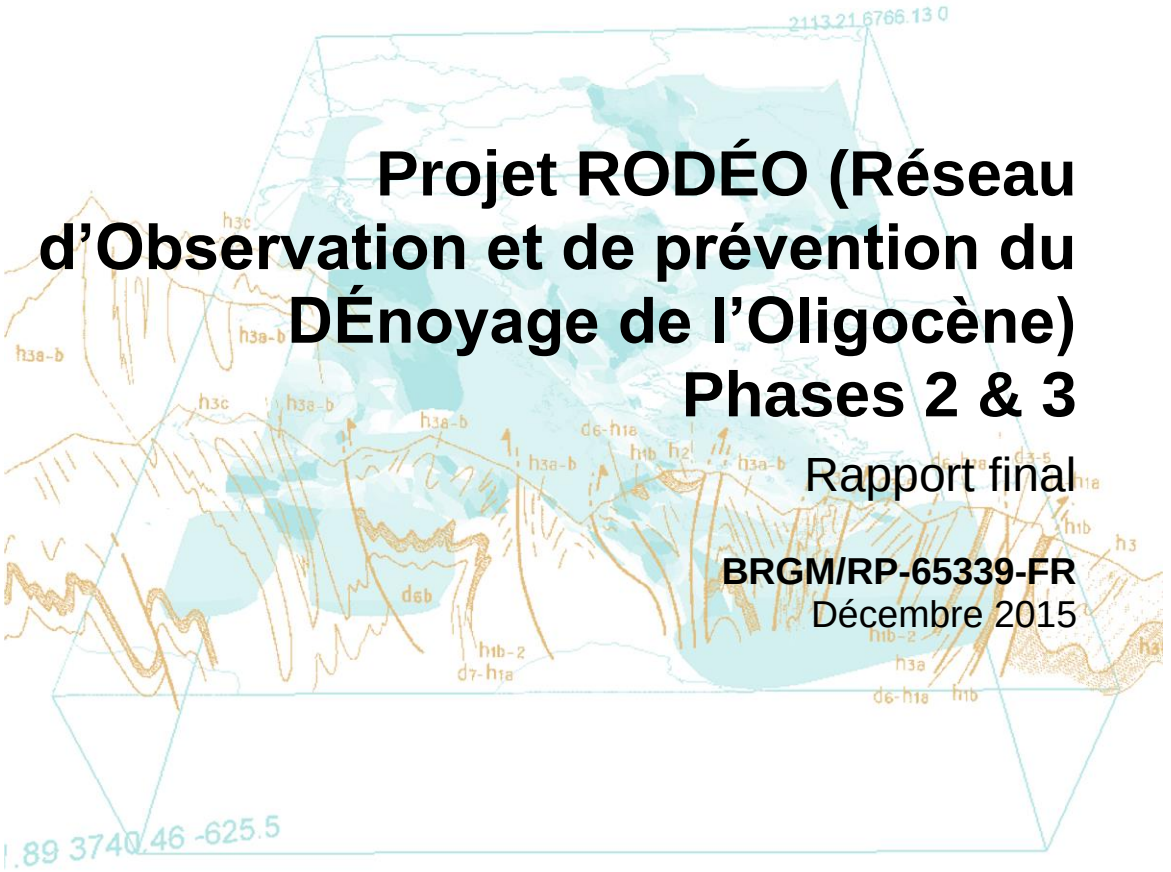
Document public

Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du DÉnoyage de l'Oligocène) Phases 2 & 3

Rapport final

BRGM/RP-65339-FR
Décembre 2015



AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE DU DEVELOPPEMENT DURABLE

Gironde LE DEPARTEMENT gironde.fr

Géosciences pour une Terre durable brgm

Document public

Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du DÉnoyage de l'Oligocène) Phases 2 & 3

Rapport final

BRGM/RP-65339-FR
Décembre 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM PSP12AQI08

M. Saltel, B. Dewandel et J. Bodinniet
Avec la collaboration de
F. Capéran, E. Husson, T. Gutierrez et A. Hoareau

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Alexis Gutierrez	Nom : Nicolas PEDRON Directeur du BRGM Aquitaine
Date : 04/12/2015	Date : 04/12/2015

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE DU DEVELOPPEMENT DURABLE

Gironde LE DEPARTEMENT gironde.fr

Géosciences pour une Terre durable brgm

Mots-clés : SAGE, atlas, risques, aquifères profonds, Oligocène, dénoyage, réseau d'observation, jaugeages, carte piézométrique, Gironde

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

M. Saltel, B. Dewandel et J. Bodinniet avec la collaboration de F. Capéran, E. Husson, T. Gutierrez et A. Hoareau (2015) - Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du DÉnoyage de l'Oligocène) Phases 2 & 3. Rapport final. BRGM/RP-65339-FR, 93 p., 62 ill., 10 tabl., 8 ann.

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

Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le cadre du SAGE « Nappes profondes de Gironde » (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) approuvé en 2003 pour sa version initiale et en 2013 pour sa version révisée (SMEGREG, 2013) et relève plus particulièrement de la disposition 5 sur l'Atlas des zones à risque. Cet atlas évolutif a pour objectif d'identifier, de caractériser et de protéger les secteurs où les aquifères profonds présentent une problématique hydrogéologique forte. L'élaboration de cet atlas s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Une première étude réalisée en 2005 (Corbier et al., 2005) avait permis d'établir un bilan des connaissances sur 5 zones identifiées par le groupe d'expert de la Commission Locale de l'Eau (CLE) et de confirmer ou d'infirmer l'existence d'un risque : dénoyage du toit de l'Oligocène bordelais, domaine minéralisé de l'Éocène, crête piézométrique de l'Éocène au droit de l'estuaire de la Gironde, salinisation de l'Éocène dans la zone médocaine, biseau salé dans le Miocène au niveau du bassin d'Arcachon.
- Une deuxième étude réalisée en 2010 (Saltel et al., 2010) a permis d'étudier plus en profondeur la problématique du dénoyage de l'Oligocène jugée prioritaire par la CLE. En effet, cette nappe d'intérêt stratégique est fortement influencée par les prélèvements, qui induisent depuis de nombreuses années un dénoyage progressif de certains secteurs susceptible de mettre en péril la ressource tant du point de vue quantitatif que qualitatif. Le travail réalisé dans le cadre de cette étude a abouti à la création d'un modèle hydrodynamique intégrateur des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le réservoir de l'Oligocène.

Ces derniers travaux ont permis d'évaluer plus finement l'extension de la zone dénoyée au cours du temps puis, à partir de simulations prospectives, de fournir des éléments techniques en vue d'arrêter un plan de gestion de la nappe de l'Oligocène. Ils ont également mis en évidence, au droit de la zone dénoyée, des lacunes dans le réseau de mesure de la nappe de l'Oligocène.

Plusieurs préconisations ont donc été formulées pour améliorer la connaissance et mieux suivre l'impact du futur plan de gestion de la nappe. Elles comprennent notamment :

- la réalisation de 6 piézomètres pour affiner la construction des cartes piézométriques dans ce secteur,
- une étude plus approfondie des interactions nappes / rivières par l'intermédiaire de jaugeages différentiels,
- la création d'une station de jaugeage.

Le projet **RODÉO** (**R**éseau d'**O**bservation et de prévention du **DÉ**noyage de l'**O**ligocène), cofinancé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le Conseil Départemental de la Gironde et le BRGM, correspond à la mise en œuvre de ces recommandations. Il a pour objectif de doter le Conseil Départemental de la Gironde et la CLE du SAGE Nappes profondes de Gironde, d'outils de suivi, de compréhension et de gestion de la problématique du dénoyage de la nappe de l'Oligocène au sud de l'agglomération bordelaise.

Lors de la phase 1 du projet (Saltel et al., 2012), 2 piézomètres ont été réalisés. Ces ouvrages, outre les données complémentaires qu'ils fournissent concernant la géologie locale, ont permis de confirmer qu'une partie du réservoir oligocène était bien désaturée au droit de leurs implantations validant ainsi la bonne représentativité du modèle hydrodynamique (niveaux simulés peu différents des niveaux observés). Cependant, les données recueillies indiquent que

ces secteurs étaient déjà libres sous couverture de la formation argileuse chattienne en 1980 (voir descriptif en annexe 1). Ces zones n'ont donc pas été dénoyées puisqu'elles n'étaient pas initialement captives. La zone dénoyée est donc à priori un peu plus étendue à l'ouest puisque le toit du réservoir est rencontré à une altitude plus élevé qu'initialement prévu. Par ailleurs, l'étude des interactions nappes rivières laissait supposer l'existence de pertes sur le ruisseau du Saucats.

La réalisation de 4 piézomètres complémentaires a permis d'améliorer la connaissance de la géométrie des réservoirs sur ce secteur stratégique. Les mesures piézométriques issues de ces nouveaux points ont permis de préciser l'extension de la zone dénoyée. Les charges mesurées au droit des piézomètres du Péloua et de la Migelane étant plus basses qu'attendu, il ressort que la zone dénoyée s'étend jusqu'au bourg de Saucats et occupe donc une surface plus importante qu'anticipé.

L'exploitation de la ligne des « 100 000 m³/j » [1]a peu à peu généré la formation d'une dépression piézométrique. La baisse de la piézométrie relative à la surexploitation de la ressource a entrainé le recul de la limite de captivité à l'ouest et le dénoyage du réservoir entrainant un changement d'état des conditions de la nappe (passant de captif à libre). La distribution des isopièzes a été fortement modifiée. Alors que l'écoulement initial de la nappe était orienté vers le nord-est en direction de la Garonne (Chamayou et al., 1975). Il existe maintenant une ligne de partage des eaux, coïncidant avec la zone d'affleurement du réservoir de l'Oligocène, qui sépare les écoulements orientés vers la Garonne de ceux orientés en direction de la ligne des « 100 000 m³/j ».

Par ailleurs, l'étude des interactions nappes/rivières par la réalisation de cartes piézométriques détaillée et par la mise en œuvre de mesures de débit réalisées de l'amont vers l'aval sur les cours d'eau du secteur (Saucats et Gât-Mort), confirment l'existence sur les zones d'affleurement de l'Oligocène, de pertes des cours d'eau en direction de la nappe. Ces pertes sont notamment relativement bien marquées sur le cours d'eau du Saucats.

En parallèle, les mesures réalisées par la DREAL Aquitaine sur ces deux cours d'eau ont permis de sélectionner le pont de la D 219 à Saint-Morillon sur le ruisseau du Gât-Mort comme site le plus opportun pour l'implantation d'une station hydrométrique. A noter que cette station est opérationnelle depuis la fin de l'année 2015.

Au final, la réalisation sur l'ensemble des phases du projet RODÉO de 6 piézomètres sur les communes de Saucats, La Brède, Cabanac-et-Villagrains et de Saint-Morillon permet de bénéficier de points de surveillance complémentaires qui vont servir à affiner la construction des cartes piézométriques dans ce secteur. Les paramètres hydrodynamiques issus de l'interprétation des pompages d'essais réalisés sur ces différents forages et le calage dans le modèle de ces chroniques issues de ces piézomètres vont participer à une meilleure restitution locale des charges dans ce domaine à fort enjeu. In fine, ces points d'observation permettront de mesurer l'effet sur la piézométrie des politiques de gestion des prélèvements des forages de la ligne des « 100 000 m³/jour ». Par ailleurs, ces ouvrages pourront également être utilisés comme point de suivi de la qualité en suivant l'évolution des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et constater ou non une dégradation de la qualité de ces dernières du fait notamment du dénoyage de la nappe.

[1] Le terme ligne des 100 000 m³/j correspond à la capacité maximum de la conduite (36,5 millions de m³/an). Dans les faits, ce champ captant n'a jamais atteint de tels débits. Le volume annuel maximum atteint était de 10 millions de m³/an.

Sommaire

1. Introduction 11

2. Réalisation de 4 piézomètres 13

2.1. FORAGE DE DARIET 08513X0050/PZ 13
2.1.1. Localisation du site 13
2.1.2. Compte-rendu des travaux réalisés sur le forage 14
2.1.3. Description géologique des terrains traversés 16
2.1.4. Interprétation des diagraphies 17

2.2. FORAGE DE GASSIES 08513X0049/PZ 21
2.2.1. Localisation du site 21
2.2.2. Compte rendu des travaux réalisés sur le forage 21
2.2.3. Description géologique des terrains traversés 24
2.2.4. Interprétation des diagraphies 25

2.3. FORAGE DE PELOUA 08276X0138/PZ 28
2.3.1. Localisation du site 28
2.3.2. Compte-rendu des travaux réalisés sur le forage 29
2.3.3. Description géologique des terrains traversés 34
2.3.4. Interprétation des diagraphies 35

2.4. FORAGE DE LA MIGELANE 08276X0139/PZ 38
2.4.1. Localisation du site 38
2.4.2. Compte-rendu des travaux réalisés sur le forage 38
2.4.3. Description géologique des terrains traversés 41
2.4.4. Interprétation des diagraphies 42

2.5. APPORTS DES NOUVEAUX FORAGES 45

3. Apports de l'interprétation des pompages d'essais 47

3.1. METHODOLOGIE UTILISEE POUR INTERPRETER LES POMPAGES DE LONGUE DUREE 47

3.2. FORAGE DE MOULIN LAGUS 49
3.2.1. Essais par paliers de débit 51
3.2.2. Essais de pompage de longue durée 52

3.3. PIEZOMETRES RODÉO 62
3.3.1. Essais par paliers de débit 62
3.3.2. Essais de pompage de longue durée 63

4. Interactions eaux de surface - eaux souterraines 74

4.1. PIEZOMETRIE DE LA NAPPE DE L'OLIGOCENE 74
4.1.1. Méthodologie 75
4.1.2. Résultats 76

4.2. MESURE DE DEBITS DES COURS D'EAU 79
4.2.1. Méthodologie 79
4.2.2. Jaugeage sur le Saucats 80
4.2.3. Jaugeages sur le Gât-Mort 83

4.3. MISE EN PLACE D'UNE STATION DE JAUGEAGE SUR LE COURS D'EAU DU GAT-MORT 85

5. Conclusions et perspectives 89

6. Bibliographie 91

Liste des figures

Illustration 1 : Localisation de la zone d'intérêt. 11
Illustration 2 : Carte de localisation du site de forage de "Dariet" à Saint-Morillon. 13
Illustration 3 : Coupe technique du forage de "Dariet" à Saint-Morillon. 15
Illustration 4 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de Dariet (Saint-Morillon). 17
Illustration 5 : Distribution des teneurs en uranium dans les eaux (ng/l). 19
Illustration 6 : Coupe géologique du sondage de Dariet à Saint-Morillon. 20
Illustration 7 : Carte de localisation du site de forage "Gassies" à Cabanac-et-Villagrains. 21
Illustration 8 : Coupe technique du forage de "Gassies" à Cabanac-et-Villagrains. 23
Illustration 9 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de Gassies (Cabanac-et-Villagrains). 25
Illustration 10 : Coupe géologique du sondage de Gassies à Cabanac-et-Villagrains. 27
Illustration 11 : Carte de localisation du site de forage du "Péloua" à Saucats. 28
Illustration 12 : Tricône embourbé par les argiles vertes de l'éponte chattienne. 29
Illustration 13 : Composition des cimentations réalisées après la première cimentation. 30
Illustration 14 : Billes de sobranite. Facilitent le colmatage des pertes. 30
Illustration 15 : Packer utilisé lors de la phase de cimentation sous pression. 31
Illustration 16 : Schéma du dispositif de cimentation sous pression. 32
Illustration 17 : Coupe technique du forage "Péloua" à Saucats. 33
Illustration 18 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de Peloua. 35
Illustration 19 : Coupe géologique du sondage de Péloua à Saucats. 37
Illustration 20 : Carte de localisation du site de forage "Migelane" à La Brède. 38
Illustration 21 : Coupe technique du forage de la "Migelane" à La Brède. 40
Illustration 22 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de la Migelane (La Brède). 42
Illustration 23 : Coupe géologique du sondage de la Migelane à La Brède. 44
Illustration 24 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais. 47
Illustration 25 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. tD : temps adimensionnel, sD (courbe pleine) et sD' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel). 48
Illustration 26 : Données du suivi du niveau piézométrique et des prélévements par pompage sur le forage de Moulin Lagus (1974-2012), et positionnement des essais par pompage disponibles (1970 ; 1996 ; 2005 et 2008). La hauteur de la barre montre le rabattement maximum durant les essais. 50
Illustration 27 : Interprétation des essais par paliers de débit réalisés sur le forage de Moulin Lagus en 1996 et 2005 ; paliers non-enchainés. Sont aussi figurés les rabattements au bout d'une heure de pompage des tests de longue durée de 1970, 1996, 2005 et 2008. 52
Illustration 28 : Diagnostic de l'essai réalisé en 1970 au forage Moulin Lagus (27/07/1970). Aquifère captif. 54
Illustration 29 : Diagnostic des essais réalisés en 2014 au forage Moulin Lagus. Aquifère libre. 54
Illustration 30 : Comparaison des diagnostics entre l'essai de 1970 et ceux postérieurs à 1996. 55

Illustration 31 : Modèles à effet de drainance d'un niveau semi-peméable sus-jacent, anisotropie de perméabilité 3-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales, captage partiel du puits (ou du piézomètre). Modifié des solutions de Hantush (1964) et Hunt et Scoot (2007). Dans la solution de Hantush $T_0 \rightarrow \infty$ ou $Sy \rightarrow \infty$. 56

Illustration 32 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé du 27-29/07/1970. Modèle : Hunt et Scott modifié. 57

Illustration 33 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé du 20-22/03/1996. Modèle : Hunt et Scott modifié. 58

Illustration 34 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé du 12-15/08/2005. Modèle : Hunt et Scott modifié. 58

Illustration 35 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé le 16/08/2005. Modèle : Hunt et Scott modifié. 58

Illustration 36 : Modélisation du rabattement aux forages de Moulin Lagus (graphe du haut) et Saucats Bourg (graphe de bas) ; essais réalisés du 03 au 05/09/2014. Modèle : Hunt et Scott modifié. 59

Illustration 37 : Modélisation des rabattements au forage de Moulin Lagus. Essais de 1970, 1996, 2005,2008 et 2014. Modèle : Hunt et Scott modifié. Représentation arithmétique. 60

Illustration 38 : Modélisation des rabattements au forage de Moulin Lagus. Zoom sur les essais de 2008 (graphe du haut) et 2014 (graphe du bas). Modèle : Hunt et Scott modifié. Représentation arithmétique. 61

Illustration 39 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Jacoulet - 08277X0312. 63

Illustration 40 : Modélisation des rabattements au forage de Jacoulet - 08277X0312. 64

Illustration 41 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Moulin d'Augey - 08276X0131. 65

Illustration 42 : Modélisation des rabattements au forage de Moulin d'Augey - 08276X0131. 66

Illustration 43 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Dariet - 08513X0050. 67

Illustration 44 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Gassies - 08513X0049. 68

Illustration 45 : Evolution des rabattements et des débits lors des essais de pompage sur le forage du Péloua - 08276X0138. 69

Illustration 46 : Evolution des rabattements et de la pression barométrique lors des essais de pompage sur le forage du Péloua - 08276X0138. 69

Illustration 47 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage du Péloua - 08276X0138. 70

Illustration 48 : Modélisation des rabattements au forage du Péloua - 08276X0138. 71

Illustration 49 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de la Migelane - 08276X0139. 72

Illustration 50 : Modélisation des rabattements au forage de la Migelane - 08276X0139. 73

Illustration 51 : Carte piézométrique 1975 de la nappe de l'Oligocène (Chamayou et al., 1975). 76

Illustration 52 : Données du suivi du niveau piézométrique au forage de La Cape à Martillac (08276X0091). 77

Illustration 53 : Dénoyage du toit de la nappe de l'Oligocène - octobre 2014. 78

Illustration 54 : Schéma illustrant la méthode de travail pour déterminer le débit par exploration du champ de vitesse. 79

Illustration 55 : Localisation des différentes stations de jaugeage, le long du Saucats, avec leur code hydro associé. 80

Illustration 56 : Évolution des valeurs de débit le long du Saucats. 81

Illustration 57 : Piézométrie de la nappe de l'Oligocène sur le ruisseau du Saucats - octobre 2014. 82

Illustration 58 : Localisation des différents points de mesures de jaugeage le long du Gât-Mort avec leur code hydro associé. 83
Illustration 59 : Évolution des valeurs de débit le long du Saucats. 84
Illustration 60 : Piézométrie de la nappe de l'Oligocène sur le ruisseau du Gât-Mort - octobre 2014. 85
Illustration 61 : Site potentiel pour l'installation d'une station de jaugeage sur le Saucats. 86
Illustration 62 : Site potentiel pour l'installation d'une station de jaugeage sur le Gât-Mort. 86

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des opérations d'isolations avant tubage. 14
Tableau 2 : Comparatif des mesures piézométriques réelles et estimées par le modèle hydrogéologique. 45
Tableau 3 : Essais par pompage disponible au forage de Moulin Lagus ; 1970, 1996, 2005, 2008 et 2014. 50
Tableau 4 : Paramètres du modèle à effet de drainance (modèle modifié de Hunt et Scott, 2007). 56
Tableau 5 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de Moulin Lagus. Cf. tableau 2 pour l'explication des paramètres. 62
Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de Jacoulet - 08277X0312. 64
Tableau 7 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de Moulin d'Augey - 08276X0131. 66
Tableau 8 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage du Péloua - 08276X0138. 70
Tableau 9 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de la Migelane - 08276X0139. 72
Tableau 10 : Récapitulatif des données provenant des forages « RODÉO ». 90

Liste des annexes

Annexe 1 Caractéristiques du réservoir de l'Oligocène 95
Annexe 2 Coupe géologique et technique du forage de Moulin Lagus (BSS : 08276X0090/F) - photos du réservoir issues des inspections par caméra 101
Annexe 3 Suivi des niveaux et des débits sur les ouvrages Lagus et Saucats durant les essais réalisés en septembre 2014 sur le forage Lagus 105
Annexe 4 Essai par paliers de débit - estimation des coefficients B et C 109
Annexe 5 Diagnostic des essais réalisés en 1996 et 2005 au forage Moulin Lagus. Aquifère libre 115
Annexe 6 Campagne de mesure piézométrique sur la nappe de l'Oligocène - Tableau synthétique 119
Annexe 7 Cartes piézométriques 123
Annexe 8 Campagne de mesures de débit sur les cours d'eau du Saucats et du Gât-Mort - Tableaux synthétiques 135

1. Introduction

La zone d'étude se situe au sud de l'agglomération bordelaise (Illustration 1). L'objet d'étude correspond à l'aquifère de l'Oligocène qui constitue, avec celui de l'Éocène, une des principales ressources en eau potable du département de la Gironde. Dans ce secteur, la zone de captivité de l'aquifère de l'Oligocène a subi une réduction progressive en raison de l'exploitation du réservoir pour l'alimentation en eau potable. Dans la suite de ce rapport, nous employons le terme de dénoyage pour signifier le passage d'une zone initialement captive à libre. Il ne s'agit pas du dénoyage complet du réservoir de l'Oligocène mais d'une frange située sous son toit, avec des conséquences sur son fonctionnement hydrodynamique.

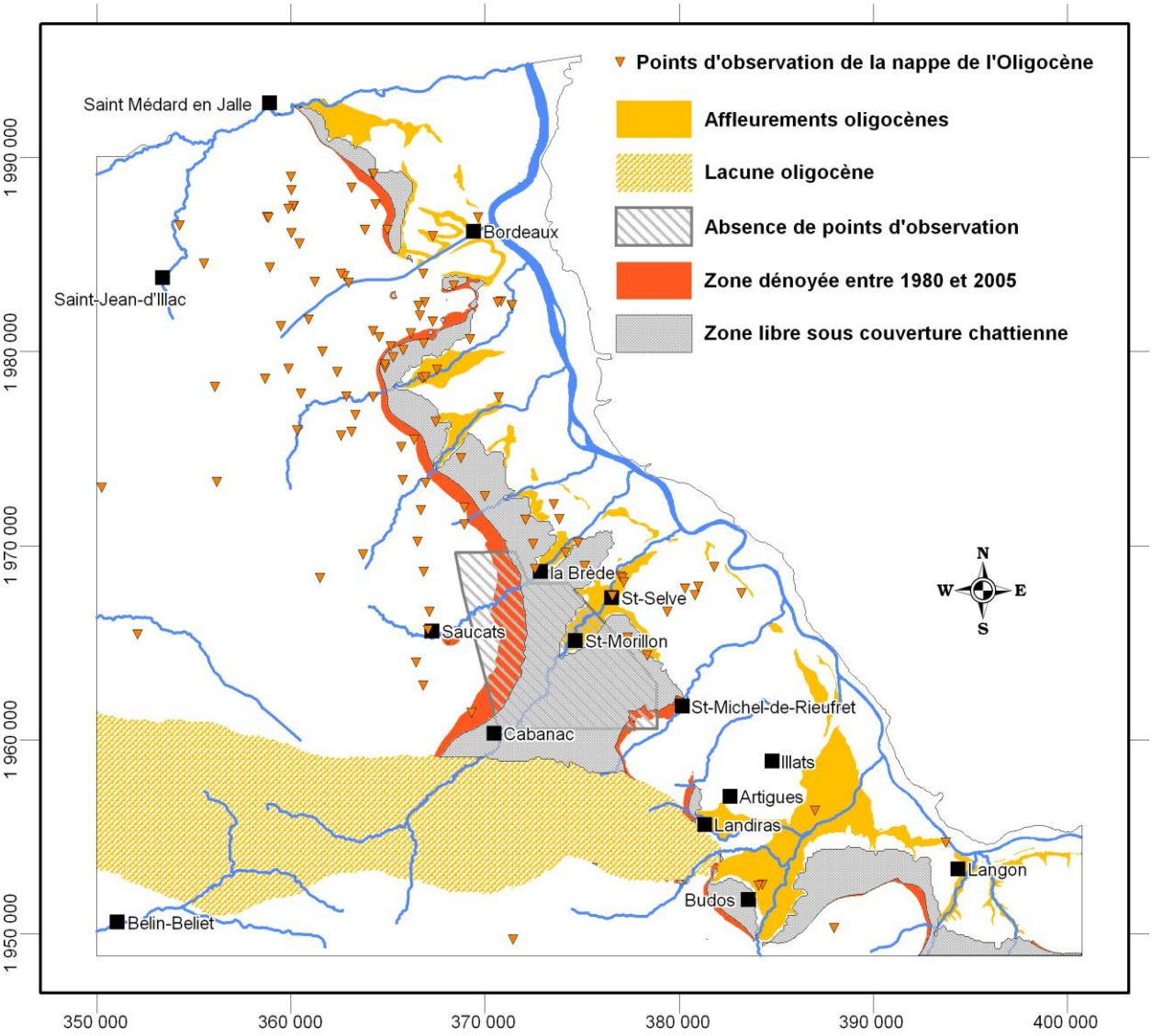


Illustration 1 : Localisation de la zone d'intérêt.

Cette étude (PSP12AQI08) s'inscrit dans le cadre du SAGE « Nappes profondes de Gironde » (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et relève plus particulièrement de la disposition 5 portant sur la réalisation d'un atlas évolutif des zones à risques.

Elle s'inscrit dans le prolongement du travail d'élaboration de cet atlas qui s'est déroulé en deux phases [(Corbier et al., 2005) ; (Saltel et al., 2010)]. A la suite de ces travaux, des recommandations ont été faites pour améliorer la connaissance et mieux suivre l'impact du futur plan de gestion de la nappe de l'Oligocène en lien avec le SAGE Nappes profondes de Gironde.

Un comité de pilotage de l'étude a été mis en place dès le début du programme. Il regroupe les financeurs ainsi que les acteurs concernés par le projet (SMEGREG, Bordeaux Métropole, Communauté de Communes de Montesquieu, DREAL Aquitaine). Son rôle a été de valider, entre autres, les options d'implantation des nouveaux ouvrages de mesures et des stations de jaugeage.

Le présent rapport rend compte des travaux réalisés dans le cadre des phases 2 & 3 de ce projet. Il décrit :

- la création de 4 piézomètres dédiés à l'amélioration des connaissances du dénoyage du toit de la nappe au sud de l'agglomération bordelaise ;
- l'interprétation des pompages d'essais effectués sur le forage d'alimentation en eau potable de Moulin Lagus (08276X0090/F, commune de Saucats) et sur les piézomètres réalisés dans le cadre du projet RODÉO ;
- la réalisation de mesures de débit en vue de la future implantation d'une ou de plusieurs stations de jaugeages sur les cours d'eau du Saucats et du Gât-Mort ;
- l'élaboration de cartes piézométriques détaillées du secteur afin de mieux caractériser les écoulements de la nappe Oligocène et les échanges avec les principaux cours d'eau.

2. Réalisation de 4 piézomètres

2.1. FORAGE DE DARIET 08513X0050/PZ

2.1.1. Localisation du site

Le forage est implanté sur la commune de Saint-Morillon, au lieu-dit « Dariet », sur la parcelle n°366 de la section C. Le site est localisé à moins de 2 km au sud du bourg de Saint-Morillon (Illustration 2). Les coordonnées du forage en Lambert 93 sont :

X = 422 441,6 m Y = 6 398 875,5 m Z (sol) = 47,33 m NGF

Le nivellement a été fait par GPS. Le BRGM Aquitaine dispose en effet d'un système DGPS[2]. La mesure des points a été faite en RTK, permettant d'obtenir en temps réel les coordonnées XYZ des forages avec une précision centimétrique. Ici en raison de la couverture végétale, la qualité du signal n'a pas permis d'obtenir une bonne précision sur le terrain malgré le post-traitement. La précision en X/Y pour ce point est de 1,06 m et de 1,32 m en Z.

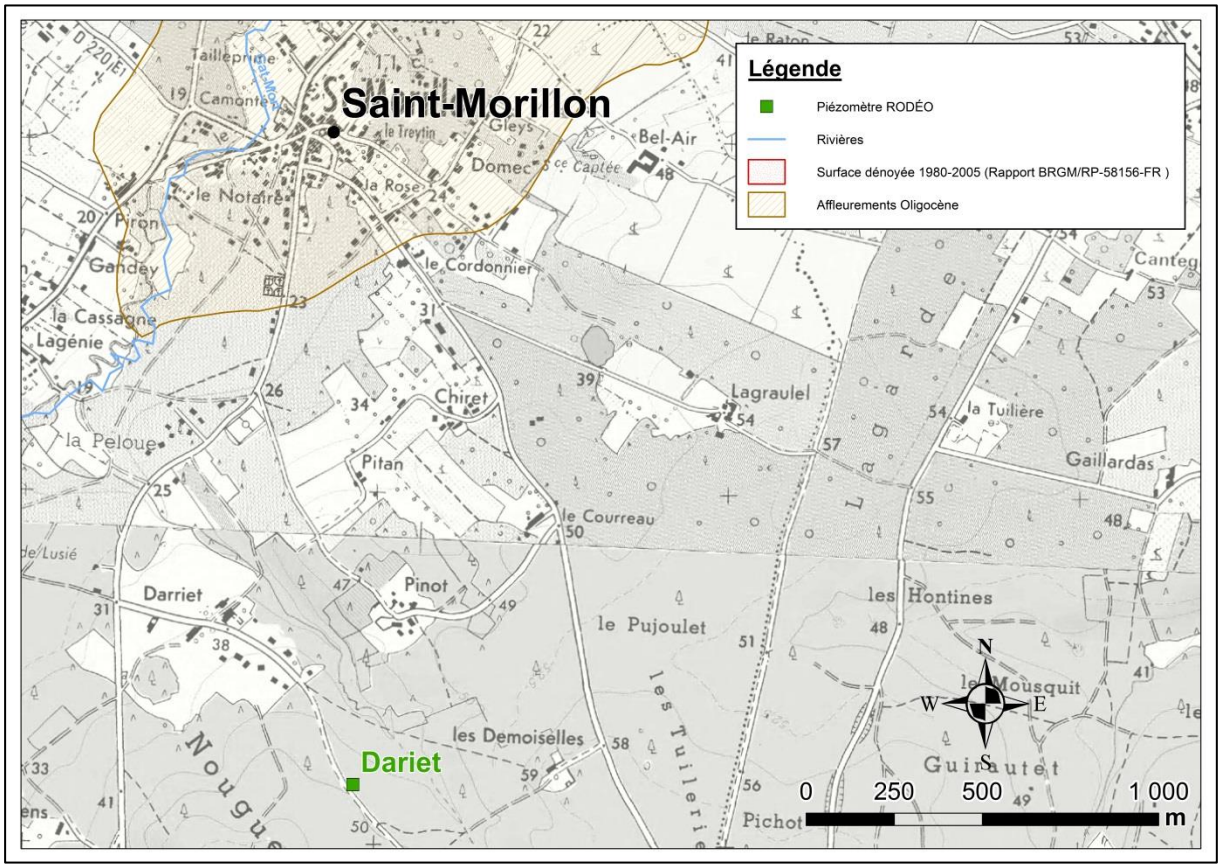


Illustration 2 : Carte de localisation du site de forage de "Dariet" à Saint-Morillon.

[2] DGPS de la marque Trimble®, composé d'une base R10 et d'un mobile R10

2.1.2. Compte-rendu des travaux réalisés sur le forage

Le chantier a débuté le 15 novembre 2013 et a pris fin le 26 novembre 2013. Le forage a été réalisé par la société Aquifor. La technique utilisée est le rotary, le fluide de circulation étant à base de polymères. Du fait de l'isolement du sondage vis-à-vis d'infrastructures permettant un approvisionnement en eau, l'alimentation en eau du chantier a été réalisée à partir d'un affluent du Gât-Mort situé à moins de 200 m. Les campagnes de jaugeages réalisées lors de cette étude montre un débit de l'ordre de 10 m³/h pour ce cours d'eau.

L'exécution du forage principal a débuté en diamètre 12''1/4 (311 mm) de 0 à 9 m de profondeur. Un premier tubage acier de 9"5/8 (244 mm) a été mis en place et ancré par cimentation inverse. Cette opération a permis d'isoler et de stabiliser les graviers des terrasses de Léognan et les Faluns calcaires de l'Aquitanien. Le forage s'est poursuivi en reconnaissance au diamètre 8''1/2 (216 mm) de 9 m à 51 m de profondeur. Des pertes partielles ont été constatées de 16 m à 26 m de profondeur (≈3 m³/h). A partir de 26 m de profondeur la circulation du fluide de forage a été complétement perdue et le forage s'est poursuivie en perte totale jusqu'à 51 m de profondeur. A noter qu'à 40,5 m de profondeur, une chute du train de tige de 50 cm a été observée, mettant en évidence l'existence d'une cavité karstique.

Un écoulement au sein du forage a été observé se traduisant par le bruit d'une « chute d'eau » indiquant l'écoulement d'un niveau producteur depuis la nappe de l'Aquitanien ver la nappe sus-jacente de l'Oligocène dont le niveau statique est plus bas. Les argiles grises verdâtres dans lesquelles le premier tubage s'est ancré ne correspondaient pas à la base du réservoir de l'Aquitanien. En effet, d'autres calcaires gréseux ont été rencontrés de 12 à 15,5 m. Une étude de la microfaune (Eradata, 2014) des déblais de forages a permis de déterminer plus précisément la stratigraphie des dépôts et de confirmer la présence de l'aquifère de l'Oligocène à 26 m de profondeur (au droit des pertes totales). Une isolation des ces horizons a donc été nécessaire. Elle a impliqué de masquer les venues d'eau comprises entre 12 et 15,5 m de profondeur en comblant le forage avec du gravier jusqu'à 16 m puis en réalisant une première cimentation (350 l de laitier de densité 1,9). Plusieurs opérations similaires ont été réalisées et sont synthétisées dans le tableau 1.

Opération	Gravier	Top gravier (m/sol)	Ciment	Top ciment (m/sol)	Reforage ciment	Reforage gravier
1ère	**3,8 T**	**16 m**	350 L	12 m	12-16 m	16-20 m
2ème	**-**	**20 m**	400 L	15 m	15-20m	20-24 m
3ème		**24 m**	400 L	17 m	17-24 m	24 -32 m
4ème		**32 m**	400 L	22 m	22 -29 m	-

Tableau 1 : Description des opérations d'isolations avant tubage.

Ces opérations préalables ont permis la mise en place d'un tubage PVC 163/180 mm ancré à 29 m de profondeur et la cimentation de l'espace inter annulaire par cimentation inverse. Une fois l'aquifère de l'Aquitanien complétement isolé, le forage a repris pour remonter le gravier introduit. Le forage s'est arrêté à 52 m de profondeur. L'équipement final de l'ouvrage en piézomètre de surveillance de la nappe de l'Oligocène a été réalisé de la manière suivante (Illustration 3) :

- mise en place d'une colonne de captage PVC 112/125 mm, avec tube décanteur plein de 48 à 52 m, crépine de 32 m à 48 m profondeur et un tube plein remontant à la surface ;
- rebouchage du fond de l'ouvrage et de l'espace annulaire avec du gravier 1 - 2.5 mm.

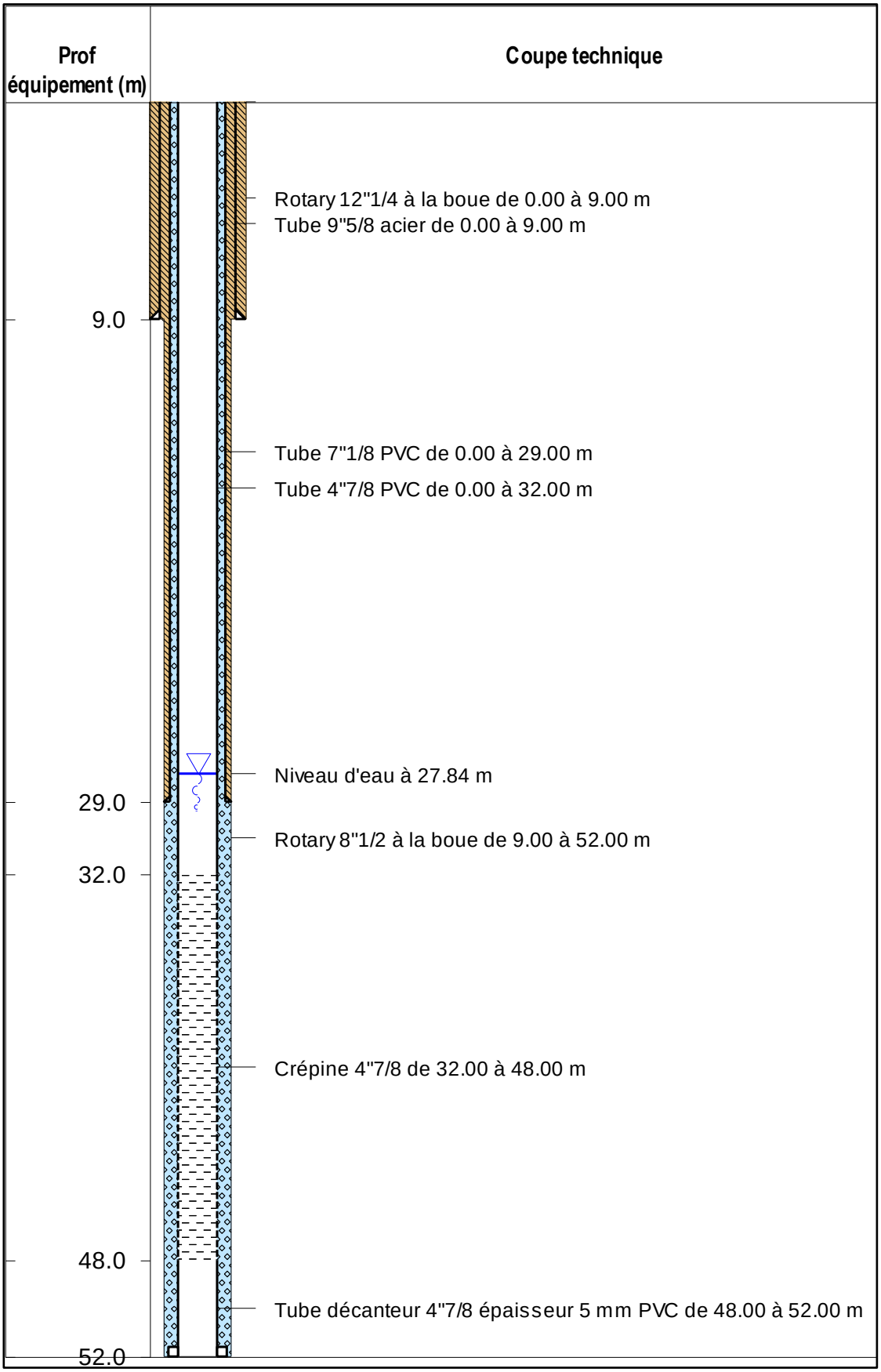


Illustration 3 : Coupe technique du forage de "Dariet" à Saint-Morillon.

2.1.3. Description géologique des terrains traversés

Le suivi géologique par observation des déblais tous les mètres a permis de dresser la coupe géologique suivante, dont l'établissement et l'interprétation ont été étayés par l'examen des diagraphies gamma ray, résistivité et les temps d'avancement :

Aquifère du Plio-Quaternaire (1,6 m d'épaisseur)

0 à 0,7 m : Petits graviers (Terrasse de Léognan).

0,7 à 1,6 m : Sable, sable argileux puis argile sableuse ocre à la base avec petits blocs de falun (Terrasse de Léognan).

Aquifère de l'Aquitanien (13,9 m d'épaisseur)

1,6 à 2,5 m : Calcaire gris à ocre non coquillier (niveau lacustre supposée, peut-être corrélable avec le sommet de l'Arriey : Aquitanien sup.).

2,5 à 4 m : Falun à Gastéropodes (turritelles complètes) et lamellibranches.

4 à 4,5 m : Falun calcaire gris verdâtre à ocres à gastéropodes, lamellibranches, intraclastes et niveaux argileux.

4,5 à 7 m : Argile calcaire induré verte-kaki ou marne.

7 à 8,3 m : Falun calcaire gris verdâtre à noir à niveaux de matière organiques.

8,3 à 10,5 m : Argile grise verdâtre à bleue turquoise à matière organique et pyrite - Datation micropal Aquitanien (SBZ24).

10,5 à 11 m : Calcaire crème orangé à gris.

11 à 12 m : Marne grise à coquilles blanches (lamellibranches).

12 à 13,5 m : Calcaire gréseux / Grès à ciment calcaire gris à gris vert à inter-bancs marneux - Datation micropal : Aquitanien (SBZ 24).

13,5 à 14 m : Niveau marneux, passage progressif à des calcaires gréseux.

14 à 15,5 m : Calcaire gréseux / Grès à ciment calcaire gris à gris vert.

Eponte du Chattien (10 m d'épaisseur)

15,5 à 25,5 m : Alternance de marne et de calcaire gréseux / Grès à ciment calcaire gris foncé très coquillier : Faune constituée de lamellibranches (tellines de très petite taille et entières), rare gastéropodes et oursins ronds.

Aquifère de l'Oligocène (26,5 m d'épaisseur)

25,5 à 26 m : Calcarénite beige orange à crème (Calc. À Astéries). Calcaire probablement karstifié comme l'indique la perte totale.

A noter que la base de l'Oligocène n'a pas été atteinte sur cet ouvrage.

2.1.4. Interprétation des diagraphies

Diagraphie instantanée

Les temps d'avancement au mètre sont présentés sur la figure ci-dessous.

