

# Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV – Reprise des investigations sur le forage ROBOL

Rapport final

BRGM/RP-62150-FR

Mars 2013



# Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV – Reprise des investigations sur le forage ROBOL

Rapport final

**BRGM/RP-62150-FR**  
Mars 2013

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

**Vérificateur :**

Nom : B. Ladouche

**Approbateur :**

Nom : M. Audibert

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 :

**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, 36 p, 28 ill.

## 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 correspond à la poursuite des investigations sur le forage Robol réalisé en 2009 dans le cadre de la démonstration de la ressource (phase III) (voir rapport BRGM/RP-57612-FR).

Ainsi lors de la précédente phase un forage de reconnaissance de la ressource en eau fut réalisé sur la commune de Salses le Château à proximité du cours d'eau temporaire le Roboul. Ce forage ainsi nommé Robol (code BSS : 10904X0116/ROBOL) 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 a priori à une zone plus productive pouvant être assimilée à un drain de plus 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 d'exutoire. L'eau sollicitée par le pompage sur cet ouvrage de reconnaissance est de bonne qualité.

Lors des essais hydrauliques réalisés en 2009 l'influence du pompage sur les niveaux d'eau des forages environnants a été évalué, elle concerne ainsi les forages recoupant l'aquifère carbonaté situé à proximité du forage. Son impact est limité (de quelques centimètres à 2 mètres pour l'ouvrage le plus proche localisé à 200 m). Il n'y a eu aucune influence à l'échelle régionale, en particulier sur les débits des exutoires, les sources de Fontestramar et de Fontdame. Le débit cumulé des deux sources au moment des essais de pompage était de l'ordre de 2 m<sup>3</sup>/s (± 200 l/s). Le débit pompé (environ 50 m<sup>3</sup>/h soit 14 l/s pendant 5 jours) au forage est environ 150 fois inférieur au débit de l'exutoire.

Les interprétations des essais de pompage de 2009 permettent d'une part, d'indiquer qu'à partir de 100 minutes de pompage, le forage est alimenté par une zone productrice et, d'autre part, de localiser cette zone dans l'espace. Cette zone contributrice (drain karstique ?) serait localisée à quelques 100 mètres à l'Ouest de l'ouvrage de reconnaissance. A partir de 1000 minutes de pompage, la piézométrie du forage sollicité par pompage n'évolue pratiquement plus. L'eau pompée provient de la zone productive (drain karstique) caractérisé par de forte perméabilité. L'interprétation réalisée suggère que cette zone productrice représente un potentiel hydraulique susceptible d'atteindre plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/h en exploitation.

A l'issue des travaux de 2009 il a été montré que l'ouvrage de reconnaissance ne permettait pas d'exploiter de façon optimale la ressource potentiellement disponible. Les facteurs limitant sont, d'une part, le diamètre de l'ouvrage et, d'autre part, la profondeur de la chambre de captage. Cette dernière n'est pas suffisamment profonde par rapport au positionnement de la zone la plus productrice du forage, située à 420 m de profondeur, pour pouvoir solliciter l'ouvrage à un débit supérieur à 50 m<sup>3</sup>/h.

C'est pourquoi, lors de cette phase IV, une acidification localisée au niveau du drain à 420 m de profondeur a été réalisée afin d'améliorer la productivité du forage et le drainage du réseau karstique principal. Afin de caractériser le gain de productivité, un essai par paliers de débit suivi d'un pompage de longue durée ont été réalisés.

Le présent rapport présente l'interprétation des nouveaux essais de pompage réalisés les 12 et 13 février 2013 suite à l'acidification, puis présente dans un second temps, l'évaluation de l'impact du pompage en terme de rabattement sur les points d'eau du réseau d'observation et l'impact sur les exutoires régionaux.

L'interprétation des essais par paliers de débit a permis de mettre en évidence une amélioration des échanges puits-aquifère d'environ 35 % (réduction de pertes de charges liées au puits de 35 %). Désormais le drain karstique sollicité par le forage réagit plus efficacement (plus d'eau drainée, plus rapidement). Les interprétations de tous les essais permettent également d'évaluer le débit d'exploitation de l'ouvrage en fonction de la profondeur de la chambre de pompage. Ainsi, pour un débit d'exploitation aux environs de 200 m<sup>3</sup>/h, un réalésage de l'ouvrage jusqu'à 250 m de profondeur sera nécessaire pour accueillir cette chambre.

Notons qu'après ces nouveaux essais de pompage un développement de l'ouvrage a été réalisé pendant 2 heures, les débits au soufflage étaient supérieurs à 200 m<sup>3</sup>/h. L'eau d'exhaure était toujours très turbide suggérant que l'ouvrage a continué à se développer. Il est donc fort probable qu'aujourd'hui le forage soit encore plus productif que pendant les derniers essais et donc que les simulations d'exploitation, comme par exemple celle à 200 m<sup>3</sup>/h, soient pessimistes.

Les travaux de réalésage et de développement seront réalisés à partir de mars 2013. Un essai de pompage par paliers de débit (3 à 4 paliers) suivi d'un pompage de longue durée (env. 3 jours) seront effectués afin de préciser les nouvelles caractéristiques de l'ouvrage. L'impact sur les forages exploités situés à proximité, sur les piézomètres de suivi du système des Corbières et sur les débits des sources de Fontestramar et Fontdame, sera également évalué.

Concernant l'impact sur la ressource seuls les ouvrages situés à proximité du forage ont subi des rabattements lors de l'essai. Il n'y a pas eu d'incidence au niveau régional, notamment sur la source de Fontestramar. Par ailleurs, seul un pompage de très longue durée (plusieurs semaines voire plusieurs mois) permettrait d'évaluer l'impact des prélèvements du forage sur les niveaux de l'aquifère à l'échelle régionale et les débits des exutoires (sources karstiques de Fontestramar et Fontdame).

# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Interprétation des essais de pompage sur le forage ROBOL .....</b>	<b>11</b>
2.1. MISE EN ŒUVRE DES ESSAIS DE POMPAGE, PROTOCOLE OPERATOIRE .....	11
2.1.1. Interprétation de l'essai par paliers de débit.....	11
2.1.2. Interprétation de l'essai longue durée .....	13
<b>3. Impact de l'essai de pompage sur l'état quantitatif des eaux souterraines .....</b>	<b>21</b>
3.1. MISE EN PLACE DU RESEAU D'OBSERVATION .....	21
3.2. EVALUATION DE L'IMPACT SUR LA PIEZOMETRIE.....	24
3.2.1. Roboul CGE.....	24
3.2.2. Mas de la Chique.....	25
3.2.3. Mas Vespelle .....	25
3.2.4. Piézomètre P107 et P102 .....	25
3.2.5. Salses - Combe Française.....	27
3.2.6. Baixas.....	27
3.2.7. Estagel.....	27
3.2.8. Formation Oligocène.....	28
3.3. EVALUATION DE L'IMPACT SUR LES DEBITS DE LA SOURCE DE FONTESTRAMAR .....	29
3.3.1. Rappel des résultats de 2009 .....	29
3.3.2. Analyse des données récentes .....	30
3.4. RELATION ENTRE LE FORAGE ET L'AQUIFERE .....	31
<b>4. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>33</b>
<b>5. Bibliographie.....</b>	<b>35</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage par paliers de débit (12/02/2013). Mesures automatiques et manuelles. ....	12
Illustration 2. Résultats des paliers de débit (12/02/2013). ....	12
Illustration 3. Interprétation de l'essai par paliers de débit (12/02/2013) et comparaison à celui réalisé en 2009. Gain de 35% sur les pertes de charges liées aux puits.....	13
Illustration 4. Evolution des rabattements et du débit durant les essais réalisés en 2013 (paliers et pompage de longue durée). Mesures automatiques et suivis manuels. ....	14
Illustration 5. Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai. ....	15
Illustration 6. Graphe Log-Log des rabattements spécifiques et dérivées logarithmiques en fonction du temps pour les essais de longue durée de 2009 et 2013. Ssp : rabattement spécifique et Ssp' : dérivée logarithmique du rabattement spécifique. ....	16
Illustration 7. Graphe semi-Log. Comparaisons des rabattements spécifiques en fonction du temps pour les essais de longue durée de 2009 et 2013. ....	16
Illustration 8. Représentation des différents régimes d'écoulement (extrait du rapport de 2009, BRGM/RP-57612-FR).....	17
Illustration 9. Modélisation des rabattements au puits de pompage (essais de 2013) ; modèles analytiques de Theis (échelle des temps en arithmétique en haut et semi-logarithmique en bas).....	18
Illustration 10. Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais de 2013. Avec T : transmissivité de l'aquifère ( $m^2/s$ ), S : emmagasinement (-), Dist. limite al. : distance à la limite alimentée (en minutes et en mètres), C : coefficient de pertes de charge quadratiques ( $m^{-5}s^2$ ), Effet Capa. : rayon de l'effet de capacité de puits (m) et r : rayon du forage. *Attention au puits de pompage, l'emmagasinement et donc la distance à la limite sont des paramètres de calage en raison de la forte indétermination sur le rayon effectif de l'ouvrage, d'erreur sur l'estimation des pertes de charge quadratiques et/ou à l'effet d'autres types de pertes de charge liées aux puits. ....	19
Illustration 11. Scénarios de débit. 100, 150, 200, 218 et 250 $m^3/h$ , pompage 24/24h 7/7j pendant un an. ....	20
Illustration 12. Synthèse des scénarios de débit. ....	20
Illustration 13. Caractéristiques des points suivis au cours de l'essai de pompage. ....	22
Illustration 14. Carte de localisation des points suivis. ....	23
Illustration 15. Piézométrie à Roboul CGE sur la période 2008-2013.....	24
Illustration 16. Piézométrie à Roboul CGE lors de la réalisation du forage ROBOL (2009). ....	24
Illustration 17. Chronique de suivi de la piézométrie à Roboul CGE lors des travaux de février 2013. ....	25
Illustration 18. Chronique de suivi du piézomètre P107, période d'octobre 2012 à février 2013 en haut et février 2013 en bas. ....	26
Illustration 19. Chronique de suivi du piézomètre P102, période d'octobre 2012 à février 2013.....	26
Illustration 20. Chronique de suivi du piézomètre Combe Française. ....	27
Illustration 21. Chronique de suivi du piézomètre de Baixas.....	27
Illustration 22. Chronique de suivi du piézomètre d'Estagel.....	28
Illustration 23. Evolution de la piézométrie à Espira-de-l'Agly.....	28
Illustration 24. Evolution de la piézométrie à Ex-Opoul.....	29

Illustration 25. Chronique de débit de Fontestramar. ....	30
Illustration 26. Chronique de conductivité électrique et température de Fontestramar. ....	30
Illustration 27. Chronique de débit de Fontestramar. ....	30
Illustration 28. Chronique de conductivité électrique de Fontestramar. ....	31



# 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 correspond à la poursuite des investigations sur le forage Robol réalisé en 2009 dans le cadre de la démonstration de la ressource (phase III).

A l'issue de cette phase III il a été montré que le forage recoupait un drain secondaire à 420 m de profondeur, drainant une ressource importante mais que le drainage de cette ressource n'était pas optimale notamment du fait des caractéristiques de l'ouvrage (diamètre limité, chambre de pompage pas assez profonde ne permettant pas un rabattement important).

C'est pourquoi, lors de cette phase IV, une acidification localisée au niveau du drain à 420 m a été réalisée afin d'améliorer le drainage du réseau principal. Afin de caractériser le gain de productivité de nouveaux essais de pompage ont ensuite été réalisés les 12 et 13 février 2013. Les résultats de ces travaux doivent permettre d'évaluer l'intérêt d'effectuer un réalésage par rapport aux capacités de l'ouvrage (évaluation de sa productivité) et sa profondeur.

