Identification et préservation des ressources majeures en eau souterraine pour l'alimentation en eau potable

Pays d'Aubagne et de l'Etoile

Investigations complémentaires

Diagnostic et évaluation de la productivité du forage Puyricard n°2 à Cuges-les-Pins (13)

Février 2019
Rapport n° 97193 /A

140 Avenue du Millet
ZI Les Paluds
13400 AUBAGNE

Région Sud
Pôle Eau
Parc Napollon – 400, avenue du Passe-temps – Bât. C
13676 Aubagne Cedex
Tél. : 04.42.08.70.70 - Fax : 04.42.08.70.71

Sommaire

Pages

1. INTRODUCTION 4

1.1. CONTEXTE GENERAL DES INVESTIGATIONS 4
1.2. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE 4

2. SOURCES D'INFORMATIONS 5

3. RAPPEL DU CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL 6

3.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE 6
3.2. SITUATION ADMINISTRATIVE DU CAPTAGE 6
3.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE 8
3.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE 9

4. REALISATION DE RECONNAISSANCES GEOLOGIQUES DU SECTEUR DE PUYRICARD 11

4.1. CADRE REGIONAL 11
4.2. LE SECTEUR DU CAPTAGE DE PUYRICARD 12
4.2.1. Le synclinal du Beausset 12
4.2.2. La plaine de Cuges-les-Pins 14
4.2.3. Cartographie de terrain – fracture et pendage : 14

5. COMPTE RENDU DES POMPAGES D'ESSAIS 17

5.1. RAPPEL DU PROGRAMME D'ESSAI 17
5.2. DEROULEMENT DES OPERATIONS 17
5.3. INSPECTION CAMERA 17
5.4. REALISATION DES POMPAGES D'ESSAIS 18
5.4.1. Contraintes de réalisation des pompages 18
5.4.2. Pompages par paliers sur le forage Puyricard F2 19
5.4.1. Pompage longue durée sur le forage Puyricard F2 23
5.5. PRESCRIPTIONS PARTICULIERES DE GESTION DE PUYRICARD 29

6. CONCLUSIONS 30

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du champ captant (fond : IGN au 1/25 000) 6
Figure 2 : Plan de localisation de l'ouvrage (fond : vue aérienne - Géoportail) 7
Figure 5 : Périmètres de protection des ouvrages de Cuges-les-Pins (source : ARS) 8
Figure 3 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 (source : BRGM) 9
Figure 4 : Localisation des embuts sur Cuges-les-Pins (source : BSS) 10
Figure 6 : Schéma structural de la Provence (F. Demory et al.) 11
Figure 7 : Schéma structural régional (d'après Tassy 2012) 12
Figure 8 : Coupe N-S du synclinal du Beausset (d'après Floquet, 2015) 13
Figure 9 : Carte des principales fractures (fond satellite) 14
Figure 10 : Carte des principales fractures (fond carte géologique) 15
Figure 11 : Bloc diagramme représentant un stade de la tectogénèse de la Sainte Baume (Guieu) 15
Figure 12 : Coupe structurale Nord-Sud de Puyricard 16
Figure 13 : Evolution des niveaux d'eau lors du pompage par paliers sur le forage Puyricard F2 20
Figure 14 : Courbe caractéristique du forage Puyricard F2 21
Figure 15 : Evolution du niveau d'eau du forage Puyricard F2 lors du pompage de longue durée 24
Figure 16 : Evolution du niveau d'eau de la nappe entre 2004 et 2011 27
Figure 17 : Evolution du niveau d'eau de la nappe entre février 2017 et octobre 2018 (source : SPL L'Eau des Collines) 28

Liste des tableaux

Tableau 1 : Déroulement des essais 17
Tableau 2 : Nivellement des forages 18
Tableau 3 : Résultats du pompage par paliers 21
Tableau 4 : Débit d'alimentation calculé avec la méthode des pentes 26
Tableau 5 : Propositions d'amélioration 29

Liste des annexes

Annexe A : Coupes techniques des forages Puyricard n°1 et n°2 de 1991
Annexe B : Coupe technique et équipement d'exploitation du forage Puyricard n°2
Annexe C : Interprétation du pompage longue durée (logiciel OUAIP)

1. Introduction

1.1. Contexte général des investigations

La Société Publique Locale L'Eau des Collines assure la gestion de l'eau potable des communes d'Aubagne, la Penne-sur-Huveaune et Cuges-les-Pins.

L'alimentation en eau potable de la commune de Cuges-les-Pins provient uniquement des ressources en eau souterraines.

Dans le cadre de l'étude stratégique actuellement réalisée par Antea Group, le site du Puyricard a été identifié en zone de sauvegarde exploitée sur laquelle une évaluation de la productivité du forage permettrait de mieux caractériser la ressource

A noter que le laboratoire du CEREGE de l'Université d'Aix-Marseille porte une étude d'ampleur sur la compréhension hydrogéologique de l'Huveaune et des massifs calcaires aux alentours. Ces investigations ont donc été également suivies par l'université.

1.2. Objectifs et méthodologie

La SPL L'Eau des Collines souhaite connaître l'état et les réserves de potentialité du forage exploité de Puyricard n°2. L'objectif à terme étant d'optimiser ou d'augmenter les prélèvements de l'eau potable pour la commune.

Pour répondre à ces objectifs, un programme d'investigation a été défini dans le cadre de l'étude bibliographique préliminaire de juillet 2018 (rapport Antea Group n°94208). Le protocole portait sur la réalisation d'une inspection vidéo du forage et de pompages d'essais.

Le présent rapport présente les résultats des investigations réalisées en octobre 2018 sur le forage de Puyricard n°2.

2. Sources d'informations

Pour la réalisation de cette étude, Antea Group s'est appuyé sur les données recueillies suivantes :

- Données d'exploitation la SPL l'Eau des Collines ;
- Différentes administrations (ARS PACA, DDTM 13, …) ;
- Principales bases de données internet : ADES, BSS du BRGM, …

Les autres sources d'informations proviennent de la consultation des documents suivants :

- Rapport Antea Group n° 94208 – 2018 - Etude bibliographique et proposition du protocole des pompages d'essais du forage Puyricard 2 à Cuges-les-Pins ;
- Rapport Antea Group n° 91360 – 2017 – Identification et préservation des ressources majeures en eau souterraine pour l'AEP du Pays d'Aubagne et de l'Etoile – Rapport de phase 1 et propositions d'investigations complémentaires ;
- Données de l'ARS : JP Sylvestre, Avis de l'hydrogéologue agréé, 2012 ;
- Entité hydrogéologique du SDAGE : Calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques *FRDG168* ;
- Données du SDAEP de Cuges-les-Pins, 2012.

3. Rappel du contexte environnemental

3.1. Situation géographique

La ville de Cuges-les-Pins dispose de trois ressources souterraines pour son alimentation en eau potable : forage Puyricard 2 - forage Dausserand - source des Jardins de la Ville. Leur localisation est présentée en figure 1 ci-dessous.

Le forage Puyricard 2 est situé en bordure de la RN8 sur la ville de Cuges-les-Pins à une altitude de 180 m NGF, dans une ancienne carrière de calcaires massifs au pied du Col de l'Ange, à 1,8 km à l'ouest du centre-ville de Cuges-les-Pins.

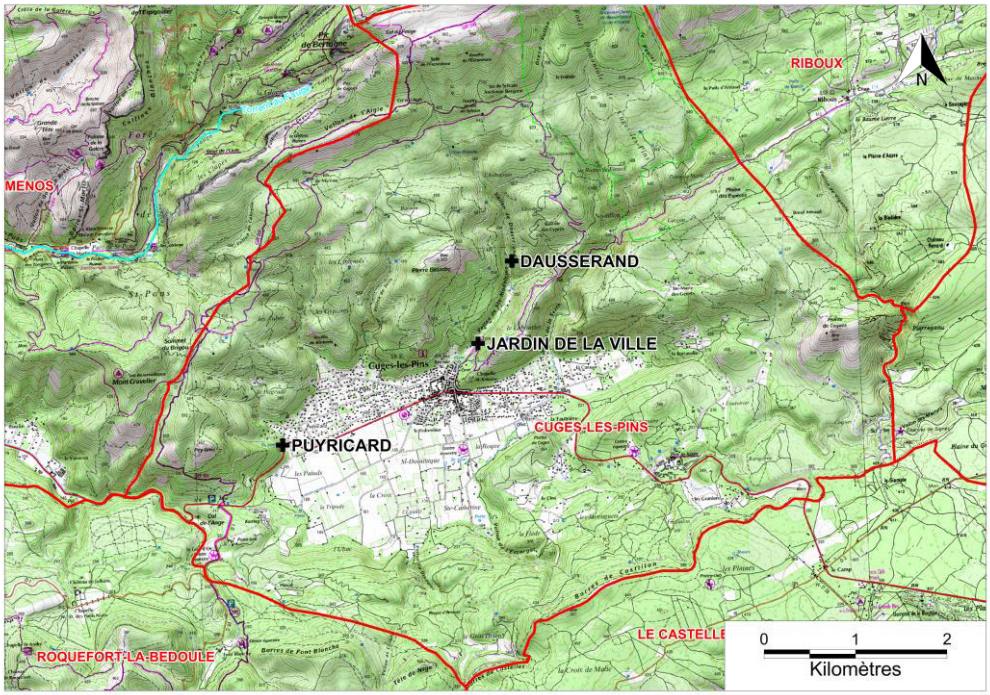


Figure 1 : Localisation du champ captant (fond : IGN au 1/25 000)

3.2. Situation administrative du captage

Le forage ne possède pas de Déclaration d'Utilité Publique (DUP) car la parcelle n°92 du périmètre de protection immédiate n'appartient pas en totalité à la commune (cf.figure 2).

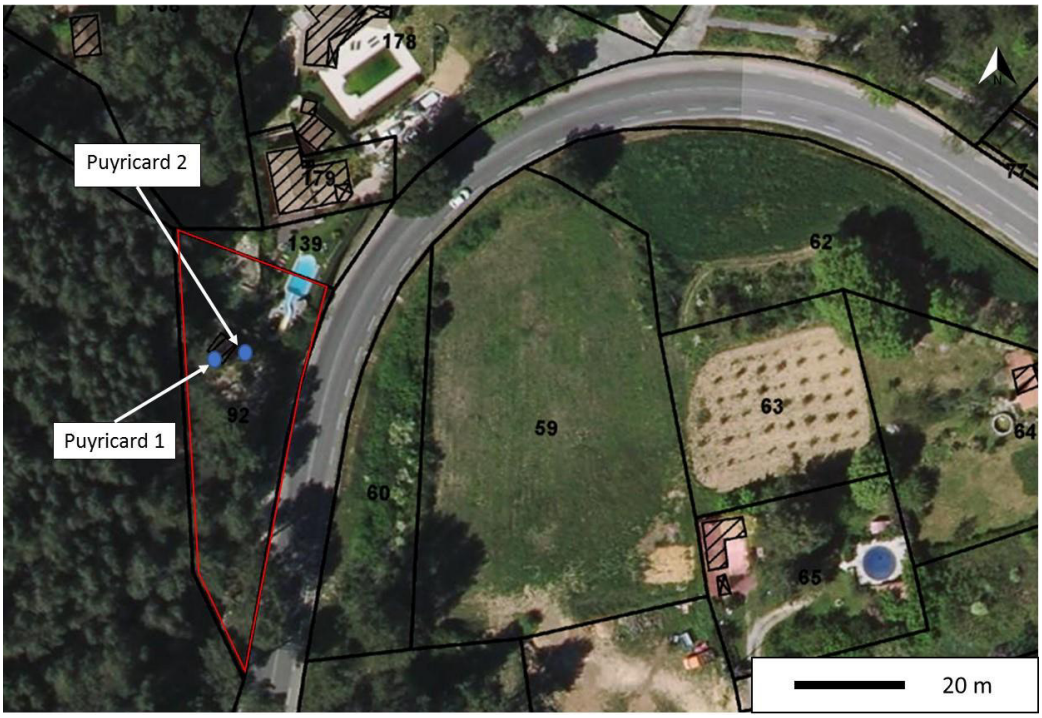


Figure 2 : Plan de localisation de l'ouvrage (fond : vue aérienne - Géoportail)

Toutefois le forage Puyricard 2 dispose de périmètres de protection immédiate, rapprochée et éloignée qui ont été prescrits par l'hydrogéologue agrée JP Sylvestre en mars 2012 (cf. figure 3).

Le site de Puyricard est protégé par une clôture grillagée qui abrite :

- le forage Puyricard 2, actuellement exploité, de 200 m de profondeur (réalisé en 1991) ;
- le forage Puyricard 1, de 130 m de profondeur, qualifié de secours. Selon le rapport de l'hydrogéologue agréé, ce forage est en mauvais état il ne permet pas de répondre immédiatement à sa fonction de secours (JP Sylvestre, 2012) ;
- le local technique comprenant le traitement UV.

