère du jurassique moyen situé sous couverture et capté par l'ouvrage profond Antigone à Montpellier (BRGM/83-SGN-295, BRGM/92-LRO-963-PR),
- aquifère crétacé situé sous couverture à Vergèze à proximité de la faille de Nîmes et capté par l'ouvrage F40b (eau chaude à 29°C et carbogazeuse, Batiot-Guilhe et al, 2012, BRGM/RP61013-FR)
- pole socle carbogazeux de Lamalou (Lamotte et al., 2011, BRGM/RP59921-FR) et de la source de Sallièges à Florac (08868X0063, Batiot-Guilhe et al, 2012, BRGM/RP-61013-FR)
- poles géochimiques régionaux du trias (halite et gypse) à partir des sources de Salz (10777X0005), Mouillère (10901X0003) et de la Fou situées dans les Corbières et de la

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> L'ACP est une technique mathématique classiquement utilisée pour la compression et la classification des données : elle consiste à transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées" en statistique) en nouvelles variables indépendantes les unes des autres (donc "non corrélées"). Ces nouvelles variables sont nommées "composantes principales" (CP), ou axes, elles permettent de réduire l'information en un nombre de composantes plus limité que le nombre initial de variables. L'utilisation la plus commune de l'ACP est de fournir, à partir de données décrites par un grand nombre de variables quantitatives, des représentations **planes** (et donc interprétables visuellement) aussi fidèles que possible. Pour cela, on projette ces données sur des **plans factoriels**, chaque plan étant défini par une paire de Composantes Principales prises parmi les premières CP (CP expliquant le maximum de variance).

source Fontereboule située dans la reculée du Lodévois sur la commune de Lauroux (Batiot-Guilhe et al, 2012, BRGM/RP61013-FR)

- pole pluie à partir des précipitations échantillonnées entre 1996 et 1998 à l'est du fleuve Hérault (Ladouche et al, 2009).

#### Caractérisation géochimique de la ressource

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les résultats des analyses disponibles dans le secteur d'étude a été réalisée en incluant les informations géochimiques du contexte régional. Cette analyse statistique permet de traiter des tableaux de données quantitatives pour réduire la dimensionnalité concernant les principaux facteurs d'interaction entre variables et représenter graphiquement ces interrelations.



Illustration 34 : Analyse en composantes principales sur les résultats des éléments majeurs (Cl, Na, K, Ca, Mg, SO4, NO3, HCO3), traces métalliques (Fe, Mn), température, pH et conductivité des eaux.

Les variables corrélées à **la composante principale 1** (*CP1 : 65 % de variance expliquée,* Illustration 34*a*) permettent d'identifier les eaux par leurs minéralisations en *Cl, Na, SO4 et Mg.* **La composante principale 2** (*CP2 : 19 % de variance expliquée,* Illustration 34*a*) permet de distinguer les eaux riches en HCO3 en contexte de socle carbogazeux et dans une moindre mesure riches en potassium (K). **La composante principale 3** (*CP3 : 11.6 % de variance expliquée,* Illustration 34*b*) permet de distinguer les eaux riches en calcium (Ca) et sulfate (SO4).



- 1 : Pôle pluie (Ladouche et al, 2009)
- 2 : Pole gypse "reculée du Lodevois" (BRGM/RP61013-FR)
- 3 : Pole gypse "Corbières" (BRGM/RP61013-FR)
- 4 : Forage thermal F9 de Balaruc (Aquilina et al, 2002)
- 5 : Pole halite "Corbières" (BRGM/RP61013-FR)
- 6 : Socle carbogazeux "froid" (Sce Salièges à Florac, BRGM/RP40509-FR)
- 7 : Socle carbogazeux "chaud" (Lamalou-les-Bains, BRGM/RP59921-FR)
- 8 : Jurassique sous couverture (Forage Antigone, Montpellier, BRGM 83-SGN-295)
- 9 : Jurassique sous couverture (Forage Pezenas, Castillonne, Fontcaude, Aquilina et al.2002)

F40b: Crétacé sous couverture (forage gaz, Perrier, BRGM/RP61013-FR)

#### Illustration 35 : ACP : Projection des échantillons dans les plans factoriels 1-2 et 1-3

La projection des différents échantillons sur le plan factoriel 1-2 (Illustration 35), permet d'individualiser très nettement les différents pôles géochimiques. Dans cette représentation, on montre que les eaux du forage de Cabrials se rapprochent des eaux profondes échantillonnées au forage Antigone à Montpellier. Les eaux du forage de Cabrials apparaissent toutefois plus minéralisées et également influencées par une composante de CO2 profond issue du socle profond sous-jacent. Les eaux du forage Notre-Dame apparaissent comparables aux eaux jurassiques situées sous couverture à Pézenas et Castillonne.

Les eaux du forage de Cabrials et de Notre-Dame apparaissent également influencées par une source de sulfate comme le montre la position des points dans le diagramme binaire SO4 vs Cl (Illustration 36). L'examen des quelques données isotopiques disponibles sur les isotopes du souffre<sup>2</sup> indique clairement que **la source de sulfate dans les eaux est liée au pôle gypse**.

 $\delta = [(R_{\acute{e}chantillon}/R_{standard}-1)*1000]$ 

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Les isotopes utilisés sont les isotopes stables les plus abondants de l'atome de soufre : <sup>32</sup>S banal (95,02%) et <sup>34</sup>S (4,21%). Le souffre est impliqué dans plusieurs processus biogéochimiques et par ses divers degrés d'oxydation (-2 à +6), il est présent sous différentes formes (sulfates, sulfures, etc.). L'étude des rapports isotopiques du soufre (<sup>32</sup>S/<sup>34</sup>S) et de l'oxygène des sulfates (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) peut renseigner sur l'origine des espèces dissoutes et rend possible l'identification des processus géochimiques et biochimiques qui les affectent. De même que pour les isotopes stables de l'eau, on utilise la notation δ exprimé en parts pour mille, par rapport à un standard de référence :

Les informations disponibles ne permettent cependant pas de conclure quant à l'origine de la source des sulfates mesurées dans les eaux. Deux hypothèses sont envisagées :

- hypothèse 1 : les sulfates proviennent des formations du trias (Trias salifère et/ou gypsifère) sous-jacent au jurassique qui a constitué la « semelle » de décollement des formations sédimentaires lors des phases tectoniques pyrénéenne et alpine.
- hypothèse 2 : sulfates en provenance des formations Oligo-Miocène sus-jacentes au réservoir du crétacé dans lequel l'ouvrage est implanté. Dans cette hypothèse, on suppose que l'acquisition des teneurs en sulfate est réalisée par interaction eau-roche au contact crétacé/tertiaire.

où R est le rapport isotopique de l'isotope lourd sur l'isotope léger des sulfates (<sup>32</sup>S/<sup>34</sup>S ; <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O). Pour le rapport <sup>32</sup>S/<sup>34</sup>S l'étalon de référence est la troïlite (FeS) de la météorite de Canyon Diablo aux États-Unis (CDT) et le SMOW (Standart Mean Ocean Water) pour le rapport <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O.

Les compositions isotopiques des eaux de pluie qui contribuent à la recharge sont en principe identiques à celles de l'eau de mer<sup>2</sup> mais les apports anthropiques industriels et les émissions volcaniques ainsi que l'activité biologique à la surface des océans entrainent un appauvrissement en <sup>34</sup>S et un enrichissement en <sup>18</sup>O des sulfates. Les signatures isotopiques attendues pour les eaux de pluie sont globalement les suivantes :  $\overline{\delta}^{34}$ Sulfate = -1-+7‰ et  $\overline{\delta}^{18}$ Osulfate = +10-+17‰ (Berger et al., 1976 ; Brenot et al., 2007 ; Otero et al., 2008). Les concentrations dans les pluies sont généralement faibles (quelques mg/l). L'oxydation des sulfates en sulfate provoque un appauvrissement en isotopes lourds si elle est réalisée par l'activité bactérienne. La réduction des sulfates en sulfures conduit à l'enrichissement en isotopes lourds des sulfates résiduel, avec un enrichissement 4 fois plus important pour le souffre que pour l'oxygène. La précipitation de minéraux sulfatés provoque un appauvrissement en isotopes lourds qui se traduit dans un diagramme  $\delta^{34}$ S(SO<sub>4</sub>) vs  $\delta^{18}$ O(SO<sub>4</sub>) par une pente de 0,5. A l'inverse, la dissolution de minéraux sulfatés n'entraine pas de fractionnement isotopique.

Les sulfates peuvent également provenir de l'altération des lithologies locales. Pour notre zone d'étude, il peut s'agir du gypse des évaporites du trias et/ou des horizons riches en gypse et anhydrite d'origine marine et d'âge Oligo-Miocène. D'après la littérature, la signature des horizons riches en gypse et anhydrite d'origine marine et d'âge Oligo-Miocène est la suivante :  $\delta^{34}$ Ssulfate = +17-+22‰ et  $\delta^{18}$ Osulfate ≈ +13‰ (Bottrell et Newton, 2006). La signature des évaporites du trias caractérisée dans les Corbières (BRGM/RP61013-FR) est la suivante :  $\delta^{34}$ Ssulfate = +15.5 ‰ et  $\delta^{18}$ Osulfate ≈ +8.9-11.9 ‰, la signature de la semelle triasique de la reculée lodévoise a été également déterminée :  $\delta^{34}$ Ssulfate = +14.5 ‰ et  $\delta^{18}$ Osulfate ≈ +13.8 ‰. Les signatures isotopiques  $\delta^{34}$ Ssulfate attendues pour les sulfures sédimentaires (pyrites sédimentaires par exemple) sont inférieures à 0‰ et peuvent aller jusqu'à -50‰ (Thode, 1991). La gamme théorique de signature isotopique  $\delta^{18}$ Osulfate attendue pour les sulfates libérés lors de l'oxydation de sulfures est de -10-+10‰ (Clark et Fritz, 1997)



Illustration 36. Evolution des teneurs en sulfates en fonction des teneurs en chlorure.



Illustration 37. δ34SSO4 (V-CDT) vs δ18OSO4 (V-SMOW) et les gammes attendues d'après la littérature pour les sources potentielles de sulfates dissous.

La relation entre CI et Na+K permet de comparer un élément conservatif (chlorure) avec deux autres éléments (Na+K) beaucoup plus réactifs, c'est-à-dire dépendant des interactions eaux-roches (Michard et al., 1990). Dans le diagramme binaire (Na+K) vs CI (Illustration 38), **la position des points du forage Cabrials sur la droite de dilution de l'eau de mer indique** 

que les teneurs en sodium, potassium et chlorure s'expliquent par le phénomène de mélange entre un pôle minéral d'origine marine et un pôle d'eau douce. La contribution d'eau profonde issue du socle et présentant un important enrichissement en Na+K (lié aux interactions eau-roche) par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer ne semble pas être perceptible pour le forage Cabrials contrairement à ce qui est observée pour le forage d'Antigone et au forage F40B notamment. Dans ce contexte, seule une contribution de l'ordre de 5 à 6% en volume), aucun flux d'eau (issu du socle) ne semble être associé à ce flux de CO2.



Illustration 38. Evolution des concentrations en sodium + potassium en fonction des teneurs en chlorure.

Les concentrations en chlorures des eaux du forage de Cabrials présentent des teneurs importantes (Cl de l'ordre de 460 mg/l). De telles valeurs ne peuvent pas être expliquées par le pôle « gypse » du Trias (Cl<20 mg/l), ce qui suggère la participation du pole halite. Les informations apportées par les isotopes du strontium<sup>3</sup> semblent pouvoir conforter cette

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Le strontium (Sr) est un élément chimique de type alcalino-terreux dont les propriétés physico-chimiques sont proches de celles du calcium (Ca). Cette similarité permet au Sr de se substituer au Ca dans les réseaux cristallins.

Le rapport isotopique du strontium (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) d'une eau est directement lié à celui du minéral ou de l'assemblage minéralogique avec lequel l'eau a interagi. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple)

hypothèse, le rapport <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr des eaux du forage Cabrials apparaissant contrôlé par la signature du pôle halite (Illustration 39). Dans ce contexte, la signature des eaux apparait bien différente de la signature isotopique des calcaires crétacés qui constituent le réservoir dans lequel le forage est implanté.

Pour le forage de Notre-Dame implanté dans le jurassique, on montre que la signature isotopique des eaux est plus radiogénique (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr plus élevé) que la signature isotopique des calcaires jurassiques. Pour expliquer le rapport <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr des eaux, il faut faire intervenir une **contribution d'eau radiogénique issue du socle**.



Illustration 39. Evolution des rapports 87Sr/86Sr en fonction des rapports Cl/Sr.

Pour les eaux du forage Cabrials, les informations apportées par les isotopes du bore<sup>4</sup> ne permettent pas de préciser la nature du pole triasique impliqué puisque la signature isotopique

présentent des rapports <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr relativement élevés, celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème donne des informations sur (1) l'origine et potentiellement les proportions de mélange des différents types d'eau, ainsi que sur (2) la nature et l'intensité des interactions eau-roche notamment liées à l'altération ou la dissolution.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Le bore est un élément trace qui possède deux isotopes <sup>10</sup>B et <sup>11</sup>B extrêmement solubles dans les fluides aqueux dont les abondances relatives sont respectivement d'environ 20% et 80%. De même que pour les isotopes stables de l'eau, on utilise la notation  $\delta$  exprimé en parts pour mille, par rapport à un standard de référence :

du pole halite apparait identique à celle du pole gypse (Illustration 40). La position des eaux du forage Cabrials dans le diagramme  $\delta^{11}$ B vs Cl/B (Illustration 41) suggère néanmoins que c'est le pôle halite qui permet d'expliquer la signature Cl/B mesurée dans l'ouvrage.



Illustration 40. Evolution du  $\delta^{11}$ B en fonction des teneurs en Bore.

$$\delta^{11}B(\%) = \left(\frac{\left(\frac{11}{B}/\frac{10}{B}\right)_{Ech}}{\left(\frac{11}{B}/\frac{10}{B}\right)_{Std}} - 1\right) \times 1000$$

Le standard de référence est l'acide borique (NBS-951) distribué par le National Bureau of Standards. Le bore est un élément léger et le contraste de masse entre le <sup>11</sup>B et <sup>10</sup>B est assez significatif pour que les isotopes du bore soient soumis à de forts fractionnements isotopiques, ce qui entraîne des variations importantes de plus de 90 ‰ de la composition isotopique des eaux dans le milieu naturel. Les valeurs de  $\delta^{11}$ B les plus basses (-30‰) sont représentées par les évaporites non-marines, les valeurs les plus hautes (jusqu'à +59‰) correspondent aux saumures marines (lacs salés australiens, mer morte). Le réservoir océanique présente une valeur de  $\delta^{11}$ B mondialement constante de l'ordre de +39.5‰ (Bassett, 1990), tandis que les carbonates marins actuels varient entre +13.3‰ et +32.2‰. Ces contrastes font du bore un excellent traceur à la fois des sources du bore (fortement lié à la salinité des eaux) que des processus naturels qui l'affectent (mise en évidence de mélange, fractionnement, etc.).

En l'absence d'évaporite ou de mélange avec des eaux saumâtres, le bore dans les eaux souterraines provient principalement de l'altération de roches silicatées (teneurs moyenne de l'ordre de 10 mg/Kg) mais est également apporté par les eaux de pluie (teneur moyenne de l'ordre de 3 µg/l pour le Gard, Ladouche et al. 2009). Dans les roches magmatiques et métamorphiques, le bore est principalement associé à la Tourmaline. Il a été montré que les signatures isotopiques du bore ( $\delta^{11}B$ ) sont contrôlées par la composition chimique des tourmalines, les tourmalines riches en lithium étant enrichies en  $\delta^{11}B$  comparées aux tourmalines riches en fer et/ou en magnésium (Chaussidon and Albarède, 1991). La gamme de variation des signatures isotopiques ( $\delta^{11}B$ ) des tourmalines des roches magmatiques et métamorphiques est très large et comprise entre -2‰ et -30‰ (Chaussidon and Albarède, 1991).

Des valeurs très négatives des rapports <sup>11</sup>B/<sup>10</sup>B dans les eaux souterraines peuvent également être liées à la désorption de bore depuis des formations argileuses (cf. Pennisi et al. 2006).



Illustration 41. Evolution du  $\delta^{11}$ B en fonction du rapport Cl/B.

Nous présentons l'évolution des signatures isotopiques du Lithium<sup>5</sup> en fonction de la signature isotopique du strontium (Illustration 42). La signature isotopique du lithium varie en fonction de

La composition isotopique du lithium d'un échantillon se note en déviation relative ( $\delta^7$ Li en ‰) par rapport à un standard en exprimant le rapport isotopique <sup>7</sup>Li/<sup>6</sup>Li de la manière suivante :

$$\delta^{7}Li~(\%) = \left(\frac{\left({}^{7}Li/{}^{6}Li\right)_{ech}}{\left({}^{7}Li/{}^{6}Li\right)_{std}} - 1\right) \times 10^{3}$$

Le standard de référence est un carbonate de lithium (L-SVEC, NIST RM8545) dont la valeur du  $\delta^7$ Li est de 0 ‰ par définition (<sup>7</sup>Li/<sup>6</sup>Li = 12.02 ± 0.03, Flesch et al., 1973).

La différence de masse relative entre les deux isotopes est considérable (17 %) et engendre des fractionnements isotopiques importants lors des réactions géochimiques qui se produisent à la surface et à la sub-surface de la Terre. En effet, la gamme de variation isotopique du lithium est de plus de 60 ‰ dans les différents matériaux géologiques. Les roches silicatées de la croûte ont une composition isotopique comprise entre -2 et +2 ‰, l'eau de mer a une signature homogène de +31 ‰, les eaux de rivières ont des compositions intermédiaires entre +6 et +23 ‰ et les eaux souterraines ont généralement des compositions isotopiques qui varient entre -10 et +20 ‰.