Le présent rapport présente ainsi (i) dans un premier temps l'interprétation de cet essai de pompage, puis (ii) l'évaluation de l'impact en terme de rabattement et diminution des débits sur les sites suivis du système karstique.



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

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

Deux essais de pompage ont été réalisés le 12 et 13 février 2013, afin d'évaluer les propriétés de l'aquifère à proximité du forage et d'étudier la réaction de l'ensemble du système 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 » et le BRGM en a assuré le suivi.

L'essai de pompage dit par paliers de débit (4 paliers de une heure suivi d'une heure de remontée), a permis de déterminer les caractéristiques du puits, et l'essai de pompage de longue durée (24 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 à l'aide de modèles permettant la modélisation du rabattement observé pendant et après le pompage.

Le matériel mis en place pour réaliser le pompage d'essai peut être décrit comme suit :

- une pompe immergée de diamètre 8" de capacité comprise entre 50 et 120 m<sup>3</sup>/h, mise en place au niveau de la chambre de pompage située à 85 m de profondeur,
- un groupe électrogène et un câble électrique d'alimentation,
- une colonne d'exhaure en tubes acier raccordés par brides,
- une conduite souple de 300 m raccordée à la colonne d'exhaure permettant d'évacuer les eaux pompées à l'aval du cours d'eau temporaire du Roboul,
- deux tubes guides en PVC de 85 m de longueur en diamètre 25 mm pour la sonde de niveau autonome et 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,
- une vanne de régulation de débit.

#### 2.1.1. Interprétation de l'essai par paliers de débit

##### *Descriptif*

L'essai par paliers de débit a été réalisé le 12/02/2013. Quatre paliers de pompage d'une heure interrompus par une heure de remontée des niveaux d'eau ont été réalisés. **Le premier a été réalisé à un débit moyen de 53.2 m<sup>3</sup>/h, le second à 73.6 m<sup>3</sup>/h, le troisième à 83.3 m<sup>3</sup>/s et le dernier à 86.0 m<sup>3</sup>/h.** Le niveau statique initial avant essai est situé à 44.59 m de profondeur, soit un niveau typique d'étiage.

Les niveaux d'eau dans l'ouvrage et les débits pompés ont été suivis en continu à l'aide d'enregistreurs, et suivis en manuel afin de vérifier la qualité des données des enregistreurs automatiques (Illustration 1).

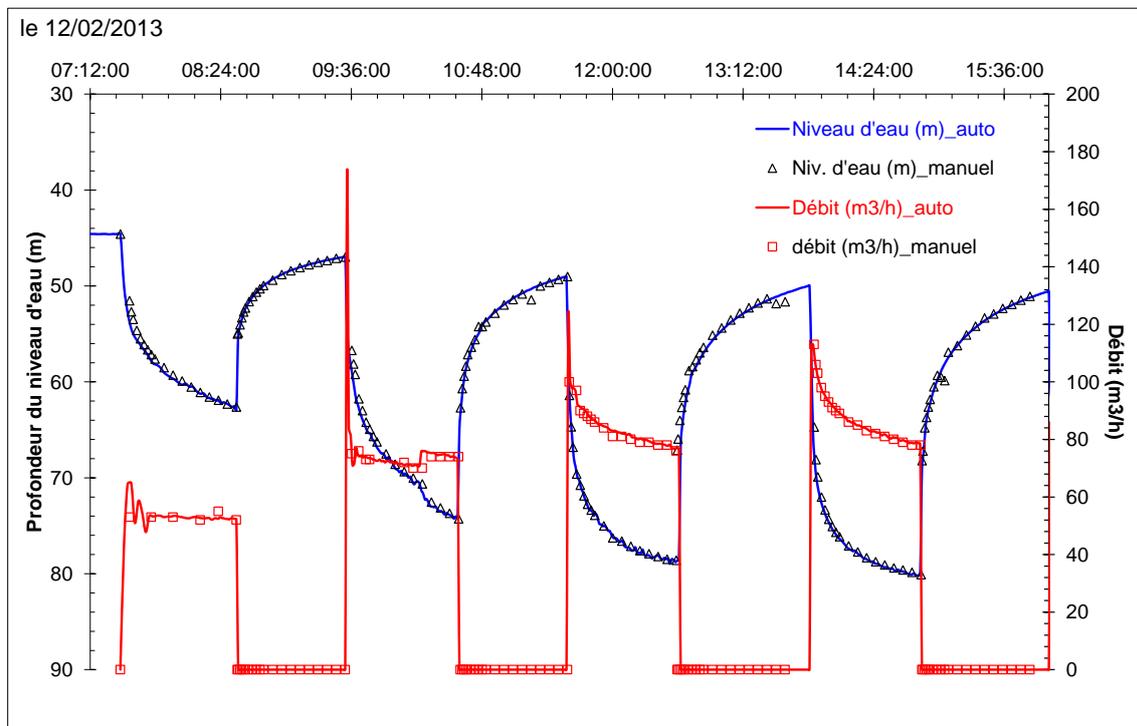


Illustration 1. Evolution de la profondeur du niveau d'eau et du débit pendant l'essai de pompage par paliers de débit (12/02/2013). Mesures automatiques et manuelles.

### Interprétation de l'essai par paliers de débit

Le rabattement ( $s_{total}$ ) mesuré après un certain temps de pompage (ici une heure) correspond à la somme du rabattement au sein de l'aquifère ( $s_{aquifère}$ ) – ce sont des pertes de charge linéaires - et au rabattement induit par l'équipement du forage ( $s_{puits}$ ), ce sont les pertes de charge quadratiques (Jacob, 1947). Ces dernières attestent de la qualité des échanges de flux entre le forage et l'aquifère, ainsi

$$s_{total} = s_{aquifère} + s_{forage} = BQ + CQ^2$$

où B est le coefficient de pertes de charge linéaires ( $m^2s$ ), et C le coefficient de pertes de charges quadratiques ( $m^5s^2$ ). Le tableau Illustration 2 présente les valeurs de débits des quatre paliers et les valeurs de rabattement correspondantes.

	débit (m3/h)	Rabat. à 60 min
Palier 1	53.16	18.37
Palier 2	73.56	29.58
Palier 3	83.3	33.95
Palier 4	86	35.56

Illustration 2. Résultats des paliers de débit (12/02/2013).

L'illustration 3 présente l'interprétation de cet essai et compare les résultats à l'essai par paliers réalisé en 2009. Le coefficient de pertes de charges quadratiques C est d'environ 27 000  $m^{-5}s^2$  soit réduit de 35% par rapport à celui évalué en 2009 (environ 42 000  $(m^{-5}s^2)$ ). Cela signifie que pour un débit de pompage de 200  $m^3/h$  le rabattement lié à l'équipement du puits est réduit d'environ 47 m (129 m en 2009 contre 82 m en 2013).

Le coefficient de pertes de charge linéaires, B, est évalué à environ 900  $m^{-2}s$ , soit quasi identique à celui évalué en 2009.

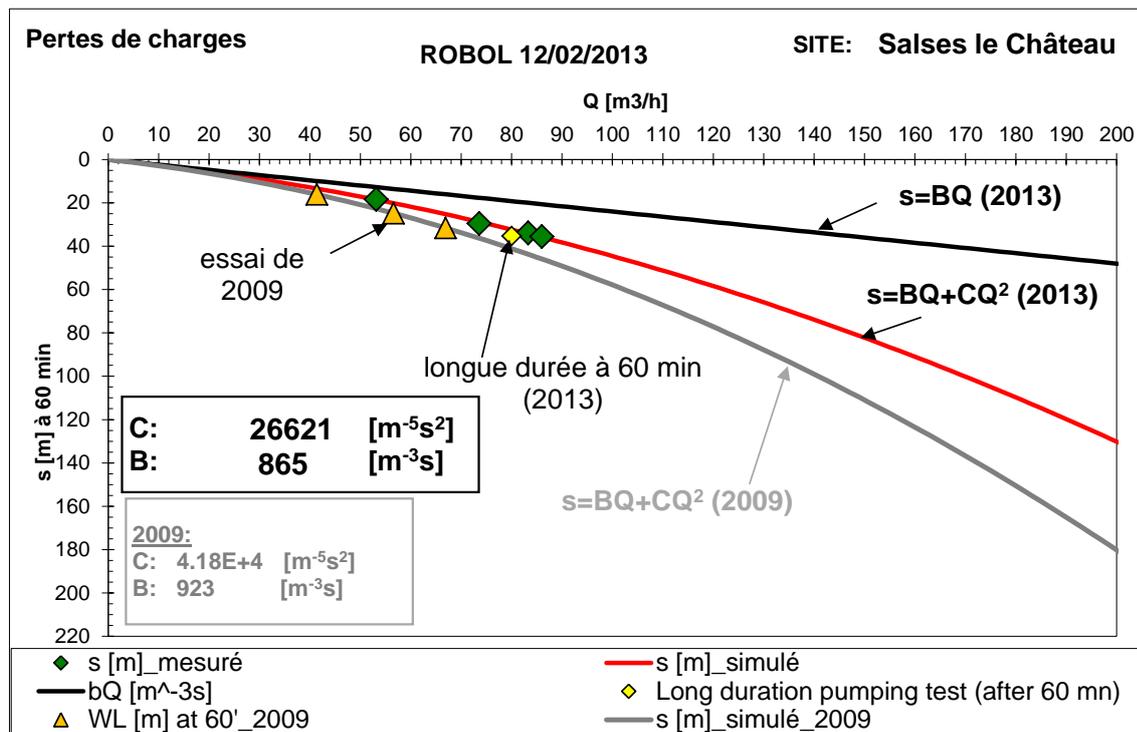


Illustration 3. Interprétation de l'essai par paliers de débit (12/02/2013) et comparaison à celui réalisé en 2009. Gain de 35% sur les pertes de charges liées aux puits.

### 2.1.2. Interprétation de l'essai longue durée

#### Descriptif

Cet essai s'est déroulé du 12 février 16 h au 14 février 8 heure en deux phases :

- phase de pompage du 12 au 13 février d'une durée de 24 heures. Le débit a évolué entre 80 et 65.6  $m^3/h$ . Le débit a du être réduit afin de ne pas dénoyer la pompe située à 84 m de profondeur,
- phase de remontée du 13 au 14 février, sur 16 heures.

L'illustration 4 présente les suivis automatiques et manuels de la profondeur du niveau d'eau et du débit de pompage durant l'ensemble des essais (essai par paliers de débit et pompage de longue durée). Durant l'essai de longue durée, le niveau stabilise rapidement à une profondeur de 81.5 m pour un débit de 65.6  $m^3/h$ , soit un rabattement de 37 m par rapport au niveau statique initial.

Avant modélisation de l'essai et donc simulation des débits d'exploitation, l'essai a été diagnostiqué afin d'une part de le comparer à l'essai de longue durée réalisé en 2009, et d'autre part, afin d'identifier le type d'aquifère testé.