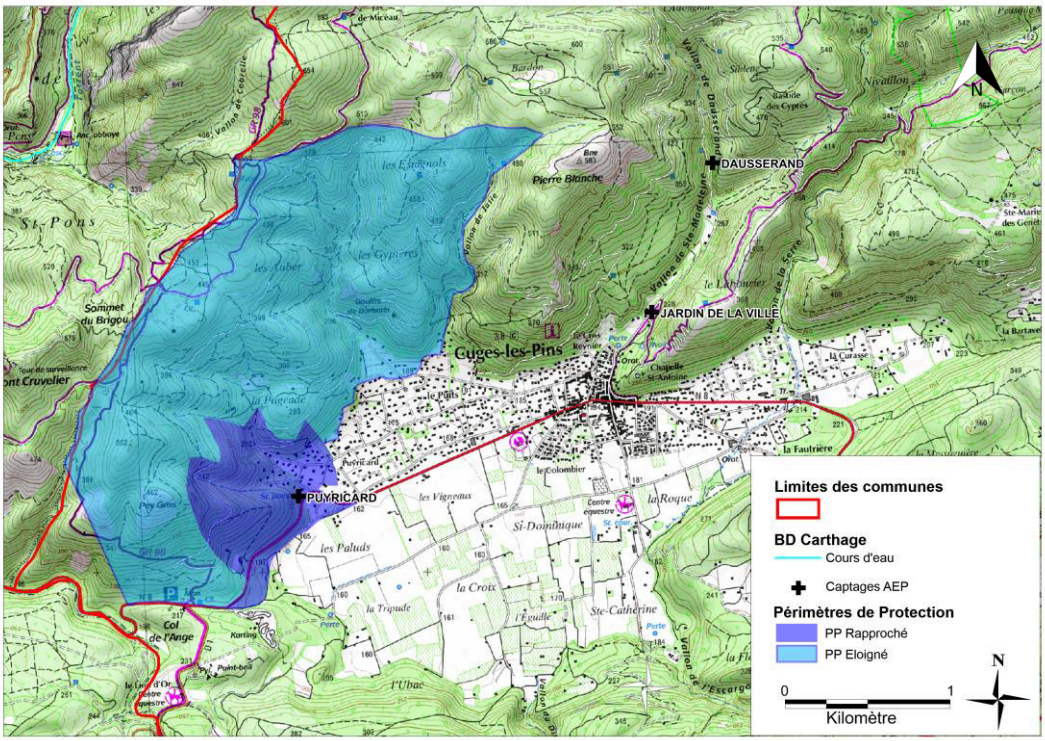


Figure 3 : Périmètres de protection des ouvrages de Cuges-les-Pins (source : ARS)

Le forage de Puyricard n°2 est actuellement exploité par la SPL L'Eau des collines à 105 m^3/h pendant environ 10 h soit **un volume journalier de 1 050 m^3**. Les cycles de pompage sont généralement de 4 h et dépendent du niveau des réservoirs.

3.3. Contexte géologique

D'après la carte géologique au 1/50 000ème, le forage Puyricard 2 est implanté dans les calcaires barrémiens (Crétacé inférieur) à faciès urgonien (n4U) (cf. Figure 4).

Le forage Puyricard 2 a recoupé sur 200 m les calcaires fracturés du Barrémien qui correspondent à des calcaires biodétritiques compacts, à patine blanche, disposés en gros bancs diaclasés.

Ces derniers reposent sur des calcaires marneux noduleux de l'Hauterivien (Crétacé inférieur), que le forage n'a pas recoupé.

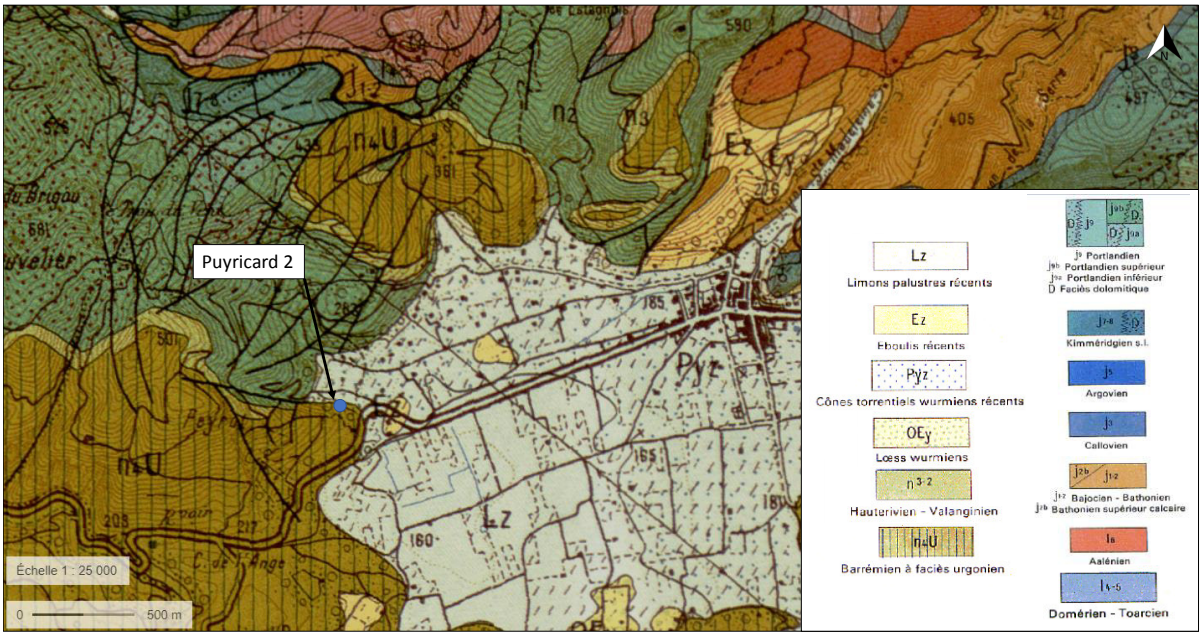


Figure 4 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 (source : BRGM)

3.4. Contexte hydrogéologique

Les calcaires barrémiens correspondent à un aquifère fracturé et karstifié. D'après la coupe de l'ouvrage, le forage Puyricard n°2 capte les arrivées d'eau des calcaires barrémiens situées entre 83 et 190 m de profondeur. Les coupes techniques des forages Puyricard n°1 et n°2 sont présentées en annexe A.

La nappe est principalement alimentée par l'infiltration des précipitations sur les affleurements calcaires. Les échanges avec d'autres aquifères, comme les calcaires jurassiques karstifiés, sont mal connus et mal quantifiés.

D'après la bibliographie, les écoulements sont dirigés vers le sud-ouest et vont alimenter les sources de Port-Miou et Bestouan, dont le bassin d'alimentation correspond principalement à l'unité karstique du Beausset externe. A noter toutefois qu'aucun traçage réalisé dans les embuts de Cuges (cf. figure 4) n'ont été retrouvés aux sources de Port-Miou.

Aucun cours d'eau ne s'écoule à proximité du forage de Puyricard 2. La commune de Cuges-les-Pins est un poljé (une vaste dépression fermée). Aux points bas de la cuvette, aux pieds des massifs, de nombreux embuts existent. Ces zones de perte vers l'aquifère constituent les exutoires de l'eau pluviale de la commune. (cf. figure 4).

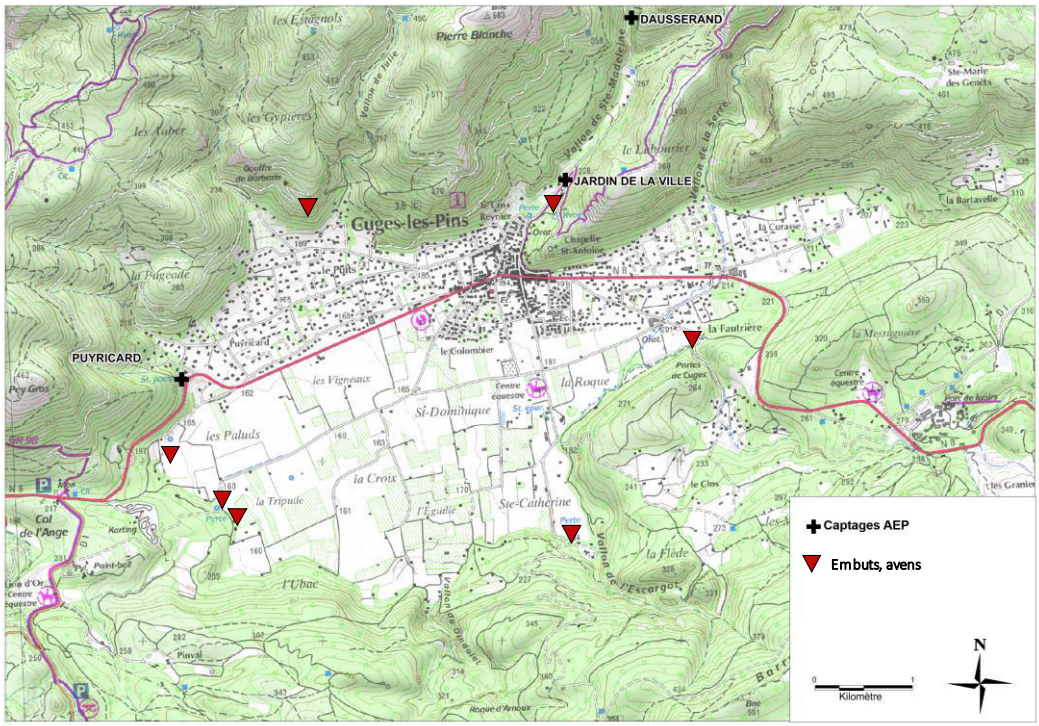


Figure 5 : Localisation des embuts sur Cuges-les-Pins (source : BSS)

Sur la commune de Cuges-les-Pins, la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère karstique est très élevée (vitesse d'infiltration rapide sur les massifs calcaires) notamment dans les zones de perte.

La sensibilité de la nappe est relativement élevée avec la présence de la route nationale (RN8), la présence de lotissements jouxtant la limite du périmètre de protection immédiat, de nombreux ANC (assainissement non collectif) et du forage F1. Au droit de ces secteurs, la vulnérabilité très élevée de l'aquifère conduit à un risque élevé vis-à-vis des eaux souterraines.

Toutefois le bassin d'alimentation du forage Puyricard étant localisé essentiellement sur une zone naturelle boisée, le risque sur les eaux souterraines est modéré (sauf à proximité immédiate du forage ou le risque est élevé).

L'eau au forage Puyricard 2 est bicarbonatée-calcique, magnésienne et légèrement sulfatée d'après les analyses réalisées sur le forage (rapport de l'hydrogéologue agréé, 2012). Aucune problématique vis-à-vis des nitrates et des pesticides n'a été relevée. Les analyses ont montré par ailleurs l'absence de contaminations bactériennes. La qualité de la ressource est classée en bon état.

4. Réalisation de reconnaissances géologiques du secteur de Puyricard

4.1. Cadre régional

D'un point de vue structural, la zone d'étude appartient à la basse Provence calcaire dont l'âge des terrains s'échelonne du Trias supérieur aux formations alluviales du Quaternaire (cf. Figure 6). Cette zone, très complexe, résulte de la tectonique pyrénéo-provençale intervenue à la fin du Crétacé, avec la mise en place de trois principales unités structurales orientées est-ouest (Guieu et Rousset - 1980).

A l'Oligocène, des fossés d'effondrement orientés nord-est/sud-ouest se sont mis en place et ont recoupé les formations carbonatées du Jurassique et du Crétacé comme le bassin de Marseille et le fossé de l'Huveaune.

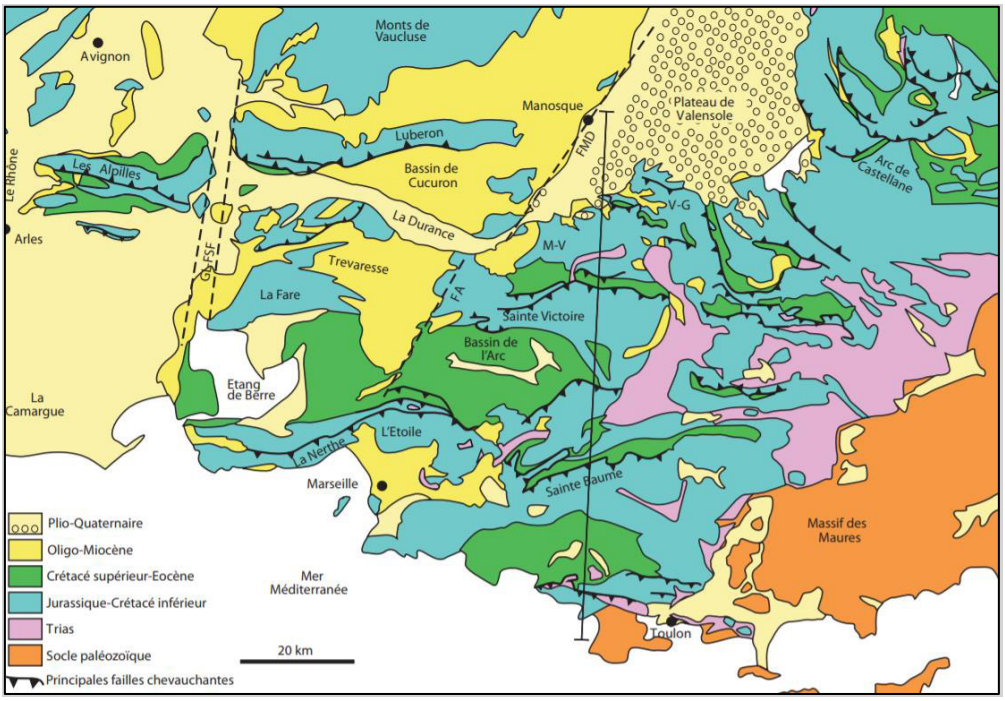


Figure 6 : Schéma structural de la Provence (F. Demory et al.)