Le comportement des isotopes du lithium lors des interactions eau/roche à basse et haute température s'est fortement précisé ces dernières années dans des contextes divers et variés. Le lithium est un élément lithophile, fortement soluble et se trouve par conséquent enrichi considérablement dans les fluides ayant interagit avec les roches.

Les concentrations en lithium dans les eaux ne sont contrôlées que par les processus d'interactions euxmêmes (intensité d'interaction, température et assemblage minéralogique). Et les réactions d'oxydoréduction, de complexation organique ou de spéciation n'ont aucun d'effet de contrôle vis-à-vis des concentrations du lithium et de ses isotopes dans les eaux.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Le lithium est un élément léger qui possède deux isotopes stables de masse 6 et 7, dont les abondances naturelles sont respectivement 7.5 % et 92.5 %.

la température des eaux, la composition isotopique du lithium ( $\delta^7$ Li) étant inversement corrélée à la température profonde du réservoir (Millot et Négrel, 2007). La signature isotopique des eaux du forage Cabrials qui est influencée par le pole salifère du trias (pole halite) présente une signature isotopique en lithium comparable ( $\delta^7$ Li = 11 ‰) aux autres du secteur d'étude qui présente des températures voisines de 25°C.

Pour le forage de Notre-Dame, la signature isotopique des eaux apparait influencée par le pole socle.



Illustration 42. Evolution de la signature isotopique du lithium ( $\delta^7$ Li) en fonction de la signature isotopique du strontium ( $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr).

Enfin d'une manière générale, les données isotopiques en lithium dans des contextes d'altération montrent que le fractionnement isotopique associé aux interactions eau/roche favorise la mise en solution de l'isotope lourd (<sup>7</sup>Li). L'isotope léger (<sup>6</sup>Li) est quant à lui préférentiellement retenu dans les minéraux secondaires d'altération. Ce fractionnement est d'autant plus faible que la température est importante Millot 2013.

Les signatures des isotopes stables de l'eau<sup>6</sup> mesurées dans les ouvrages de Cabrials et de Notre-Dame sont présentées sur l'Illustration 43. Les points s'alignent sur la droite des pluies ce qui indique que la signature des eaux n'est pas affectée par des échanges isotopiques. La signature isotopique des ouvrages apparait très comparable à celles mesurées dans les aquifères karstiques du secteur d'étude (karst sous couverture : Pézenas et Castillonne ; karst Gardiole : aquifère karstique libre). Dans ce contexte, la signature isotopique des eaux apparait bien expliquée par les eaux de pluie du climat actuel, c'est-à-dire postérieur à la dernière glaciation daté de – 12 000 ans.

#### <sup>6</sup> Généralité sur les isotopes stables de l'eau :

Les variations des compositions isotopiques des isotopes stables de l'eau (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O et <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H) dans le cycle hydrologique résultent soit de fractionnement isotopique qui intervient lors des changements de phase (évaporation, condensation), soit de mélanges d'eaux de compositions isotopiques différentes. L'évaporation entraîne toujours la formation de vapeur appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide d'origine (fractionnement isotopique). A l'inverse, lors de la condensation, la phase condensée (pluie par exemple) est toujours enrichie en isotopes lourds au détriment de la phase vapeur résiduelle (nuage). A l'échelle mondiale, les teneurs en deutérium des pluies sont reliées aux teneurs en oxygène 18 par la relation suivante :  $\delta^2 H = 8 * \delta^{18} O + 10$ ; couramment appelée droite mondiale des eaux météoriques (Craig 1961).

Sous certaines conditions (temps de résidence élevé, faible rapport Eau/Roche, température élevée du réservoir, échange avec le CO<sub>2</sub>), les interactions Eau-Roche peuvent modifier la composition isotopique initiale de l'eau :



Processus d'échanges isotopiques susceptibles d'affecter la signature isotopique (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H) de l'eau (d'après Clark et Fritz 1997).

En l'absence d'évaporation ou d'échange avec des gaz dissous, les isotopes stables de la molécule d'eau se comportent comme des traceurs conservatifs et reflètent le mélange des différentes recharges ayant alimenté les eaux souterraines considérées.

L'histoire hydroclimatique d'un aquifère peut être reconstituée par l'abondance des isotopes lourds (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H) dont les signatures correspondent à des environnements et des épisodes hydroclimatiques spécifiques, ou des altitudes de recharge différentes. La localisation de la zone d'alimentation doit être néanmoins abordée avec circonspection si l'on estime avoir affaire à des eaux très vieilles. Il est possible en effet que des eaux minérales infiltrées lors d'une période plus froide que l'actuelle, comme la dernière période glaciaire, enregistrent un appauvrissement de leurs teneurs en isotopes lourds dû à la baisse générale des températures, l'effet paléoclimatique se surajoutant au seul effet de l'altitude.



Illustration 43.  $\delta^2$ H vs  $\delta^{18}$ O des eaux des ouvrages réalisées dans cette étude. Les droites des pluies mondiales (DMEM) et locales (DLEM) sont reportées ainsi que les signatures des aquifères karstiques proches de la zone d'étude.

Les eaux du forage Cabrials ne présentent pas de tritium<sup>7</sup> ce qui indique que les eaux de l'aquifère se sont infiltrées avant 1952.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Contrairement à l'oxygène 18 et au deutérium, l'isotope tritium (<sup>3</sup>H) de la molécule d'eau est instable dans le temps et est fréquemment utilisé comme géochronomètre pour dater les eaux (<sup>3</sup>H, isotope radioactif de période courte de 12,32 ans). C'est un marqueur des masses d'eau contemporaines. En effet, une production artificielle s'est ajoutée à la production naturelle au cours des essais thermonucléaires aériens, pendant la période 1952-1963 ; les essais aériens ont cessé depuis 1963. Par l'intermédiaire de cette production artificielle, on peut donc différencier les eaux qui résultent des précipitations sans tritium nucléaire (avant 1952) des eaux de précipitations formées dans une atmosphère contenant du tritium nucléaire. La présence de tritium dans une eau témoigne d'une alimentation récente. Dans notre cas, elle peut permettre d'identifier une infiltration d'eau récente dans le réservoir carbonaté.

Les teneurs en tritium des pluies actuelles sont très faibles et globalement comprises entre 2 et 7 Unités Tritium (UT), les valeurs les plus élevées étant observées en hiver et au printemps.

### Synthèse de la caractérisation géochimique et isotopique

Les eaux légèrement carbogazeuses (5%) du forage Cabrials sont chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes selon la classification de Piper. Les teneurs en chlorures (468 mg/l) et sodium (274 g/l) mesurées sont supérieures aux normes de potabilités (<200 mg/l pour ces paramètres). L'origine de la salinité a été précisée par l'approche multi-isotopique mise en œuvre, la salinité des eaux apparait liée au pôle halite du Trias salifère situé sous le jurassique. Dans ce contexte, les résultats géochimiques indiquent que le réservoir crétacé dans lequel est implanté le forage est en lien avec l'aquifère jurassique sous-jacent, ce dernier reposant sur les évaporites du Trias. Ce transfert pourrait être favorisé par l'accident décrochant sénestre mis en évidence préalablement à l'ouest de l'ouvrage (Illustration 44, Coueffé et al., 2011, RP/BRGM-60640-FR).

La signature isotopique de l'eau ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{2}H$ ) témoigne d'une absence d'échanges isotopiques de type évaporation ou échange avec le CO<sub>2</sub> gazeux d'origine profonde. Aussi, cette signature apparait bien expliquée par les eaux de pluie du climat actuel (pas de mise en évidence d'effet paléo-climatique). L'absence de tritium dans les eaux de l'aquifère indique néanmoins que les eaux sont anciennes, les pluies qui ont contribué à recharger l'aquifère se sont infiltrées avant 1952. La présence de CO<sub>2</sub> dissous dans les eaux ne permet pas l'utilisation de l'activité carbone 14 pour la datation du carbone minéral total dissous.



Illustration 44. Carte géologique prédictive des terrains mésozoïques présents immédiatement sous la couverture cénozoïque (Coueffé et al, 2011, Extrait rapport BRGM/RP-60640-FR).

# 3.4.3. Informations apportées par les géothermomètres

La température des réservoirs profonds peut être estimée par l'utilisation de géothermomètre. L'utilisation des géothermomètres Na/K<sup>8</sup> (Michard 1979) qui suppose un équilibre atteint entre le plagioclase et le feldspath potassique ne peut pas être utilisée dans notre cas d'étude puisque la salinité des eaux est acquise principalement par interaction eau-roche avec les marnes salifères du trias. Pour ces mêmes raisons, le géothermomètre Na/Li<sup>9</sup> (Fouillac et Michard, 1981) ne peut pas être utilisé.

Le géothermomètre à silice est le seul applicable au contexte hydrogéologique de la zone d'étude. D'après les auteurs, quand la teneur en silice dans les eaux est inférieure à 60 mg/l, le terme « température à silice » doit se référer à la calcédoine (Serra et Sanjuan B., 2003). Les teneurs en silice du forage Cabrials sont faibles (16 mg/l). Dans ce contexte, c'est le géothermomètre à calcédoine qui doit être considérée pour le calcul de la température d'équilibre du réservoir. Nous vérifions par le calcul de l'indice de saturation<sup>10</sup> des eaux vis-à-vis de la calcédoine que les eaux sont en équilibre avec cette phase minérale (Illustration 45). L'utilisation du géothermomètre à calcédoire<sup>11</sup> donne des températures de réservoir comparable à celles mesurées dans les ouvrages, soit autour de 24°C.

		Fournier 1977	Fournier 1977	Fournier 1977		
Nom	SiO2 (mg/l)	T(°C)_Quartz	T(°C)_Quartz	T(°C)_Calcédoine	IS_Calcédoine	IS_Quartz
F. CABRIALS 22/12/2014	16.0	55	62	23	-0.04	0.39
F. CABRIALS 17/12/2014	16.4	56	62	24	-0.02	0.41
F. NOTRE DAME 03/10/2014	13.9	50	57	18	0.04	0.50

IS=0=>eau en équilibre avec la phase minérale

IS<<0=>eau sous-saturée (dissolution)

IS>>0 =>eau sursaturée (précipitation possible)

#### Illustration 45. Résultats du géothermomètre à silice.

En supposant que le gradient géothermique est normal, c'est-à-dire de +3°C/100m (soit +30°C par km de profondeur), la température du réservoir carbonaté entre 200 et 300 m devrait être comprise en 18°C et 21°C en considérant la température moyenne observée dans les aquifères peu profonds de la zone d'étude (autour de 15°C). La confrontation des informations obtenues pour la température mesurée et calculée par le géothermomètre à silice indique pour la zone d'étude, l'existence d'une anomalie positive du gradient géothermique ce qui apparait cohérent avec les résultats de l'étude de Garibaldi (2010) qui souligne l'existence d'une anomalie de température à 1000 m de profondeur dans l'Hérault, notamment à proximité de la faille crustale de Nîmes (Illustration 46).

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> T(°C)=908/(0.7+log(Na/K))-273.15, en mol/kg dans Michard (1979)

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> T(°C)=1000/(0.38+log(Na/Li))-273.15, en mol/kg; Fouillac et Michard (1981)

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> IS calculé avec le logiciel Phreeqc (USGS)

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> T(°C)=1032/(4.69-log(SiO2))-273.15, en mg/l ; Fournier 1977



Illustration 46. Cartes thermiques du Bassin provençal à 1 km de profondeur et localisation des forages (points noirs), extrait de Garibaldi (2010). Les anomalies principales sont celles de : 1) Montpellier, 2) La Drôme, 3) Lodève, 4) Aix-en-Provence et 5) Les Cévennes.

## 3.4.4. Datation de l'âge apparent des eaux par l'analyse des Gaz CFC et SF6

La méthode utilisée pour la datation des eaux se base sur la mesure des gaz dissous contenus dans l'eau à l'état de trace : les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 trichlorodifluorométhane), et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) ainsi que le SF6 (hexafluorure de soufre). Les gaz CFC ont été produits industriellement à partir des années 1930, avec une large utilisation dans les années 1950 à 1960 avant d'être interdits en 1987 (accords du protocole de Montréal) car les CFC sont en effet des gaz destructeurs de la couche d'ozone (cf. Annexe 4). Les CFC étaient utilisés dans les fluides réfrigérants et les solvants tandis que le SF6 est utilisé principalement pour ses capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs et la production du double vitrage. La production industrielle du SF<sub>6</sub> a débuté en 1953. Le SF<sub>6</sub> est principalement d'origine anthropique mais, contrairement aux CFC, il existe également une production géogénique de ce gaz, estimée à 1% à l'échelle mondiale mais qui peut représenter, localement, un apport plus important.

L'analyse des gaz dissous (CFC et SF6) dans les eaux souterraines permet donc de dater des eaux relativement jeunes. La description détaillée de l'approche méthodologique est présentée en annexe 4. Les prélèvements en vue de la datation ont été réalisés de façon à obtenir un échantillon représentatif de l'eau étudiée. La principale difficulté rencontrée lors du prélèvement de l'eau des sources a été de garantir l'absence de contamination par l'air atmosphérique.

Au préalable à l'interprétation, il est nécessaire de convertir les données brutes (exprimées en pmol/l, cf. tableau de résultats en annexe 4) en pptv (partie par trillion volumique) dans le but d'estimer la concentration en gaz dans l'air au moment de la recharge de l'aquifère. Le calcul est réalisé à l'aide des coefficients de solubilités donnés par le guide de l'IAEA (2006). Pour conduire ce calcul, il faut également connaître les paramètres susceptibles d'influencer la diffusion des gaz dans l'eau au moment de la recharge : altitude et la température moyenne de la recharge.

En pratique, pour interpréter les résultats, les données de chacun des traceurs sont comparées deux par deux (SF6 vs CFC-12 par exemple) sur des graphes représentant les courbes d'évolutions théoriques calculées par modèle de transfert « piston », le modèle exponentiel et le modèle de mélange entre les eaux d'infiltrations actuelles et les eaux anciennes (infiltrées avant 1940, cf. Annexe 4). La confrontation des résultats obtenus par les différents gaz permet en outre d'apprécier le phénomène de contamination et/ou dégradation des CFC. Ce type de représentation permet également de tester l'effet de l'existence d'un excès d'air notamment pour le SF6 qui est sensible à l'excès d'air en raison de sa faible solubilité.

Comme indiqué précédemment, pour dater les eaux, il faut poser quelques hypothèses de travail. La première concerne la température moyenne de recharge qui peut varier d'un ou deux degré Celsius par rapport à la température moyenne annuelle de l'air dans la zone de recharge de l'aquifère. On suppose donc ici que la recharge se produit sur de courtes périodes (<< année) ou lors d'épisode ponctuel de recharge. La sensibilité du paramètre « température » à ± 2°C conduit à des modifications de l'âge apparent de l'ordre de 2-3 ans. Par ailleurs, du fait de l'absence de mesure de l'excès d'air dans cette étude à l'aide du rapport Ne/Ar, des tests de sensibilité ont été effectués en considérant des valeurs d'excès d'air compris entre 0 et 100 cm<sup>3</sup>/kg (valeurs possibles d'après les informations de la littérature). Dans cette étude, ce paramètre a été ajusté afin d'obtenir la meilleure adéquation possible des âges apparents estimés avec chacun des traceurs.

ld	nom	Nom Graph	date	Alt. moyenne de recharge (m)	T°C moyenne Air	T°C recharge	Excess Air cm3/kg	SF6 pptv	CFC-12 pptv	CFC-11 pptv	CFC-113 pptv
R94	F. CABRIALS 22/12/2014	F.Cabrials_2	22/12/14	100	14.3	14.3	45	0.3	22.0	9.3	2.9
R83	F. CABRIALS 17/12/2014	F.Cabrials_1	17/12/14	100	14.3	14.3	55	0.1	4.4	1.1	1.4

Illustration 47. Paramètres utilisés pour le calcul des ages de l'eau prélévée en decembre 2014.

Les paramètres utilisés pour le calcul de l'âge apparent des eaux sont rassemblés dans le tableau de l'Illustration 47. Les représentations graphiques des résultats des eaux prélevées en 2014 sont présentées sur une planche graphique de synthèse (Illustration 48).

Les eaux du forage Cabrials présentent de très faibles teneurs en gaz dissous (CFC et SF6). Les eaux du forage prélevées en début de pompage sont anciennes (infiltrées avant 1930-1940, période des premières utilisations industrielles des CFCs). En fin de pompage, les eaux présentent des concentrations en gaz dissous supérieures aux valeurs initiales ce qui pourrait traduire l'existence d'un mélange avec des eaux plus récentes. Le report des points dans les différents graphiques de l'Illustration 48 indique que le point en fin de pompage se positionne sur la droite de mélange binaire définie par les pôles anciens (infiltrée avant 1940) et récent (subactuelle). Dans ce contexte, la contribution du pole récent serait évaluée à moins de 5%. Compte tenu d'une part des faibles teneurs en gaz dissous et d'autre part des incertitudes, il n'est pas possible de définir avec précision l'âge du pole récent qui semble contribuer au mélange (vraisemblablement infiltrée entre 2000 et 2014).



Illustration 48. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2014 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire.
#### 3.5. IMPACT DE L'ESSAI DE POMPAGE SUR L'ETAT QUANTITATIF DES EAUX SOUTERRAINES A PROXIMITE DE L'OUVRAGE

Afin d'évaluer l'impact du pompage sur les aquifères localisés à proximité, un suivi piézométrique a été mis en place. Ainsi deux ouvrages distants de quelques centaines de mètres ont étés suivis. Le plus proche (600 m) est un forage exploité occasionnellement pour l'activité agricole du Mas de Cabrials. Le second distant de 1,2 km est un puits pompé servant à l'alimentation en eau du Mas Bachellery.