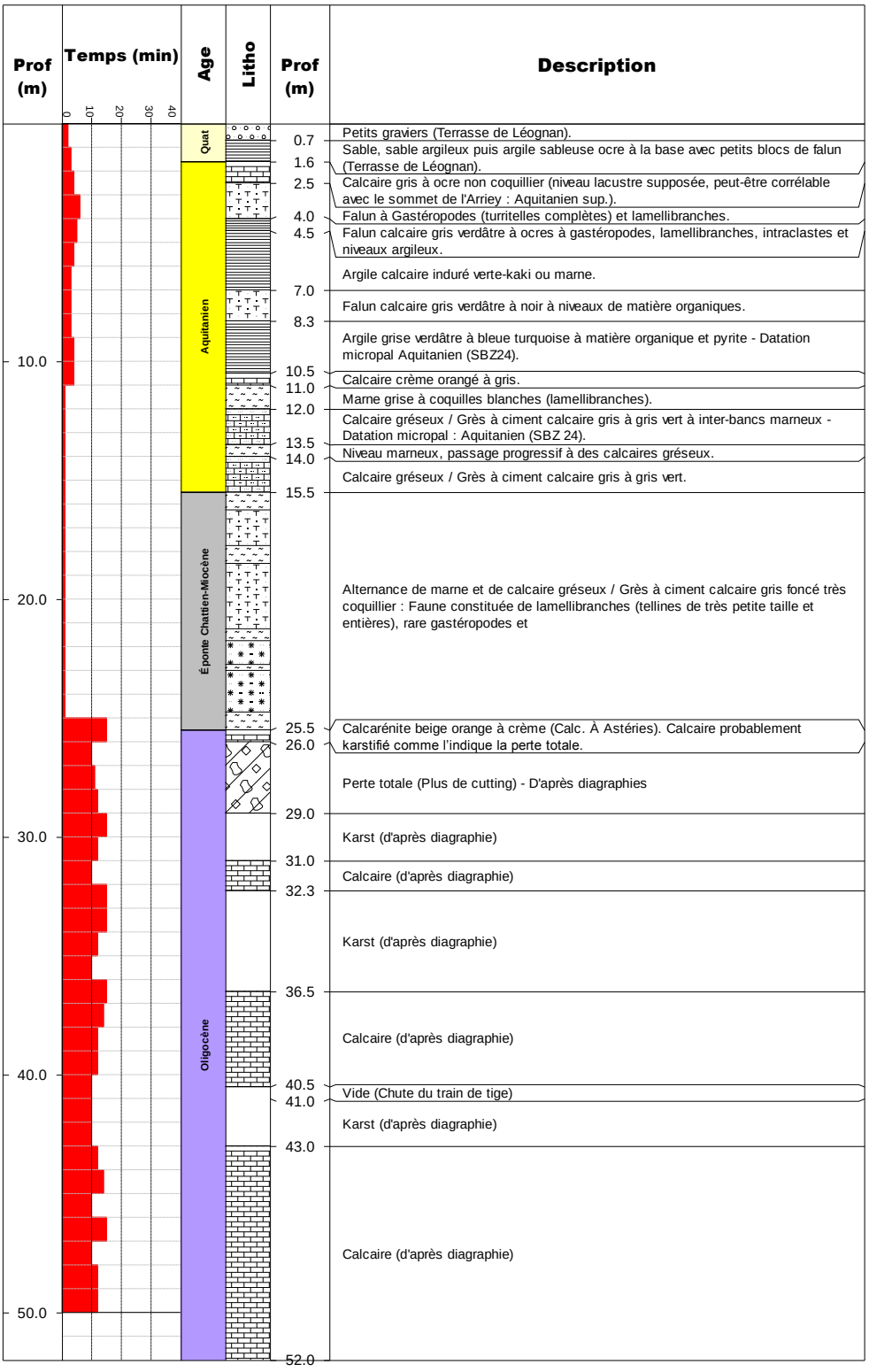


Illustration 4 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de Dariet (Saint-Morillon).

Les temps d'avancement sont compris entre 1 min et 15 min au mètre. Il est possible de distinguer 3 zones :

- une première entre 0 et 11 m de profondeur correspondant principalement aux formations de l'Aquitanien et qui présente des temps d'avancement inférieur à 5 min au mètre,
- une deuxième zone entre 11 et 24 m avec des temps d'avancement très rapide de l'ordre de la minute au mètre qui coïncide avec une alternance de marne et de calcaire gréseux,
- une zone entre 24 et 50 m de profondeur avec des temps d'avancement supérieurs à 10 min au mètre et qui traduit le passage dans le réservoir calcaire de l'Oligocène.

Diagraphies différées

- **Gamma Ray**

Les mesures de radioactivité naturelle (Illustration 6) ont été effectuées de 0 à 49,9 m de profondeur. Cette diagraphie montre des pics importants dans l'aquifère de l'Oligocène. De tels pics sont souvent attribués à des niveaux plus argileux. Cependant dans certains milieux carbonatés, l'origine de la radioactivité n'est pas forcément corrélée à une composante argileuse mais peut-être induit par la circulation de l'eau. Dans les carbonates, le rayonnement Gamma provient généralement de l'uranium. Cet élément étant facilement mobilisable en solution, la circulation d'eau à travers des fractures peut, en conditions réductrices, précipiter l'uranium. La radioactivité naturelle peut ainsi présenter des pics au droit de fractures (Serra, 1984 ; Mickam et al., 1984). D'autre part, les concentrations d'uranium peuvent être associées à des minéraux détritiques et/ou de la matière organique (Tihansky et al., 2001). Ainsi, la relation entre radioactivité naturelle totale et présence de minéraux argileux ou détritiques n'est pas toujours vérifiée dans les milieux carbonatés. Il semblerait que la réponse radioactive (et donc la présence d'uranium) soit très fortement liée aux environnements de dépôt des carbonates (Raddadi, 2005).

Dans le cas du réservoir de l'Oligocène, il est relativement fréquent d'observer dans des horizons carbonatés des pics sur le gamma ray dont les valeurs sont plus importantes que dans les formations argilo-marneuses de l'éponte sus-jacente. Ainsi, le pic observé à 41 m de profondeur coïncide avec une cavité karstique (chute du train de tige de 50 cm). Par ailleurs, des mesures d'uranium réalisées dans le cadre d'une étude récente (Saltel et al., 2014) montrent que les teneurs observées dans les eaux de l'aquifère de l'Oligocène sont relativement élevées (entre 800 et 8 000 ng/l) à proximité de la zone d'affleurement en rive gauche de la Garonne en comparaison des eaux prélevés ailleurs dans le même réservoir (moyenne de l'ordre de 12 ng/l).

A titre indicatif, les valeurs mesurées dans la nappe de l'Éocène moyen s'échelonnent entre 0,3 et 187 ng/l avec une moyenne à 36 ng/l.

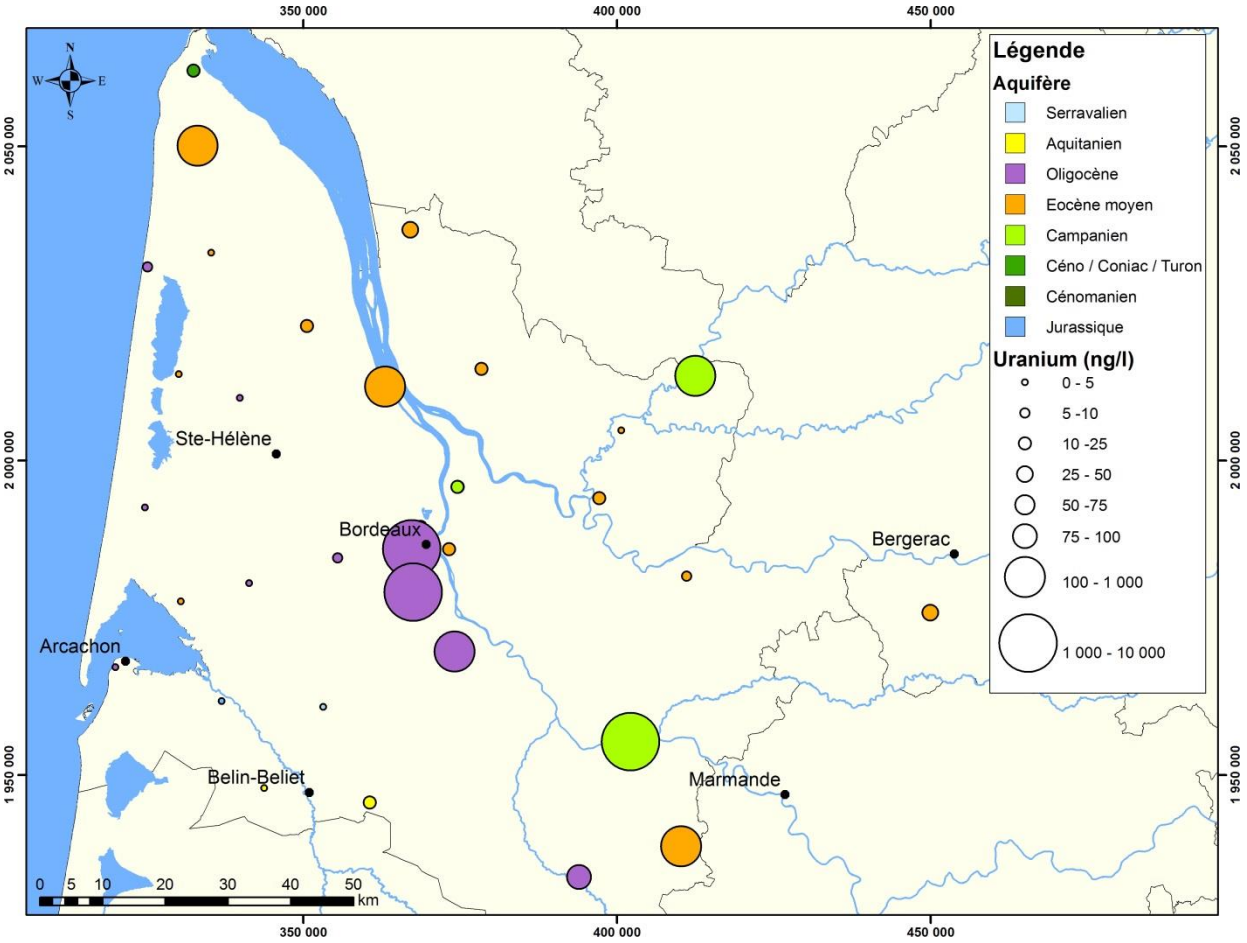


Illustration 5 : Distribution des teneurs en uranium dans les eaux (ng/l).

- **Résistivité**

Cette diagraphie (Illustration 6) ne pouvant être réalisée dans la partie tubée du forage, ce n'est donc qu'à partir de 30,6 m de profondeur que les mesures ont pu être effectuées.

Dans une première partie, de 30,6 m à 36 m de profondeur, les différences d'intensité entre les deux mesures de résistivité (petite et grande normale) traduisent une invasion de la boue dans les calcaires du sommet de l'Oligocène, laissant supposer une bonne perméabilité de ces formations sur la hauteur considérée (Schlumberger, 1989). Il y a d'ailleurs corrélation entre les pics du gamma ray et les résistivités mesurées indiquant bien que la réponse du gamma ray ne correspond pas à la présence d'un horizon argileux mais peut être liée à des zones plus fracturées et/ou karstique comme l'indique les pertes de fluides enregistrées en forage. La zone entre 36,5 et 40,5 m de profondeur montre un contraste moins important entre petite et grande normale et doit probablement correspondre à un calcaire moins fracturé.

De 42 à 49,7 m de profondeur, les mesures de résistivités laissent supposer l'existence d'une zone plus perméable.

Globalement, les mesures de résistivités semblent indiquer l'existence dans le réservoir de l'Oligocène de perméabilités relativement importantes mais quelque peu hétérogènes liées au degré de fracturation et/ou de karstification des calcaires à Astéries. Malheureusement, les pertes de boues et l'absence de cuttings qui en découle ne permettent pas d'aller plus en avant dans l'interprétation.

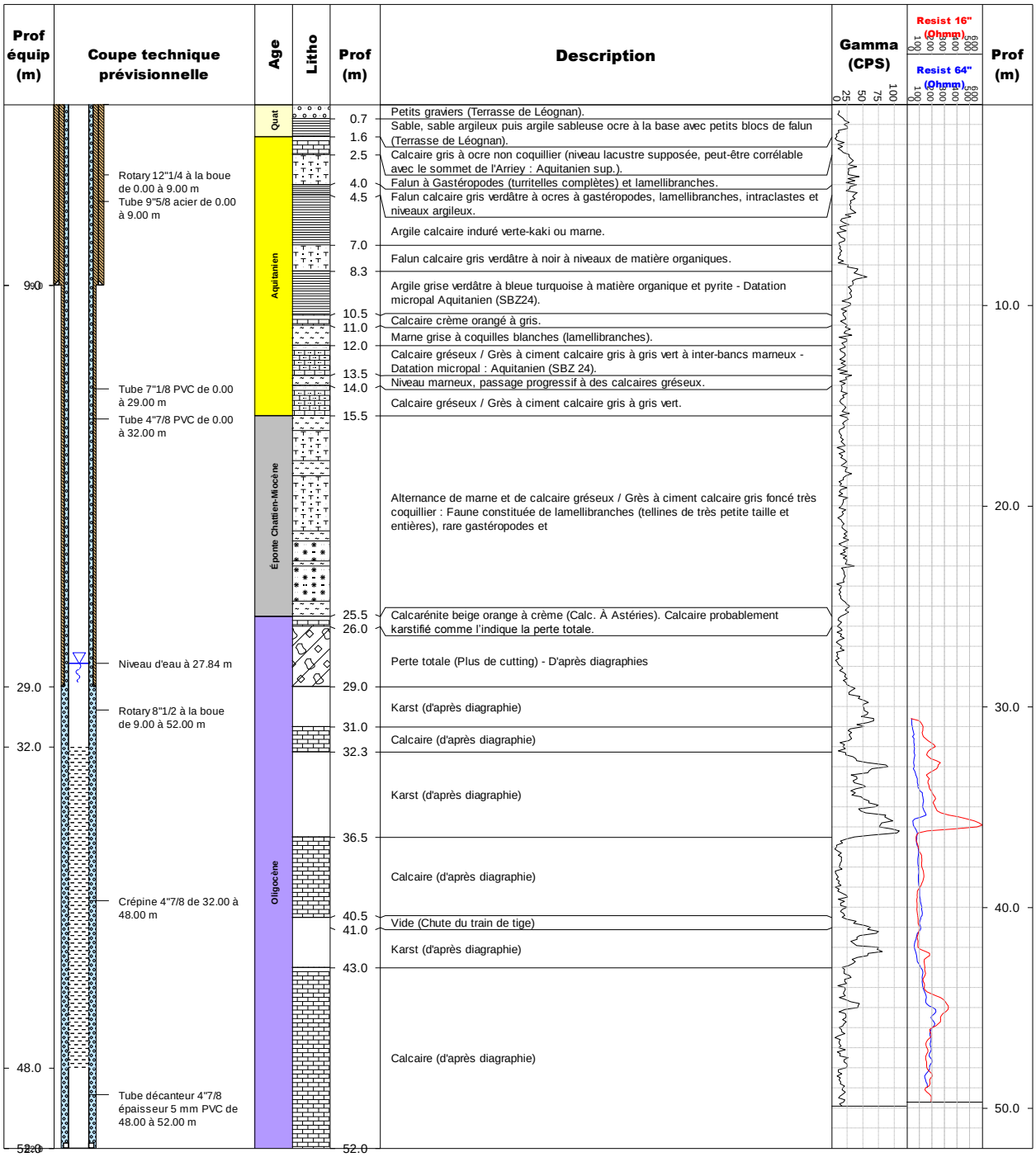


Illustration 6 : Coupe géologique du sondage de Dariet à Saint-Morillon.

2.2. FORAGE DE GASSIES 08513X0049/PZ

2.2.1. Localisation du site

Le forage est implanté sur la commune de Cabanac-et-Villagrains, au lieu-dit « Gassies », sur la parcelle n°415 de la section A. Le site est localisé à moins de 2 km au nord-ouest du bourg de Cabanac (Illustration 7).

Les coordonnées du forage en Lambert 93 sont :

X = 419 140,03m

Y = 6 397 274,16 m

Z (sol) = 41,71 m NGF

Le nivellement a été fait par GPS. La précision en X/Y pour ce point est bonne, elle est de 0,01 m et de 0,02 m en Z.

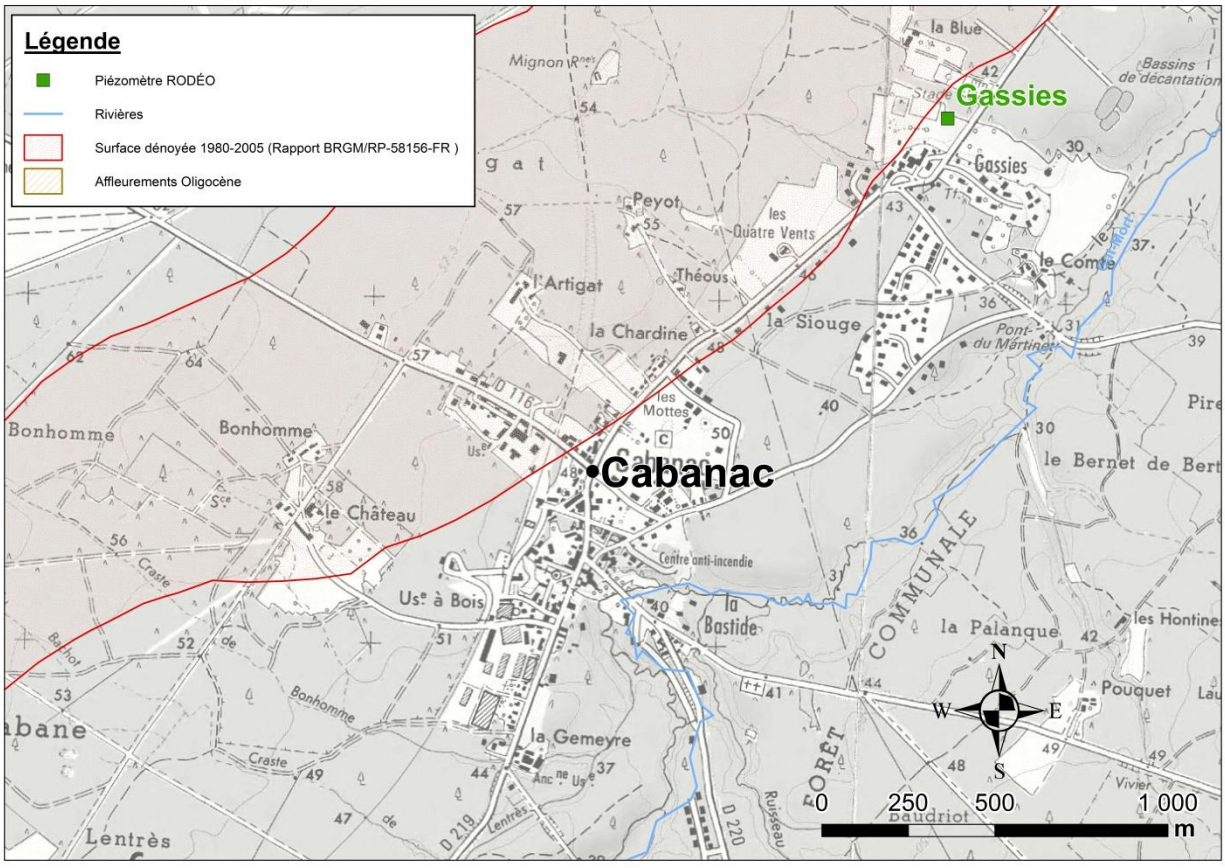


Illustration 7 : Carte de localisation du site de forage "Gassies" à Cabanac-et-Villagrains.

2.2.2. Compte rendu des travaux réalisés sur le forage

Le chantier a débuté le 27 novembre 2013 et a pris fin le 16 décembre 2013. Le forage a été réalisé par la société Aquifor. La technique utilisée est le rotary, le fluide de circulation étant à base de polymères.

Le forage étant réalisé à proximité du stade, l'alimentation en eau du chantier a été réalisée en se raccordant à l'eau de la ville.

Le forage a débuté en 14''$^{3/4}$ (374,5 mm) de 0 à 5,5 m de profondeur. Un premier tubage acier de diamètre 355 mm a été mis en place avec une cimentation gravitaire de l'espace inter-annulaire.

Le forage a ensuite repris au diamètre 12''$^{1/4}$ (311 mm) pour atteindre la cote de 26 m de profondeur. Dès 20 m de profondeur, des pertes partielles de fluide ont été observées dans des proportions importantes. L'observation de pertes est fréquente en forages lorsque les formations calcaires de l'Oligocène sont atteintes. En effet ces formations karstiques sont très perméables et peuvent donc entrainer des pertes partielles voir totale de la boue dans les terrains. La stratigraphie a été confirmée par une étude de la microfaune sur les déblais de forages (Eradata, 2014). A 25 m de profondeur, une chute du train de tige de 50 cm et une perte totale de fluide a été observée entrainant l'arrêt du forage pour la mise en sécurité du train de tige.

Un contrôle de trou a ensuite été réalisé en s'assurant du retour de la circulation de la boue et un premier jeu de diagraphie a été réalisé (Gamma Ray et résistivité). S'en est suivi la pose d'un deuxième tubage acier de diamètre 9''5/8 (244 mm) et de la cimentation de l'espace inter-annulaire par cimentation inverse.

Le forage s'est ensuite poursuivi en 8''$^{1/2}$ (216 mm) jusqu'à 47 m de profondeur. A 31 m de profondeur, une nouvelle perte totale a été observée accompagnée d'une chute du train de tige. De telles chutes se sont reproduites à 35 m, 39 m et 43 m de profondeur. Les temps d'avancements ont été globalement très rapides dans les formations de l'Oligocène.

L'équipement final de l'ouvrage en piézomètre de surveillance de la nappe de l'Oligocène a été réalisé de la manière suivante (Illustration 8) :

- mise en place d'une colonne de captage PVC 163/180 mm, avec tube décanteur plein de 43 à 46 m, crépine de 43 m à 25,6 m profondeur et un tube plein remontant à la surface ;
- rebouchage du fond de l'ouvrage et de l'espace annulaire avec du gravier 1 - 2.5 mm.

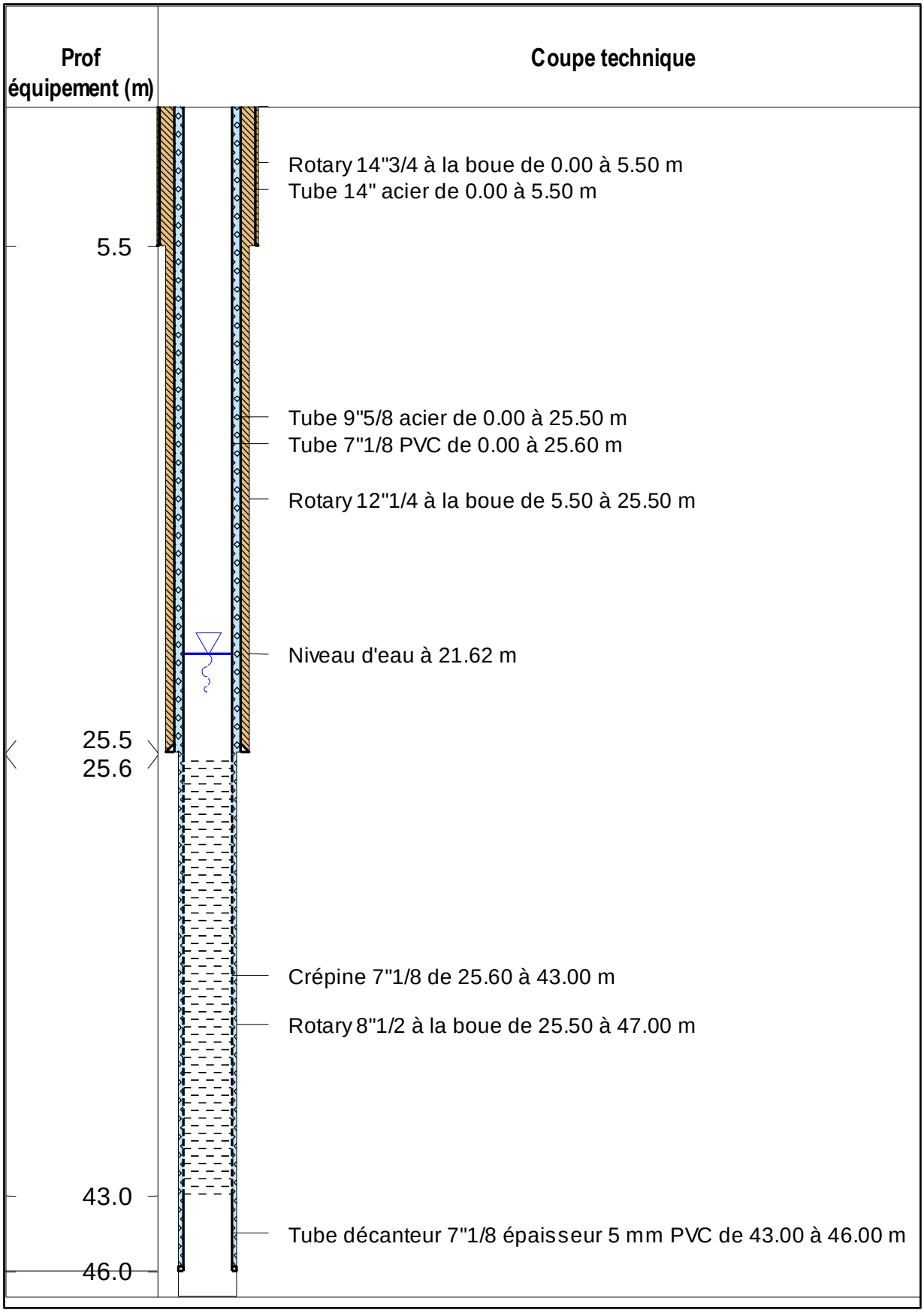


Illustration 8 : Coupe technique du forage de "Gassies" à Cabanac-et-Villagrains.

2.2.3. Description géologique des terrains traversés

Le suivi géologique par observation des déblais tous les mètres a permis de dresser la coupe géologique suivante, dont l'établissement et l'interprétation ont été étayés par l'examen des diagraphies gamma ray, résistivité et des temps d'avancement :

Aquifère du Plio-Quaternaire (1 m d'épaisseur)

0 à 0,4 m : Sable.

0,4 à 1 m : Sable ocre à gravier (Terrasses de Léognan).

Aquifère de l'Aquitanien (8 m d'épaisseur)

1 à 3 m : Sable fin bien classé coquillier à graviers (Aquitanien).

3 à 5,5 m : Argile verte (Datation micropal Aquitanien SBZ 24).

5,5 à 6,5 m : Falun calcaire coquillier gris vert à ocre.

6,5 à 7,5 m : Niveau plus argileux d'après diagraphie.

7,5 à 9 m : Falun calcaire coquillier gris vert à ocre.

Eponte du Chattien (10 m d'épaisseur)

9 à 13,1 m : Argile verte à petits niveaux gréseux, discontinuité à la base.

13,1 à 14,5 m : Argile ocre rouille altérée.

14,5 à 16,3 m : Argile bleu-vert non altérée (Datation micropal Aquitanien SBZ 24).

16,3 à 16,6 m : Grès calcaire gris vert coquilliers à graviers (base de séquence supposée).

16,6 à 17,9 m : Argile ocre (Chattien supposée).

17,9 à 19 m : Argile ocre à blocs de calcaires beige ocre (Chattien supposée).

Aquifère de l'Oligocène (28 m d'épaisseur)

19 à 20 m : Calcarénite fine blanc crème (Calc. à Astéries).

20 à 23 m : Calcaire fracturé/karstifié (pertes).

23 à 25 m : Calcarénite fine avec petits niveaux d'argiles vertes (couverture injectée dans fractures karstique) - (Datation micropal Rupélien O2, O3, O4).

25 à 25,5 m : Perte totale (Chute du train de tige).

25,5 à 27 m : Zone béchique (Fortes vibrations de la machine).

27 à 31 m : Calcarénite.

A noter que la base de l'Oligocène n'a pas été atteinte sur cet ouvrage.

2.2.4. Interprétation des diagraphies

Diagraphie instantanée

Les temps d'avancement au mètre sont présentés sur la figure ci-dessous.

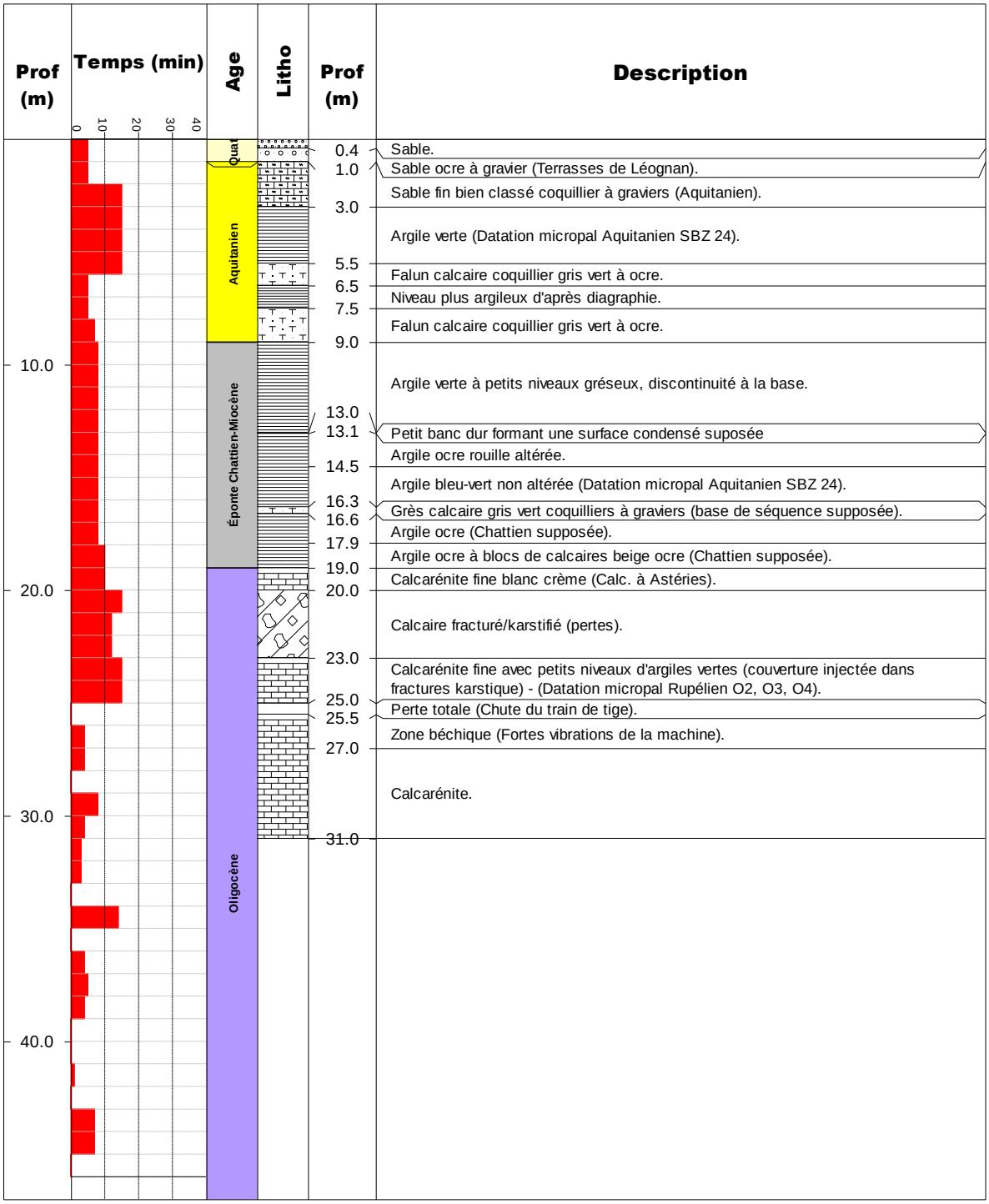


Illustration 9 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de Gassies (Cabanac-et-Villagrains).

Les temps d'avancements sont compris entre 0 et 15 minutes au m, il ressort de ces mesures que les temps d'avancements sont globalement plus faibles dans le réservoir de l'Oligocène. A noter que plusieurs cavités ont été traversées lors du forage dans les calcaires à Astéries correspondant à des temps d'avancements nuls.

Diagraphies différées

- **Gamma Ray**

Les mesures de la radioactivité naturelle (Illustration 10) ont été effectuées de 0,3 à 46,9 m de profondeur. Les valeurs les plus importantes sont observées au sein du réservoir de l'Oligocène. Ces pics de radioactivité ne traduisent pas forcément une composante argileuse mais sont probablement induit par la circulation de l'eau à travers des fractures (cf. page 18). Le pic le plus important est observé entre 38 et 39 m de profondeur, zone où une cavité a été mise en évidence par la chute du train de tige.

A noter cependant que la radioactivité des terrains entre 9 et 19 m semble bien corrélée à l'argilosité des formations.

- **Résistivité**

Cette diagraphie (Illustration 10) ne pouvant être réalisée dans la partie tubée du forage, ce n'est donc qu'à partir de 8 m de profondeur que les mesures ont pu être effectuées. Les premières valeurs mesurées jusqu'à 9 m de profondeur semble traduire une invasion de boue dans les faluns calcaires coquilliers constituant le réservoir de l'Aquitanien.

De 9 à 19 m de profondeur, les valeurs mesurées indiquent la présence de formations très conductrices et montre qu'il n'y a pas invasion de la boue de forage dans ces horizons correspondant aux argiles constituant l'éponte Chattien-Miocène.

A partir de 19 m de profondeur, les différences d'intensité entre les deux mesures de résistivité (petite et grande normale) montrent une invasion de la boue dans les calcaires fissurés du sommet de l'Oligocène, laissant supposer une bonne perméabilité de ces formations sur la hauteur considérée comme le suggère les pertes de boues observées lors du forage.

Tout ceci laisse à penser que la perméabilité de l'aquifère de l'Oligocène est potentiellement importante du fait de la fissuration et de la karstification du réservoir.

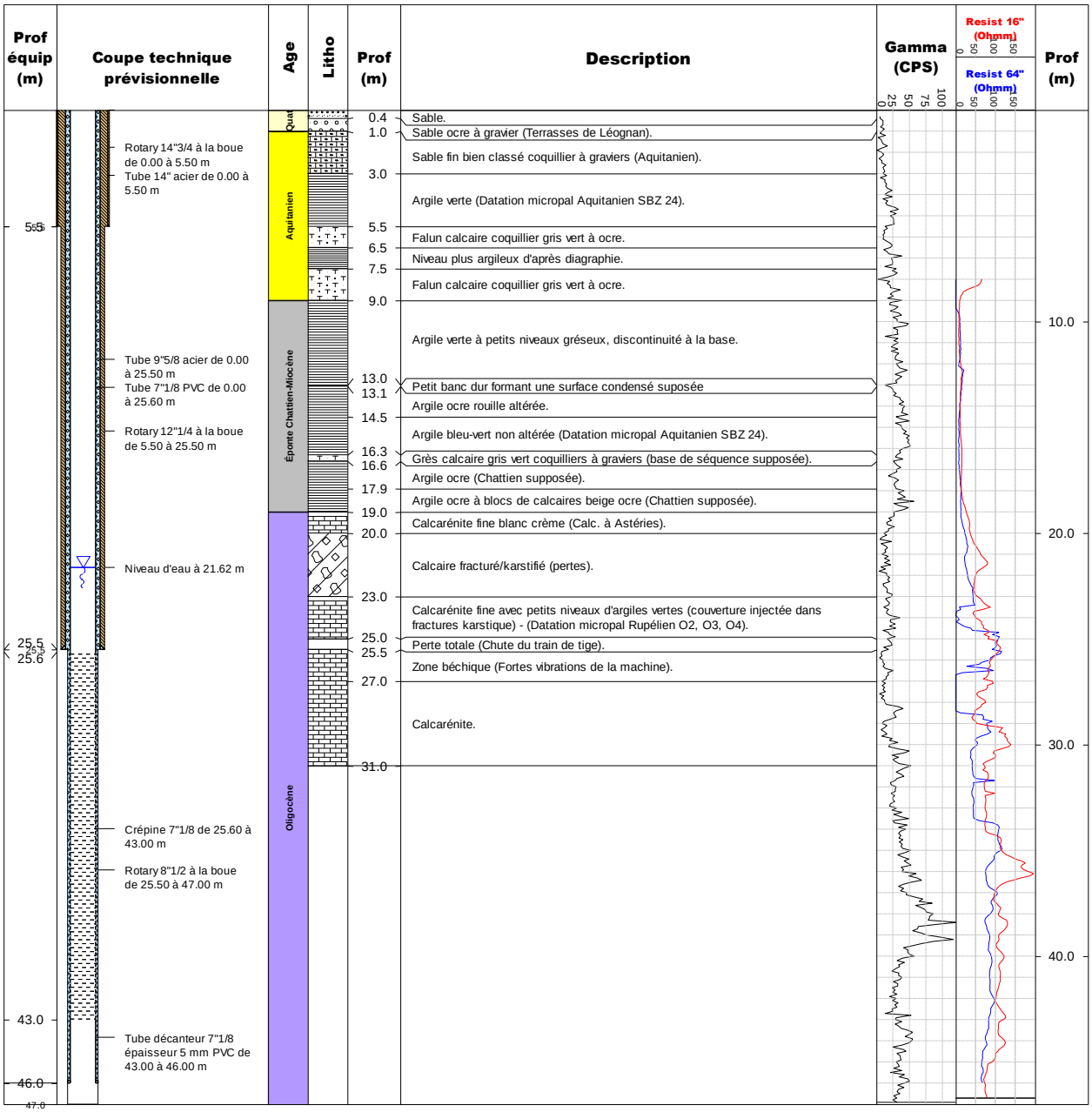


Illustration 10 : Coupe géologique du sondage de Gassies à Cabanac-et-Villagrains.

2.3. FORAGE DE PELOUA 08276X0138/PZ

2.3.1. Localisation du site

Le forage est implanté sur la commune de Saucats, au lieu-dit le « Péloua », sur la parcelle n°945 de la section C, localisé à moins de 2,5 km à l'est du bourg de Saucats, sur la Réserve naturelle géologique de Saucats-La Brède (Illustration 11).

Les coordonnées du forage en Lambert 93 sont :

X = 417 481,3 m

Y = 6 401 671,74 m

Z (sol) = 43,89 m NGF

Le nivellement a été fait par GPS. La précision en X/Y pour ce point est bonne, elle est de 0,03 m et de 0,05 m en Z.

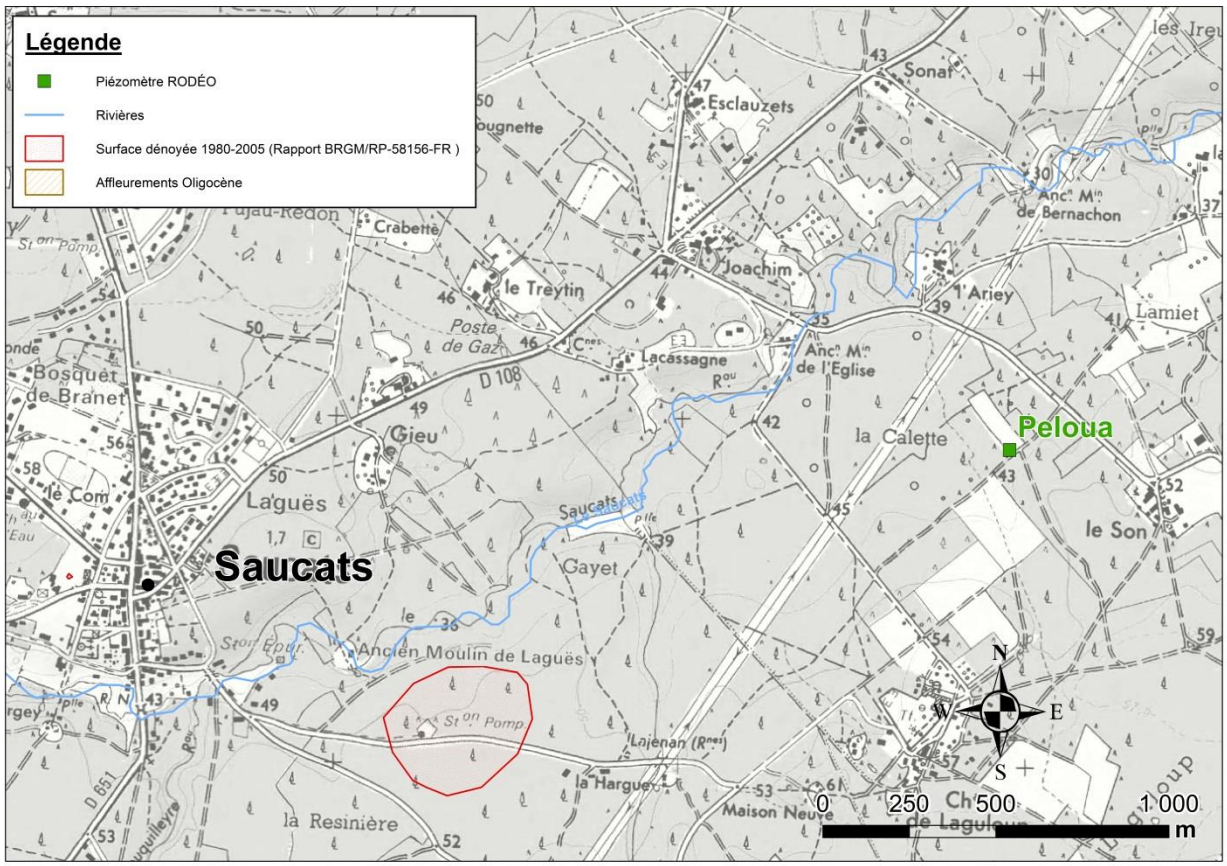


Illustration 11 : Carte de localisation du site de forage du "Péloua" à Saucats.

2.3.2. Compte-rendu des travaux réalisés sur le forage

Le chantier de forage a été réalisé avec la société Foradour. Il a débuté le 16 juin 2014 et a pris fin le 7 novembre 2014. Le forage a été réalisé au rotary, le fluide de circulation étant la bentonite. L'alimentation en eau du chantier a été réalisée à partir du forage 08276X0137/SC1 situé à moins de 20 m du chantier. Ce forage a été réalisé par carottage en 2006. D'une profondeur totale de 29,9 m, il capte la nappe de l'Aquitanien.

Les travaux ont débuté en rotary au diamètre 12''$^{1/4}$ (311 mm) de 0 à 38,7 mètre. L'objectif de cette première phase est de traverser les formations aquifères de l'Aquitanien pour placer le tubage dans l'éponte chattienne afin d'isoler ces horizons avant la reprise du forage pour capter l'aquifère sus-jacent de l'Oligocène. Des pertes partielles de boue ont été observées à 5,3 m de profondeur. Entre 28 et 37,5 m de profondeur, plusieurs embourbements de l'outil, nécessitant la remontée du train de tige et le nettoyage du tricône ont été nécessaire (Illustration 12). Ces difficultés sont liées à la traversée des argiles vertes de l'éponte chattienne. Afin de faciliter la traversée de l'éponte, il a été décidé de forer en 8''$^{1/2}$ (203.2 mm) jusqu'au calcaire de l'Oligocène, puis d'alléser en 12''$^{1/4}$.

Illustration 12 : Tricône embourbé par les argiles vertes de l'éponte chattienne.