La série sédimentaire du secteur d'étude débute au Trias et se termine dans la dépression d'Aubagne où les formations quaternaires affleurent. A l'affleurement, les deux principales formations présentes sont les calcaires du Jurassique et du Crétacé, représentant près de 70% de la superficie de la zone d'étude. Ce sont des terrains propices à l'infiltration des eaux en profondeur.

4.2. Le secteur du captage de Puyricard

Le forage de Puyricard est situé en bordure de la plaine de Cuges-les-Pins (cf. Figure 7). Cette plaine correspond à une dépression fermée comportant des dépôts oligocènes recouverts par des sédiments quaternaires.

Les reliefs encerclant cette dépression sont formés de calcaires et dolomies d'âge Jurassique moyen (Bajocien-Bathonien) à Crétacé inférieur (Barrémien). Ce secteur est situé à la transition entre le massif du Beausset et le massif de la Sainte-Baume.

4.2.1. Le synclinal du Beausset

Le synclinal du Beausset est une des entités géologiques les plus facilement identifiables en Basse Provence.
Il est fortement dissymétrique, son axe étant déporté vers le Sud. Le flanc nord du synclinal, très développé, a généralement un pendage de 10°. Le flanc sud, très réduit, a un pendage beaucoup plus variable, de 25° à 40°, mais il peut également être vertical ou quelque peu déversé, écaillé sous le chevauchement par l'Unité de Bandol. Ainsi, l'aspect général est monoclinal avec un pendage vers le Sud. Néanmoins, les terrains s'ordonnent en auréoles.

Une auréole, large et identifiable, faite de terrains résistants, correspond aux calcaires urgoniens d'âge hauterivien et barrémien (n3-4). Dans la moitié occidentale du synclinal, elle limite au Sud le fossé (poljé) de Cuges les Pins puis, au-delà du col de l'Ange vers l'Ouest, elle forme le massif du Douard qui borde au Sud la plaine d'Aubagne – Gémenos. Cependant, ce dernier présente une structure anticlinale faillée (commençant à s'individualiser au Sud du fossé de Cuges les Pins), à cœur de terrains d'âge berriasien-valanginien, qui le rattache aux structures anticlinales du massif de Carpiagne.

Au nord de Cuges les Pins, le dispositif quasi-monoclinal amène à l'affleurement les terrains d'âge crétacé et jurassique. Ces terrains, en série normale allochtone et appartenant bien au synclinal du Beausset constituent le flanc le plus méridional de la Sainte-Baume (cf. Figure 8).

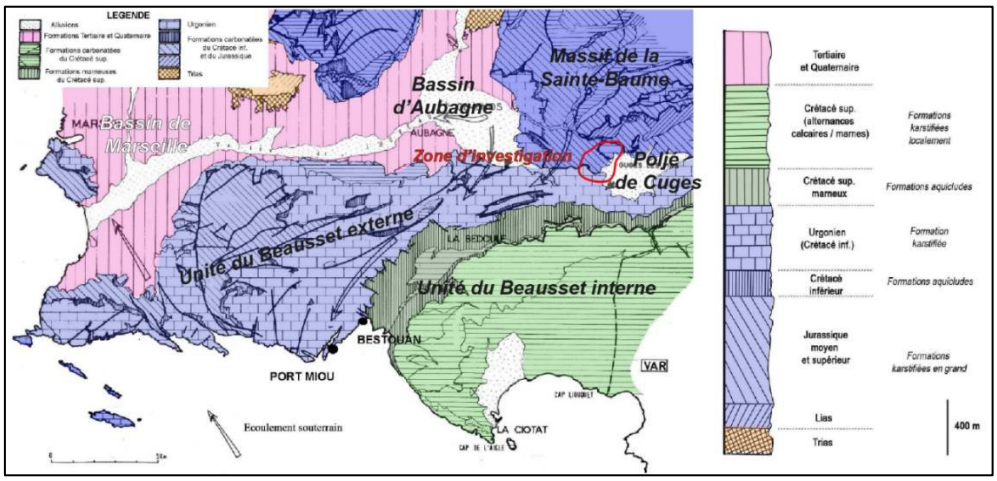


Figure 7 : Schéma structural régional (d'après Tassy 2012)

Ces calcaires karstifiés du Beausset sont le siège d'écoulements souterrains a priori importants. En effet, le massif est principalement alimenté par l'infiltration des précipitations, voire par des écoulements souterrains provenant du massif de la Sainte-Baume.

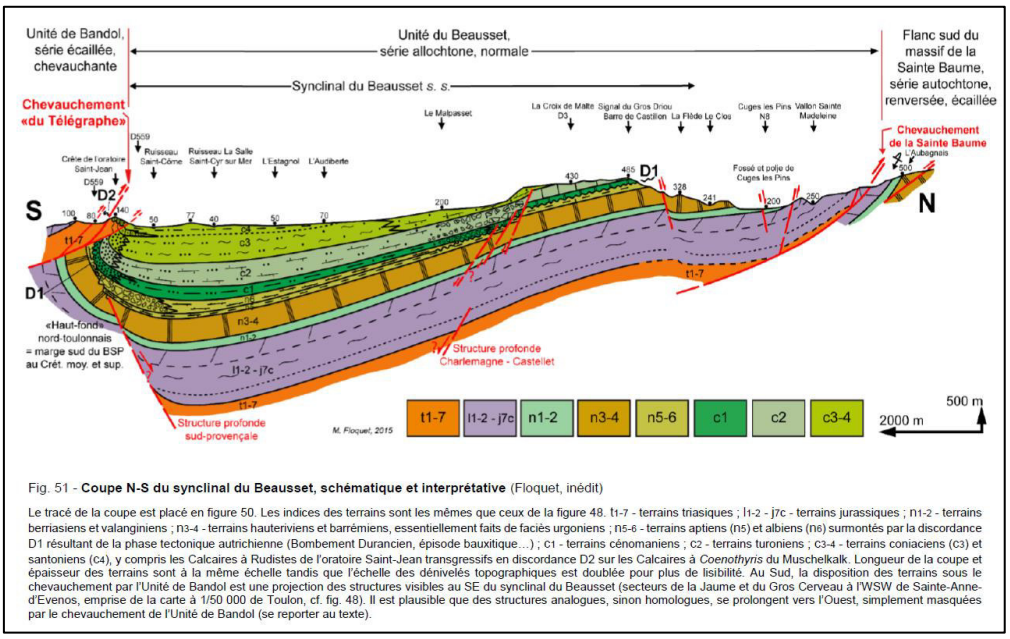


Fig. 51 - **Coupe N-S du synclinal du Beausset, schématique et interprétative** (Floquet, inédit)

Le tracé de la coupe est placé en figure 50. Les indices des terrains sont les mêmes que ceux de la figure 48. t1-7 - terrains triasiques ; l1-2 - j7c - terrains jurassiques ; n1-2 - terrains berriasiens et valanginiens ; n3-4 - terrains hauterivien et barrémiens, essentiellement faits de faciès urgoniens ; n5-6 - terrains aptiens (n5) et albiens (n6) surmontés par la discordance D1 résultant de la phase tectonique autrichienne (Bombement Durancien, épisode bauxitique...) ; c1 - terrains cénomaniens ; c2 - terrains turoniens ; c3-4 - terrains coniaciens (c3) et santoniens (c4), y compris les Calcaires à Rudistes de l'oratoire Saint-Jean transgressifs en discordance D2 sur les Calcaires à *Coenothyris* du Muschelkalk. Longueur de la coupe et épaisseur des terrains sont à la même échelle tandis que l'échelle des dénivelés topographiques est doublée pour plus de lisibilité. Au Sud, la disposition des terrains sous le chevauchement par l'Unité de Bandol est une projection des structures visibles au SE du synclinal du Beausset (secteurs de la Jaume et du Gros Cerveau à l'WSW de Sainte-Anne-d'Evenos, emprise de la carte à 1/50 000 de Toulon, cf. fig. 48). Il est plausible que des structures analogues, sinon homologues, se prolongent vers l'Ouest, simplement masquées par le chevauchement de l'Unité de Bandol (se reporter au texte).

Figure 8 : Coupe N-S du synclinal du Beausset (d'après Floquet, 2015)

Le forage de Puyricard est situé sur les formations du Barrémien, qui sont constituées de 350 m de calcaires biodétritiques compacts, à patine blanche, en gros bancs diaclasés, à faciès urgonien (n4U sur la carte géologique au 1/50 000). Sous cette unité se trouve l'Hauterivien (n3) formé de calcaires noduleux et marneux peu épais, puis le Valanginien dolomitique (n2D). On peut noter que l'on retrouve ces terrains Valanginien autour du sommet du Brigou, au nord du forage de Puyricard. Le décalage des séries est dû à la présence de nombreuses failles.

Le Valanginien se compose de 150 m de calcaires blancs et de 200 m de dolomies, sous lequel on trouve le jurassique supérieur (j3, j7-8, j9) d'environ 160 m. Le jurassique moyen est beaucoup plus marneux et possède une épaisseur d'environ 400 m, avec alternance de marnes et calcaires.

Ainsi, on retrouve environ 400 m de calcaires et dolomies au niveau du forage de Puyricard, surmontant un substratum marneux important.

Au niveau du forage, le recouvrement quaternaire est faible, mais directement en contact avec les calcaires Urgoniens.

4.2.2. La plaine de Cuges-les-Pins

La dépression de Cuges correspond à un bassin d'effondrement du Crétacé à l'Eocène. Elle est constituée de dépôts de cônes de déjection torrentiel (Pyz), de lœss du même âge (Oey), de limons palustres (Lz) plus récents (secteurs des paluds) et d'éboulis récents (Ez), notamment en bordure nord.

Des reconnaissances par puits et sondages réalisées en 2009 ont montré une épaisseur importante de sédiments post crétacé, 125 m minimum, dans le quartier du Puyricard. La structure des contours de la dépression de Cuges est faite par de grandes failles ENE-OSO, masquées par les sédiments du Crétacé. Ces structures s'accompagnent d'un ensemble de grabens limités par des failles en relais (affaissement de la zone d'extension à l'arrière de la Sainte Baume). Ce réseau met en contact les calcaires urgoniens du Beausset et les formations crétacées et jurassiques du versant sud de la Sainte-Baume. On trouve d'ailleurs un petit graben à 100 m au nord du forage du Puyricard.

4.2.3. Cartographie de terrain – fracture et pendage :

Cette carte représente une répartition des données de structures observées sur le terrain ainsi que les fractures observées soit sur le terrain soit par photo interprétation.

