



64468

Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV – Investigations sur le forage ROBOL 2

Rapport « final »

BRGM/RP-64468-FR

Août 2014



Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV – Investigations sur le forage ROBOL 2

Rapport « final »

BRGM/RP-64468-FR
Août 2014

P. Fleury, B. Dewandel, B. Ladouche, P. Delvoye
Avec la collaboration de
F. Maldan

Vérificateur :

Nom : J-C. MARECHAL

Le : 19/01/2015



Approbateur :

Nom : A. BLUM

Le : 06/02/2015



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 : Corbières, Pyrénées Orientales, Aude, Robol, systèmes karstiques, hydrogéologie, ressource en eau, forage, interprétation d'essais de pompage

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

P. Fleury, B. Dewandel, B. Ladouche, P. Delvoye, F. Maldan, 2014. Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV –Investigations sur le forage ROBOL 2. Rapport « final ». BRGM/RP-64468-FR, 90 p., 47 ill., 4 ann..

Synthèse

Ce projet intitulé « Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières », phase IV, est un projet de recherche cofinancé par le Conseil Général des Pyrénées-Orientales, par l'Agence de l'eau Rhône, Méditerranée & Corse, le Conseil Régional du Languedoc-Roussillon et le BRGM. Cette phase fait suite à des phases antérieures parmi lesquelles les premières investigations sur le forage Robol en 2009, et leur poursuite en 2013 (nouvelle acidification, réalésage) dans le cadre de la démonstration de la ressource (Fleury *et al.*, 2009 ; Fleury et Dewandel, 2013).

Lors de la précédente phase, le forage de reconnaissance de la ressource en eau, dit Robol 1 (code BSS : 10904X0116/ROBOL) fut réalisé sur la commune de Salses-le-Château, à proximité du cours d'eau temporaire le Roboul. Ce forage réalisé dans les calcaires du Crétacé puis du Jurassique a atteint la profondeur de 503 m. Il a intercepté à 420 m de profondeur un drain de faible dimension (20 cm de diamètre), qui est connecté à une zone plus productive pouvant conceptuellement être assimilée à un drain de grande dimension. Le résultat des analyses hydrochimiques montre que ce conduit est probablement un des collecteurs principal de l'axe de drainage souterrain situé sur le flanc septentrional du synclinal entre la zone des pertes et la zone exutoire. L'eau sollicitée par le pompage sur cet ouvrage de reconnaissance est de bonne qualité, d'après l'analyse de première adduction réalisée en 2009 à la fin du pompage.

A l'issue des travaux de 2009 et de 2013, un débit d'exploitation d'environ 200 m³/h a été évalué. Afin d'atteindre ce débit, des travaux de réalésage ont eu lieu, avec approfondissement de la chambre de pompage à 250 m. Cependant, lors de la cimentation de cette dernière, un collapse du tubage inox s'est produit (septembre 2013), entraînant l'abandon du forage, et son rebouchage.

L'implantation d'un nouveau forage, dit Robol 2 (code BSS : 10904X0132/ROBOL2), a alors été réalisée en janvier 2014. Situé à 25 m au sud de l'ouvrage initial, son implantation tient compte de la déviation du premier forage et a été faite au droit de la fracture productrice qui fut recoupée par Robol 1 à 420 m. Cet ouvrage présente un équipement comparable à Robol 1 : chambre de pompage en diamètre 160 mm de 0 à 250 m puis trou nu jusqu'à 450 m afin d'extraire le volume d'exploitation calculé égal à 200 m³/h (Fleury *et al.*, 2013).

L'interprétation des essais de pompage réalisés en juin 2014 sur Robol 2 montre le même schéma conceptuel de fonctionnement que pour Robol 1, indiquant qu'à partir de 100 minutes de pompage, le forage sollicite une zone productive dont le comportement hydrodynamique s'apparente à une limite alimentée. A partir de 1000 minutes de pompage, la piézométrie du forage sollicité par pompage n'évolue pratiquement plus. L'interprétation des essais par paliers de débit a permis de mettre en évidence une amélioration des échanges puits-aquifère, entre les forages Robol 1 et 2 avec une réduction de pertes de charge liées au puits de 18 %. Désormais, le drain karstique sollicité par le forage réagit plus efficacement (plus d'eau drainée, plus rapidement).

Les résultats de l'interprétation des essais de pompage réalisés en juin 2014 par paliers ou de longue durée (73 h) au débit moyen de 170 m³/h, ont permis d'établir des scénarios d'exploitation. Ils montrent que l'ouvrage pourrait être exploité en continu à un débit de l'ordre 200 m³/h, soit un volume prélevable annuel de 1,8 Mm³.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Interprétation des essais de pompage sur le forage ROBOL 2	11
2.1. MISE EN ŒUVRE DES ESSAIS DE POMPAGE, PROTOCOLE OPERATOIRE.....	11
2.2. ESSAI PAR PALIERS DE DEBIT.....	12
2.2.1. Descriptif.....	12
2.2.2. Interprétation de l'essai par paliers de débit.....	14
2.3. ESSAI DE LONGUE DUREE	15
2.3.1. Présentation de la méthode de diagnostic des essais par pompage	16
2.3.2. Diagnostic des essais sur les puits Robol 1 & 2	18
2.3.3. Simulation de débits d'exploitation	24
2.3.4. Profondeur maximum admissible	25
2.3.5. Résultats.....	25
2.4. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DE LA RESSOURCE	27
2.4.1. Données acquises	27
2.4.2. Interprétation des résultats chimiques et isotopiques	27
2.4.3. Information sur l'âge de l'eau à l'aide des gaz dissous (CFC-SF6)	34
2.4.4. Information sur l'âge de l'eau à l'aide du tritium	38
3. Impact de l'essai de pompage sur l'état quantitatif des eaux souterraines	43
3.1. MISE EN PLACE DU RESEAU D'OBSERVATION	43
3.2. EVALUATION DE L'IMPACT SUR LA PIEZOMETRIE.....	47
3.2.1. Roboul CGE.....	47
3.2.2. Mas de la Chique.....	48
3.2.3. Mas Vespeille	49
3.2.4. Piézomètres P107 et P102	50
3.2.5. Salses - Combe Française.....	51
3.2.6. Baixas.....	52
3.2.7. Estagel.....	53
3.2.8. Formation Oligocène.....	54
3.2.9. Comparaison avec le suivi de 2013	56
3.3. EVALUATION DE L'IMPACT SUR LES DEBITS DE LA SOURCE DE FONTESTRAMAR	57
3.4. RELATION ENTRE LE FORAGE ET L'AQUIFERE	58
4. Conclusion et perspectives	59

Illustration 18. Evolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux en fonction des teneurs en strontium (Sr). Les eaux des forages Robol 1 et 2 ont été replacées dans le contexte géochimique du système karstique du Bas Agly.....	33
<i>Illustration 19 : Chroniques des concentrations des CFC et SF₆ dans l'air (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov)</i>	<i>34</i>
Illustration 20. Tableau des résultats des gaz dissous (composés halogénés) contenus dans l'eau à l'état de trace : CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 (trichlorodifluorométhane), CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) et SF6 (hexafluorure de soufre). Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau prélevée en 2013 et 2014.	35
Illustration 21. Diagrammes CFC11 vs CFC12 et CF113 vs CFC12. 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	37
Illustration 22. Diagramme SF6 vs CFC12. 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	38
Illustration 23. Signatures isotopiques et activités tritium de l'eau du forage Robol 2	39
Illustration 24. Chronique tritium des pluies à Thonon-les-Bains et calibration à la zone d'étude à partir des pluies de Perpignan. Les calculs des teneurs théoriques en tritium des eaux souterraines pour différents modèles de transfert sont également reportés.....	41
Illustration 26. Caractéristiques des points suivis au cours de l'essai de pompage.	44
Illustration 27. Carte de localisation des points suivis.	45
Illustration 28. Piézométrie à Roboul CGE sur la période d'octobre 2013 à juillet 2014.	47
Illustration 29. Chroniques de suivi de la piézométrie à Roboul CGE lors des travaux de février et juin 2014.	48
Illustration 30. Chronique du suivi piézométrique au Mas de la Chique.	49
Illustration 31. Chronique du suivi piézométrique au Mas Vespelle.	49
Illustration 32. Chronique de suivi du piézomètre P107 d'octobre 2013 à juin 2014.	50
Illustration 33. Chronique de suivi du piézomètre P102 d'octobre 2013 à juin 2014.	50
Illustration 34. Chronique de suivi du piézomètre P107 en juin 2014.	51
Illustration 35. Chronique de suivi du piézomètre P102 en juin 2014.	51
Illustration 36. Chroniques de suivi du piézomètre Combe Française	52
Illustration 37. Chroniques de suivi du piézomètre de Baixas.....	53
Illustration 38. Chroniques de suivi du piézomètre d'Estagel.....	54
Illustration 39. Chronique du suivi piézométrique au Mas Passe Temps.	55
Illustration 40. Evolution de la piézométrie à Espira-de-l'Agly.	55
Illustration 41. Evolution de la piézométrie à Ex-Opoul.....	56
Illustration 42. Chroniques de débit de Fontestramar.	57
Illustration 43. Chronique de conductivité électrique et température de Fontestramar.	58
<i>Illustration 44 : Chroniques des concentrations des CFC et SF₆ dans l'air (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov)</i>	<i>88</i>
Illustration 45. Modèle de transfert couramment utilisé pour interpréter les résultats CFCs (d'après Maloszewski et Zuber, 1982).....	90
<i>Illustration 46 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF6.....</i>	<i>91</i>

1. Introduction

Ce projet intitulé « Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières », phase IV, est un projet de recherche cofinancé par le Conseil Général des Pyrénées-Orientales, par l'Agence de l'eau Rhône, Méditerranée & Corse, le Conseil Régional du Languedoc-Roussillon et le BRGM. Cette phase fait suite à des phases antérieures parmi lesquelles les premières investigations sur le forage Robol 1 en 2009 (phase III), et la nouvelle acidification sur cet ouvrage (phase IV, tâche 1). L'étude se poursuit avec la caractérisation de la ressource à partir d'un nouvel ouvrage : Robol 2 distant de quelques mètres, suite à l'abandon de Robol 1 (phase IV, tâche 2). Ce dernier a dû être abandonné du fait du collapse du tubage inox à 240 m de profondeur, intervenu lors de la cimentation de la chambre de pompage. Cet ouvrage en gros diamètre (chambre de pompage en inox de diamètre 160 mm, jusqu'à 250 m de profondeur) devra permettre d'exploiter la ressource au débit précédemment calculé à partir de l'interprétation des essais de pompage réalisés en 2013 sur Robol 1, soit 200 m³/h.

A l'issue de ces phases, il a été montré que le forage Robol 1 recoupait un drain secondaire à 420 m de profondeur, drainant une ressource importante. Le second forage est équipé de façon comparable à celle de Robol 2 (tubage inox en diamètre 445 mm cimenté de 0 à 251 m puis trou nu jusqu'à 466 m). Il a été implanté à 25 m au sud de l'ouvrage initial, pour tenir compte de la déviation du premier forage et être au droit de la fracture productrice. Le drain initialement recoupé à 420 m n'a pas été retrouvé, toutefois plusieurs zones de fractures et fissures élargies ont été recoupées.

Robol 2 lors de sa réalisation a fourni le même type de caractéristiques hydrodynamiques que Robol 1, à savoir :

- le débit au soufflage sur l'ouvrage de reconnaissance Robol 2 (Ø 222 mm) à 150 m est de 35 m³/h, il était de 50 m³/h à Robol 1.
- après acidification (13 T acide) sur l'ouvrage de reconnaissance Robol 2, le rabattement spécifique après 5 heures de pompage à 65 m³/h était comparable (environ 0,5 m/m³/h) à l'ouvrage de reconnaissance Robol 1 après acidification (9 T).

Compte tenu des caractéristiques proches entre les deux ouvrages de reconnaissance, Robol 2 a été réalisé jusqu'à 251 m en diamètre 445 mm.

Afin de caractériser l'aquifère, la productivité de l'ouvrage et la structure environnante de l'aquifère, des essais de pompage d'abord par paliers, puis de longue durée, ont été réalisés du 26 au 30 juin 2014.

Le présent rapport décrit (i) dans un premier temps l'interprétation de ces essais de pompage, puis (ii) l'évaluation de l'impact en terme de rabattement et de diminution des débits sur les sites suivis du système karstique et de l'aquifère Oligocène situé à proximité.

2. Interprétation des essais de pompage sur le forage ROBOL 2

2.1. MISE EN ŒUVRE DES ESSAIS DE POMPAGE, PROTOCOLE OPERATOIRE

Deux essais de pompage ont été réalisés le 26 juin (paliers) et du 27 au 30 juin 2014 (longue durée) afin d'évaluer les propriétés de l'aquifère à proximité du forage Robol 2. La réaction de l'ensemble du système a été étudiée grâce à la mise en place d'un réseau de suivi. La mise en œuvre des essais de pompage a été réalisée par l'entreprise « Forage Massé », le BRGM en a assuré le suivi.

L'essai de pompage dit par paliers de débit (trois paliers d'une heure suivis d'une heure de remontée) a permis de déterminer les caractéristiques du puits. L'essai de pompage de longue durée (72 h de pompage) 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 1) est décrit comme suit :

- une pompe immergée de diamètre 10", mise en place au niveau de la chambre de pompage à 231 m de profondeur ;
- un groupe électrogène d'une puissance de 400 kW et un câble électrique d'alimentation ;
- une colonne d'exhaure en tubes acier raccordés par brides d'un diamètre intérieur de 240 mm ;
- deux tubes guides en PVC en diamètre 25 mm pour la sonde de niveau autonome, installée à 194 m de profondeur, et pour les mesures piézométriques manuelles ;
- un piquage sur la colonne d'exhaure pour les prélèvements et l'alimentation d'un bac 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 1. Photographie annotée du matériel mis en place à Robol 2 pour les essais de pompage de juin 2014.