A 37,5 m de profondeur, un changement de comportement a été observé sur la foreuse traduisant un changement dans la lithologie et marquant le passage de terrains argileux du Chattien aux formations calcaires de l'Oligocène. A 38,7 m de profondeur, une perte totale de boue a été observée dans le forage en cours de réalisation accompagnée d'une chute du niveau statique de la nappe de l'Aquitanien sur le forage servant à l'alimentation en eau du chantier. Le niveau statique est passé de 1 m à 12 m de profondeur par rapport au sol. Cette chute s'explique par l'écoulement continu de la nappe de l'Aquitanien dans le réservoir de l'Oligocène. Au bout d'un certain temps, le niveau statique de la nappe du Miocène est revenu à la normale laissant supposer que les aquifères de l'Aquitanien et de l'Oligocène étaient de nouveau isolés l'un de l'autre. En effet, le fond du forage s'est trouvé comblé sur près de 2 m par les retombés des terrains sus-jacents.

Des diagraphies (Gamma Ray et résistivité) ont alors pu être effectuées en trou nu jusqu'à 36,8 m de profondeur, puis un premier tubage en acier 9''5/8 (244 mm) a été mis en place et ancré par cimentation inverse à la cote de 35 m. Cette opération a pour but d'isoler la nappe du Miocène de la nappe de l'Oligocène. Plusieurs phases de cimentation ont été nécessaires sur ce forage. Une première cimentation inverse de 1 000 L, suffisante pour combler l'espace inter annulaire (espace entre le trou nu et le tube) a été effectuée, suivi d'une cimentation complémentaire gravitaire (à l'aide d'une canne) directement dans l'espace inter-annulaire de 400 L.

Après une phase de séchage du ciment de 72 heures, la deuxième phase du forage a pu débuter avec un outil de diamètre 8''$^{1/2}$ (216 mm). Des pertes partielles de boue sont constatées dès la reprise du forage mais ces pertes sont courantes dans les formations karstiques de l'Oligocène. A la cote 42 m, une descente de 30 cm du tube acier ainsi qu'une chute de 20 m de la cote de cimentation dans l'espace inter annulaire sont constatées. Le forage a alors été arrêté afin de reprendre la cimentation du 1er tubage. Plusieurs phases de cimentation ont été réalisées pour s'assurer de l'étanchéité entre les réservoirs de l'Aquitanien et de l'Oligocène. Elles sont résumées dans le tableau suivant (Illustration 13).

Cimentation	Ciment	Sable	Gravier	Sobranite
2ème	800 L	175 kg	-	-
3ème	800 L	-	1 500 kg	-
4ème	800 L	-	-	-
5ème	500 L	-	150 kg	75 kg
6ème	400 L	-	-	75 kg

Illustration 13 : Composition des cimentations réalisées après la première cimentation.

Les difficultés de cimentations ont été causées par la combinaison de deux problèmes: la présence de la perte à 38,7 m qui se comble très difficilement et qui entraine des pertes de circulations du fluide de forage, et la présence de l'écoulement d'eau en continu provenant de la nappe de l'Aquitanien qui lessive le ciment. Au total, en comptant la 1ère cimentation, 4,7 m^3 de ciment, 1,65 t de graviers, 175 kg de sables et 150 kg de sobranite (Illustration 14) ont été injectés dans l'espace inter annulaire.

Illustration 14 : Billes de sobranite. Facilitent le colmatage des pertes.

In fine, des tests d'étanchéités sur le ciment ont été réalisés en utilisant un système de packer. Ces tests ont mis en évidence que malgré les opérations effectuées jusqu'alors une communication demeurait entre les aquifères de l'Aquitanien et de l'Oligocène.

Pour y remédier, une nouvelle cimentation entre packers a été réalisée. Les packers sont assimilables à des ballons qui obturent l'espace annulaire en se gonflant (Illustration 15). Le but de l'opération est d'injecter le ciment sous pression, entre les deux packers, afin de colmater les fissures présentent dans le ciment en place, sans être soumis aux influences de la perte observée dans la nappe de l'Oligocène (Illustration 16).

Packer au repos

Packer gonflé à l'air

Illustration 15 : Packer utilisé lors de la phase de cimentation sous pression.

Après cette nouvelle phase de cimentation, puis de séchage, un nouveau test d'étanchéité a été réalisé et le forage a pu reprendre. La perte dans les formations de l'Oligocène n'étant pas comblée, les déblais de forage n'ont pu être échantillonnés sur la suite du forage. Le forage s'est poursuivi en perte totale au diamètre de 8''$^{1/2}$ (216 mm) jusqu' à la profondeur finale de 64 m.

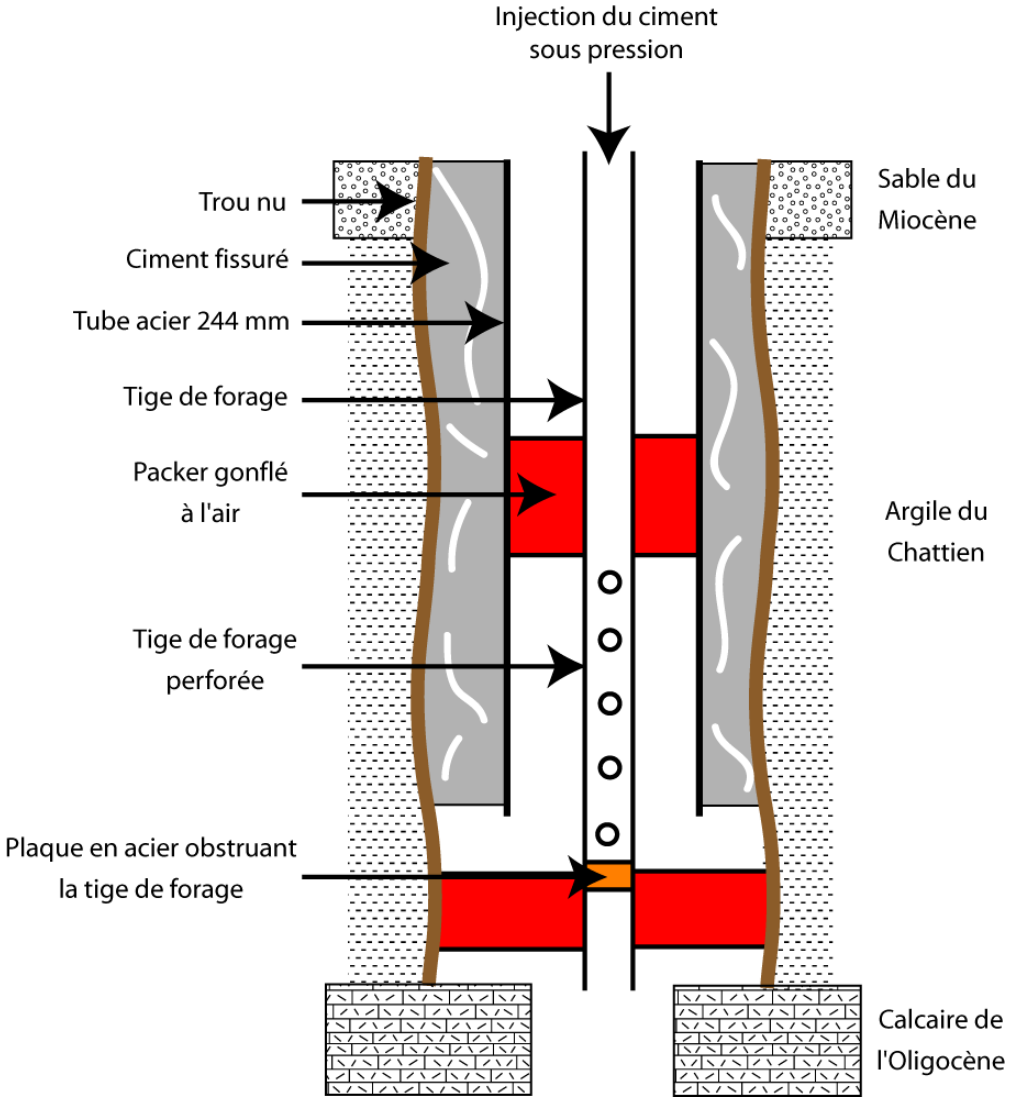


Illustration 16 : Schéma du dispositif de cimentation sous pression.

Lors du contrôle de trou avant la réalisation des diagraphies, le train de tige s'est retrouvé coincé à plusieurs reprises lors de la phase de remontée entre 35 et 38 m au droit des formations chattiennes non isolées par le tubage. Ce sont en fait les argiles du Chattien qui en s'hydratant gonflent et viennent coincer le train de tige qui est alors relativement difficile à décoincer. Afin de régler ce problème, il a été décidé d'ajouter un tubage acier en 6''$^{5/8}$ pour isoler ces argiles et équiper le forage en piézomètre.

Les diagraphies complémentaires n'ont finalement pas été réalisées et l'équipement final de l'ouvrage en piézomètre a été réalisé de la manière suivante (Illustration 17) :

- mise en place d'une colonne de captage PVC en 4''1/2 (114 mm), avec tube décanteur plein de 63,2 à 64 m, crépine de 44 m à 63,2 m profondeur et un tube plein remontant à la surface ;
- rebouchage de l'espace annulaire avec du gravier 1 - 2.5 mm.

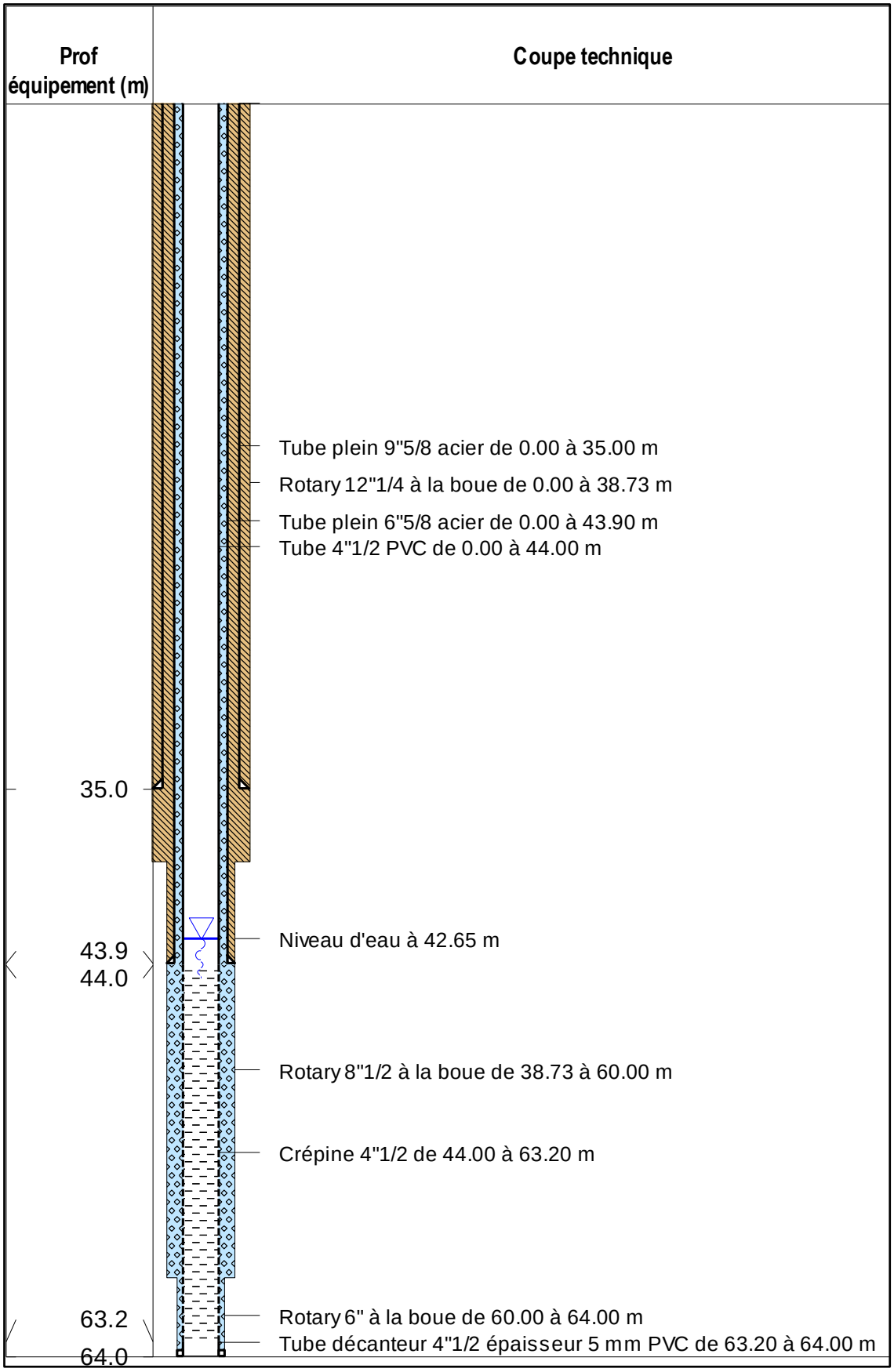


Illustration 17 : Coupe technique du forage "Péloua" à Saucats.

2.3.3. Description géologique des terrains traversés

Le suivi géologique par observation des déblais tous les mètres a permis de dresser la coupe géologique de l'ouvrage. Cette analyse s'appuie sur l'étude détaillée du carottage du Miocène fait à proximité du forage réalisé par la Réserve naturelle géologique de Saucats-La Brède (Londeix, 2014).

Aquifère de l'Aquitanien (28 m d'épaisseur)

0 à 2,6 m : Faluns lagunaire du Burdigalien.

2,6 à 3,1 m : Calcaire et argile lacustre, présence de Planorbis, Limnées, Potamides.

3,1 à 4 m : Argile lagunaire à Potamides et bivalves.

4 à 5 m : Calcaire bréchique avec passage très argileux, pauvres en fossiles.

5 à 6,3 m : Marnes grises lagunaires à Potamides, nombreux fossiles.

6,3 à 8 m : Marnes sableuses très coquillées à grains de quartz.

8 à 13 m : Grès quartzeux à coquilles marines et Potamides.

13 à 15,3 m : Grès calcaire très fin beige, présence de coquilles.

15,3 à 17,8 m : Sable quartzeux et sable calcaire marins à nombreuses coquilles.

17,8 à 20 m : Argile sableuse grise, présence de quelques coquilles.

20 à 21 m : Marnes sableuses, grains millimétriques, morceaux riches en matière organique, quelques petites coquilles, morceaux d'argile verte.

21 à 22 m : Sable quartzeux avec de l'argile verte et quelques coquilles.

22 à 26,6 m : Sable à grains millimétriques avec quelques éléments coquillés.

26,6 à 28 m : Sable argileux avec quelques éléments coquillés.

Eponte du Chattien (9,5 m d'épaisseur)

28 à 37,5 m : Argile bleu verte du Chattien.

Aquifère de l'Oligocène (22,5 m d'épaisseur)

37,5 à 38,7 m : Calcaire gris blanc probablement karstifié comme l'indique la perte totale.

A noter que la base de l'Oligocène n'a pas été atteinte sur cet ouvrage.

2.3.4. Interprétation des diagraphies

Diagraphie instantanée

Les temps d'avancement au mètre montrent une nette corrélation avec la nature géologique des terrains traversés (Illustration 18). Les temps d'avancement les plus longs sont observés lors du passage des argiles de l'éponte chattienne. Ces temps d'avancements peuvent également être imputés à des aspects techniques : mauvais choix de l'outil de forage et puissance insuffisante de la machine.

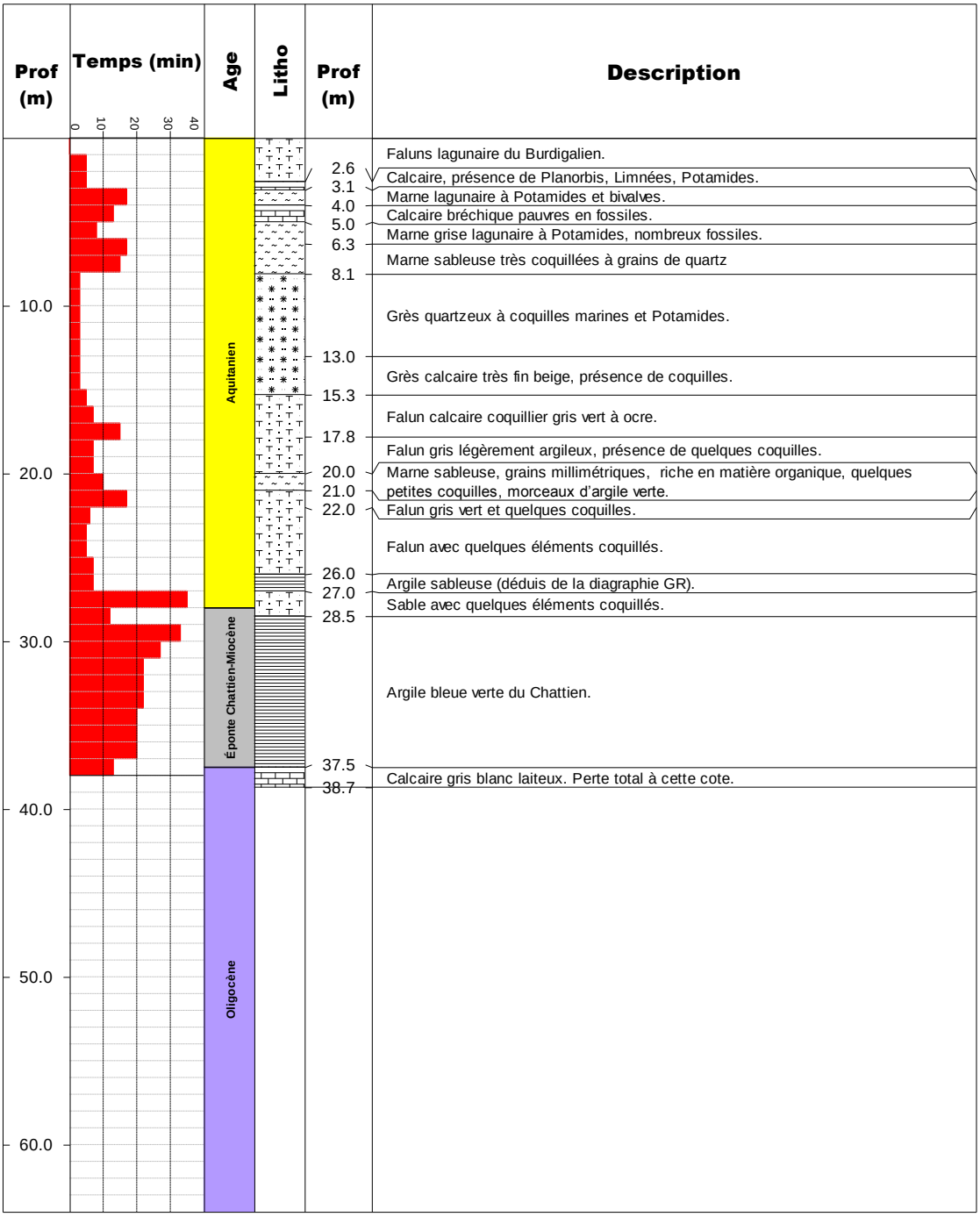


Illustration 18 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de Peloua.

Les temps d'avancements n'ont pas été mesurés sur la suite du forage en raison des nombreux problèmes techniques rencontrés (pertes totales, problèmes d'étanchéités, blocage du train de tige,…).

Diagraphies différées

- **Gamma Ray**

La mesure de la radioactivité naturelle est réalisée de 0 à 37 m de profondeur (Illustration 19). La valeur de la ligne de base des argiles est évaluée à 10 CPS (Coups Par Seconde). Il est possible de constater deux petit pics entre 5 et 6 m et entre 7 et 8 m. Ces deux pics correspondent aux marnes observées entre 5 et 8,1 m. Un pic de 65 CPS est observée entre 26 et 27 m. Il correspond à un niveau d'argile non observé en diagraphie instantanée. Enfin de 29 m à 37 m de profondeur le signal est de 40 CPS en moyenne. Ce signal correspond aux argiles bleu verte de l'éponte chattienne.

- **Résistivité**

Cette diagraphie ne pouvant être réalisée qu'en présence de fluide (boue ou eau), ce n'est donc qu'à partir de 4,4 m de profondeur que les mesures ont pu être effectuées. Sur l'enregistrement (Illustration 19), les mesures ne commencent réellement qu'à partir de la cote 8 m. Les enregistrements présents avant sont des artéfacts liés au dispositif. Cette diagraphie permet de mettre en évidence les zones perméables du réservoir de l'Aquitanien et de repérer le niveau argileux de l'éponte chattienne.

Entre 8 et 18 m, les valeurs des résistivités (petite et grande normale) sont très proches l'une de l'autre. Le fait qu'il n'y ait pas de contraste net entre ces deux valeurs laisse supposer que les formations sont peu perméables.

Entre 18 et 20 m, puis entre 22 et 26 m des niveaux perméables sont observés. En effet, les différences d'intensité entre les deux mesures de résistivité traduisent une invasion de la boue dans les grès de l'Aquitanien, laissant supposer la présence d'horizons réservoirs.

Entre 26 et 37 m, un niveau très conducteur est mis en évidence correspondant aux argiles bleue verte du Chattien. Ces mesures sont en adéquation avec les mesures de gamma ray traduisant une argilosité plus importante des formations. A noter que l'horizon sableux rencontré entre 27 et 28,5 m de profondeur n'est probablement pas suffisamment épais pour apparaitre nettement sur les mesures de résistivité.

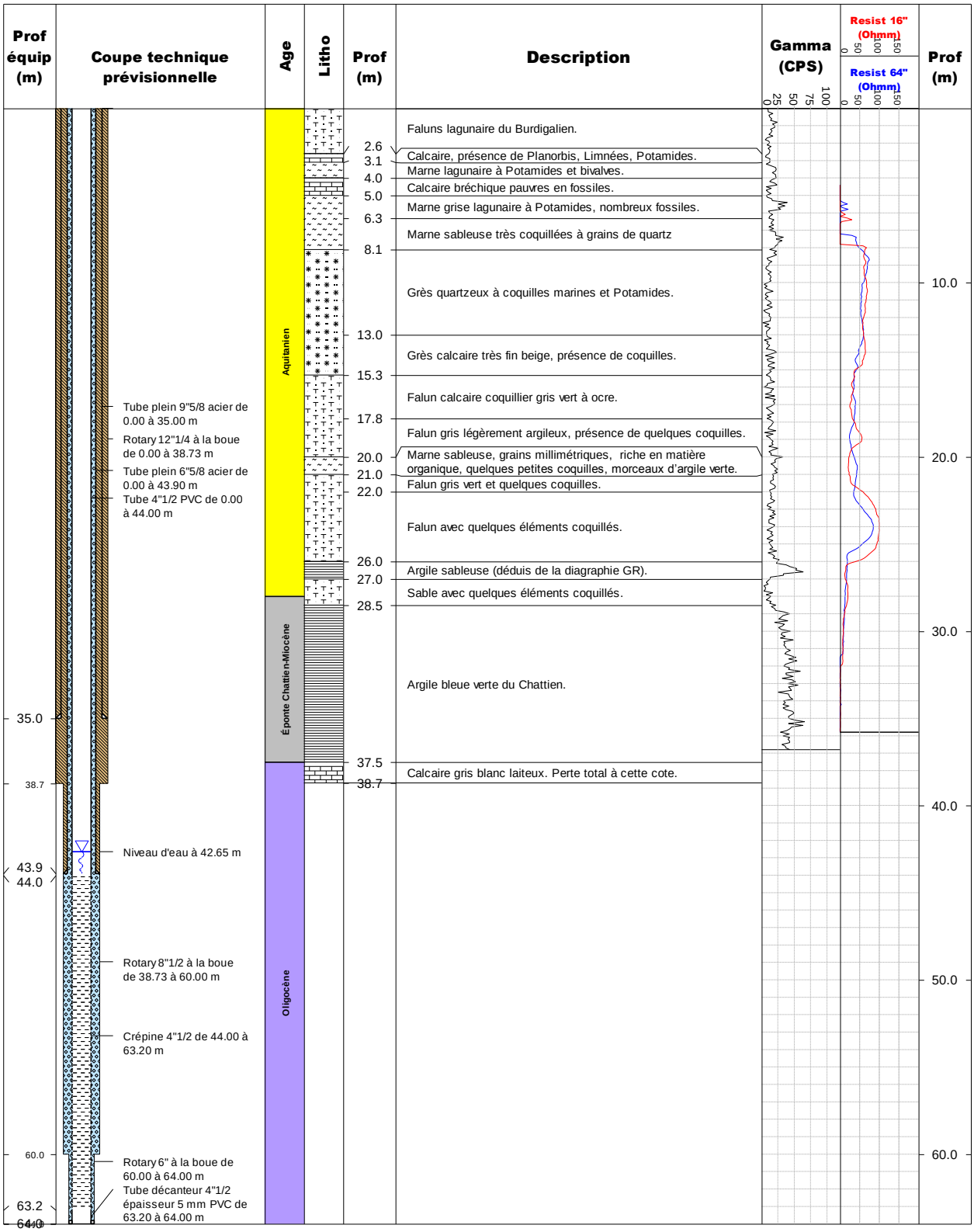


Illustration 19 : Coupe géologique du sondage de Péloua à Saucats.

2.4. FORAGE DE LA MIGELANE 08276X0139/PZ

2.4.1. Localisation du site

Le forage est implanté sur la commune de La Brède, au lieu-dit « Migelane », sur la parcelle n°2 de la section BM. Le site est localisé à près de 4 km au nord-ouest du bourg de La Brède (Illustration 20).

Les coordonnées du forage en Lambert 93 sont :

X = 416 634,94 m

Y = 6 405 978,45 m

Z (sol)= 56,45 m NGF

Le nivellement a été fait par GPS. La précision en X/Y pour ce point est bonne, elle est de 0,02 m et de 0,01 m en Z.

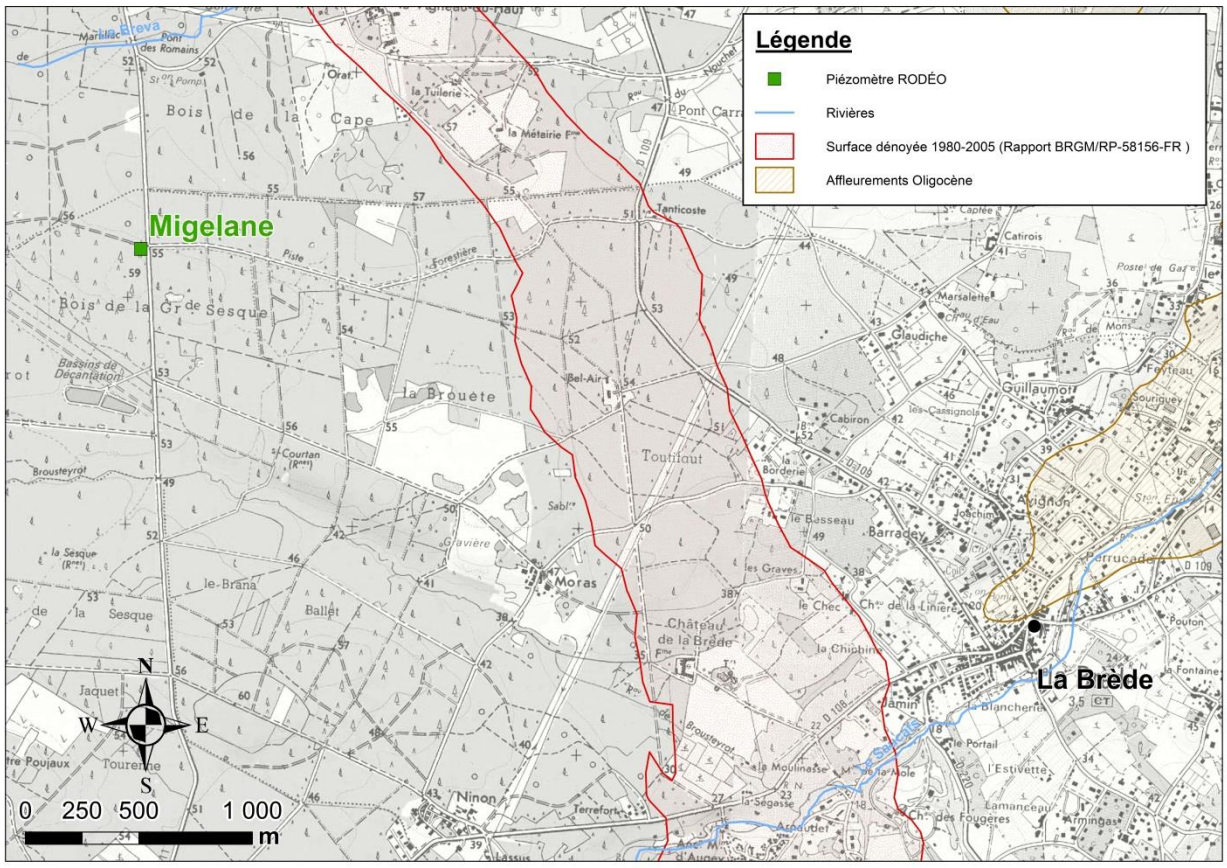


Illustration 20 : Carte de localisation du site de forage "Migelane" à La Brède.

2.4.2. Compte-rendu des travaux réalisés sur le forage

Le chantier a débuté le 21 octobre 2015 et a pris fin le 5 décembre 2015. Le forage a été réalisé par la société Aquifor. La technique utilisée est le rotary, le fluide de circulation a varié en fonction des formations rencontrées. Le forage a débuté en utilisant de la bentonite pour

traverser les formations plus meubles du Quaternaire et de l'Aquitanien. Une fois le réservoir cible de l'Oligocène atteint, la boue a été renouvelée pour utiliser un fluide à base de polymères pour la fin du chantier.

Du fait de l'isolement du sondage vis-à-vis d'infrastructures permettant un approvisionnement en eau du chantier, un premier forage de 9 m de profondeur a été réalisé dans les alluvions. Ce forage ne s'est pas avéré suffisamment productif et l'alimentation en eau a été assurée par une citerne de manière à avoir suffisamment de réserve en cas de perte lors du forage.

Le forage a débuté en gros diamètre en 17''$^{1/2}$ (431,8 mm) de 0 à 15 m de profondeur. Après un contrôle de trou, un premier tubage acier (355,6 mm, épaisseur 5 mm) a été mis en place et ancré par cimentation sous pression (volume : 800 litres, densité 1,8). Une cimentation complémentaire gravitaire (à l'aide d'une canne) directement dans l'espace inter annulaire a été nécessaire (volume : 100 litres, densité 1,8).

La suite du forage s'est effectuée en 12''$^{1/4}$ (311 mm) de 15 m à 65 m de profondeur. L'analyse des déblais de forage a permis de mettre en évidence une transition franche à 22 m de profondeur entre les alluvions (Sable et graviers gris) et les formations de l'Aquitanien (Falun gris vert). Cependant, le passage dans l'éponte chattienne et les calcaires à Astéries de l'Oligocène n'ont pas clairement été observée. Aux vues des profondeurs atteintes et étant données le log prévisionnel déterminé à partir des forages voisins, l'arrêt du forage a été décidé à 65 m pour réaliser une première série de diagraphie (gamma Ray et résistivité). Il est en effet parfois difficile de dresser fidèlement la coupe géologique du forage à partir de seuls déblais. En effet, le brassage dans la boue de forage des déblais et l'influence de retombées rendent l'interprétation plus compliquée. Le forage s'est ensuite poursuivi en en 12''$^{1/4}$ (311 mm) jusqu'à 80 m de profondeur où une perte de circulation de boue a été constatée. De nouvelles diagraphies ont alors été réalisées jusqu'à 76 m de profondeur (le forage s'étant comblé sur 4 m). Ces mesures ont permis de définir l'équipement du forage afin d'isoler le réservoir de l'Aquitanien de celui de l'Oligocène avec la pose d'un tube acier (244 mm, épaisseur 4 mm). Après un contrôle de trou mettant en évidence un comblement supplémentaire du forage à 72 m de profondeur, un bouchon de ciment a été mis en place pour permettre la pose du tubage acier (volume : 280 litres, densité 1,8). Après séchage, le sommet du ciment atteignait la profondeur de 68 m. Ce dernier a donc été re-foré jusqu'à 70 m de profondeur pour permettre la pose du tubage et la cimentation de l'espace inter annulaire sous pression (volume : 2 500 litres, densité 1,8). Une cimentation complémentaire gravitaire de l'espace inter-annulaire a été nécessaire (volume : 250 litres, densité 1,8).

Le forage a ensuite repris en 8''1/2 (216 mm) jusqu'à la profondeur finale de 92 m. L'équipement final de l'ouvrage en piézomètre de surveillance de la nappe de l'Oligocène a été réalisé de la manière suivante (Illustration 21) :

- mise en place d'une colonne de captage PVC 160/180 mm, avec tube décanteur plein de 89 à 92 m, crépine de 71 m à 89 m profondeur et un tube plein remontant à la surface ;
- rebouchage du fond de l'ouvrage et de l'espace annulaire avec du gravier 1 - 2.5 mm.

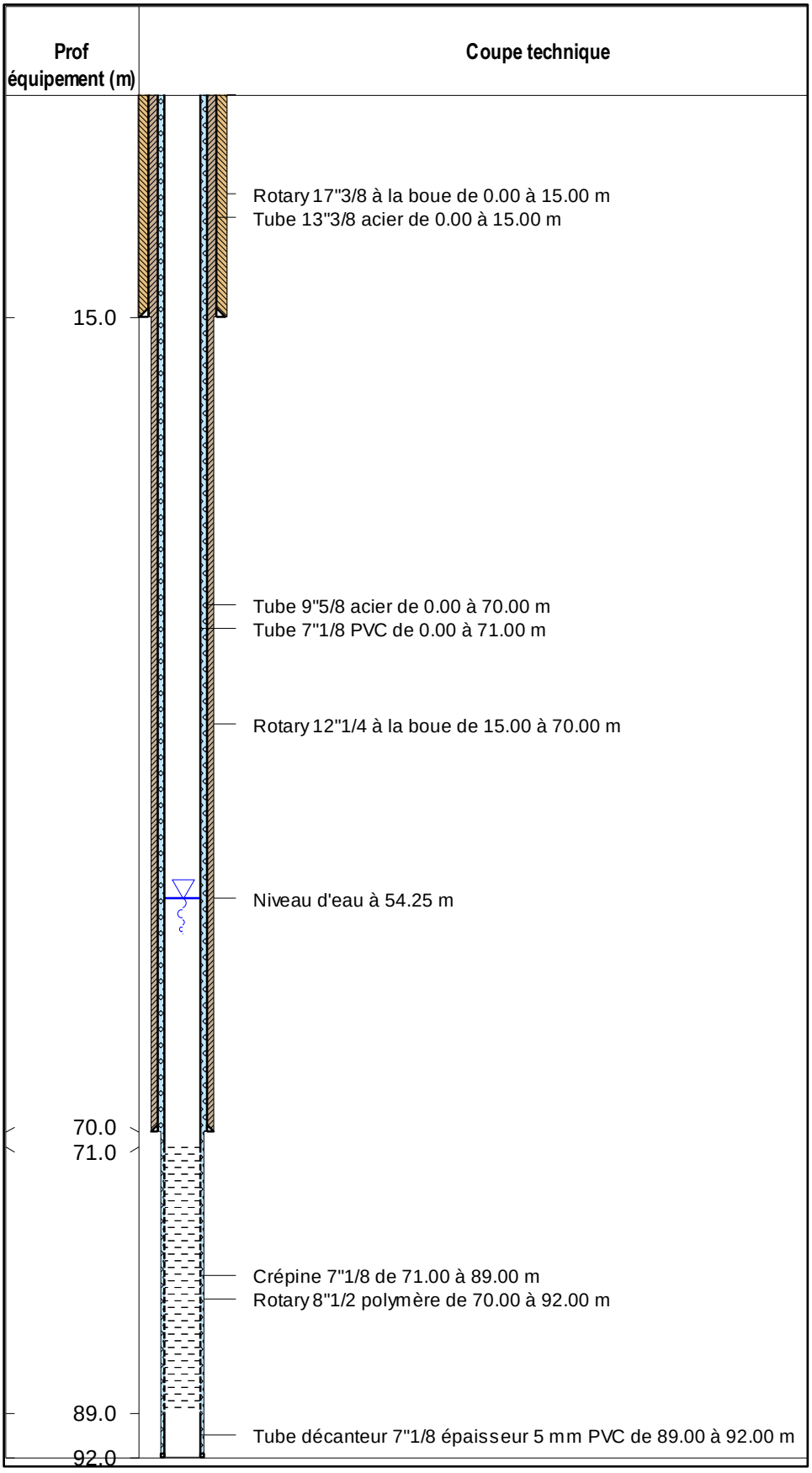


Illustration 21 : Coupe technique du forage de la "Migelane" à La Brède.

2.4.3. Description géologique des terrains traversés

Le suivi géologique par observation des déblais tous les mètres a permis de dresser la coupe géologique suivante, dont l'établissement et l'interprétation ont été étayés par l'examen des diagraphies gamma ray, résistivité (petite et grande normale) et par les temps d'avancement :

Aquifère du Plio-Quaternaire (22 m d'épaisseur)

0 à 14,5 m : Sable grossier gris.

14,5 à 16,5 m : Argile noirâtre compacte.

16,5 à 22 m : Sable et argile jaune.

Aquifère de l'Aquitanien (24 m d'épaisseur)

22 à 25 m : Falun blanc gréseux.

25 à 32 m : Falun gris-vert légèrement gréseux.

32 à 33 m : Argile verte avec grès coquillier.

33 à 46 m : Grès coquillier gris.

Éponte Chattien-Miocène (11 m d'épaisseur)

46 à 50 m : Marno-calcaire légèrement gréseux.

50 à 57 m : Marne verte et jaune.

Aquifère de l'Oligocène (35 m d'épaisseur)

57 à 65 m : Grès grossier coquillier légèrement marneux.

65 à 80 m : Calcaire gris noir et sable fin.

80 à 92 m : Calcaire gris blanc laiteux.

A noter que la base de l'Oligocène n'a pas été atteinte sur cet ouvrage.

2.4.4. Interprétation des diagraphies

Diagraphie instantanée

Les temps d'avancement au mètre sont présentés sur la figure ci-dessous.

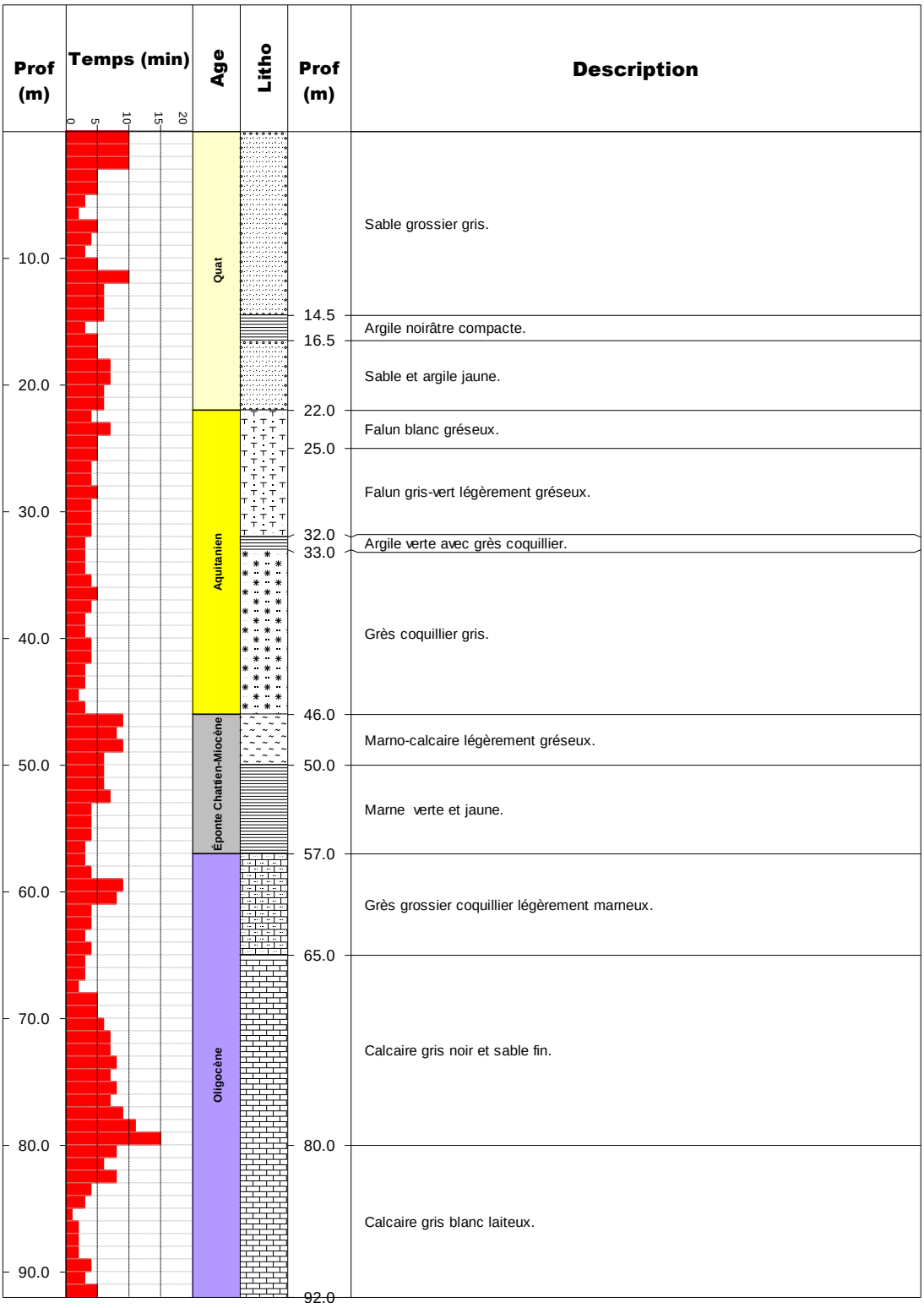


Illustration 22 : Diagraphie instantanée et lithologie du forage de la Migelane (La Brède).

Les temps d'avancements sont compris entre 1 et 15 minutes au m. Il ressort de ces mesures que les temps d'avancement sont légèrement plus importants dans l'éponte chattienne (supérieurs à 10 min par m) en comparaison de ceux mesurés dans les faluns de l'Aquitanien (environ 4 min par m).

Diagraphies différées

- **Gamma Ray**

Les mesures de radioactivité naturelle (Illustration 23) ont été effectuées de 0 à 76 m de profondeur. Cette diagraphie a notamment permis de préciser le positionnement d'un banc argileux dans les alluvions du Quaternaire entre 14,50 et 16,5 m de profondeur. En dehors de ce pic, les valeurs les plus importantes sont mesurées au droit de l'aquifère de l'Oligocène. Ces pics de radioactivité ne traduisent pas forcément une composante argileuse mais sont probablement induit par la circulation de l'eau à travers des fractures (cf. page 18). Ce phénomène est très fréquent dans le réservoir de l'Oligocène. Il a été observé dans la quasi-totalité des piézomètres réalisés dans le cadre de ce projet, ainsi que dans les forages avoisinants réalisés pour l'alimentation en eau potable.

- **Résistivité**

Cette diagraphie (Illustration 23) a été mesurée entre 15 et 75 m de profondeur. Les premiers mètres n'ont pu être investiguées en raison de la présence du premier tubage. De même, pour des raisons de budget, le fond du forage n'a pas fait l'objet de nouvelles diagraphies.