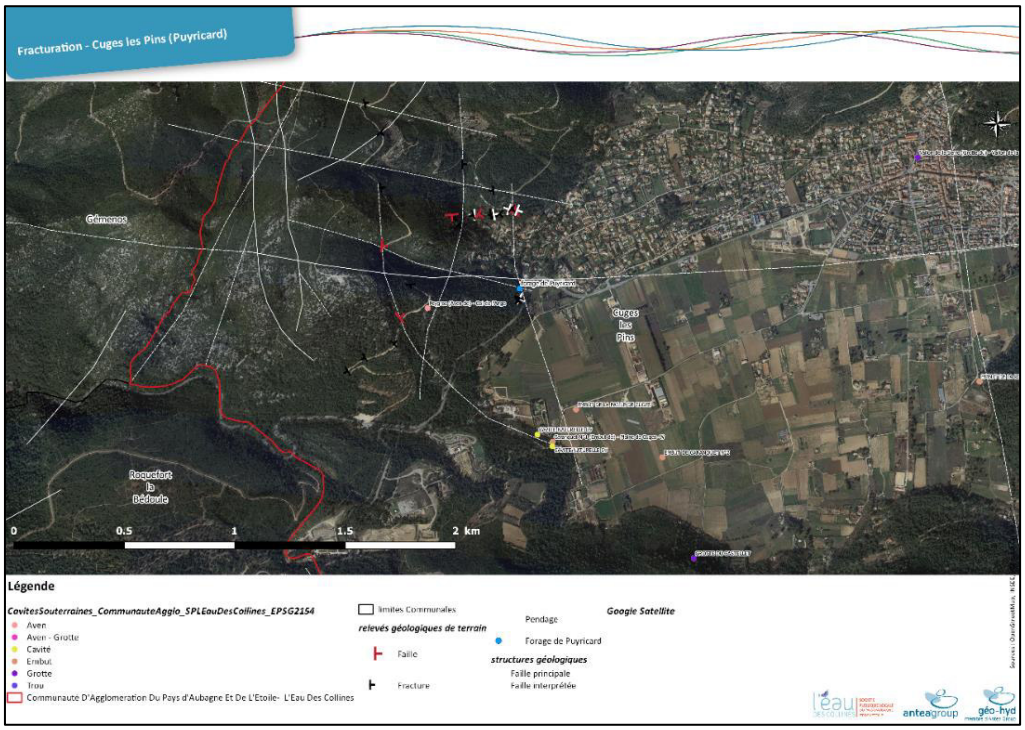


Figure 9 : Carte des principales fractures (fond satellite)

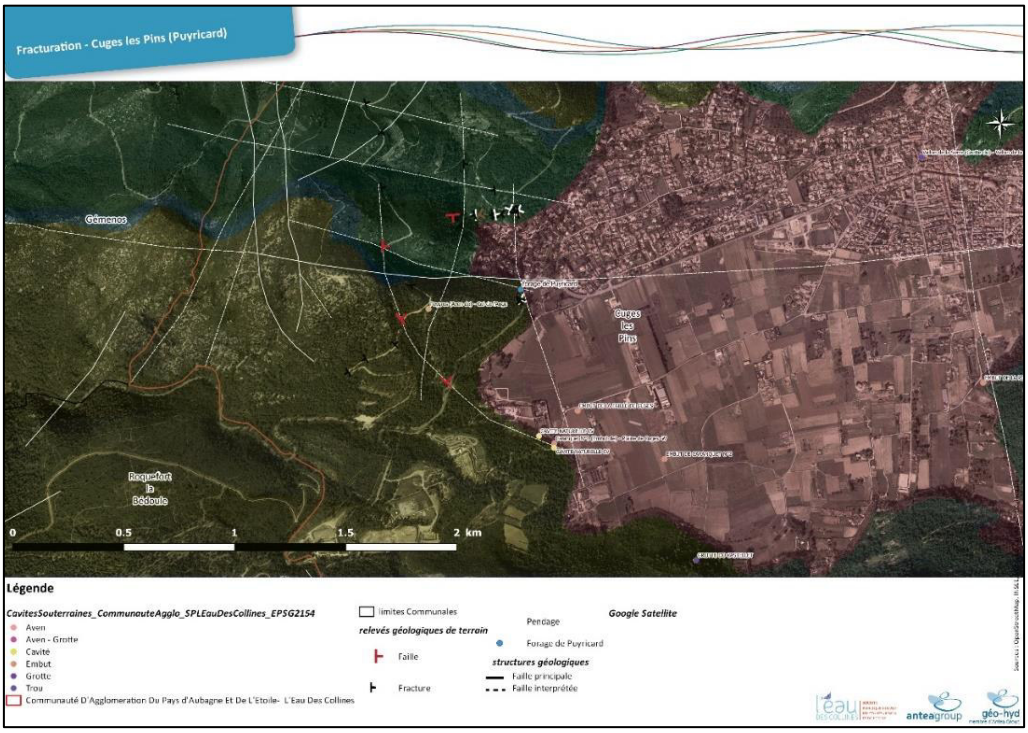


Figure 10 : Carte des principales fractures (fond carte géologique)

On observe d'importantes failles est-ouest dans les calcaires à faciès urgonien. Ces failles observées sur le terrain structurent et limitent le massif de Carpiagne et structurent également le bassin de Cuges. Des structures nord-sud de plus petite échelle sont observées dans le même secteur. Ces fractures nord-sud font la transition entre les calcaires urgoniens/valanginiens et la dépression de Cuges. Ces deux familles de fractures forment un réseau fracturé dense. Un bloc diagramme représentant la tectogénèse de la Sainte-Baume est présenté ci-dessous pour illustrer la structure locale (présent dans « l'Avis hydrogéologique du forage AEP de Puyricard – JP Sylvestre – Mars 2012 »).

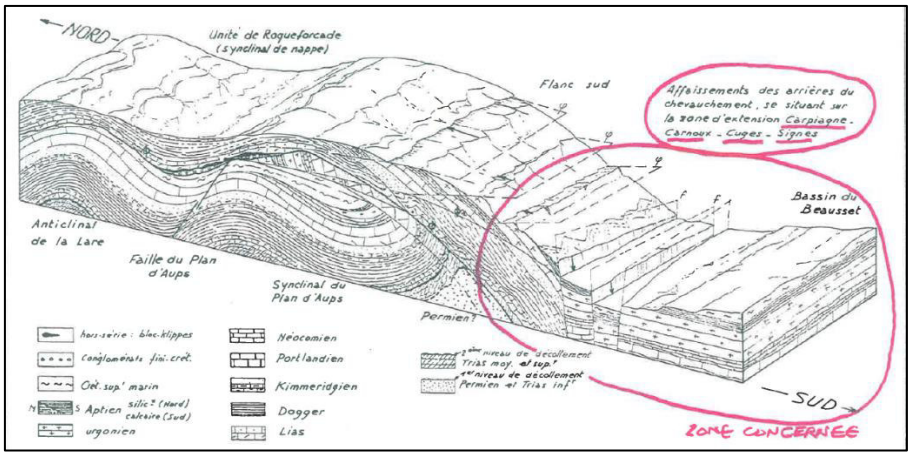
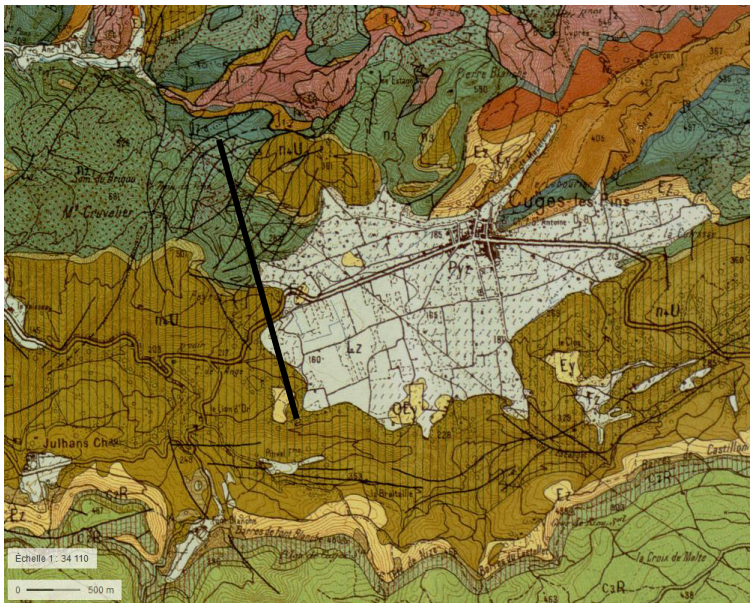


Figure 11 : Bloc diagramme représentant un stade de la tectogénèse de la Sainte Baume (Guieu)

La coupe nord-sud passant par Puyricard nous montre le contact direct entre le massif du Beausset externe et les séries de la Sainte Baume au nord. Les failles situées au contact entre ces formations ne sont pas des barrières et permettent ainsi la circulation hydraulique. Les fractures karstiques du faciès urgonien récupèrent ainsi les circulations des séries de la Sainte-Baume.



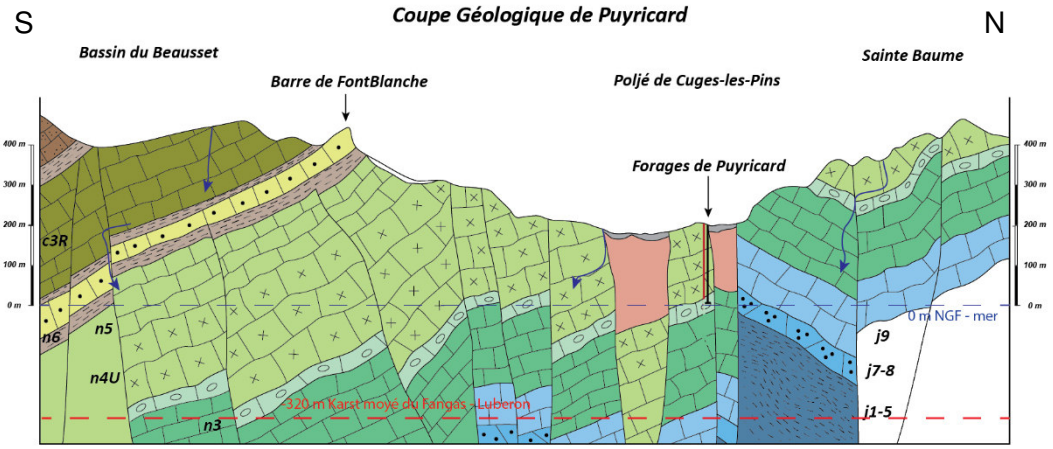


Figure 12 : Coupe structurale Nord-Sud de Puyricard
(JP Sylvestre-2012, modifié par Antea Group)

5. Compte rendu des pompages d'essais

5.1. Rappel du programme d'essai

Le protocole d'essai était le suivant :

- **Réalisation d'une inspection vidéo** sur le forage Puyricard 2 afin d'observer l'état des ouvrages ;
- **Pompages par paliers** sur l'ouvrage pour obtenir les pertes de charges ;
- **Pompages longue durée** pour estimer un débit de réalimentation de l'aquifère.

5.2. Déroulement des opérations

Les opérations se sont déroulées du 03/10/2018 au 10/10/2018 selon le phasage suivant :

Date	Type d'essais	Remarques
Du 03 au 04/10/2018	Paliers	4 pompages par paliers d'une durée comprise entre 60 et 225 minutes aux débits suivants : 112, 125, 132, 150 m^3/h
Du 08 au 10/10/2018	Pompages longue durée	Plusieurs pompages longue durée de 15 heures à 150 m^3/h (08/10/2018) et de 7 heures à 150 m^3/h (09/10/2018)

Tableau 1 : Déroulement des essais

5.3. Inspection caméra

Une inspection vidéo a été réalisée sur l'ouvrage Puyricard le 11 octobre 2018.

Les principaux points relevés sont les suivants :

- repère des mesures : +0,1 m/sol ;
- 0 à 101 m (chambre de pompage) : tubage plein en acier de diamètre 300/312 mm (quasi-similaire à la coupe technique du forage mentionnant une profondeur de 100 m) ;
- 101 à 204,6 m (colonne captante) : tubage crépiné en acier de diamètre 300/312 mm, fentes oblongues (quasi-similaire à la coupe technique du forage mentionnant une profondeur de 203 m) ;
- absence de massif filtrant au droit des crépines ;
- bon état général de la chambre de pompage. Légère oxydation des parois dans la partie émergée. Croûte d'oxydation plus épaisse dans la zone de battement de la nappe (vers 80,9 m). Partie immergée caractérisée par une fine croûte de dépôts ;

- crépines encroûtées entre 101 et 121 m et fortement encroûtées entre 175 et 204,6 m. Uniquement la partie entre 121 et 175 m présente un état général plus satisfaisant avec cependant une partie des crépines obstruée entre 133 et 139 m. Réduction de la section de l'ouvrage à partir de 195 m en raison de concrétions très importantes sur la paroi ;
- présence de perforation du tubage à 119,3 m et à 119,9 m ;
- fond de l'ouvrage à 204,6 m caractérisé par des dépôts sableux et graveleux.

L'absence d'entretien du forage depuis sa création en 1991 entraine un mauvais état général de l'ouvrage. Il est notamment marqué par un fort encroûtement des crépines probablement dans les zones les moins productives.

La coupe technique et les équipements d'exploitation du forage Puyricard N°2 sont présentés en annexe B.

Le nivellement des ouvrages a été réalisé par un géomètre expert. Les valeurs sont les suivantes :

Nom	X (m)	Y (m)	Z (m NGF) Haut tube forage
Puyricard F1	1917407.42	3122563.79	178.57
Puyricard F2	1917400.14	122567.73	179.48

Tableau 2 : Nivellement des forages

5.4. Réalisation des pompages d'essais

5.4.1. Contraintes de réalisation des pompages

De nombreuses contraintes ont dues être prises en compte dans les essais.

- Continuité d'alimentation en eau potable de la commune. L'eau du pompage devait alimenter les réservoirs ;
- Le diamètre de l'ouvrage de 300 mm, le niveau dynamique à 100 m et la pression de refoulement nécessaire de 11 bars en tête du forage ont conduit à trouver la **meilleure pompe disponible du marché[1].**
- L'absence de rejet vers un cours d'eau (poljé), réseau d'eau pluvial limitant (sous dimensionné, embâcles) ;
- Difficultés de rejet/surverse (mises en charge des caniveaux, coupures d'eau lors de délestage par le réseau incendie (très forte baisse de pression, …).