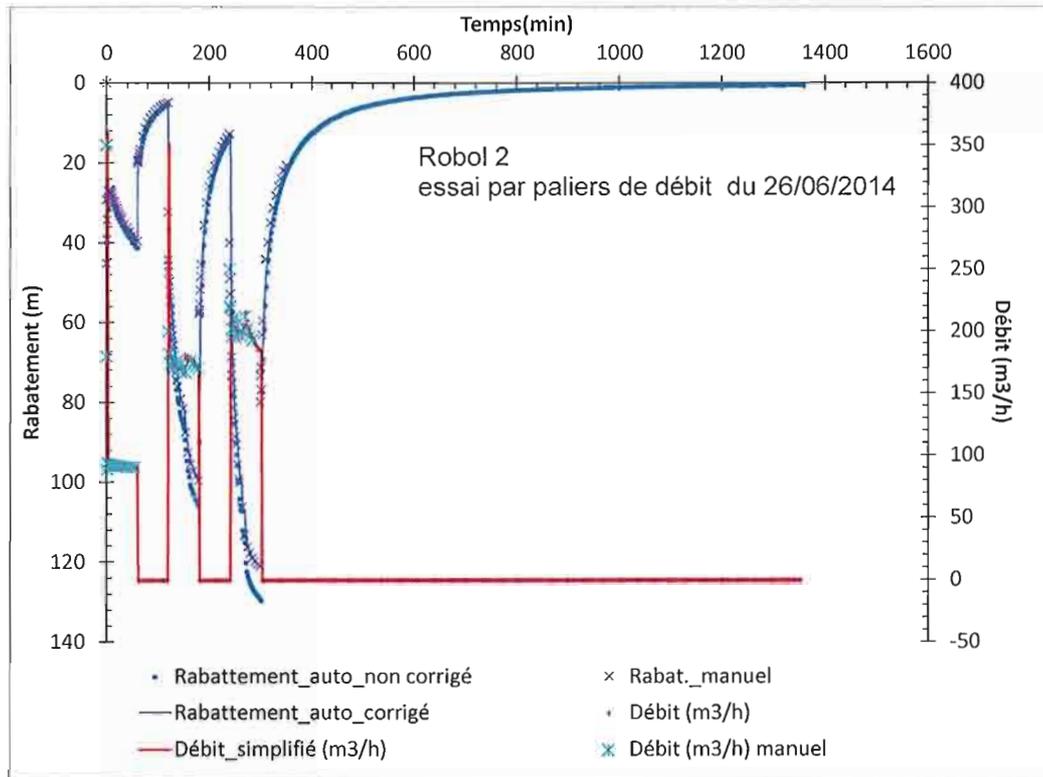


Illustration 2. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage par paliers de débit (26/06/2014). Mesures automatiques et manuelles.

Le suivi du niveau d'eau révèle une dérive du capteur à partir d'une certaine profondeur. Ces mesures de rabattement automatique ont dû être corrigées à partir des mesures manuelles, par une fonction

L'illustration 4 présente l'interprétation de cet essai et compare les résultats à l'essai par paliers réalisé en 2013 sur l'ancien forage (Robol 1). Le coefficient de pertes de charge quadratiques C est d'environ $22\,000\text{ m}^{-5}\text{s}^2$ soit 18 % inférieur à celui évalué sur Robol 1 (environ $27\,000\text{ m}^{-5}\text{s}^2$). Cela signifie que les échanges entre le puits et l'aquifère sont meilleurs à Robol 2 qu'à Robol 1. Pour un débit de pompage de $200\text{ m}^3/\text{h}$, le rabattement lié à l'équipement du puits à Robol 2 est d'environ 67 m, contre 82 m à Robol 1. Cependant, le coefficient de pertes de charge linéaires, B, est évalué à environ $1\,000\text{ m}^{-2}\text{s}$, soit plus élevé que sur Robol 1 (environ $900\text{ m}^{-2}\text{s}$) suggérant un aquifère légèrement moins transmissif au droit de Robol 2.

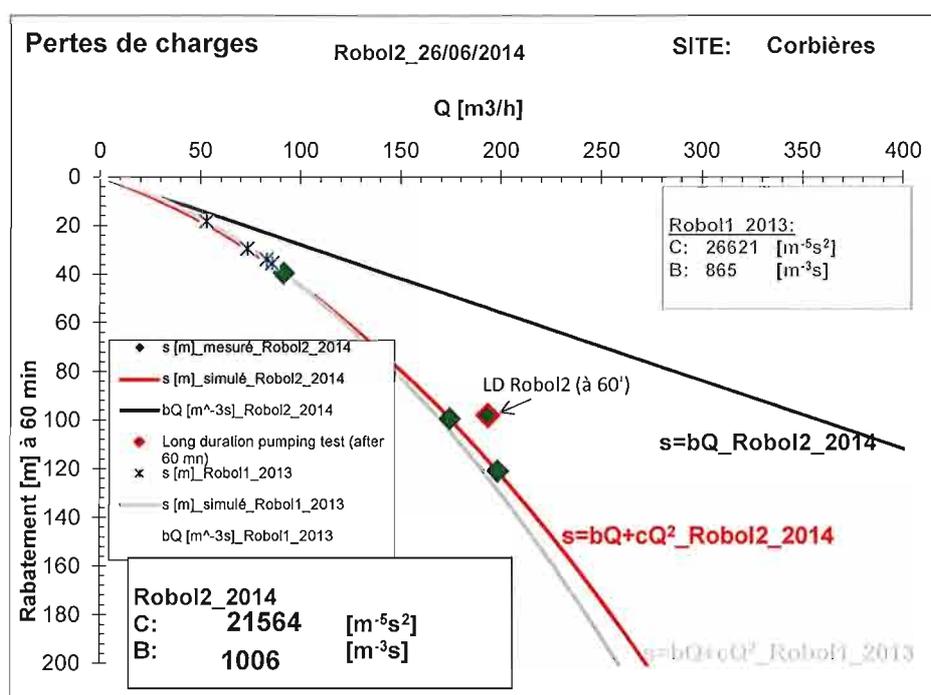


Illustration 4. Interprétation de l'essai par paliers de débit sur Robol 2 (26/06/2014) et comparaison à celui réalisé en 2013 sur Robol 1.

2.3. ESSAI DE LONGUE DUREE

Cet essai s'est déroulé du 27 juin à 9 h au 1^{er} juillet à 10 h, en deux phases :

- phase de pompage du 27 au 30 juin d'une durée de 73 heures. Le débit a évolué entre $224\text{ m}^3/\text{h}$ en début de pompage et $147\text{ m}^3/\text{h}$ en fin de pompage ;
- phase de remontée du 30 juin au 1^{er} juillet, avec un suivi des niveaux durant 22 heures.

L'essai était initialement prévu au débit de $200\text{ m}^3/\text{h}$. Toutefois, les capacités de la pompe n'ont pas permis de maintenir ce débit, malgré l'ouverture complète de la vanne, en raison de l'augmentation de la charge manométrique durant l'essai (rapidement de l'ordre de 180 m du fait des forts rabattements).

L'illustration 5 présente les suivis automatiques et manuels de la profondeur du niveau d'eau, de la conductivité électrique corrigée à 25°C et du débit de pompage durant l'ensemble des essais

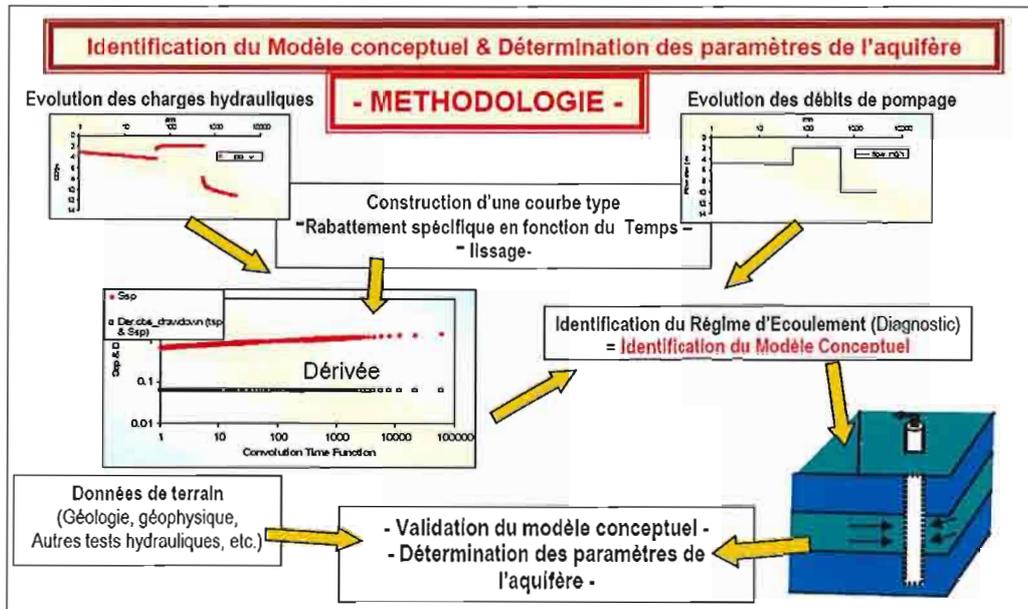


Illustration 6. Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai.

Le diagnostic repose sur l'interprétation de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements ($d(s)/d(\ln(t))$) ; à la descente 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 l'outil 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 sub-surface (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.

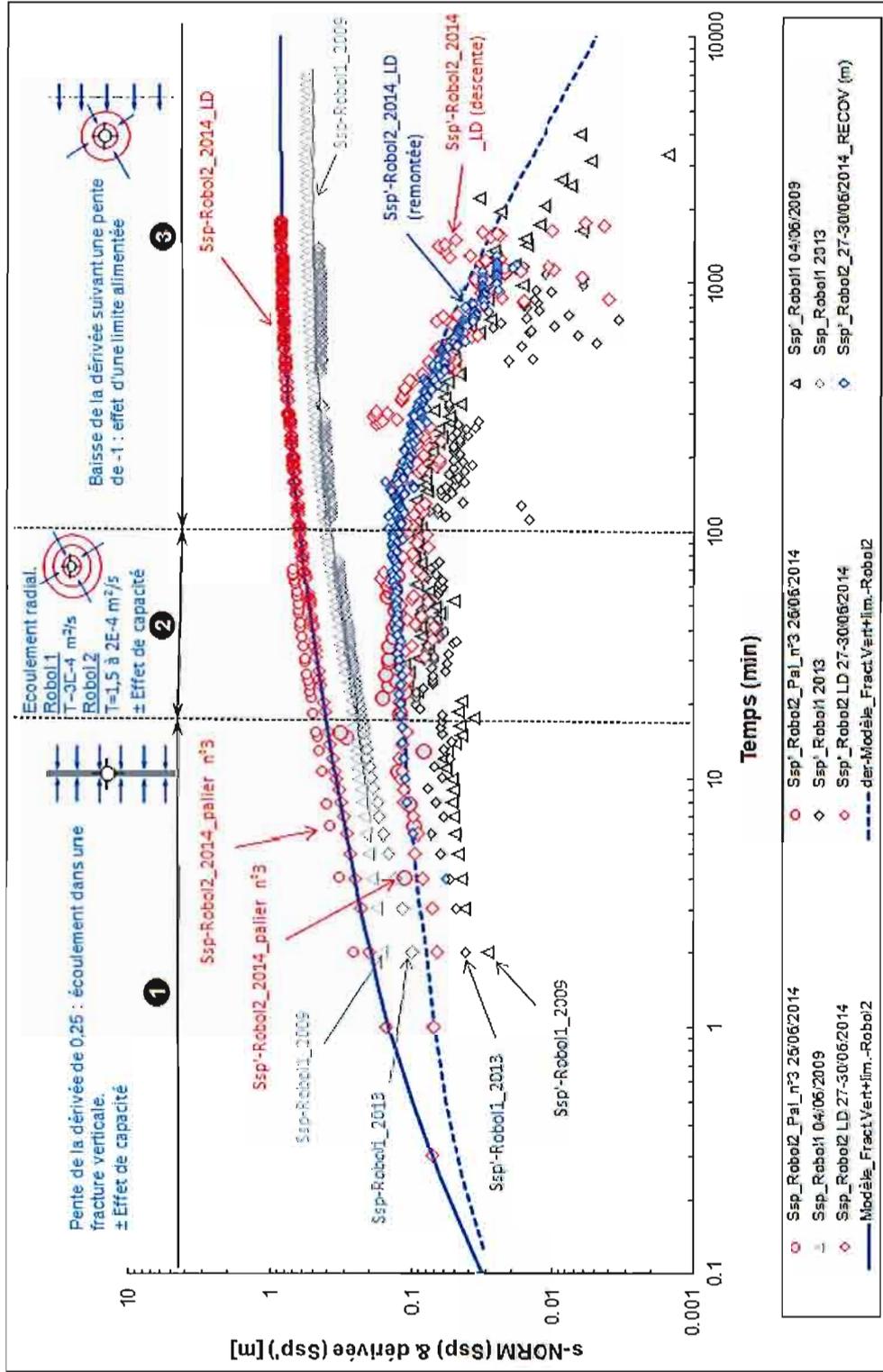


Illustration 7. Graphe Log-Log des rabattements spécifiques et dérivées logarithmiques en fonction du temps pour les essais réalisés sur Robol 1 (2009 et 2013) et Robol 2 (2014). Ssp : rabattement spécifique et Ssp' : dérivée logarithmique du rabattement spécifique.

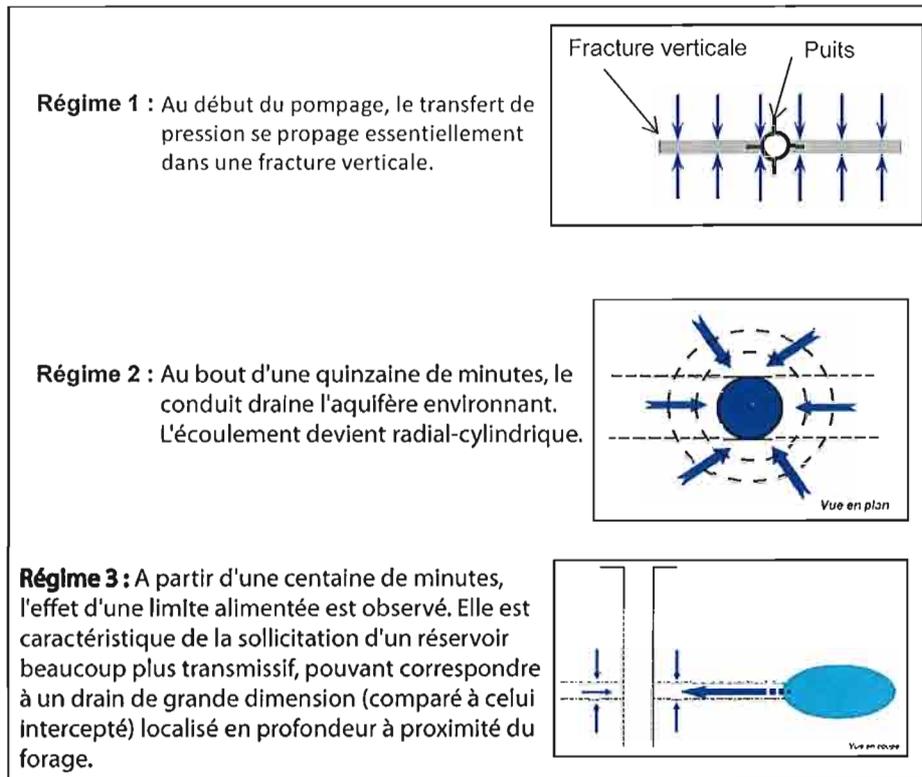


Illustration 8. Représentation des différents régimes d'écoulement (modifiée d'après Fleury et al., 2009).