Enfin, afin de suivre un comportement plus régional de l'aquifère, le piézomètre carrière du Biterrois (situé à 8 km au Sud-Ouest) dans les formations karstifiées du Jurassique en partie sous couverture a été suivi. Ces ouvrages sont localisés Illustration 49.



Illustration 49. Localisation des ouvrages de suivi des niveaux piézométriques.

L'Illustration 50 permet d'appréhender l'évolution des niveaux piézométrique au Mas Cabrials sur une durée de près de 3 mois. Durant cette période le niveau remonte d'environ 1,5 m. Cette remontée est à associer à la recharge hivernale de l'aquifère (précipitations importantes sur le secteur en octobre et novembre 2014). Des périodes de pompage de 1 h sont également enregistrées, elles se traduisent par des rabattements de 6 à 8 mètres suivies d'une remontée rapide des niveaux. Aucune diminution significative des niveaux piézométriques n'a été

observée au cours de la période de pompage du 16 au 22 décembre sur le forage Béziers Est – Cabrials (zone surlignée en jaune Illustration 50). Les essais de pompage d'une durée de cinq jours sur le forage Béziers Est – Cabrials n'ont donc pas impacté cette ressource localement.



Illustration 50. Niveau piézométrique mesuré au forage du Mas Cabrials.

L'Illustration 51 permet d'appréhender l'évolution des niveaux piézométriques sur une durée de 6 semaines au Mas Bachellery. Durant cette période le niveau remonte d'environ 1,5 m. Cette remontée est à associer à la recharge hivernale de l'aquifère (précipitations importantes sur le secteur en octobre et novembre 2014). Des périodes de pompage de 1 h, allant de 2 à 4 fois par jour sont également enregistrées, elles se traduisent par des rabattements d'environ 30 cm. Aucune diminution significative des niveaux piézométriques n'a été observée au cours de la période de pompage du 16 au 22 décembre sur le forage Béziers Est – Cabrials (zone surlignée en jaune Illustration 51). Ces essais de pompage d'une durée de cinq jours n'ont donc pas impacté cette ressource localement.



Illustration 51. Niveau piézométrique mesuré au Mas Bachellery.

Concernant le suivi plus régional, les mesures réalisées de mi-décembre à début janvier sur le piézomètre de la carrière du Biterois montrent une légère diminution des niveaux piézométrique d'environ 30 cm au cours du mois. Sur la période des essais de pompage (en jaune sur l'Illustration 52) aucune diminution significative des niveaux piézométriques n'a été observée. Les essais de pompage sur le forage Béziers Est-Cabrials d'une durée de cinq jours au débit de 165 m<sup>3</sup>/h n'ont donc pas impacté la ressource régionale.



Illustration 52. Niveau piézométrique mesuré au piézomètre de la carrière du Biterois.

En conclusion, le réseau de suivi mis en place permet de montrer que l'essai de pompage (d'une durée de 5 jours au débit de 165 m<sup>3</sup>/h) sur le forage de Béziers Est – Cabrials dans les calcaires karstifiés du Crétacé inférieur n'a pas impacté localement la ressource superficielle. La ressource régionale des karsts sous couverture ne semble pas non plus avoir été impactée du moins de façon significative.

### 4. Conclusion et perspectives

A l'issu de la première phase d'identification des aquifères carbonatés sous couverture sur le secteur de Béziers à l'aide d'une étude géophysique, il a été décidé d'implanter deux ouvrages de reconnaissances. Le premier appelé Béziers Ouest est situé à proximité de la Chapelle « Notre Dame de la Consolation » au Sud-Ouest de Béziers. Le second au Sud Est de Béziers au niveau du lieu-dit Cabrials est nommé Béziers Est.

Le premier ouvrage a été effectué sur les calcaires jurassiques dits de la Galiberte entre les mois d'aout et octobre 2014. Ces calcaires sont localement sous faible recouvrement sédimentaire (quelques dizaines de mètres). Malheureusement cet ouvrage (code BSS : 10394X0168/CHAPEL) n'a pas recoupé de venue d'eau significative. A la fin de la foration à 205 m de profondeur le débit était d'environ 10 m<sup>3</sup>/h. Aussi, au vu de ce faible débit, il a été décidé de ne pas poursuivre les investigations sur l'ouvrage.

Le second forage, a permis d'étudier l'aquifère karstique développé dans les calcaires du Crétacé, localisés sous environ 145 m de couverture sédimentaire (marnes du Miocène). L'ouvrage (code BSS : 10401X0367/CABRIA) a atteint 252 m de profondeur. Une zone à forte karstification (réseau de fractures ouvertes et conduits décimétriques) a été recoupée au toit des calcaires (147-152 m), occasionnant le drainage d'une importante ressource en eau. A l'issue de la foration le débit au soufflage à 250 m était supérieur à 200 m<sup>3</sup>/h. Des essais hydrauliques (pompage par paliers et longue durée au débit de 165 m<sup>3</sup>/h) ont été réalisés du 15 au 27 décembre 2014. Ces derniers ont été accompagnés d'un suivi physicochimique.

L'interprétation des essais de pompage montre que l'aquifère capté a une transmissivité de l'ordre de 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s, et qu'il est soumis à des effets de drainance et/ou situé à proximité d'une limite alimentée. Le modèle mathématique fracture verticale avec une limite alimentée (Gringarten + une limite alimentée) s'est révélé pertinent pour reproduire l'évolution du rabattement observé lors des essais de pompage.

Les paramètres de calage permettent d'estimer la demi-longueur de fracture (égale à 40 m) et mettent en évidence l'impact d'une limite alimentée se faisant ressentir au bout de 250 min de pompage.

Par la suite le modèle a été utilisé pour estimer le débit d'exploitation de l'ouvrage. Les résultats montrent que le forage de Béziers Est-Cabrials a une très bonne potentialité, bien au-delà des débits qui ont été testés. En théorie, le débit d'exploitation maximal se situerait aux alentours de 275 m<sup>3</sup>/h pour un rabattement maximal de 140 m. Cependant, en pratique l'ouvrage n'a été testé que jusqu'à 180 m<sup>3</sup>/h (dernier palier de débit) ce qui ne permet pas de se prononcer pour des débits supérieurs. En l'état actuel des connaissances sur cet ouvrage, il est conseillé un débit d'exploitation maximal de 180 m<sup>3</sup>/h (pompage 24h/24, 7j/7), ce qui représente un prélèvement annuel aux alentours de 1,58 Mm<sup>3</sup>. A ce débit, le niveau d'eau devrait rapidement stabiliser vers 71 m de profondeur permettant d'assurer un fonctionnement correct de la pompe.

Par ailleurs le suivi physicochimique mis en place révèle la présence d'une eau anormalement chaude ( $26^{\circ}C-27^{\circ}C$ ) et fortement minéralisée (conductivité = 2,7 mS/cm) et légèrement carbogazeux (5 à 6% de CO<sub>2</sub> dissous). Les eaux du forage Cabrials sont chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes selon la classification de Piper. Les teneurs en chlorures (468 mg/l) et sodium (274 g/l) mesurées sont supérieures aux normes de potabilités (<200 mg/l pour ces

paramètres). L'origine de la salinité a été précisée par l'approche multi-isotopique mise en œuvre, la salinité des eaux apparait liée au pôle halite du Trias salifère situé sous le Jurassigue. Dans ce contexte, les résultats géochimiques indiguent que le réservoir crétacé dans lequel est implanté le forage est en lien avec l'aquifère jurassigue sous-jacent, ce dernier reposant sur les évaporites du Trias. Ce transfert pourrait être favorisé par l'accident décrochant sénestre mis en évidence préalablement à l'ouest de l'ouvrage (Coueffé et al., 2011). La signature isotopique de l'eau ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{2}H$ ) témoigne d'une absence d'échanges isotopiques de type évaporation ou échange avec le CO<sub>2</sub> gazeux d'origine profonde. La signature isotopique de l'eau apparait bien expliquée par les eaux de pluie du climat actuelle (pas de mise en évidence d'effet paléo-climatique). La présence de CO<sub>2</sub> dissous dans les eaux ne permet pas l'utilisation de l'activité carbone 14 pour la datation des eaux. Toutefois. les eaux prélevées en début de pompage apparaissent anciennes (infiltrées avant 1950) d'après les informations apportées par les gaz dissous (CFC/SF6) et comme l'indique l'absence de tritium. Le pompage semble avoir mobilisé une faible fraction (<5%) d'eau plus récente compte tenu des valeurs mesurées en fin de pompage. L'âge apparent de la composante récente mobilisée par le pompage ne peut pas être évalué précisément.

En parallèle, lors de ces essais, un suivi des niveaux d'eau sur les ouvrages localisés à proximité captant des aquifères superficiels a été réalisé. Ce suivi a montré l'absence d'impact de l'essai de pompage d'une durée de cinq jours sur ces ressources superficielles.

Les teneurs en chlorures (468 mg/l) et sodium (274 g/l) mesurées étant supérieures aux normes de qualité d'eau brute pour l'alimentation en eau potable), l'eau ne peut pas être utilisée à des fins de consommation humaine.

En conclusion cet ouvrage permet une bonne exploitation de la ressource mais présente des teneurs en Na (274 g/l) et Cl (468 mg/l) supérieures aux limites de qualité (<200 mg/l pour ces paramètres) rendant l'eau impropre à l'utilisation pour un usage AEP. D'autres pistes d'utilisation de l'eau sont envisagées.

Un usage pour la géothermie est possible, toutefois au vu de la température limitée (27°C) l'utilisation ne semble rentable qu'à proximité immédiate de l'ouvrage. Dans ce cas une réinjection de l'eau sera nécessaire dans l'aquifère, mais à une distance significative (plus de cent mètre a prirori) de l'ouvrage afin de ne pas impacter localement la température de l'eau prélevée. Le projet a ainsi permis de mettre en évidence le potentiel thermal de cette ressource. Les ressources en eau présentent dans les calcaires crétacés présents dans le sous-sol de l'Agglomération de Béziers pourrait-être envisagées à des fins géothermales.

La perspective d'utilisation de l'eau chaude identifiée pour le thermalisme est également envisageable (eau minérale au sens réglementaire du terme). Une telle utilisation est complexe compte tenu des contraintes techniques et réglementaires, elle peut nécessiter des investissements notables et, en conséquence il est conseillé de faire une étude de faisabilité pour disposer de l'aide à la décision utile pour poursuivre sur cet axe. L'eau du forage n'étant pas potable, elle ne peut donc pas être utilisée dans une piscine municipale, mais par contre elle peut l'être pour un centre thermo-ludique par exemple.

D'autres projets peuvent être envisagés tels que l'irrigation (toutefois la minéralisation en Na et Cl est forte), le développement de projet sur les algues et les bactéries, la pisciculture, etc. Ces éventuelles filières ne sont pas à négliger pour une valorisation potentielle de la ressource identifiée qui, si elle ne répond pas aux objectifs initiaux fixés par le projet, constitue malgré tout une ressource très conséquente.

# 5. Bibliographie

Aquilina, L., Ladouche, B., Doerfliger, N., Seidel, J.L., Bakalowicz, M., Dupuy, C., Le Strat, P., 2002. Origin, evolution and residence time of saline thermal fluids (Balaruc springs, southern France): implications for fluid transfer across the continental shelf. Chemical Geology 192 1-21.

Aquilina.L., Ladouche B., Dorfliger N., Bakalovicz.M., Seidel.J.L. (2003) Hydrochemistry of a complex karstic system : Thau lagoon (Sud de la France), *Ground Water*, Vol. 41, N°6, p. 790-805

**Bassett R.L**. (1990) A critical evaluation of the available measurements for the stable isotopes of boron. Applied Geochemistry, 5: 541-554.

Batiot-Guilhe C., J.L. Seidel, J.C. Maréchal, B. Ladouche, V. Prié, F. Cernesson, N. Dorfliger, M. Blanc, V. Léonardi, P.Y. Vion. Avec la collaboration de C. Bancon, H. Fenet, C. Gonzalez, S. Spinelli, S. Van-Exter. (2012). Projet de gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez – Caractérisation hydrochimique; qualité chimique, vulnérabilité de l'hydrosystème et de l'écosystème associé. Rapport RP-61013-FR

**Berger G., Bosch B., Desprez N., et al.** (1976). Recherches sur l'origine des nitrates dans les eaux souterraines de la Beauce. Rapport sur la campagne de prélèvement et analyses du 1er septembre 1976. Rapport BRGM-76-SGN-444-BDP.

**Bottrell S.H., Newton R.J.** (2006). Reconstruction of changes in global sulphur cycling from marine sulfate isotopes. Earth-Science Reviews 75, 59-83.

Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis, World Oil.

Bourdet D., Ayoud J.A. and Prirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test interpretation. SPE, 293-302.

**Brenot A., Carignan J., France-Lanord C., Benoît M.** (2007). Geological and land use controls on  $\delta$ 34S and  $\delta$ 18O of river dissolved sulfates: the Moselle river basin, France. Chemical Geology 244, 25-41.

**Caballero Y. Dewandel, B., Ladouche, B., Vigouroux, P**., (2014) – Apport des forages de reconnaissance Proto 1 et Proto 2 à l'amélioration du modèle hydrogéologique conceptuel du site de Quézac. BRGM/RC-63574-FR

**Chaussidon M. and Albarède F.** (1991) - Secular boron isotope variations in the continental crust: an ion microprobe study. *Earth and Planetary Science Letters*, 108 (1992): 229-241.

**Clark I.D., Fritz P.** (1997). Groundwater Quality in Environmental Isotopes in Hydrology. CRC Press/Lewis Publishers, 328 p.

**Cooper H.H. and Jacob C.E.,** 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am. Geoph. Union Trans. 27, 526-534.

**Coueffé, R., Fleury, P., Capar, L**. (2011). Caractérisation géologique du secteur de l'agglomération de Béziers à partir de la réinterprétation des profils sismiques et définition de zones favorables pour l'implantation d'ouvrages de reconnaissance. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-60640-FR, 139 pp., 31 ill., 3 ann.,

**Craig H**., 1961. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere. In : E. Tongiorgi. Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures, C.N. R., Lab. Geol. Nucl. Pisa : 9-130.

Craig H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. Sciences, 133, 1702

**Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J**., 1992. Testing design and analysis. Oilfield and analysis. 28-45.

Flesch G.D., Anderson A.R. and Svec H.J. (1973) A secondary isotopic standard for 6Li/7Li determinations. International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics, 12, 265-272.

Fouillac, C. and Michard, G., 1981. Sodium-lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. Geothermics, 10: 55-70

**Fournier R.O.** (1977) - Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics 5, pp.41-50.

**Garibaldi C.** (2010). Détermination des températures profondes du bassin du sud-est de la France et relations entre anomalies thermiques, géologie et circulations hydrothermale, Thèse Université de Nice-Sophia Antipolis.

Gringarten, A.C., Ramey, H.J. et Raghavan R., 1972. Unsteady-state pressure created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture. SPE, August 1974, 347-360.

**IAEA** (2006) – Use of Chlorofluorocarbons in hydrology: A guidebook. STI/PUB 1238, IAEA, Vienna.277p

Ladouche.B., Aquilina.L., Dorfliger N. (2009) Chemical and isotopic investigation of rainwater in southem France (1996-2002): potential use as input signal for karst functioning investigation, Journal of Hydrology, Vol. 367, Issues 1-2, p.150-164.

Ladouche B., Millot R., Guerrot C. et Lamotte C. (2011) : Caractérisation géochimique des eaux de l'hydrosystème de la presqu'ile de Balaruc-Les-Bains lors d'un épisode d'inversac, BRGM/RP 59922-FR.

Ladouche B., Millot R., Guerrot C., Lamotte C. (2012). Caractérisation géochimique de l'aquifère hydrothermal de Balaruc-les-Bains lors d'un épisode d'inversac. Dix-huitièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. " Ressources et gestion des aquifères littoraux. Cassis 2012. ", Cassis : France (2012). hal-00680642, version 1

Lamotte C., Gironde C., Ladouche B., Le Goff E. (2011). Ressource en eau thermale de la station de Lamalou-les-Bains – Etat des lieux. BRGM/RP-59921-FR

**Michard, G., 1990**. Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, St, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas. Chem. Geol., 89:117-134

**Millot R., Négrel Ph. (2007)**. Multi-isotopic tracing ( $\delta$ 7Li,  $\delta$ 11B, 87Sr/86Sr) and chemical geothermometry: evidence from hydro-geothermal systems in France. Chemical Geology, 244: 664-678.

**Millot R. (2013)** Les isotopes du lithium: exemples d'applications en géochimie. Habilitation à Diriger des Recherches. Université d'Orléans, 219 p.

**Otero N., Soler A., Canals A.** (2008). Controls of  $\delta^{34}$ S and  $\delta^{18}$ O in dissolved sulphate: learning from a detailed survey in the Llobregat River (Spain). Applied Geochemistry 23, 1166-1185.

**Pennisi M., Bianchini G., Muti A., Kloppmann W, Gonfiantini R**. (2006) - Behaviour of boron and strontium isotopes in groundwater–aquifer interactions in the Cornia Plain (Tuscany, Italy). *Applied Geochemistry* 21, 1169–1183.

**Serra H., Sanjuan B.** (2003) – Synthèse bibliographique des géothermomètres chimiques. Rapport final BRGM RP-52430

**Spane F.A. and Wurstner S.K.,** 1993. DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

Shlumberger. 2002. Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

**Thode H.G.** (1991). Sulphur Isotopes in Nature and the Environment : An Overview. In: Krouse, H.R., Grinenko, V.A. (Eds.), Stables Isotopes: Natural and Anthropogenic.