Les premières valeurs mesurées entre 16 et 22 m de profondeur traduisent une invasion nette de boue dans les sables et graviers des alluvions quaternaire. Un contraste net apparait avec les résistivités mesurées entre 22 et 32 m de profondeur dans les faluns gris-verts de l'Aquitanien dans lesquels l'écart entre petite et grande normale est moins marqué. La base du réservoir présente encore une signature différente avec des valeurs très similaires entre les deux résistivités autour de 50 ohm.m.

De 46 à 57 m de profondeur, les valeurs mesurées indiquent la présence de formations très conductrices indiquant clairement la présence de l'éponte Chattien-Miocène.

A partir de 57 m de profondeur, les différences d'intensité entre les deux mesures de résistivité (petite et grande normale) montrent de nouveau une invasion de la boue dans le réservoir calcaire de l'Oligocène.

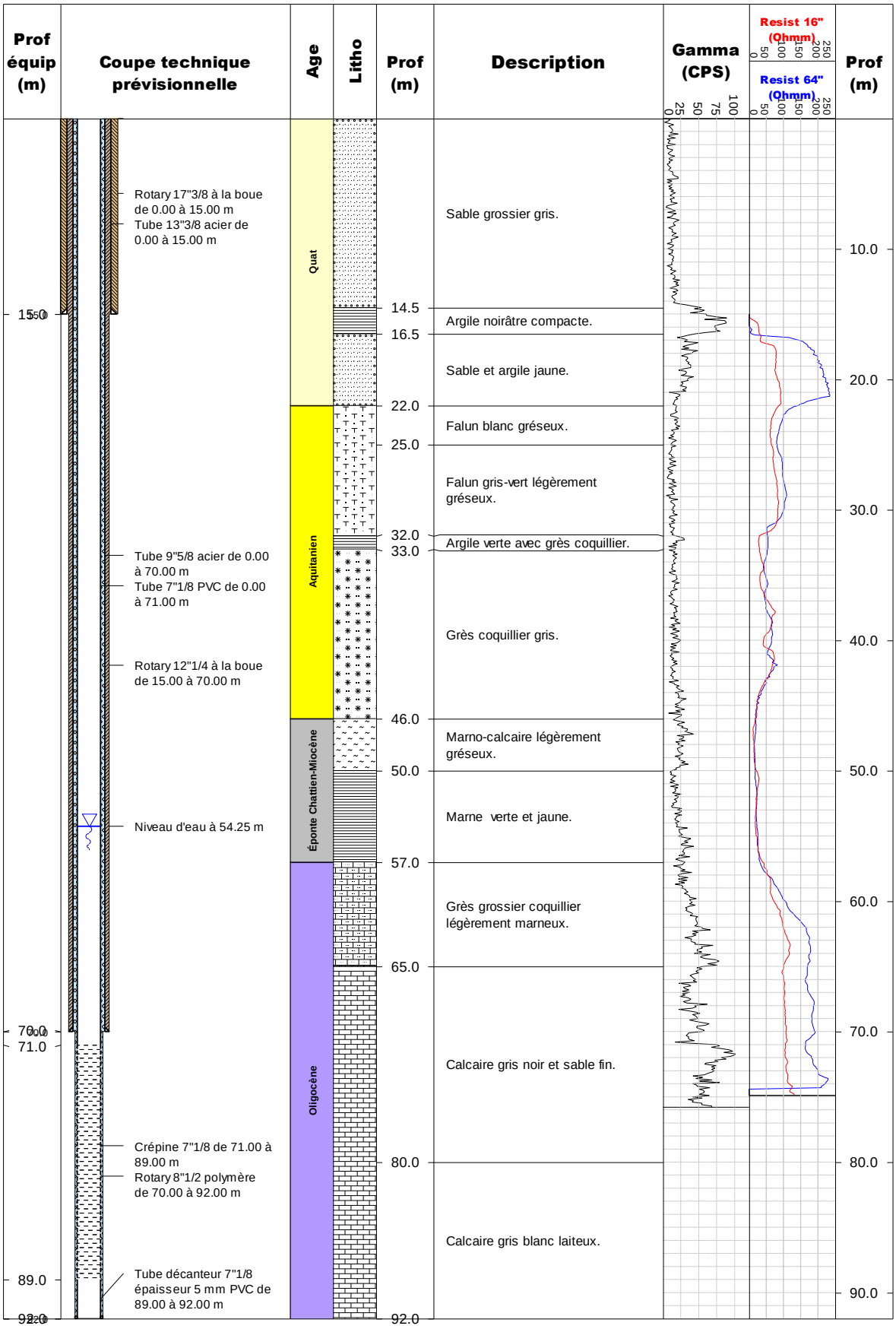


Illustration 23 : Coupe géologique du sondage de la Migelane à La Brède.

2.5. APPORTS DES NOUVEAUX FORAGES

Les nouvelles données recueillies par l'intermédiaire de ces quatre forages ont permis de préciser la géologie du secteur. Ces informations ont été introduites dans le modèle géologique réalisé en 2010, de manière à mettre à jour la géométrie des réservoirs.

A noter que c'est le forage de Dariet (08513X0050) qui présente le décalage le plus important par rapport à la géométrie initiale du modèle puisque le toit du réservoir de l'Oligocène est 8 m en dessous de la cote attendue et que la base de l'Aquitanien est à 6 m en dessous de l'estimation initiale.

Le forage de Gassies (08513X0050) présente un décalage de 3 à 4 m par rapport à la coupe prévisionnelle élaborée à partir du modèle géologique. La base de l'Aquitanien et le sommet du réservoir de l'Oligocène ayant été rencontrés plus proches de la surface qu'attendus.

Les observations réalisées au forage du Péloua (08276X0138) sont très proches des cotes estimées à partir du modèle, puisque les décalages ne sont que d'un mètre.

Au forage de la Migelane (08276X0139), l'épaisseur des alluvions est plus importante qu'anticipée (22 m d'épaisseur contre 9 attendus) et le toit du réservoir de l'Oligocène est 3 m plus haut que prévus (57 m de profondeur contre 60 attendus).

La réalisation de ces ouvrages permet d'effectuer des mesures piézométriques et de confronter les côtes réelles issues des mesures manuelles réalisées sur les forages nouvellement créés aux résultats du modèle hydrogéologique développé en 2010 (Tableau 2).

Commune	Lieu-dit	Indice BSS	Cote piézométrique en m NGF		Delta en m	Etat
			Modèle hydrodynamique 2007	Mesures manuelles 2015		
Saucats	Peloua	08276X0138	7.14	0.98	-6.16	Dénoyé
Cabanac-et-Villagrains	Gassies	08513X0049	13	18.86	5.86	Dénoyé
Saint-Morillon	Dariet	08513X0050	14.2	19.85	5.65	Libre sous couverture
La Brède	Migelane	08276X0139	6.27	2.72	-3.56	En limite de dénoyage

Tableau 2 : Comparatif des mesures piézométriques réelles et estimées par le modèle hydrogéologique.

Les mesures montrent des différences importantes entre piézométrie modélisée et piézométrie observée et démontre l'intérêt de bénéficier de point d'observation dans cette zone à fort enjeux. La piézométrie au droit du forage du Péloua et de la Migelane est plus basse qu'attendue (par rapport à l'approche par modélisation réalisée en 2010), traduisant l'importance de l'influence de la ligne des « 100 000 m³/j » sur la piézométrie. Ainsi la zone où le toit de la nappe est dénoyé est plus étendue que prévue initialement (Illustration 53) et s'étend jusqu'au bourg de Saucats. A contrario, la piézométrie observée aux forages de Dariet et de Gassies est plus élevée qu'attendue dans ces zones.

A noter qu'il y a 8 années entre les valeurs issues du modèle qui présente la piézométrie fin 2007 et les dernières mesures effectuées sur les piézomètres fin 2015.

3. Apports de l'interprétation des pompages d'essais

3.1. METHODOLOGIE UTILISEE POUR INTERPRETER LES POMPAGES DE LONGUE DUREE

La méthode mise en œuvre est décrite dans le schéma suivant (Illustration 24).

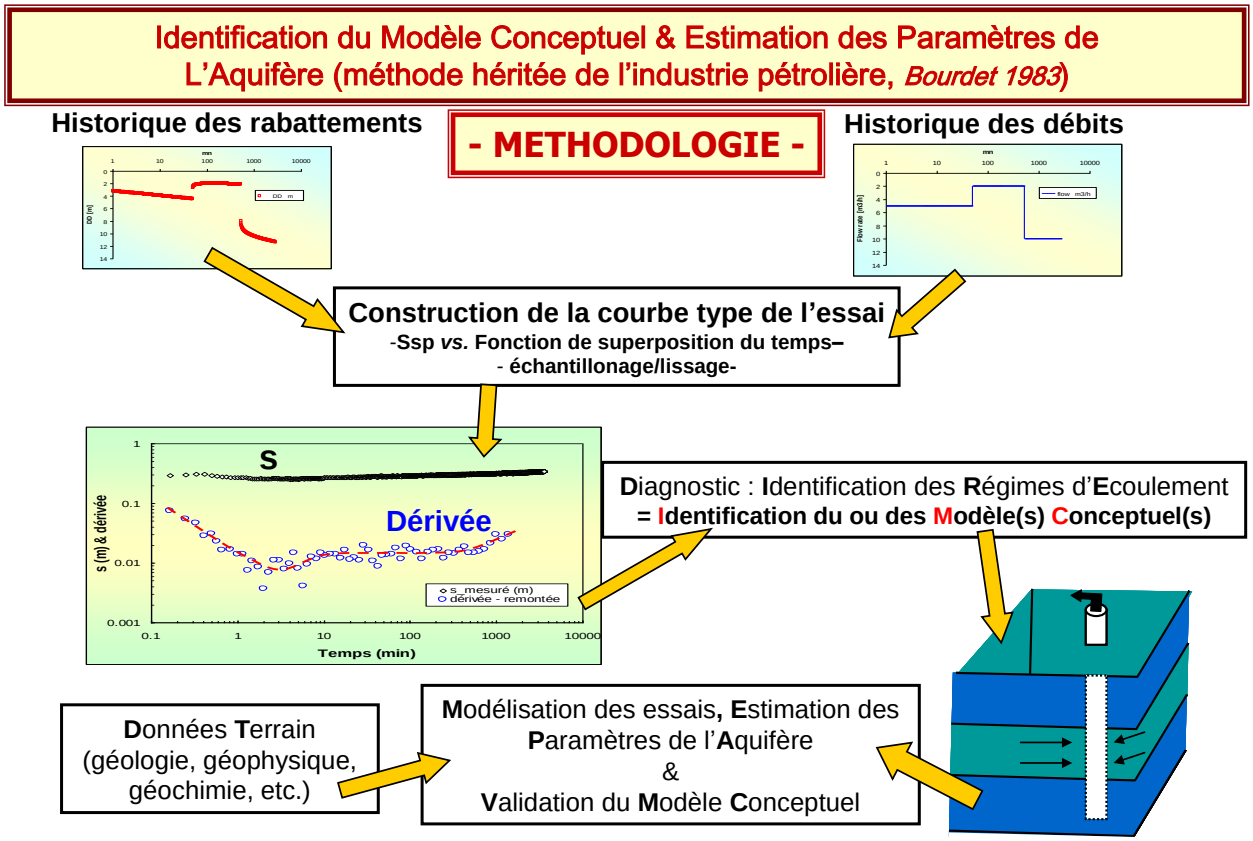


Illustration 24 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.

L'interprétation des essais de pompage dans les formations fracturées ou dans les formations sédimentaires hétérogènes est souvent complexe, conséquence de la géométrie des réseaux de fractures, des relations fracture-matrice, de la connexion de ces réseaux avec des aquifères de surface, de l'empilement et de la géométrie de séries à perméabilités différentes lorsqu'il s'agit de formations sédimentaires, etc.

Afin de déterminer les différentes composantes d'écoulement associées aux propriétés hydrauliques de tels aquifères, il est nécessaire de porter une attention particulière aux essais de pompage et de poser un diagnostic aussi fin que possible sur les essais avant toute modélisation de ces derniers. Le diagnostic repose sur l'interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements ($\partial s/\partial \ln t$; à la descente ou à la remontée des niveaux) qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet et al., 1983, 1989 ; Spane and Wurstner, 1993 ; etc.).

L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère mais aussi pour chaque type de configuration forage-aquifère (captage partiel de l'aquifère par exemple), il correspond un certain régime ou une succession de certains régimes d'écoulement qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck et al., 1992, Shlumberger, 2002 ; Renard et al., 2009). Par exemple, un écoulement radial sera caractérisé par une dérivée formant un plateau (pente nulle), l'atteinte de deux limites étanches parallèles par une pente de ½, 4 limites étanches orthogonales (ou un autre type de réservoir fermé) par une pente de 1, un captage partiel de l'aquifère par une pente de -½, un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. L'illustration 25 présente comme exemple les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère situé dans un aquifère rectangulaire où, tour à tour, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte.

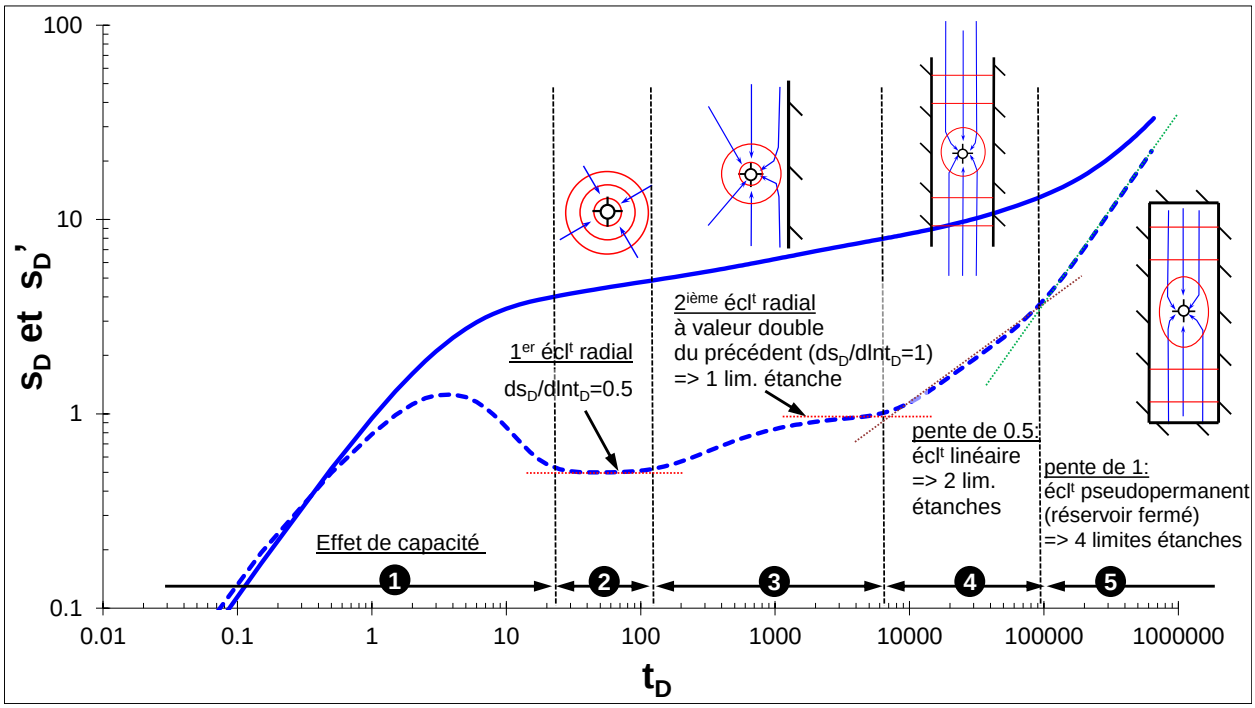


Illustration 25 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. tD : temps adimensionnel, sD (courbe pleine) et sD' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, le bruit étant engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles.

De plus, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul. Le calcul de la dérivée sera donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débit) ; on obtient ainsi une courbe type de l'essai - c'est-à-dire pour un débit unitaire - 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, effet de skin, …), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa géométrie

(effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et d'autres aquifères (effet de drainance par exemple) et éventuellement la mise en évidence d'écoulements fractionnaires dus par exemple à la forte perméabilité d'un drain karstique.

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 et la perméabilité de la formation captée, lorsqu'un écoulement radial cylindrique est identifié.

3.2. FORAGE DE MOULIN LAGUS

Le forage de Moulin Lagus (BSS : 08276X0090/F), réalisé en 1970, est exploité depuis 1974 par la Lyonnaise des Eaux de Bordeaux. Le forage est situé dans la région de Bordeaux sur la commune de Saucats. Le forage est profond de 78,45 m. La géologie montre des formations gréseuses à calcaires sur les 40 premiers mètres, puis de 40 à 49 m des argiles bleues, de 49,0 m à 74,8 des formations calcaires Oligocènes fracturées et karstifiées (cf. annexe 2), puis à partir de 74,8 m des argiles. Le forage est tubé jusqu'à 50,0 m de profondeur (bouchon de ciment à 41,0 m), et capte de 49,0 m à 74,8 les formations calcaires Oligocènes fracturées et karstifiées. Cet aquifère est captif du fait des formations argileuses sus-jacentes très peu, voire imperméables.

La plupart des venues d'eau se situe à plus de 70 m, soit a priori entre vers 70-74,8 m (Ravigne, 2008).

La coupe géologique et technique de l'ouvrage est disponible en annexe 2.

La chronique piézométrique de l'ouvrage est atypique (Illustration 26), et montre que lorsque le niveau de l'eau du forage est passée sous la couverture argileuse (vers 49.0 m de profondeur) vers 1995-96, la baisse du niveau piézométrique a fortement ralenti, malgré des pompages plus importants. Se pose donc la question d'un changement du comportement hydrodynamique de l'aquifère lié à l'éventuel changement d'état du système (passage d'un aquifère captif à libre). Afin de répondre à cette question, l'ensemble des tests par pompage disponibles sur le forage ainsi que l'essai suivi par le BRGM en septembre 2014 ont été ré-analysés et modélisés.

Notons que les essais antérieurs à 2014 ont déjà fait l'objet d'interprétations et même de réinterprétations dans le cadre de la gestion et optimisation du parc d'ouvrages captant l'aquifère oligocène [(Dupuy et al., 2006) ; (Dupuy et al., 2007)] et que de très fortes différences de transmissivité (1 à 2 ordres de grandeur) ont été trouvées entre les essais de 1970 et 1996.

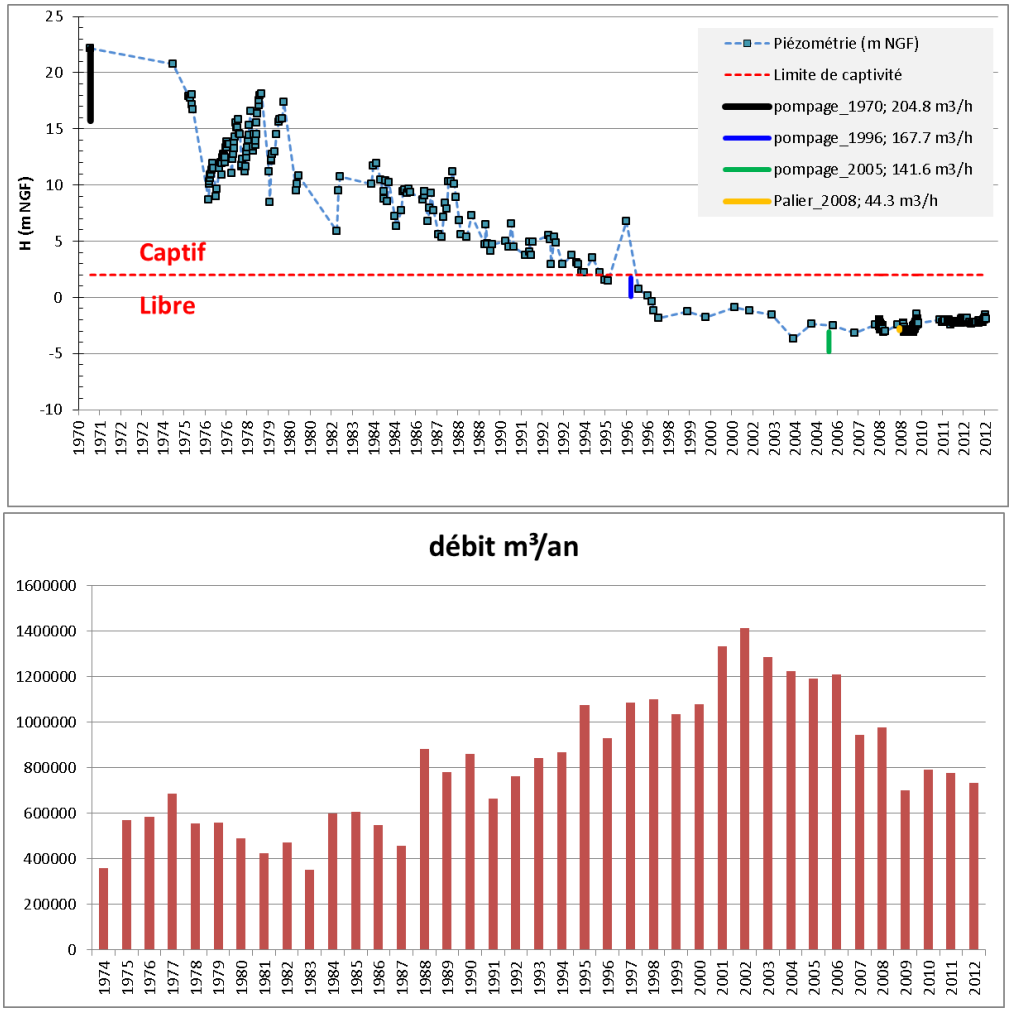


Illustration 26 : Données du suivi du niveau piézométrique et des prélévements par pompage sur le forage de Moulin Lagus (1974-2012), et positionnement des essais par pompage disponibles (1970 ; 1996 ; 2005 et 2008). La hauteur de la barre montre le rabattement maximum durant les essais.

Le tableau suivant présente l'ensemble des données de pompage disponibles:

	1970	1996	2005	2008	2014*
Prof. niv. initial (m)	29.65	50.07	54.87	54.53	52.93
Essai par paliers (courte durée)	Non	Oui (de 28 à 168 m^3/h)	Oui (de 66 à 147 m^3/h)	Non	Oui (de 27 à 96 m^3/h)
Durée du pompage de longue durée (j)	2.50	2.08	3.02	0.11 (2.7h)	2.16
Débit moyen du pompage de longue durée (m^3/h)	204.8	167.7	141.6	44.3	94.0
Source	BSS	HYDRO INVEST (Ravigne, 1996)	HYDRO INVEST (Ravigne, 2005)	HYDRO INVEST (Ravigne, 2008)	BRGM

Tableau 3 : Essais par pompage disponible au forage de Moulin Lagus ; 1970, 1996, 2005, 2008 et 2014.

A noter qu'en 2014, la profondeur exacte du niveau initial a été estimée puisque l'essai a débuté en régime influencé par de précédents pompages sur l'ouvrage ; l'ouvrage de Saucats Bourg (08276X0001/F), exploité et situé à 1 148 m du puits de pompage, a aussi été suivi durant cet essai (cf. figure en Annexe 3).

Ainsi, on dispose de 5 périodes d'essai, dont une en 1970 avec un niveau d'eau au-dessus de l'imperméable argileux. Le reste des essais ayant été réalisé alors que le niveau imperméable était désaturé (base du niveau imperméable : 49,0 m).

3.2.1. Essais par paliers de débit

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

$s=BQ+CQ^2$

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

Dans le cas du forage du Moulin Lagus, les données des essais par paliers de débit sont disponibles pour les tests réalisés en 1996 (3 paliers 28.0, 84.7 et 166.0 m³/h le 20/03/1996) et, en 2005 (4 paliers 66.4, 99.7, 117.8 et 136.9 m³/h du 10 au 12/05/2005) et en 2014 (4 paliers 27.3, 57.7, 82.2 et 95.5 m³/h le 02/09/2014). Chaque palier a duré au moins 60 min, et ont tous été suivis d'une phase de remontée au moins équivalente (débit nul). Les trois essais ont été réalisés dans les des mêmes conditions de niveaux relativement proches, c'est-à-dire un niveau d'eau au-dessous de la base des argiles.

L'illustration 27 présente l'interprétation des essais. Le coefficient C est relativement faible, de l'ordre de 500 $m^{-5}.s^2$, en 1996, et de l'ordre de 750 $m^{-5}.s^2$ en 2005 et de l'ordre de 500 $m^{-5}.s^2$ en 2014. Par contre, pour le test réalisé en 2014 on notera un coefficient B, représentatif de la transmissivité de l'aquifère, anormalement élevé (19 en $m^{-3}.s$) comparé aux essais précédents (5 à 9 en $m^{-3}.s$, ce qui traduit vraisemblablement le fait que l'essai n'a pas été réalisé avec un niveau initial suffisamment stabilisé. On portera donc peut de crédit à l'estimation des coefficients B et C de 2014, mais on se fiera au placement des points dans le graphe de l'illustration 27, ceux-ci étant d'ailleurs conformes aux observations de 2005. L'augmentation de ce coefficient C entre 1996 et 2005, c'est à dire une augmentation des pertes de charge liées aux puits, traduit un colmatage du puits entre ces deux périodes. Le coefficient B est faible de l'ordre de 5 à 10 en $m^{-3}.s$ traduisant la forte perméabilité de l'aquifère. Les rabattements à 60 minutes de pompage ont été reportés pour les essais de 1970 et 2008. Concernant celui de 1970 - aquifère en condition captive, le point se situe en dessous de toutes les courbes, soit en raison du changement de fonctionnement de l'aquifère (captif → libre), soit en raison de pertes de charge liées au puits plus élevées en 1970. Le rabattement de 2008 et ceux de 2014 se situent quasiment sur la courbe de 2005, suggérant peu d'évolution des pertes de charge entre ces deux périodes.

L'annexe 4 présente les graphes qui ont permis l'estimation des coefficients B et C.

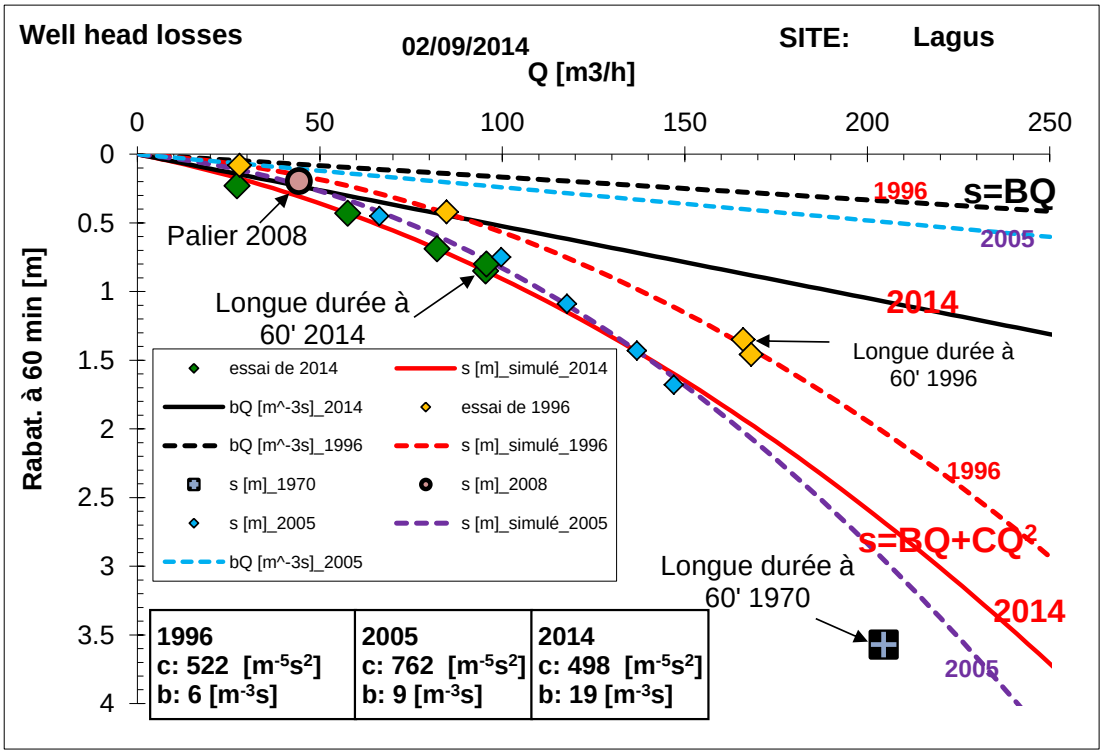


Illustration 27 : Interprétation des essais par paliers de débit réalisés sur le forage de Moulin Lagus en 1996 et 2005 ; paliers non-enchainés. Sont aussi figurés les rabattements au bout d'une heure de pompage des tests de longue durée de 1970, 1996, 2005 et 2008.
Courbes rouges : s=BQ+CQ² ; courbes noires : s=BQ ; s=rabattement (m) ; Q=débit (m³/h).

3.2.2. Essais de pompage de longue durée

Diagnostic des essais

Essai de 1970 :

L'illustration 28 présente le diagnostic de l'essai réalisé en 1970. Il a été établi à partir de la normalisation des données de descente et de remontée du niveau du pompage réalisé du 27 au 29/07/1970 (débit : 201 à 207 m^3/h). L'analyse des courbes de dérivée montrent :

1. du début de l'essai à environ 2-3 minutes, la courbe de dérivée décrit la fin d'un effet de capacité lié au puits possiblement affecté d'un effet de captage partiel de l'ouvrage,
2. de 3 à 4-5 minutes environ, la dérivée décrit un léger plateau caractéristique d'un écoulement radial à partir duquel une première estimation de la transmissivité de l'aquifère peut être faite, aux alentours de 10^{-1} m^2/s,
3. de 5 à 70 minutes, la dérivée suit une pente de 0,5 caractéristique d'un écoulement linéaire pouvant correspondre à l'atteinte de deux limites étanches parallèles, ou trois limites étanches (la troisième étant orthogonale aux deux premières),
4. de 70 à 400 minutes, la dérivée décrit une légère inflexion a priori due à un effet de drainance,
5. puis de 400 minutes à la fin de l'essai, la dérivée suit à nouveau une pente de 0,5 caractéristique d'un écoulement linéaire typique de la réaction complète d'un système multicouche limité dans l'espace par deux ou trois limites étanches.

Le diagnostic de cet essai met en évidence une succession d'écoulements typique d'un aquifère très transmissif (10^{-1} m^2/s) limité dans l'espace et assujetti à un effet de drainance a priori en provenance d'un aquifère supérieur. Les courbes bleues de l'illustration 28, présente les résultats d'un modèle (cf. § suivant pour les paramètres du modèle).

Essai de 2014 :

L'illustration 29 présente le diagnostic des essais réalisés en 2014. Il a été établi à partir de la normalisation des données de descente et de remontée du pompage de longue durée (03-05/09/2014) et de la remontée des paliers (02/09/2014). Les courbes de dérivée montrent un comportement similaire avec cependant plus d'information sur le début du pompage en raison de l'acquisition très fine de la mesure (pas de temps d'une seconde) :

1. du début de l'essai à environ 0,2 minutes, la courbe de dérivée décrit la fin de l'effet de capacité lié au puits,
2. de 0,2 à 1 minute, la dérivée forme un plateau typique d'un écoulement radial,
3. de 1 à 7 minutes, la dérivée suit une pente de -0,5 caractéristique d'un écoulement sphérique, ce qui met en évidence le captage partiel du puits,
4. de 7 à 20 minutes environ, la dérivée décrit un plateau caractéristique d'un écoulement radial à partir duquel une première estimation de la transmissivité de l'aquifère peut être faite, aux alentours de 10^{-1} m^2/s,
5. de 20 à 200 minutes environ, la dérivée suit une pente de 0,5 caractéristique d'un écoulement linéaire pouvant correspondre à l'atteinte de deux ou trois limites étanches,
6. de 200 à 600-700 minutes, la dérivée stabilise puis décroit, ce qui est typique de la réaction d'un aquifère superficiel (effet de drainance),
7. puis de 700 minutes à la fin de l'essai, la dérivée suit à nouveau une pente de 0,5 caractéristique de la réaction complète d'un système multicouche limité dans l'espace.

Le diagnostic des essais réalisés en 2014 montrent un comportement de l'aquifère proche de celui de l'essai réalisé en 1970, au détail près que la forte densité de la donnée en début de pompage a permis de mettre en évidence la captage partiel du puits et que les limites étanches sont atteintes pour des temps de pompage beaucoup plus longs quand le niveau imperméable situé au-dessus de l'aquifère a été désaturé. De la même manière, des diagnostics ont été réalisés sur les essais de 1996 et 2005 (cf. Annexe 5) et montrent les mêmes caractéristiques, aux détails près que les courbes sont bruitées en raison du peu de sensibilité de la mesure (précision de 0,03 à 0,05 m suivant les essais) et que l'acquisition des données n'a pas permis de mettre en évidence toute la complexité précédemment décrite. Cependant, elles montrent le même comportement hydrodynamique. Ainsi, la différence de comportement entre l'essai de 1970 et ceux postérieurs à 1996 peut s'expliquer par un changement d'état de l'aquifère passant d'une condition captive à libre. En effet, la distance à la limite s'exprime de la façon suivante :

dist. : 2(Tt/S)^0.5 (T : transmissivité (m^2/s) ; t : temps d'atteinte de la limite (s) ; S : emmagasinement (sans dimension)).

Donc, pour une limite située à la même distance du puits de pompage, cette dernière sera perçue plus rapidement quand l'emmagasinement S est faible, donc typique d'un aquifère captif (cas du test de 1970), que s'il est important, donc typique d'un aquifère libre (cas des tests postérieurs à 1996). L'illustration 30 synthétise ces résultats ; le ratio entre le temps d'atteinte des limites donne une idée du ratio des emmagasinements, soit un emmagasinement approximativement 8 à 10 fois plus élevé à partir de 1996. On notera aussi un effet de

drainance plus important pour les essais postérieurs à 1996 probablement créé par une différence de pression plus importante entre l'aquifère supérieur, l'aquitanien, et celui pompé, l'Oligocène. La mise en exploitation dans l'Oligocène semblerait donc forcer les écoulements verticaux locaux. Les courbes bleues de l'illustration 29, présente les résultats d'un modèle (cf. § suivant pour les paramètres du modèle).

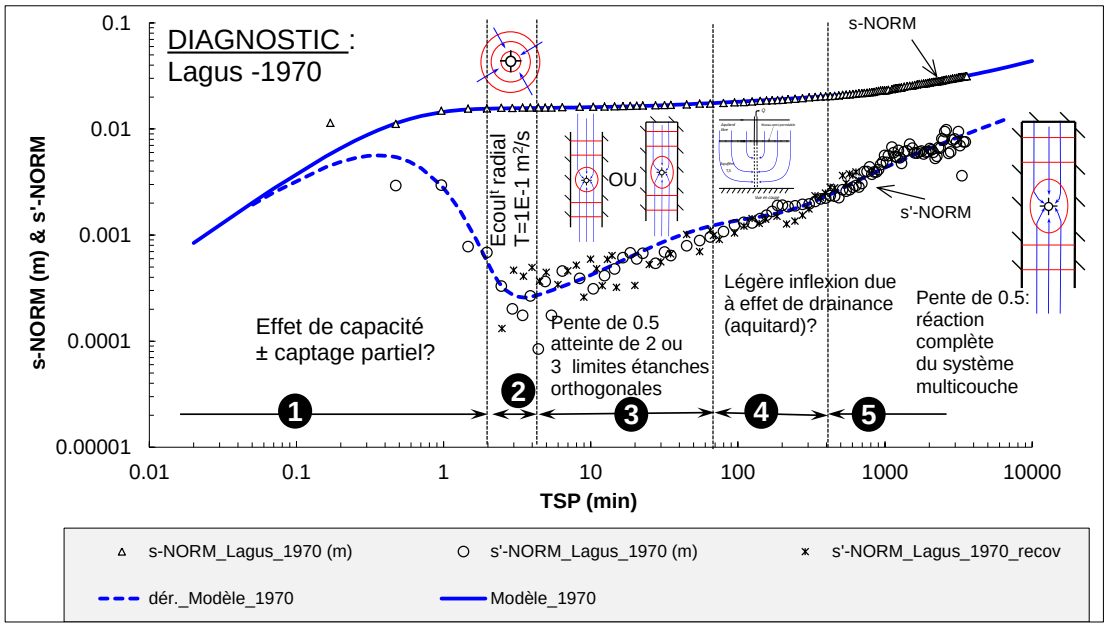


Illustration 28 : Diagnostic de l'essai réalisé en 1970 au forage Moulin Lagus (27/07/1970). Aquifère captif.
s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé à la descente et recov : à la remontée du niveau. En bleu : modèle (trait plein : rabattement ; pointillés : dérivée).

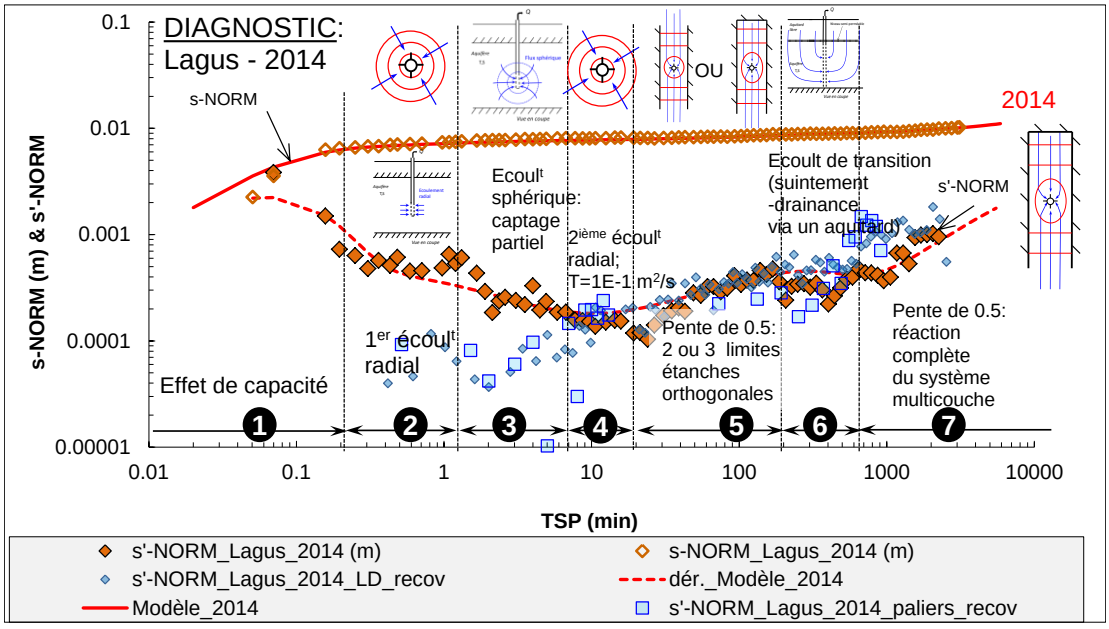


Illustration 29 : Diagnostic des essais réalisés en 2014 au forage Moulin Lagus. Aquifère libre.
s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé à la descente et recov : à la remontée du niveau. En bleu : modèle (trait plein : rabattement ; pointillés : dérivée).

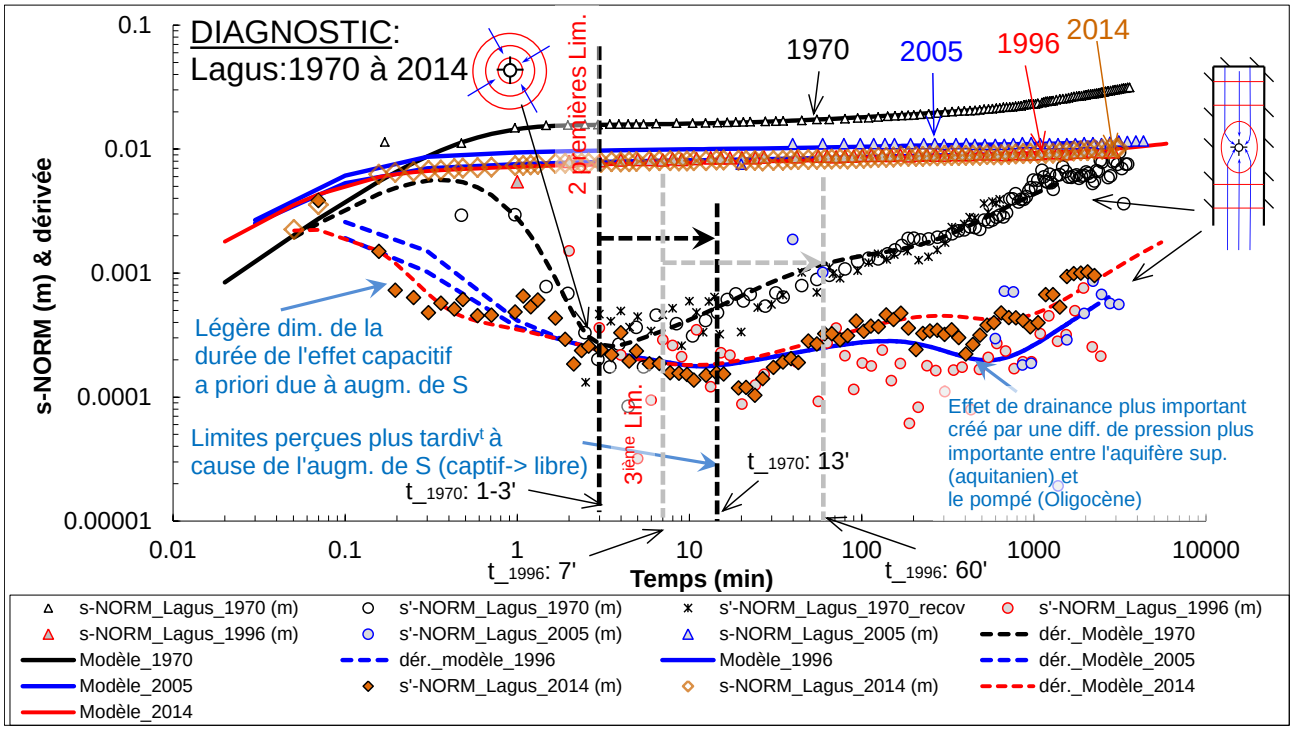


Illustration 30 : Comparaison des diagnostics entre l'essai de 1970 et ceux postérieurs à 1996.

Modélisation de l'ensemble des essais

Les diagnostics des essais réalisés sur le forage du Moulin Lagus mettent en évidence que le forage est situé dans un aquifère très transmissif qu'il ne capte que partiellement, que l'aquifère est limité dans l'espace par trois limites étanches parallèles et qu'il est soumis à des effets de drainance. Les caractéristiques du modèle mathématique choisi pour modéliser les essais sont (Illustration 31 ; modèle modifié de Hunt et Scott ; 2007) :

- un aquifère multicouche, composé de deux aquifères, l'un inférieur (celui pompé) et l'autre supérieur, séparé par un semi-perméable, (effet de drainance) ;
- prise en compte d'une anisotropie de perméabilité (ou transmissivité) 3-D. L'anisotropie verticale est défini par le ratio Th/Tv (Th : transmissivité horizontale et Tv, verticale), et l'anisotropie dans le plan horizontal x,y par le ratio Tyy/Txx (Tyy : selon l'axe des y et Txx selon l'axe des x). Cette option n'a pas été utilisée car nécessitant plusieurs piézomètres d'observation pendant les essais ;
- captage partiel du forage et du piézomètre dans l'aquifère ;
- jusqu'à 4 limites étanches orthogonales. Deux parallèles à l'axe des y et deux perpendiculaires ;
- positionnement quelconque du puits et du piézomètre dans l'aquifère ;
- et prise en compte des effets liés au puits (capacité de puits, skin, pertes de charges quadratiques).