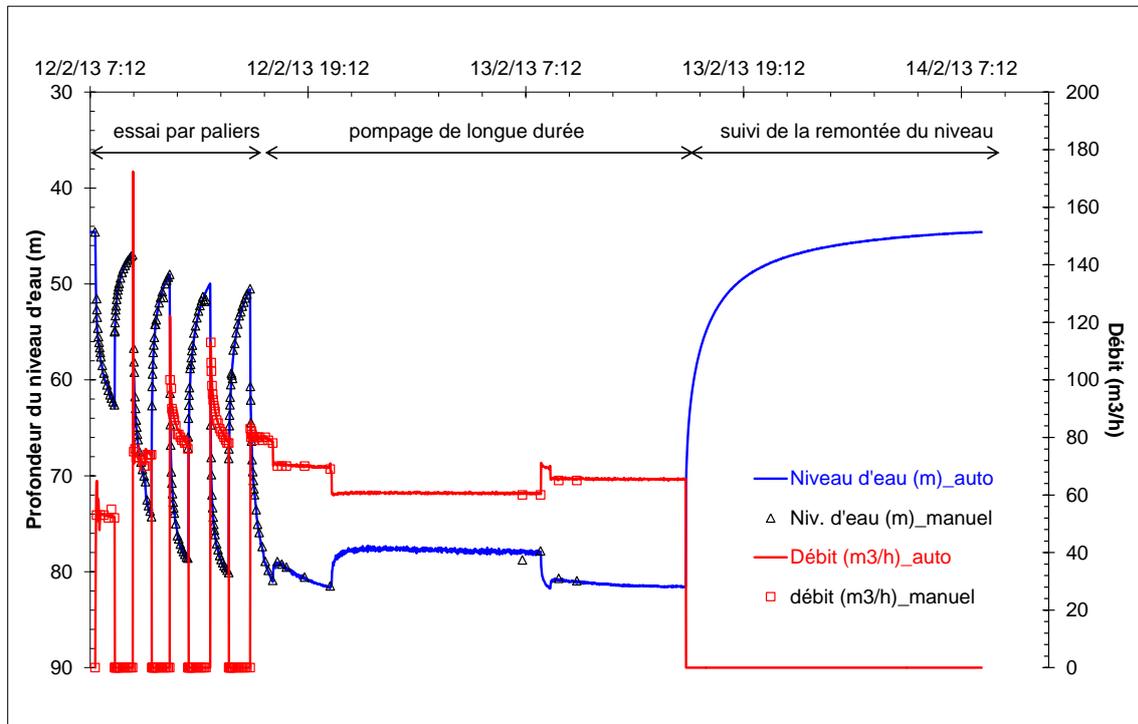


Illustration 4. Evolution des rabattements et du débit durant les essais réalisés en 2013 (paliers et pompage de longue durée). Mesures automatiques et suivis manuels.

### 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 Robol est décrite dans le schéma suivant (Illustration 5).

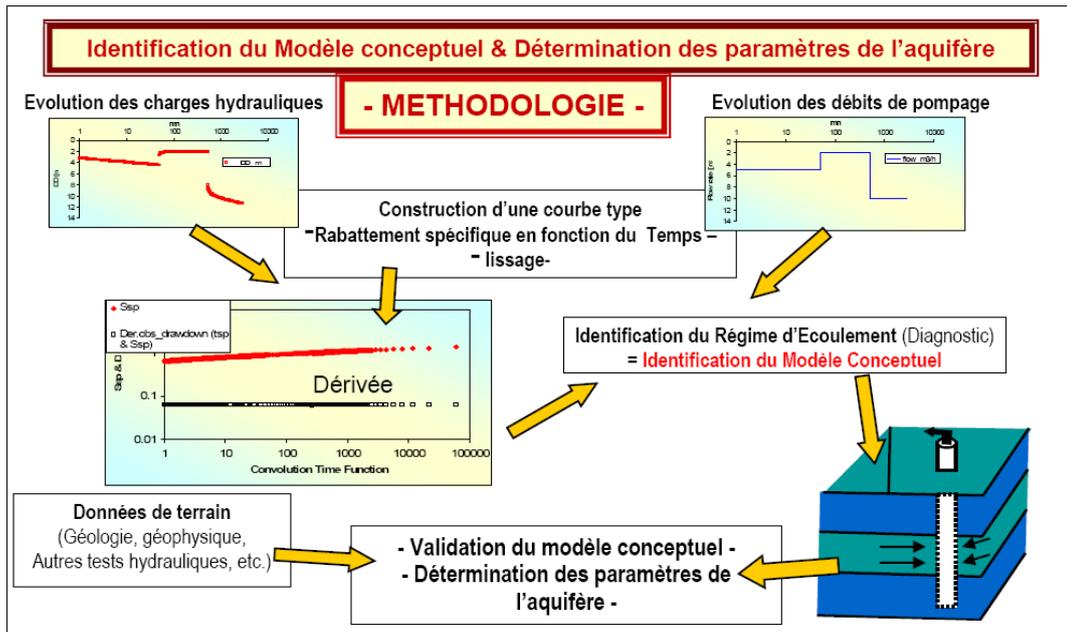


Illustration 5. Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai.

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 ; Spang and Wurster, 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 (Deruyk 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 charges, ...), 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.

### Interprétation des rabattements observés au puits

A partir des rabattements mesurés au puits Robol lors de l'essai de 2013 et des mesures du débit de pompage, le diagnostic montre un résultat très similaire à celui de 2009 à savoir la mise en évidence d'un **drain karstique de dimension notable situé à proximité du puits de pompage**.

Le graphique bi-logarithmique (Illustration 6) présente l'évolution du rabattement spécifique observé dans le puits Robol pendant l'essai de pompage longue durée ainsi que les courbes de dérivée des rabattements spécifiques lors de la descente (pendant le pompage) et de la remontée (après l'arrêt du pompage).

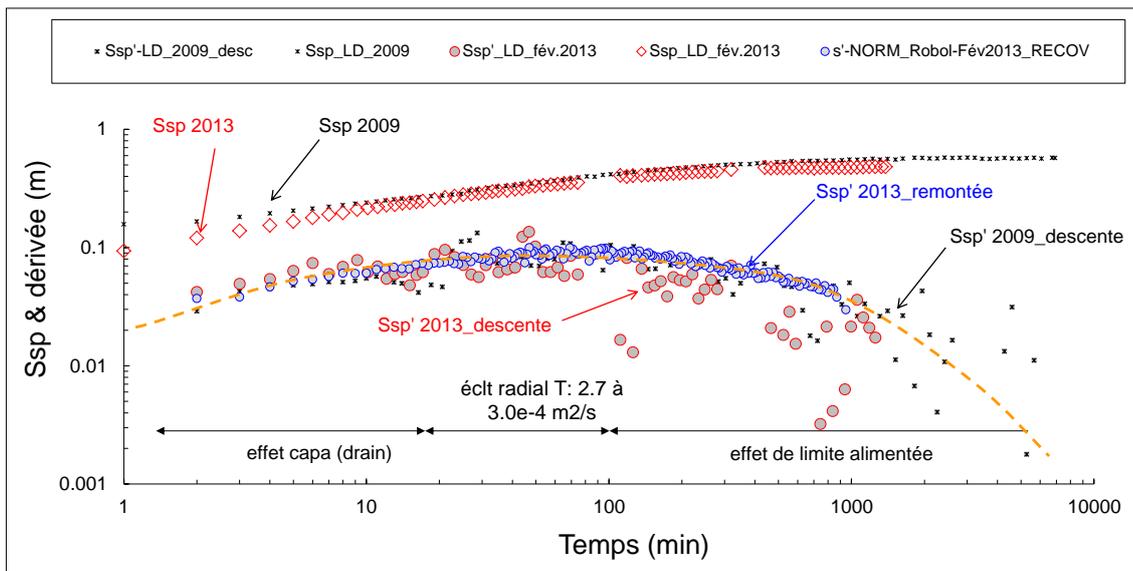


Illustration 6. Graphe Log-Log des rabattements spécifiques et dérivées logarithmiques en fonction du temps pour les essais de longue durée de 2009 et 2013. Ssp : rabattement spécifique et Ssp' : dérivée logarithmique du rabattement spécifique.

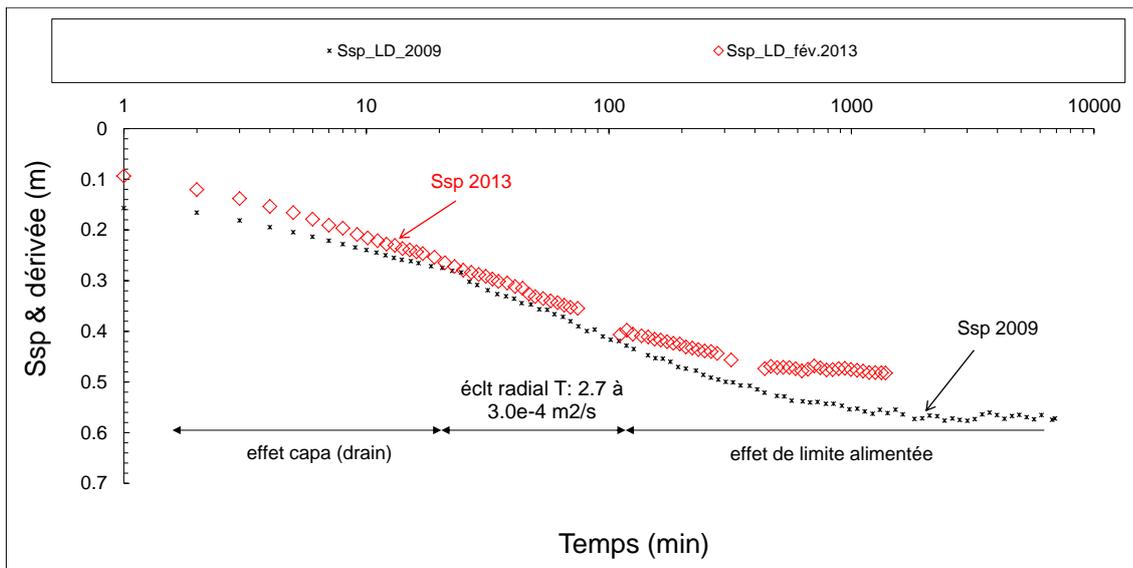


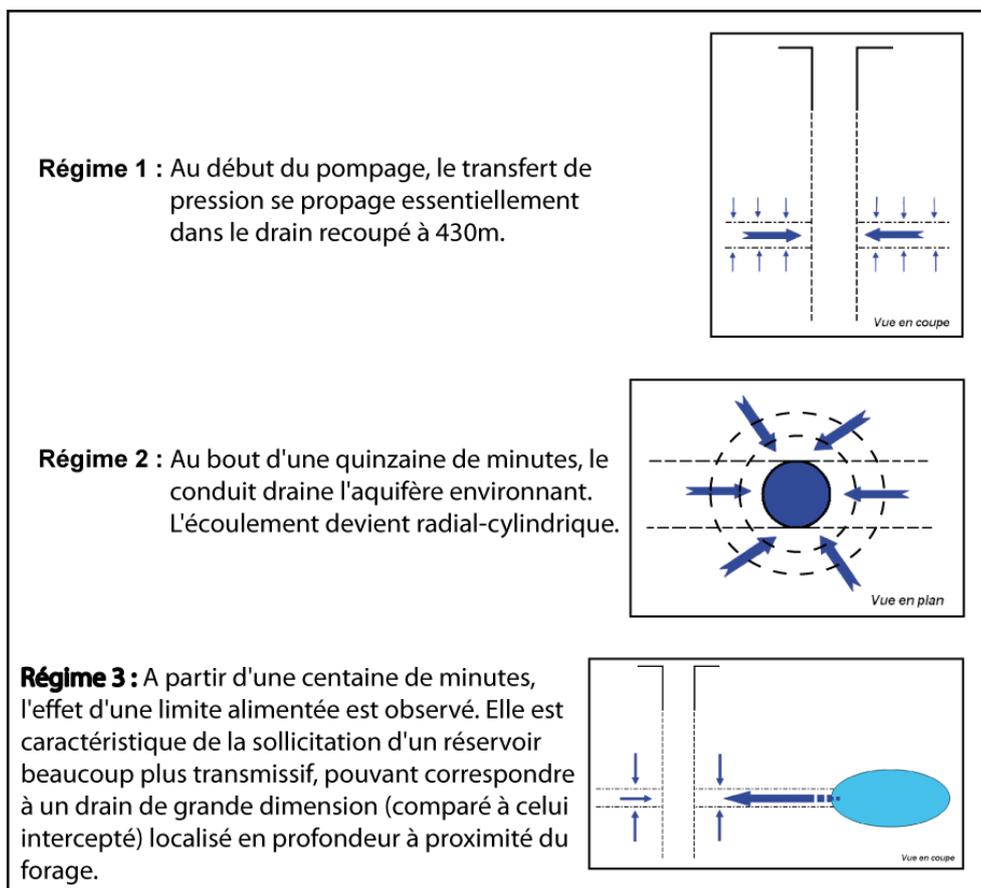
Illustration 7. Graphe semi-Log. Comparaisons des rabattements spécifiques en fonction du temps pour les essais de longue durée de 2009 et 2013.