**83-SGN-295-LRO.** Projet « Energies Nouvelles » pour le quartier d'Antigone. Ville de Montpellier (Hérault). Etude de faisabilité d'un projet géothermique partie sous-sol

# Annexe 1

# Rapport diagraphie Hydro Assistance



### FORADOUR

# HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE



DECEMBRE 2014

**RECEPTION D'OUVRAGE** 

FORAGE "SUD-EST" - 34500 BEZIERS

Examen endoscopique - Contrôle de cimentation Diagraphies différées - Diagraphies de production - Diamétreur

Référence rapport : HA\_03-2015/12

Département de l'Hérault

SIEGE SOCIAL 2 Allée Dache Dise 40180 HINX Tél : 05.58.98.55.66 – Fax : 05.58.98.47.72



Agence BORDEAUX 33 Rue El Alamein 33400 TALENCE Tél : 05.56.90.82.41 – Fax : 05.56.90.82.42

SARL au capital de 740 000 € - R.C.S. DAX 499 405 587 - SIRET 499 405 587 00019 - Code APE 7112 B

Béziers (34) - Forage "Sud-Est"

### Table des matières

1 PRESENTATION DE L'INTERVENTION	1
1.1- MOTIF D'INTERVENTION	2
1.2- DATE D'INTERVENTION	2
1.3- OBJECTIFS	2
1.4- Mesures realisees	2
1.5- Operateur	2
	2
2 LOCALISATION DE L'OUVRAGE	3
2.1- SITUATION GEOGRAPHIQUE	4
2.2- COORDONNEES	4
3 PRESENTATION DE L'OUVRAGE	5
3.1- IDENTIFICATION	6
3.2- Photographies du site	6
3.3- Origine des mesures	6
3.4- Donnees hydrogeologiques	6
	7
4 COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE	···· /
4.1- COUPE TECHNIQUE	0
4.1.1) D'après les documents existants	ט פ
4.1.2) D'après l'examen endoscopique	0 Q
4.2- COUPE GEOLOGIQUE	0
5 JOURNAL DES TRAVAUX	9
6 EXAMEN ENDOSCOPIQUE	. 11
6.1- CHAMBRE DE POMPAGE	. 12
6.2- TROU NU	. 12
	12
7 INESURES	14
7.1- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION NATURELLE	1/
7.2- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION EN POMPAGE	. 14
7.2.1) Le profit de temperature	14
	15
7.3 2 1) Deremètres d'equisition de la mesure	. 15
7.3.2) D'un noint de vue qualitatif	. 15
7.3.3) D'un point de vue quantitatif	. 15
	4-
8 BILAN	.1/

**Table des annexes** 

ANNEXE 1 PRESENTATION DU SITE ANNEXE 2 COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE ANNEXE 3 DIAGRAPHIES DIFFEREES - DIAGRAPHIES DE PRODUCTION ANNEXE 4 CONTROLE DE CIMENTATION (MESURE CBL/VDL) ANNEXE 5 EXAMEN ENDOSCOPIQUE

# PRESENTATION DE L'INTERVENTION

Hydro Assistance Ingénierie

- 1 / 18 -

#### 1.1- Motif d'intervention

**RECEPTION DE L'OUVRAGE** 

#### 1.2- Date d'intervention

**11 DECEMBRE 2014** 

#### 1.3- Objectifs

- contrôle des équipements mis en place
- mesure du diamètre du trou nu
- contrôle de la cimentation annulaire des équipements de la chambre de pompage
- caractérisation des formations géologiques forées
- caractérisation du fonctionnement hydrodynamique de l'ouvrage

#### 1.4- Mesures réalisées

8	Examen endoscopique			
	Caméra numérique couleur à visées axiale et radiale			
	Réalisé en pompage (Q = 105 m <sup>3</sup> /h) :	de 0 à 218.40 mètres		
8	Pompage			
	Pompe installée à :	50.50 m/repère (aspiration de la pompe)		
	Débit pompé :	105 m³/h		
8	Diagraphies de production naturelle			
	Température, conductivité, flux :	de 13 à 217.20 mètres		
n,	Diagraphies de production en pompage	(Q = 105 m³/h)		
	Température, conductivité, flux :	de 56 à 217.20 mètres		
	Autres diagraphies			
	Gamma-Ray :	de 0.40 à 217.40 mètres		
	Résistivités 16" et 64" :	de 147.10 à 215.70 mètres		
	Diamétreur :	de 0 à 218.40 mètres		
	CBL/VDL :	de 13 à 144 mètres		

#### 1.5- Opérateur

Ludovik LACHEVRE

### LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Hydro Assistance Ingénierie

- 3 / 18 -

#### 2.1- Situation géographique



Département : Commune : Localisation : Hérault (34) Béziers "Rec de Cabrials"

Référence cadastrale :

section HP - parcelle 180



Coordonnées Lambert-93 (en mètres) :

X = 722 402 Y = 6248 984



Z = + 30 m NGF



3

# PRESENTATION DE L'OUVRAGE

Hydro Assistance Ingénierie

#### 3.1- Identification

Dénomination :forage "Sud-Est"Date de création :octobre 2014 - janvier 2015Profondeur théorique :250 mètresUtilisation :reconnaissance d'aquifères karstiques

#### 3.2- Photographies du site



#### 3.3- Origine des mesures

Repère : Position : bride du tube en acier - diamètre interne 316 mm + 0.32 m/sol





#### 3.4- Données hydrogéologiques

Aquifère capté : Niveau statique : calcaires de l'Aptien (Crétacé inférieur) - 8.55 m/repère (le 10/12/2014 au matin)

# **COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE**

#### 4.1- Coupe technique

#### 4.1.1) D'après les documents existants

La foration

- de 0 à 12 m :	diamètre 24" (	(610 mm	) - Rotary	
-----------------	----------------	---------	------------	--

- de 12 à 147 m : diamètre 17"<sup>1/2</sup> (444 mm) Rotary
- de 147 à 250 m : diamètre 12"<sup>1/4</sup> (311 mm) Marteau fond de trou

#### Les équipements

- de 0 à 12 m :	tube en acier API, diamètre 20" (508 mm), épaisseur 6.35 mm, espace annulaire cimenté
- de 0 à 147 m :	tube en acier API, diamètre 13" <sup>3/8</sup> (339.7 mm), épaisseur 12.20 mm, espace annulaire cimenté
- de 147 à 250 m :	trou nu, diamètre 12" <sup>1/4</sup> (311 mm)

#### 4.1.2) D'après l'examen endoscopique

-	de 0 à 147.10 m :	tube en acier API, diamètre interne 316 mm, espace annulaire cimenté
2	de 147.10 à 218.40 m :	trou nu, diamètre 12" <sup>1/4</sup>

#### 4.2- Coupe géologique

Profondeurs (m)	Lithologie	Stratigraphie
0 - 3	limons faiblement sableux et carbonatés, à rares éléments détritiques (quartz) de taille millimétrique	
3 - 7	sables grossiers (de la taille des arénites) à éléments de quartz, calcaires et grès rouges dans une matrice ocre légèrement sableuse et carbonatée	Plio-Quaternaire
7 - 150	marnes : argiles grises légèrement sableuses, avec quelques fragments coquilliers et rares éléments détritiques	Miocène
150 - 180	calcaires à passées marneuses : calcaires blancs à blanc-gris (80-85%), argiles fines grises (marnes) et quelques fragments (taille <mm) (15-20%)<="" calcaires="" de="" noirs="" td=""><td></td></mm)>	
180 - 200	nombreux fragments de <b>calcaires</b> blancs à gris-beige (80-85%) et quelques fragments (taille <mm) calcaires="" de="" noirs<br="">(15-20%)</mm)>	
200 - 218	alternance de calcaires et de marnes : calcaires blanc-gris laiteux (50-60%), marnes grises (40-50%), quelques fragments (taille <mm) (taille<mm)<br="" calcaires="" de="" fragments="" noirs,="" quelques="">de roches noires indéterminées et quelques fragments coquilliers</mm)>	Aptien (Crétacé inférieur)
218 - 252	<b>calcaires</b> blanc-gris laiteux (>95%) avec quelques fragments (taille <mm) calcaires="" coquilliers="" de="" et="" fragments="" grises,="" noires,="" noirs,="" quelques="" roches="" sulfures<="" td=""><td></td></mm)>	

5

# JOURNAL DES TRAVAUX

Hydro Assistance Ingénierie

Date	Heures	Opérations
	00h15	Arrivée sur site et mise en place du matériel
	051115	Pompage en cours depuis le 10/12/2014 à 15h00, au débit moyen de 105 m <sup>3</sup> /h
	10h15	Examen endoscopique en pompage
	11h40	Diagraphies de production en pompage (température, conductivité et flux)
	12h35	Arrêt du pompage et remontée de la pompe de test
	14h00	Contrôle de cimentation de l'espace annulaire des équipements de la chambre
11/12/2014		de pompage (mesure CBL/VDL)
	15h00	Mesure de résistivités
		Mesure gamma-ray
	16h15	Mesure de diamètre
	17h30	Diagraphies de production naturelle (température, conductivité et flux)
	18h20	Repli du matériel
	18h50	Départ du site

# EXAMEN ENDOSCOPIQUE

Hydro Assistance Ingénierie

- 11 / 18 -

L'inspection vidéo a été réalisée en régime dynamique, au débit moyen de 105 m<sup>3</sup>/h.

#### 6.1- Chambre de pompage

- de 0 à 33.50 m :	la partie émergée des tubes en acier présente un état mécanique visuellement satisfaisant sur les 11 premiers mètres. A partir de cette profondeur, les conditions de visibilité sont réduites, notamment en raison de la présence de la colonne d'exhaure de la pompe de test (pompage en cours depuis la veille).
- de 33.50 à 147.10 m :	au droit de la partie immergée des équipements, la turbidité de la colonne d'eau est élevée, notamment en dessous de la pompe de test positionnée à 50.50 mètres (arrivées d'eau très turbides au sommet du trou nu - cf. paragraphe 6.2). L'état mécanique du tubage n'a donc pas pu être apprécié dans le détail. Aucune anomalie majeure n'a toutefois été mise en évidence.

#### 6.2- Trou nu

- de 147.10 à 148.40 m :	cette partie haute du trou nu est caractérisée par la présence d'arrivées d'eau très turbide en pompage. A partir de 148.40 mètres, la colonne d'eau s'éclaircit brutalement.
- de 148.40 à 161 m :	de 148.40 à 149 mètres, le trou nu est bien calibré.
	A 149 mètres, on observe un changement de lithologie. A partir de cette profondeur, la présence de nombreuses fissures obliques et subverticales confèrent au trou nu une section plus irrégulière.
	De 158.50 à 159.20 mètres, ainsi qu'aux environs de 161 mètres, on observe la présence de deux grandes zones cavées, renfermant de la calcite, surmontée de sables fins.
- de 161 à 218.40 m :	en dessous de la zone cavée identifiée à 161 mètres, le trou nu paraît mieux calibré. Les formations renferment cependant de nombreuses cavités, dont les plus importantes ont été observées à 170.80 mètres (renfermant des cristaux de calcite), à 182.10 et 182.80 mètres, aux environs de 195 mètres, ainsi qu'à 214.40 et 215.60 mètres (renfermant également des cristaux de calcite).
	De nombreuses fissures sont également présentes à partir de 169 mètres.
	Aux environs de 217 mètres, le forage recoupe une grande fissure ouverte subverticale.
- à 218.40 m :	l'inspection vidéo a dû être stoppée à cette profondeur, au droit d'une zone d'éboulement rocheux (bloc calcaire obstruant partiellement l'ouvrage). La présence d'arrivées d'eau sous-jacentes, visiblement très faibles, témoigne cependant de l'obstruction partielle de cette zone. La profondeur théorique de l'ouvrage se situe à 250 mètres.



#### 7.1- Diagraphies de production naturelle

Les profils ont été enregistrés 4h30 après l'arrêt du pompage de développement, alors que le niveau piézométrique était en cours de remontée. Ces mesures attestent que la zone de production située au droit des zones cavées (identifiées aux environs de 159 et 161 mètres) participe préférentiellement à la récupération de pression.

En dessous de cette profondeur, la température diminue avec la profondeur pour retrouver, à partir de 178 mètres, le gradient géothermique des terrains encaissants.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

au début des mesures, à 13 mètres :

- température : 21.5°C
- conductivité : 2867 µS/cm (corrigée à 25°C)

à la base des mesures, à 215.80 mètres :

- température : 27.3°C
- conductivité : 2825 μS/cm (corrigée à 25°C)

#### 7.2- Diagraphies de production en pompage

Suite à un dysfonctionnement de la cellule de la sonde de conductivité, le profil enregistré s'est avéré erroné et n'a donc pas été représenté sur la planche de diagraphies fournie en annexe.

#### 7.2.1) Le profil de température

La thermographie met en évidence une zone d'entrées d'eau principale au sommet du trou nu, de 147.10 à 149 mètres.

Des entrées d'eau plus localisées ont été identifiées aux environs de 161 mètres (via la zone cavée), 170.50 mètres (cavité renfermant de la calcite), ainsi que 190, 201.50 et 209.50 mètres.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

- au début des mesures, à 56 mètres :
  - température : 23.7°C
- à la base des mesures, à 215.60 mètres :
  - température : 28.7°C

#### 7.2.2) La mesure de flux

Elle a été réalisée au débit moyen de 105 m<sup>3</sup>/h.

La dépression d'environ 25 mètres produite par près de 21 heures de pompage (au début de la diagraphie) a permis de répartir la distribution des arrivées d'eau de la manière suivante :

- 43.8% du débit sont produits entre 147.10 et 149.50 mètres (arrivées d'eau très turbides identifiées au sommet du trou nu),
- 4.7% du débit sont produits entre 149.50 et 156.80 mètres,
- 26.2% du débit sont produits entre 156.80 et 162 mètres, au droit des deux grandes zones cavées identifiées lors de l'inspection vidéo,
- 10.5% du débit sont produits entre 162 et 218.40 mètres,
- 14.8% du débit sont produits en dessous de 218.40 mètres, à savoir en dessous de la zone d'éboulement rocheux.

#### 7.3- Contrôle de cimentation (mesure CBL/VDL)

Il a été réalisé au droit de la partie immergée des tubes en acier de diamètre interne 316 mm qui équipent la chambre de pompage.



#### 7.3.1) Paramètres d'acquisition de la mesure

#### 7.3.2) D'un point de vue qualitatif

La mesure et l'enregistrement du temps de transit du signal acoustique (profil rouge référencé "TT\_A", en µsec), qui caractérise le temps de transit du signal acoustique entre la sonde et les tubes de la chambre de pompage, permet de contrôler les éventuels phénomènes de "bruits de fond" liés à l'excentration et aux mouvements de la sonde dans la chambre de pompage.

La limite inférieure du profil du temps de transit enregistré, linéaire (observée notamment entre 46 et 52 mètres, 64 et 70 mètres ou encore entre 84 et 90 mètres), de l'ordre de 362 µsec, témoigne des bonnes conditions de centrage de la sonde de mesure.

Le profil est néanmoins marqué par la présence de nombreux "sauts de cycle", majoritairement discontinus. Ce phénomène se produit en présence de très basses amplitudes de résonance et exprime la liaison parfaite de la gangue de ciment avec la paroi externe du tubage, qui de ce fait atténue fortement l'effet de résonance et limite les possibilités de mesures de l'amplitude du signal.

#### 7.3.3) D'un point de vue quantitatif

La <u>mesure CBL</u> (profil bleu référencé "AMP3", en mV) exprime la résonance du tubage. L'amplitude du signal de résonance enregistré traduit l'état de cohésion entre l'extrados du tube constituant la chambre de pompage et la gangue de ciment annulaire.

La mesure obtenue met en évidence la présence de zones de très bonne cohésion entre le tubage et le ciment, alternées avec des zones localement de moins forte cohésion (mais qui restent néanmoins correcte) :

P	de 13 à 25 m :	cimentation d'excellente qualité (amplitude <5 mV), générant un grand "s	saut de
		cycle" du temps de transit (cf. 7.3.2),	

- de 25 à 46 m : cimentation de très bonne qualité (amplitude de 5-7 mV), générant de nombreux petits "sauts de cycle",
- de 46 à 52 m : cimentation de qualité satisfaisante (amplitude de 15-20 mV),
- de 52 à 55 m : cimentation de très bonne qualité (amplitude proche de 5 mV), générant un "saut de cycle",
- de 55 à 64 m : cimentation de qualité satisfaisante (amplitude de 20 puis 15 mV),
- de 64 à 70 m : cimentation de qualité satisfaisante (amplitude de 20 mV),

Réception d'ouvrage

	de 70 a 76 m :	cimentation hétérogène mais de bonne qualité (amplitudes variant entre 7 et 20 mV), générant de nombreux petits "sauts de cycle" au droit des plus basses amplitudes,
A	de 76 à 84 m :	cimentation de très bonne qualité (amplitude proche de 5 mV), générant des "sauts de cycle",
A	de 84 à 90 m :	cimentation de qualité satisfaisante (amplitude de 20 mV),
A	de 90 à 117 m	cimentation de bonne qualité (amplitude de 5 à 10 mV), générant un "saut de cycle",
A	de 117 à 141 m	cimentation plus hétérogène mais de bonne qualité (amplitude variant entre 5 et 15 mV), générant des "sauts de cycle", avec une zone localement de moins
	ran Parisona a senarara	forte cohésion entre 130 et 132 mètres (amplitude de 15 à 20 mV),
	de 141 à 144 m :	cimentation de qualité satisfaisante (amplitude de l'ordre de 15 mV).

La <u>mesure VDL</u> (spectre sismique référencé "FW 5Ft", en µsec) donne des informations sur la qualité du lien entre le tubage et la gangue de ciment puis entre la gangue de ciment et la formation géologique. La mesure obtenue atteste d'un **bon couplage tubage/ciment/formation**, qui constitue un ensemble cohérent, d'autant plus marqué au droit de la partie haute des équipements, jusqu'à 25 mètres. Cette mesure met également en évidence les raccords de tubages, positionnés tous les 6-7 mètres environ, qui génèrent une diffraction du signal sous forme de chevrons.