L'illustration 31 et le tableau 4 présentent les modèles et leurs paramètres.

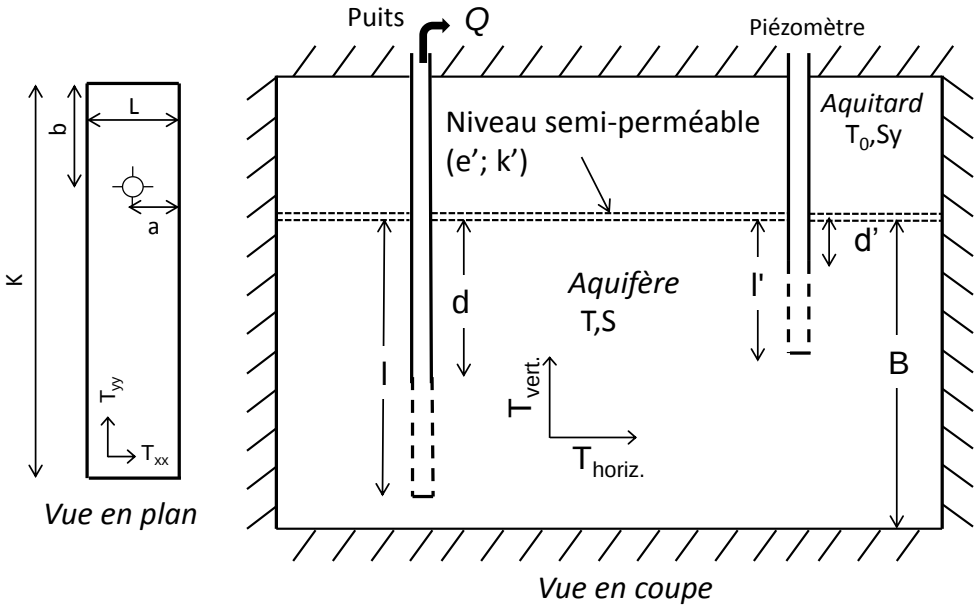


Illustration 31 : Modèles à effet de drainance d'un niveau semi-peméable sus-jacent, anisotropie de perméabilité 3-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales, captage partiel du puits (ou du piézomètre). Modifié des solutions de Hantush (1964) et Hunt et Scoot (2007). Dans la solution de Hantush $T_0 \rightarrow \infty$ ou $Sy \rightarrow \infty$.

Paramètres du modèle modifié de Hunt et Scott, 2007	
distance	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m^2/s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Epaisseur de l'aquifère capté	B (m)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Epaisseur de l'éponte	e' (m)
Transmissivité de l'aquitard	T_0 (m^2/s)
Emmagasinement de l'aquitard	Sy (-)
Longueur du puits	l (m)
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)
Longueur du piézomètre	l' (m)
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère du piézomètre	d' (m)
Anisotropie de transmissivité verticale	Th/Tv (-)
Anisotropie de transmissivité dans le plan x,y	Tyy/Txx (-)
Dist. à la 1ère limite (a)	Dist.lim. 1 (min et m)
Dist. à la 2ième limite (L-a)	Dist.lim. 2 (min et m)
Dist. à la 3ième limite (b)	Dist.lim. 3 (min et m)
Dist. à la 4ième limite (K-b)	Dist.lim. 4 (min et m)
Skin de puits	Sk (-)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	C ($m^{-5}s^2$)
Capacité du puits	Rc (m)

Tableau 4 : Paramètres du modèle à effet de drainance (modèle modifié de Hunt et Scott, 2007).

Ce modèle est bien adapté aux configurations mises en évidence lors des diagnostics.

L'illustration 32 à l'illustration 36 présentent les modélisations des essais réalisés en 1970, 1996, 2005, 2008 et 2014 (y compris au forage Saucats Bourg - 08276X0001/F), elles sont de bonne qualité, et ont toutes, excepté la valeur de l'emmagasinement, été réalisées avec des paramètres aquifères très proches.

La transmissivité de l'aquifère est forte et estimée à $1{,}2x10^{-1}$ m^2/s. Elle est typique d'un milieu très fracturé, karstifié. Il est estimé que l'ouvrage capte les 20 premiers mètres d'un aquifère d'une puissance de 60 m, ce qui est conforme aux observations géologiques (épaisseur d'Oligocène : 50-60 m). La valeur de l'emmagasinement, $4{,}0x10^{-4}$ (-) pour l'essai de 1970, est réaliste pour un aquifère captif bien qu'estimée au puits de pompage[3]. Celle des essais postérieurs à 1996 est de $3{,}5x10^{-3}$ (-), et plus typique d'un aquifère fracturé libre. Dans les deux cas, les premières limites étanches sont estimées à environ 330 m du puits, et à environ 700 m pour la troisième. Elles forment un couloir d'environ 600-700 m de large dont une extrémité est fermé, il pourrait s'agir de l'extension latérale d'une zone fracturée/karstifiée. Les propriétés de l'aquifère sus-jacent sont différentes entre les essais de 1970 et ceux réalisés post 1996. Vraisemblablement, cette différence traduit plus un phénomène d'effet de drainance plus important post 1996 qu'un réel changement des propriétés de cet aquifère. Ceci pourrait s'expliquer par une différence de charge plus importante entre les deux aquifères au moins à partir de 1996.

Les effets de puits, notamment les pertes de charge au puits (C et Sk), sont différentes dans les quatre cas et ce en raison de phases de développement et/ou colmatage de l'ouvrage. On note aussi que l'effet capacitif du puits est moins important post 1996, à cause de l'augmentation de l'emmagasinement.

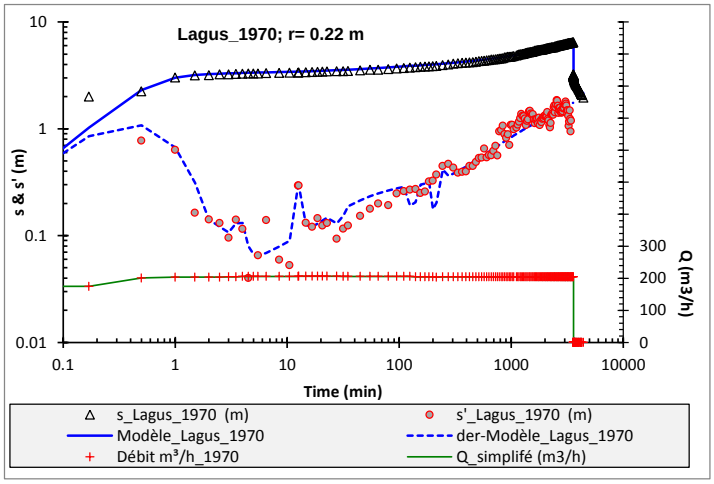


Illustration 32 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé du 27-29/07/1970. Modèle : Hunt et Scott modifié.

[3] Au puits de pompage, il n'est pas possible d'avoir une estimation fiable de l'emmagasinement en raison des effets de puits, de l'incertitude sur le rayon du puits et aussi du fait que l'on capte des fractures (rayon d'échange puits/aquifère plus grand que le rayon du puits). Donc, l'emmagasinement au puits est un paramètre de calage, parfois sans signification. Cependant, son utilisation pour faire des simulations d'exploitation n'altère pas la qualité des résultats.

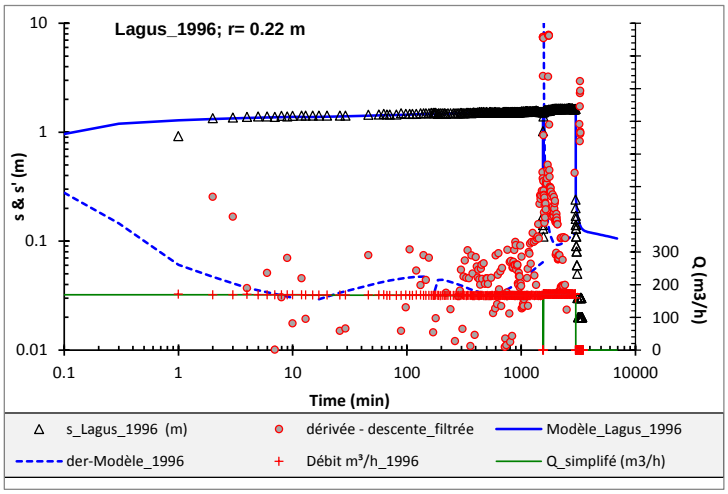


Illustration 33 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé du 20-22/03/1996. Modèle : Hunt et Scott modifié.

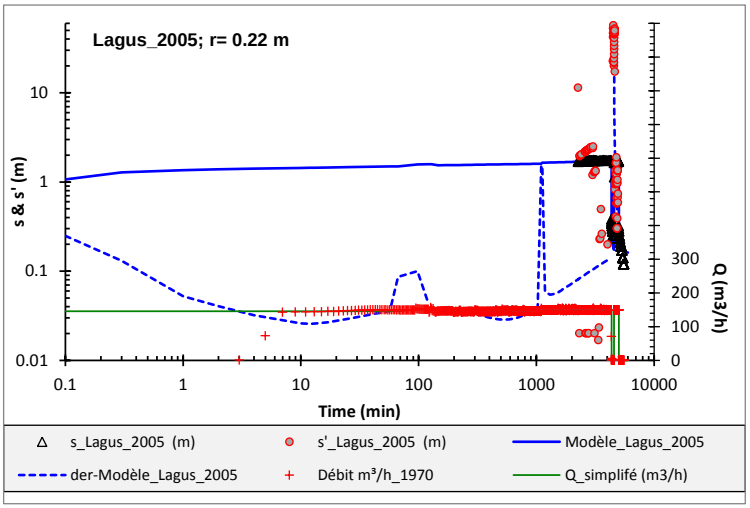


Illustration 34 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé du 12-15/08/2005. Modèle : Hunt et Scott modifié.

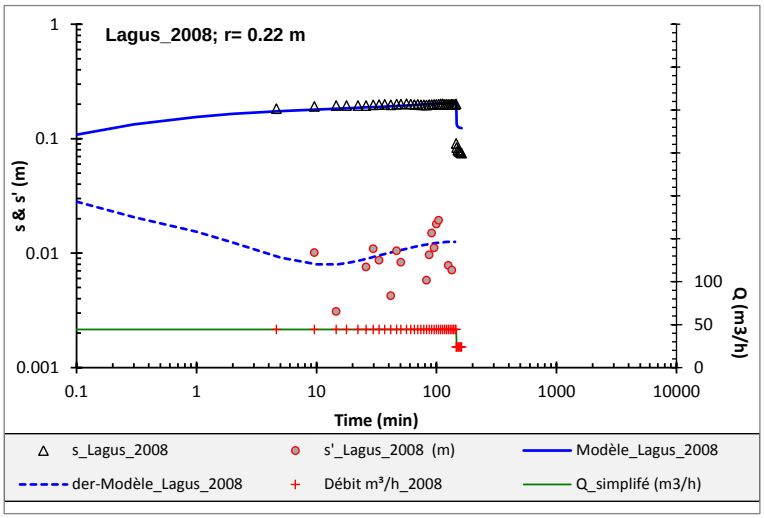


Illustration 35 : Modélisation du rabattement au forage de Moulin Lagus ; essai réalisé le 16/08/2005. Modèle : Hunt et Scott modifié.

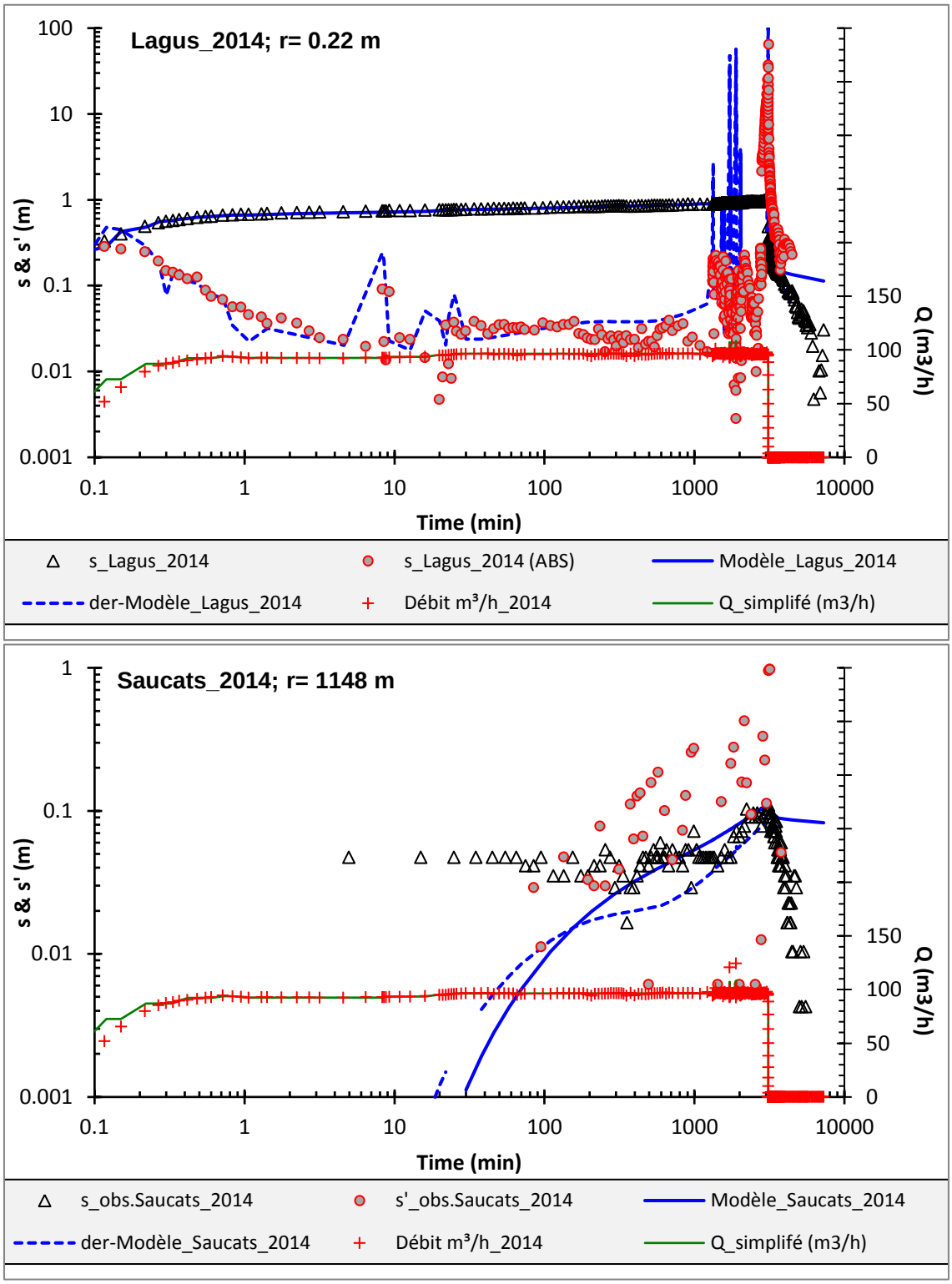


Illustration 36 : Modélisation du rabattement aux forages de Moulin Lagus (graphe du haut) et Saucats Bourg (graphe de bas) ; essais réalisés du 03 au 05/09/2014. Modèle : Hunt et Scott modifié.

Illustration 32 à 35 : rabattement observé (s) et modélisé en représentation log-log avec figuration des dérivées observées et modélisées.

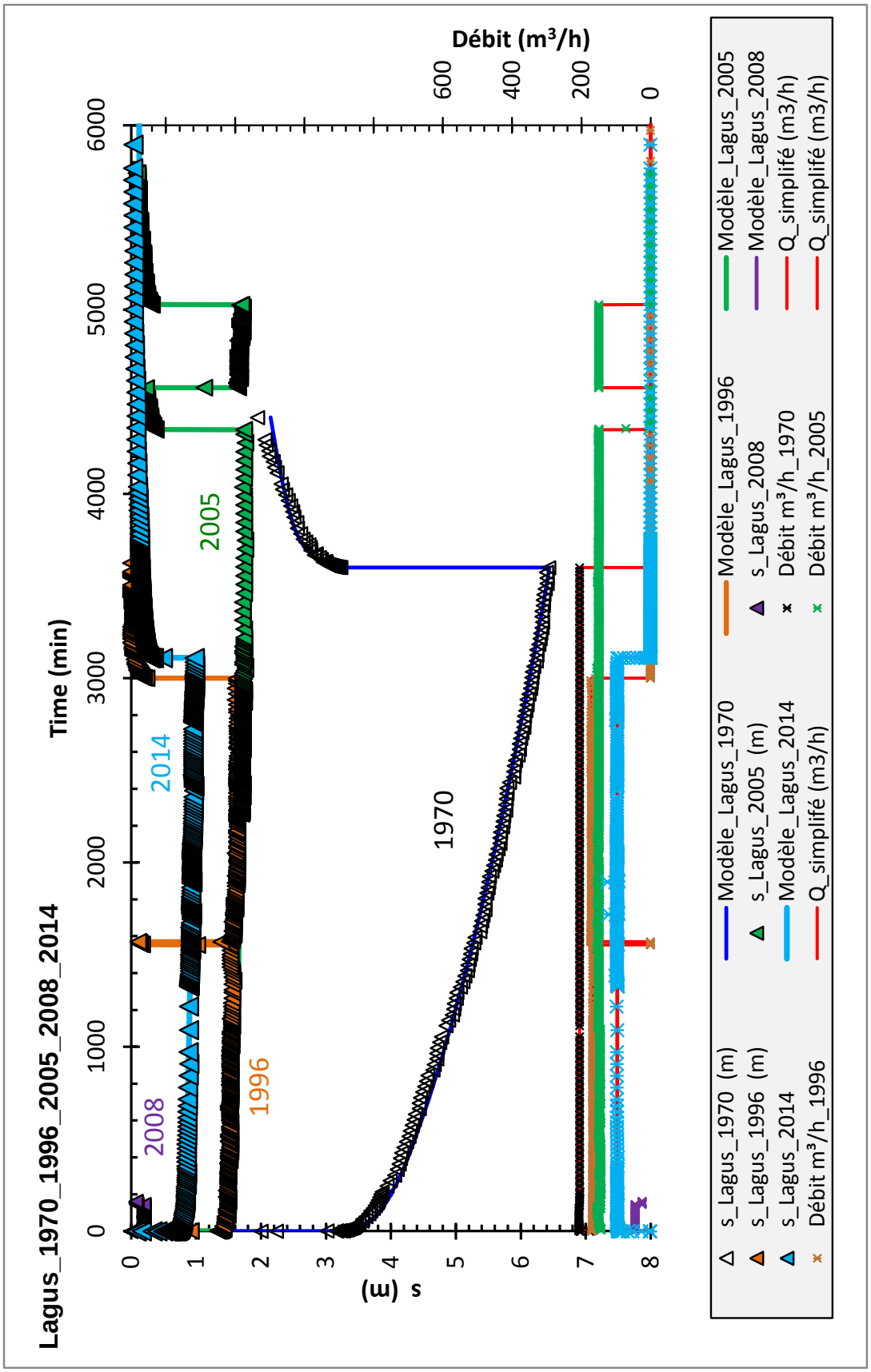


Illustration 37 : Modélisation des rabattements au forage de Moulin Lagus. Essais de 1970, 1996, 2005,2008 et 2014. Modèle : Hunt et Scott modifié. Représentation arithmétique.

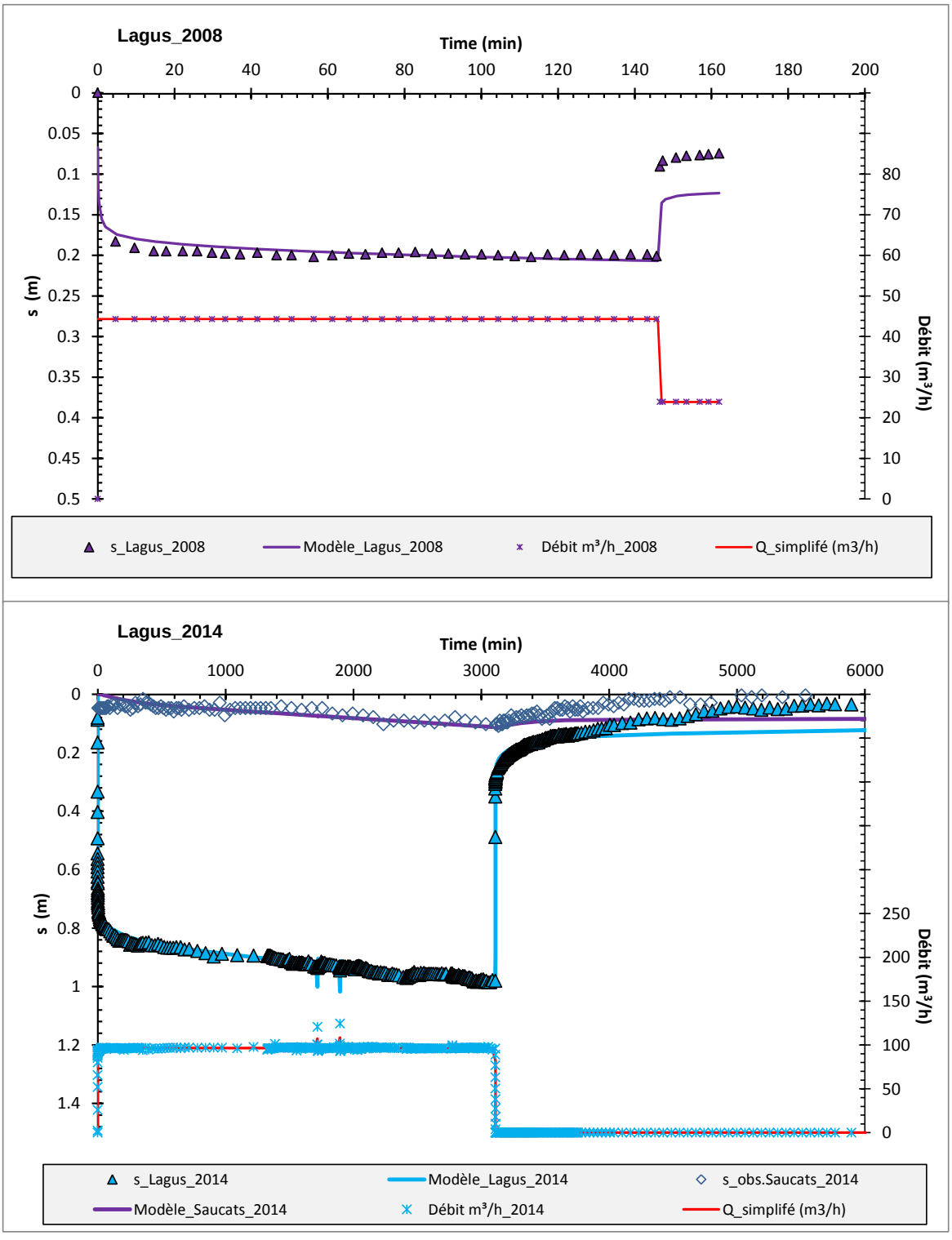


Illustration 38 : Modélisation des rabattements au forage de Moulin Lagus. Zoom sur les essais de 2008 (graphe du haut) et 2014 (graphe du bas). Modèle : Hunt et Scott modifié. Représentation arithmétique.

	Lagus_1970	Lagus_1996	Lagus_2005	Lagus_2008	Lagus_2014	Lagus_2014 (Obs.Saucats)
r (m)	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	1148
T (m^2/s)	1.20E-01	1.20E-01	1.20E-01	1.20E-01	1.20E-01	1.20E-01
S (-)	4.00E-04	3.50E-03	3.50E-03	3.50E-03	3.50E-03	3.50E-03
kh/kv (-)	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
B (m)	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
l (m)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	60.0
d (m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
k' (m/s)	4.50E-08	3.50E-07	3.50E-07	3.50E-07	2.50E-07	2.50E-07
e' (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
T_0 (m^2/s)	1.00E-04	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03
Sy (-)	9.00E-04	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02	2.00E-02	2.00E-02
Dist.lim. 1 (min)	1.5	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
Dist.lim. 2 (min)	1.5	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
Dist.lim. 3 (min)	7.0	61.0	61.0	61.0	61.0	13.0
Dist.lim. 1 (m)	328.6	327.1	327.1	327.1	327.1	327.1
Dist.lim. 2 (m)	328.6	327.1	327.1	327.1	327.1	327.1
Dist.lim. 3 (m)	709.9	708.5	708.5	708.5	708.5	708.5
Sk (-)	26.3	2	2.5	-7	3	-
C ($m^{-5}s^2$)	0	60	220	0	0	-
Rc (m)	0.35	0.22	0.22	0.22	0.22	-

Tableau 5 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de Moulin Lagus. Cf. tableau 2 pour l'explication des paramètres.

NB : la valeur indiquée (emmagasinement) correspond à un paramètre de calage qui n'a pas forcément de signification physique lorsqu'estimée au puits de pompage.

3.3. PIEZOMETRES RODÉO

Chacun des 6 piézomètres réalisés dans le cadre du projet RODÉO a fait l'objet d'essais par paliers de débit et d'essais de pompage de longue durée. Ainsi, les forages de Jacoulet (08277X0312) et de Moulin d'Augey (08276X0131), réalisés dans le cadre de la phase 1 du projet RODÉO (Saltel et al., 2012) ont également fait l'objet de pompage d'essai. Cependant les pompages réalisés sur le forage de Dariet et de Gassies ne permettent pas de réaliser une interprétation complète de l'essai. Les phases de modélisation n'ont pu aboutir pour ces deux tests.

3.3.1. Essais par paliers de débit

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

$s=BQ+CQ^2$

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

A noter que pour des raisons techniques, les essais par paliers de débit n'ont pu être réalisés sur les forages de Dariet et de Gassies.

L'annexe 4 présente les graphes qui ont permis l'estimation des coefficients B et C.

3.3.2. Essais de pompage de longue durée

Forage de Jacoulet (Saint-Morillon - 08277X0312)

- **Diagnostic**

L'illustration 39 présente le diagnostic de l'essai réalisé du 4 décembre 2013 au 8 décembre 2013 au forage de Jacoulet. Il a été établi à partir des données de descente et de remontée du pompage de longue durée. Les courbes de dérivée montrent :

1. du début de l'essai à environ 1 minute, la courbe de dérivée décrit l'effet de capacité lié au puits,
2. de 1 à 100 minutes, la dérivée forme un plateau typique d'un écoulement radial à partir duquel une première estimation de la transmissivité de l'aquifère peut être faite, aux alentours de $6{,}4.10^{-3}$ m^2/s,
3. puis de 100 minutes à la fin de l'essai, la dérivée suit une pente de 0,5 caractéristique d'un écoulement linéaire pouvant correspondre à l'atteinte de deux ou trois limites étanches.

Les courbes bleues de l'illustration 39, présentent les résultats du modèle décrit page suivante.

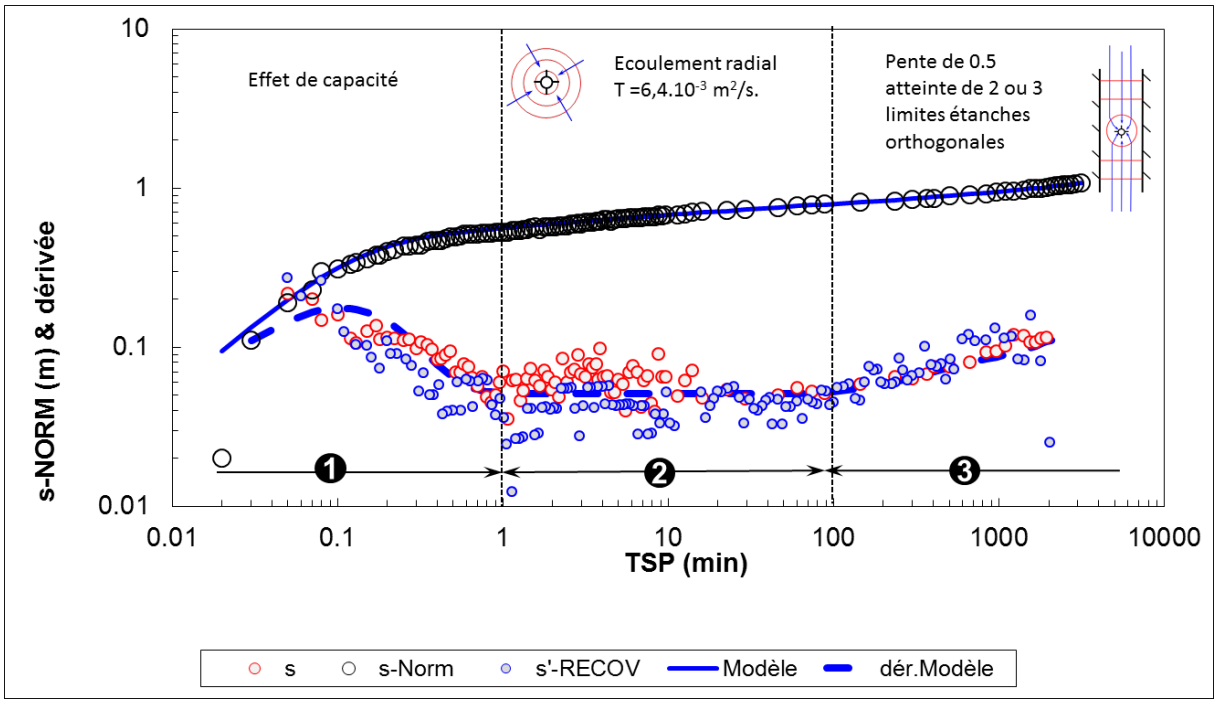


Illustration 39 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Jacoulet - 08277X0312.

- **Modélisation**

Les caractéristiques du modèle mathématique choisi pour modéliser les essais sont les suivantes :

- aquifère monocouche sans effet de drainance
- aquifère isotrope
- puits parfait
- 2 limites étanches parallèles.
- et prise en compte des effets de capacité de puits.

Le tableau 6 présente les valeurs des paramètres utilisés pour le modèle.

Distance	r (m)	0.062
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m^2/s)	6.40E-03
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	4.00E-03
% aquifère capté	B (%)	100
Temps à la 1ère limite	Dist.lim. 1 (min)	100
Temps à la 2ième limite	Dist.lim. 2 (min)	800
Dist. à la 1ière limite	Dist.lim. 1 (m)	195.96
Dist. à la 2ième limite	Dist.lim. 2 (m)	554.26
Capacité du puits	Rc (m)	0.12

Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de Jacoulet - 08277X0312.

L'illustration 40 présente le résultat des rabattements simulés.

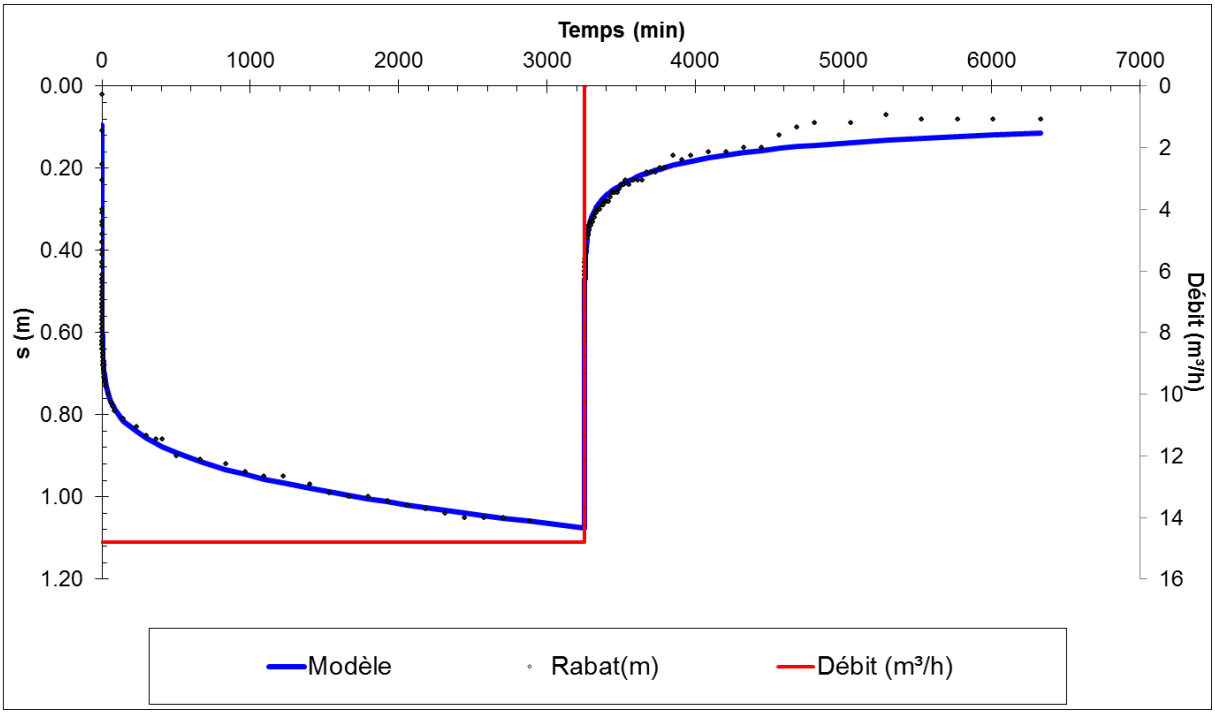


Illustration 40 : Modélisation des rabattements au forage de Jacoulet - 08277X0312.

Forage de Moulin d'Augey (La Brède - 08276X0131)

- **Diagnostic**

L'illustration 41 présente le diagnostic de l'essai réalisé du 19 novembre 2013 au 22 novembre 2013 au forage de Moulin d'Augey. Il a été établi à partir des données de descente et de remontée du pompage de longue durée. Les courbes de dérivée montrent :

1. du début de l'essai à environ 0,7 minutes, la courbe de dérivée décrit l'effet de capacité lié au puits,
2. de 0,7 à 3 minutes, la dérivée forme un plateau typique d'un écoulement radial,
3. de 3 à 40 minutes, la dérivée suit une pente de -0,5 caractéristique d'un écoulement sphérique, ce qui met en évidence le captage partiel du puits,
4. puis de 40 minutes à la fin de l'essai, la dérivée décrit un plateau caractéristique d'un écoulement radial à partir duquel une première estimation de la transmissivité de l'aquifère peut être faite, aux alentours de $8{,}8.10^{-3}$ m^2/s.

Les courbes bleues de l'illustration 41 présentent les résultats du modèle décrit en suivant.

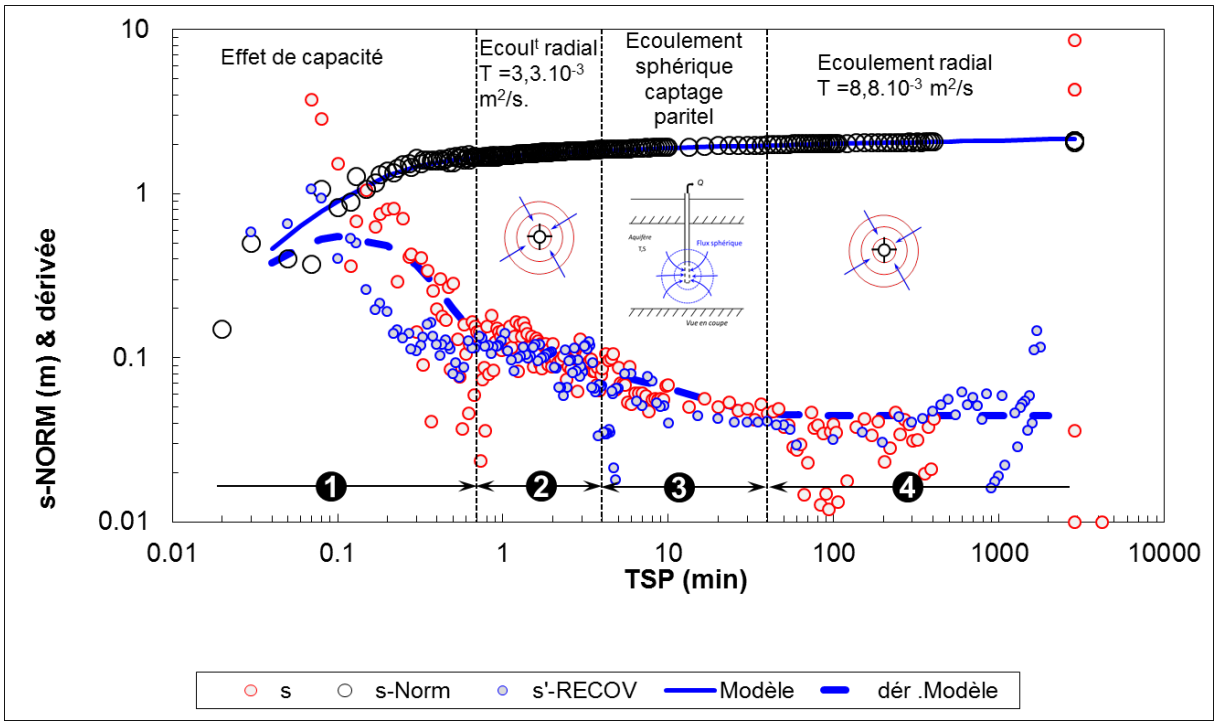


Illustration 41 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Moulin d'Augey - 08276X0131.

- **Modélisation**

Les caractéristiques du modèle mathématique choisi pour modéliser les essais sont les suivantes :

- aquifère monocouche sans effet de drainance
- aquifère isotrope
- captage partiel du forage
- et prise en compte des effets de capacité de puits.

Le Tableau 7 présente les valeurs des paramètres utilisés pour le modèle.

Distance	r (m)	0.089
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m^2/s)	8.80E-03
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	9.00E-05
Epaisseur de l'aquifère capté	B (m)	80
Longueur du puits	l (m)	32.5
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)	2.5
Capacité du puits	Rc (m)	0.05

Tableau 7 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de Moulin d'Augey - 08276X0131.

L'illustration 42 présente le résultat des rabattements simulés.

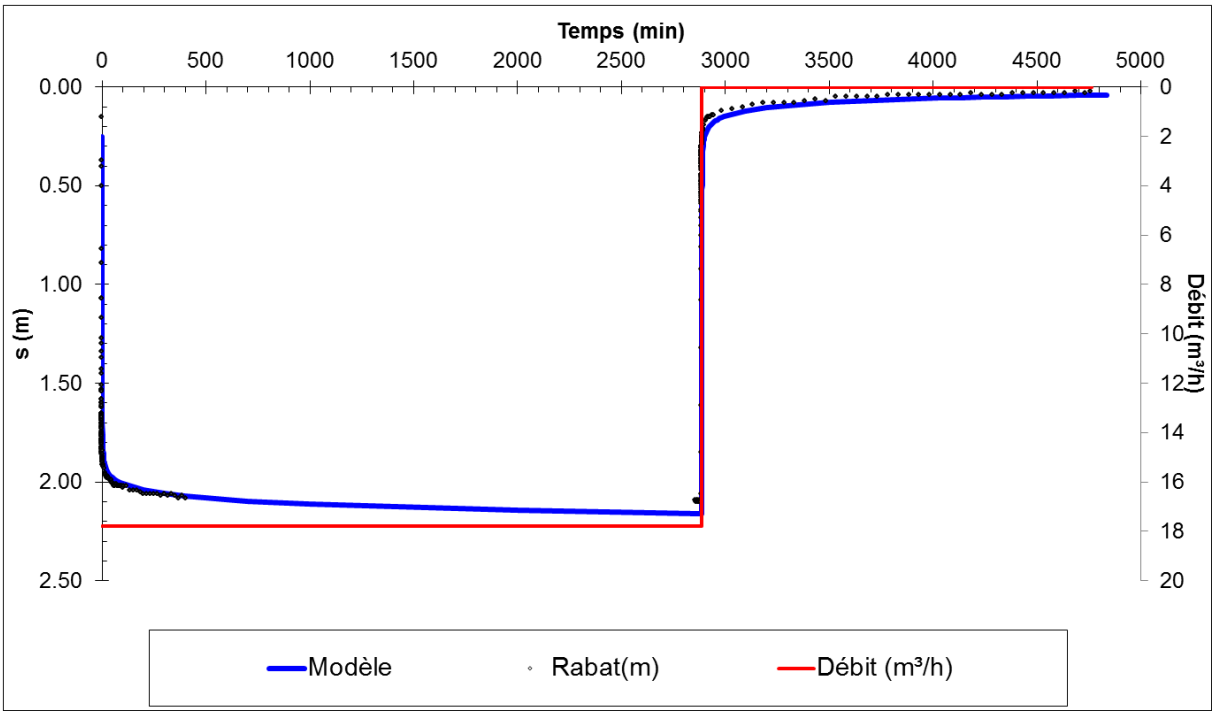


Illustration 42 : Modélisation des rabattements au forage de Moulin d'Augey - 08276X0131.

Forage de Dariet (Saint-Morillon - 08513X0050)

- **Diagnostic**

Les courbes de dérivée calculées sur les phases de descente et de remontée ne se superposent pas (Illustration 43). Elles ont des formes similaires, et ne sont pas décalées dans le temps, les variations des pentes de la dérivée arrivant environ en même temps. Sur la première partie de l'essai, les deux courbes sont presque superposées.

Par contre, il y a par la suite un fort décalage en ordonnée. Le plateau de la dérivée, traduisant un écoulement radial, indique à la descente une valeur de transmissivité T=2,8 10^{-4} m^2/s contre T=1.10^{-3} m^2/s à la remontée. Cela traduit vraisemblablement le fait que durant le pompage une partie de l'aquifère (ou la première fracture pour un milieu fracturée) a rapidement été

désaturée. Les deux courbes montrant de fortes divergences à partir de 5-10' de pompage, il est possible que cette zone corresponde à la portion de l'aquifère où le rabattement était compris entre 4 et 5 m pendant les essais soit entre 31 et 32 m de profondeur au sein du réservoir de l'Oligocène. Lors du forage, dès la rentrée dans les formations de l'Oligocène, à partir de 26 m de profondeur, la perte totale de circulation de boue a empêché la récolte de déblais de forage. Les diagraphies semblent indiquer que le réservoir de l'Oligocène présente des perméabilités potentiellement importantes mais quelque peu hétérogène liées au degré de fracturation et/ou de karstification des calcaires à Astéries.

Il faut noter que deux capteurs différents ont été installés lors de cet essai et que les mesures sont cohérentes et se superposent aux relevés manuels. Par ailleurs, le débit est relativement stable pendant la durée de l'essai, un problème lié à la métrologie parait donc peu probable.

En supposant que durant l'essai une partie de l'aquifère ait été désaturée, la transmissivité de l'aquifère est à peu près bien estimée sur la remontée, mais sous-estimée sur la descente.

Après la phase d'écoulement radial, la dérivée suit une pente de 0,5 traduisant un écoulement chenalisé (présence de deux limites étanches parallèles).

En raison du comportement atypique du pompage (remontée ne se superposant pas à la descente), la phase de modélisation n'a pas été entreprise pour ce pompage.