Que ce soit pour l'essai de 2009 ou de 2013, l'analyse de la courbe de la dérivée (à la descente ou à la remontée) montre distinctement **trois régimes d'écoulement successifs** lors du pompage dans l'aquifère karstique (Illustration 7) :

- 1- de 0 à 15-20 minutes, un régime d'écoulement où la dérivée augmente suivant une faible pente (0,2 - 0,3), ce qui correspond à la réaction du drain intercepté par le forage ;
- 2- de 15-20 à 100 minutes, un régime d'écoulement où la dérivée est constante (droite horizontale dans le graphique semi-logarithmique). Cet écoulement correspond à un écoulement radial cylindrique (aquifère homogène). La transmissivité, T, peut ici être estimée à  $2,7-3,0 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Ceci montre que le drain draine un aquifère de transmissivité T ;
- 3- de 100 minutes à la fin de l'essai : la dérivée diminue (stabilisation des rabattements), ce qui correspond à un phénomène de drainance ou de limite alimentée.

On notera aussi la moindre valeur des rabattements spécifiques en 2013 liée au développement de l'ouvrage (Illustration 7).

L'interprétation de ces trois régimes d'écoulement est présentée dans l'Illustration 8.



*Illustration 8. Représentation des différents régimes d'écoulement (extrait du rapport de 2009, BRGM/RP-57612-FR).*

Le diagnostic a conduit à définir un modèle mathématique adapté à la situation hydrogéologique identifiée : c'est le modèle de Theis (aquifère homogène isotrope) + une limite alimentée qui a été choisie pour modéliser les essais de 2013. Les pertes de charges et effets de capacité de puits sont aussi intégrés à cette modélisation.

L'illustration 9 présente les résultats de la modélisation de l'ensemble des essais (paliers et longue durée), les paramètres hydrodynamiques sont consignés dans le tableau Illustration 10.

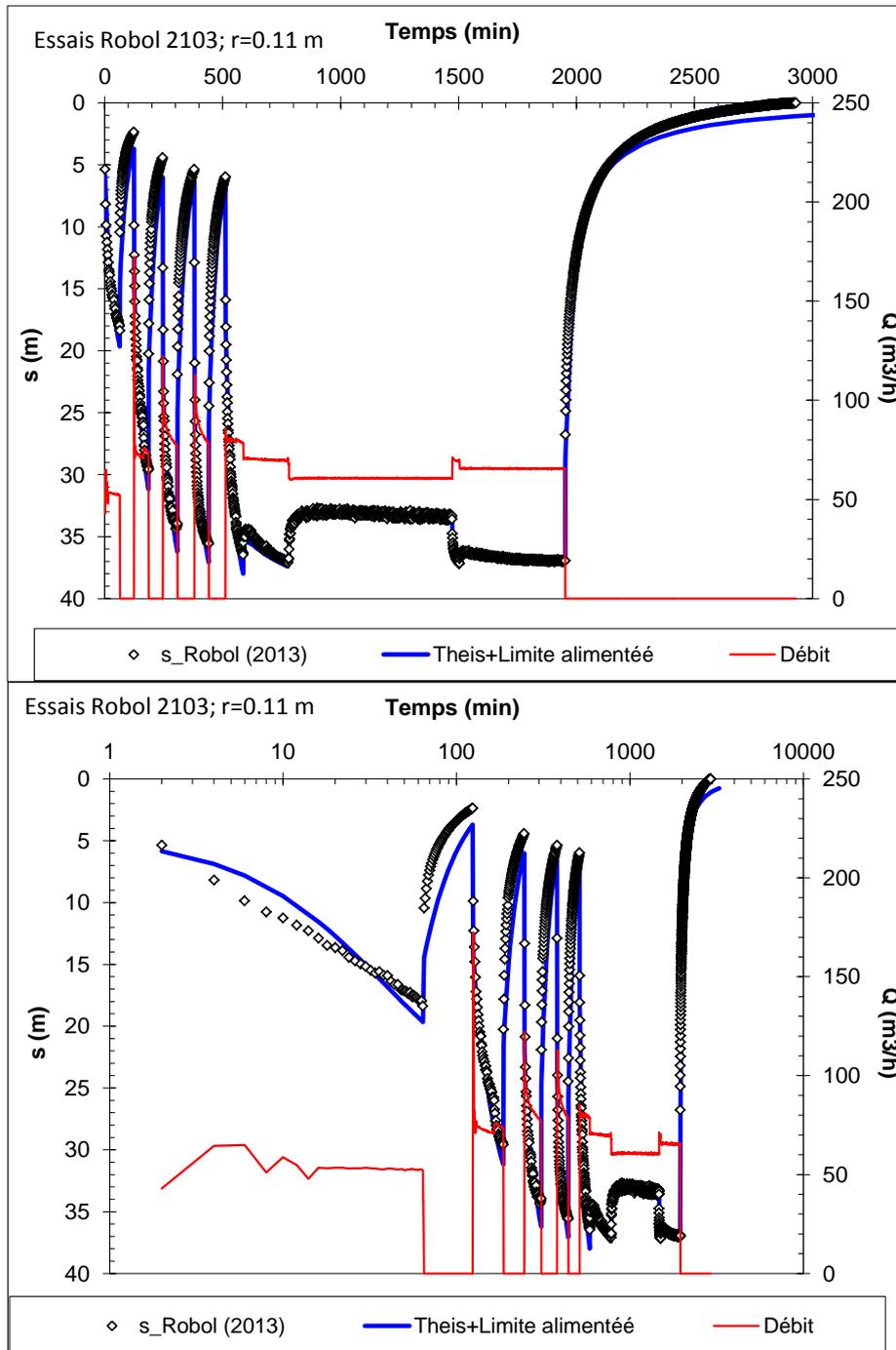


Illustration 9. Modélisation des rabattements au puits de pompage (essais de 2013) ; modèles analytiques de Theis (échelle des temps en arithmétique en haut et semi-logarithmique en bas).

<b>Solution: Theis + limite alimentée</b>			
<b>T</b>	3.16E-04	m <sup>2</sup> /s	
<b>S*</b>	2.45	-	!! Paramètre de calage
<b>Dist. limite al.</b>	95	min	
<b>Dist. limite al.*</b>	1.71	m	!! Paramètre de calage
<b>C</b>	2.16E+04	m <sup>-5</sup> s <sup>2</sup>	
<b>Effet capa.</b>	0.65	m	
<b>r</b>	0.11	m	

*Illustration 10. Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais de 2013. Avec T : transmissivité de l'aquifère (m<sup>2</sup>/s), S : emmagasinement (-), Dist. limite al. : distance à la limite alimentée (en minutes et en mètres), C : coefficient de pertes de charge quadratiques (m<sup>-5</sup>s<sup>2</sup>), Effet Capa. : rayon de l'effet de capacité de puits (m) et r : rayon du forage. \*Attention au puits de pompage, l'emmagasinement et donc la distance à la limite sont des paramètres de calage en raison de la forte indétermination sur le rayon effectif de l'ouvrage, d'erreur sur l'estimation des pertes de charge quadratiques et/ou à l'effet d'autres types de pertes de charge liées aux puits.*

La modélisation des essais est de bonne qualité, la transmissivité de l'aquifère est estimée à 3.2x10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s. Son emmagasinement ne peut pas être estimé puisque la modélisation est faite au puits de pompage; il s'agit donc d'un paramètre de calage. La limite alimentée est atteinte rapidement, au bout de 95 min de pompage, tout comme l'emmagasinement, la distance à cette limite ne peut pas être estimée avec précision. Dans ce cas, la valeur de cette distance est aussi une valeur de calage. A noter aussi la prise en compte d'un effet de capacité de puits relativement important compte tenu du diamètre de l'ouvrage qui peut s'expliquer par la présence des vides karstiques interceptés par l'ouvrage. Le calage du modèle étant satisfaisant vis à vis des données observées, des scénarios de simulation du rabattement pour plusieurs gammes de débit de pompage donnés sont proposés ci-après.

### **Simulation de débits d'exploitation**

A partir des paramètres du modèle précédemment décrit (cf tableau Illustration 10), 5 scénarios de débit - 100, 150, 200, 218 et 250 m<sup>3</sup>/h - ont été testés sur une durée de 365 jours (pompage 24/24h 7/7j ; Illustration 11). Le tableau Illustration 12 présente les principales informations. Ces calculs ont été réalisés avec l'hypothèse selon laquelle les conditions initiales de l'aquifère n'évoluaient pas.

Les essais ont ainsi été réalisés dans un contexte de relatives « hautes eaux » pour le karst dans sa zone d'alimentation par les pertes (soutien des débits de l'Agly notamment par les lâchers du barrage de Caramany). Les résultats sont donc associés au fonctionnement actuel avec une recharge lié au soutien de Caramany. Si la gestion des eaux de surface devait évoluer alors le fonctionnement du système évoluerait, les capacités de l'ouvrage également.

Le comportement de l'ouvrage en contexte de basses eaux (intervenant en fin d'automne lors de l'interruption du soutien des débits et associé à un fonctionnement en perte total au niveau du secteur d'infiltration), n'a pas pu être caractérisé. Les chroniques sur le forage Roboul CGE montrent un tarissement maximal observé à l'automne 2008 avec un niveau 10 m plus bas que celui observé lors des essais de cette année (soit 55 m de profondeur). Afin de caractériser les capacités de l'ouvrage sur ces périodes de « basses eaux », il conviendrait par la suite de réaliser de nouveaux essais pendant cette période.

On remarque que la possibilité d'exploiter cet ouvrage est intimement liée à l'approfondissement de la chambre de pompage et donc au rabattement maximal admissible. Pour ces simulations, on a pris en compte un niveau de nappe bas à 55 m de profondeur (cf. données de suivi de cet ouvrage et du piézomètre Roboul CGE Illustration 15). Les modélisations sont donc plutôt pessimistes.

Dans la mesure où la chambre de pompage serait approfondie jusqu'à environ 250 m de profondeur, un débit d'exploitation aux environs de 215 m<sup>3</sup>/h semble envisageable. Au bout d'un an de pompage, la quantité prélevée devrait se situer aux alentours de 1.9 Mm<sup>3</sup>, et le niveau d'eau vers 240 m de profondeur ce qui laisserait une marge de 10 m de sécurité pour la pompe.