Toutes ces contraintes ont conduit à avoir une **réactivité permanente et une adaptation du programme d'essais.**

[1] La pompe d'exploitation très puissante est une pompe réalisée sur mesure par le fabricant

5.4.2. Pompages par paliers sur le forage Puyricard F2

Principe :

Les pompages par paliers (réalisés à débits croissants) permettent d'obtenir des couples de valeurs "débits-rabattements" à partir desquels il est possible de déterminer chacun des deux termes des pertes de charge :

- les pertes de charges linéaires (proportionnelles au débit) : correspondant à l'écoulement laminaire de l'eau dans l'aquifère, que l'on écrit B ;
- les pertes de charges quadratiques : provoquées par les écoulements turbulents de l'eau (dans les crépines et le tubage), que l'on écrit C.

L'équation simplifiée est la suivante : $\boxed{S_w = BQ + CQ^2}$

Avec S_w *le rabattement stabilisé au puits,*
Q le débit.

Ces essais sont indispensables à une gestion durable des ouvrages. L'évolution des paramètres de l'ouvrage dans le temps permet d'apprécier l'état de vieillissement des ouvrages par comparaison aux valeurs initiales.

5.4.2.1. Déroulement de l'essai

Le pompage par paliers a été réalisé les 03/10/2018 et 04/10/2018. Quatre paliers de durée variable (60 à 225 minutes) ont été réalisés aux débits suivants : 112, 125, 132 et 150 m^3/h. Le temps de pompage inégal et l'ordre des différents paliers non progressif ont été réalisés en fonction des contraintes d'exploitation et de surverse.

De plus au cours des essais par paliers, des pompages à 30 m^3/h ont dû être réalisés pour remplir les réservoirs (débit de la pompe d'essai à une pression de 11 bars).

Le graphique d'évolution des niveaux d'eau est reporté en Figure 13.

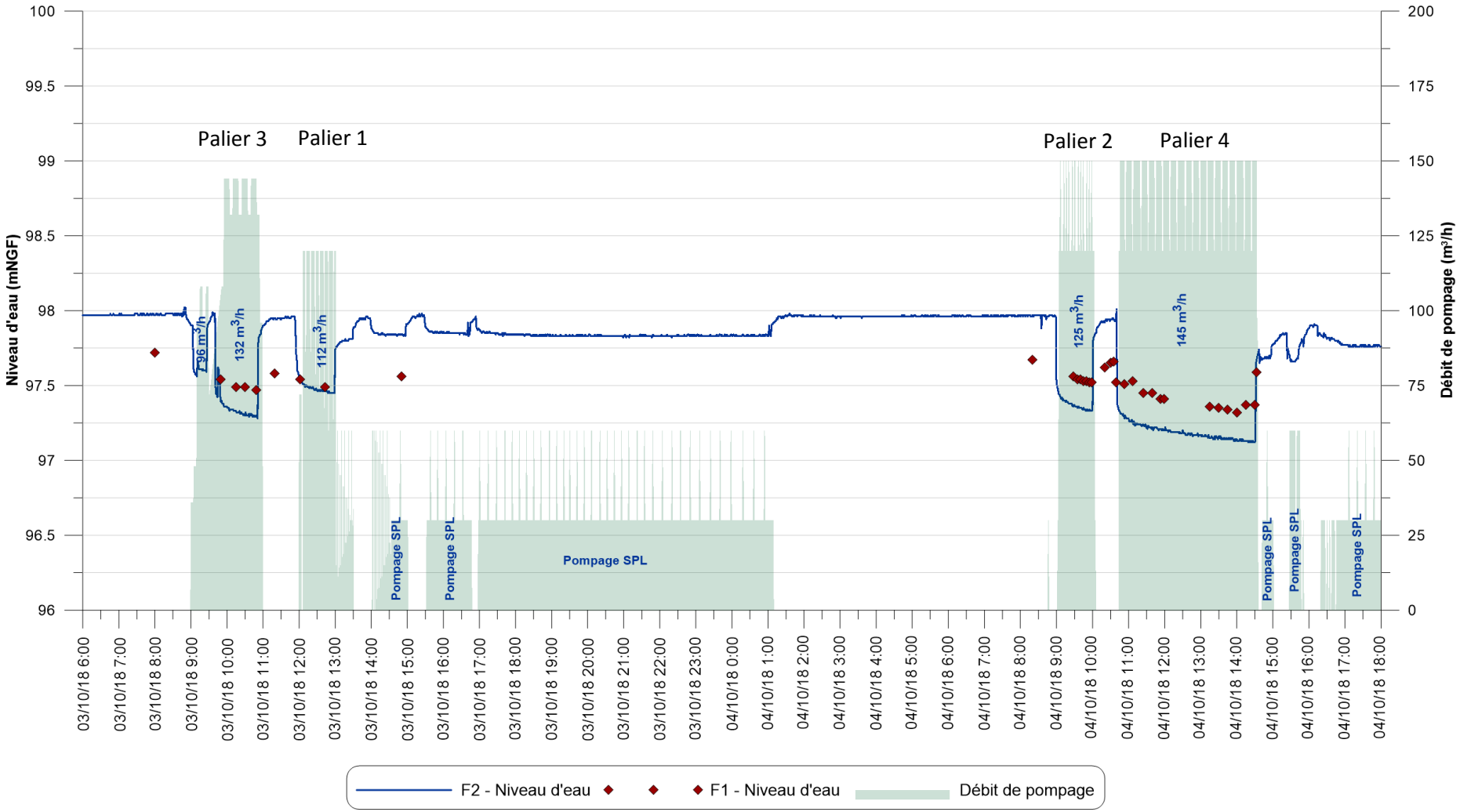


Figure 13 : Evolution des niveaux d'eau lors du pompage par paliers sur le forage Puyricard F2

5.4.2.2. Résultats des essais par paliers

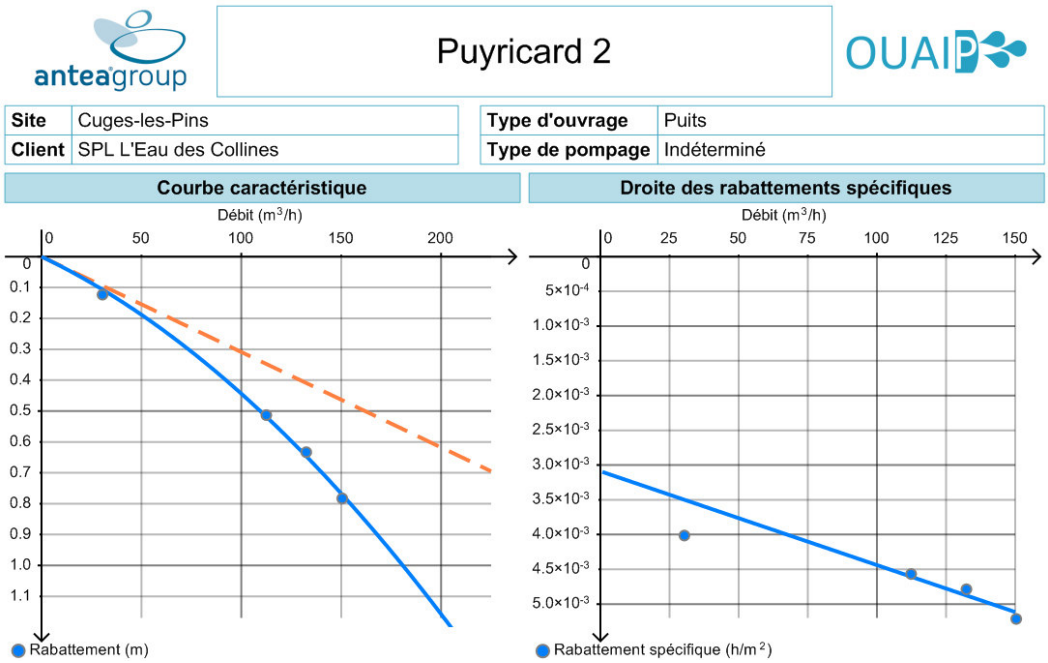
Les valeurs de rabattement obtenues après une heure de pompage pour chaque palier sont présentées dans le tableau ci-après :

n° Palier	Débit (en m³/h)	Rabattement après 1h de pompage (en m)	Débit spécifique (en m³/h/m)
Niveau statique : 97,97 m NGF			
-	30*	0,12	250
1	112	0,51	220
2	125	0,62	202
3	132	0,63	210
4	150	0,78	192

*les données du palier à 30 m³/h proviennent d'un pompage de la SPL dans le cadre de leur exploitation

Tableau 3 : Résultats du pompage par paliers

La courbe caractéristique du forage Puyricard F2 est présentée ci-après :



Résultats de l'ajustement		
Coef. de pertes de charges linéaires (B)	$3{,}09\times10^{-3}$ h/m²	**11,1 s/m²**
Coef. de pertes de charges quadratiques (C)	$1{,}35\times10^{-5}$ h²/m⁵	**175 s²/m⁵**
Exposant (n)	2,00	

Figure 14 : Courbe caractéristique du forage Puyricard F2

Ces résultats mettent en évidence :

- une réaction instantanée de la nappe lors des phases de démarrage et d'arrêt de la pompe ;
- l'absence de stabilisation à la fin des paliers (sauf à 30 m^3/h) ;
- pour les paliers n°1 et n°3 on note des remontées très rapides au niveau initial après l'arrêt de pompage (respectivement de 20 et de 37 minutes) ;
- des débits spécifiques[2] importants allant de 250 (m^3/h)/m à 192 (m^3/h)/m selon les paliers ;
- les valeurs de turbidité sont inférieures à 1 NTU.

Concernant le suivi du niveau d'eau sur le forage Puyricard F1, il apparait que son comportement est similaire à celui de F2. Les rabattements sont cependant plus atténués que sur le forage de pompage en raison de l'absence de pertes de charge (rabattement de 0,25 m pour le palier n°4).

5.4.2.3. Interprétation des essais par paliers

L'utilisation du logiciel OUAIP, permet de calculer les pertes de charges linéaires (B) et les pertes de charges quadratiques (C) de l'ouvrage :

- B = 11,1 m/(m^3/s)
- C = 175 m/(m^3/s)

Ces résultats indiquent que pour un débit de 150 m^3/h, le rabattement de 0,78 m correspond à 30 % de pertes de charges quadratiques (liées uniquement à l'ouvrage). Le débit spécifique de l'ouvrage est d'environ 200 $m^3/h/m$.

En considérant que les pertes de charges quadratiques acceptables en exploitation sont de l'ordre de 30 %, le débit critique de l'ouvrage peut être donné à **150 m^3/h** (en l'état et pour les conditions d'essai).

Il est rappelé qu'une surexploitation d'un ouvrage peut entraîner un vieillement accéléré et remettre en cause son exploitation (ensablement, …).

[2] Le débit spécifique correspond au débit obtenu pour un mètre de rabattement dans le puits.

5.4.1. Pompage longue durée sur le forage Puyricard F2

5.4.1.1. Déroulement de l'essai

Le pompage d'essai de plus longue durée possible (15h) a été réalisé le 8 et 9 octobre 2018 à un débit de 150 m^3/h.

Pour obtenir le débit de 150 m^3/h avec la pompe d'essai, les eaux de rejet ont dû être directement évacuées vers le réseau d'eau pluvial. Toutefois, le rejet a entrainé une mise en charge de l'eau dans les fossés d'eaux pluviales en raison de nombreux embâcles (branches, diamètre trop restreint, déchets…). Des visites régulières de surveillance ont été réalisées afin de contrôler la mise en charge des fossés. Par précaution, il a été décidé d'arrêter le pompage à 0h15 afin de ne pas prendre de risques vis à vis des habitations présentes aux alentours.

Un deuxième et un troisième essai de respectivement 7 h et 2 h ont été réalisés le 9 octobre et 10 octobre 2018.

Le graphique d'évolution des niveaux d'eau est reporté en Figure 15.

Remarque :

D'après le protocole initial, il a été prévu d'appliquer la méthode « Porchet » afin de déterminer les débits d'alimentation de l'aquifère recoupé par le forage Puyricard 2. Cette méthode est basée sur l'interruption du pompage longue durée à intervalles réguliers de façon à laisser remonter le plan d'eau. A partir des couples rabattement/débit d'alimentation de la galerie on détermine le débit maximum d'alimentation de la vasque (cf. protocole des pompages - rapport Antea Group n°94208).

Toutefois, le faible temps de pompage ainsi que la très forte remontée du plan d'eau à l'arrêt du pompage n'ont pas permis d'appliquer cette méthode « Porchet ».

Au cours du pompage, il a été décidé d'adapter la méthode d'interprétation en utilisant le guide BRGM sur les pompages d'essais dans le karst (rapport BRGM RP-58237-FR de mars 2010[3]).