Le niveau piézométrique mesuré le 10 décembre 2014 (au matin) était situé à 8.55 mètres sous le repère, pris au niveau de la bride du tube en acier de diamètre interne 316 mm (située à + 0.32 m/sol).

Le forage a été contrôlé conforme à la coupe technique annoncée.

L'état des équipements de la chambre de pompage - tubes en acier API de diamètre 13"<sup>3/8</sup> - n'a pu être réellement apprécié en raison d'une turbidité très élevée de la colonne d'eau en pompage.

La partie en trou nu - calcaires, forés en diamètre 12"<sup>1/4</sup> - est marquée par une zone de production haute (de 147.10 à 148.40 mètres) produisant des eaux très turbides.

Deux grandes zones cavées ont également été localisées aux environs de 159 et 161 mètres, conférant au trou nu un diamètre très irrégulier.

En dessous de 161 mètres, la section du trou nu est globalement homogène. De nombreuses fissures ont été identifiées, ainsi que des cavités dont les plus importantes renferment de la calcite.

Une grande fissure ouverte subverticale est également présente aux environs de 217 mètres, recoupant l'axe du forage.

L'inspection vidéo a dû être stoppée à 218.40 mètres, au droit d'une zone d'éboulement, la base de l'ouvrage se situant théoriquement à 250 mètres.

Les diagraphies de production effectuées au débit moyen de 105 m<sup>3</sup>/h témoignent d'une répartition très hétérogène des arrivées d'eau, avec notamment 43.8% du débit produits au sommet du trou nu (de 147.10 à 149.50 mètres - arrivées d'eau très turbides), soit sur environ 2% de la surface en trou nu totale.

La mesure CBL/VDL met globalement en évidence un **bon couplage tubage/ciment/formation**, qui constitue un ensemble cohérent, d'autant plus marqué au droit de la partie haute des équipements, jusqu'à 25 mètres.

#### Fait à Hinx, le 18 mars 2015

<u>Rédacteur</u> : Hélène LAFITTE Ingénieur HYDROGEOLOGUE

Vérificateur : Karine EUZENAT Ingénieur HYDROGEOLOGUE

Approbateur : Sébastien DANGOUMAU Gérant

Annexe 1

PRESENTATION DU SITE

## HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Présentation du site

#### Commune : Béziers (34)

Adresse : "Rec de Cabrials"

Forage : "Sud-Est"

Réf. cadastrale : section HP - parcelle 180

#### Vue aérienne



#### **Extrait cadastral**



Hydro Assistance Ingénierie

Présentation du site

Annexe 2

COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE
Coupe technique de l'ouvrage



## Commune : Béziers (34)

Forage : Sud-Est



Annexe 3

**DIAGRAPHIES DIFFEREES - DIAGRAPHIES DE PRODUCTION** 

1



## Diagraphies

Commune : Béziers (34) Forage neuf "Sud-Est"



Annexe 4

CONTROLE DE CIMENTATION (MESURE CBL/VDL)



Annexe 5

**EXAMEN ENDOSCOPIQUE** 

E

## Hydro Assistance Ingenierie

Examen endoscopique



## Commune : Béziers (34)

Forage : "Sud-Est"

Date d'intervention : 11/12/2014

## Chambre de pompage en acier API - diamètre $13^{n^{3/8}}$ et trou nu - diamètre $12^{n^{1/4}}$ (1/2)



Tube en acier API - diamètre 13"3/8



Tube en acier API - diamètre 13"<sup>3/8</sup> Colonne d'eau (en pompage) très turbide



Base du tube en acier API - diamètre 13"<sup>3/8</sup> Sommet du trou nu - diamètre 12"<sup>1/4</sup>



Grande zone cavée de 158.50 à 159.20 mètres Présence de calcite, surmontée de sables fins



Trou nu (calcaires) - diamètre 12"<sup>1/4</sup> Section bien calibrée



Zone cavée à 161 mètres Présence de calcite, surmontée de sables fins

## Hydro Assistance Ingenierie

Examen endoscopique



## Commune : Béziers (34)

Forage : "Sud-Est"

Date d'intervention : 11/12/2014

Trou nu - diamètre 12"1/4 (2/2)



Section bien calibrée Présence de fissures



Section plus irrégulière Présence de fissures



Fissure ouverte renfermant de la calcite



Cavité renfermant de la calcite



Grande fissure ouverte subverticale, recoupée par l'axe du forage



Zone déboulement à 218.40 mètres Arrêt vidéo - Bloc rocheux en travers du forage

Hydro Assistance Ingénierie

## Annexe 2

## Analyses chimique Laboratoire Carso (sur le Forage Cabrials)

## CARSO - LABORATOIRE SANTÉ ENVIRONNEMENT HYGIÈNE DE LYON

Laboratoire Agréé pour les analyses d'eaux par le Ministère de la Santé

Rapport d'analyse Page 1 / 7 Edité le : 06/01/2015

Rapport partiel

CABM - SERVICE FINANCES

39 BOULEVARD DE VERDUN CS 30567 34536 BEZIERS Cedex .

Le rapport établi ne concerne que les échantillons soumis à l'essai. Il comporte 7 pages.

La reproduction de ce rapport d'analyse n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral. L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, identifiés par le symbole #.

Les paramètres sous-traités sont identifiés par (\*).

Les paramètres co-traités aux laboratoires BIOFAQ (Accréditation 1-1674 portée disponible sur www.corrac.tr) sont identifiés par (\*\*).

Identification dossier : Identification échantillon :	SE14-140892 Réference contrat : LSEC14-4691 .SE1412-35240 Analyse demandée par : ARS DT DE L'HERAULT								
Doc Adm Client :	Cde 2014000203 du 30/07/2014 - Fournisseu	de 2014000203 du 30/07/2014 - Fournisseur 12847							
N° Analyse :	00162883	N° Prélévement : 00162956	)						
Nature:	Eau de ressource souterraine								
Lieu de Prelevement :	F.KARST - BEZIERS EST 2014	ARST - BEZIERS EST 2014							
Localisation exacte :	TETE DE FORAGE-Robinet de la colonne de	TE DE FORAGE-Robinet de la colonne de forage							
Dept et commune :	34 BEZIERS	34 BEZIERS							
UGE :	0686 - S. CABM								
Type d'eau :	B - EAU BRUTE SOUTERRAINE		PSV: 0000005535						
Type de visite :	AUPA Type Analyse : PAEKA		Motif du prélèvement : AU						
Nom de l'installation :	KARST - BEZIERS EST 2014	Type : CAP	Code : 005854						
Prélèvement :	Prélevé le 22/12/2014 à 10h30 Réceptionne	é le 22/12/2014 à 21h33							
	Prélevé et mesuré sur le terrain par CARSO L Prélèvement accrédité	SEHL / HADDEDOU GILBER	रा						
	Flaconnage CARSO-LSEHL								

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont consultables au laboratoire. Pour déclarer, ou non, la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.

Date de début d'analyse le 22/12/2014 à 21h36

Paramètres analytique	5	Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de qualité	Références de qualité	ONLIGO
Mesures sur le terrain								
Température de l'eau	34PAEKA	27.1	•c	Méthode à la sonde	Méthode Interne M_EZ008 v2	25		#
pH sur le terrain	34PAEKA	6.4	-	Electrochimie				#
Oxygène dissous	34PAEKA	0.92	mg/1 O2	Methode LDO	Méthode Interne M_EZ014 V2			#
Taux de saturation en oxygène sur le terrain	34PAEKA	10.5	%	Méthode LDO	Méthode Interne M_EZ014 V2			
Chiore total sur le terrain	34PAEKA	<0.05	mg/I Cl2	Spectrophotométrie à la DPD	NF EN ISO 7393-2			#

Société par action simplifiée au capital de 2 283 622.30 € - RCS Lyon B 410 545 313 - SIRET 410 545 313 00042 - APE 743 B -- N\* TVA: FR 82 410 545 313 par action simplified au capital de 2.85 62,50 ° Frost Lyon 9410 545 315 ° onter 1410 545 315 00042 ° APE 445 0 °

CARSO-LSEHL Rapport d'analyse Page 2 / 7 Edité le : 06/01/2015 Identification échantillon : LSE1412-35240 Destinataire : CABM - SERVICE FINANCES

Paramètres analytiques		Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de qualité	Références de qualité	OOFRAC
Analyses microbiologiques								Г
Microomanismes aérobies à 36°C	MPAEKA	19	UEC/ml	incomposition.	NE EN 190 5222			±
Microomanismes aérobies à 22°C	MPAEKA	36	UEC/ml	Incorporation	NE EN ISO 5222			#
Bactéries coliformes à 36°C	MPAFKA	<1	UEC/100 ml	Filtration	NE EN ISO 9308-1			#
Escherichia coli	34PAEKA	<1	UFC/100 ml	Filtration	NF EN ISO 9308-1	20000		#
Entérocoques (Streptocoques fécaux)	ЗИРАЕКА	<1	UFC/100 ml	Filtration	NF EN 180 7899-2	10000		#
Anaérobles sulfito-réducteurs (spores)	34PAEKA	<1	UFC/100 ml	Fitration	NF EN 26461-2			#
Analyses parasitologiques								
Oocystes de Cryptosporidium	зираека	Absence	/100 litres	Concentration et IMC	NF T90-455			#
Caractéristiques organoleptiques								
Odeur	34PAEKA	0 Néant	-	Qualitative				
Saveur	34PAEKA	0 Néant	-	Qualitative				
Odeur à 25 °C : seul	34PAEKA	N.M.	-	Analyse organoleptique	NF EN 1622 méth. courte			
Saveur à 25 °C : seul	34PAEKA	N.M.	-	Analyse organoleptique	NF EN 1622 méth.			
Couleur apparente (eau brute)	34PAEKA	< 5	mg/I Pt	Comparateurs	NF EN ISO 7887	200		#
Couleur vraie (eau filtrée)	34PAEKA	< 5	mg/I Pt	Comparateurs	NF EN ISO 7887	200		#
Turbidité	34PAEKA	160	NFU	Néphélométrie	NF EN ISO 7027			
Analyses physicochimiques								
Analyses physicochimiques de bas	e							
Conductivité électrique brute à 20°C	34PAEKA	2468	µS/cm	Conductimétrie	NF EN 27888			#
Conductivité électrique brute à 25°C	34PAEKA	2736	µS/cm	Conductimétrie	NF EN 27888			#
TAC (Titre alcalimétrique complet)	34PAEKA	67.00	*F	Potentiométrie	NF EN 9963-1			#
TH (Titre Hydrotimétrique)	34PAEKA	85.0	•F	Calcul à partir de Ca et Mg	Méthode Interne M_EM144			#
Carbone organique total (COT)	34PAEKA	0.3	mg/I C	Pyrolyse ou Oxydation par	NF EN 1484	10		#
Indice phénoi	34PAEKA	< 0.010	mg/l	Flux continu (CFA)	NF EN ISO 14402	0.10		#
Tensioactifs anioniques (indice	34PAEKA	< 0.05	mg/LS	Spectrophotométrie	NF EN 903	0.5		
SABM) Fluorures	34PAEKA	0.65	mg/I F-	Chromatographie ionique	NF EN ISO			#
Cyanures totaux (Indice cyanure)	зираека	< 10	µg/I CN-	Flux continu (CFA)	10304-1 NF EN ISO 14403	50		#
Equilibre calcocarbonique								
pH à l'équilibre	34PAEKA	6.44	-	Calcul	Méthode Legrand			
Equilibre calcocarbonique (5 classes)	34PAEKA	2 à l'équilbre	-	Calcul	Méthode Legrand et Poirier			
Cations								
Ammonium	34PAEKA	0.19	mg/I NH4+	Spectrophotométrie au bieu Indophénoi	NF T90-015-2	4		#
Calcium dissous	зираека	237.0	mg/I Ca++	ICP/AES après fitration	NF EN ISO 11885			#
L			1	1	1			

CARSO-LSEHL Rapport d'analyse Page 3 / 7 Edité le : 06/01/2015 Identification échantillon : LSE1412-35240 Destinataire : CABM - SERVICE FINANCES

Paramètres analyt	iques	Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de qualité	Références de qualité	OCFRAC
Magnésium dissous	34PAEKA	62.51	mg/I Mg++	ICP/AES après fitration	NF EN ISO 11885			#
Sodium dissous	34PAEKA	263.2	mg/I Na+	ICP/AES après fitration	NF EN ISO 11885	200		#
Potassium dissous	34PAEKA	22.37	mg/I K+	ICP/AES après fitration	NF EN ISO 11885			#
Anions								
Chlorures	34PAEKA	441	mg/I CI-	Chromatographie lonique	NF EN ISO	200		#
Sulfates	34PAEKA	246	mg/1 SO4-	Chromatographie ionique	10304-1 NF EN ISO	250		#
Nitrates	34PAEKA	< 0.1	mg/I NO3-	Chromatographie ionique	10304-1 NF EN ISO	100		#
Nitrites	34PAEKA	< 0.02	mg/I NO2-	Spectrophotométrie	10304-1 NF EN 26777			#
Métaux								
Aluminium total	34PAEKA	336	µg/I Al	ICP/MS après acidification et	180 17294-1 et NF			#
Arsenic total	34PAEKA	2	µg/I As	ICP/MS après acidification et	ISO 17294-1 et NF	100		#
Chrome total	34PAEKA	6	µg/I Cr	ICP/MS après acidification et	ISO 17294-1 et NF	50		#
Fer total	34PAEKA	355	µg/I Fe	ICP/MS après acidification et	ISO 17294-1 et NF			#
Manganèse total	34PAEKA	< 10	µg/I Mn	ICP/MS après acidification et	ISO 17294-1 et NF			#
Nickel total	34PAEKA	< 5	µg/I NI	ICP/MS après acidification et	ISO 17294-1 et NF			#
Plomb total	34PAEKA	< 2	µg/I Pb	ICP/MS après acidification et décantation	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2	50		#
Baryum totai	34PAEKA	0.041	mg/I Ba	ICP/MS après acidification et	180 17294-1 et NF			#
Bore total	34PAEKA	0.108	mg/I B	ICP/MS après acidification et	ISO 17294-1 et NF			#
Cadmium total	34PAEKA	< 1	µg/I Cd	ICP/MS après acidification et décantation	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2	5		#
Antimoine total	34PAEKA	< 1	µg/I Sb	ICP/MS après acidification et	ISO 17294-1 et NF			#
Sélénium total	34PAEKA	< 2	µg/I Se	ICP/MS après acidification et décantation	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2	10		#
Culvre total	34PAEKA	< 0.010	mg/I Cu	ICP/MS après acidification et décantation	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2			#
Zinc total	34PAEKA	< 0.010	mg/I Zn	ICP/MS après acidification et décantation	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2	5		#
Mercure total	34PAEKA	< 0.5	µg/I Hg	Fluorescence après minéralisation bromure-bromate	Méthode Interne seion NF EN ISO 17852			#
COV : composés organiques	volatils							
втех								
Benzêne	34PAEKA	< 0.5	нач	HS/GC/MS	NF EN ISO 11423-1			#
Solvants organohalogénés								
1,2-dichloroéthane	34PAEKA	< 0.50	µg/I	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			#
Bromoforme	34PAEKA	< 0.50	hðu	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			#
Chloroforme	34PAEKA	< 0.50	µg/1	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			#
Dibromochlorométhane	34PAEKA	< 0.50	µg/1	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			#
Dichiorobromométhane	34PAEKA	< 0.50	µ9/1	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			#
L				1	1			

CARSO-LSEHL Rapport d'analyse Page 4 / 7 Edité le : 06/01/2015 Identification échantillon : LSE1412-35240 Destinataire : CABM - SERVICE FINANCES

Paramètres analytique	5	Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de	Références	OOFR
				-		drate	de queite	ð
Somme des trihaiométhanes	34PAEKA	<0.50	ндл	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			
Tétrachloroéthyléne	34PAEKA	< 0.50	µg/1	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			#
Trichioroëthylëne	34PAEKA	< 0.50	µg/I	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			#
Somme des tri et tétrachioroéthylène	34PAEKA	<0.50	µg/1	HS/GC/MS	NF EN ISO 10301			
HAP : Hydrocarbures aromatiques	polycycliqu	25						
НАР								
Pesticides								
Total pesticides								
Pesticides azotés								
Atrazine déséthyl délsopropyl	34PAEKA	< 0.020	µg/I	HPLC/MS/MS après Injection directe	Méthode Interne M_ET108	2		#
Peszicides organochlorés								
Aldrine	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Dieldrine	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Methode M_ET172	2		#
Endosulfan alpha	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Endosulfan béta	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Endosulfan sulfate	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Methode M_ET172	2		#
Endosulfan total (alpha+beta)	34PAEKA	<0.015	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Endrine	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
HCB (hexachlorobenzène)	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Heptachlore	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Heptachlore époxyde endo trans	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Heptachiore époxyde exo dis	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GCMS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Heptachlore époxyde	34PAEKA	<0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Lindane (HCH gamma)	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Pesticides organophosphorés								
Phoxime	34PAEKA	< 0.020	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Oxydemeton methyl	зираека	< 0.020	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Chiorfenvinphos (chiorfenvinphos	зираека	< 0.005	µg/I	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Chiorpyriphos ethyl	зираека	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Diazinon	34PAEKA	< 0.005	hðu	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Dichlorvos	34PAEKA	< 0.010	hðų	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		
Fenitrothion	ЗИРАЕКА	< 0.005	hðu	GCMSMS après extraction SPE	Methode M_ET172	2		#
L			1	1				

CARSO-LSEHL Rapport d'analyse Page 5 / 7 Edité le : 06/01/2015 Identification échantillon : LSE1412-35240 Destinataire : CABM - SERVICE FINANCES