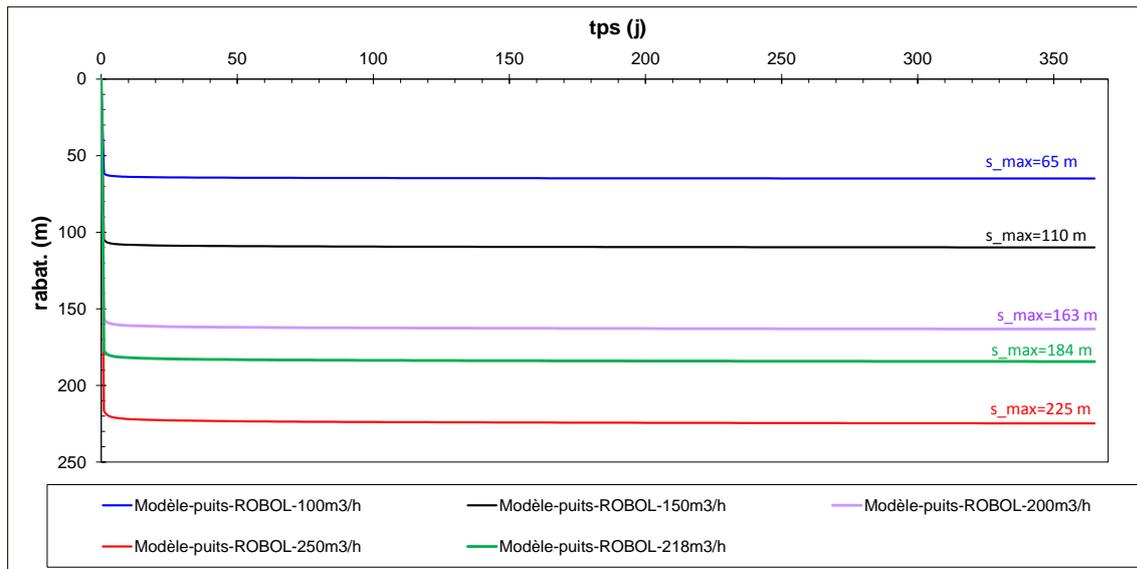


Illustration 11. Scénarios de débit. 100, 150, 200, 218 et 250 m<sup>3</sup>/h, pompage 24/24h 7/7j pendant un an.

débit (m <sup>3</sup> /h)	s_max (à 365j) en m	dont pertes de charges (m)	estimation de la prof. du niveau d'eau au bout de 365 j (m)	Prélèvements sur un an (Mm <sup>3</sup> )
100	64.9	16.7	120	0.88
150	109.9	37.5	165	1.31
200	163.1	66.7	218	1.75
218	184.4	79.2	239	1.91
250	224.8	104.2	280	2.19

Illustration 12. Synthèse des scénarios de débit.

### 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 sur l'état quantitatif des eaux souterraines, 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 Vespeille, Mas de la Chique). Les points du karst concerné sont les suivants, ils sont localisés dans l'illustration 14 :

- piézomètre de Roboul (Réseau CG66, n° BSS 10904X0105/ROBOUL). Cet ouvrage situé à environ 220 m du Forage Robol permet de suivre la charge 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 de caractériser le contexte hydrogéologique au moment des essais de pompage,
- piézomètre d'Estagel (Réseau CG66, n° BSS 10903X0034/PZSTGL). Cet ouvrage permet de suivre la charge piézométrique du karst au niveau des pertes de l'Agly et du Verdoble,
- piézomètre de Baixas (Réseau ONEMA-BRGM, n° BSS 10904X0104/PIEZO). Cet ouvrage permet de suivre la charge piézométrique du karst dans le flan sud du synclinal du Bas-Agry. Les variations piézométriques sont comparables à celles mesurées au forage de Cases de Pène (cf. Rapport BRGM/RP-52920-Fr),
- piézomètre de Salses (Réseau CG66, n° BSS 10795X0070PZCOMB) situé dans la Combe Francaise. Cet ouvrage permet de suivre la charge piézométrique du karst en amont hydraulique des exutoires du système karstique (Sce Fondame et Fontestramar) dans un secteur du karst où les eaux demeurent encore pas ou peu impactées par la minéralisation d'origine saline,
- piézomètre 102 (Réseau ONEMA-BRGM, n° BSS 10795X0028/CARSTE). Cet ouvrage permet de suivre la charge piézométrique du karst au voisinage immédiat de la source de Font Dame,
- piézomètre 107 (Réseau CG66, n° BSS 10795X0033). Cet ouvrage permet de suivre la charge 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 niveaux d'eau de la vasque sont suivis par la DREAL au pas de temps de 5 mn. La conductivité et la température des eaux sont suivies au niveau de la pisciculture (réseau du CG 66),
- forage du Mas de la Chique (n° BSS 10904X0001/F). Cet ouvrage situé à environ 800 m du Forage Robol permettra de suivre l'interférence liée au pompage,
- forage Vespeille, situé à environ 2 km du forage Robol, cet ouvrage permettra de suivre l'interférence lié au pompage.

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 (Illustration 14). Le forage profond de reconnaissance (332 m)

d'Espira a été également équipé d'un enregistreur autonome pour les besoins de cette étude (BRGM/RP-54523-FR). Enfin le forage « Ex-Opoul » a été équipé également d'un enregistreur autonome.

Les caractéristiques de ces points et du suivi sont récapitulés dans l'illustration 13, ils sont localisés Illustration 14.

Dénomination	Indice BSS	Type d'appareil	Pas de temps (minutes)	Piézo.	Temp.	Cond.
Forage ROBOL	1090 4X 0116	CT Diver	1	X	X	X
Roboul CGE	1090 4X 0105	Slimcom + Dipper	2	X	X	X
Fontestramar	1079 5X 0001/S	Slimcom + Conducti	60		X	X
Piézomètre P107	1079 5X 0033	OTT Orpheus mini	60	X		
Font Dame - P102	1079 5X 0028	OTT Orpheus mini	60	X	X	
Salses Combe fr	1079 5X 0070	OTT Orpheus mini	60	X	X	X
Espira de l'Agly	1090 4X 0108-	OTT Orpheus mini	60	X	X	
Baixas	1090 4X 0104	Slimcom + Dipper	60	X	X	
Estagel	1090 3X 0034	Slimcom + Dipper	15	X		
Espira	1090 4X 0108	OTT Orpheus mini	60	X		
Ex Opoul	1090 1X 0137	OTT Orpheus mini	60	X		
Mas de la Chique	1090 4X 0001/F	Suivi ponctuel	-	X		
Mas Vespelle	-	Suivi ponctuel	-	X		
Mas Passe Temps	-	Suivi ponctuel	-	X		

*Illustration 13. Caractéristiques des points suivis au cours de l'essai de pompage.*

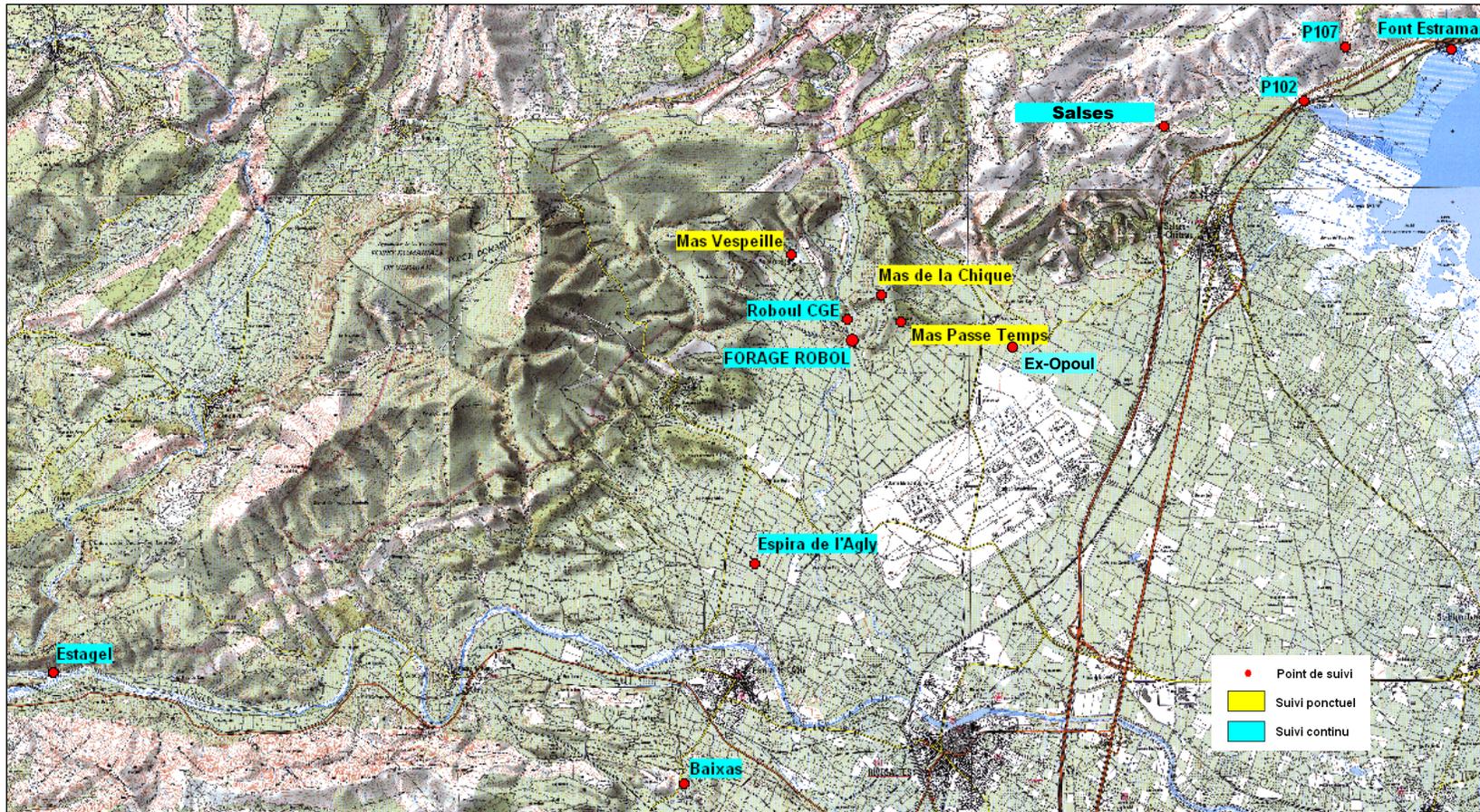


Illustration 14. Carte de localisation des points suivis.

### 3.2. EVALUATION DE L'IMPACT SUR LA PIEZOMETRIE

A l'issue de l'essai de pompage longue durée réalisé en 2009 sur 5 jours de pompage au débit de 50 m<sup>3</sup>/h, des rabattements ont été observés uniquement à proximité de l'ouvrage (Roboul CGE, Mas de la Chique). L'ensemble des autres points n'a 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 (du 5 au 8 février) et de pompage (12 et 13 février) 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 de celui-ci. Il permet d'appréhender l'état de l'aquifère selon la période de l'année. L'illustration 15 montre ainsi que les travaux réalisés en février 2013 s'inscrivent dans une période de tarissement non influencée par des précipitations. Le niveau est à 45 m de profondeur, comparable à celui observé lors des investigations de 2009. Le niveau d'étiage moyen est environ 5 m plus bas, à 50 m de profondeur.