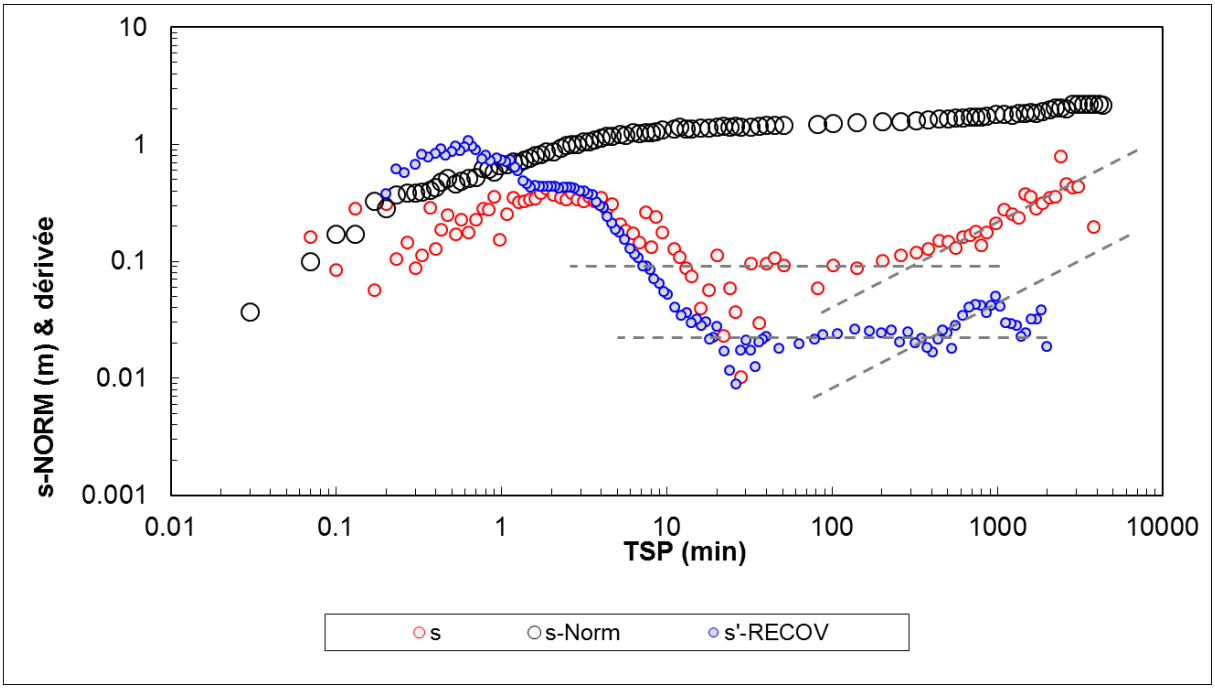


Illustration 43 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Dariet - 08513X0050.

Forage du Gassies (Cabanac-et-Villagrains - 08513X0049)

L'Illustration 44 présente le diagnostic de l'essai réalisé du 13 décembre 2013 au 14 décembre 2013 au forage du Gassies. L'essai a duré moins de 11 heures en raison du dénoyage de la pompe. En effet, il s'avère que le rabattement a fortement augmenté après 8 heures et 45 minutes de pompages passant de 8 m à plus de 16 m en fin de pompage (profondeur de la pompe). La très forte augmentation des rabattements ne peut s'expliquer par l'atteinte de limites étanches. La pente étant supérieure à 0,5 sur la courbe de dérivée. Il est probable que

lors de l'essai un ou plusieurs niveau(x) producteur(s) a/ont été dénoyé(s). Le rabattement à partir duquel une rupture de pente est observée (8,3 m) correspond à une profondeur de 31 m. Cette cote coïncide aux pertes totales observées lors de la réalisation du forage. Il est donc très probable que le dénoyage de ce niveau très producteur est entrainé la forte augmentation du rabattement et donc le dénoyage de la pompe. Une valeur de transmissivité peut être interprétée de la phase d'écoulement radial observée entre et 257 min : T=1,2 10^{-4} m^2/s. En raison de la faible durée du pompage et de l'impossibilité de prendre en compte la remontée dans le diagnostic en raison de la fluctuation des débits liée au dénoyage de la pompe, cet essai n'a pas été modélisé.

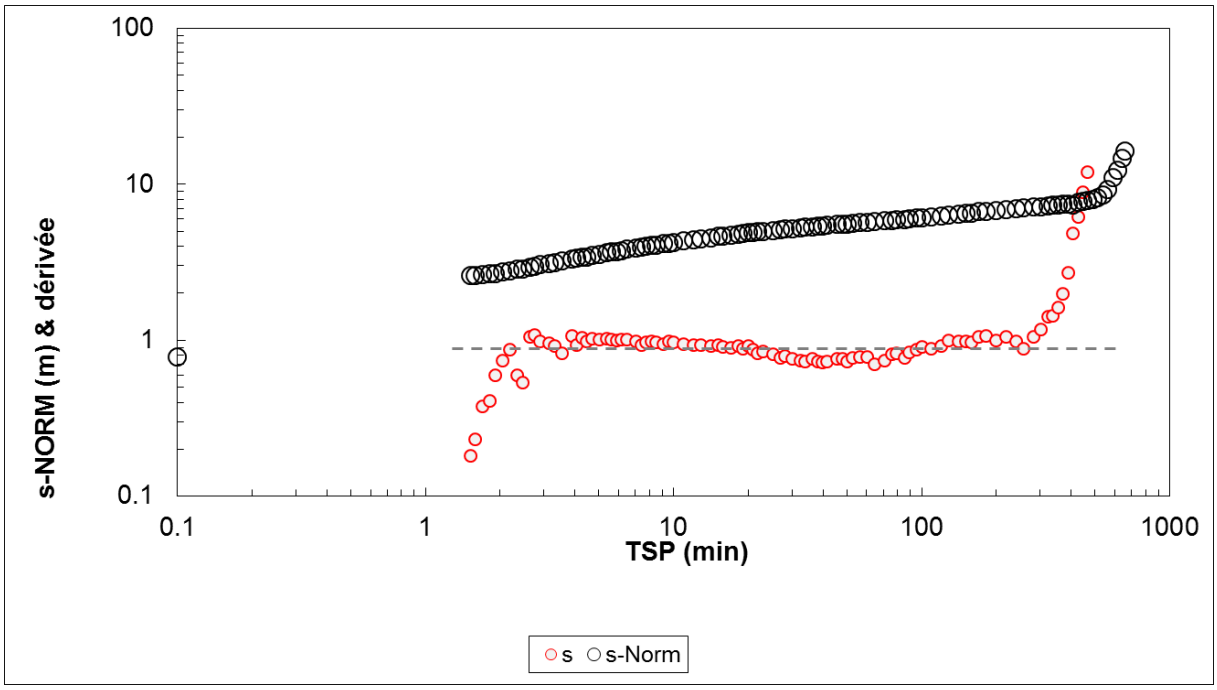


Illustration 44 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de Gassies - 08513X0049.

Forage du Péloua (Saucats - 08276X0138)

- **Diagnostic**

L'illustration 47 présente le diagnostic de l'essai réalisé du 3 novembre 2014 au 8 novembre 2014 au forage du Péloua. L'essai s'est déroulé en plusieurs phases (Illustration 45) :

- une première phase de pompage d'une durée de 306 minutes où le débit peut être considéré comme stable à 17,58 m³/h suivi d'une phase de remontée de 646 minutes due à un arrêt du groupe électrogène,
- la reprise du pompage pour une période plus longue (un peu plus de 50 heures) où le débit présentait des variations de débits entre 17 et 18 m³/h suivi d'une période de remontée (sur 42 heures).

A noter que des oscillations du niveau ont été observées lors de la seconde phase de remontée. Ces variations rendent l'interprétation de l'essai plus compliquée. Leur origine est potentiellement liée à un effet barométrique comme le montre la comparaison de l'évolution du rabattement et de la pression barométrique (Illustration 46).

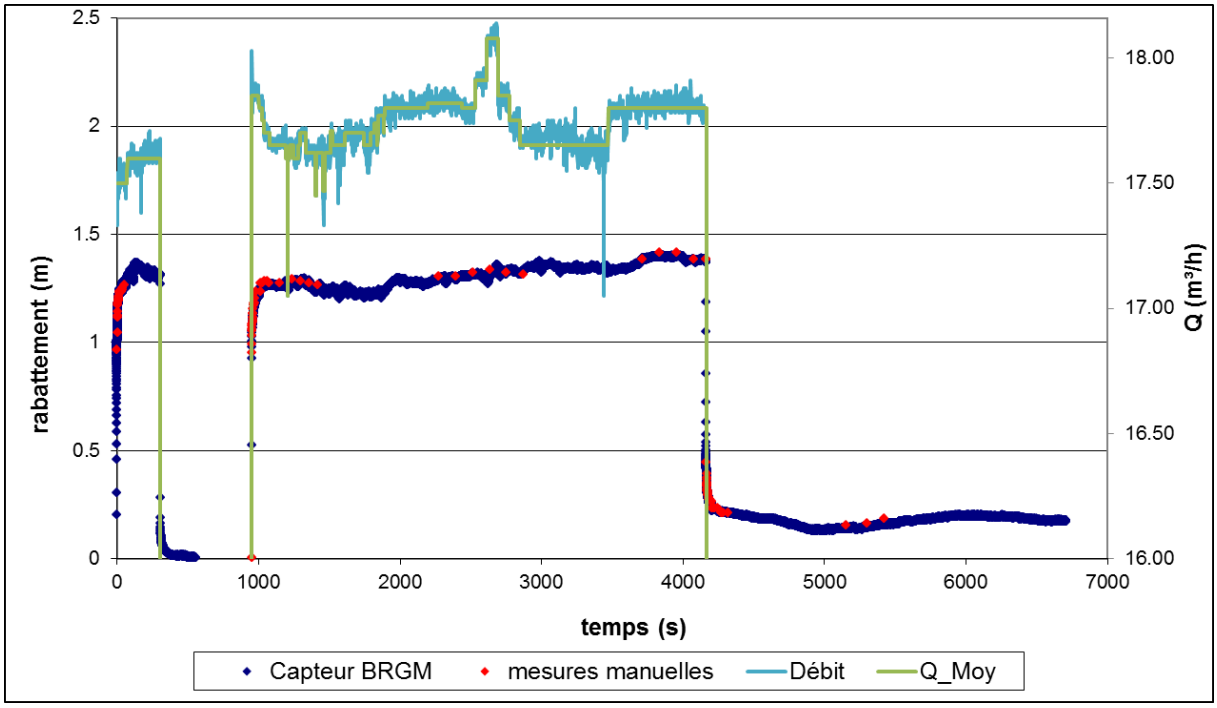


Illustration 45 : Evolution des rabattements et des débits lors des essais de pompage sur le forage du Péloua - 08276X0138.

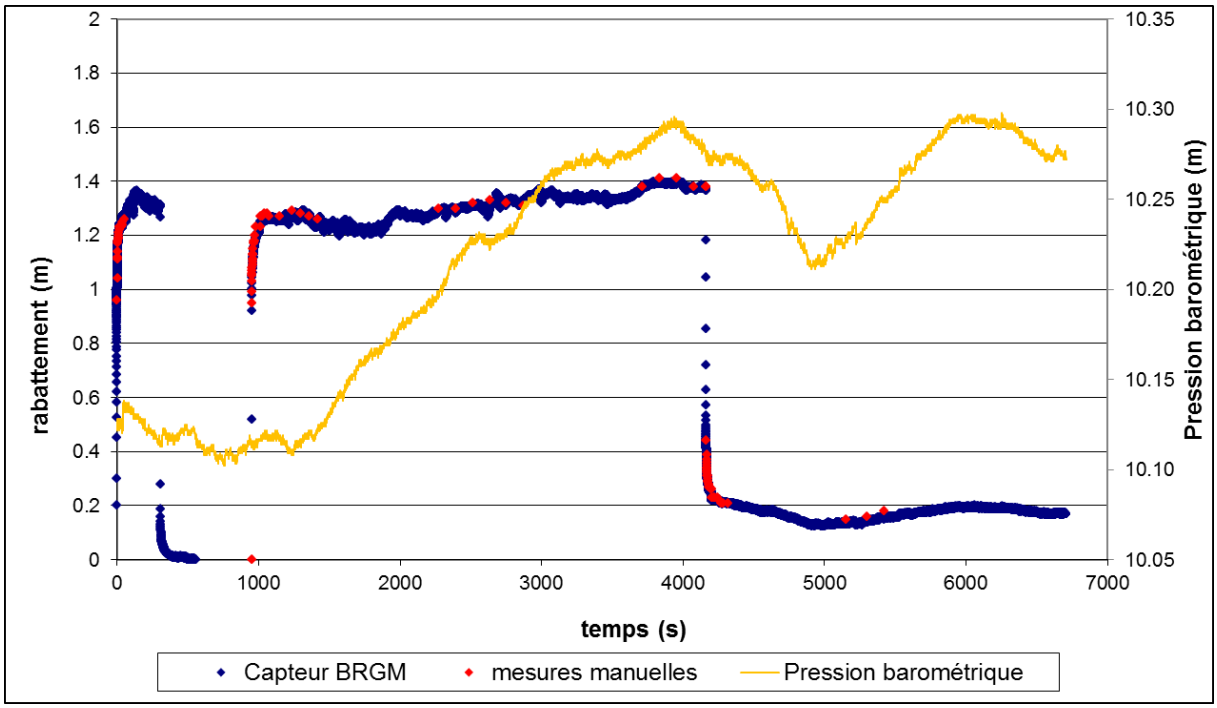


Illustration 46 : Evolution des rabattements et de la pression barométrique lors des essais de pompage sur le forage du Péloua - 08276X0138.

En raison des variations de débits mesurées lors de la seconde phase de pompage, l'interprétation a été réalisée sur la première phase. Les courbes de dérivée montrent :

1. du début de l'essai à environ 0,5 minute, la courbe de dérivée décrit l'effet de capacité lié au puits,

2. de 0,5 à 9 minutes, la dérivée forme un plateau typique d'un écoulement radial,
3. de 9 minutes à la fin de l'essai, la dérivée suit une pente de -0,5 caractéristique d'un écoulement sphérique, ce qui met en évidence le captage partiel du puits.

Les courbes bleues de l'illustration 47, présentent les résultats du modèle décrit en suivant.

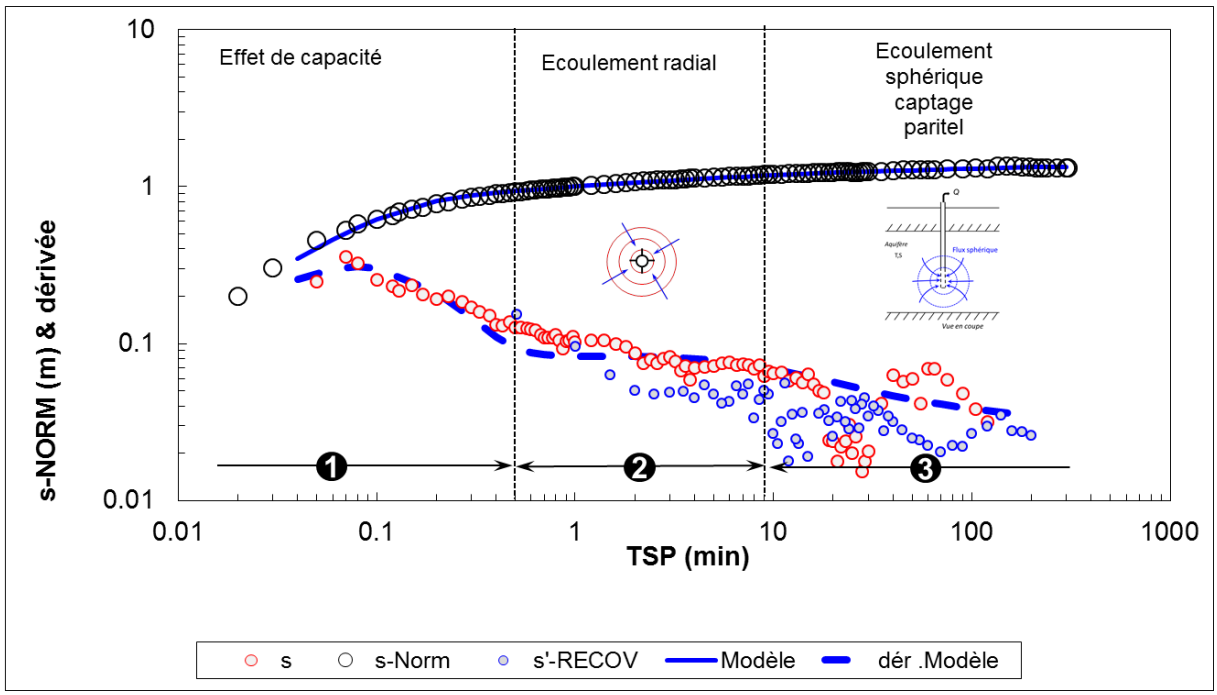


Illustration 47 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage du Péloua - 08276X0138.

- **Modélisation**

Les caractéristiques du modèle mathématique choisi pour modéliser les essais sont les suivantes :

- aquifère monocouche sans effet de drainance
- aquifère isotrope
- captage partiel du forage
- et prise en compte des effets de capacité de puits.

Le tableau 8 présente les valeurs des paramètres utilisés pour le modèle.

Distance	r (m)	0.057
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m^2/s)	1.22E-02
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	3.00E-03
Epaisseur de l'aquifère capté	B (m)	50
Longueur du puits	l (m)	25.7
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)	6.5
Capacité du puits	Rc (m)	0.055

Tableau 8 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage du Péloua - 08276X0138.

L'illustration 48 présente le résultat des rabattements simulés. A noter que la remontée est moins bien représentée que la descente du fait des oscillations engendrées par les effets barométriques. Il est également possible que la transmissivité soit un peu sous-estimée.

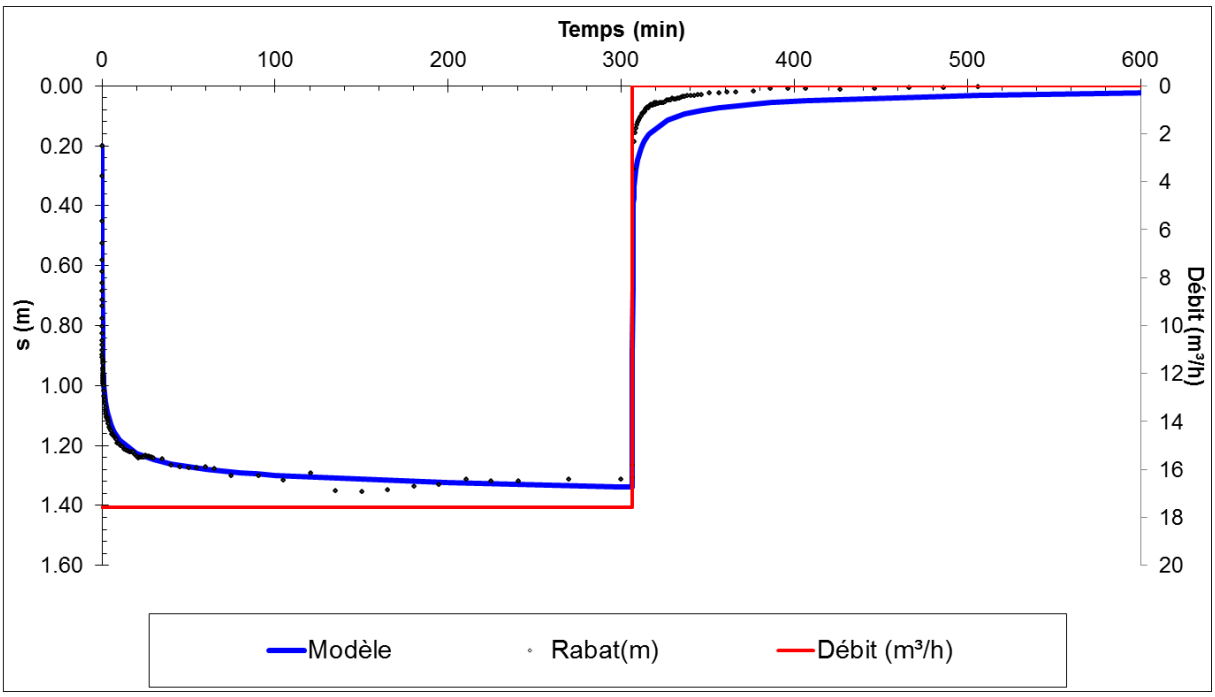


Illustration 48 : Modélisation des rabattements au forage du Péloua - 08276X0138.

Forage de la Migelane (La Brède - 08276X0139)

- **Diagnostic**

L'illustration 49 présente le diagnostic de l'essai réalisé du 30 novembre 2015 au 5 décembre 2015 au forage de la Migelane. Il a été établi à partir de la normalisation des données de descente et de remontée du pompage de longue durée. Les courbes de dérivée montrent :

1. du début de l'essai à environ 2 minutes, la courbe de dérivée décrit l'effet de capacité lié au puits,
2. de 2 à 20 minutes, la dérivée forme un plateau typique d'un écoulement radial,
3. de 20 à 200 minutes, la dérivée suit une pente de -0,5 caractéristique d'un écoulement sphérique, ce qui met en évidence le captage partiel du puits,
4. puis de 200 minutes à la fin de l'essai, la dérivée décrit un plateau caractéristique d'un écoulement radial à partir duquel une première estimation de la transmissivité de l'aquifère peut être faite, aux alentours de $4{,}35.10^{-3}$ m^2/s.

Les courbes bleues de l'illustration 49, présentent les résultats du modèle décrit en suivant.

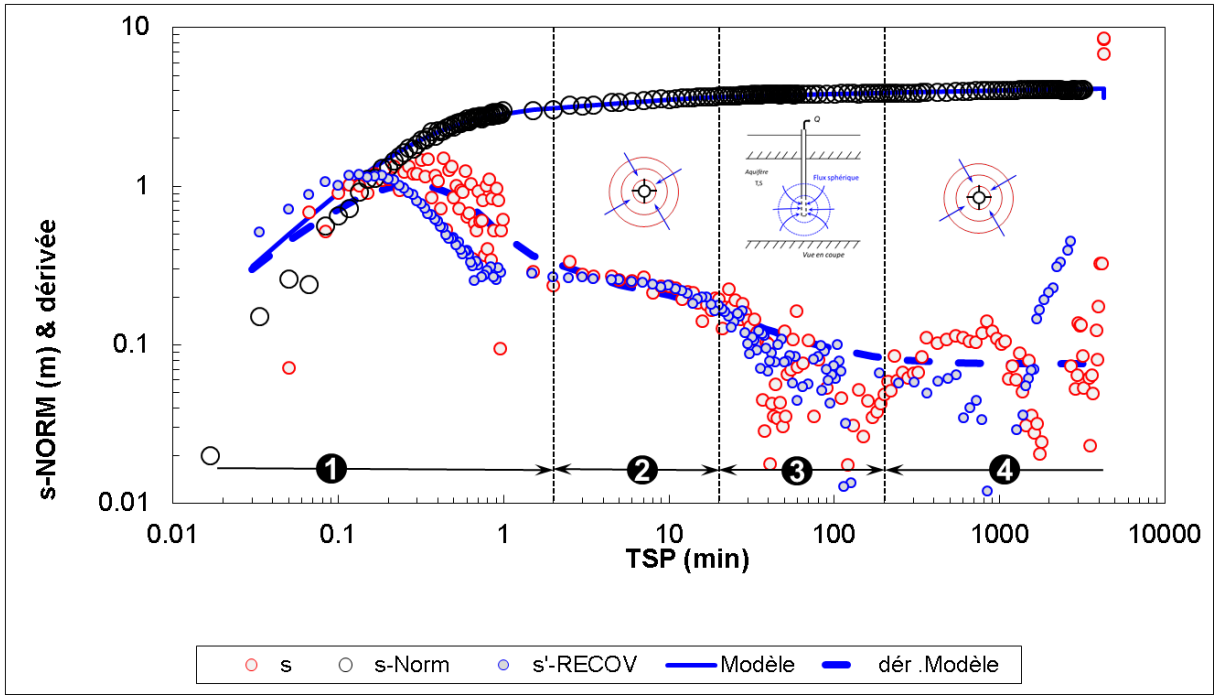


Illustration 49 : Diagnostic de l'essai réalisé au forage de la Migelane - 08276X0139.

- **Modélisation**

Les caractéristiques du modèle mathématique choisi pour modéliser les essais sont les suivantes :

- aquifère monocouche sans effet de drainance
- aquifère isotrope
- captage partiel du forage
- et prise en compte des effets de capacité de puits.

Le tableau 9 présente les valeurs des paramètres utilisés pour le modèle.

Distance	r (m)	0.090
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m^2/s)	4.35E-03
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	1.00E-03
Epaisseur de l'aquifère capté	B (m)	62
Longueur du puits	l (m)	32
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)	14.0
Capacité du puits	Rc (m)	0.045

Tableau 9 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage de la Migelane - 08276X0139.

L'illustration 50 présente le résultat des rabattements simulés.

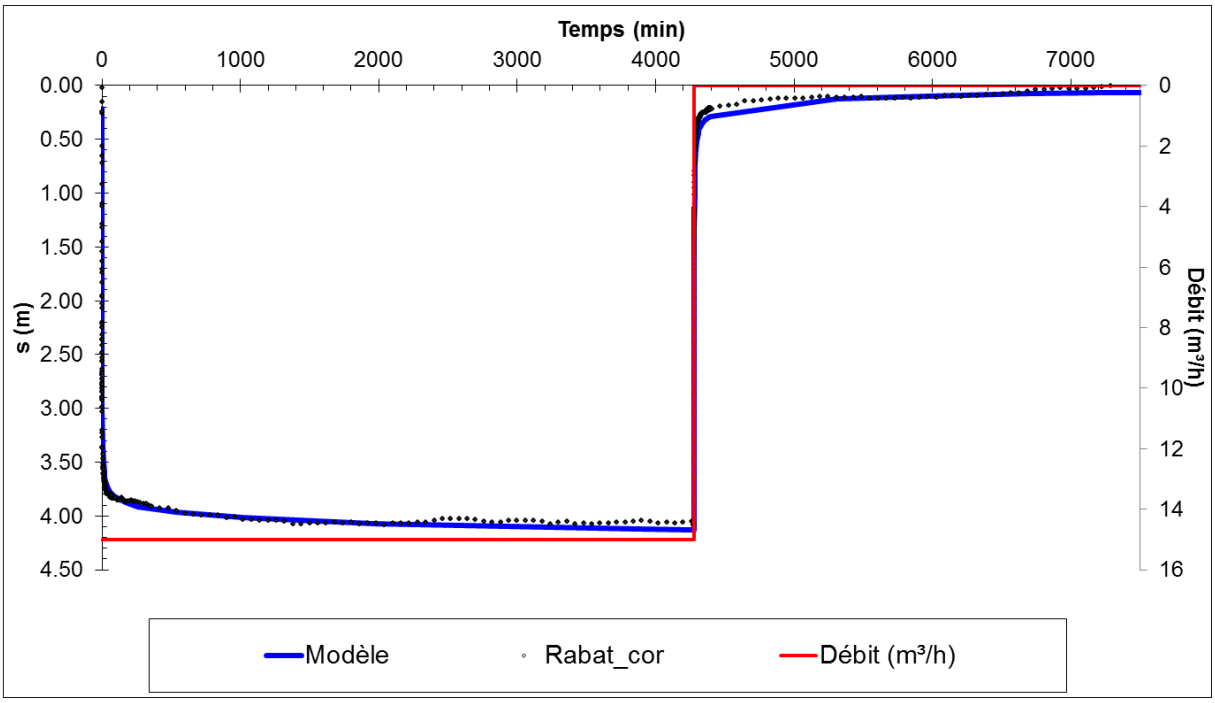


Illustration 50 : Modélisation des rabattements au forage de la Migelane - 08276X0139.

4. Interactions eaux de surface - eaux souterraines

Lors de la phase 2 de l'Atlas des zones à risque du SAGE Nappes profondes de Gironde (Saltel et al., 2010), le BRGM avait sollicité la DREAL Aquitaine pour la réalisation de campagnes de jaugeages. Les mesures avaient été réalisées durant les automnes 2008 et 2009, à l'amont et à l'aval des zones d'affleurements du réservoir oligocène, afin d'évaluer les échanges éventuels entre la nappe et le réseau hydrographique superficiel. Les mesures avaient mis en évidence des pertes sur le ruisseau du Saucats, où les débits diminuaient d'un tiers entre les points de jaugeage amont et aval. Ces résultats étaient cohérents avec les études antérieures qui indiquaient l'existence d'une communication étroite entre le ruisseau du Saucats et la nappe de l'Oligocène (LARAG et al., 1994).

Dans le cadre de la phase 1 du projet RODÉO (Saltel et al., 2012) une approche complémentaire de la caractérisation des écoulements et des échanges nappes / rivières avait été initiée par la réalisation d'une carte piézométrique détaillée du secteur et par la réalisation de jaugeages sur les ruisseaux du Gât-Mort et du Saucats. Les résultats de ces mesures laissaient supposer l'existence, sur certains secteurs, de zones d'alimentation de la nappe depuis ces cours d'eau ; les pertes du cours d'eau vers la nappe étant plus nettes sur le Saucats que sur le Gât-Mort.

Dans le cadre de la présente étude, 4 campagnes de terrain ont été réalisées sur deux ans en périodes de hautes-eaux et de basses-eaux.

Pour chaque campagne, des mesures piézométriques ont été réalisées pour dresser des cartes piézométriques locales, de manière à affiner la connaissance des écoulements sur cette zone. Par ailleurs, des jaugeages de l'amont vers l'aval ont été réalisés sur le Saucats et le Gât-Mort. En différents points resserrés des cours d'eau, les mesures concernent le débit, le pH, la conductivité et la température. Cette approche avait déjà été menée en amont sur le ruisseau du Gât-Mort, où elle avait permis de mettre en évidence une interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines, se traduisant par un apport des eaux issues de l'aquifère du Campanien (Saltel, 2008).

En parallèle, la DREAL Aquitaine a assuré des jaugeages sur le Saucats et le Gât-Mort, afin d'élaborer une courbe de tarage, en vue de l'implantation de stations de jaugeage sur les sites jugés comme favorables lors de la phase 1 du projet (Saltel et al., 2012). L'objectif est de contrôler sur le long terme le débit des cours d'eau et d'orienter le choix final de l'implantation des stations de mesure.

4.1. PIEZOMETRIE DE LA NAPPE DE L'OLIGOCENE

Un total de 4 campagnes piézométriques a été réalisé sur le secteur d'étude. Elles ont eu lieu aux périodes suivantes :

- mai 2013
- octobre 2013
- mai 2014
- octobre 2014

Au total, près de 89 points ont été mesurés lors de ces campagnes. Les mesures sont présentées en annexe 6.

4.1.1. Méthodologie

La méthodologie utilisée pour la construction de la carte piézométrique est issue des travaux de développement réalisés dans le cadre de la convention « Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine » signée entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM sur la mise en œuvre d'outils de cartographie et d'optimisation de réseaux de surveillance à partir des méthodes géostatistiques (Bourgine, 2012).

La géostatistique est une discipline dont l'objectif est l'étude des phénomènes « régionalisés », c'est-à-dire présentant une certaine « structure » dans l'espace (x,y,z) ou dans le temps. Par « structure » on entend la corrélation spatiale d'une variable entre deux points de mesure à l'intérieur d'une zone d'étude ou au même point en deux instants différents. Ainsi la cote piézométrique en un point A d'un aquifère est en général peu différente de la cote piézométrique en un point B très proche (au même instant) : les deux côtes piézométriques sont très « corrélées ». On comprend aisément que cette corrélation diminue lorsque la distance entre les points A et B augmente. A la limite, on conçoit qu'il y ait des cas où ces cotes piézométriques soient indépendantes l'une de l'autre lorsque les points sont suffisamment éloignés (Bourgine et al., 2013).

L'interpolation des cartes, réalisées dans le cadre du projet RODÉO, utilise la méthode du krigeage avec dérive externe, qui consiste à décomposer la variable mesurée $P(x,y)$ en une dérive $M(x,y)$ et un résidu stationnaire $R(x,y)$:

$$P(x,y) = k.M(x,y) + R(x,y)$$

Cette méthode suppose une corrélation relativement linéaire entre la variable d'intérêt et une variable auxiliaire $M(x,y)$ connue partout, cette variable auxiliaire étant nommée « dérive externe ». Le coefficient k (pente de la régression) peut varier localement pour obtenir une meilleure régression locale.

Dans cette technique, on considère que la forme et la structure générale de la variable d'intérêt sont données par la dérive externe. Le krigeage avec dérive externe va schématiquement consister à « plaquer » cette forme sur les données, tout en respectant globalement la forme sous-jacente.

Dans notre cas la variable d'intérêt $P(x,y)$ est la cote piézométrique mesurée lors des campagnes de mesure et la dérive externe $M(x,y)$ correspond à la piézométrie de 2007 issue du modèle hydrodynamique réalisée en 2010 (Saltel et al., 2010) considérée comme la plus intégratrice des données existantes sur la nappe. En effet, le modèle hydrodynamique intègre des données telles que : la géométrie des réservoirs, les paramètres hydrodynamiques, le réseau hydrographique, les échanges avec les nappes encadrantes,…Même si les cartes issues du modèle ne peuvent être considérées comme des références absolues, elles constituent une base solide pour prendre en compte la complexité des systèmes aquifères. Pour réaliser l'interpolation, la carte du modèle sert de dérivée externe, les écarts entre les mesures effectuées sur le terrain lors des différentes campagnes et les valeurs issues du modèle sont calculées et interpolées de manière à déformer la carte initiale (celle du modèle) afin de l'ajuster grâce aux dernières mesures. Cette approche permet notamment de prendre en compte les axes de drainages éventuels et ainsi d'éviter que la surface piézométrique soit supérieure à la topographie dans les secteurs où la nappe est libre. Ce procédé a été appliqué pour élaborer les cartes piézométrique dans le cadre de la gestion des nappes en Gironde (Corbier et al., 2011).

4.1.2. Résultats

Initialement, le modelé piézométrique présentait une orientation générale en direction de la Garonne au nord-est avec une forte influence du réseau hydrographique (Illustration 51) qui venait drainer la nappe de l'Oligocène, soit directement soit par l'intermédiaire des alluvions de la Garonne (Chamayou et al., 1975).

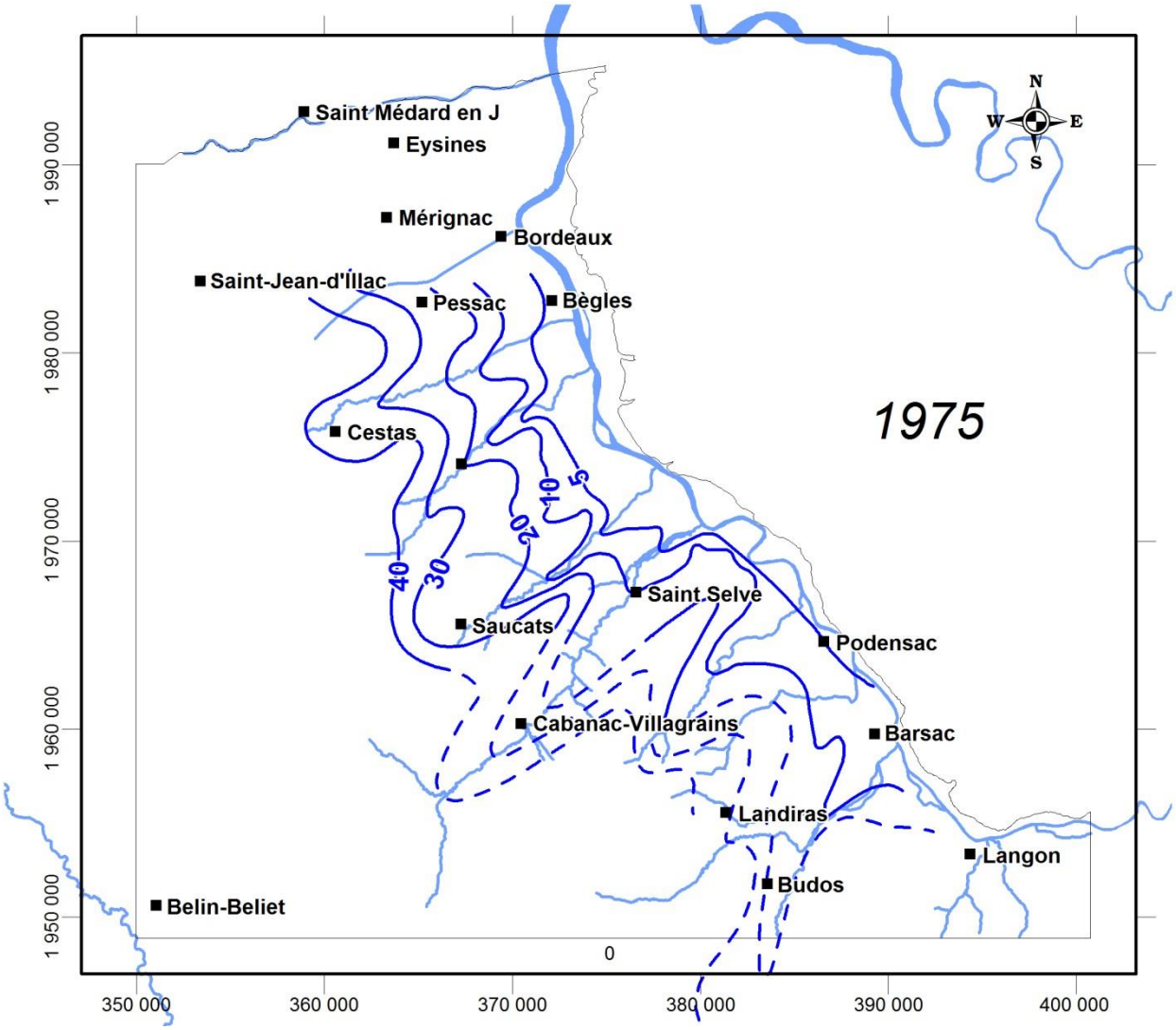


Illustration 51 : Carte piézométrique 1975 de la nappe de l'Oligocène (Chamayou et al., 1975).

Au fil des ans, l'exploitation de la nappe pour l'alimentation en eau potable a fortement modifié la distribution des isopièzes en induisant la formation d'une dépression orientée selon un axe-nord-sud. Les cartes piézométriques réalisées dans le cadre du projet RODÉO restituent bien la zone de dépression à l'ouest du secteur d'étude correspondant à l'exploitation du réservoir par les forages de la ligne des « 100 000 m³/j » (Annexe 7). La comparaison des différentes mesures réalisées aux mêmes forages lors des différentes campagnes de mesures montre des variations de l'ordre du mètre. Ces variations sont liées aux battements naturels de la nappe entre hautes eaux et basses eaux, mais peuvent également trouver une explication dans les modifications d'exploitation de certains forages.

Ainsi, certains puits non exploités (ex : puits communal de Saint-Selve - 08277X0080, puits individuel sur la commune de Cadaujac - 08272X0275) ont montré des fluctuations importantes entre les hautes eaux de mai 2013 et celles de mai 2014 (près de 3 m de hausse à Saint-Selve et 5 m à Cadaujac). Ces hausses traduisent probablement l'impact d'une recharge plus favorable sur la période fin 2013 / début 2014. Dans d'autres secteurs, la diminution de l'exploitation de certains ouvrages (ex : La Cape Martillac - 08276X0091, Sabatey à Saucats - 08276X0067) se traduit par des hausses de la piézométrie de plus d'un mètre sur la période observée (1,42 m à Martillac contre 0,98 m à Saucats). Cette tendance semble s'être prolongée plus durablement à Martillac (Illustration 52). Par ailleurs, il faut noter que d'autres secteurs sont marqués par des baisses.

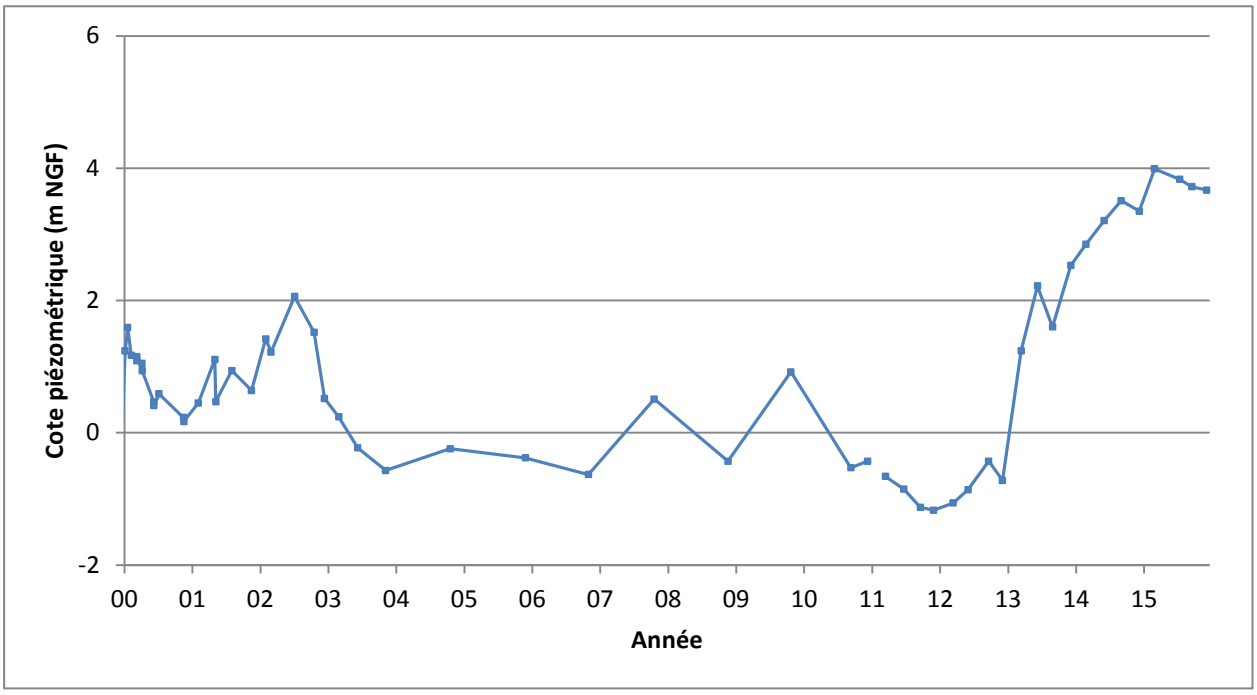


Illustration 52 : Données du suivi du niveau piézométrique au forage de La Cape à Martillac (08276X0091).

Sur les cartes actuelles, une ligne de partage des eaux sépare les écoulements orientés vers la Garonne, de ceux orientés en direction de la ligne des « 100 000 m³/j » (Illustration 53). La position de cette ligne coïncide avec la zone d'affleurement du réservoir de l'Oligocène (en orange sur la carte) ce qui traduit bien le rôle que joue actuellement cette zone dans l'alimentation de la nappe. Sur la carte de 1975 (Illustration 51), les affluents de rive gauche de la Garonne drainent la nappe de l'Oligocène, qui émerge en de nombreuses aires d'exutoire le long de ces cours d'eau. Il semble donc qu'initialement la zone d'affleurement constituait principalement une zone d'exutoire pour la nappe. L'abaissement du niveau de la nappe, lié à l'exploitation de la ressource pour l'alimentation en eau potable, a donc abouti à des modifications majeures du comportement de la nappe sur ce secteur. Cet abaissement a ainsi conduit à un dénoyage progressif du toit de la nappe au fil des ans provoquant le déplacement de la limite de captivité vers l'ouest et induisant un changement d'état des conditions de l'aquifère (de nappe captive à libre) liées à l'exploitation du secteur.

Les zones en rouge correspondent aux secteurs pour lesquels la charge hydraulique est inférieure au toit du réservoir, sous recouvrement chattien. La portion hachurée a été figurée pour tenir compte des incertitudes liées à la précision du modèle géologique et de la restitution de la piézométrie déduite des interpolations (Illustration 53).