Le diagnostic a conduit à définir un modèle mathématique adapté à la situation hydrogéologique identifiée : c'est le modèle de Gringarten (fracture verticale unique drainant un aquifère ; Gringarten *et al.*, 1974) auquel une limite alimentée est ajoutée pour modéliser les essais de 2014. Les pertes de charge et effets de capacité liés au puits sont aussi intégrés à cette modélisation. Les courbes bleues de l'illustration 9 présentent les rabattements et dérivées modélisées de ce modèle pour le rabattement normalisé de l'essai de longue durée sur Robol 2.

L'illustration 9 et l'illustration 10 présentent les résultats de la modélisation des essais par paliers ; l'illustration 11 et l'illustration 12 présentent ceux des essais de longue durée. Les paramètres hydrodynamiques sont consignés dans le tableau de l'illustration 13.

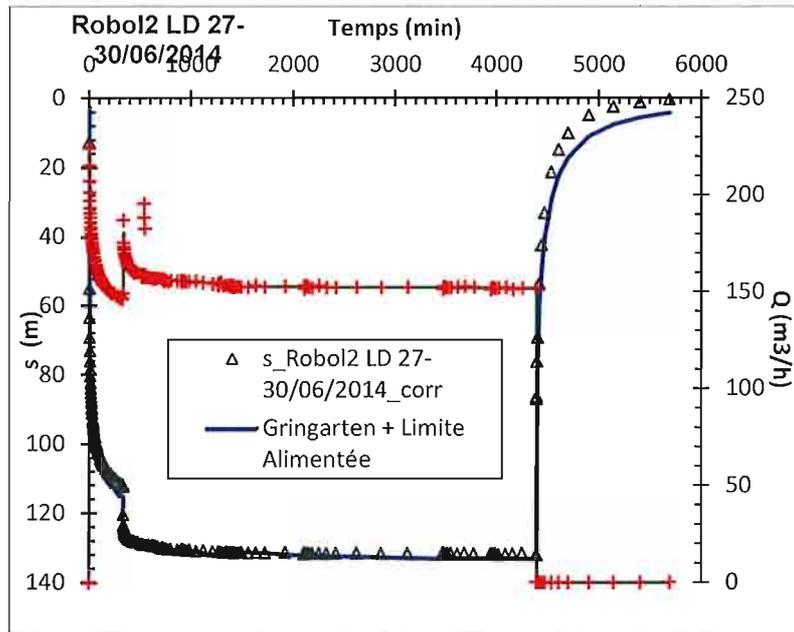


Illustration 11. Modélisation des rabattements au puits de pompage pour l'essai longue durée sur Robol 2 (2014). Echelle arithmétique ; modèle analytique de Gringarten + une limite alimentée.

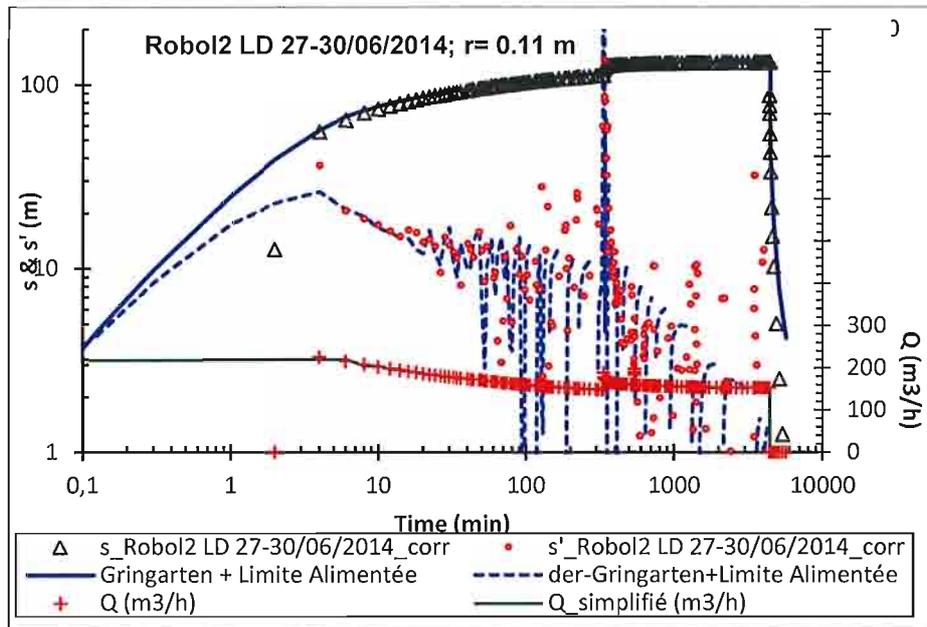


Illustration 12. Modélisation des rabattements et des dérivées des rabattement au puits de pompage pour l'essai longue durée sur Robol 2 (2014). Echelle log-log ; modèle analytique de Gringarten + une limite alimentée.

2.3.4. Profondeur maximum admissible

La profondeur maximum admissible est le niveau d'eau dans l'ouvrage qui ne devra pas être atteint pendant l'exploitation. Dans le cas de Robol 2, elle a été définie en fonction de la position de la chambre de pompage et non des zones productives puisque celles-ci sont situées plus profondément que la chambre de pompage. On veillera ainsi à ne pas dénoyer la chambre de pompage et donc la pompe. De plus, afin de conserver un espace suffisant pour l'emplacement de la pompe, d'éviter toute turbulence au niveau de la pompe mais aussi de conserver une marge de sécurité de quelques mètres, il est conseillé de conserver une hauteur de 10 m au-dessus de la base de la chambre de pompage. La profondeur maximum admissible, en profondeur par rapport au sol, est donc calculée de façon suivante :

$Pf_max = \text{base de la chambre de pompage} - (\text{emplacement pompe} + \text{sécurité})$

$$Pf_max = 245 - 10 = 235 \text{ m}$$

Pour le rabattement maximum admissible, donc par rapport au niveau piézométrique basses eaux (NP = 55 m de profondeur), on obtient :

$$s_max = Pf_max - NP$$

$$s_max = 235 - 55 = 180 \text{ m}$$

Ainsi le niveau minimum admissible est de 235 m et le rabattement maximum admissible (celui qu'on veillera à ne pas dépasser dans les simulations suivantes) est de 180 m.

2.3.5. Résultats

L'illustration 14 et l'illustration 15 présentent les résultats des simulations. Elles montrent qu'un débit d'exploitation aux environs de 202,5 m³/h est envisageable. Au bout d'un an de pompage, la quantité d'eau prélevée devrait se situer aux alentours de 1,8 Mm³, et le niveau d'eau vers 235 m de profondeur permettant d'assurer un fonctionnement correct de la pompe.

2.4. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DE LA RESSOURCE

2.4.1. Données acquises

Dans le but d'établir des comparaisons avec les nombreuses données géochimiques acquises précédemment sur le forage Robol 1 (cf. Fleury et al, 2009¹), les eaux du forage Robol 2 ont été échantillonnées à 2 reprises, en début de pompage (le 27/06/14 au bout de 6 heures de pompage) et en fin de pompage (30/06/14). Les paramètres analysés sont les éléments majeurs et les éléments traces, les isotopes de la molécule d'eau (oxygène 18, deutérium et tritium) et les isotopes du strontium (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr). Les résultats analytiques de 2014 sont reportés en annexe avec ceux acquis en 2009. Les analyses chimiques et isotopiques ont été réalisées par le laboratoire du BRGM à l'exception du tritium (laboratoire HYDROISOTOP, Allemagne).

Dans le but d'estimer l'âge apparent des eaux du forage Robol 2, deux prélèvements en vue de l'analyse des gaz dissous (CFC et SF₆) ont été prélevés en début (27/06/14) et fin de pompage (30/06/14). Sur le forage Robol 1, un prélèvement pour l'analyse des CFC et SF₆ avait été également réalisé lors de l'essai de pompage du 12 au 13 février 2013 (cf. Fleury et al, 2013²). L'ensemble des analyses des CFC et SF₆ a été réalisée par chromatographie gazeuse en septembre 2014 sur les trois échantillons par le laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne).

En fin de pompage (30/06/14), le Centre d'Analyses Méditerranée Pyrénées a prélevé des échantillons en vue de l'analyse des phytosanitaires.

2.4.2. Interprétation des résultats chimiques et isotopiques

a) Analyses des phytosanitaires

L'analyse des phytosanitaires réalisée par le Centre d'Analyses Méditerranée Pyrénées (Annexe 1) sur un échantillon prélevé le 30/06/14 à 08h50 en fin de pompage, révèle la présence d'atrazine (0,05 µg/l), de terbuthylazin déséthyl (0,081 µg/l) et de simazine (0,044 µg/l), à des concentrations inférieures à la limite de potabilité (0,1 µg/l). La molécule de deisopropylotrazine déséthyl a été mesurée à des concentrations supérieures aux limites de qualité (0,16 µg/l). Ces molécules font partie de la famille des triazines, produit de synthèse organique de type désherbant utilisé en agriculture et pour le désherbage de voies ferrées jusqu'en 2003, date de leur interdiction. Toutefois, la présence d'atrazine non dégradée semble indiquer une utilisation récente de cette molécule. Les autres molécules analysées présentent des concentrations inférieures aux limites de détection. Les eaux du forage Robol 2 présentent donc des teneurs comparables à celles mesurées en 2009 dans le forage Robol 1 (Fleury et al, 2009), à l'exception de l'atrazine, non détecté dans le forage Robol 1 et de la deisopropylotrazine déséthyl (non recherché en 2009).

¹ BRGM/RP-57612-FR

² BRGM/RP-62150-FR

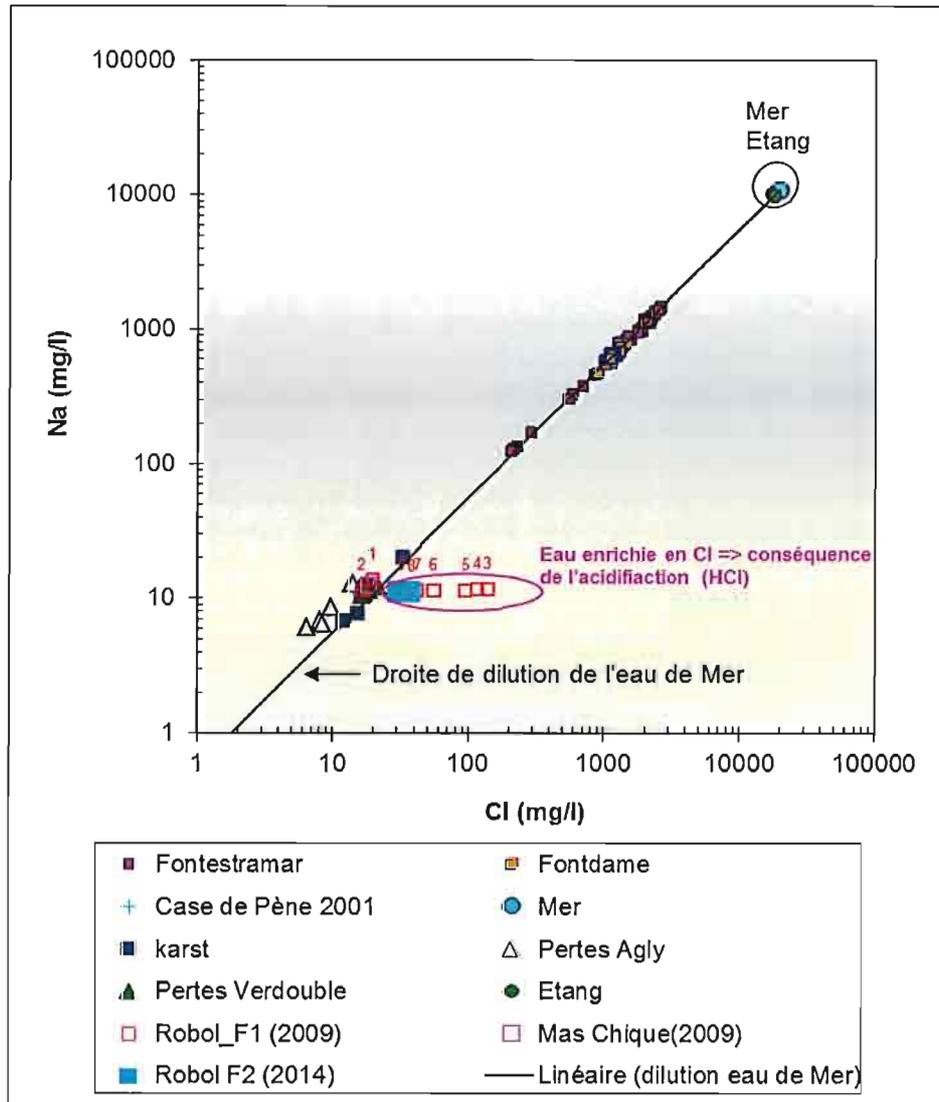


Illustration 16. Evolution des teneurs en sodium (Na) des eaux des forage Robol 1 et 2 en fonction des teneurs en chlorures (Cl). Les eaux des forages ont été replacées dans le contexte géochimique du système karstique du Bas Agly.