[3] Guide méthodologique – Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource

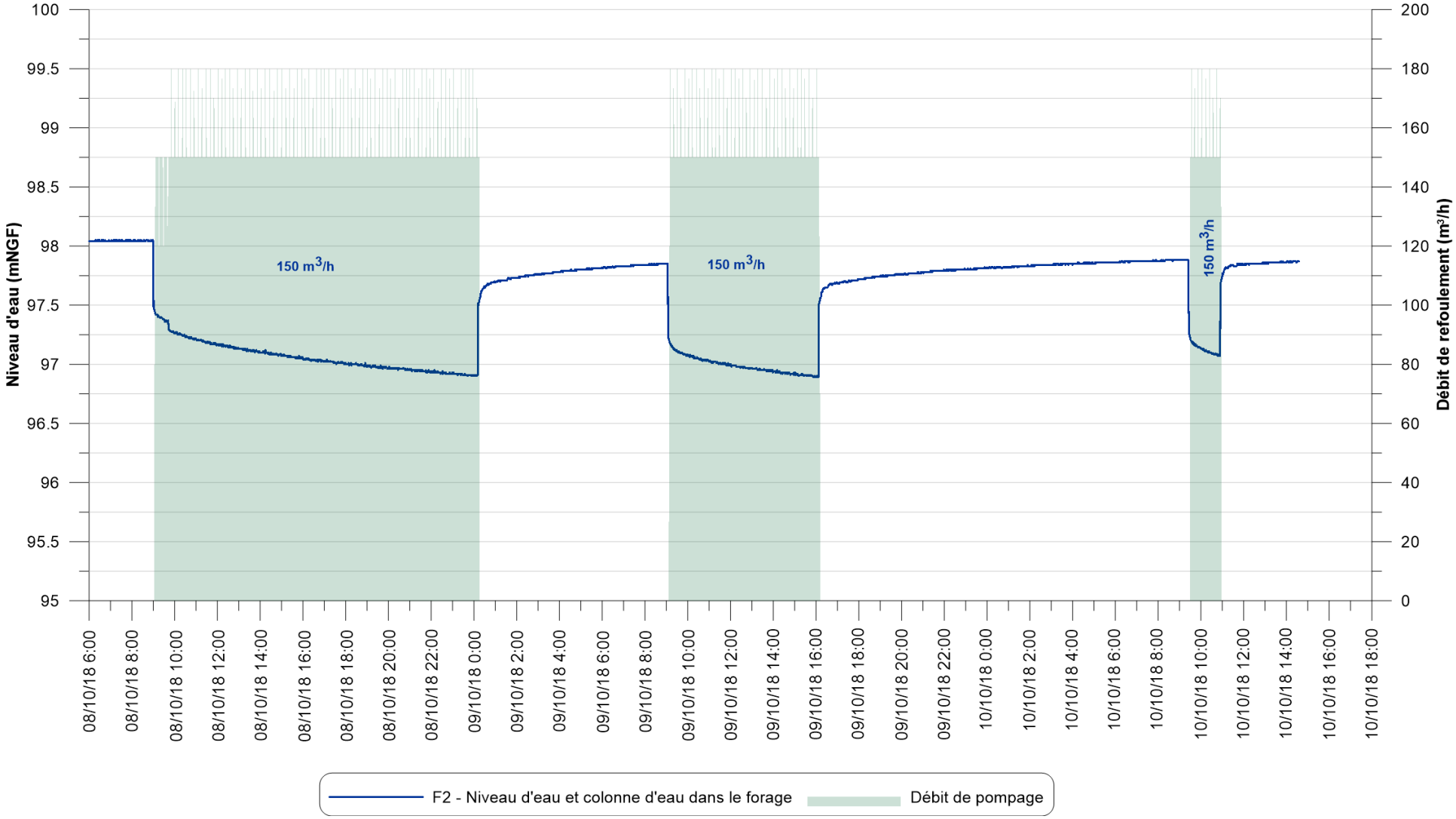


Figure 15 : Evolution du niveau d'eau du forage Puyricard F2 lors du pompage de longue durée

5.4.1.2. Résultats du pompage longue durée

Ces résultats mettent en évidence :

- un rabattement de 1,14 m au bout de 15 heures de pompage (essai n°1) ainsi qu'un rabattement de 0,65 m au bout de 7 heures de pompage (essai n°2) ;
- l'absence de stabilisation du niveau d'eau pour les deux essais. La pente résiduelle de baisse est de l'ordre de 0,01 m/h pour l'essai n°1 ;
- une remontée en plusieurs temps :
    - très rapide la première heure (0,8 m/h soit 70 % du rabattement total) ;
    - plus lente ensuite (0,01 m/h) ;
- l'absence d'atteinte du niveau initial après l'arrêt de la pompe. Pour l'essai n°1, le rabattement résiduel au bout de 9 heures d'arrêt de pompage est de 0,19 m.

5.4.1.3. Interprétation des essais et détermination du débit d'alimentation

Contrairement aux aquifères poreux, il n'existe pas de modèles d'interprétation des pompages d'essai spécifiques aux aquifères karstiques car la disposition et l'organisation des vides peuvent changer d'un aquifère à l'autre. De plus, les informations obtenues pour une certaine valeur de débit ne sont souvent pas extrapolables en raison de la non-linéarité des systèmes karstiques liée à l'hétérogénéité du milieu.

Toutefois, le guide BRGM sur l'interprétation des pompages d'essais en milieu karstique présente trois méthodes :

- Méthode n°1 : Forage recoupant un drain (stabilisation quasi-immédiate du rabattement) ;
- Méthode n°2 : Forage recoupant de vides à l'intérieur d'une zone compartimentée (réservoir). Les rabattements présentent une évolution linéaire ;
- Méthode n°3 : Forage recoupant un milieu fissuré dont une interprétation analytique à l'aide de schémas propres (Theis ,…).

L'évolution du rabattement du pompage de Puyricard n'a pas de stabilisation immédiate. Cela se traduit par un pompage dans un aquifère d'extension finie et de transmissivité très élevée (vides). Les méthodes d'interprétation n°2 et n°3 du BRGM ont été appliquées à ce pompage.

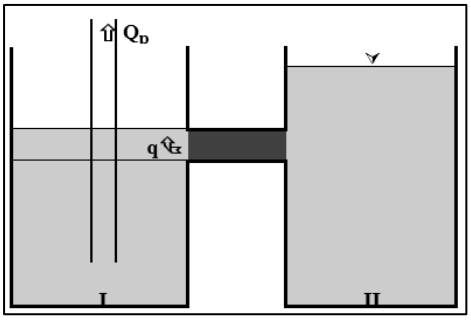
<u>Méthode n°2 :</u>

Le réservoir peut être alimenté par un écoulement perché par rapport à la nappe. Le débit d'alimentation est alors calculé à partir de la courbe des pentes de rabattement observées pour deux débits de pompage différents (BRGM/RP-58237-FR) suivant l'équation suivante :

$$\frac{(\alpha_1 Q_2 - \alpha_2 Q_1)}{\alpha_1 - \alpha_2} = Q_a$$

α_1=pente correspondant à un pompage constant à débit Q_1

α_2=pente correspondant à un pompage constant à débit Q_2



Les différents débits de pompages (paliers et longue durée) menés sur le forage Puyricard F2 ont permis de calculer plusieurs débits d'alimentation après 2 heures de pompage. Le tableau ci-après synthétise les différents couples de débit et leur débit d'alimentation associé.

Débit (m3/h	Pente (m)	Couple de débit ($m^3/h/m^3/h$)	Débit d'alimentation (m^3/h)
120	0.04	150/120	172
144	0.029	150/125	163
150	0.017	150/144	158
125	0.05	144/120	207
-	-	144/125	170

Tableau 4 : Débit d'alimentation calculé avec la méthode des pentes

Cette méthode permet d'avoir une approche sur un débit de réalimentation. La méthode utilisée met en évidence des débits d'alimentation cohérents entre les différents couples de débit. Il a pu être estimé entre 150 et 200 m^3/h.

Méthode n°3 :

Par ailleurs, un calage assez satisfaisant a été obtenu avec le schéma de Theis sur les paramètres suivants (cf. annexe C) :

- Transmissivité (T) = 6.10^{-2} m^2/s.
- Coefficient d'emmagasinement (s) = 1
- Deux limites étanches : les limites étanches introduites pour l'interprétation n'ont pas forcément de réalité physique mais peuvent traduire l'extension et la connexion d'un milieu fracturé.

Le coefficient d'emmagasinement ne peut pas normalement être supérieur à 1 car ce paramètre correspond à un pourcentage (rapport du volume d'eau libérée par unité de surface d'un aquifère pour une variation de charge unitaire). Les valeurs obtenues dans le cas présent traduisent la présence de vides (fracture ouverte, vide karstique, etc.) recoupés par le forage augmentant le rayon d'observation. La valeur obtenue doit donc être interprétée en termes de structure (présence de vides) et non comme un paramètre physique.

Ce résultat doit être interprété en termes de fonctionnement et non de structure. Il signifie que les pertes de charge liées aux écoulements dans l'aquifère sont linéaires, ce qui traduit des vitesses de circulation lentes. L'eau serait contenue dans un milieu fracturé relativement continu et homogène à grande échelle (comportement équivalent à un aquifère poreux). Ce point n'exclue pas la présence de vides karstifiés de grandes dimensions au sein du magasin.

5.4.1.4. Productivité de l'aquifère

Le suivi d'exploitation du forage depuis 2004 a été exploité pour observer la productivité de l'aquifère. A noter qu'il n'y a pas de données d'exploitation fiable entre 2011 et 2017.

Le schéma directeur d'alimentation en eau potable de la commune de Cuges-les-Pins réalisé en juin 2012 par la société des Eaux de Marseille met en évidence l'évolution du niveau de la nappe entre 2004 et 2011[4] (cf. Figure 16). Le niveau de la nappe oscille entre 120 m (prof = 83 m/sol) et 85 m (prof = 118 m/sol).

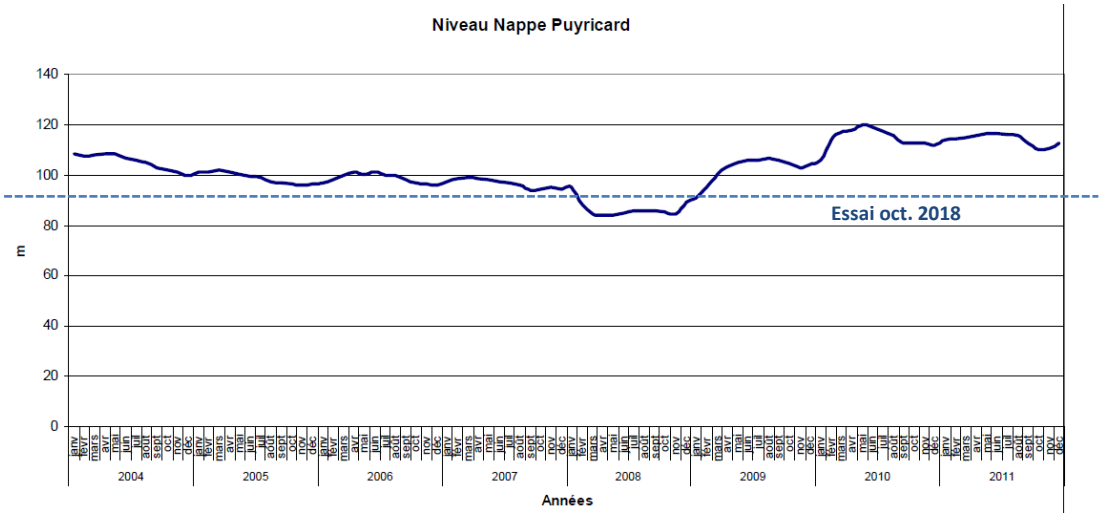


Figure 16 : Evolution du niveau d'eau de la nappe entre 2004 et 2011
(source : SDAEP de la commune de Cuges-les-Pins, juin 2012, Société des Eaux de Marseille)

Le suivi d'exploitation de la SPL (février 2017 à octobre 2018) montre des hauteurs d'eau au-dessus de la pompe entre 81 m (prof = 92 m/sol) et 90 m (prof = 83 m/sol)[5]. Une chronique piézométrique semble être mise en évidence avec des hautes eaux en juin 2017 et des basses eaux en mars 2018 (cf. Figure 17).