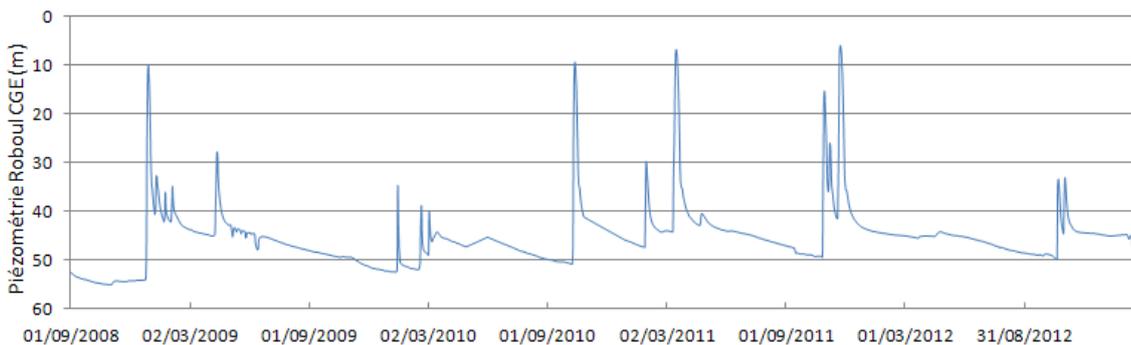


Illustration 15. Piézométrie à Roboul CGE sur la période 2008-2013.

En 2009, ce piézomètre a réagi (Illustration 16) pendant les essais de pompage et également lors des phases de développement du forage (acidification, soufflage). Lors du développement du forage, le niveau d'eau sur le piézomètre Roboul CGE est descendu au maximum de près de 3 m. Lors de l'essai longue durée (5 jours à un débit d'environ 50 m<sup>3</sup>/h), le niveau a chuté de plus de 3 m.

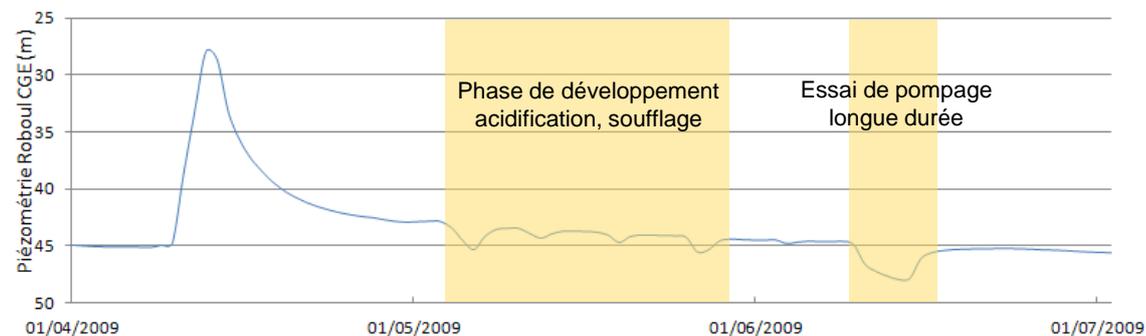


Illustration 16. Piézométrie à Roboul CGE lors de la réalisation du forage ROBOL (2009).

Lors des travaux réalisés en février 2013, le même type d'impact a été observé avec un rabattement d'environ 70 cm lors du développement de l'ouvrage et de 2 m lors des essais de pompage.

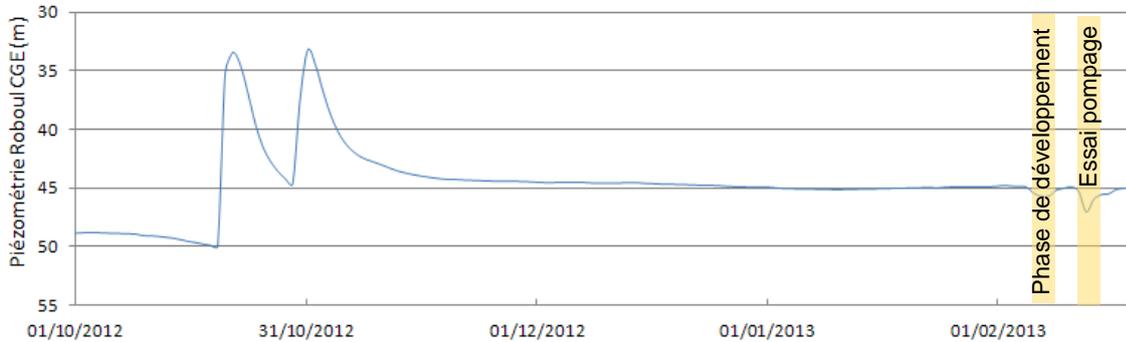


Illustration 17. Chronique de suivi de la piézométrie à Roboul CGE lors des travaux de février 2013.

### 3.2.2. Mas de la Chique

Le 12 février avant les essais de pompage le niveau était à 81,52 m. Le 13 février à la fin de l'essai de pompage longue durée le niveau était à 81,69 m soit 17 cm plus bas qu'avant la réalisation des essais de pompage. Ces essais ont ainsi induit un rabattement de 17 cm. A titre de comparaison, les rabattements observés sur ce forage lors de son exploitation sont de 15 à 20 m.

### 3.2.3. Mas Vespeille

Le 12 février avant les essais de pompage le niveau était à 49,50 m. Le 13 février à la fin de l'essai de pompage longue durée le niveau était à 49,60 m. Le pompage a ainsi engendré un rabattement de l'ordre de 10 cm.

### 3.2.4. Piézomètre P107 et P102

Les piézomètres situés à proximité de l'exutoire du système, P102 et P107 ont un comportement proche. Ils ont enregistré suite aux crues de l'automne 2012 une augmentation des niveaux suivis d'un tarissement associé à des niveaux stables depuis le mois de novembre 2012. Aucune fluctuation significative des niveaux n'a été observée durant la période des travaux sur le forage Robol (Illustration 18 et Illustration 19). Les interventions réalisées à Robol en février 2013 n'ont donc pas impacté la ressource.

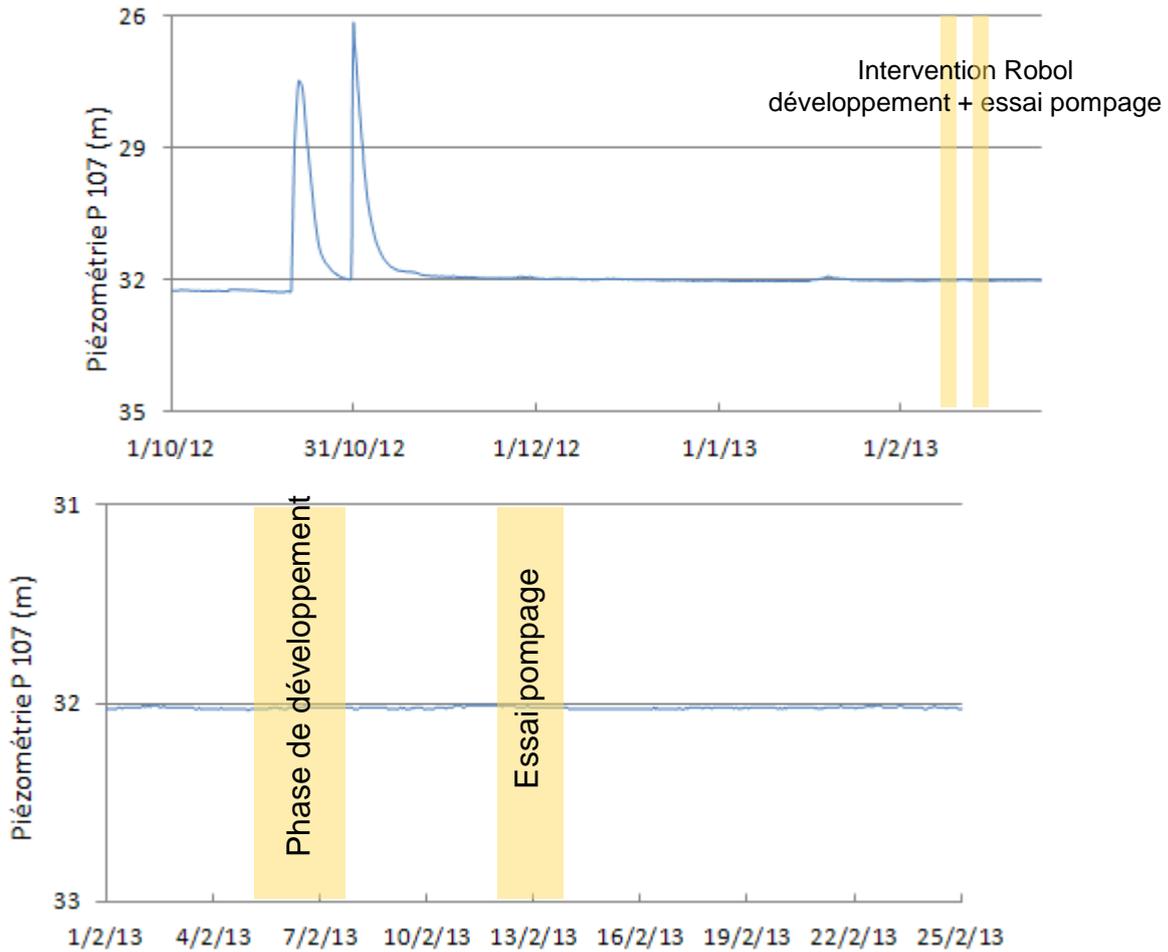


Illustration 18. Chronique de suivi du piézomètre P107, période d'octobre 2012 à février 2013 en haut et février 2013 en bas.

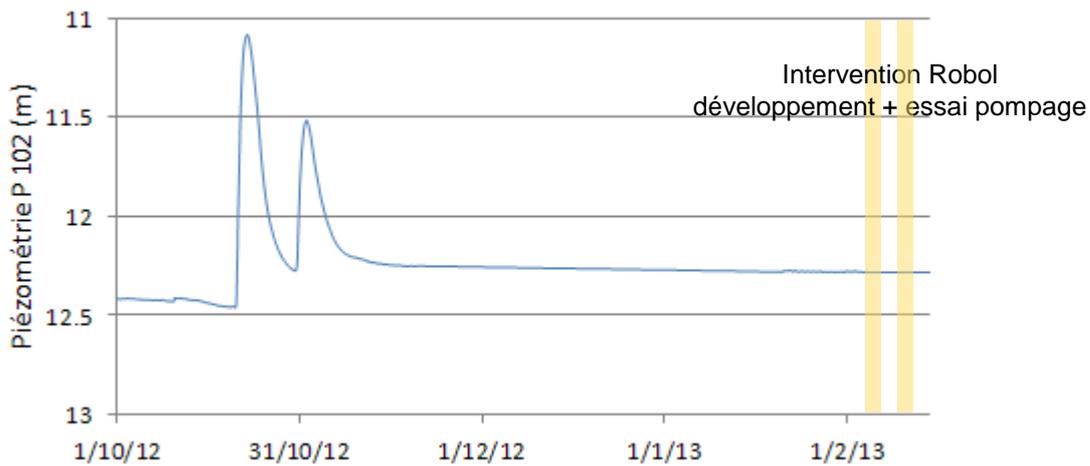


Illustration 19. Chronique de suivi du piézomètre P102, période d'octobre 2012 à février 2013.

### 3.2.5. Salses - Combe Française

Comme pour les points précédents, l'ouvrage Combe Française observe des niveaux relativement stables suite aux crues de fin 2012 (Illustration 20). Il n'y a pas non plus de fluctuation significative au moment des travaux sur Robol.