c) Caractérisation de l'origine de l'eau pompée

La caractérisation de l'origine des eaux pompées par le forage Robol a été abordée à l'aide des isotopes stables de l'eau. Les études antérieures avaient permis de montrer que les signatures isotopiques des différentes composantes du système du Bas Agly se distinguaient les unes des autres par des teneurs différentes (BRGM/RP-52918-FR ; BRGM/RP-52918-FR 54708-FR). Les eaux les plus appauvries en isotopes stables sont celles prélevées au niveau de l'Agly. Ce résultat s'explique par le fait qu'il existe au sein des pluies un gradient isotopique (compris entre $-0,15\text{‰}/100\text{ m}$ et $-0,3\text{‰}/100\text{ m}$ pour l'oxygène 18) qui se manifeste par un appauvrissement en isotopes lourds en fonction de l'altitude. L'altitude moyenne du bassin versant de l'Agly est bien supérieure à celle du bassin versant du Verdoble, la signature isotopique de l'Agly

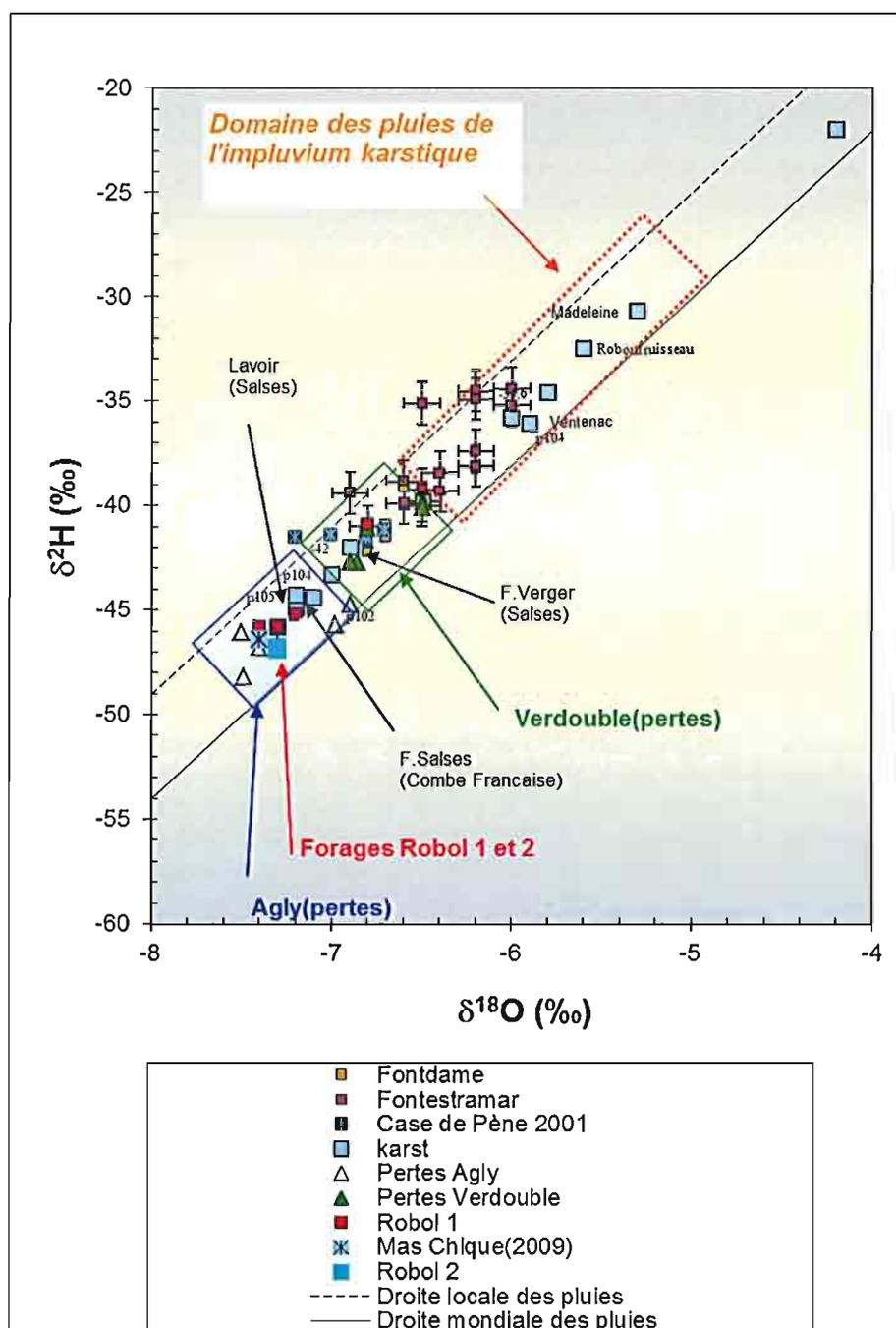


Illustration 17. Evolution des teneurs en deutérium des eaux des forages Robol 1 et 2 en fonction des teneurs en oxygène 18. Les eaux du forages Robol ont été replacées dans le contexte géochimique du système karstique du Bas Agly.

Nom		Forage Robol_1 (2013) N719	Forage Robol_2 (2014-73h) P961	Forage Robol_2 (2014-6h) P986	Remarques/Interprétations
SF6	fmol/l	0,0012	0,002	0,0013	Mesure
CFC-12	pmol/l	2	2,1	1,9	Mesure
CFC-11	pmol/l	3,4	2,9	2,8	Mesure
CFC-113	pmol/l	0,22	0,25	0,22	Mesure
Alt moy recharge	m	100	100	100	Paramètre estimé
Temp Eau recharge	°C	14,5	14,5	15	Paramètre estimé
Excess Air	cc/kg	0,0	0,0	0,0	Paramètre estimé
SF6	pptv	3,7	6,2	4,1	Concentration atm estimée de l'eau recharge
CFC-12	pptv	463,5	486,6	444,3	Concentration atm estimée de l'eau recharge
CFC-11	pptv	209,8	178,9	174,4	Concentration atm estimée de l'eau recharge
CFC-113	pptv	45,0	51,1	45,4	Concentration atm estimée de l'eau recharge
SF6*	pptv	3,7	6,2	4,1	
CFC-12*	pptv	463,5	486,6	444,3	
CFC-11*	pptv	209,8	178,9	174,4	
CFC-113*	pptv	45,0	51,1	45,4	

*avec correction excès d'air

Illustration 20. Tableau des résultats des gaz dissous (composés halogénés) contenus dans l'eau à l'état de trace : CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 (trichlorodifluorométhane), CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) et SF6 (hexafluorure de soufre). Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau prélevée en 2013 et 2014.

Au préalable à l'interprétation, il est nécessaire de convertir les données brutes (exprimées en pmol/l, cf. tableau de résultats, Illustration 20) 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 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 (ou récentes, i.e infiltrées il y a quelques années) et les eaux anciennes (infiltrées avant 1940, cf. Annexe 3). 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.

b) Estimation de l'âge apparent et des modalités de transfert

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 degrés 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'épisodes ponctuels de recharge. La sensibilité du paramètre « température » à $\pm 2^\circ\text{C}$ conduit à des modifications de l'âge apparent de l'ordre de 2-3 ans. Par ailleurs, du fait de l'absence de quantification de l'excès d'air à l'aide du rapport Ne/Ar, des tests de sensibilité ont été effectués en considérant des valeurs d'excès d'air comprises entre 0 et 10 cm^3/L (valeurs possibles d'après les informations de la littérature).

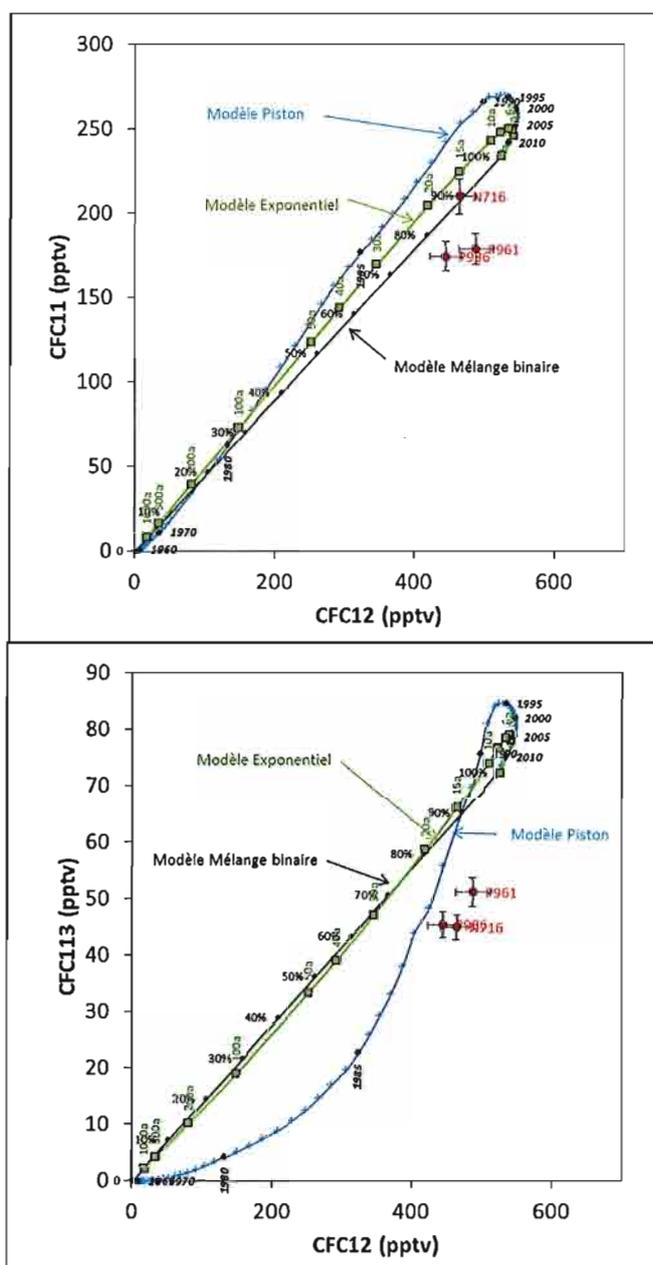


Illustration 21. Diagrammes CFC11 vs CFC12 et CF113 vs CFC12. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2014 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire

différencier les eaux résultant de précipitations sans tritium nucléaire (avant 1952) des eaux de précipitations formées dans une atmosphère contenant du tritium nucléaire (après 1952).

Comme pour l'analyse des isotopes stables de la molécule d'eau, c'est la molécule d'eau elle-même qui est marquée, à l'aide d'un atome d'hydrogène aux propriétés radioactives. Ainsi, en plus des différents modèles théoriques d'évolution de la fonction d'entrée présentés pour les gaz dissous d'origine anthropique (Piston, Modèle exponentiel), la décroissance radioactive du tritium selon une demi-vie de 12,32 ans est prise en compte.

Dans un premier temps, les données de tritium disponibles à la station de Thonon-les-Bains (Blavoux et al, 2013) ont été complétées au pas de 90 jours par les données du GNIP⁴. Ceci suppose que l'évolution relative des teneurs en tritium est identique en tout point de l'hémisphère Nord au pas de temps de 90 jours. Les données du site d'Evian sont disponibles sur la période 1963–2009, ce qui permet de décrire précisément la dynamique du pic de tritium associé aux essais nucléaires. La reconstitution des données pour les autres périodes a consisté en une simple pondération des données atmosphériques du GNIP.

Cependant, les concentrations atmosphériques en tritium ne sont pas homogènes dans l'atmosphère, si bien qu'une étape de calage du signal d'entrée est nécessaire pour adapter la méthode au site étudié.

Les données sur le site de Thonon-les-Bains mesurées ou reconstituées sur la période 1950-2010 ont dès lors été comparées aux teneurs mesurées dans les précipitations à proximité du site de Robol. Trois données issues de la base BD-ISO (<http://infoterre.brgm.fr>) pour Perpignan permettent de mieux cadrer le pic de tritium. L'analyse des teneurs en tritium des pluies échantillonnées dans les années 60 à Perpignan nécessitent une pondération (correction de 30% du signal de Thonon-les-Bains)

b) Résultats

Les eaux du forage Robol 2 échantillonnées en juin 2014 présentent une faible activité tritium (de l'ordre de 2 UT, Illustration 23).

Réf. Labo	Echantillon	Echantillon	δD ‰ vs SMOW ($\pm 0,8$ ‰)	$\delta^{18}O$ ‰ vs SMOW ($\pm 0,1$ ‰)	Tritium UT
14E 354	ROBOL	27/06/2014	-46,9	-7,3	2,2 \pm 0,5
14E 355	ROBOL	30/06/2014	-46,8	-7,3	2,1 \pm 0,6

Tritium : activité à fin novembre 2014 (période du tritium de 12,32 ans)

Illustration 23. Signatures isotopiques et activités tritium de l'eau du forage Robol 2

Peu de données tritium sont recensées pour les eaux karstiques du système du bas Agly pour aider à l'interprétation des résultats du Forage Robol. En septembre 2003, les eaux des sources de Fontdame et Fontestramar ont fait l'objet d'une analyse en tritium, respectivement de 5 ± 2 UT et 3 ± 1 UT.

⁴ Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. <http://www.iaea.org/water>

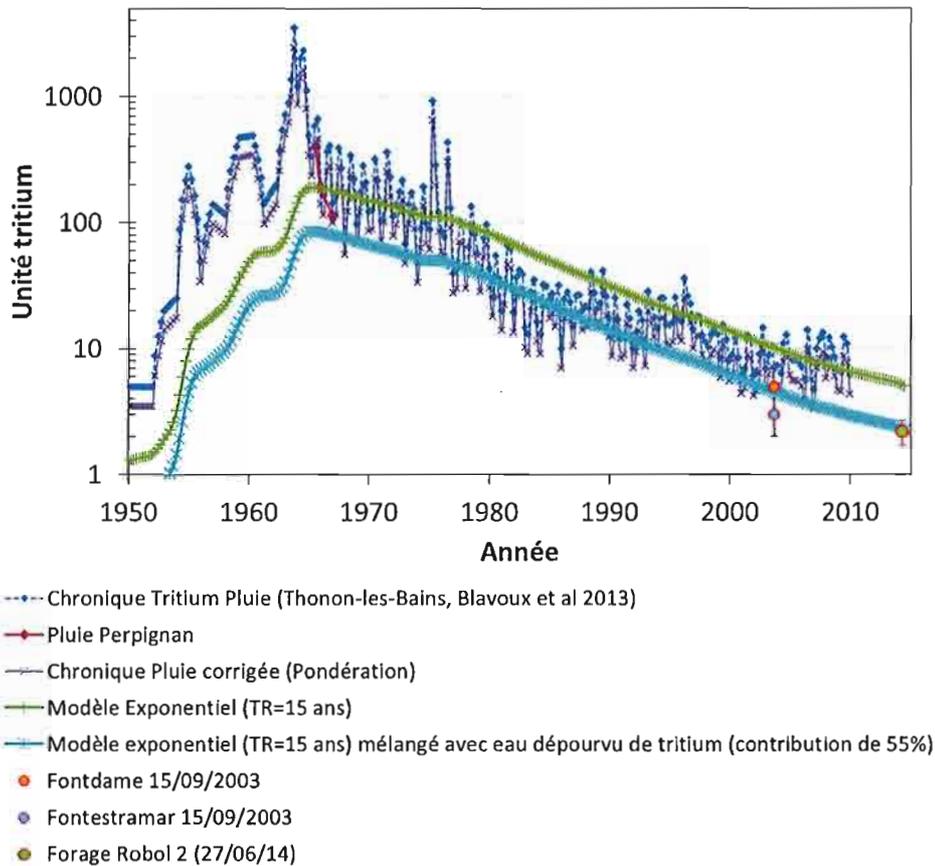


Illustration 24. Chronique tritium des pluies à Thonon-les-Bains et calibration à la zone d'étude à partir des pluies de Perpignan. Les calculs des teneurs théoriques en tritium des eaux souterraines pour différents modèles de transfert sont également reportés.