Paramètres analytiques		Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de	Références	OOFRA
						-	us quality	δ
Malathion	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Methidathion	зираека	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Parathion éthyl (parathion)	34PAEKA	< 0.010	µg/I	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Parathion méthyl	ЗИРАЕКА	< 0.005	ндл	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Carbamates								
Carbendazime	34PAEKA	< 0.020	µg/I	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Carbofuran	34PAEKA	< 0.020	р91	HPLC/MS/MS après	M_ET108 Méthode Interne M_ET108	2		#
Carbofuran 3-hydroxy	34PAEKA	< 0.020	µg/1	HPLC/MS/MS après injection directe	Méthode Interne M_ET108	2		#
Methomyl	34PAEKA	< 0.020	µg/I	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Iprovalicarbe	зираека	< 0.020	µg/1	HPLC/MS/MS après injection directe	Méthode Interne M_ET108	2		#
Amides								
Acétochiore	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Alachiore	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Métazachior	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Métolachior	SAPAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Napropamide	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GC/MS/MS après extraction	Methode M_ET172	2		#
Oxadixyl	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Tebutam	34PAEKA	< 0.005	µg/I	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Dimetachlore	ЗИРАЕКА	< 0.005	рдл	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Ammoniums quaternaires								
Mépiquat	зираека	< 0.050	µg/I	HPLC/MS/MS Injection	Méthode Interne	2		#
Diquat	зираека	< 0.050	рдл	HPLC/MS/MS Injection	Methode Interne	2		#
Paraquat	34PAEKA	< 0.050	µg/I	HPLC/MS/MS injection	Méthode Interne	2		#
Chiorméquat-chiorure	34PAEKA	<0.064	µg/I	HPLC/MS/MS injection	Méthode Interne	2		
Anilines				unette	M_E1035			
Pendimethaline	34PAEKA	< 0.005	µgл	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Trifluraline	34PAEKA	< 0.005	рдл	SPE GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Ampler				SPE				
		0.050						_
Aminotriazole	34PAEKA	< 0.050	hðu	HPLC/MS/MS après Injection directe	Méthode Interne M_ET130	2		#
Benzontriles								
Acionifen	зираека	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		
L			1	1				L

CARSO-LSEHL Rapport d'analyse Page 6 / 7 Edité le : 06/01/2015 Identification échantillon : LSE1412-35240 Destinataire : CABM - SERVICE FINANCES

Paramètres analytiqu	ues	Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de	Références	<b>M</b> -DO
			•	-		quante	de querte	8
Dichlobenii	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Fenarimol	ЗИРАЕКА	< 0.005	µgЛ	SPE GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Diazines								
Bromaclie	ЗИРАЕКА	< 0.005	µgл	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Dicarboxymides								
Captane	34PAEKA	< 0.010	µg/1	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		
Folpel (Folpet)	34PAEKA	< 0.010	µg/1	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		
Iprodione	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		
Procymidone	зираека	< 0.005	µg/I	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Phénoxyacides								
fluroxypyr-meptyl ester	ЗАРАЕКА	< 0.020	µg/I	HPLC/MS/MS après Injection directe	Méthode Interne M_ET108	2		#
Pyréthrinoïdes								
Cyperméthrine	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Deitaméthrine	ЗИРАЕКА	< 0.005	µд/1	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Strobilurines								
Peszicides divers								
S-metolachior	34PAEKA	⊲0.10	µg/1	HPLC/MS/MS après extract.	Méthode Interne			
Cymoxanii	34PAEKA	< 0.020	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne M ET108	2		
Fosetyl aluminium	34PAEKA	< 0.020	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Glufosinate	34PAEKA	< 0.050	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
AMPA	34PAEKA	< 0.050	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Glyphosate (incluant le sulfosate)	34PAEKA	< 0.050	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Fenamidone	34PAEKA	< 0.020	µg/1	HPLC/MS/MS après	Méthode Interne	2		#
Anthraquinone	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Chlorothaionli	34PAEKA	< 0.010	µg/1	GCMS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		
Cyprodinii	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Diffurenican (Diffurenicanii)	ЗИРАЕКА	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Dimethenamide	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Fenpropidine	34PAEKA	< 0.010	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		
Fenpropimorphe	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
2,6-dichlorobenzamide	34PAEKA	< 0.005	hðu	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
L			1	1	1			

CARSO-LSEHL Rapport d'analyse Page 7 / 7 Edité le : 06/01/2015 Identification échantillon : LSE1412-35240 Destinataire : CABM - SERVICE FINANCES

Doc Adm Client : Cde 2014000203 du 30/07/2014 - Fournisseur 12847

Paramètres analytiques		Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de qualité	Références de qualité	OOFRAC
Kresoxim-méthyi	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Norflurazon	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Norflurazon désméthyi	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Oxadiazon	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Oxynuoriene	34PAEKA	< 0.010	µg/1	GC/MS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Piperonii butoxyde	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMS/MS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Quinoxyfène	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Carlentrazone ethyl	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction	Méthode M_ET172	2		#
Benoxacor	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GCMSMS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Famoxadone	34PAEKA	< 0.005	µg/1	GC/MS/MS après extraction SPE	Méthode M_ET172	2		#
Urées substituées								
Radioactivité								

ANALYSE 1ERE ADDUCTION EAU EN MILEU KARSTIQUE 34PAEKA

Turbidité : délai de mise en analyse supérieur à 1 jour.

détergents anioniques : délai de mise en analyse supérieur à 1 jour.

## Annexe 3

## Résultats des analyses chimiques et isotopiques



Provenance : SGR LRO			Demandeur : LADOUCHE Bernard
Nature échantillon : EAU Echantillons réceptionnés le : 14/01/2015 Analyses commencées le : 16/01/15 Référence commande : PSP11LRO11 0	Nombre:	3	Adresse: SAR/GGR ME/SGR LRO 1039, rue de Pinville 34000 MONTPELLIER France

Secteur analytique	Ingénieur technique
Analyse inorganique des eaux et des solides	T.CONTE

Résultats validés par le(s) ingénieur(s) technique(s)

Visa:

Veronique JUANPROST Direction

Coordonnateur des analyses

Téléphone: 02.38.64.30.17 Télécopie: 02.38.64.39.25

le:02-FEV-2015

GABORIAU

Nombre de pages: 5

>>> ATTENTION AUX COMMENTAIRES DU LABORATOIRE

Les résultats exprimés ne concernent que les échantilions soumis à essais. La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation qui sont identifiés par le symbole ". Laboratoire agréé par le ministère chargé de l'environnement - se reporter à la liste des laboratoires sur le site du ministère.

Siège Tour Mirabeau - 39-43, quai André-Citroën, 75739 Paris Cedex 15-France Tel. 01 40 58 89 00 - Fax 01 40 58 89 33

Centre scientifique 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France Tél. 02 38 64 34 34 - Fax 02.38.64.35.18

brgm Etablissement public à caractère industriel et commercial - RCS 58 b 5614 Paris - SIRET 58205614900419

www.brgm.fr

## brgm LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission : 100035825

Rapport d'essais : 15-6-004-A

\* : éléments analysés dans le cadre de l'accréditation COFRAC

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le secteur analytique : Analyse inorganique des eaux et des solides

Le mode opératoire MO108	Analyse d'éléments traces par ICP-MS sulvant NF EN ISO 17294-2 d'avril 2005
est utilisé pour doser :	
"Ag (Argent)	"Al (Aluminium)
"As (Arsenic)	"B (Bore)
"Ba (Baryum)	"Be (Béryillum)
*Cd (Cadmium)	"Co (Cobalt)
°Cr (Chrome)	"Cu (Culvre)
*LI (Lithium)	"Mn (Manganèse)
"NI (Nickel)	"Pb (Plomb)
"Sr (Strontlum)	"Zn (Zinc)
Le mode opératoire MO332 SEP-14	Analyse colorimétrique sur un système d'analyse discrète sulvant la norme NF ISO 15923-1.
est utilisé pour doser :	
"NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	"NO2 (Nitrites exprimés en NO2)
"PO4 (OrthoPhosphates en PO4)	
Le mode opératoire NF EN ISO 10304 Code Sandre : 266 est utilisé pour doser :	Méthode par chromatographie ionique (Dionex) selon NF EN ISO 10304- 1 (juillet 2009). Evaluation des aires des pics. Analyse sur échantilion filtre à 0.45µm.
CI (Chiorures)	"F (Fluorures)
"NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	"SO4 (Sulfates)
Le mode opératoire NF EN ISO 11885 NOV-09 Code Sandre : 306	Analyse par ICP - spectrométrie d'émission.
est utilisé pour doser :	
"Ca (Calcium)	"Fe (Fer)
"K (Potassium)	'Mg (Magnésium)
"Na (Sodium)	"SIO2 (Silice)
Le mode opératoire NF EN ISO 9963-1 FEV-96 Code Sandre : 234 est utilisé pour doser :	Alcalinité TA/TAC par potentiométrie selon NF EN ISO 9963-1, CO3/HCO3 calculés à partir des valeurs de l'alcalinité (hypothèse alcalinité uniquement due à CO3, HCO3)
CO3 (Carbonates)	HCO3 (Bicarbonates)

le: 02-FEV-2015

## brgm LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission : 100035825

Rapport d'essais : 15-6-004-A

\* : éléments analysés dans le cadre de l'accréditation COFRAC

Commentaire du laboratoire :

Le délai et la température des échantillons à réception au laboratoire ne sont pas conformes aux normes de conservation des échantillons en vigueur pour les paramètres NH4, NO2, NO3, alcalinité pour la totalité des échantillons et PO4, CI, SO4 pour l'échantillon 3. Si l'apposition du logo COFRAC en face des paramètres concernés indique que les analyses ont été réalisées conformément à notre système de management de la qualité, les résultats peuvent toutefois ne pas refléter la concentration réelle de l'échantillon initialement prélevé en raison des conditions de conservation des échantillons lors du transport.

Commentaire général :

Les échantilions reçus non conditionnés selon les recommandations en vigueur (normes d¿analyses ou norme NF EN ISO 5667-3) font l'objet d'un commentaire du laboratoire. Le mode et la durée de conservation avant réception au laboratoire sont de la responsabilité de l'organisme préleveur.

Tout échantilion concernant des études d'environnement est détruit un mois après la remise des résultats sauf demande du client. Pour les solides : résultats exprimés sur matière sèche.

RESULTATS: Les limites de quantification sont estimées sur des matrices naturelles ou représentatives de l'échantilion. Elles peuvent être modifiées en fonction de la nature des échantilions.

Les incertitudes des paramètres accrédités peuvent être fournis sur demande. UNITES : elles peuvent être différentes selon les éléments

g/l, mg/l, µg/l (1µg/l=0.001mg/l), ng/l (1ng/l=0.001µg/l)

% (pourcentage massique) mg/kg (1mg/kg=0.0001%), µg/kg (1µg/kg=0.001mg/kg) µg-microgramme, ng-nanogramme

le: 02-FEV-2015

## brgm

## TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100035825

Rapport d'essais : 15-6-004-A

			Lims	200227420	200227421	200227422
			Labo	1 E Cabriala 20/12/14	2 E Cabrials 17/10/14	3 E Notro Domo
			Client	F.Gabriais 22/12/14	F.Gabriais 17/12/14	03/10/14
Elément	Unité	LQ**	cs ***			
*Ca (Calcium)	mg/l	0.5	1374	251.8	255.6	109.3
	-		4370			20.5
Mg (Magnesium)	mgn	0.5	13/2	04.4	00.1	32.5
"Na (Sodium)	mg/l	0.5	1375	274.1	271.1	47.9
W (Dotacelum)	mail		1767	22.0	02.1	
R (Potassium)	mgn	0.5	1307	22.9	20.1	3.5
*NH4 (Ammonium exprimé en	mg/l	0.05	1335	0.26	0.26	< 0.05
NH4)						
CO3 (Carbonates)	mo/l	10	1328	< 10	< 10	e 10
COS (Carbonates)	ingri		1020	~ 10	- 10	- 10
HCO3 (Bicarbonates)	mg/l	10	1327	804	800	360
*CI (Chiorures)	ma/l	0.5	1337	467.7	385.4	48.9
NO3 (Nitrates exprimés en	mg/i	0.5	1340	< 0.5		10.7
100)						
"NO3 (Nitrates exprimés en	mg/l	1	1340		< 1	
NO3)						
100 ( 10) (0)						
SO4 (Sunates)	mg/i	0.5	1330	205.4	222.4	123.0
*PO4 (OrthoPhosphates en	mg/l	0.05	1433	< 0.05	0.36	< 0.05
PO4)						
"NO2 /Nitritos exprimés en NO	2) mail	0.01	1330	< 0.01	< 0.01	0.16
NO2 (Nulles explines en NO	2) mg/i	0.01	1009	< 0.01	< 0.01	0.10
*F (Fluorures)	mg/l	0.1	1391	2.1	2.2	0.2
"Ag (Argent)	ug/1	0.01	1368	< 0.01	< 0.01	< 0.01
	P.9**	2.21			2.01	
"Al (Aluminium)	µg/l	0.5	1370	2.00	1.84	0.64
"As (Arsenic)	µg/l	0.05	1369	2.84	3.20	0.23
ъ (Bore)	µg/l	0.5	1362	129	128	36.1

le: 02-FEV-2015

## brgm

## TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100035825

Rapport d'essais : 15-6-004-A

			Lims	200227420	200227421	200227422
			Labo	1	2	3
			Client	F.Cabrials 22/12/14	F.Cabrials 17/12/14	F.Notre Dame
						03/10/14
Elément	Unite	10"	ce			
	erine.		03			
'Ba (Baryum)	µg/I	0.05	1396	33.1	34.4	68.7
"Be (Béryllium)	µдЛ	0.01	1377	0.08	0.08	< 0.01
"Cd (Cadmlum)	µд/I	0.01	1388	0.08	0.02	0.02
"Co (Cobalt)	µg/l	0.05	1379	0.22	0.45	0.54
°Cr (Chrome)	µg/I	0.1	1389	< 0.1	< 0.1	0.17
"Cu (Culvre)	µg/l	0.1	1392	< 0.1	< 0.1	2.42
'Fe (Fer)	mg/l	0.02	1393	0.626	0.621	< 0.02
*Li (Lithium)	µg/l	0.1	1364	90.4	92.7	11.5
'Mn (Manganèse)	µд/I	0.1	1394	5.06	6.20	89.8
"NI (Nickel)	µд/I	0.1	1386	2.66	8.89	3.43
"Pb (Plomb)	µд/I	0.05	1382	0.07	0.11	< 0.05
*SIO2 (SIlice)	mg/l	0.5	1348	16.0	16.4	13.9
*Sr (Strontium)	µg/l	0.1	1363	3354	3313	227
"Zn (Zinc)	µд/1	0.5	1383	487	5.93	4.24

\*\* LQ Limite de quantification

\*\*\* CS : Code Sandre

## FIN DU RAPPORT D'ESSAIS

le: 02-FEV-2015

' <b>x</b>	Geosciences p bron EAU/NKE	sur une Terre d'urable	
	23/UL		45.6.005.4
	A suivra par :	RAPPORT DESSAIS	15-0-005-A
	Copies p.i. :	*******	
	Classement :		
V/Réf			A l'attention de : LADOUCHE Bernard
Infor	mations sur le(s) éc	hantillon(s) :	BRGM D3E/NRE
- Da	te début d'analyse :	19/01/15	1039, rue de Pinville
- Da	te de réception :	16/01/2015	34000 MONTPELLIER France
- No	mbre: 2		
- Na	ture : EAU		
- Aut	eur prélèvement:		Télécopie nº

Secteur analytique	Coordinateur
Spectromètres de masse	C.GUERROT

Validé le 19-FEV-2015 par Catherine GUERROT

Approuvé par Philippe NEGREL, Directeur adjoint des laboratoires

## SS

Nbr pages : 2

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

> BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France Direction des Laboratoires - Unité Isotopes Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11

RECTION DES LABORATOIRES	ITE ISOTOPES	soumission : 100035852	Etude : 15-6-005-A
OIREC'	UNITE	d sour	N° Etuc

Plateau ISOTOPIE SPECTROMETRES DE MASSE Labo TIMS

Orléans le 19/02/2015

# RESULTATS D'ANALYSES

Objet : Analyse isotopique du Bore dans 2 échantillons d'eau du projet Karst Bézier 2. Demandeur : B. LADOUCHE D3E/NRE/MONTPELLIER

Demande du :	16/01/2015	Mesure du <sup>511</sup> B		
Fait le :	19/02/2015	Analyse sur mono filaments de Ta en	ions positifs	
	n°Labo	n°Client	5 <sup>11</sup> B en ‰	± 2ơ(m) (‰)
	B2630	F. CABRIALS 18/12/2014	9.56	0.03
		= =	66.6	0.15
	B2631	F. CABRIALS 17/12/2014	11.55	0.15
		2	11.92	0.14
La valeur obte Une incertitud	enue sur 11 déterminatior le analytique totale de ± 0	ns du standard NBS951 durant cette période est de 4.0538. ).3 ‰ (2σ) est attribuée à chaque détermination individuell	9 ± 0.00127 (2σ) (reproductibilité e de δ <sup>11</sup> B dans le cadre de cette é	externe = ± 0.31 en ‰) ≜tude.
La valeur moy	renne à long terme obten	ue sur le standard d'eau de mer IAEA-B1 est de 8 <sup>11</sup> B = 39.1	i8 ± 0.33 ‰ (2ơ) (n=76).	
Le rapport iso	rtopique est donné en dév	viation pour mille. $\delta^{15}B = \{[(Rapport 11/10 echantillon)/(Ra$	upport 11/10 standard)]-1}*1000	

C. GUERROT

116185000.XLS

6	Géosciences pour une Terre durable DEGUNRE Arrivóe la : 2 3/0 2	•		
	A suive par RAPP Copies p.i. :	ORT D'ESSAIS	15-6-005-B	
	Classement :			
V/Réf. :			A l'attention de : LADOU	CHE Bernard