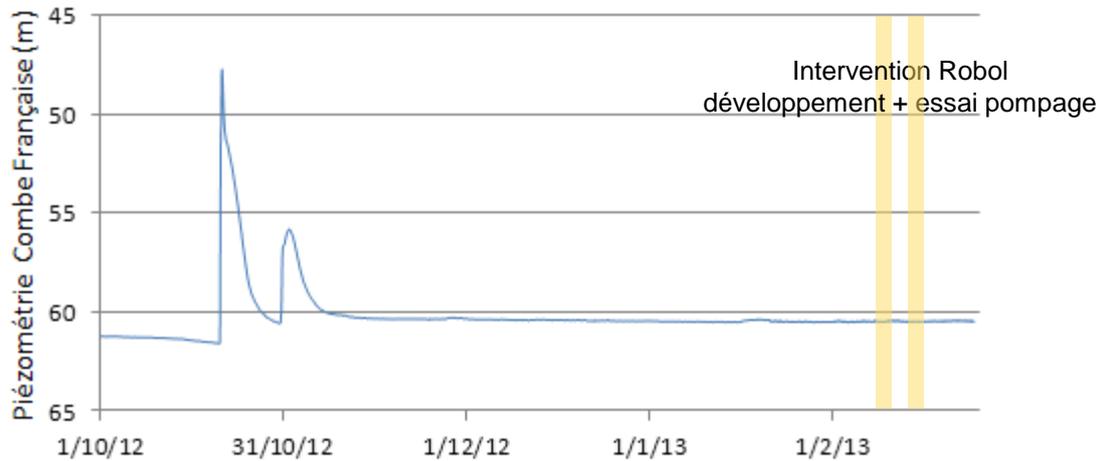


Illustration 20. Chronique de suivi du piézomètre Combe Française.

### 3.2.6. Baixas

Le piézomètre de Baixas, situé au Sud-Ouest du forage Robol, sur le flanc Sud du synclinal, a lui aussi enregistré une baisse du niveau d'eau suite aux crues de fin 2012. Au cours du mois de février 2013, les niveaux étaient stables (Illustration 21) n'indiquant pas d'influence potentielle par l'ouvrage Robol.

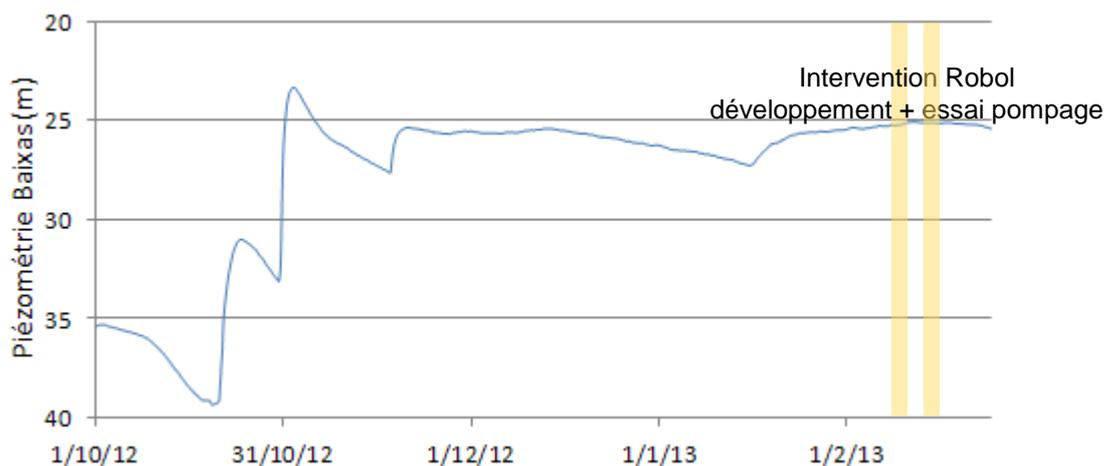


Illustration 21. Chronique de suivi du piézomètre de Baixas.

### 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 la fin de l'année 2012 (Illustration 22). Il n'y a pas de fluctuation particulière sur la période des travaux à Robol, les interventions ne semblent donc pas avoir affecté ce secteur.

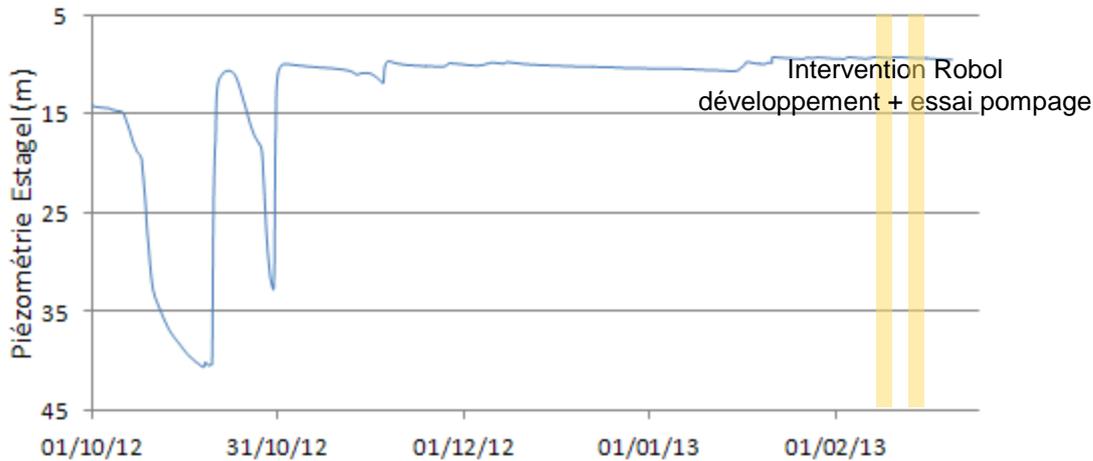


Illustration 22. Chronique de suivi du piézomètre d'Estagel.

### 3.2.8. Formation Oligocène

Un suivi ponctuel a été réalisé au Mas Passe Temps avant et après les travaux. Le 24 janvier le niveau était à 9,66 m de profondeur et le 13 février le niveau a atteint 10 m de profondeur. Cette diminution de 34 cm sur 3 semaines correspond au tarissement sur le secteur. Les essais de pompage n'ont pas impactés cet ouvrage.

Les forages d'Espira et d'Ex-Opoul ont également été suivis depuis le 18 janvier 2013 pour les besoins de l'étude.

A Espira, sur la période de suivi, les niveaux ont évolué entre 29,6 et 29,8 m de profondeur (Illustration 23). Aussi les chroniques présentées ne semblent pas montrer de lien entre les périodes d'interventions et les variations du niveau.

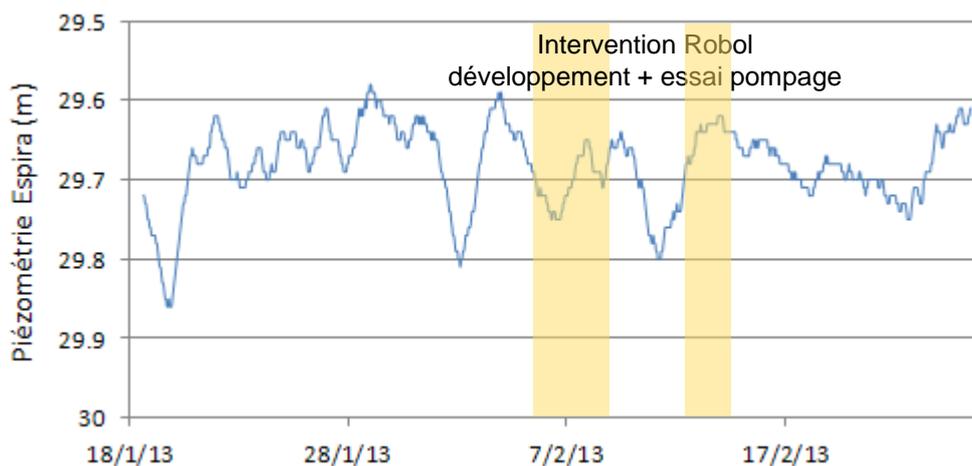


Illustration 23. Evolution de la piézométrie à Espira-de-l'Agly.

Une évolution comparable des niveaux est observée sur le piézomètre Ex Opoul (Illustration 24). Sur ce point il ne semble pas non plus que les travaux sur le forage Robol aient eu un impact.

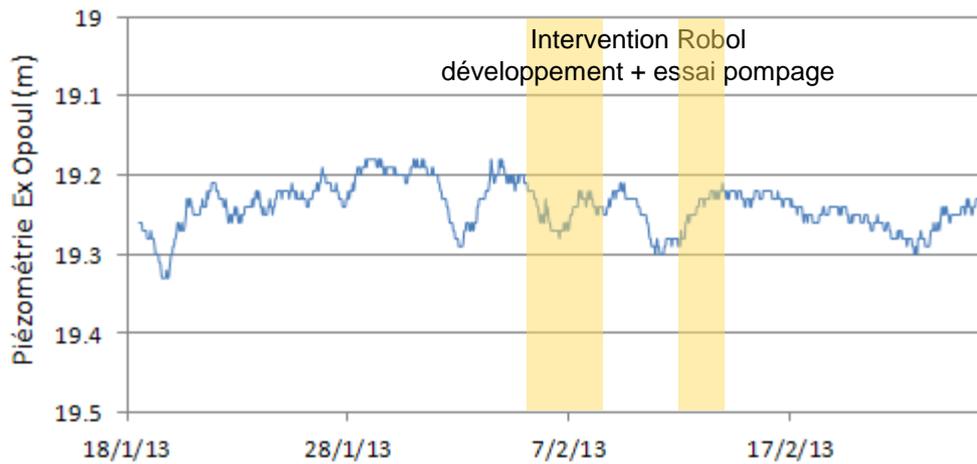


Illustration 24. Evolution de la piézométrie à Ex-Opoul.

Les travaux sur le forage Robol n'ont donc pas eu d'impact significatif sur les formations oligocènes situées à proximité.

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

#### 3.3.1. Rappel des résultats de 2009

Le niveau à la source est mesuré en continu par la DDTM de l'Aude, les données sont bancarisées sous la banque hydro. En contrebas de la source de Fontestramar, un suivi de conductivité et de température est en place au niveau de la pisciculture ExtraMer (suivi réalisé par le BRGM dans le cadre du réseau CG66). Les chroniques de ce suivi (Illustration 25 et Illustration 26) montrent que les investigations sur le forage Robol réalisées en 2009 n'ont pas modifié l'évolution des paramètres suivis à Fontestramar. En effet, la piézométrie subit une décroissance régulière sur la période d'étiage, à l'inverse la température et la conductivité subissent une augmentation saisonnière régulière qui, au regard des chroniques disponibles sur les cinq dernières années ne semble pas être différente au cours de la période des essais de pompage réalisés.

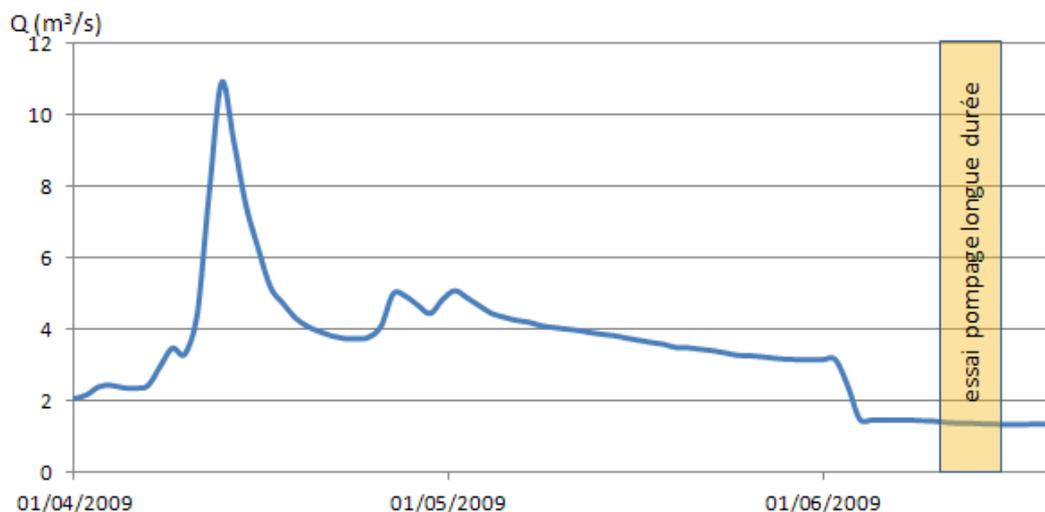


Illustration 25. Chronique de débit de Fontestramar.