3. Impact de l'essai de pompage sur l'état quantitatif des eaux souterraines

3.1. MISE EN PLACE DU RESEAU D'OBSERVATION

Dans le but d'évaluer les interférences liées aux pompages, au sein du système karstique, les pas d'acquisitions des capteurs du réseau de suivis du CG66 et de l'ONEMA ont été adaptés en fonction de leur éloignement par rapport au site. Les ouvrages de particuliers dans les formations carbonatées situés à proximité ont également été suivis manuellement (Mas Vespelle, Mas de la Chique). Les points du karst concernés sont les suivants, ils sont localisés sur l'illustration 26 :

- piézomètre Roboul CGE (Réseau CG66, n° BSS 10904X0105/ROBOUL). Cet ouvrage situé à environ 220 m du Forage Robol permet de suivre le niveau piézométrique du karst à proximité immédiate de la zone d'étude. Le pas de temps d'acquisition est passé à 2 minutes. Les suivis réalisés permettront notamment de caractériser le contexte hydrogéologique au moment des essais de pompage ;
- piézomètre Estagel (Réseau CG66, n° BSS 10903X0034/PZSTGL). Cet ouvrage permet de suivre le niveau piézométrique du karst au niveau des pertes de l'Agly et du Verdoble ;
- piézomètre Baixas (Réseau ONEMA, n° BSS 10904X0104/PIEZO). Cet ouvrage permet de suivre le niveau piézométrique du karst dans le flan sud du synclinal du Bas-Agly. Les variations piézométriques sont comparables à celles mesurées au forage de Cases de Pène (cf. Rapport BRGM/RP-52920-Fr) ;
- piézomètre Salses - Combe Française (Réseau CG66, n° BSS 10795X0070/PZCOMB). Cet ouvrage permet de suivre le niveau piézométrique du karst en amont hydraulique des exutoires du système karstique (Source de Fondame et de Fontestramar) dans un secteur du karst où les eaux demeurent encore pas ou peu impactées par la minéralisation d'origine saline ;
- piézomètre P102 (Réseau ONEMA, n° BSS 10795X0028/CARSTE). Cet ouvrage permet de suivre le niveau piézométrique du karst au voisinage immédiat de la source de Font Dame ;
- piézomètre P107 (Réseau CG66, n° BSS 10795X0033). Cet ouvrage permet de suivre le niveau piézométrique du karst au voisinage de la source de Fontestramar dans un secteur qui n'apparaît pas ou peu connecté hydrauliquement aux pertes de l'Agly et du Verdoble ;
- source de Fontestramar (Réseau CG66, n° BSS 10795X0001/S). Les débits à la vasque sont suivis par la DREAL au pas de temps de 5 min. La conductivité et la température des eaux sont suivies au niveau de la pisciculture (réseau CG 66) ;
- forage Mas de la Chique (n° BSS 10904X0001/F). Cet ouvrage situé à environ 800 m du Forage Robol permettra de suivre l'impact lié au pompage sur le secteur ;
- forage Vespelle, situé à environ 2 km du forage Robol, cet ouvrage permettra de suivre l'impact du pompage à une distance plus grande.

En complément du suivi de l'aquifère carbonaté, le comportement de la nappe Oligocène à proximité du secteur d'étude a également été surveillé grâce aux mesures manuelles réalisées au Mas Passe de Temps (localisé en Illustration 26). Le forage profond de reconnaissance (332 m) d'Espira d'Agly a été également équipé d'un enregistreur autonome pour les besoins de cette étude (BRGM/RP-54523-FR). Enfin le forage « Ex-Opoul » (N° BSS 10901X0137) a été équipé également d'un enregistreur autonome.

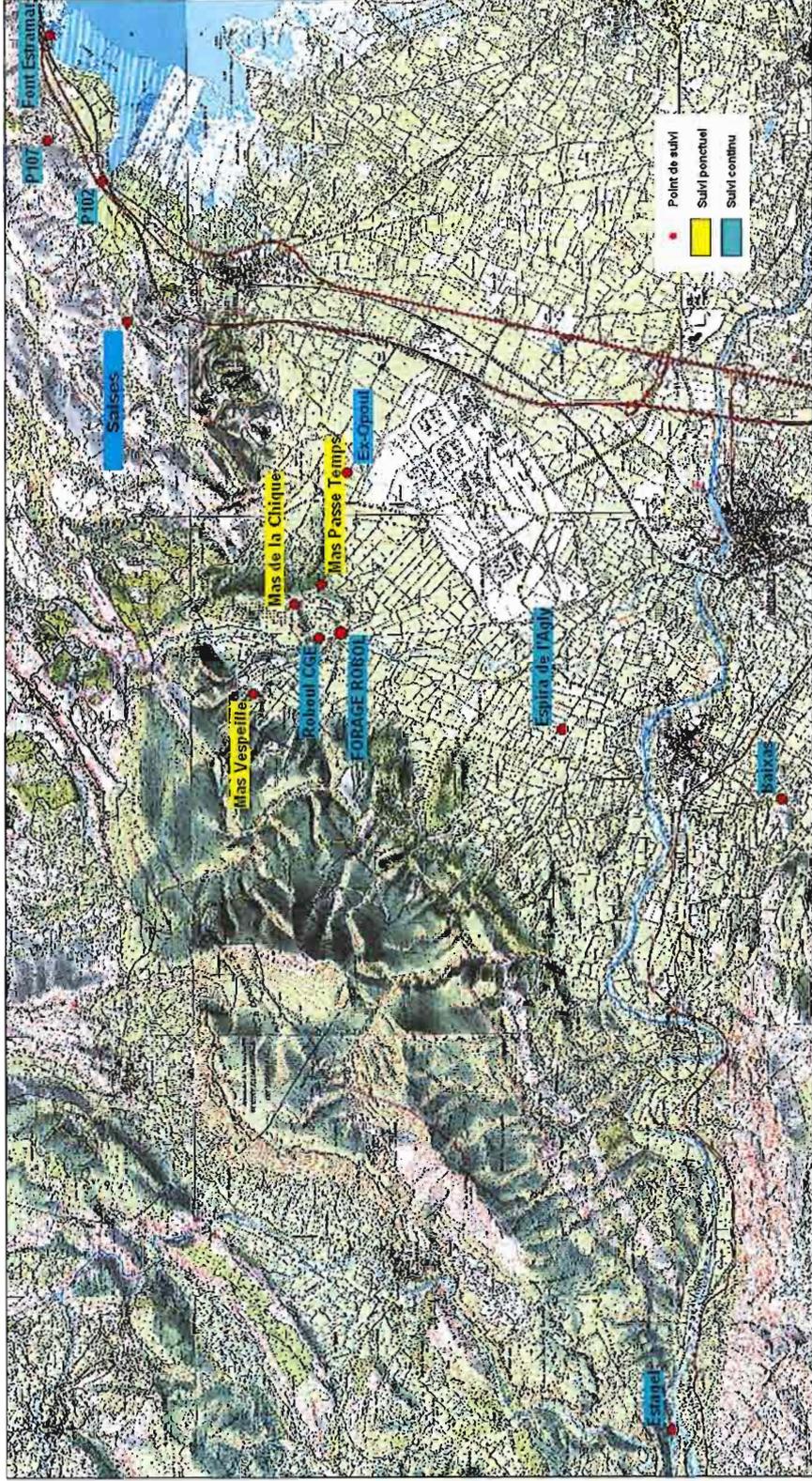


Illustration 26. Carte de localisation des points suivis.

3.2. EVALUATION DE L'IMPACT SUR LA PIEZOMETRIE

Pour mémoire, à l'issue de l'essai de pompage longue durée réalisé en 2009 sur 5 jours de pompage au débit de 50 m³/h, des rabattements ont été observés uniquement à proximité de l'ouvrage (Roboul CGE, Mas de la Chique, Mas Vespeille). L'ensemble des autres points n'avait pas été impacté (voir rapport BRGM/RP-57612-FR).

Les évolutions piézométriques au cours des derniers mois pour les différents ouvrages sont présentées dans les graphiques ci-après. Les périodes de développement de l'ouvrage Robol 2 (du 4 au 20 février 2014) et de pompage (27 à 30 juin 2014) sont surlignées en jaune.

3.2.1. Roboul CGE

Le piézomètre « Roboul CGE », situé à environ 220 m au nord du forage Robol, est le point de suivi le plus proche. Il permet d'appréhender l'état de l'aquifère selon la période de l'année. L'illustration 27 montre ainsi que les travaux réalisés en février et juin 2014 s'inscrivent dans des périodes de tarissement, non influencées par des précipitations.

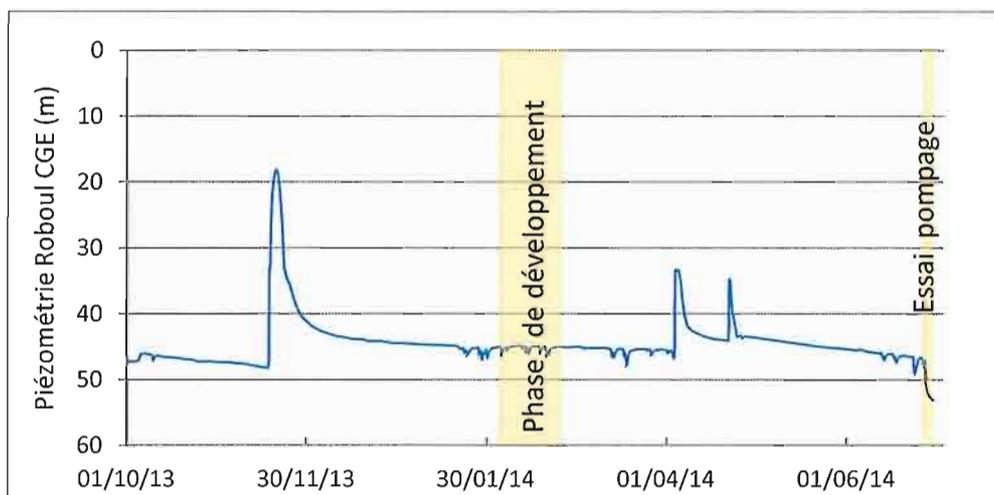


Illustration 27. Piézométrie à Roboul CGE sur la période d'octobre 2013 à juillet 2014.

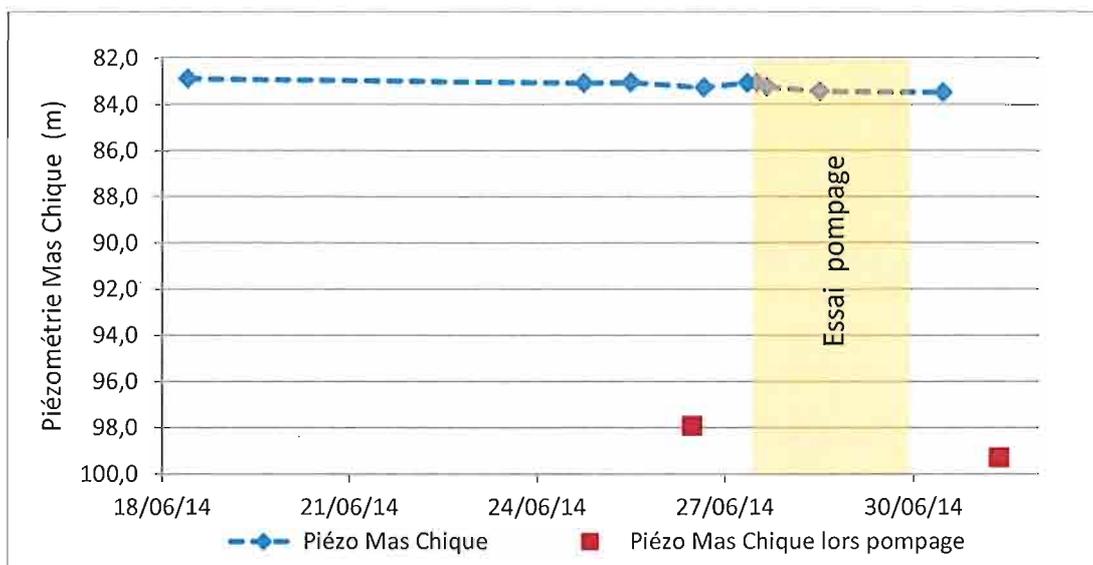


Illustration 29. Chronique du suivi piézométrique au Mas de la Chique.

3.2.3. Mas Vespelle

Le 25 juin 2014, avant les essais de pompage, le niveau était de 50,77 m (Illustration 30). Le 30 juin 2014, à la fin de l'essai de pompage de longue durée, le niveau était de 50,81 m, soit 4 cm plus bas. Il y a ainsi une diminution des niveaux de seulement quelques centimètres au cours de l'essai de pompage. Compte tenu du tarissement naturel observé au cours du mois de juin, cette diminution est probablement liée au tarissement naturel estival de la nappe. Ainsi, l'impact du pompage de longue durée de 3 jours apparaît négligeable sur le forage du Mas Vespelle.