## V/Réf.: A l'attention de : LADOUCHE Bernard Informations sur le(s) échantillon(s) : BRGM D3E/NRE - Date début d'analyse : 19/01/15 - Date de réception : 16/01/2015 - Nombre: 3 - Nature : EAU - Auteur prélèvement: Télécopie n°

Coordinateur
C.GUERROT

Validé le 19-FEV-2015 par Catherine GUERBOT

Approuvé par Philippe NEGREL, Directeur adjoint des laboratoires

Nbr pages : 2

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

> BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France Direction des Laboratoires - Unité isotopes Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11

Orléans le 19/02/2015			namique	<sup>27</sup> Sr/ <sup>35</sup> Sr 2ơ(m)	0.707891 0.000008	0.707898 0.000007	0.709303 0.000008		7
Plateau ISOTOPIE SPECTROMETRES DE MASSE Labo TIMS	RESULTATS D'ANALYSES	sur 3 échantillons du projet Karst Bézier 2. 3E/NRE/MONTPELLIER	Détermination des rapports isotopiques 87Sr/86Sr en triple multid) Analyse sur mono filament W	n° Echantillon	F. CABRIALS 18/12/2014	F. CABRIALS 17/12/2014	F. NOTRE DAME 03/10/2014	inations du standard NBS987 analysé durant cette période est de 0.710250 ± 8 (2ठ) est de 0.710240. Les rapports mesurés sont normalisés à cette valeur.	
DIRECTION DES LABORATOIRES UNITE ISOTOPES Id soumission : 100035854 N° Etude : 15-6-005-B		Objet : Analyse isotopique du Si Demandeur : B. LADOUCHE	Demande du : 16/01/2015 Fait le : 19/02/2015	n°Labo	Sr171	Sr172	Sr173	La valeur obtenue sur 4 déterr La valeur certifiée du standard	

÷ 4,

BRGM/RP-64541-FR - Rapport final

133

Page 2/2

C. GUERROT

116184998.XLS

Arrivée Je: 20/0 2	r une Terre durable	
A suivro par :	RAPPORT D'ESSAIS	15-6-005-C
Copies p.i. :		
Classement :		
V/Réf. :		A l'attention de : LADOUCHE Bernard
Informations sur le(s) éch	antillon(s) :	SAR/GGR ME/SGR LRO
- Date début d'analyse :	09-FEB-15	1039, rue de Pinville
- Date de réception :	05/01/2015	34000 MONTPELLIER France
- Nombre: 3		
- Nature : EAU		
- Auteur prélèvement:	demandeur	Télécopie n°

Secteur analytique	Coordinateur
Neptune	R.MILLOT

Validé le 16-FEB-2015 par Romain MILLOT

Approuvé par Philippe NEGREL, Directeur adjoint des laboratoires

Nbr pages : 9

Philippe NEGRE Directeur Actoint Direction des Labohabires

Note Importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

> BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France Direction des Laboratoires - Unité Isotopes Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11



Orléans, le 16 Février 2015

## DIRECTION DES LABORATOIRES Plateau Isotope Neptune

ID soumission : 100036005 n° de l'étude : 15-6-005-C

Demandeur : B. LADOUCHE (D3E/NRE) Projet : PSP11LRO11 Tâche : 2 Réf. labo : 15Li001 à 3 Nombre d'échantillons : 3 Type : eaux

## **RESULTATS D'ANALYSES ISOTOPIQUES**

## LITHIUM

Destinataire(s) :	B. LADOUCHE (D3E/NRE)
Archivage :	15Li001-003.doc
Rédacteur :	R. MILLOT (LAB/ISO)
Responsable Plateau Anal	ytique : R. MILLOT (LAB/ISO)

## brgm

LAB/ISO 3, avenue Claude Guillemin B.P. 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France

2/4

n° de l'étude : 15-6-005-C

## 1. Protocole analytique

La mesure de la composition isotopique du lithium des échantillons référencés dans le tableau 1 a été réalisée selon la méthode décrite dans le mode opératoire BRGM (MO 001).

Au préalable à la mesure isotopique, nous avons procédé à une préparation chimique de l'échantillon de façon à obtenir une quantité purifiée de 60 ng de lithium. Le lithium est ainsi séparé de sa matrice par chromatographie sur résine échangeuse d'ions. Pour les roches et les sédiments, une étape de mise en solution par attaque acide est nécessaire auparavant.

L'absence de fractionnement lors de l'étape de purification a été testée par l'analyse répétée du standard d'eau de mer IRMM BCR-403 et/ou du standard de roche JB-2 le cas échéant. Les valeurs obtenues pour ces standards pendant cette période d'analyses sont en parfait accord avec nos mesures réalisées sur le long terme ainsi qu'avec les valeurs publiées dans la littérature.

Au cours de la préparation de l'échantillon, l'apport en lithium lié aux réactifs utilisés et à la manipulation est totalement négligeable. Aucune correction de blanc de chimie n'est apportée. Toutefois des mesures de blancs de chimie et des réactifs sont réalisées périodiquement pour contrôler leurs niveaux et leurs reproductibilités.

La composition isotopique du lithium a été mesurée sur ICP-MS à multi-collection Neptune (ThermoElectron). Conformément au protocole décrit dans les modes opératoires MO 001 et MO 309, la mesure de la composition isotopique se fait selon la méthode dite de « standard-bracketing » en normalisant au standard L-SVEC (NIST, RM8545) afin de corriger du biais de masse instrumental et de sa dérive au cours du temps.

Chaque mesure isotopique (échantillon et standard L-SVEC) est corrigée du « blanc » qui correspond au milieu d'introduction contenant l'échantillon (HNO<sub>3</sub> 3%) et au bruit de fond instrumental.

La justesse de la mesure a été testée par l'analyse de solutions standards internes. Les résultats de ces analyses sont en parfait accord avec les mesures répétées sur le long terme dans la limite de ± 0.5‰ (2σ, 2 standard deviation).

Dans le tableau 1, nous avons reporté pour chaque échantillon l'erreur sur la mesure  $(2\sigma_m)$ . Elle est de 0.1‰. Cependant, il est important de souligner que la reproductibilité externe de notre protocole pour la mesure isotopique du lithium d'échantillons naturels, déterminée par l'analyse répétée sur le long terme de standards (eau de mer IRMM BCR-403 et basalte JB-2) après purification est de ± 0.5‰ (2 $\sigma$ , 2 standard deviation) (Millot et al. 2004). Dès lors, l'incertitude analytique attribuée à chaque détermination de  $\delta^7$ Li est donc de ± 0.5‰ (2 $\sigma$ ), elle correspond à la reproductibilité totale externe du protocole.

## 2. Résultats

Dans le tableau 1 sont reportées les analyses de la composition isotopique en lithium d'échantillons d'eaux. Pour chaque échantillon, le nombre de replicats est spécifié (*n*) et l'erreur  $(2\sigma_m)$  tient compte de ces replicats. Un replicat correspond à une autre purification chimique et une autre analyse isotopique du même échantillon.

Les échantillons sont à la fois référencés selon la nomenclature du demandeur, mais également selon celle du Plateau Analytique Neptune.

## 3. Références

Millot R., Guerrot C., Vigier N. (2004) Accurate and high precision measurement of lithium isotopes in two reference materials by MC-ICP-MS. Geostandards and Geoanalytical Research, 28 :153-159.

MO 001 (2004) Préparation et analyse isotopique du lithium par MC-ICP-MS Neptune dans des échantillons d'eaux et de roches. Mode opératoire BRGM, R. Millot.

MO 309 (2004) L'analyse isotopique des eaux et des solides mis en solution sur Neptune (MC-ICP-MS). Mode opératoire BRGM, M. Robert.

3/4

n° de l'étude : 15-6-005-C

## Ref : 15Li001-003.xls

## Tableau 1

ID soumission : ID soumission : Demandeur (N° PROJET // tâche) : Nature des échantillons : Date de l'analyse (opérateur) : Système isotopique (rédacteur) : Responsable Plateau Analytique Neptune : R. MILLOT		15-8-005-C 100036005 B. Ladouche (PSP11LRO11//2) eaux du 09 au 13/02/15 (R. Millot) Li (R. Millot)			
N° éch. Labo Neptune	Nom échantillon	date	δ <sup>7</sup> Li (‰)	2σ <sub>m</sub>	n
15Li001	F. Cabrials	22/12/2014	11.3	0.1	1
15Li002	F. Cabrials	17/12/2014	11.2	0.1	1
15Li003	F. Notre Dame	03/10/2014	8.6	0.1	1

NB : L'incertitude analytique prenant en compte la reproductibilité totale externe du protocole est de ± 0.5‰ (2σ)

Consciences pour une Terre durable								
_	EAU/NRE							
		IS 15-6-005-E						
	Copies p.i. :	•						
V/Réf. :	Classement :	A l'attention de : LADOUCHE Bernard						
Informations sur le(s) échantillon(s) :		D3E/NRE						
- Date début d'anaiyse : 02-FEB-15		1039, rue de Pinville						
- Date de réception : 16/01/2015		34000 MONTPELLIER France						
- Nombre: 3								
- Nature : EAU								
- Auteur prélèvement:	demandeur	Télécopie nº .						

Secteur analytique	Coordinateur
Spectromètres de masse	C.GUERROT

Validé le 21-APR-2015 par Christine FLEHOC

Approuvé par Hervé GABORIAU, Directeur des laberatoires

Nbr pages : 3

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantilions soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantilions sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

> BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 38009 - 45060 Orléans, cedex 2, France Direction des Laboratoires - Unité Isotopes Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11



Orléans, le 20/04/2015

## DIRECTION DES LABORATOIRES Unité ISOTOPES

Rapport d'essais 15-6-005-E

Demandeur : B. LADOUCHE <u>Projet</u> : PSP11LRO11 <u>tache</u> : 2 <u>Réf. labo</u> : 15E 009 à 15E 011

## RESULTATS D'ANALYSES ISOTOPIQUES

Eaux

Destinataire(s): B. LADOUCHE D3E/ NRE

Archivage : LAB / ISO (15E009-011T.doc)

BRGM LAB / ISO B.P. 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France

Rapport d'essais 15-6-005-E

## Karst Bezier 2

## TRITIUM

## Echantillons

Nature : eaux Date de réception : 16/01/2015

## Analyses

Opérateur(s): C. FLEHOC, HYDROISOTOP Date de réalisation : fév.- avr. 2015

## Méthodes d'analyse

Mesure de l'activité du tritium, après enrichissement électrolytique, par comptage β sur compteur à scintillation liquide. Sous-traitance à HYDROISOTOP.

## Résultats

Nb	Réf. Labo	ECHANTILLON	DATE de Prélèvement	Tritium UT		
1	15E 009	F. Cabrials	22/12/2014	< 0.6		
2	15E 010	F. Cabrials	17/12/2014	< 0.6		
3	15E 011	F. Notre-Dame	03/10/2014	2.7	±	0.7

Activité Tritium à avril 2015 (période du tritium de 12.32 ans)

## Devenir des échantillons

Les volumes restants d'échantillon sont conservés six mois à compter de la date d'envoi des résultats. Leur destruction est ensuite systématique, sauf avis contraire de la part du demandeur.

2 lehoe

C. FLEHOC


# RAPPORT D'ESSAIS 15-6-005-F

.

V/Réf. :	A l'attention de : LADOUCHE Bernard		
Informations sur le(s) échantillon(s) :	D3E/NRE		
- Date début d'analyse : 27-JAN-15	1039, rue de Pinville		
- Date de réception : 16/01/2015	34000 MONTPELLIER France		
- Nombre: 2			
- Nature : EAU			
- Auteur prélèvement: demandeur	Télécopie nº .		

Coordinateur		
C.GUERROT		

Validé le 23-MAR-2015 par Christine FLEHOC

Approuvé par Hervé GABORIAU, Directeur des laboratoires

GABORIAU Hervá ecteur D Direction dea Laboratoires

Nbr pages : 🅢

Note importante :

Les résultats exprimés no concernent que les échantilions soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

> BRGM - 3, avenue Claude Guillemín - BP 36009 - 45080 Orléans, cedex 2, France Direction des Laboratoires - Unité Isotopes Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11



Orléans, le 27/02/2015

## DIRECTION DES LABORATOIRES Unité ISOTOPES

Rapport d'essais 15-6-005-F

<u>Demandeur</u> : B. LADOUCHE <u>Projet</u> : PSP11LRO11 <u>Tâche</u> : 2 <u>Réf. labo</u> : 15E 009 à 011

## RESULTATS D'ANALYSES ISOTOPIQUES

Eaux

Destinataire(s) : B. LADOUCHE (D3E / NRE / MONTPELLIER)

Archivage : LAB / ISO (15E009-011SO.doc)

BRGM LAB / ISO B.P. 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France

Rapport d'essais 15-6-005-F

### ISOTOPES DES SULFATES DISSOUS

#### Echantillons

Nature : Eaux provenance SGR LRO Date de réception : 16/01/2015

#### Analyses

Opérateur(s): A-T. MONTECH -- E. PROUST Date de réalisation : Janvier -- Février 2015

### Mode d'analyse : $\delta^{34}$ S & $\delta^{18}$ O (SO<sub>4</sub>) en flux continu

L'échantillon est filtré et les sulfates sont précipités avec BaCl<sub>2</sub>. Le précipité BaSO<sub>4</sub> est séché à l'étuve pendant une nuit.

Analyse des isotopes du soufre. Une fraction (250 µg) du BaSO<sub>4</sub> obtenu est mélangé à du pentoxyde de Vanadium dans une capsule en étain. La capsule est placée dans le caroussel de l'Analyseur Elémentaire (Flash EA), qui injecte automatiquement l'échantillon dans le four de réaction (porté à 1000°C). La combustion sous flux d'oxygène génère du SO<sub>2</sub>. Le gaz purifié chromatographiquement est analysé par spectométrie de masse en flux continu. Le rapport isotopique <sup>34</sup>S/<sup>32</sup>S est exprimé en "‰ vs CDT" et la précision est de l'ordre de 0,3‰.

*Analyse des isotopes de l'oxygène.* Une fraction (150 μg) du BaSO<sub>4</sub> obtenu est placée dans une capsule en argent, placée dans le caroussel du TC/EA, qui injecte automatiquement l'échantillon dans le four graphite du périphérique (porté à 1450°C). A cette température l'oxygène se combine au graphite pour former du CO qui, après purification chromatographique est analysé par spectrométrie de masse en flux continu. Le rapport isotopique <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O est exprimé en "8‰ vs SMOW" et la précision est de l'ordre de 0,6‰.

3

Karst sous couverture Béziers - Forages de reconnaissance de la ressource en eau

Rapport d'essais 15-6-005-F

### Résultats

Nb	Réf. Labo	ECHANTILLON	DATE de Prélèvement	Sulfate δ <sup>34</sup> S ‰ vs CDT (± 0.3‰)	Sulfate 8 <sup>18</sup> O ‰ vs SMOW (± 0.6‰)
1	15E 009	F. Cabrials	22/12/2014	14.3	11.4
2	15E 010	F. Cabrials	17/12/2014	13.7	11.2
3	15E 011	F. Notre-Dame	03/10/2014	Non demandé	Non demandé

#### Conservation des échantillons après analyse

Les échantillons contenant de l'acétate de cadmium non consommés lors des analyses sont conservés six mois à compter de la date d'envoi des résultats. Leur destruction est ensuite systématique, sauf avis contraire de la part du demandeur.

RC

A-T MONTECH

MANQUE LE Bordereau d'analyse

Nb	Réf. Labo	ECHANTILLON	DATE de Prélèvement	δD ‰ vs SMOW (± 0.8‰)	δ <sup>18</sup> O ‰ vs SMOW (± 0.1‰)	Tritium UT	Sulfate δ <sup>34</sup> S ‰ vs CDT (± 0.3‰)	Sulfate δ <sup>18</sup> O ‰ vs SMOW (± 0.6‰)
1	15E 009	F. Cabrials	22/12/2014	-40.6	-6.7	< 0.6	14.3	11.4
2	15E 010	F. Cabrials	17/12/2014	-41.1	-6.7	< 0.6	13.7	11.2
3	15E 011	F. Notre-Dame	03/10/2014	-38.7	-6.5	<b>2.7 ±</b> 0.7	Non demandé	Non demandé

## Annexe 4

# Diagramme de Piper



## Annexe 5

## Principe de la méthode de datation de l'âge apparent des eaux par l'analyse des Gaz CFC et SF6

Résultats pour le forage Cabrials

### Principe de la méthode de datation

La méthode utilisée pour la datation des eaux se base sur la mesure des gaz dissous contenu dans l'eau à l'état de trace : les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 trichlorodifluorométhane), et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) ainsi que le SF6 (hexafluorure de soufre). Les gaz CFC ont été produits industriellement à partir des années 1930, avec une large utilisation dans les années 1950 à 1960 avant d'être interdits en 1987 (accords du protocole de Montréal) car les CFC sont en effet des gaz destructeurs de la couche d'ozone. Les CFC étaient utilisés dans les fluides réfrigérants et les solvants tandis que le SF6 est utilisé principalement pour ses capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs et la production du double vitrage. La production industrielle du SF<sub>6</sub> a débuté en 1953. Le SF<sub>6</sub> est principalement d'origine anthropique mais, contrairement aux CFC, il existe également une production géogénique de ce gaz, estimé à 1% à l'échelle mondiale mais qui peut représenter, localement, un apport plus important.

L'analyse des gaz dissous (CFCs et SF6) dans les eaux souterraines permet donc de dater des eaux relativement jeunes. L'intérêt de l'utilisation de ces composés repose principalement sur leur origine et leurs propriétés physico-chimiques (IAEA, 2006):

- Un temps de résidence atmosphérique élevé<sup>12</sup>
- Une homogénéité des concentrations atmosphériques
- Aucune production naturelle, sauf pour le SF6 dans des cas particulier
- Une bonne stabilité chimique dans le sol et dans l'eau

La datation des eaux par les CFC (Plummer et Friedman, 1999) et SF6 (Busenberg & Plummer, 2000) a été rendu possible par la connaissance (1) de leurs concentrations atmosphériques depuis 1930 (Bauer et al., 2001) et (2) par leurs solubilités dans l'eau (Warner & Weiss, 1985 ; Bu & Warner 1995 ; Bullister et al., 2002).