[4] Les données du niveau de la nappe correspondent à la hauteur d'eau au-dessus de la pompe immergée (sommet de la pompe à 203 m/sol d'après données SEM)
[5] Pompe située à 173 m/sol

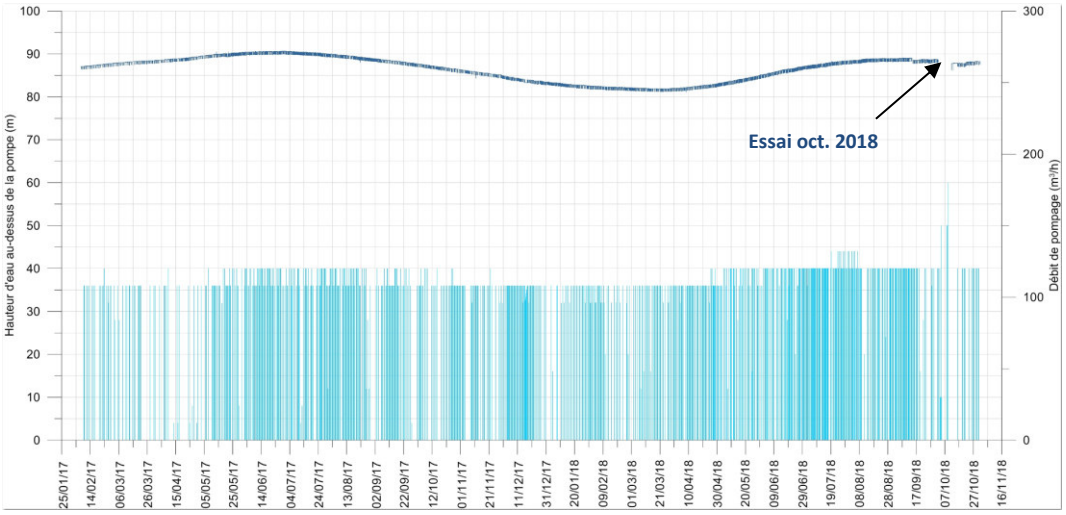


Figure 17 : Evolution du niveau d'eau de la nappe entre février 2017 et octobre 2018 (source : SPL L'Eau des Collines)

Les suivis d'exploitation (SEM et SPL) montrent deux éléments importants :

- Une fluctuation naturelle de la nappe indépendante des pompages d'exploitation ;
- Une indépendance entre le niveau d'eau et les épisodes pluvieux ce qui traduit l'inertie du réservoir exploité. Un tel comportement se retrouve dans des karsts dits "non fonctionnels".

De plus d'après ces données, on observe que les pompages d'essais réalisés en octobre 2018 ont été conduits en **état hydrologique de moyennes eaux**.

5.5. Prescriptions particulières de gestion de Puyricard

Le tableau suivant liste les points particuliers mis en évidence et établit des propositions d'amélioration.

Points particuliers	Proposition d'exploitation et d'amélioration
Diagnostic du forage Puyricard 2	- Le diagnostic a montré un forage en relativement bon état structurel. Cependant de nombreuses concrétions sont présentes dans la partie crépinée qui obstruent partiellement les zones productives. **Un nettoyage de l'ouvrage est vivement recommandé (brossage et air lift).**
Potentialité de l'aquifère	- Fluctuation naturelle de la nappe de 20 à 30 m indépendante des pompages d'exploitation => forte inertie du réservoir ; - Forage situé dans la partie capacitive du karst ; - Colonne d'eau très importante dans le forage d'environ 100 m ; - Rabattement faible et remontée du niveau d'eau très rapide (70 % du rabattement en 1h) ; - Réalimentation du réservoir estimée entre 150 à 200 m^3/h ; - Débit préconisé du forage Puyricard 2 de **150 m^3/h** ;
Exploitation du site de Puyricard	- Privilégier une **exploitation sur une durée plus longue** pour éviter les phases de démarrage/arrêt trop répétées de la pompe (accélération du vieillissement de la pompe). Réglage du débit de la pompe par un variateur de fréquence ; - **Rechercher l'origine de la forte HMT de 11 bars en sortie de forage,** modifier le refoulement et/ou changer les organes défectueux afin de réduire cette pression et augmenter le débit de prélèvement. Une alternative serait de prévoir une pompe de reprise, bâche tampon et/ou surpresseur en sortie de forage. Cela permettrait d'augmenter immédiatement le débit de prélèvement.
Autorisation	- **Régularisation de la DUP** à obtenir rapidement (nouvel avis d'un hydrogéologue agrée pour redéfinir le PPI ou acquérir la parcelle du PPI par la commune).
Vulnérabilité de la ressource	- **Préservation de la ressource à mettre en place** : zone de sauvegarde à intégrer dans le PLU ; - Protection à mettre en place le long de la RN8 (murs renforcés, drainage eau pluviale, …) et sur le bassin d'alimentation proche (eaux usées - fosses septiques, eau pluviale - voirie, …).
Sécurisation et augmentation du prélèvement	- La sécurisation et l'augmentation des prélèvements sur Puyricard pourrait se faire grâce à un **nouveau forage de 300 m de profondeur** qui recouperait, sous les calcaires marneux de l'Hauterivien les formations fracturées du Valanginien théoriquement très productifs.

Tableau 5 : Propositions d'amélioration

6. Conclusions

Dans le cadre de l'étude du diagnostic du forage de Puyricard 2 et d'évaluation des potentialités aquifères réalisée pour le compte de la SPL L'Eau des Collines, les pompages d'essais ont permis de mettre en évidence :

- un ouvrage avec de nombreux dépôts concrétionnés dans la zone crépinée qui montre l'absence d'entretien depuis sa création en 1991. Dans ce cadre, un nettoyage par brossage et air lift est recommandé ;
- un forage très productif dont le débit d'exploitation préconisé est de 150 m^3/h (dans les conditions d'essais) ;
- un aquifère très productif et des réserves de potentialités mobilisables importantes au droit du site Puyricard ;
- des résultats d'analyses conformes aux limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine pour l'ensemble des paramètres analysés ;
- des possibilités d'optimisations sont susceptibles d'être trouvées en modifiant les conditions d'exploitation notamment en soulageant la pression sur la pompe immergée.

Le forage de Puyricard n°2 et plus généralement l'aquifère karstique est primordial pour l'alimentation en eau potable de la commune de Cuges-les-Pins. Le caractère très vulnérable de cet aquifère exploité doit entraîner une forte protection en surface du bassin d'alimentation. Cette préservation passera par une réglementation des activités présentant un risque pour la ressource en eau et par un encadrement des prélèvements d'eaux souterraines.

Par ailleurs, il serait envisageable d'augmenter et sécuriser le prélèvement via un nouveau forage plus profond de 300 m qui recouperait les calcaires valanginiens théoriquement productifs.

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable ; en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des indications et énonciations d'Antea Group ne saurait engager la responsabilité de celle-ci.

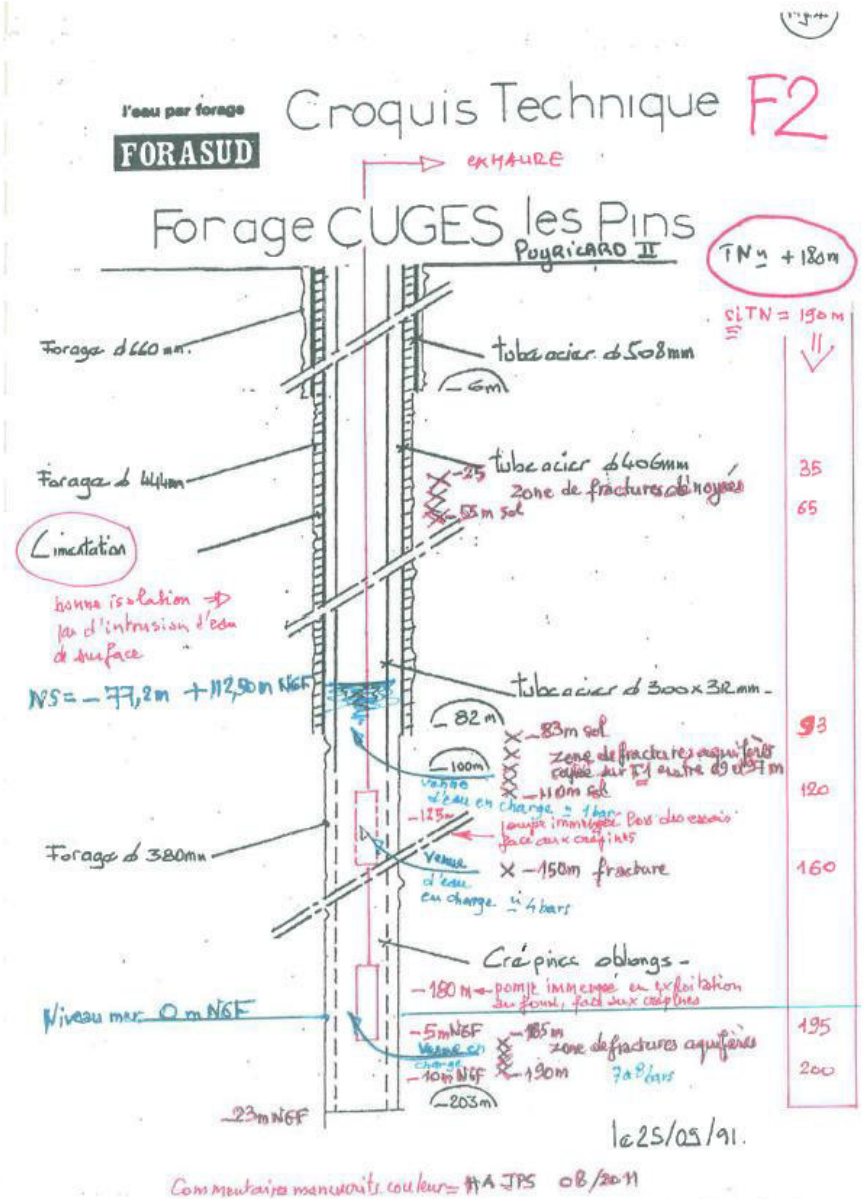
La prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

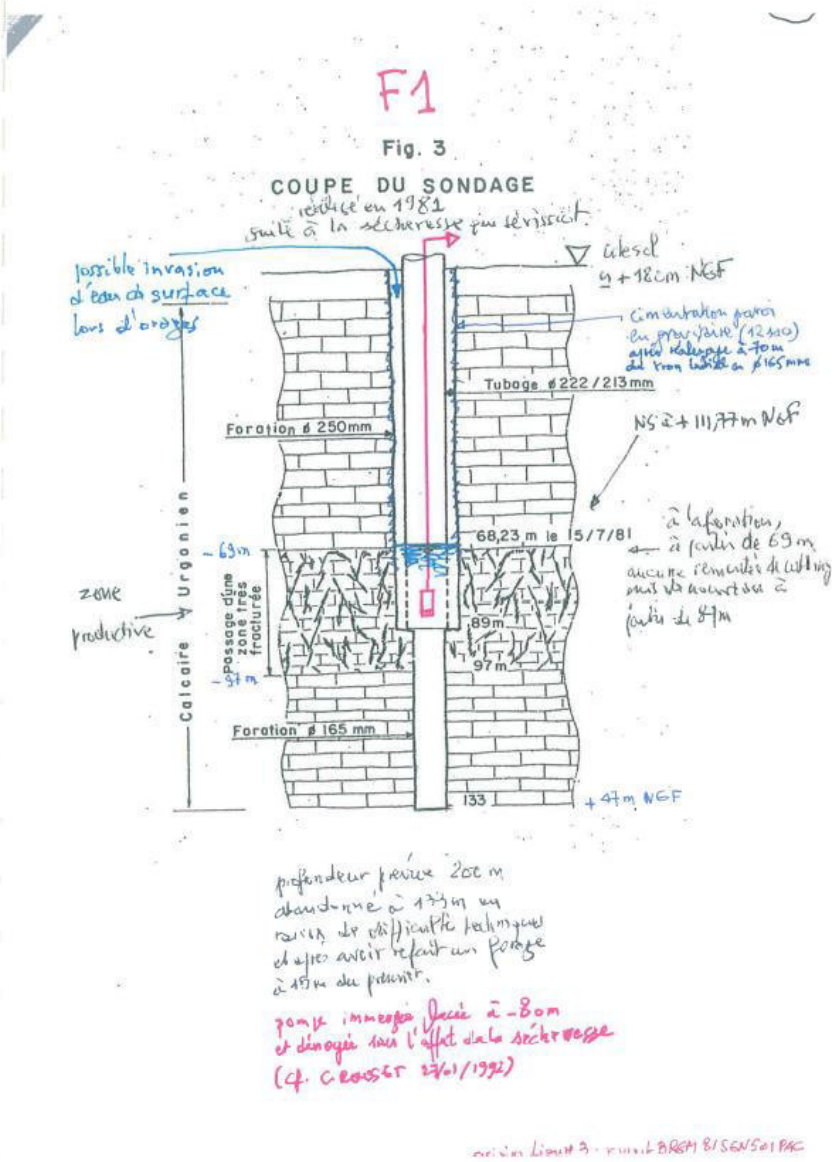
Annexe A :

Coupes techniques des forages Puyricard n°1 et n°2 de 1991

(1 page)

Annexe A : coupes géologiques et techniques des ouvrages
Forage F2 « Puyricard 2 » et Forage F1 « Puyricard 1 »
Source : Rapport de l'hydrogéologue agrée de 2012