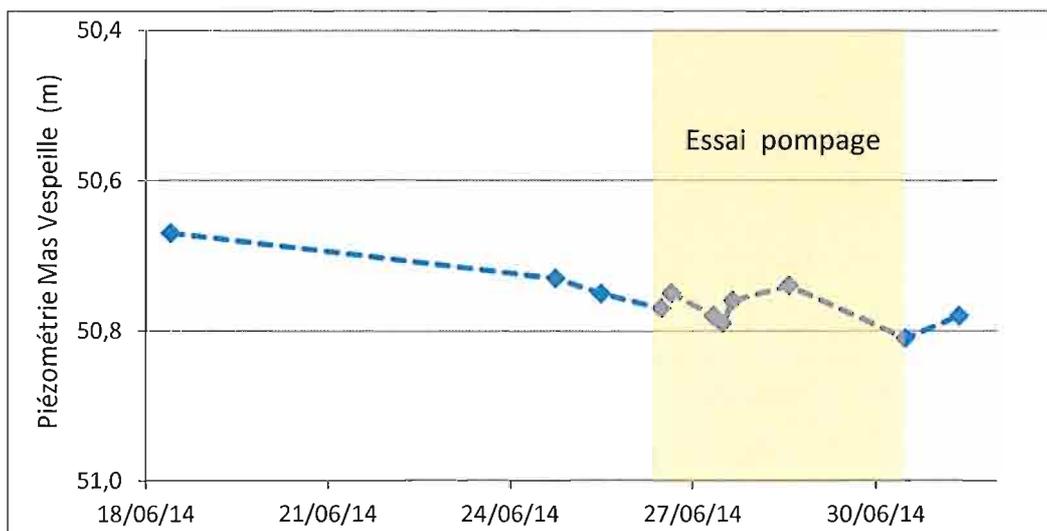


Illustration 30. Chronique du suivi piézométrique au Mas Vespelle.

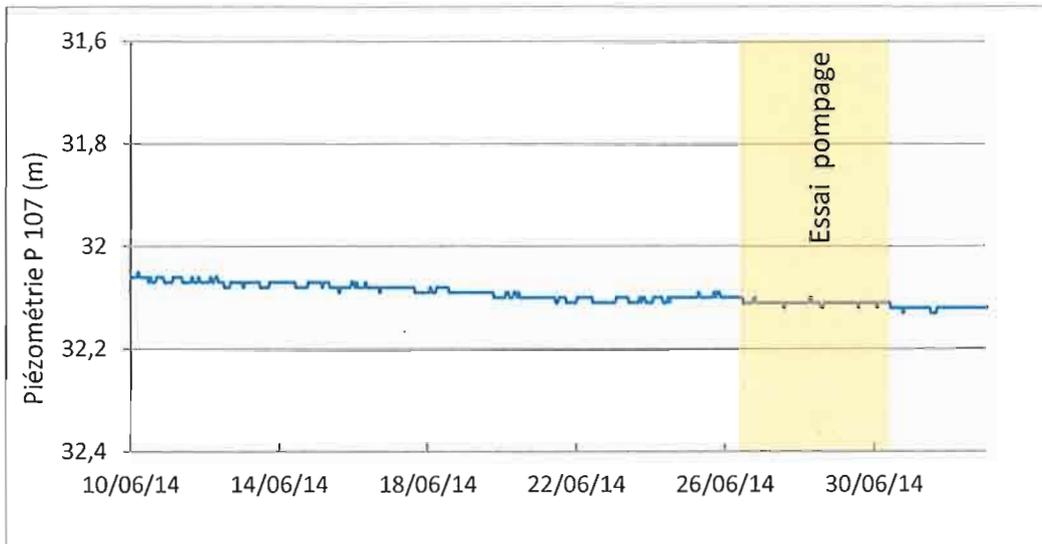


Illustration 33. Chronique de suivi du piézomètre P107 en juin 2014.

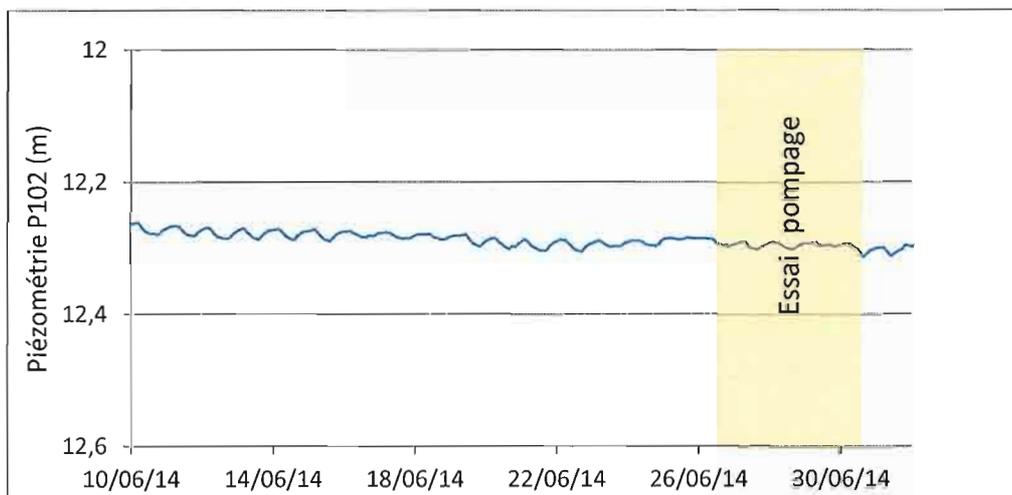


Illustration 34. Chronique de suivi du piézomètre P102 en juin 2014.

3.2.5. Salses - Combe Française

Comme pour les points précédents, l'ouvrage Combe Française présente des niveaux relativement stables suite aux crues, bien que le tarissement s'infléchisse depuis mai 2014 (Illustration 35). Cette baisse ne s'est pas accentuée durant les essais de pompage réalisés à Robol 2 à la fin du mois de juin indiquant l'absence d'influence des essais sur ce secteur.

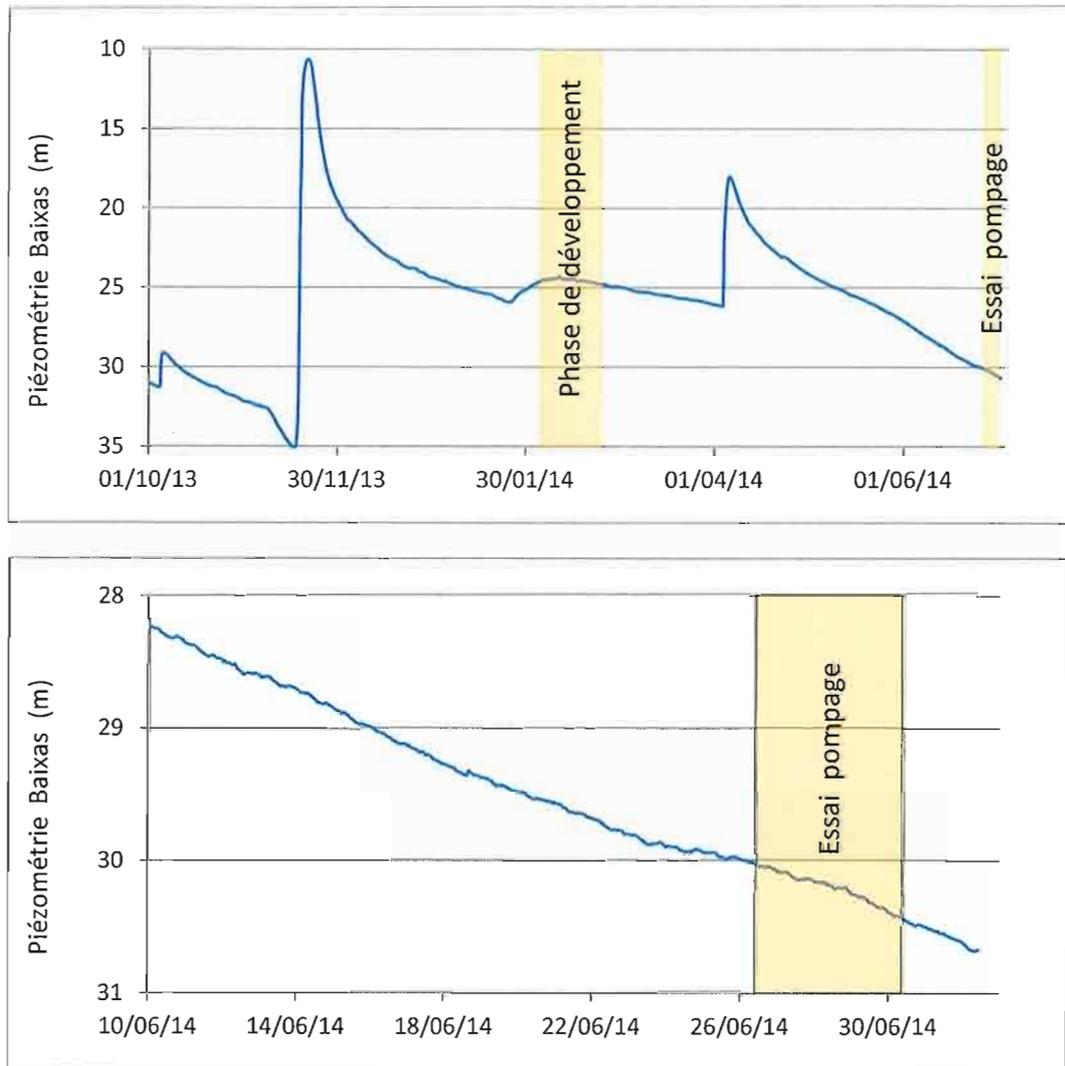


Illustration 36. Chroniques de suivi du piézomètre de Baixas.

3.2.7. Estagel

Le piézomètre d'Estagel, situé en amont du système au niveau des pertes de l'Agly, présente des niveaux hauts et assez constant depuis novembre 2013 (Illustration 37). L'ouvrage est caractérisé par une diminution progressive du niveau d'eau au cours du mois de juin. Aucune fluctuation particulière n'a été observée sur la période des travaux à Robol 2. Les interventions semblent donc ne pas avoir affecté ce secteur.

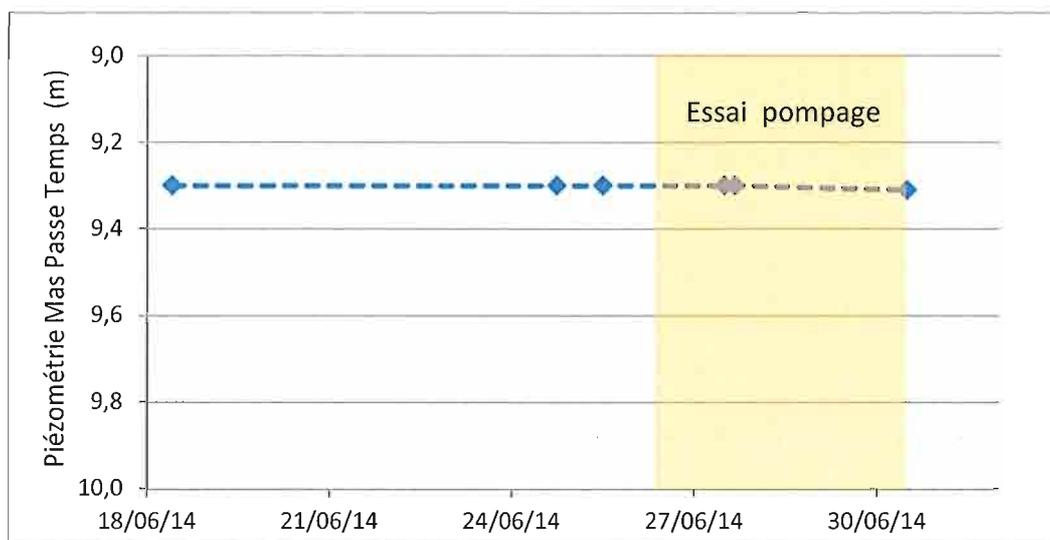


Illustration 38. Chronique du suivi piézométrique au Mas Passe Temps.

Les forages d'Espira et d'Ex-Opoul ont également été suivis pour les besoins de l'étude.

A Espira, durant la fin du mois de juin, les niveaux sont restés assez stables ; des variations quotidiennes de l'ordre de 10 centimètres sont observées (Illustration 39). Les chroniques présentées ne semblent pas montrer de lien entre les périodes de pompage et les variations du niveau, indiquant une absence d'influence des pompages sur ce secteur.

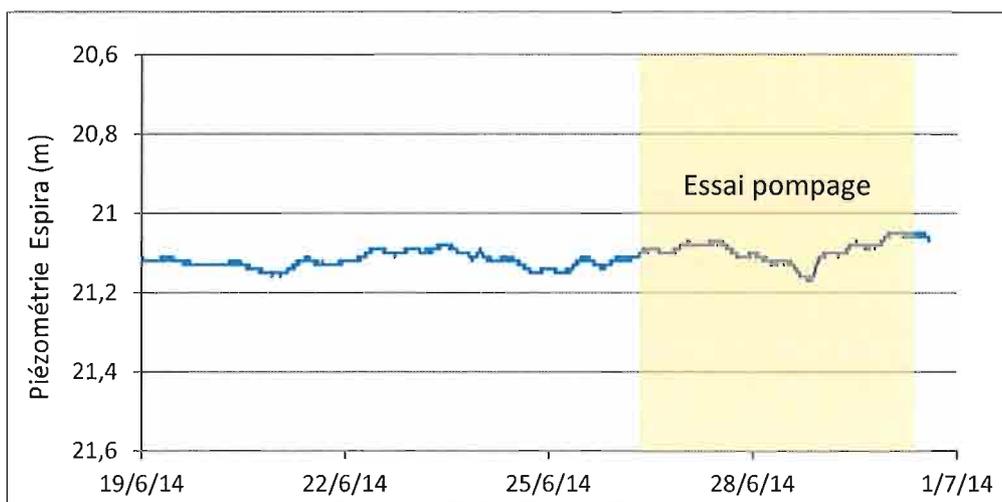


Illustration 39. Evolution de la piézométrie à Espira-de-l'Agly.

A l'exception d'une phase de légère remontée en avril 2014, le niveau du piézomètre Ex Opoul est caractérisé par une tendance globale à la baisse depuis le début de l'année (Illustration 40). Cette baisse progressive ne semble pas s'être accentuée durant la période de pompage, indiquant une absence d'impact des essais de pompage à Robol 2 sur le secteur.

désormais à 250 m, les horizons captés sont plus profonds (de 250 à 450 m). Le forage du Mas Vespeille étant profond de 80 m, la différence de comportement entre les deux essais provient probablement de l'approfondissement des horizons captés.