Le dénoyage du toit du réservoir est principalement localisé à l'est de l'axe formé par la ligne des « 100 000 m³/jour », avec un recul net de la limite de captivité. A noter que la zone dénoyée est plus étendue vers l'ouest en direction de Saucats en raison de la concentration de forages exploitant la nappe sur ce secteur.

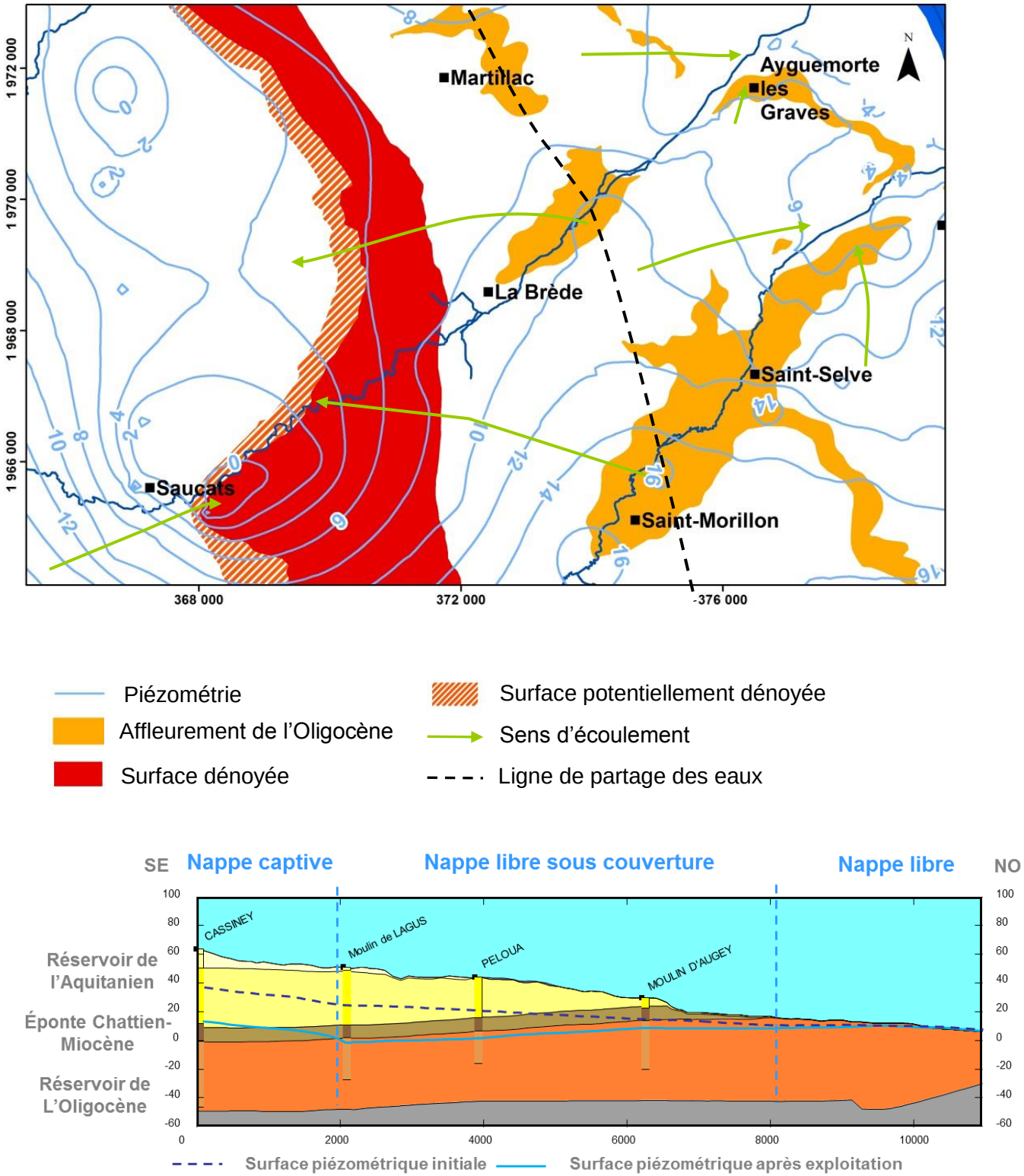


Illustration 53 : Dénoyage du toit de la nappe de l'Oligocène - octobre 2014.

4.2. MESURE DE DEBITS DES COURS D'EAU

Un total de 4 campagnes de jaugeages a été réalisé sur les cours d'eau du Gât-Mort et du Saucats contenus dans le secteur d'étude. Elles ont eu lieu aux périodes suivantes :

- avril 2013
- octobre 2013
- juin 2014
- octobre 2014

Au total, 22 sites ont été jaugés, dont 15 sur les cours d'eaux principaux et 7 sur les affluents. L'objectif de cette campagne de jaugeage était d'évaluer l'interaction entre les cours d'eaux et la nappe de l'Oligocène, au droit des zones d'affleurement du réservoir. Des mesures ont été réalisées de l'amont vers l'aval afin de mettre en évidence les variations de débits ou de la chimie des eaux en fonction des réservoirs traversés par le cours d'eau. Les paramètres mesurés sont : le débit, le pH, la conductivité et la température.

4.2.1. Méthodologie

Les débits ont été déterminés à l'aide d'un courantomètre par la méthode d'exploitation du champ de vitesse (Illustration 54). De manière générale, la section définie pour chaque station de jaugeage est découpée en plusieurs verticales. Ce découpage est fonction de la largeur du miroir d'eau. Sur chaque verticale, plusieurs points de mesures sont définis : un point de mesure en fond de rivière, un point de mesure à la surface de la lame d'eau et un à deux points de mesures intermédiaires. A chaque point de mesure au minimum trois acquisitions de vitesse sont réalisées. La valeur de vitesse affichée par le courantomètre est une moyenne de vitesses enregistrées sur 10 secondes. Si, sur les trois acquisitions, les deux valeurs extrêmes ont un delta inférieur à 0,050 m/s, alors la valeur notée correspond à la moyenne des trois acquisitions. Sinon, d'autres acquisitions sont faîtes jusqu'à avoir des valeurs les plus rapprochées possibles. Il est à noter que les incertitudes de mesure du courantomètre sont de l'ordre de 5%. Pour les mesures de conductivité, il y a une incertitude de plus ou moins 14 µS/cm. Pour celles de pH, l'incertitude est de plus ou moins 0,05 unité pH.

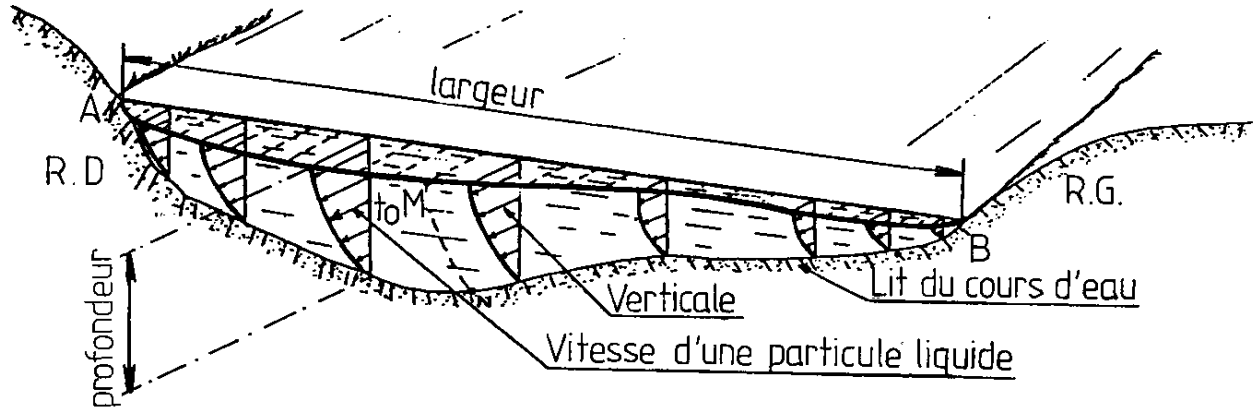


Illustration 54 : Schéma illustrant la méthode de travail pour déterminer le débit par exploration du champ de vitesse.

Les valeurs de vitesses enregistrées, avec leurs profondeurs, sont ensuite saisies sur un logiciel de calcul de débit appelé « jaugealc ».

Le logiciel calcul le débit à partir de la formule suivante :

$$Q = \iint_S U.dp.dl$$

Avec, Q : débit (m³/s)
U : vitesse moyenne (m/s)
dp : un élément de profondeur (m)
dl : un élément de la largeur (m)

« La formule indique qu'il faut définir une vitesse moyenne sur toute la profondeur et obtenir ainsi un débit élémentaire appelé aussi débit unitaire ou produit unitaire (souvent désigné par le symbole PU), suivant une verticale qui sera sommée ensuite sur toute la largeur » (http://medhycos.mpl.ird.fr/fr/data/hyd/Drobot/5C.htm). Le logiciel calcule un PU par verticale, en intégrant les valeurs de vitesse sur toute la profondeur, puis il intègre l'ensemble de ces PU sur la largeur du miroir d'eau.

4.2.2. Jaugeage sur le Saucats

Sur le tronçon du Saucats, 6 mesures de débit ont été réalisées sur le cours d'eau à chacune des campagnes de jaugeage. Des mesures complémentaires ont été réalisées sur 3 points placées sur des affluents du Saucats. Sur le bras principal, 3 mesures sont localisées sur les affleurements de l'Aquitanien et les 3 autres sur les affleurements de l'Oligocène (Illustration 55).

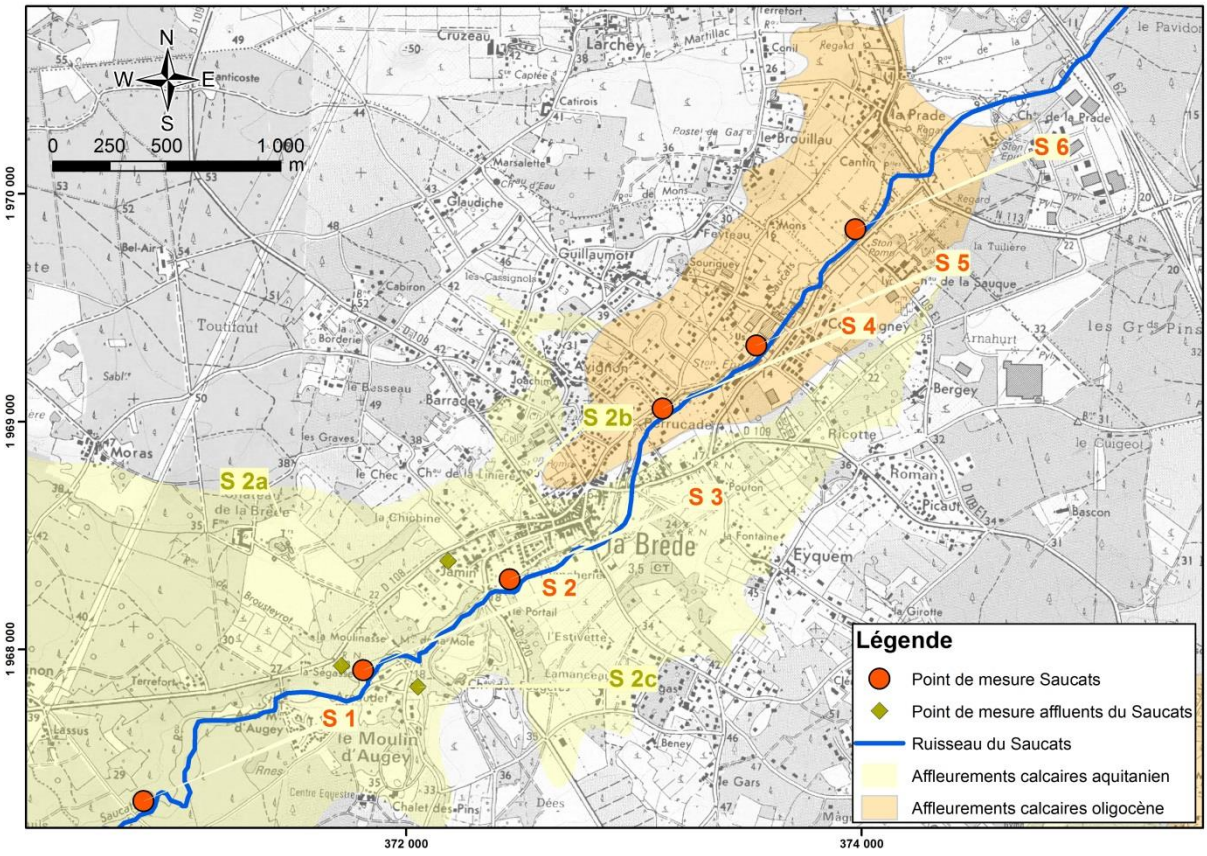


Illustration 55 : Localisation des différentes stations de jaugeage, le long du Saucats, avec leur code hydro associé.

Les mesures de débits de l'ensemble des campagnes réalisées sur le ruisseau du Saucats (hors affluents) sont synthétisées sur l'illustration 56. Elles sont figurées de l'amont vers l'aval (du sud-ouest vers le nord-est) et ne concernent que le ruisseau du Saucats. L'ensemble des valeurs est disponible en annexe 8.

Les débits sont très variables d'une campagne à l'autre et traduisent différentes périodes de hautes eaux et de basses eaux. Les débits les plus importants ont été observés en avril 2013 avec des valeurs de plus de 1 000 l/s. Les valeurs les plus faibles ont été mesurées pendant la période de basses eaux d'octobre 2014 avec des débits de l'ordre de 150 l/s.

Dans l'analyse de l'évolution du débit de l'amont à l'aval, il faut garder à l'esprit que :

- la tendance à l'augmentation est la tendance « naturelle », puisque la surface du bassin versant hydro(géo)logique de chaque point de jaugeage augmente de l'amont vers l'aval,
- les campagnes d'étiage ont plus de poids que celles d'avril ou juin, qui peuvent être affectés par du ruissellement direct ou différé (ressuyage des sols, ruissellement hypodermique),
- seules les tendances à la baisse, supérieures à l'augmentation naturelle théorique et l'incertitude de 5% des mesures, permettent de formuler une hypothèse solide.

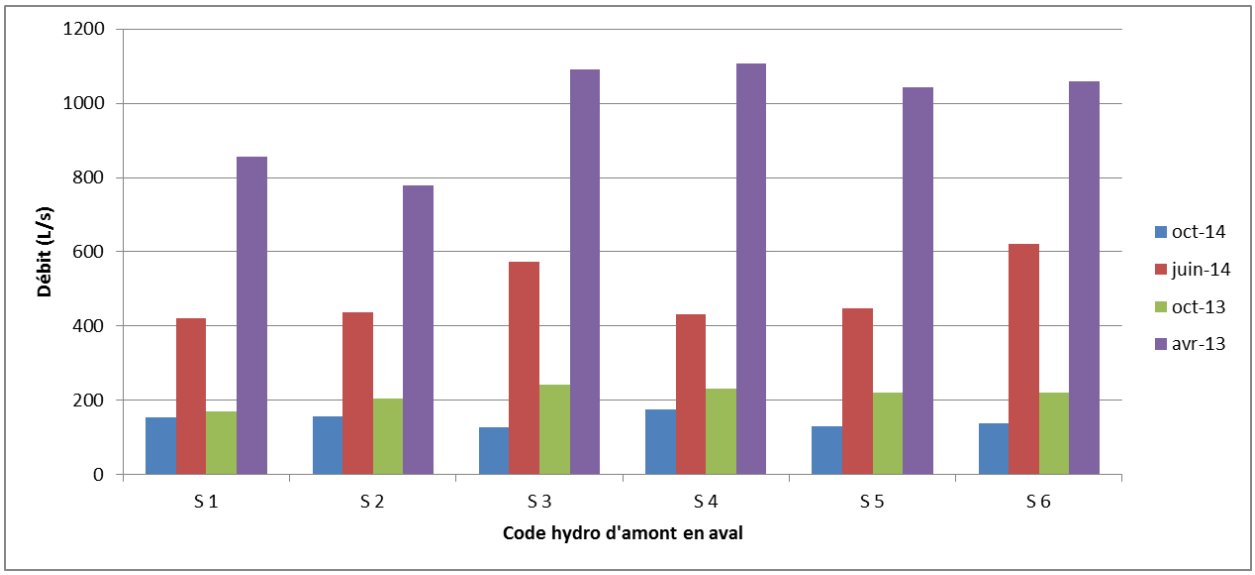


Illustration 56 : Évolution des valeurs de débit le long du Saucats.

Sur les trois premiers points situés à l'amont, correspondant à la partie s'écoulant sur les formations aquitaniennes, une tendance générale à l'augmentation du débit est observable. Cette tendance est bien marquée pour les campagnes d'avril 2013, d'octobre 2013 et de juin 2014. L'augmentation apparaît progressivement sur cette portion en octobre 2013 alors qu'il semble qu'une augmentation plus importante soit observée au point **S 3** par rapport aux points amont sur les campagnes d'avril 2013 et de juin 2014.

A partir du point **S 4**, la tendance à l'augmentation est interrompue. En avril 2013, le débit augmente de plus de 200 l/s entre le point **S 1** et le point **S 3**, alors qu'il reste dans la même gamme de débit sur les points à l'aval avec une valeur moyenne de 1 075 l/s. En octobre 2013 (période de basses eaux), une baisse progressive du débit est observée à partir du point **S 4** avec une diminution globale du débit de l'ordre de 20 l/s sur la zone d'affleurement de l'Oligocène. En juin 2014, la baisse entre le point **S 3** et **S 4** est de près de 140 l/s. Les mesures

réalisées en octobre 2014 ne permettent pas de dégager une tendance nette de l'évolution du débit en fonction de la géologie.

Il apparaît cependant assez nettement, sur l'ensemble des campagnes réalisées, que la partie amont correspond à une zone d'augmentation du débit du cours d'eau cohérente avec l'augmentation progressive de la superficie du bassin versant drainé à mesure que l'on se dirige vers l'aval. L'augmentation de débit plus importante au point **S 3** peut traduire un apport de la nappe de l'Aquitanien au débit du cours d'eau même s'il est difficile de le confirmer avec certitude. Sur la partie plus aval, des diminutions du débit sont observées sur la zone d'affleurement du réservoir de l'Oligocène qui traduisent des pertes du cours d'eau en direction de la nappe et qui viennent confirmer les observations réalisées dans les études précédentes (LARAG et SAFEGE, 1994 ; Saltel et al., 2010 ; Saltel et al. 2012).

La carte piézométrique de la zone (Illustration 57), montre que sur la partie aval du cours d'eau, les écoulements sont divergents sur la partie la plus amont de la zone d'affleurement de l'Oligocène laissant supposer une alimentation de la nappe par le cours d'eau en cohérence avec les pertes observées sur ce secteur. Plus à l'aval, la distribution des isopièzes évolue peu à peu pour converger en direction du Saucats traduisant une alimentation de la rivière par la nappe.

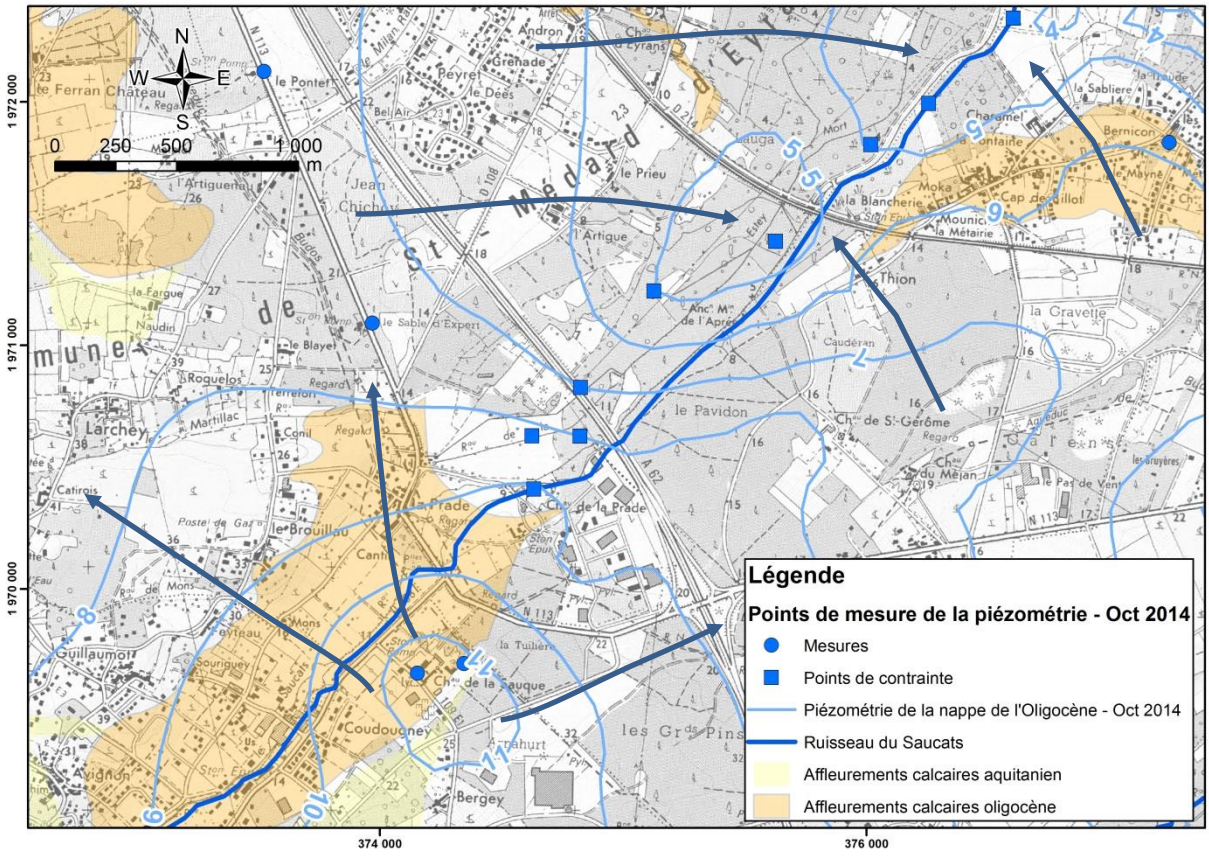


Illustration 57 : Piézométrie de la nappe de l'Oligocène sur le ruisseau du Saucats - octobre 2014.

Les mesures physico-chimiques (pH, conductivité, température) apportent peu d'éléments complémentaires sur la compréhension des interactions nappes/rivières. Les valeurs de conductivités sont globalement assez homogènes de l'amont vers l'aval. Un contraste apparait cependant entre les mesures effectuées lors des différentes campagnes. Les valeurs de

conductivités étant plus basses (environ 250 µS/cm) lorsque le débit de la rivière est fort (avril 2013) en comparaison des mesures plus fortes (450 µS/cm) effectuées en basses eaux (octobre 2014). Ce contraste traduit l'influence des eaux de ruissellement (moins minéralisées) dans les campagnes d'avril et juin.

4.2.3. Jaugeages sur le Gât-Mort

Sur le tronçon du Gât-Mort, 9 mesures de jaugeages ont été réalisées de l'amont vers l'aval lors des différentes campagnes de jaugeage. Par ailleurs, 4 mesures complémentaires ont été effectuées sur des affluents du Gât-Mort. Sur les 9 mesures entreprises sur le bras principal, 3 sont localisées sur la zone d'affleurement de l'Aquitanien et le reste sur les affleurements de l'Oligocène (Illustration 58).

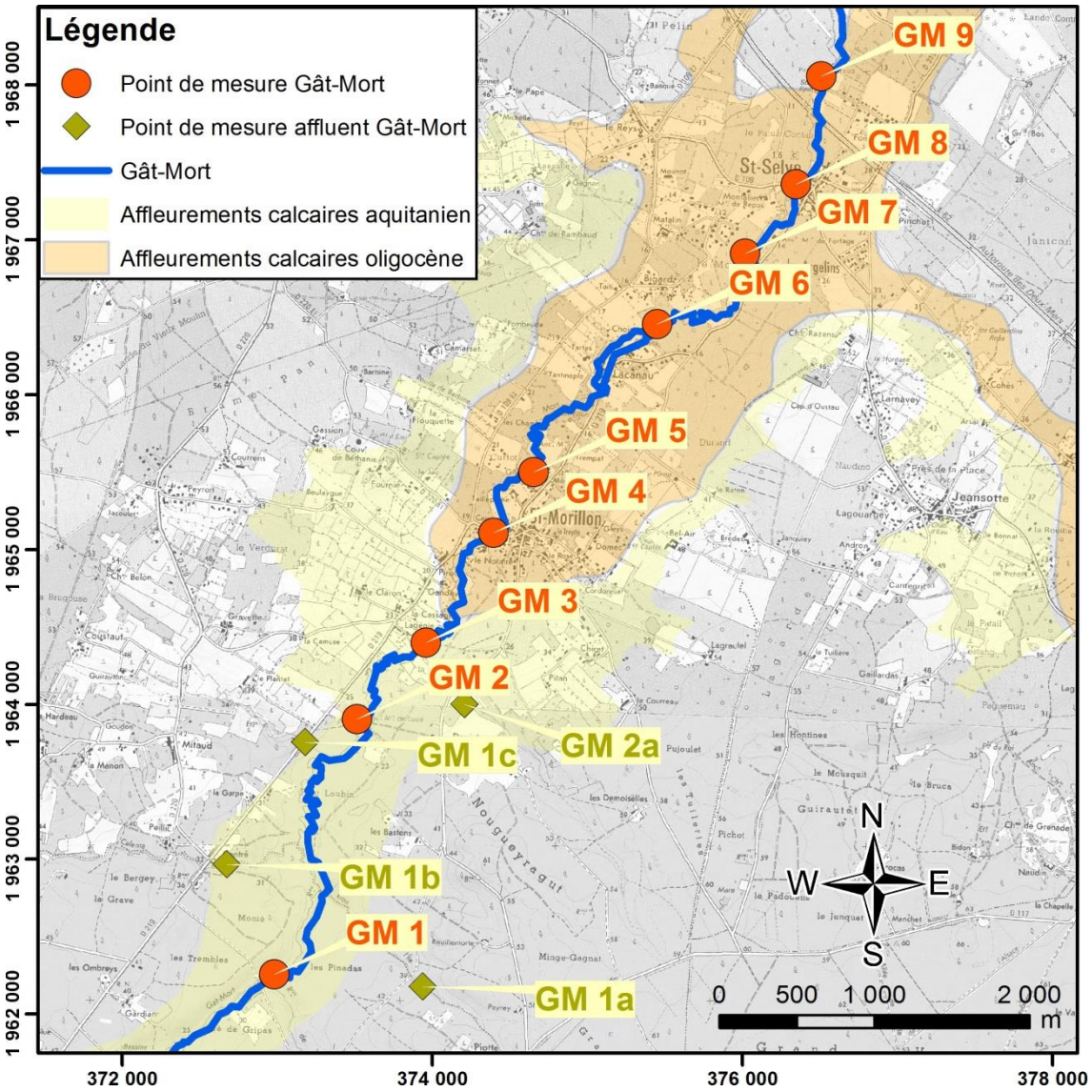


Illustration 58 : Localisation des différents points de mesures de jaugeage le long du Gât-Mort avec leur code hydro associé.

Les mesures de débits de l'ensemble des campagnes réalisées sur le cours d'eau du Gât-Mort (hors affluents) sont synthétisées sur l'illustration 59. Elles sont figurées de l'amont vers l'aval et ne concernent que le ruisseau du Gât-Mort. L'ensemble des valeurs est disponible en annexe 8.

Les débits sont très variables d'une campagne à l'autre et traduisent différentes périodes de hautes eaux et de basses eaux. Les débits les plus importants ont été observés en avril 2013 avec des valeurs de plus de 1 300 l/s. Les valeurs les plus faibles ont été mesurées pendant la période de basses eaux d'octobre 2014 avec des débits de l'ordre de 175 l/s. Ici, les interactions entre le cours d'eau et la nappe sont moins tranchées. Cependant, pour chaque campagne de mesure, une augmentation du débit est constatée entre les points **GM 1** et **GM 2** sur la zone d'affleurement de l'Aquitanien. Sur les points situés plus à l'aval, les débits observés ne montre pas de tendance significative à l'augmentation et ce, malgré la croissance progressive de la superficie du bassin versant drainé à mesure que l'on se dirige vers l'aval.

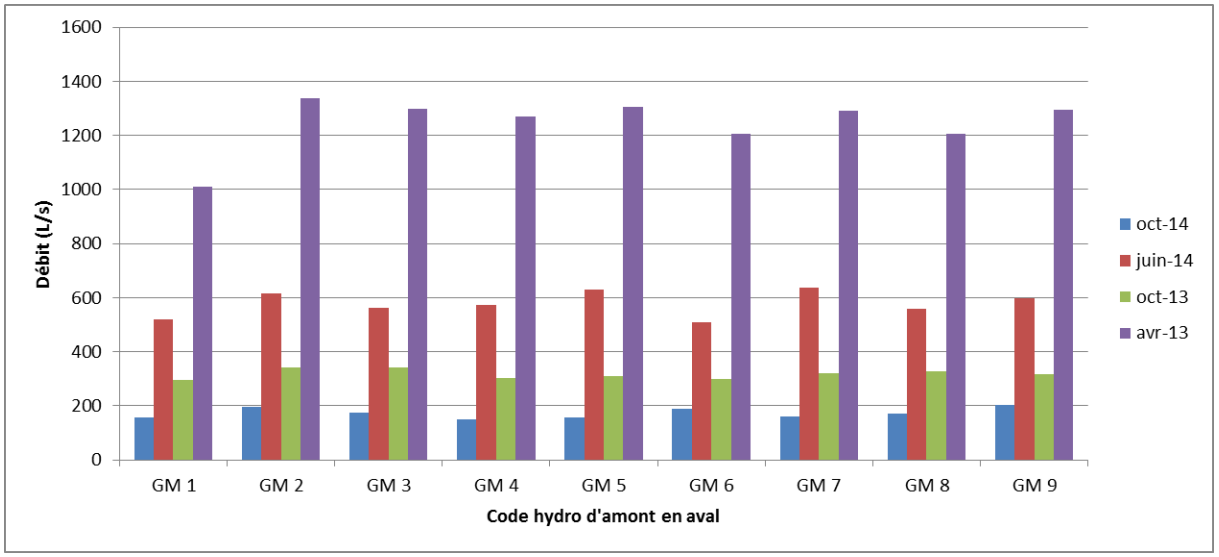


Illustration 59 : Évolution des valeurs de débit le long du Saucats.

Les débits fluctuent ensuite autour d'une valeur moyenne sans qu'aucune tendance nette ne puisse être dégagée, même si la distribution des isopièzes traduit l'existence d'écoulements divergents sur la partie amont des affleurements de l'Oligocène (Illustration 60). Il est donc difficile de conclure sur l'existence dans cette zone de pertes entrainant une alimentation de la nappe par le cours d'eau. Plus à l'aval, la distribution des isopièzes semble évoluer peu à peu pour converger en direction du Gât-Mort, traduisant une alimentation de la rivière par la nappe.

Tout comme sur le ruisseau du Saucats, les mesures physico-chimiques (pH, conductivité, température) apportent peu d'éléments complémentaires sur la compréhension des interactions nappes/rivières. Les valeurs de conductivité sont globalement assez homogènes de l'amont vers l'aval. Un contraste apparaît cependant entre les mesures effectuées lors des différentes campagnes : les valeurs de conductivité sont plus basses (environ 175 µS/cm) lorsque le débit de la rivière est fort (avril 2013), en comparaison des mesures plus fortes (plus de 300 µS/cm) effectuées en basses eaux (octobre 2014).

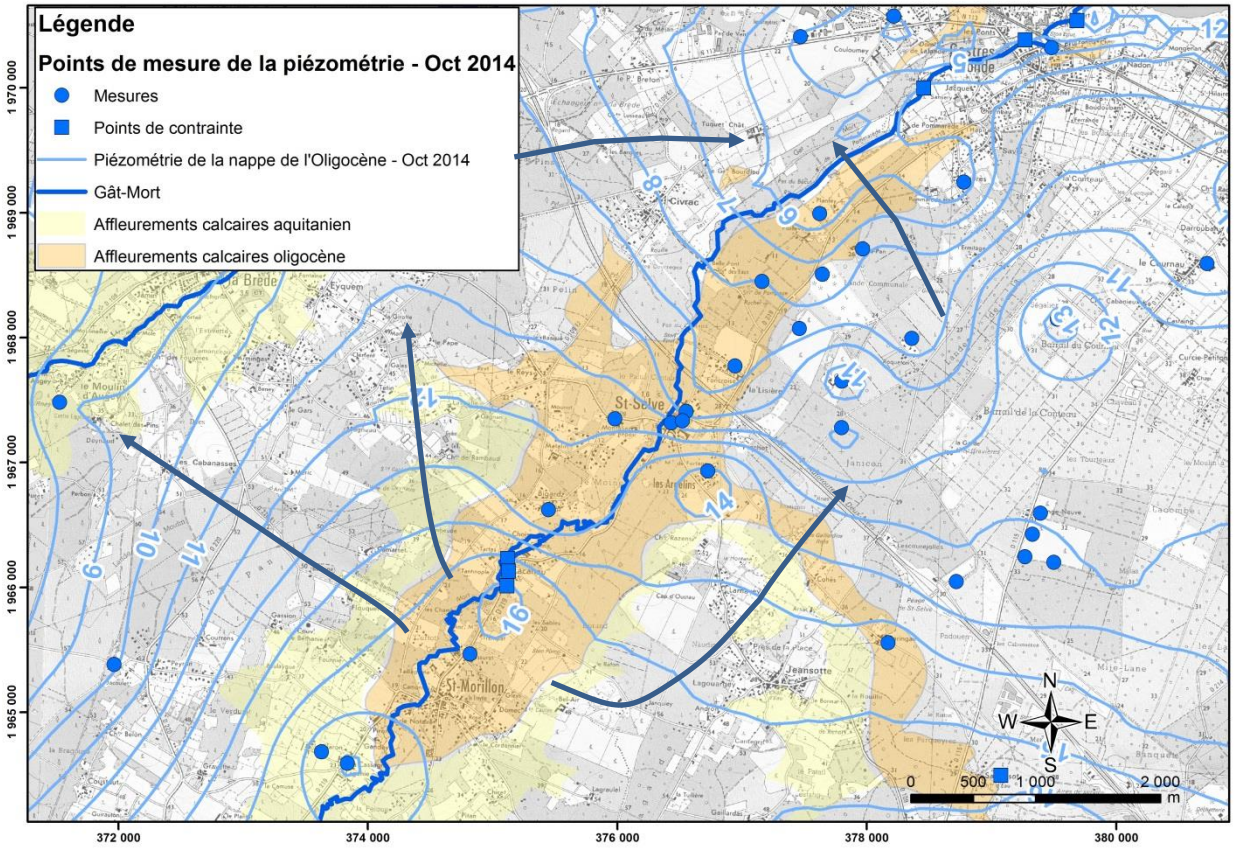


Illustration 60 : Piézométrie de la nappe de l'Oligocène sur le ruisseau du Gât-Mort - octobre 2014.

4.3. MISE EN PLACE D'UNE STATION DE JAUGEAGE SUR LE COURS D'EAU DU GAT-MORT

En complément des mesures réalisées par le BRGM, la DREAL Aquitaine a effectué une série de jaugeages, en deux points stratégiques, sur les ruisseaux du Saucats et du Gât-Mort. L'objectif est d'élaborer, sur chaque site, une courbe de tarage, afin de déterminer l'emplacement le plus favorable à l'implantation d'une station de jaugeage.

Le premier site est localisé dans le bourg de La Brède, allée des Lettres Persanes, à 10 m en amont de l'échelle limnimétrique installée par le Conseil Départemental (Illustration 61). A noter que des mesures de débits sont régulièrement réalisées par le Conseil Départemental de la Gironde. Cependant, selon la DREAL, ce point ne semble pas remplir l'ensemble des critères pour permettre l'installation pérenne d'une station de jaugeage sur ce site. En effet, il ne semble pas y avoir un contrôle hydraulique permettant qu'un même débit s'écoule toujours pour une même hauteur.

Le deuxième site est situé à Saint-Morillon, au pont de la D 219 (Illustration 62). Ce site présente l'intérêt de disposer d'un seuil naturel qui limite les écoulements turbulents sur la section.

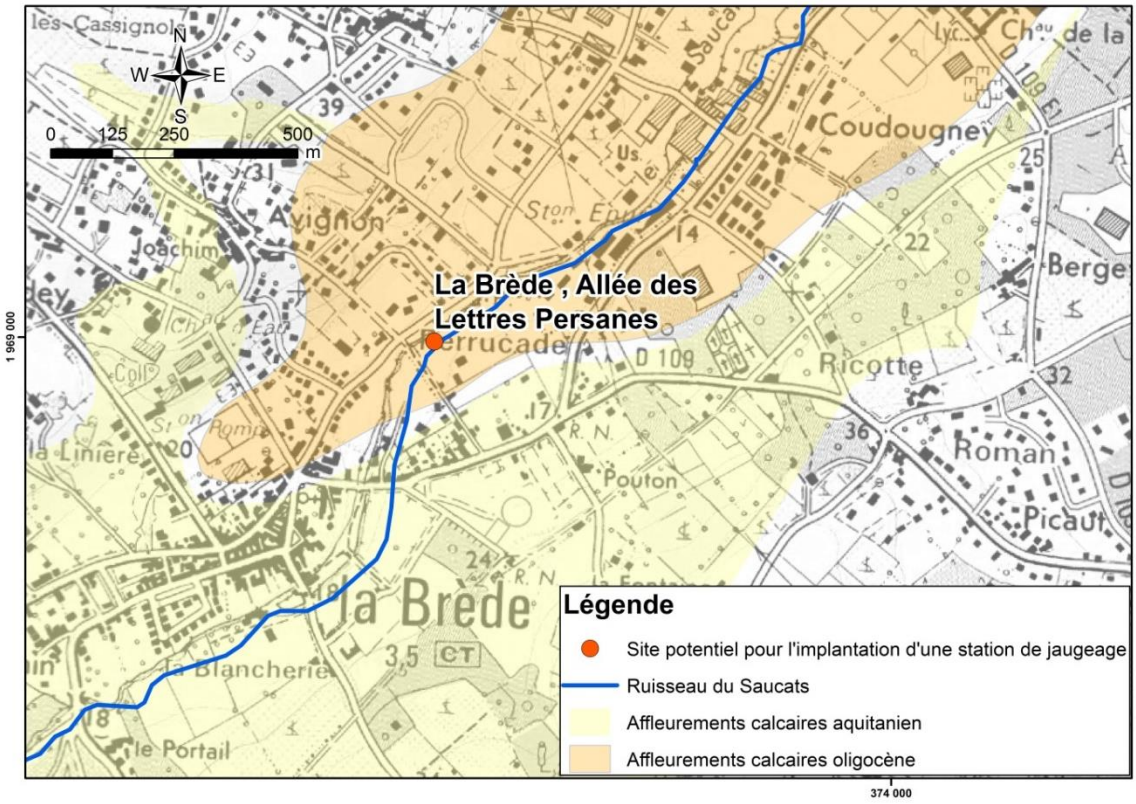


Illustration 61 : Site potentiel pour l'installation d'une station de jaugeage sur le Saucats.

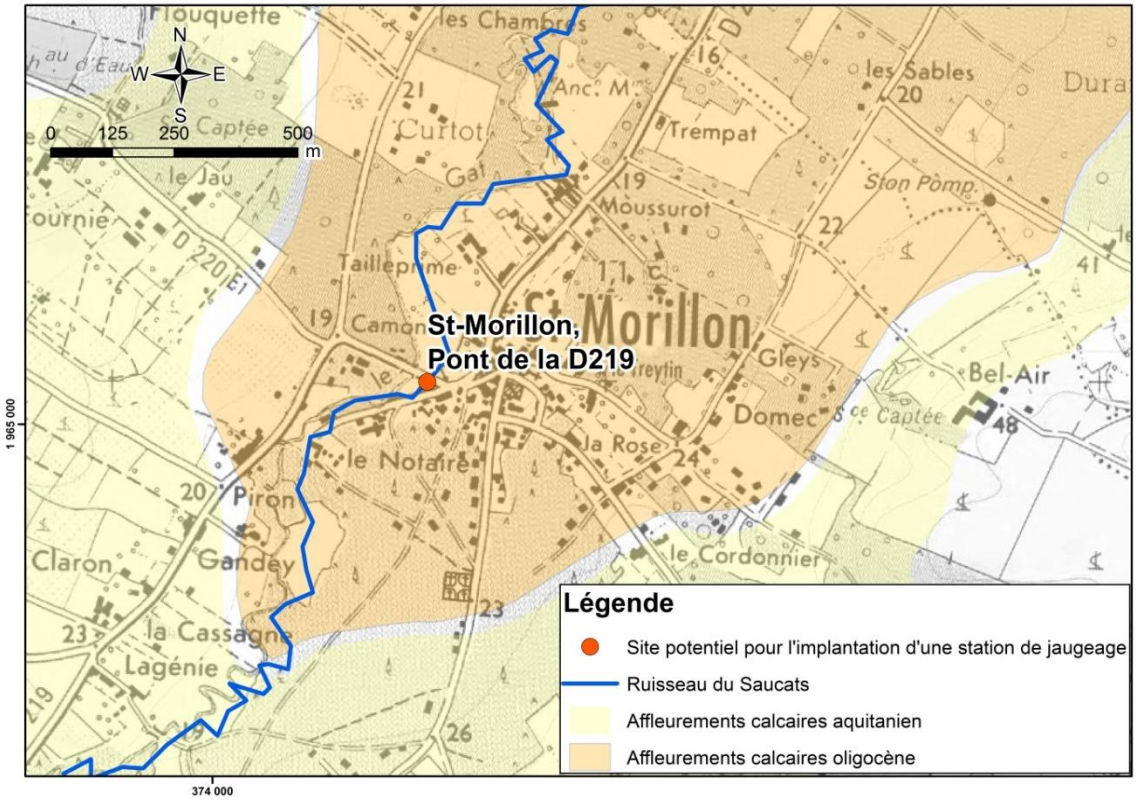


Illustration 62 : Site potentiel pour l'installation d'une station de jaugeage sur le Gât-Mort.

L'étude des interactions nappes/rivières sur ces deux cours d'eau a permis de sélectionner le Gât-Mort comme site d'implantation d'une station d'hydrométrie. Les travaux préalables à la mise en œuvre de la station de mesure de débit sur le Gât Mort ont été réalisés le 2 décembre 2015 par la CACG. Les travaux ont compris :

- la fourniture et pose d'une échelle limnimétrique sur équerres galvanisées avec fixation sur la pile du pont,
- la fourniture et pose d'une échelle limnimétrique d'un demi-mètre pour les basses eaux,
- la fourniture et mise en place d'un fourreau de protection pour la centrale d'acquisition posée au pied de l'échelle (partie toujours en eau),
- la liaison sonde/centrale d'acquisition des données par câble sous tube galvanisé fixé sur moellons le long de la rampe (pose du capteur et tirage câble capteur fournie par la DREAL),
- la prise de terre,
- le relevé topographique et profil en travers.