Les traceurs gazeux présents dans l'atmosphère passent la zone non saturée des hydrosystème selon un transport diffusif avant d'entrer dans l'eau souterraine sous forme de gaz dissous. La concentration d'un gaz dissous dans l'eau à l'équilibre avec l'atmosphère est régie par la loi de Henry qui définit la solubilité des gaz<sup>13</sup>. L'application de la loi de Henry nécessite des estimations de l'altitude de recharge et de la température de recharge pour calculer les âges apparents à partir des concentrations des gaz dissous (CFC et SF6) mesurées dans les eaux.

De nombreuses études ont montré que les concentrations en gaz dissous (gaz nobles surtout) dans les eaux souterraines se situent presque toujours au-dessus de l'équilibre de solubilité attendue avec l'atmosphère. La composition du gaz en excès par rapport à l'équilibre de

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Les temps de vie dans l'atmosphère des CFC-11, CFC-12 et CFC-113 sont respectivement estimés à  $45 \pm 7,87$  ans,  $87 \pm 17$  ans et 100 ± 32 ans (Volk et al., 1997)

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Les concentrations d'un gaz dissous dans l'eau à l'équilibre avec l'atmosphère est régie par la loi de Henry qui définit la solubilité des gaz :  $C_i=K_{Hi}p_i$ . La pression partielle du gaz considéré ( $p_i$ ) est fonction de la fraction molaire du gaz dans l'air ( $x_i$ ), de la pression atmosphérique (P) et de la pression partielle de vapeur d'eau (Warner et Weiss, 1985) :  $p_i=xi(P-p_{H2O})$ . Les constantes d'Henry K<sub>Hi</sub> sont fonction de la température et de la salinité des eaux. Les paramètres pour les calculs des K<sub>H</sub> pour le CFC-11 et CFC-12 sont ceux de Warner et Weiss (1985) et Bullister *et al.* (2002) pour le K<sub>H</sub> du SF<sub>6</sub>.

solubilité prouve son origine atmosphérique, d'où l'expression courante «excès d'air » (Heaton et Vogel, 1981).

La cause de l'excès d'air est liée à la présence de petites bulles d'air piégées dans la zone quasi-saturé (frange capillaire) située au-dessus de la nappe phréatique (Faybishenko, 1995). Des modèles complexes prenant en compte le fractionnement de la composition de l'air en excès par rapport à l'air ont été développés pour étudier la formation de l'excès d'air (Aeschbach-Hertig et al. 2000). Ces modèles permettent de montrer que la pression hydrostatique a une influence prépondérante sur l'importance de l'excès d'air. Puisque la pression hydrostatique est liée aux fluctuations de la nappe phréatique une relation entre l'excès d'air et la recharge ou l'intensité des précipitations peuvent être prévus (Aeschbach-Hertig et al. 2002a, Beyerle et al. 2003 Kulongoski et al. 2004). La procédure de correction de l'excès d'air est surtout importante pour le SF6. L'effet est quasiment négligeable dans le cas du CFC-11 du fait de la haute solubilité de ce gaz (Plummer et Busember, 2000)



Illustration 53 : Chroniques des concentrations des CFC et SF<sub>6</sub> dans l'air (NOAA/PMEL, <u>John.L.Bullister@noaa.gov</u>)

La datation des eaux se base sur la comparaison des concentrations en gaz dissous dans les eaux souterraines et les chroniques de concentration des gaz dans l'atmosphère<sup>14</sup> (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). La méthode de datation des eaux par l'utilisation des CFCs et du SF6 est conditionnée par plusieurs hypothèses :

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Dans cette étude, les chroniques d'entrées pour les CFC et le SF6 sont celles produites par John Bullister (NOAA/PMEL, <u>John.L.Bullister@noaa.gov</u>).

(1) la température et l'altitude de recharge sont connues (ou peuvent être estimées)<sup>15</sup> ;

(2) la pression partielle des gaz dans la zone d'infiltration (zone non saturée) est identique à celle des couches de la troposphère et l'eau de recharge est en équilibre avec l'atmosphère de la zone d'infiltration ;<sup>16</sup> ;

(3) les concentrations des gaz dissous dans l'eau n'est pas altérée par des processus biologiques, géochimiques ou hydrologiques<sup>17</sup>;

(4) l'aquifère ou la zone d'infiltration n'est pas contaminées par des sources anthropiques (pollutions urbaines, agricoles, industrielles)<sup>18</sup>;

(5) la méthode de prélèvement ne doit pas permettre de contact entre l'échantillon d'eau et l'atmosphère<sup>19</sup>.

<sup>16</sup> L'épaisseur de la zone non saturée ou se produit le transfert massique de l'eau vers l'aquifère peut fausser les estimations de l'âge de l'eau des aquifères (Busenberg et al, 1993 ; Cook et Salomon, 1995). En effet, l'air contenu dans la zone non saturée échange en permanence avec l'eau porale ce qui peut retarder la mise à zéro du compteur de datation lorsque l'eau arrive dans l'aquifère. Pour une ZNS de 10 m, l'âge de l'eau souterraine peut être surestimé de 1 à 2 ans (Cook et Salomon, 1995). L'erreur d'estimation des âges en fonction de l'épaisseur de la ZNS dépend également du type et de la teneur en eau du sol et également des modalités de transfert (présence ou absence d'une double porosité).

La dégradation microbienne affecte les concentrations en CFC en milieu anoxique (CFC11 affecté d'un facteur 10 par rapport au CFC-12 et CFC-113, Cook et al 1995 et Oster et al. 1996). La séquence de dégradation des CFC est la suivante : CFC-11>CFC-113>CFC-12. Le SF6 n'est pas affecté par ce phénomène.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> La température de recharge est un paramètre important pour le calcul des âges apparents. La température de recharge peut être estimée à partir des données climatologiques. Elle est souvent considérée comme égale à la température moyenne de l'air au niveau de la zone de recharge. On considère parfois la température moyenne des eaux de l'aquifère. La méthode de datation avec les CFC et SF6 est relativement peu sensible à l'altitude de recharge. Toutefois, une augmentation de l'altitude moyenne de recharge peut entrainer une diminution de la température de l'eau de recharge. Pour les sites où la recharge peut se produire à des altitudes nettement supérieure à l'altitude de la nappe phréatique et, par conséquent, à des températures inférieures de recharge, une analyse de sensibilité est généralement effectuée.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Dans les climats arides où la zone d'infiltration (zone non saturée) peu s'assécher entre les épisodes de recharges, Russel et Thompson (1983) ont montré que les CFCs pouvaient s'adsorber sur la matière organique des sols secs, l'adsorption du CFC11 étant privilégiée par rapport au CFC12 en raison de plus faibles teneurs en fluor. L'effet de sorption est minimal pour le CFC-113 et nul pour le SF6. Au moment de la recharge, l'humidité du sol favorise le relargage des CFCs adsorbés dans l'air du sol ce qui conduit à enrichir les concentrations au-delà des concentrations d'équilibre air-eau. Puisque le CFC11 est plus fortement adsorbé sur la matière organique des sols secs, les concentrations en CFC11 de l'eau recharge sont plus fortes que les concentrations en CFC12. Dans les zones arides, ce mécanisme de sorption-désorption sur la matière organique peut conduire à tort, a des âges apparents plus jeunes, notamment pour le CFC11.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> La contamination locale de l'atmosphère par un ou plusieurs gaz en raison d'une source de pollution (production) du ou des gaz (proximité d'un milieu urbain, de sites de rejets des eaux usées ou de décharges officielles ou sauvages (vieux réfrigérateurs ou climatiseurs, récipient en plastique, propulseur aérosols, voiture...). Certains effluents d'eaux usées peuvent présenter des concentrations en CFC d'un ordre de grandeur supérieur aux concentrations attendues par l'équilibre air-eau.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Toutes les précautions sont prises pour éviter ces contaminations toutefois les conditions de terrain ne permettent pas toujours de se prémunir de ce risque

En l'absence de pollution locale, la comparaison des teneurs des différents gaz dissous par rapport aux teneurs connues dans l'atmosphère permet d'estimer un temps moyen de séjour de l'eau dans les aquifères. La mesure des concentrations en gaz dissous ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. L'âge « CFC » d'une eau souterraine est en fait l'âge moyen d'un mélange de nombreux écoulements élémentaires. La datation des eaux souterraines ne peut donc se limiter uniquement à déterminer un âge. C'est toute une répartition des âges qu'il faut déterminer. Pour permettre une datation des eaux souterraines, il est essentiel d'obtenir au préalable un modèle conceptuel des circulations souterraines qui permettra notamment la détermination des principaux modes de circulation des eaux (type piston, exponentiel, modèle de mélange).



Modèle conceptuel de transfert utilisé pour interpréter les résultats

Illustration 54. Modèle de transfert couramment utilisé pour interpréter les resultats CFCs (d'après Maloszewski et Zuber, 1982)

Les estimations des âges de l'eau repose donc sur l'utilisation de modèle de transfert (Illustration 54, Maloszewski et Zuber, 1982) :

- Le modèle piston (P) suppose le déplacement du fluide sans modification de la teneur (modèle convectif). C'est le modèle le plus simple qui permet d'attribuer un âge apparent sans définir de distribution des temps de séjour. Seuls des dates de recharge postérieures aux années 50 pourront être proposées par l'utilisation des gaz dissous.
- Le modèle exponentiel (EM) attribue une forme exponentielle décroissante à la distribution des temps de séjour de l'eau. Ce modèle ne nécessite qu'un paramètre : le temps moyen de séjour. Ce modèle correspond à la distribution des temps de séjour obtenue par un bilan de masse pour un réacteur discontinu à mélange parfait. Dans le cas d'un aquifère, ce modèle s'interprète comme la résultante sur une verticale de multiple lignes d'écoulements ayant une distribution exponentielle des âges. A l'échelle de l'aquifère, il peut donc s'interpréter comme le résultat d'une dispersion d'origine hydrodynamique.

Un troisième type de modèle est également classiquement utilisé pour décrire les résultats. Il s'agit du modèle de mélange binaire : l'eau étudiée est constituée d'un mélange de deux eaux

d'âges différents. Un des pôles du mélange peut être ancien (anté ou post-traceur), l'autre pole de mélange étant actuel.

Compte tenu de l'importante variabilité géologique et hydrodynamique des aquifères, les trois modèles décrits ci-dessus peuvent être envisagés pour décrire un même système. Le choix du modèle pour chaque point de mesure se fait en plusieurs étapes. La première est la vérification de l'adéquation des quatre traceurs avec l'un des modèles (dans le cas où aucune dégradation ou contamination n'est observée).

#### Echantillonnage et mesure

Les prélèvements pour mesure de CFC dissous dans l'eau suivent le protocole développé par Oster *et al.* (1996). Pour cette étude les prélèvements ont été réalisés par le BRGM lors des campagnes de prélèvement effectuées en 2013 et 2014.



Illustration 55 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF6



Source : IAEA, 2006

Illustration 56 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF<sub>6</sub>

a) récipient en métal, b) tuyau de prélèvement, c) flacon de verre, d) bouchon de verre, e) clip métallique pour bloquer le bouchon, f) récipient métallique, g) couvercle du récipient métallique, h) bloqueur couvercle métallique

Le prélèvement se fait dans un flacon en verre de 500 ml lui-même placé dans un récipient métallique (Illustration 55) qui sera également rempli d'eau prélevée en évitant les mélanges avec l'air ambiant. La fermeture de la bouteille en verre et du récipient métallique se fait impérativement sous l'eau (Illustration 56).

Les analyses des gaz dissous (CFC) ne font pas l'objet de normes ISO, inexistantes pour ces éléments mais suivent un contrôle continu (utilisation de standards internes et participation à des exercices de calibration inter-laboratoires) qui permettent de garantir l'obtention de faibles incertitudes.

Les CFC sont mesurés à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse équipée d'un capteur à détecteur d'électron. L'incertitude analytique est de  $\pm$  5%.

### Bibliographie

**Aeschbach-Hertig, W., Peeters, F., Beyerle, U., Kipfer, R.**, (2000) Paleotemperature reconstruction from noble gases in groundwater taking into account equilibrium with entrapped air, Nature 405,1040–1044.

Aeschbach-Hertig W, Beyerle U, Holocher J., Peeters F. (2002). Excess air in groundwater as a potential indicator of past environmental changes. Study Of Environmental Change Using Isotope Techniques, IAEA, VIENNA, 2002, IAEA-CSP-13/P, p174-183.

**Bauer S., Fulda C., Schäfer W.** (2001) - A multi-tracer study in a shallow aquifer using age dating tracers 3H, 85Kr, CFC-113 and SF6 — Indication for retarded transport of CFC-113, J. Hydrol. 248 (2001), pp. 14–34.

Billard G. (1970) – Captage de la source Blanche. Rapport BRGM 70TAN18. 8 p.

**Billard G.** (1974) – Carte géologique de l'île de la Réunion (4 feuilles, 1/50 000). Carte géologique de la France, BRGM.

**Bu X., Warner M.J.** (1995). Solubility of chlorofluorocarbon 113 in water and seawater, Deep-Sea Res. 427, pp. 1151–1161.

**Busenberg, E. et Plummer, L.**, 1992. Use of chlorofluorocarbons (CCI3F and CCI2F2) as hydrologic tracers and age-dating tools : the alluvium and terrace system of central oklahoma, Water Resource Research, 29, 2257-2283.

**Busenberg, E. et Plummer, L.**, 1997. Use of sulphur hexafluoride as a dating tool and as a tracer of igneous and volcanic fluids in groundwater, Geological Society of America, Salt Lake City, 29(6), p. A-78.

**Busenberg E., Weeks E., Plummer L. et Bartholemay R.** (1993) - Age dating groundwater by use of chlorofluorocarbons (CCI3F and CCI2F2) and distribution of chlorofluorocarbons in the unsaturated zone, snake river plain aquifer, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho. U.S. Geological Survey WaterResources Investigations 93-4054, 47p

Bullister J.L., Wisegarver D.P. & Menzia F.A., (2002) - The solubility of sulphurhexafluoride in water and seawater, Deep-Sea Res I 49, pp. 175–187.

**Busenberg E. & Plummer L.N.** (2000) - Dating young groundwater with sulphurhexafluoride — Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, Water Resour. Res. 36, pp. 3011–3030.

**Cook, P.G., Solomon, D.K.** (1995) - The transport of atmospheric trace gases to the water table: Implications for groundwater dating with chlorofluorocarbons and Krypton85. Water Resour. Res., Vol. 31, 263-270

**Cook, P.G., Solomon, D.K., Plummer, L.N., Busenberg, E., Schiff, S.L.** (1995) - Chlorofluorocarbons as tracers of groundwater transport processes in a shallow, silty sand aquifer, Water Resour. Res., Vol. 31, No. 3, 425-434

**Faybishenko, B.A.** (1995). Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: Laboratory experiments. Water Resources Research 31: doi: 10.1029/95WR01654. issn: 0043-1397.

**Faybishenko**, **B.A.** (1995). Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: Laboratory experiments. *Water Resources Research 31: doi: 10.1029/95WR01654. issn: 0043-1397.* 

Heaton T. et Vogel J. (1981) - "Excess air" in groundwater, Journal of Hydrology, 50, pp. 201-216

IAEA (2006) - Use of Chlorofluorocarbons in hydrology: A guidebook. STI/PUB 1238, IAEA, Vienna.277p

Kulongoski, J.T., Hilton, D.R., and E.T. Selaolo, (2004). Climate variability in the Botswana Kalahari through the Last Glacial Period, Geophysical Research Letter, 31: L10204.

**Mauroux B. & Chavinier L.** (1994) – Avis hydrogéologique relatif au captage des eaux de la source Blanche par la Société Edena. Rapport BRGM R38059 REUSGN94 – 94REU25. 26 p.

**Maloszewski P., Zuber A.,** (1982) - Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, I-models and their applicability, Journal of Hydrology, 57, (3-4), pp. 207-231.

**Plummer L.N. et Friedman L.C.** (1999) - Tracing and dating young ground water, USGS Fact Sheet, 134-99

**Oster H., Sonntag C. et Münnich K.,** (1996) - Groundwater age dating with chlorofluorocarbons, Water Resources Research, 32, pp. 2989-3001

**Russell, A.D., Thompson, G.M.**, Mechanism leading to enrichment of the atmospheric fluorocarbons CCI3F and CCI2F2 in groundwater, Water Resour. Res. 19 (1983) 57–60

**Volk, C.M., et al.,** Evaluation of source gas lifetimes from stratospheric observations, J. Geophys. Res. Atmosphere 102 D21 (1997) 25543–25564

Warner M.J., Weiss R.F. (1985) - Solubilities of chlorofluorocarbons 11 and 12 in water and seawater: Deep-Sea Res. 32 1485–1497.



07.02.2015

#### CFC/SF<sub>6</sub> analysis / project Bezier

sample	(	SF <sub>6</sub> conc.		
	CFC 12	CFC 11	CFC-113	[fmol/l]
R83	0,14 ±0,05	0,17 ±0,05	$0,02 \pm 0,05$	$0,8 \pm 0,1$
R94	$0,03 \pm 0,05$	$0,02 \pm 0,05$	<0,01	$0,4 \pm 0,1$

### Echantillon R83 = Forage Cabrials le 22/12/2014

Echantillon R94 = Forage Cabrials le 17/12/2014



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Service Géologique Languedoc-Roussilon

1039 rue de Pinville 34000 Montpellier - France Tél. : 04 67 15 79 80