La piézométrie des autres points suivis ne semblent pas avoir été influencée par les travaux de 2013 et 2014.

3.3. EVALUATION DE L'IMPACT SUR LES DEBITS DE LA SOURCE DE FONTESTRAMAR

Lors des essais de juin 2014, l'évolution des débits de Fontestramar n'a pas été significative (Illustration 41). Bien qu'une baisse de quelques litres par seconde puisse être observée lors des pompages, celle-ci a débuté avant les essais, et ne semble pas liée aux essais de pompage.

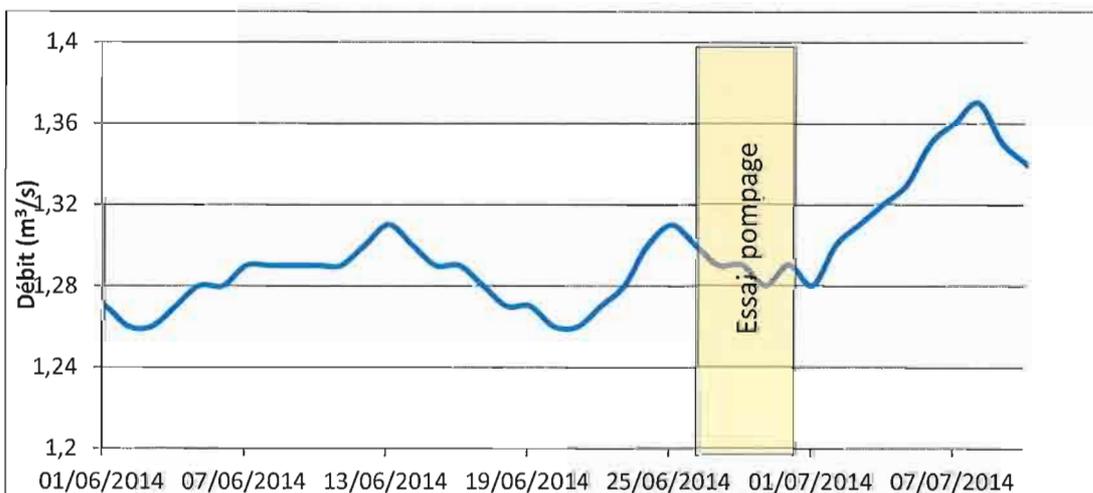
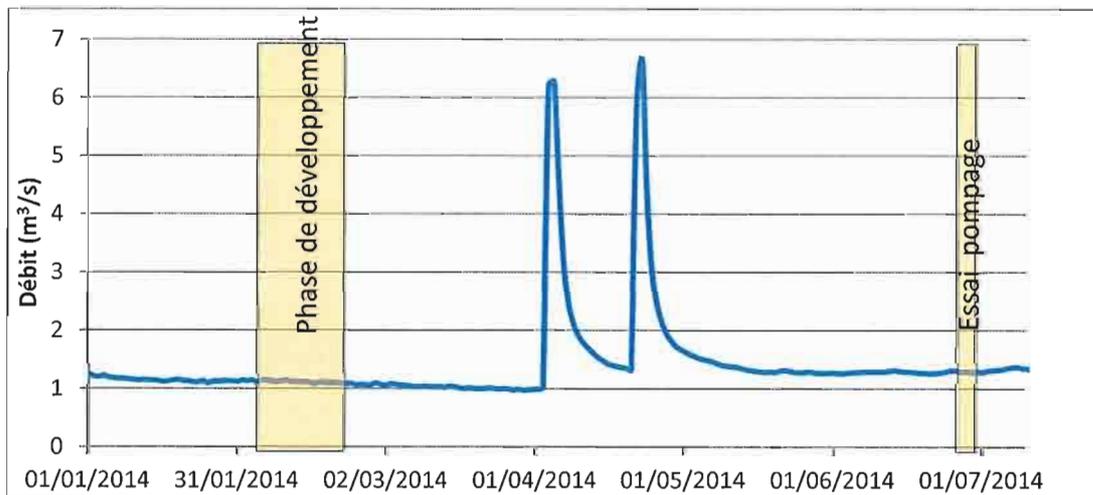


Illustration 41. Chroniques de débit de Fontestramar.

4. Conclusion et perspectives

Les capacités du nouvel ouvrage Robol 2 et la structure de l'aquifère à proximité de l'ouvrage ont été définies à partir de l'interprétation des essais de pompage réalisés en juin 2014. Il a ainsi été montré que les capacités de l'ouvrage sont proches de celles de Robol 1 avec toutefois quelques différences :

- une transmissivité plus faible au droit du forage Robol 2 ($1,5$ à 2×10^{-4} m²/s contre 3×10^{-4} m²/s pour Robol 1) avec pour conséquence une augmentation des pertes de charge linéaires (B) ($1\ 000$ m²s contre 900 m²s pour Robol 1) ;
- une diminution des pertes de charge quadratiques (C) pour Robol 2 ($22\ 000$ m⁻⁵s² contre $27\ 000$ m⁻⁵s² pour Robol 1), indiquant un meilleur échange puits-aquifère pour Robol 2.

Le modèle conceptuel structural est également comparable à celui de Robol 1 avec la mise en évidence d'une zone de forte perméabilité se comportant hydrodynamiquement comme une limite alimentée atteinte après seulement 100 minutes de pompage. Celle-ci est importante et assure l'alimentation du captage, et donc la stabilisation du niveau piézométrique au bout de seulement quelques jours de pompage.

Les paramètres hydrauliques définis par l'essai de pompage permettent d'établir un scénario d'exploitation de la ressource. Une exploitation en continu à un débit aux alentours de 200 m³/h paraît envisageable. Ceci représente un volume annuel proche de 1,8 M.m³.

Il est intéressant de constater que les deux ouvrages Robol 1 et 2 présentent des caractéristiques comparables et dans les deux cas un comportement de drainage associé à une limite alimentée atteinte après seulement une centaine de minutes de pompage. Ceci implique une relative homogénéité de l'aquifère localement, probablement liée à un réseau de failles bien développé en profondeur.

Concernant l'origine de l'eau, la signature isotopique du forage Robol est à mettre en relation avec la signature globale de la zone noyée du réservoir karstique. Les eaux du forage Robol se positionnent dans le domaine défini pour les eaux des pertes de l'Agly. Ces résultats permettent donc de confirmer que les eaux sollicitées par le forage Robol 2 sont en connexion hydraulique et massique avec la zone des pertes de l'Agly.

L'âge apparent moyen de l'eau estimé par les gaz dissous est de l'ordre de 10 ans. Il a été défini à partir de plusieurs méthodes et semble ainsi constitué par un mélange d'eau ancienne (supérieure à 30 ans) et d'eau récente (quelques années).

Concernant l'impact sur la ressource, seuls les ouvrages situés à proximité du forage ont subi un abaissement de leur niveau piézométrique : de l'ordre de 6 mètres pour le piézomètre de suivi, Roboul CGE, situé à 200 mètres, et quelques dizaines de centimètres pour le mas le plus proche. D'après l'analyse des piézomètres situés sur le karst des Corbières, il n'y a pas eu d'incidence au niveau régional. Il n'y a pas eu non plus d'impact local sur l'aquifère de l'Oligocène.

Une évaluation de l'impact sur la ressource est proposée pour la source de Fontestramar. Cette source est caractérisée par un débit moyen d'environ 2 m³/s et un débit d'étiage moyen de 1 m³/s. Dans le cas d'une exploitation de l'ouvrage Robol 2 à un débit de 200 m³/h, soit 55 l/s, le prélèvement impactera alors au maximum le débit de cette source de 3 %. Lors des périodes d'étiage la réduction maximale des débits sera de moins de 6 %.

5. Bibliographie

Blavoux B., Lachassagne P., Henriot A, Ladouche B., Marc V., Beley J-J., Nicoud G, Olive P., 2013. A fifty-year chronicle of tritium data for characterising the functioning of the Evian and Thonon (France) glacial aquifers. *Journal of Hydrology* 494, 116–133. 10.1016/j.jhydrol.2013.04.029.

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

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

Craig H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters, *Sciences*, 133, 3465, 1702-1703.

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

Dörfliger N., Ladouche B. avec la collaboration de Izac J-L, Cubizolles J. et Du Couëdic C., 2004. Evaluation des ressources en eau des Corbières. Phase I – Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales. Rapport final. Volume 4 – Synthèse hydrogéologique des systèmes karstiques des Corbières orientales : la Mouillère, la Tirounère, le Verdoble. BRGM RP-52921-FR, 109 p., 70 ill., 2 ann.

Dörfliger N., Ladouche B., Le Strat P., et al., 2004. Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales - Rapport final de la phase I du projet « Évaluation des ressources en eau des Corbières ». Volume 1 - Moyens mis en œuvre et méthodologie de caractérisation. BRGM/RP-52918-FR. 107 p., 85 ill., 2 ann.

Fleury P., Ladouche B., Dewandel B., Dörfliger N., P. Le Strat, Grunenwald G., Izac, J-L., Cubizolles J., 2009. Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase III – Démonstration de la ressource. Rapport « final ». BRGM/RP-57612-FR, 148 p.

Fleury P., Dewandel B., Maldan F., 2013. Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV – Reprise des investigations sur le forage ROBOL. Rapport « intermédiaire ». BRGM/RP-62150-FR, 44 p, 28 ill.

Gringarten AC., Ramey H.J. Jr., Raghavan R., 1974. Unsteady state pressure distributions created by a well in a well with single infinite conductivity vertical fracture. *SPE J.*, 14:347–360.

Jacob C.E., 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions ASCE*, 112 : 1047-1064.

Ladouche B., Dörfliger N., avec la collaboration de Izac, J.L., Cubizolles, J., Du Couëdic, C., Aunay, B., Thomson, P., 2004. Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales - Rapport final de la phase I du projet Évaluation des ressources en eau des Corbières. Volume 2 - Caractérisations géologique et hydrogéologique du système karstique du « synclinal du Bas-Agly » BRGM/RP-52919-FR. 198 p., 109 ill., 5 ann.

Annexe 1

Analyses pesticides Robol 1 - 2009



CONSEIL GENERAL DES PYRENEES ORIENTALES
 Direction de l'Economie et du Territoire
 24, quai Sadi Carnot
 BP 906
 66906 PERPIGNAN CEDEX

RAPPORT D'ANALYSES N° 090610162	
Dossier n° P-CG66ECO-090611-6729	
Echantillon n° : P-09-21839	
Produit : Eau distribuée sans désinfection	
Page : 1 sur 5	Version du rapport : Rev 03/08/20

Édité à Perpignan, le 25/06/09

Date de réception	11/06/2009	Type de visite	AUTOCONTROLÉ
Date de prélèvement	11/06/2009	Motif du prélèvement	-
Heure de prélèvement	09:05	Point de prélèvement	FORAGE DU ROBOIL
Prélevé par	MIROSA	Localisation exacte	EXHAURE
Commune	SALSES	Condit. prélèvement	
Type d'analyse	PEST LR07		

Paramètres	Réalisation	Méthodes	Résultats	Unités	Réf. Qualité	Limites Qualité	Date début analyse
Pesticides Amides							
Achéthure		NF EN ISO 6461	<0.020	µg/l			12/06/2009
Alachlore		NF EN ISO 6468	<0.02	µg/l			12/06/2009
Cymoxanil		LC MSMS	<0.050	µg/l			12/06/2009
Métazachlore		LC MSMS	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Métolachlore		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Propiconazole		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
S-Métolachlore		LC MSMS	<0.01	µg/l			12/06/2009
Tébutiuron		LC MSMS	<0.050	µg/l			12/06/2009
Pesticides Aryloxyacétides							
2,4-D		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Diclorprop		LC MSMS	<0.01	µg/l			12/06/2009
Diclorprop-P		LC MSMS	<0.01	µg/l			12/06/2009
Hexaprop		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
2,4-DCPA		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009



Le présent Rapport d'Essai ne concerne que les objets soumis à l'essai.
 Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont disponibles sur demande.

La reproduction de ce Rapport d'Essai n'est autorisée que sous forme de fac-similé intégral.

L'accréditation de COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais

couverts par l'accréditation, qui sont identifiés par le symbole :

Les limites et références de Qualité suivent le code de la Santé publique

: Analyses réalisées en interne : Valeurs des Références de Qualité : Valeurs des Limites de Qualité



Dossier n° : P-CG66ECO-090611-6729
 Echantillon n° : P-09-21839
 Produit : Eau distribuée sans désinfection
 Origine : CG66ECO
 Bulletin N° 090610162
 Page : 3 sur 5 *Votre dépositaire Assuré n° 3*

Paramètres	Réalisation	Méthodes	Résultats	Unités	Réf. Qualité	Limites Qualité	Date début analyse
Oxydéméton méthyl		LC MSMS	<0.020	µg/l			12/06/2009
Parathion éthyl		NF EN ISO 10695	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Parathion Méthyl		NF EN ISO 10695	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Phoxone		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Pesticides Carbamates							
Hydroxycarbofuran 3		LC MSMS	<0.02	µg/l			12/06/2009
Carbofuran		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Carbendazime		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Iprovalcarb		LC MSMS	<0.050	µg/l			12/06/2009
Pesticides Nitrophénols et Alcools							
Bromoxynil		LC MSMS	<0.030	µg/l			12/06/2009
Toxyl		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Pesticides Pyréthrinoides							
Cyperméthrine		NF EN ISO 6468	<0.02	µg/l			12/06/2009
Deltaméthrine		NF EN ISO 6468	<0.02	µg/l			12/06/2009
Piperonil butoxide		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Pesticides triazolones							
Sulcotriane		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Pesticides Urées Substituées							
Chlorotoluron		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
1-(3,4-dichlorophényl)-3-méthylurée		LC MSMS	<0.050	µg/l			12/06/2009
Diuron		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Déméthyl éoproturon		LC MSMS	<0.01	µg/l			12/06/2009
Isoproturon		LC MSMS	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Linuron		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Metoluron		LC MSMS	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Métoluron		LC MSMS	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009

Le présent Rapport de suite concerne que les objets soumis à l'essai.

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique des techniques et les incertitudes de mesure sont disponibles sur demande.

La reproduction de ce rapport d'essai est autorisée sur une forme de fac-similé intégral.

L'accréditation COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais

concernés par l'accréditation, qui sont identifiés par le symbole

limites et Références de Qualité selon le code de la Santé publique.