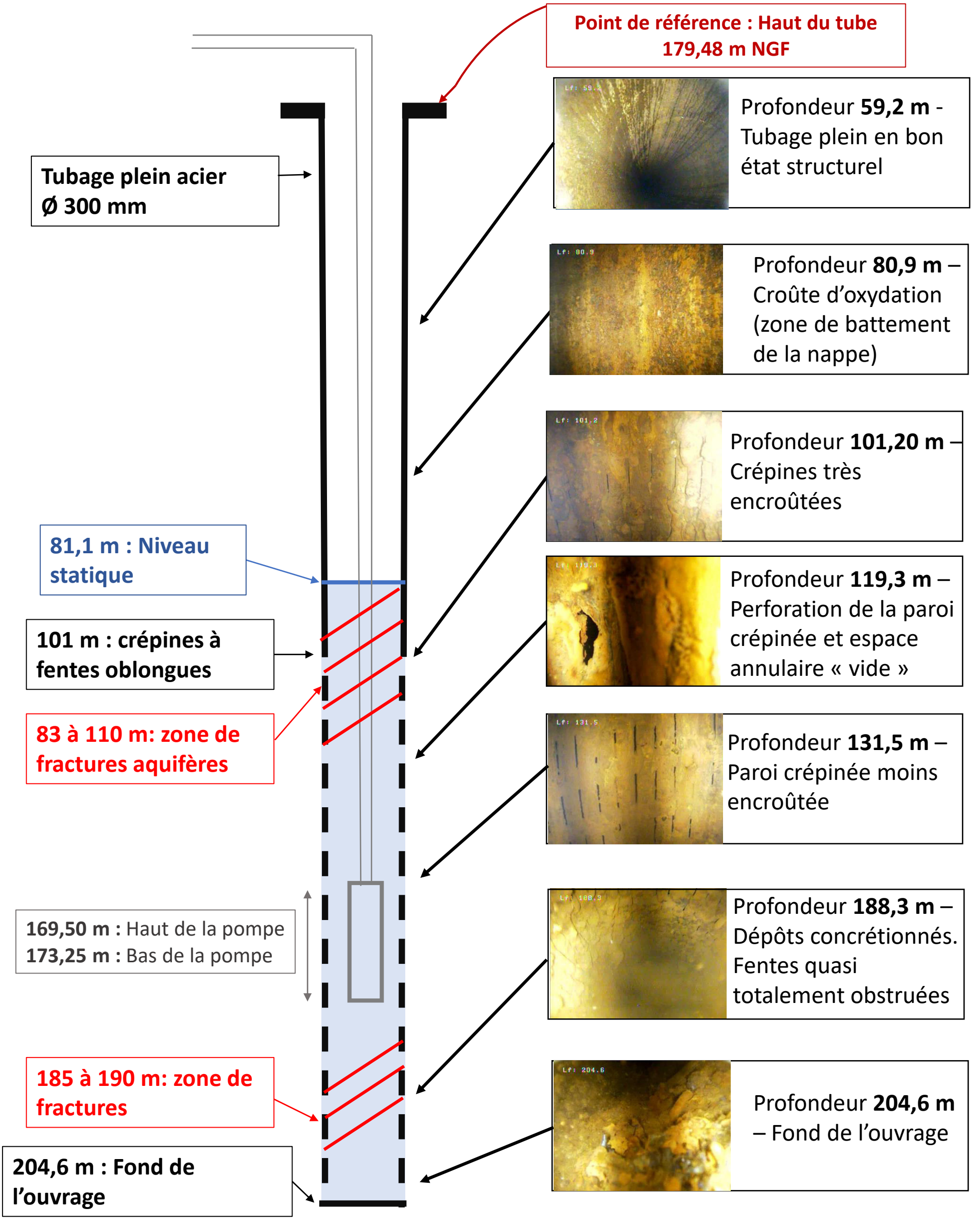


Annexe B :

Coupe technique et équipements d’exploitation du forage Puyricard N°2

(2 pages)

Forage Puyricard
Inspection vidéo du 11 octobre 2018



3.5- Equipements d'exploitation

- **Débit d'exploitation :** 105 m^3/h

- **Pompe**

Marque : KSB
Type : UPA 200B-130/11 + UMA 200B 90/21 (moteur - 88 kW)
Diamètre : 8"
NPSH* : ≈ 5.50 mètres (à Q=105 m^3/h)

Ancienne position : 174.60 m/repère (sommet pompe)
178.35 m/repère (base pompe)
Arrêtée le : 02/10/2018, à 08h00
Démontée le : 02/10/2018, à 12h30

Nouvelle position : 169.50 m/repère (sommet pompe)
173.25 m/repère (base pompe)
Remise en place le : 11/10/2018, à 17h45

** NPSH (net positive suction head) : charge nette requise à l'aspiration*

- **Colonne d'exhaure**

Nature : acier - revêtement époxy
Type de connexion : raccords rapides type Hagusta
Diamètre : 6"5/8 (DN150)
Connexion pompe : raccord vissé 5"
Connexion refoulement : bride DN150

Détails des équipements d'exploitation reposés* :

N°	Longueur (m)	Profondeur (m/rep)	Observations particulières
1	0.55	0 - 0.55	manche de tête
2 à 34	5.10 x 33	0.55 - 168.85	33 tubes de 5.10 ml
35	0.65	168.85 - 169.50	manchette de pompe
36	3.75	169.50 - 173.25	pompe

** Un élément tubé de 5.10 ml a été retiré de la colonne d'exhaure lors de la remise en place des équipements d'exploitation en fin d'intervention.*

Commune : Cuges-les-Pins (13)

Forage : "Puyricard F2"

Date d'intervention : 11/10/2018

Chambre de pompage - en acier - diamètre 300/312 mm (partie 1/2)

Zone émergée
Légers dépôts d'oxydation

Dépôts d'oxydation

Dépôts d'oxydation

Tubage en bon état structurel

Dépôts d'oxydation

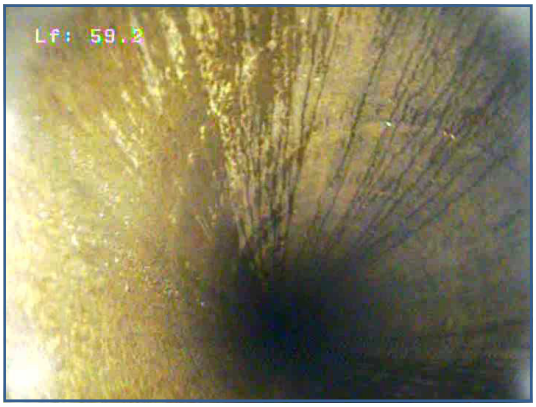
Dépôts d'oxydation

Commune : Cuges-les-Pins (13)

Forage : "Puyricard F2"

Date d'intervention : 11/10/2018

Chambre de pompage - en acier - diamètre 300/312 mm (partie 2/2)



Tubage en bon état structurel

Dépôts d'oxydation

Dépôts d'oxydation

Croûte d'oxydation plus épaisse
Zone de battement de la nappe

Zone immergée
Fine croûte de dépôts et nodules

Pellicule de dépôts

Commune : Cuges-les-Pins (13)

Forage : "Puyricard F2"

Date d'intervention : 11/10/2018

Colonne captante - en acier - diamètre 300/312 mm (partie 1/2)

Sommet des **crépines, à fentes oblongues**
Nombreux dépôts croncrétionnés

Crépines très encroûtées
Fentes en grande partie obstruées

Nombreux dépôts croncrétionnés
Fentes en grande partie obstruées

Perforation de la paroi crépinée à 119.30 m
Espace annulaire "vide"

Paroi crépinée moins encroûtée
Fentes majoritairement dégagées

Nombreux dépôts croncrétionnés
Fentes majoritairement obstruées

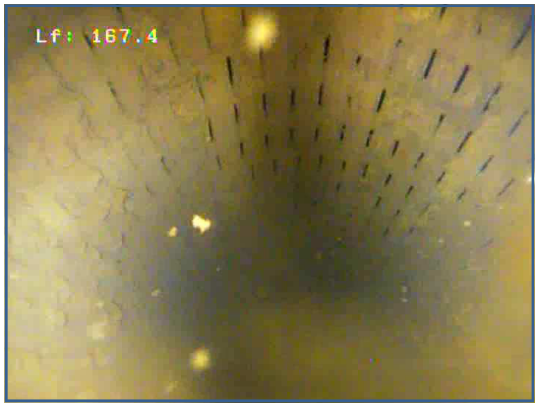
Commune : Cuges-les-Pins (13)

Forage : "Puyricard F2"

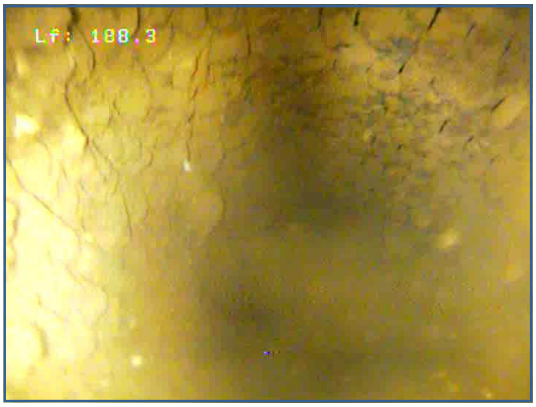
Date d'intervention : 11/10/2018

Colonne captante - en acier - diamètre 300/312 mm (partie 2/2)

Fentes majoritairement dégagées



Paroi crépinée moins encroûtée
Fentes majoritairement dégagées



Très nombreux dépôts concrétionnés
Fentes quasi-totalement obstruées

Paroi crépinée très encroûtée
Fentes totalement obstruées

Concrétions imposantes sur les parois
réduisant la section de l'ouvrage

Fond de l'ouvrage atteint à - 204.60 m/repère

Annexe C :

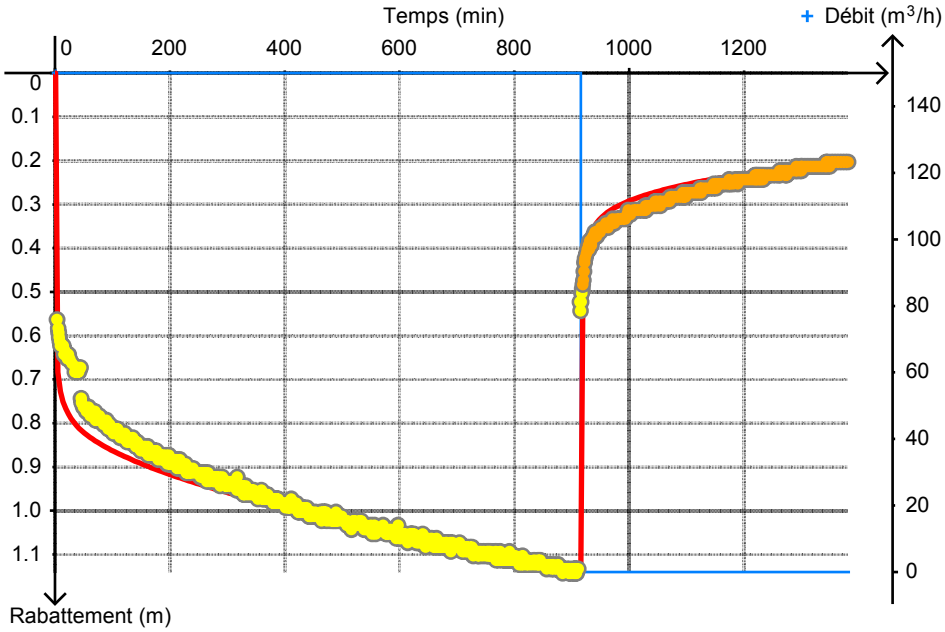
Interprétation du pompage longue durée (logiciel OUIAP)

(1 page)

Puyricard F2

Type d'ouvrage	Puits

Rayon d'observation	0.15 m



Légende	
	Rabattement mesuré
	Remontée mesurée
	Débit
	Courbe théorique

Interprétation à l'aide de la solution	Theis
Type aquifère	Captif
Transmissivité	6.30×10^{-2} m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	1.00 (-)
Coefficient d'ajustement de Nash -Sutcliffe	0.98 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Limite 1	Étanche
Distance à la première limite	25.90 m
Limite 2	Étanche
Distance à la deuxième limite si présente	30.00 m

→ Pertes de charge quadratiques	
Coefficient de pertes de charges quadratiques	175 s^2/m^5

Fiche signalétique

Rapport

Titre : Diagnostic et évaluation de la productivité du forage de Puyricard n°2 à Cuges-les-Pins (13) - Compte rendu des pompages d'essais

Numéro et indice de version : n° 97173/A
Date d'envoi : Janvier 2019 Nombre d'annexes dans le texte : 2
Nombre de pages : 30 Nombre d'annexes en volume séparé *:* 0
Diffusion (nombre et destinataires) : *1 ex. client (pdf)*

Client

Coordonnées complètes : **SPL L'EAU DES COLLINES**
140 Avenue du Millet
Z.I Les Paluds
13785 Aubagne Cedex

Noms et fonctions des Interlocuteurs : M. Marthos - Directrice générale

Antea Group

Unité réalisatrice : SEAU

Nom des intervenants et fonction remplie dans le projet :

Interlocuteur commercial, responsable du projet : Nicolas BLANCHOIN

Auteurs : Anna Schleich et Thibault PELLEGRINI

Secrétariat : Marie-Laure ANTONUCCI

Qualité

Contrôlé par : *Nicolas BLANCHOIN*
Date : Décembre *2018*

N° du projet : PACP150185
Références et date de la commande : LRAR n°1A13438541823

Mots-clés : forages, pompages, Cuges-les-Pins.