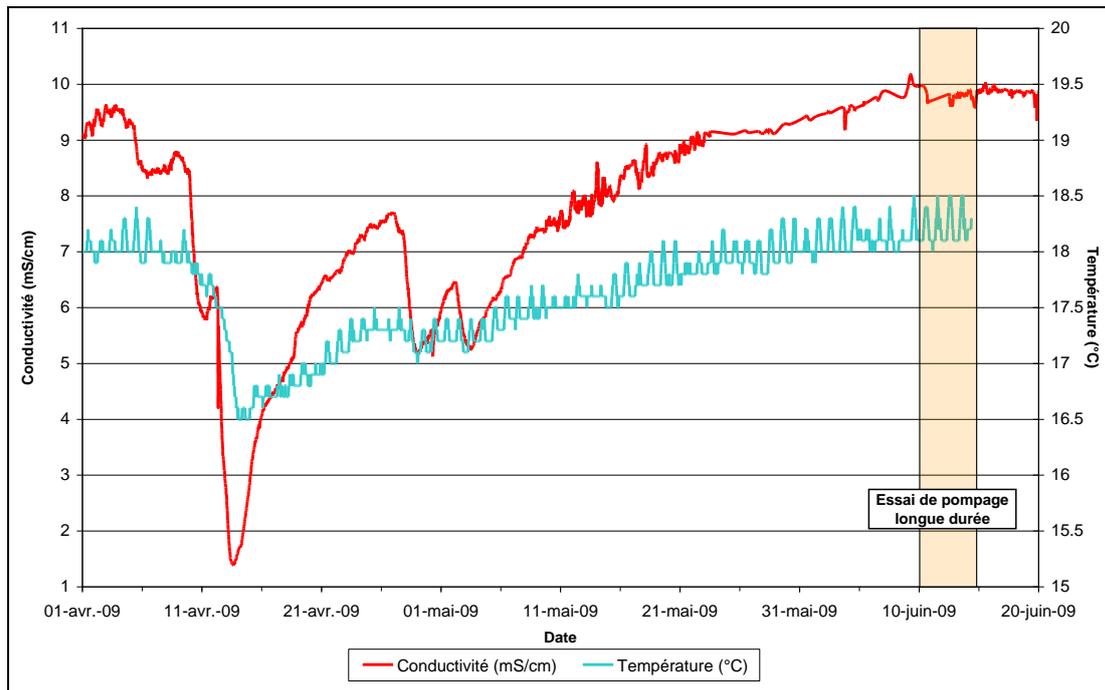


Illustration 26. Chronique de conductivité électrique et température de Fontestramar.

### 3.3.2. Analyse des données récentes

Le dernier essai du 12-13 février 2013 sur 1 journée dans des conditions hydrologiques comparables avec un débit du même ordre de grandeur que l'essai sur 5 jours (70 m<sup>3</sup>/h au lieu de 50 m<sup>3</sup>/h) n'ont donc pas pu impacter les débits.

Cependant nous observons bien une diminution du débit ce jour-là sur le site de prévision des crues (Illustration 27). Le 12 février vers 15 h le débit a chuté brusquement d'environ 200 l/s. Une telle chute des débits ne peut pas être associée à l'essai de pompage réalisé à un débit de 70 m<sup>3</sup>/h ou 20 l/s. Il y a en effet un facteur 10 entre ces 2 valeurs.

Ensuite le 13 février vers 10 h le débit est remonté de 150 l/s. L'essai de pompage longue durée se poursuivait alors sur le site de Robol pendant encore 6 h.

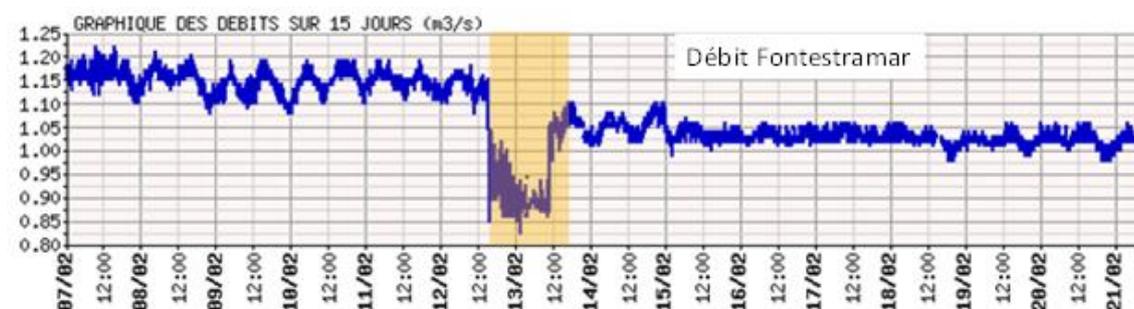


Illustration 27. Chronique de débit de Fontestramar.

Notons que ces données n'ont pas été validées par le producteur (DDTM Aude) et doivent donc être prises en compte avec précaution. La validation devrait être réalisée début mars 2013. Une nouvelle analyse de ces données sera alors réalisée.

En parallèle, la courbe de conductivité électrique (Illustration 28) met en évidence un fonctionnement particulier sur cette journée avec une chute forte de la conductivité du 12 février à 12h au 13 février à 4h.

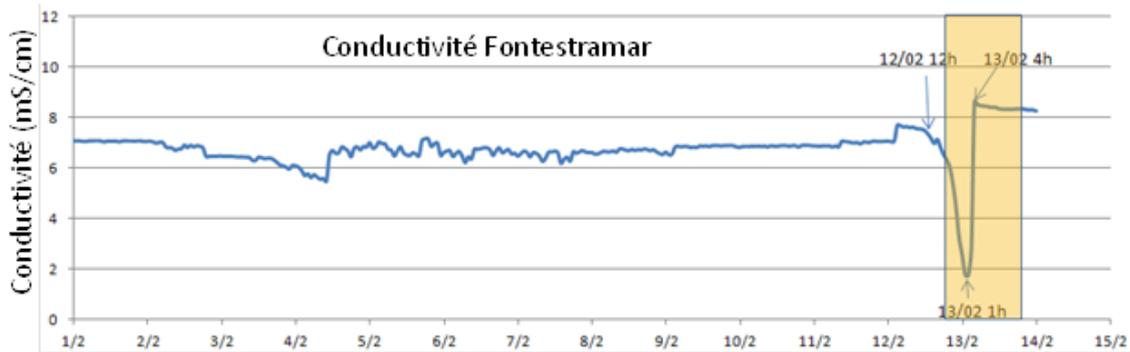


Illustration 28. Chronique de conductivité électrique de Fontestramar.

A l'évidence un fonctionnement lié à une intervention humaine a eu lieu le 12-13 février, sans que cette dernière ne soit liée à l'essai de pompage à 70 m<sup>3</sup>/h d'une journée. Remarquons également que les périodes influencées sur les chroniques de Fontestramar ne sont pas concomitantes avec l'essai de pompage (surligné en orange sur les graphiques), élément complémentaire pour réfuter l'influence des essais sur le fonctionnement naturel de la source.

### 3.4. RELATION ENTRE LE FORAGE ET L'AQUIFERE

Parmi les piézomètres situés sur l'aquifère karstique et suivis pendant les périodes de développement de l'ouvrage et les essais de pompage, seul le piézomètre Roboul CGE situé à proximité du forage (220 m) a réagi significativement. Les niveaux piézométriques du forage du Mas de la Chique (800 m) et du Mas Vespeille (2 km) ont également réagi mais dans une moindre mesure (rabattement de quelques centimètres). Les essais hydrauliques ont donc eu un impact à l'échelle locale et non régionale.

Par ailleurs seul un pompage longue durée (plusieurs semaines / mois) permettra d'évaluer l'impact des prélèvements du forage sur les niveaux de l'aquifère et les débits des exutoires.

Une évaluation de l'impact sur la ressource est ainsi proposée au niveau des débits de Fontestramar. Cette source est caractérisée par un débit moyen d'environ 2 m<sup>3</sup>/s et un débit d'étiage moyen de 1 m<sup>3</sup>/s. Dans le cas d'une exploitation de l'ouvrage Robol à un débit de 200 m<sup>3</sup>/h, soit 55 l/s, le prélèvement impactera alors au maximum le débit de cette source de 3 %. Lors des périodes d'étiages la réduction maximale des débits sera de 5 %.



## 4. Conclusion et perspectives

Les travaux complémentaires (acidification, soufflage) réalisées sur le forage Robol en février 2013 ont permis d'améliorer les potentialités de l'ouvrage de manière très significative (gain de 35% sur la productivité du puits). La réalisation des essais de pompage et leur interprétation a permis de caractériser le gain de productivité de l'ouvrage, mais aussi de proposer des scénarios d'exploitation de cette ressource.

Ainsi un débit d'exploitation de 215 m<sup>3</sup>/h 24/24h et 7/7j est tout à fait envisageable dans la mesure où la chambre de pompage de cet ouvrage est abaissée à 250 m de profondeur. Ceci impliquant alors un réalésage jusqu'à 250 m. Dans ces conditions, le prélèvement annuel devrait se situer aux alentours de 1.9 Mm<sup>3</sup>, et le niveau d'eau vers 240 m de profondeur ce qui laisserait une marge de 10 m de sécurité pour la pompe.

Cependant, les derniers essais par soufflage (2 heures de soufflage avec un débit au soufflage supérieur à 200 m<sup>3</sup>/h), réalisés post-essais par pompage ont encore montré une eau très turbide suggérant que l'ouvrage a continué à se développer. Il est donc probable qu'aujourd'hui le forage est encore plus productif que pendant les derniers essais, et que les simulations réalisées soient pessimistes.

Concernant l'impact sur la ressource seuls les ouvrages situés à proximité du forage ont subi des rabattements lors de l'essai. D'après l'analyse des piézomètres situés sur le karst des Corbières, il n'y a pas eu d'incidence au niveau régional.

Une évaluation de l'impact sur la ressource est ainsi proposée pour la source de Fontestramar. Cette source est caractérisée par un débit moyen d'environ 2 m<sup>3</sup>/s et un débit d'étiage moyen de 1 m<sup>3</sup>/s. Dans le cas d'une exploitation de l'ouvrage Robol à un débit de 200 m<sup>3</sup>/h, soit 60 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 %.

Par ailleurs seul un pompage de longue durée (plusieurs semaines / mois) permettra d'évaluer l'impact des prélèvements du forage sur les niveaux de l'aquifère et les débits des exutoires.



## 5. Bibliographie

**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.

**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.

**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 Verdoube. BRGM RP-52921-FR, 109p., 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.

**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 J.L. Izac, J. Cubizolles, C. Du Couëdic, B. Aunay, P. Thomson (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.

**Nind T.E.W., 1965.** Influences of absolute and partial hydrologic barriers on pump test results. Can.J. Earth Sci. 2, 309-323.

**Schlumberger.** 2002. Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

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

**Streltsova, T.D., 1988.** Well testing in heterogeneous formations. Exxon Monograph, John Wiley & Sons, Inc. p. 413.

**Theis, C.V.**, 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Am. Geoph. Union*, 16, 519-524.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

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

**Service EAU**  
**Unité RMD**  
1039 rue de Pinville  
34000 Montpellier - France  
Tél. : 04 67 15 79 80