: Analyses réalisées en externe : Valeurs hors Références de Qualité : Valeurs hors Unités de Qualité



Dossier n° : P-CG66ECO-090611-6729
 Echantillon n° : P-09-21839
 Produit : Eau distribuée sans désinfection
 Origine : CG66ECO
 Bulletin N° 090610162
 Page : 5 sur 5 Version de rapport ModLix 2.0

Paramètres	Réalisation	Méthodes	Résultats	Unités	Réf. Qualité	Limites Qualité	Date début analyse
Carbetracène éthyne		LC MSMS	<0.01	µg/l			12/06/2009
Clérodésiquat chlorure		LC MSMS	<0.03	µg/l			12/06/2009
Diquat		LC MSMS	<0.030	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Diméthomorphe		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Dinocap		NF EN ISO 6468	<0.040	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Fenoxadone		NF EN ISO 6468	<0.02	µg/l			12/06/2009
Fénamidon		LC MSMS	<0.01	µg/l			12/06/2009
Fépral		NF EN ISO 6468	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Fenprovidin		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Glyphosate		LC MSMS	<0.030	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Imidachlopride		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Kioxazin méthyle		LC MSMS	<0.050	µg/l			12/06/2009
Mepiquat		LC MSMS	<0.03	µg/l			12/06/2009
Metolaxyl		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Noflurazon		NF EN ISO 6468	<0.020	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Desmethylnoflurazon		LC MSMS	<0.010	µg/l			12/06/2009
Oxadiazyl		LC MSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Prochloraz		LC MSMS	<0.020	µg/l			12/06/2009
Pendiméthaline		NF EN ISO 6458	<0.020	µg/l			12/06/2009
Paraquat		LC MSMS	<0.050	µg/l		n < 0.100	12/06/2009
Spiroxzoline		LC MSMS	<0.050	µg/l			12/06/2009
Trifluraline		NF EN ISO 6458	<0.02	µg/l			12/06/2009
Somme et totaux							
Total Pesticides		CALCUL	0.072	µg/l			12/06/2009

Destinataire : CONSEIL GENERAL DES PYRENEES ORIENTAL

Rapport Validé le : 25/06/2009

Demandé par : AUGÉ

Responsable CHIMIE GENERALE

Supplément des Responsables de l'Analyse

Le présent Rapport d'Essai ne concerne que les objets soumis à l'essai.
 Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon
 et les incertitudes de mesure sont disponibles sur demande.

La production de ce Rapport d'Essai n'est possible que sous forme de fac-similé intégral
 L'accréditation COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les analyses
 effectuées par l'accréditation, qui sont identifiées par le sigle : 
 L'analyse est effectuée de Qualité selon le site de la Santé publique

 Analyser et valider en continu  Valider les Références de Qualité  Valider les Limites de Qualité

Annexe 2

Analyses pesticides Robol 2 - 2014



Dossier n° : P-SALES-140630-8409

Echantillon n° : P-14-28234

Produit : Foin distribuée sans désinfection

Origine : SALES

Bulletin N° : 140713346

Page : 2 sur 6

Fonction de support : Analyse de Foin

Paramètres	Réalisation	Méthodes	Résultats	Unités	Réf. Qualité	Limites Qualité	Date début analyse
<input type="checkbox"/> Dichloroprop-P		MOP07-04 par LCMSMS	<0.01	µg/l			30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Mécoprop		MOP07-04 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> 2,4-DCPA		MOP07-04 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input type="checkbox"/> Mécoprop-p		MOP07-04 par LCMSMS	<0.010	µg/l			30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Triclopyr		MOP07-04 par LCMSMS	<0.050	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Métabolites des triazines							
<input checked="" type="checkbox"/> Atrazine Déséthyl		NF EN ISO 10695	<0.020	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Atrazine Desopropyl		NF EN ISO 10695	0.050	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Terbutylazin déséthyl		NF EN ISO 10695	0.081	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Hydroxyterbutylazine		MOP07-04 par LCMSMS	<0.010	µg/l			30/06/2014
Pesticides Triazines							
<input checked="" type="checkbox"/> Améthirine		NF EN ISO 10695	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Atrazine		NF EN ISO 10695	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Cyanazine		NF EN ISO 10695	<0.020	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Hexachloro		MOP07-04 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input type="checkbox"/> Propazine		NF EN ISO 10695	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Simazine Hydroxy		MOP07-04 par LCMSMS	<0.030	µg/l			30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Simazine		NF EN ISO 10695	0.044	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Terbutylazine		NF EN ISO 10695	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Terbutolone		NF EN ISO 10695	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
<input type="checkbox"/> Terbutryne		NF EN ISO 10695	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Pesticides Organophosphorés							
<input checked="" type="checkbox"/> Ténaflous		NF EN ISO 6468	<0.02	µg/l			30/06/2014
<input checked="" type="checkbox"/> Chlorfenvinphos		MOP07-04 par LCMSMS	<0.010	µg/l			30/06/2014

Le présent Rapport d'Essai ne concerne que les objets soumis à l'essai.

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont disponibles sur demande. Les incertitudes ne sont pas prises en compte pour les déclarations de conformité.

La reproduction de ce Rapport d'Essai n'est autorisée que sous forme de fac-similé intégral.

L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais

soumis par accréditation, qui sont identifiés par le symbole :

Limites et références de Qualité selon le code de la norme publique

Analyses réalisées en externe
 Valeurs hors Références de Qualité
 Valeurs hors Limites de Qualité

Siège Social : LAMP - Laboratoire Départemental - Route de la Thermodynamique - Technopôle - 66300 PERPIGNAN



Dossier n° : P-SATFSE-140630-8409

Echantillon n° : P-14-28234

Produit : Eau distribuée sans désinfectant

Origine : SATFSE

Bulletin N° : 140713346

Page : 4 sur 6

Formule de rapport standard 00

Paramètres	Réalisation	Méthodes	Résultats	Unités	Réf. Qualité	Limites Qualité	Date début analyse
Pesticides Urées Substituées							
Chlorotoluron		MOP07-01 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
1 (3,4-dichlorophényl)-3-méthylurée		MOP07-01 par LCMSMS	<0.020	µg/l			30/06/2014
Diuron		MOP07-01 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Desméthyl isoproturon		MOP07-01 par LCMSMS	<0.01	µg/l			30/06/2014
Isoproturon		MOP07-01 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Linuron		MOP07-01 par LCMSMS	<0.050	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Monolinuron		MOP07-01 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Métolomeuron		MOP07-01 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Méthéméthiazuron		MOP07-01 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Métoxuron		MOP07-01 par LCMSMS	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Pesticides organo-chlorés.							
Aldrine		NF EN ISO 6468	<0.010	µg/l		n < 0.030	30/06/2014
Dinitrochlorobenzène		MOP07-01 par LCMSMS	<0.01	µg/l			30/06/2014
Endosulfan total		NF EN ISO 6468	<0.020	µg/l			30/06/2014
Hexachlorocyclopentadiène		NF EN ISO 6468	<0.020	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
HCH Gamma		NF EN ISO 6468	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Dieldrine		NF EN ISO 6468	<0.020	µg/l		n < 0.030	30/06/2014
Heptachlore		NF EN ISO 6468	<0.010	µg/l		n < 0.030	30/06/2014
Heptachlore epoxide		NF EN ISO 6468	<0.010	µg/l		n < 0.030	30/06/2014
Oxadiazon		NF EN ISO 6468	<0.010	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Pesticides triazolés							
Aminotriazole (Amitrole)		MOP 07-20	<0.030	µg/l		n < 0.100	30/06/2014
Trioxaconazole		MOP07-01 par LCMSMS	<0.020	µg/l			30/06/2014

Le présent rapport d'essai ne concerne que les objets soumis à l'essai.

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesures sont disponibles sur demande. Les incertitudes ne sont pas prises en compte pour les déclarations de conformité.

La reproduction de ce Rapport d'Essai n'est autorisée que sous forme de fac-similé intégral.

L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les essais.

couverts par l'accréditation qui sont identifiés par le symbole :

Limites et références de Qualité selon le code de la Santé publique.

Analyses réalisées en externe : Valeurs hors références de Qualité : Valeurs hors limites de Qualité

 Siège Social : CAMP - Laboratoire Départemental - Route de la Université agricole - Le Masquié - 86100 HUILLY-VALENTIN
 Tél : 04 69 68 33 00 - Fax : 04 69 56 49 05 - e-mail : camp@campylda.com

Annexe 3

Tableaux des résultats analytiques

n° échantillon	date	LQ													
		CO3	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	NO3	NH4	NO2	SO4	SiO2	B	Sr
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
1	F. Robol1 05/05/2009	<LQ	81.1	8.8	13.7	1.2	198	19.3	17.6	<LQ	0.08	65.5	7.9	17.2	454
2	F. Robol2 07/05/2009	<LQ	94.9	15.6	11.5	1.3	185	16.1	6.2	<LQ	0.04	151	8.6	15.8	769
3	F. Robol3 04/06/2009 09:58	<LQ	187	19.3	11.7	1.5	293	135	3.8	0.1	0.06	167	9.5	18	923
4	F. Robol4 04/06/2009 14:18	<LQ	171	18.6	11.7	1.3	251	113	4.8	0.05	0.04	162	9.5	18.3	899
5	F. Robol5* 10/06/2009 13:23	<LQ	159	18.2	11.5	1.4	247	92.6	4.2	<LQ	0.04	168	9.3	18.2	871
6	F. Robol6* 11/06/2009 09:00	<LQ	131	17.2	11.5	1.3	227	54.2	4.6	<LQ	<LQ	160	9.1	18.2	772
7	F. Robol7* 12/06/2009 14:30	<LQ	123	16.9	11.5	1.3	236	41.2	4.8	<LQ	<LQ	161	8.9	18.1	714
8	F. Robol8* 13/06/2009 10:00	<LQ	119	16.7	11.4	1.3	215	37.7	4.9	<LQ	<LQ	160	8.9	17.9	793
9	F. Robol9* 15/06/2009 11:50	<LQ	115	16.5	11.5	1.3	213	31.1	4.8	<LQ	<LQ	158	8.8	17.8	774
10	F. Mas Chique 15/06/2009 00:00	<LQ	101	15.7	12.7	1.2	200	18.1	5.7	0.07	<LQ	152	8.3	17.3	613

*: prélevé au cours du pompage de longue durée

ech n°6 : analyses chimiques + phytosanitaires

n° échantillon	date	LQ													
		CO3	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	NO3	NH4	NO2	SO4	SiO2	B	Sr
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
1	F. Robol 2_T+6h* 27/06/2014 15:00	<LQ	121	17.3	11.1	1.4	209	36.1	4.1	<LQ	<LQ	168	8.6	21.1	887
2	F. Robol 2_T+72h* 30/06/2014 09:00	<LQ	115	17.4	11.2	1.3	205	29.7	4.1	<LQ	<LQ	167	8.5	20.7	904

*: prélevé au cours du pompage de longue durée

ech n°2 : analyses chimiques + phytosanitaires

n° échantillon	date	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	incertitude	$\delta^2\text{H}$ (‰) (± 0.8 ‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) (± 0.1 ‰)
1 F. Robol1	05/05/2009	0.707946	0.000008	-40.9	-6.8
2 F. Robol2	07/05/2009	0.707879	0.000007	-45.2	-7.2
3 F. Robol3	04/06/2009 09:58				
4 F. Robol4	04/06/2009 14:18				
5 F. Robol5*	10/06/2009 13:23				
6 F. Robol6*	11/06/2009 09:00				
7 F. Robol7*	12/06/2009 14:30	0.707876	0.000007	-45.8	-7.3
8 F. Robol8*	13/06/2009 10:00				
9 F. Robol9*	15/06/2009 11:50	0.707863	0.000007	-45.8	-7.4
10 F. Mas Chique	15/06/2009 00:00	0.707852	0.000006	-46.4	-7.4

*: prélevé au cours du pompage de longue durée

ech n°6 : analyses chimiques + phytosanitaires

n° échantillon	date	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	incertitude	$\delta^2\text{H}$ (‰) (± 0.8 ‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) (± 0.1 ‰)
1 F. Robol 2_T+6h*	27/06/2014 15:00	0.70784503	0.000006	-46.9	-7.3
2 F. Robol 2_T+72h*	30/06/2014 09:00	0.70784303	0.000006	-46.8	-7.3

*: prélevé au cours du pompage de longue durée

ech n°2 : analyses chimiques + phytosanitaires

Annexe 4

Analyses des Gaz CFC et SF6 pour la datation de l'âge apparent des eaux

a) 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 SF₆ a débuté en 1953. Le SF₆ 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 élevé⁵
- 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 gaz⁶. 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

⁵ Les temps de vie dans l'atmosphère des CFC-11, CFC-12 et CFC-113 sont respectivement estimés à 45 ± 7,87 ans, 87 ± 17 ans et 100 ± 32 ans (Volk et al., 1997)

⁶ 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) : $p_i = x_i(P - p_{H_2O})$. Les constantes d'Henry K_{Hi} sont fonction de la température et de la salinité des eaux. Les paramètres pour les calculs des K_H pour le CFC-11 et CFC-12 sont ceux de Warner et Weiss (1985) et Bullister *et al.* (2002) pour le K_H du SF₆.

- (1) la température et l'altitude de recharge sont connues (ou peuvent être estimées)⁸ ;
- (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 ;⁹ ;
- (3) les concentrations des gaz dissous dans l'eau n'est pas altérée par des processus biologiques, géochimiques ou hydrologiques¹⁰ ;
- (4) l'aquifère ou la zone d'infiltration n'est pas contaminées par des sources anthropiques (pollutions urbaines, agricoles, industrielles)¹¹ ;
- (5) la méthode de prélèvement ne doit pas permettre de contact entre l'échantillon d'eau et l'atmosphère¹².

⁸ 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 entraîner 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.

⁹ L'épaisseur de la zone non saturée où 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 poreuse 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).

¹⁰ Dans les climats arides où la zone d'infiltration (zone non saturée) peut 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, à des âges apparents plus jeunes, notamment pour le CFC11.

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.**

¹¹ La contamination locale de l'atmosphère par un ou plusieurs gaz en raison d'une source de pollution (production) de 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.

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

b) 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 45 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF6

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.* 42 7, pp. 1151–1161.

Busenberg, E. et Plummer, L., 1992. Use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) 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 Bartholemey R. (1993) - Age dating groundwater by use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) 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