5. Conclusions et perspectives

Lors des phases 2 & 3 du projet RODÉO, 4 piézomètres ont été réalisés. Ces ouvrages, outre les données complémentaires qu'ils fournissent concernant la géologie locale, ont permis de préciser l'étendue de la réduction de la zone de captivité de la nappe de l'Oligocène. La piézométrie au droit du forage du Péloua et de la Migelane est plus basse qu'attendue (dans l'approche par modélisation réalisée en 2010), ce qui implique que la zone dénoyée est plus vaste qu'anticipée et s'étend jusqu'au bourg de Saucats. Pour les forages de Dariet et de Gassies, la piézométrie observée s'est révélée plus haute que ne le laissaient penser les travaux de modélisation.

L'influence de la ligne des « 100 000 m³/j » s'est donc traduite au fil du temps par la formation d'une dépression orientée selon un axe nord-sud provoquant un recul net de la limite de captivité. Le dénoyage du toit est principalement localisé à l'est de cette dépression, en direction de la zone d'affleurement. Il s'étend à l'ouest, en direction de Saucats, en raison de la concentration de forages exploitant la nappe sur ce secteur.

L'analyse des pompages d'essai, qui ont été conduits au forage de Moulin de Lagus à différentes périodes, met clairement en évidence un changement d'état des conditions de la nappe, lié à la surexploitation du secteur. De 1970 à environ 1994-1995, le niveau d'eau dans l'ouvrage était situé au-dessus du niveau imperméable au toit de l'aquifère. Durant cette période, la nappe était captive. A partir de 1995, le niveau est situé sous l'imperméable, mettant progressivement la nappe en condition libre. Ceci a pu être vérifié à partir de la modélisation des essais, où le seul paramètre changeant entre ces deux états est la valeur de l'emmagasinement.

Par ailleurs, la surexploitation de la nappe dans ce secteur a fortement modifié la distribution des isopièzes. En effet, l'écoulement initial de la nappe était orienté vers le nord-est, en direction de la Garonne. Il existe maintenant une ligne de partage des eaux, coïncidant avec la zone d'affleurement du réservoir de l'Oligocène, qui sépare les écoulements orientés vers la Garonne de ceux orientés en direction de la ligne des « 100 000 m³/j ».

L'étude des interactions nappes/rivières indique l'existence sur les zones d'affleurement de l'Oligocène de pertes des cours d'eau en direction de la nappe. Cela se traduit sur le cours d'eau du Saucats par des diminutions de débits sur ce secteur et par l'existence d'écoulements divergents depuis la rivière. Plus à l'aval, la distribution des isopièzes évolue peu à peu pour converger en direction du Saucats, traduisant cette fois une alimentation de la rivière par la nappe.

Sur le cours d'eau du Gât-Mort, les mesures de débits réalisées de l'amont vers l'aval ne mettent pas en évidence des diminutions nettes du débit. Cependant, il semble, d'après la carte piézométrique, que cette portion des affleurements oligocènes corresponde localement à une zone de recharge de la nappe.

En parallèle, les mesures réalisées par la DREAL Aquitaine sur ces deux cours d'eau ont permis de sélectionner le pont de la D 219 à Saint-Morillon sur le ruisseau du Gât Mort, comme site d'implantation le plus opportun à la réalisation d'une station d'hydrométrie. Le site est opérationnel depuis la fin de l'année 2015.

Au final, la réalisation, sur l'ensemble des phases du projet RODÉO, de 6 piézomètres (Tableau 10) sur les communes de Saucats, La Brède, Cabanac-et-Villagrains et Saint-Morillon permet

de bénéficier de points de surveillance complémentaires qui vont servir à affiner la construction des cartes piézométriques dans ce secteur. Les ouvrages créés dans le cadre de ce programme seront, à terme, intégrés au réseau de suivi départemental quantité et/ou qualité de la Gironde (GN33). Les paramètres hydrodynamiques issus de l'interprétation des pompages d'essais réalisés sur ces différents forages et le calage dans le modèle des chroniques issues de ces piézomètres vont participer à une meilleure restitution locale des charges dans ce secteur à fort enjeu. Par ailleurs, des prélèvements pourront également être réalisés pour observer l'évolution de paramètres susceptibles de traduire une dégradation de la qualité de la nappe. In fine, ces points d'observation permettront de mesurer l'effet sur la piézométrie des politiques de gestion des prélèvements des forages de la ligne des « 100 000 m³/jour ».

	Prof du forage (m)	Z sol (m)	Toit du réservoir (m NGF)	NS fin 2015 (m NGF)	T (m²/s)	S (-)
Jacoulet – Saint-Morillon – 08277X0312	65	52,63	20,63	8,95	6.40E-03	4.00E-03
Moulin d'Augey – La Brède – 08276X0131	50	28,81	13,31	7,6	8.80E-03	9.00E-05
Dariet – Saint-Morillon – 08513X0050	52	47,33	21,83	19,85	2,80E-04	-
Gassies – Cabanac-et-Villagrains – 08513X0049	46	41,71	22,71	18,86	1,20E-04	-
Péloua – Saucats – 08276X0138	64	43,89	6,39	0,98	1,22E-02	3,00E-03
Migelane – La Brède – 08276X0139	92	56,45	-0,55	2,72	4,35E-03	1,00E-03

Tableau 10 : Récapitulatif des données provenant des forages « RODÉO ».

6. Bibliographie

Alvinerie J., Dubreuilh J., Gayet J., Pratviel L. (1977) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Pessac (827), 33p.

Bourdet D, A Ayoub J, M Pirard Y (1983) - A new set of type curves simplifies well test analysis. World Oil, Vol. 196, 95-106.

Bourdet D., Ayouba A., Pirard Y.M. (1989) - Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation. Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, Vol. 4, 293-302.

Bourgine B. (2012) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Année 2. BRGM/RP-60153-FR, 85 p., 39 fig., 6 tab., 1 ann.

Bourgine B., Pédron N. (2013) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Module 2 - Année 3. Rapport final. BRGM/RP-62346-FR, 47 p., 28 fig., 1 ann.

Cassoudebat M., Platel J.P., Sellier E. (1972) - Étude phénoménologique du calcaire à Astéries. Bulletin de la société linnéenne de Bordeaux, Vol. , 9-18.

Chamayou J., Heng B. (1975) - Nouvelles possibilités aquifères des calcaires oligocènes au sud-est de Bordeaux, en rive Gauche de la Garonne -BRGM- 75 SGN185 AQI- 9 p., 7 fig., 1 ann.

H Cooper H, E Jacob C (1946) - A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field hystory. Trans Amer Geophys Union, Vol. 3, 526-534.

Corbier P., Pédron N., Bourgine B., Bourdonné R. (2011) - Contrôle qualité et gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde – Utilisation de méthodes géostatistiques pour la valorisation et la comparaison des données piézométriques. BRGM/RP-60146-FR, 65 p., 46 ill., 1 ann.

Corbier P., Capdeville J.P., Pédron N., Platel J.P., Winckel A. (2005) - SAGE Nappes profondes de Gironde - Atlas des zones à risques - BRGM/RP-53756-FR, 180 p., 82 ill, 4 ann.

Deruyck B., Ehlig-Economides C., Joseph J. (1992) - Testing Design an Analysis. Oilfield Review, Vol. 4, 2, 28-45.

Dupuy A., Larroque F. (2006) - Gestion et optimisation du parc d'ouvrages captant l'aquifère oligocène. Note d'avancement Phase 2. Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3. LYONNAISE DES EAUX Centre des Moyens Techniques de Bordeaux, 80p.

Dupuy A., Franceschi M., Larroque F. (2007) - QUANTIPROD - PROBLEMATIQUE DES PERTES DE PRODUCTIVITE - Gestion et optimisation du parc d'ouvrages oligocènes bordelais. Universtité Michel de Montaigne - Bordeaux 3. LYONNAISE DES EAUX Centre des Moyens Techniques de Bordeaux, 86 p.

Eradata (2014) - Microfaciès et biostratigraphie de 3 échantillons de forage à Saint-Morillon (Gironde).

Eradata (2014) - Microfaciès sédimentaires et biostratigraphie de 3 échantillons de forage à Cabanac-et-Villagrains, Gironde.

Gayet J. (1985) - L'ensemble des environnements oligocènes nord aquitains; un modèle de plate-forme marine stable à sédimentation carbonatée. *Mémoires de l'Inst. de Géol. du Bassin d'Aquitaine*, 571

Hunt B., Scott D. (2007) - Flow to a Well in a Two-Aquifer System. J. Hydrol. Eng, Vol. Volume 12, Issue 2, 146-155.

LARAG , SAFEGE (1994) - Étude de vulnérabilité de l'aquifère stampien - secteur de La Brède - LARAG SAFEGE - 63 p.

Londeix L. (2014) - Stratotype Aquitanien. *Biotope*,

T. Mickam J., S. Levy B., W. Lee G. (1984) - Surface and borehole geophysical methods in ground water investigations. Ground Water Monitoring and Remediation, Vol. 4 (4), pp. 167-171.

Platel J.P., Schnebelen N., Le Nindre Y.M., Sourisseau B., Saplairoles M., Dufour P., Benhammouda S., Bonnery H. (2000) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 4 - Etude sectorielle - Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise - Synthèse des connaissances géologiques - Etat des connaissances hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-50468-FR, 70 p., 36 fig., 5 cartes annexes.

Pratviel L. (1972) - Essai de cartographie structurale et faciologique du bassin sédimentaire ouest aquitain pendant l'Oligocène. *Thèse de doctorat : Université de Bordeaux 1*, 632

Chaker Raddadi Mohamed (2005) - Étude de la nature de la radioactivité gamma dans les roches carbonatées de plate-forme : analyses et interprétations environnementales, diagénétiques et géodynamiques. *Thèse de doctorat : Thèse de doctorat, Université Grenoble 1, 221p*,

Ravigne L. (2005) - Forage de Lagus - Interprétation des essais de pompage - Août 2005.

Ravigne L. (1996) - Forage Lagus - Interprétation des essais de pompage.

Ravigne L. (2008) - Forage Lagus N° BSS 08276X0090/F - Commune de Saucats -Mission de diagnostic et de contrôle des 15 et 16/12/2008.

Renard Philippe, Glenz Damian, Mejias Miguel (2009) - Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. Hydrogeology Journal, Vol. 17, 589-600.

Saltel M., Pédron N., Platel J.P., Corbier P., Bourgine B. (2010) - Atlas des zones à risque du SAGE Nappes Profondes de Gironde - Phase 2 - Problématique du dénoyage de l'Oligocène au Sud de l'agglomération Bordelaise. BRGM/RP-58156-FR 123 p., 64 fig., 11 tab., 7 ann.

Saltel M., Innocent C., Franceschi M., Lavielle B., Thomas B., Rebeix R., Grabenstaetter L., Capéran F. (2014) - Eaurigine - Caractérisation de la paléorecharge des aquifères du nord du Bassin aquitain par l'utilisation de traceurs isotopiques et des gaz rares. Rapport final. BRGM/RP-62193-FR, 43 p., 18 fig., 2 ann.

Saltel M., Capéran F. (2012) - Projet RODEO (Réseau d'Observation et de prévention du DÉnoyage de l'Oligocène) Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-61559-FR, 43 p., 23 fig., 3 ann.

Saltel Marc (2008) - Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds - Fonctionnement hydrogéologique des antiformes du sud de Bordeaux. *Thèse de doctorat : Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 268p.*, 268 p.

Schlumberger (1989) - Log Interpretation Principles/Applications. *Schlumberger Educationnal Services*, 223 p.

Schlumberger (2002) - Well test interpretation.

Serra O. (1984) - Fundamentals of well-log interpretation - the acquisition of logging data. *Elsevier*,

SMEGREG (2013) - SAGE Nappes profondes de Gironde - Plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource - Tome 2 : Objectifs - Dispositions - Moyens.

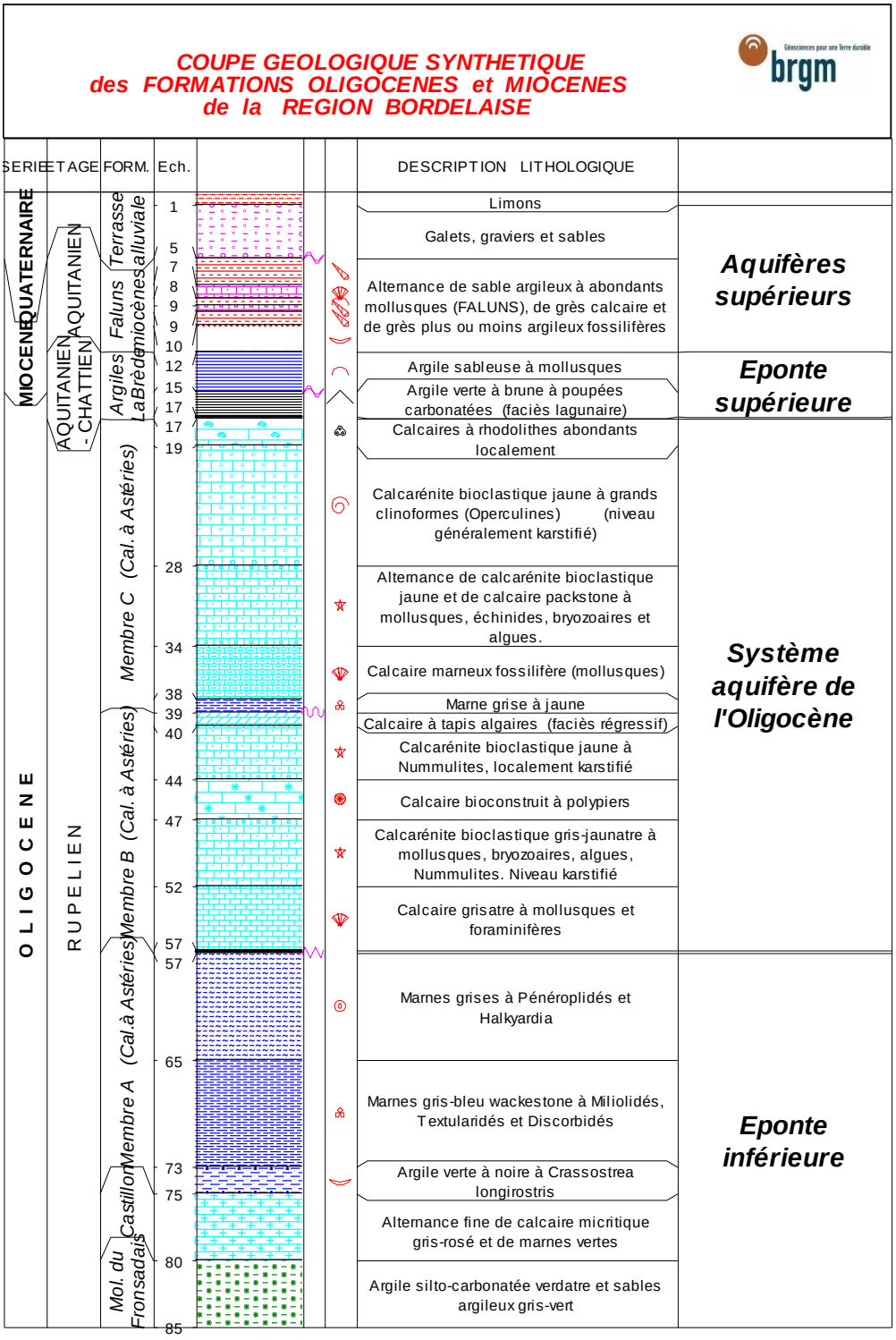
A Spane F, K Wurstner S (1993) - DERIV: a computer program for calculating pressure derivatives for use in hydraulics test analysis. Groundwater, Vol. 31, 814-822.

B. Tihansky A., A. Knochenmus L. (2001) - Karst Features and Hydrogeology in West-central Florida—A Field Perspective. U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Water-Resources Investigations Report 01-4011, p. 198-211.

Annexe 1

Caractéristiques du réservoir de l'Oligocène

L'Oligocène peut être séparé en deux ensembles, l'Oligocène inférieur ou Rupélien (regroupant le Stampien et le Sannoisien) et l'Oligocène supérieur ou Chattien. Ci-après est présentée la coupe géologique synthétique conceptuelle des formations oligocènes et de ses recouvrements. Elle retrace la superposition des terrains dans la région bordelaise.



Extrait du rapport BRGM/RP-50468-FR

Copyright © BRGM 2000

Ce log théorique permet de représenter l'ensemble des termes composant la série lithostratigraphique. Certains secteurs sont en effet caractérisés par des lacunes induites par des phénomènes d'érosion ou de non-dépôt.

L'Oligocène inférieur basal (Rupélien basal)

La base des terrains oligocènes est constituée par la partie supérieure de la Formation des Molasses du Fronsadais. Cette formation, d'origine fluviatile et palustre, est essentiellement composée d'assises argilo-carbonatées dans sa partie inférieure et de niveaux gréso-sableux dans sa partie supérieure. Elle présente une épaisseur de 30 à 40 mètres.

Les Molasses du Fronsadais sont surmontées par la Formation de Castillon qui est constituée de calcaires micritiques gris rosé, alternant avec des marnes vertes et des niveaux argileux à nodules de calcaire, déposés en environnement lacustre. Son épaisseur est faible (environ 1 à 5 m) car elle a été souvent érodée par la transgression marine du Rupélien.

L'Oligocène inférieur (Rupélien)

La Formation du Calcaire à Astéries, plus récente, est composée de trois membres (A, B et C). Elle correspond à une transgression marine majeure qui s'est déroulée en deux épisodes successifs séparés d'une phase régressive [(Cassoudebat et al., 1972) ; (Pratviel, 1972) ; (Gayet, 1985) ; (Platel et al., 2000)].

L'éponte inférieure de l'aquifère oligocène est formée par le Membre A.

Ce dernier correspond à une assise de calcaires marneux fins, de teinte grise à gris-bleu, riches en foraminifères, déposée dans des paléo-environnements de baie protégée ou de zones lagunaires (= ex Sannoisien des auteurs). Localement, cette assise peut débuter par un mince niveau d'argiles vertes à noires à Crassostrea longirostris [(Gayet, 1985) ; (Alvinerie et al., 1977)]. Vers l'ouest du secteur d'étude, ce membre est représenté par des marnes grises à pénéroplidés et Halkyardia, déposées en environnement de plate-forme proximale à moyenne et aussi appelées "Calcaires à Archiacines" par certains auteurs.

La partie réservoir est constituée par les membres supérieurs B et C de la Formation du Calcaire à Astéries.

Le Membre B correspond à l'assise médiane du Rupélien carbonaté. Il est liée à une transgression plus affirmée que la précédente pendant laquelle se sont déposés, sur une vingtaine de mètres, des calcaires de texture grainstone, bioclastiques, gris à jaunes (ou calcarénites) dont les éléments clastiques sont principalement des foraminifères, des bryozoaires, des polypiers, des algues et des mollusques (Alvinerie et al., 1977). La fin de la grande séquence A-B du Rupélien correspond à des assises massives de calcaires bioclastiques jaunes à nummulites à stratifications obliques qui progradent en direction de l'ouest. L'épisode régressif, qui termine le membre médian du Rupélien, se caractérise localement par un calcaire peu épais à tapis algaires. La base du Membre C est représentée par quelques mètres de marnes et de calcaire marneux. L'assise supérieure est surtout constituée par des calcaires de texture "grainstone" bioclastiques gris blanc parfois jaunâtres, très fossilifères comprenant de nombreux débris d'échinodermes, de lamellibranches, de foraminifères et de bryozoaires. Ces calcaires massifs à stratifications obliques, qui représentent les couches progradantes déposées pendant le haut niveau marin, sont organisés en grands clinoformes. Au sommet du membre, des calcaires à rhodolites abondants se sont localement déposés.

L'Oligocène supérieur (Chattien) et le Miocène inférieur (Aquitanien basal)

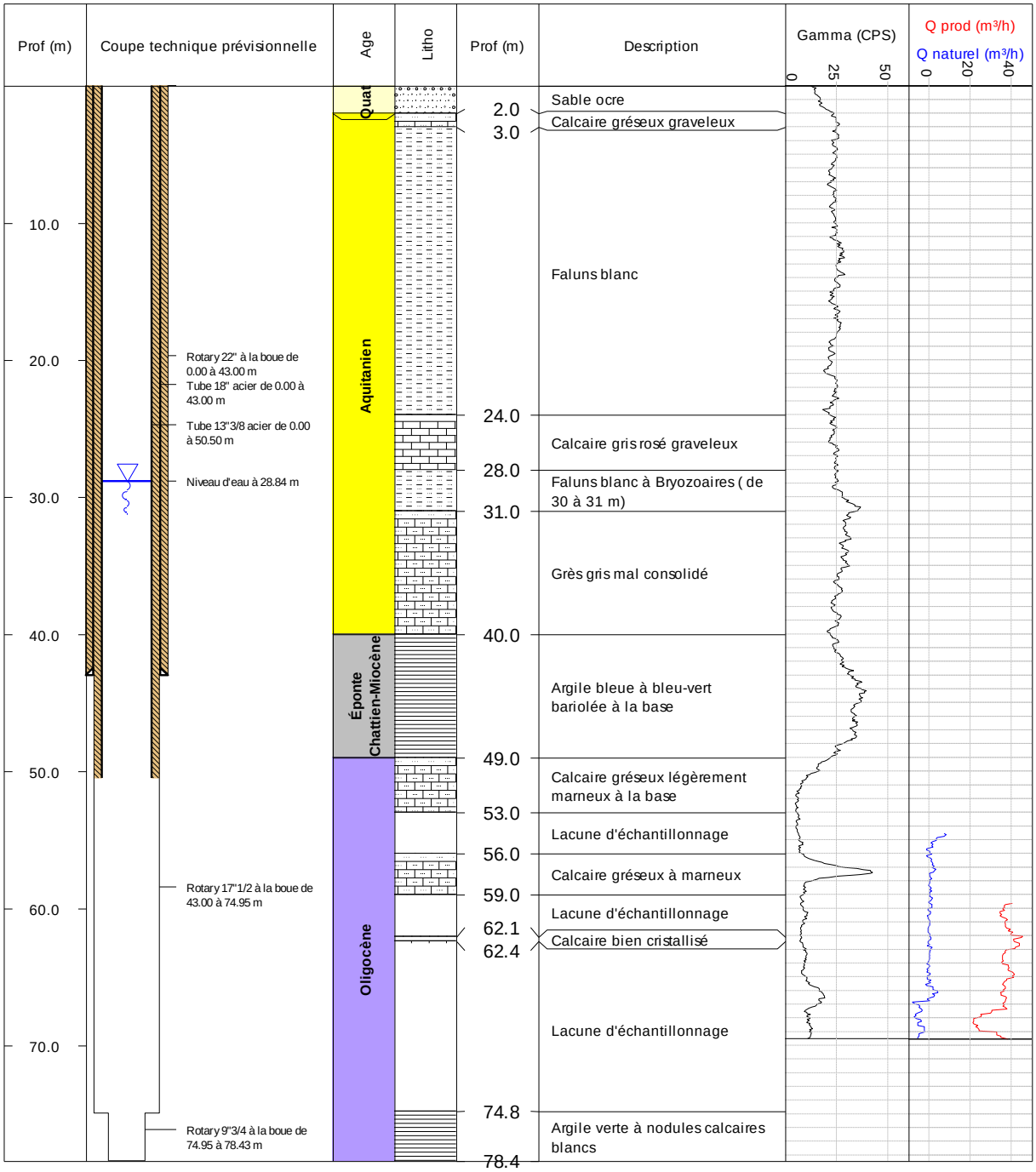
L'éponte supérieure de l'aquifère oligocène est constituée par les assises imperméables du Chattien et de l'Aquitanien.

Le Chattien est constitué de marnes et d'argiles (Marnes de Sainte-Christine ou Argiles de La Brède selon les auteurs) qui témoignent de la très importante régression marine connue au début du Chattien (baisse du niveau de l'océan mondial de 150 m environ). Leur épaisseur ne dépasse toutefois pas 5 mètres. Le caractère lagunaire des dépôts est très marqué avec des faciès d'argiles vertes à nodules carbonatés (poupées) et de fréquentes marmorisations pédogénétiques ocres mais cet horizon est souvent absent dans les forages profonds ou à l'affleurement, du fait de l'érosion liée à la transgression miocène ou de la mise en place des terrasses alluviales de la Garonne.

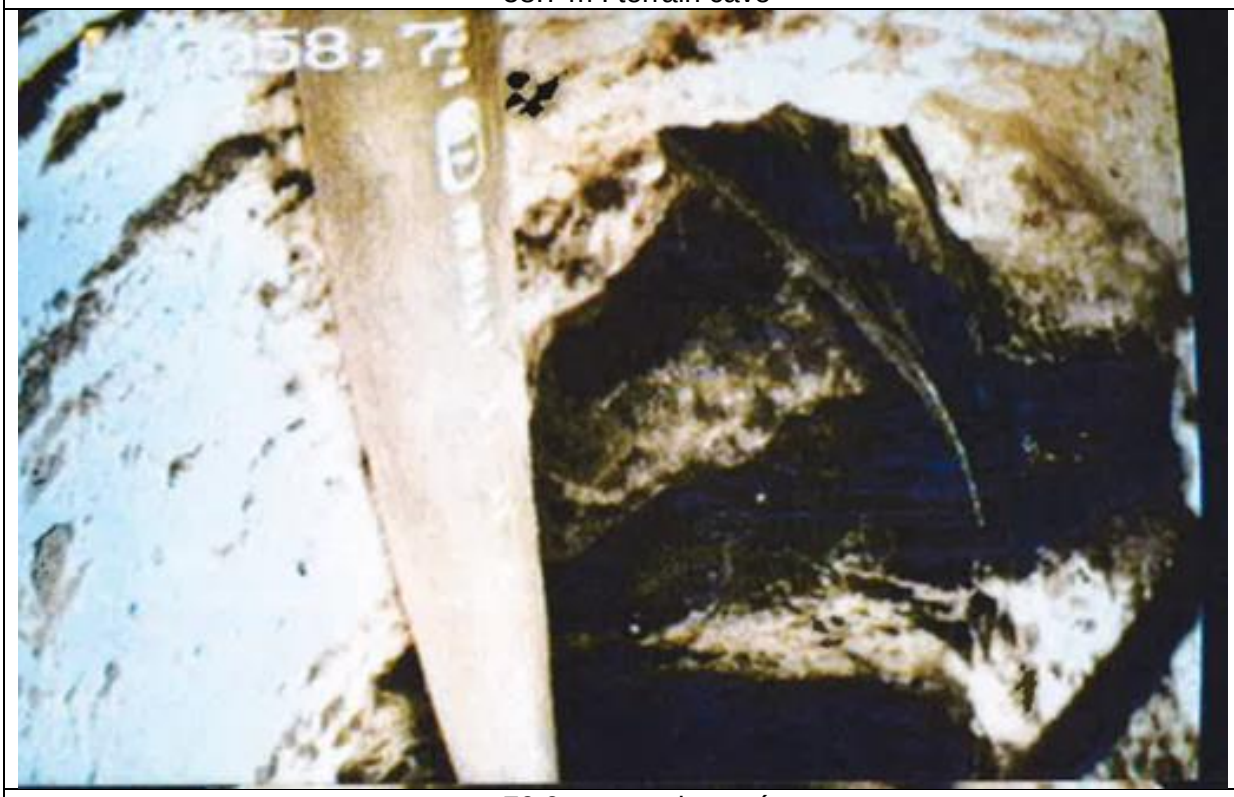
L'Aquitanien basal est représenté par des argiles sableuses bleu verdâtre à mollusques qui correspondent aux faciès de la première transgression miocène. Ces assises constituent la partie supérieure de l'éponte des réservoirs oligocènes. Toutefois, elles n'existent pas partout. Le cas échéant, l'éponte du réservoir est alors uniquement constituée par les argiles et les marnes du Chattien.

Annexe 2

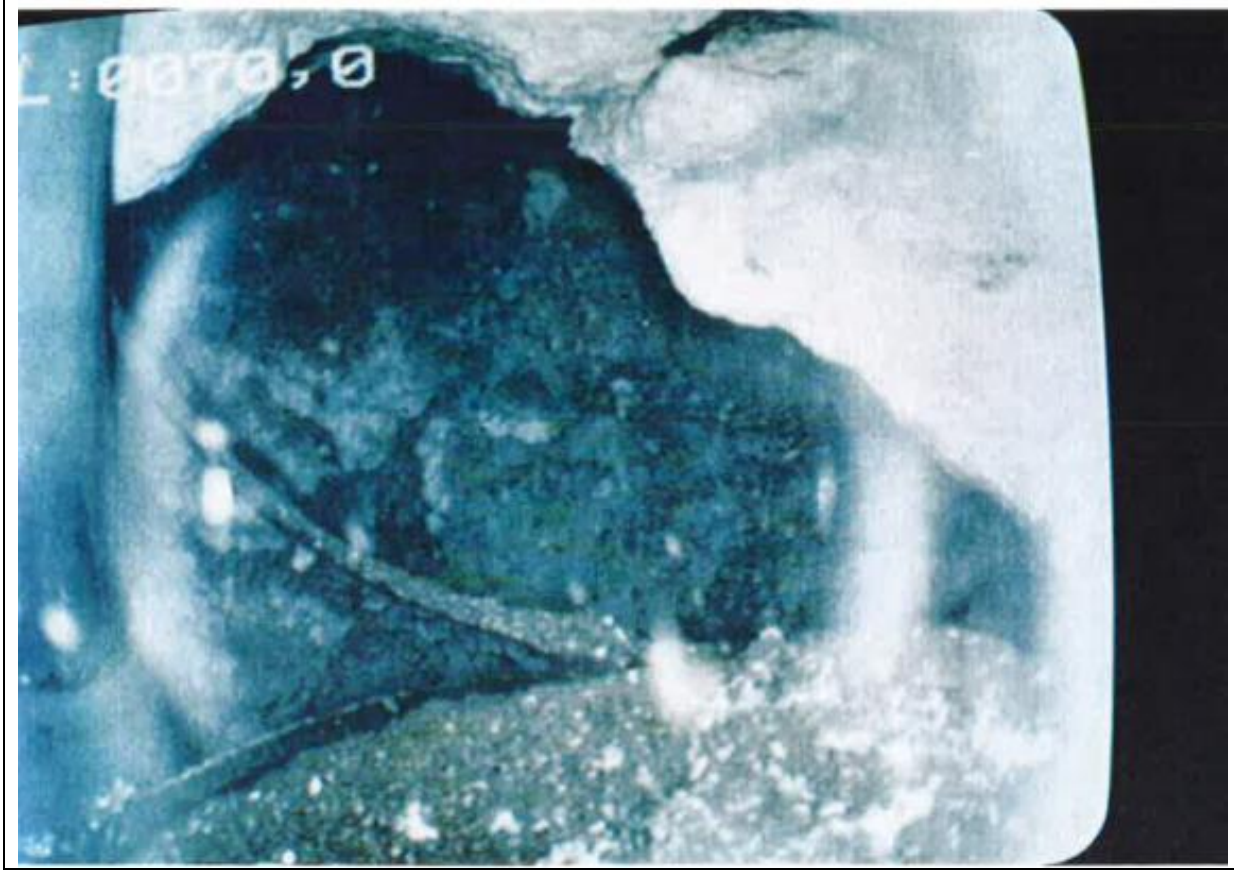
Coupe géologique et technique du forage de Moulin Lagus (BSS : 08276X0090/F) - photos du réservoir issues des inspections par caméra


Prof (m)
Coupe technique prévisionnelle
Age
Litho
Prof (m)
Description
Gamma (CPS)
Q prod (m³/h)
Q naturel (m³/h)
0
25
50
0
20
40
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
70.0
Quat
Aquitanien
Éponte Chattien-Miocène
Oligocène
Rotary 22" à la boue de 0.00 à 43.00 m
Tube 18" acier de 0.00 à 43.00 m
Tube 13"3/8 acier de 0.00 à 50.50 m
Niveau d'eau à 28.84 m
Rotary 17"1/2 à la boue de 43.00 à 74.95 m
Rotary 9"3/4 à la boue de 74.95 à 78.43 m
2.0
3.0
24.0
28.0
31.0
40.0
49.0
53.0
56.0
59.0
62.1
62.4
74.8
78.4
Sable ocre
Calcaire gréseux graveleux
Faluns blanc
Calcaire gris rosé graveleux
Faluns blanc à Bryozoaires (de 30 à 31 m)
Grès gris mal consolidé
Argile bleue à bleu-vert bariolée à la base
Calcaire gréseux légèrement marneux à la base
Lacune d'échantillonnage
Calcaire gréseux à marneux
Lacune d'échantillonnage
Calcaire bien cristallisé
Lacune d'échantillonnage
Argile verte à nodules calcaires blancs

58.7 m : terrain cavé

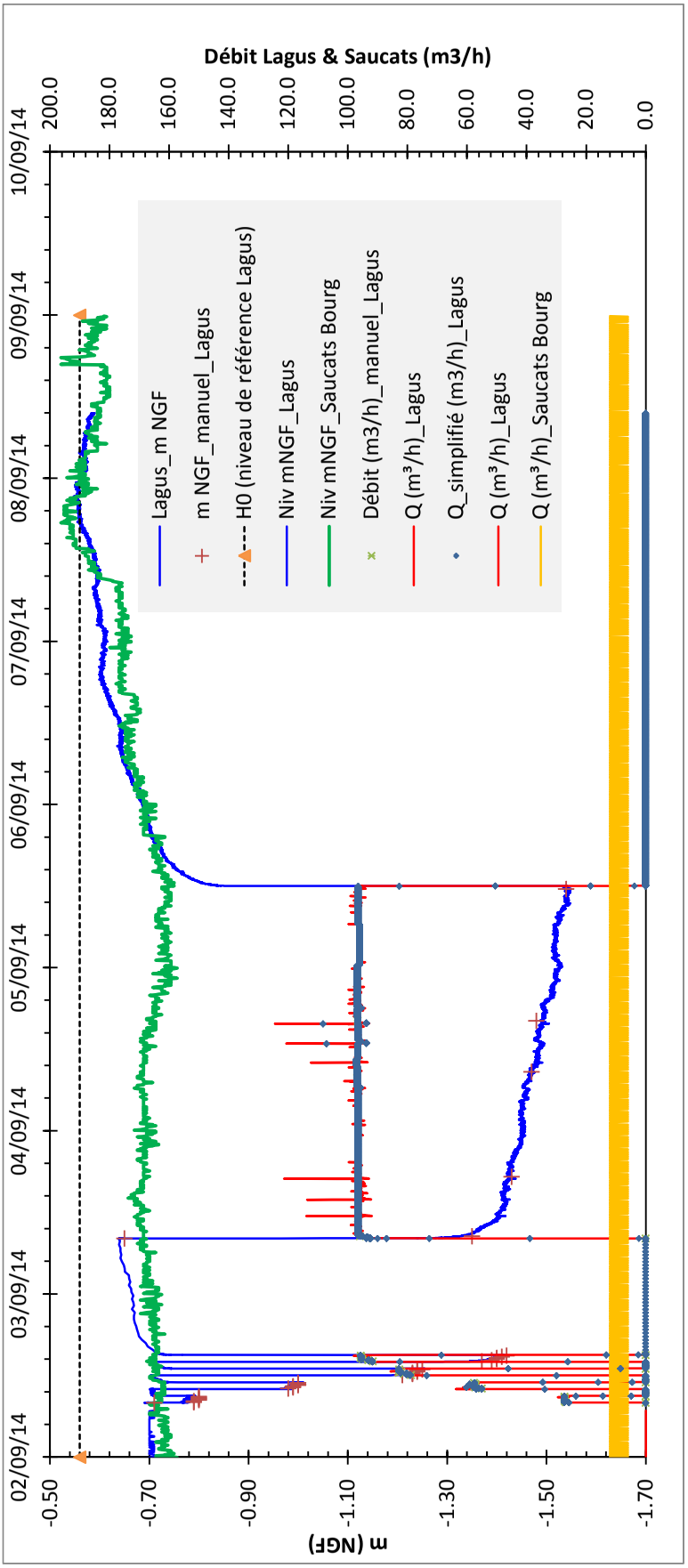


70.0 m : terrain cavé



Annexe 3

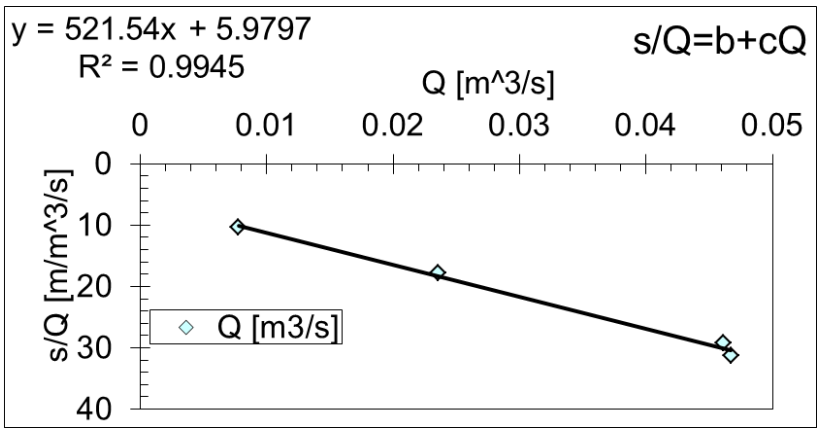
Suivi des niveaux et des débits sur les ouvrages Lagus et Saucats durant les essais réalisés en septembre 2014 sur le forage Lagus


Débit Lagus & Saucats (m3/h)
200.0
180.0
160.0
140.0
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
10/09/14
09/09/14
08/09/14
07/09/14
06/09/14
05/09/14
04/09/14
03/09/14
02/09/14
-0.50
-0.70
-0.90
-1.10
-1.30
-1.50
-1.70
m (NGF)
Lagus_m NGF
m NGF_manuel_Lagus
H0 (niveau de référence Lagus)
Niv mNGF_Lagus
Niv mNGF_Saucats Bourg
Débit (m3/h)_manuel_Lagus
Q (m³/h)_Lagus
Q_simplifié (m3/h)_Lagus
Q (m³/h)_Lagus
Q (m³/h)_Saucats Bourg

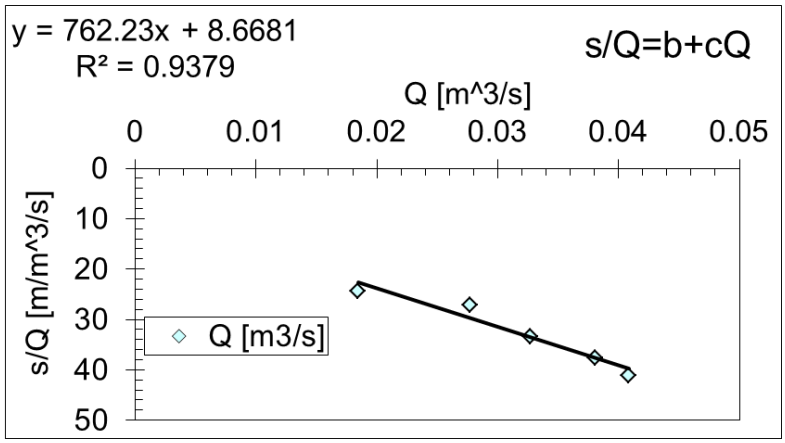
Annexe 4

Essai par paliers de débit - estimation des coefficients B et C

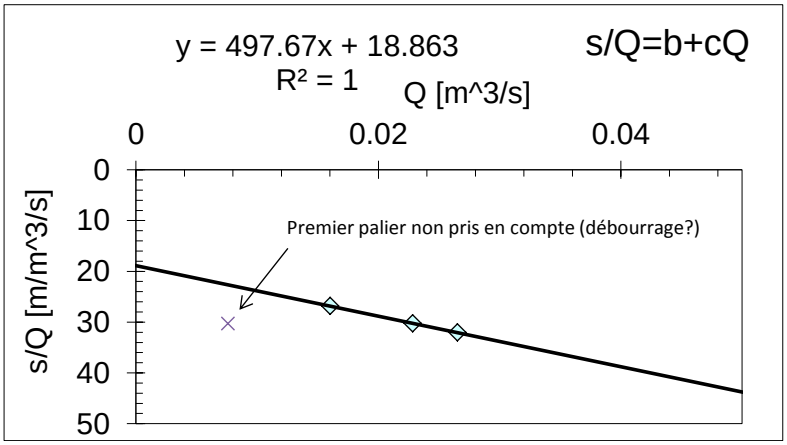
Forage de Moulin Lagus - 08276X0090/F



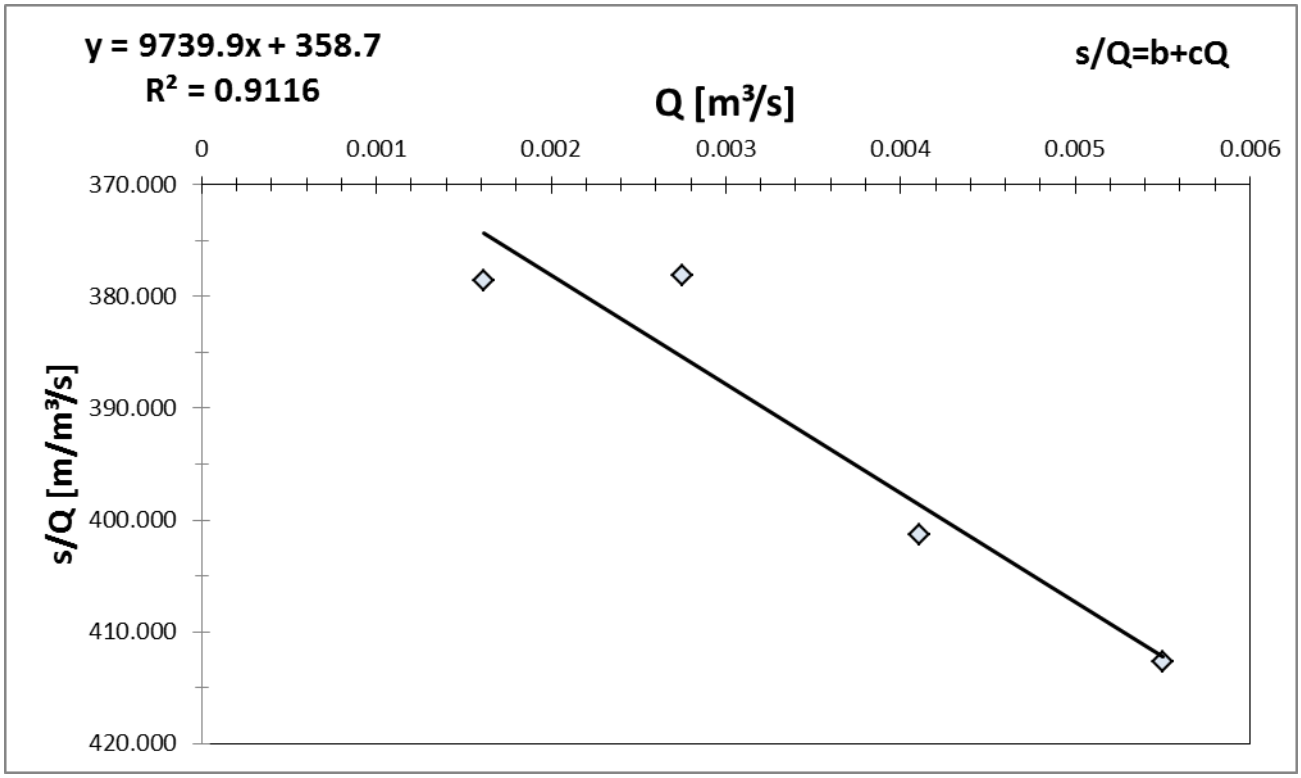
A. Essai par paliers de débit sur le forage de Moulin Lagus. Relation s/Q=b+CQ. 20/03/1996. Paliers non-enchainés.



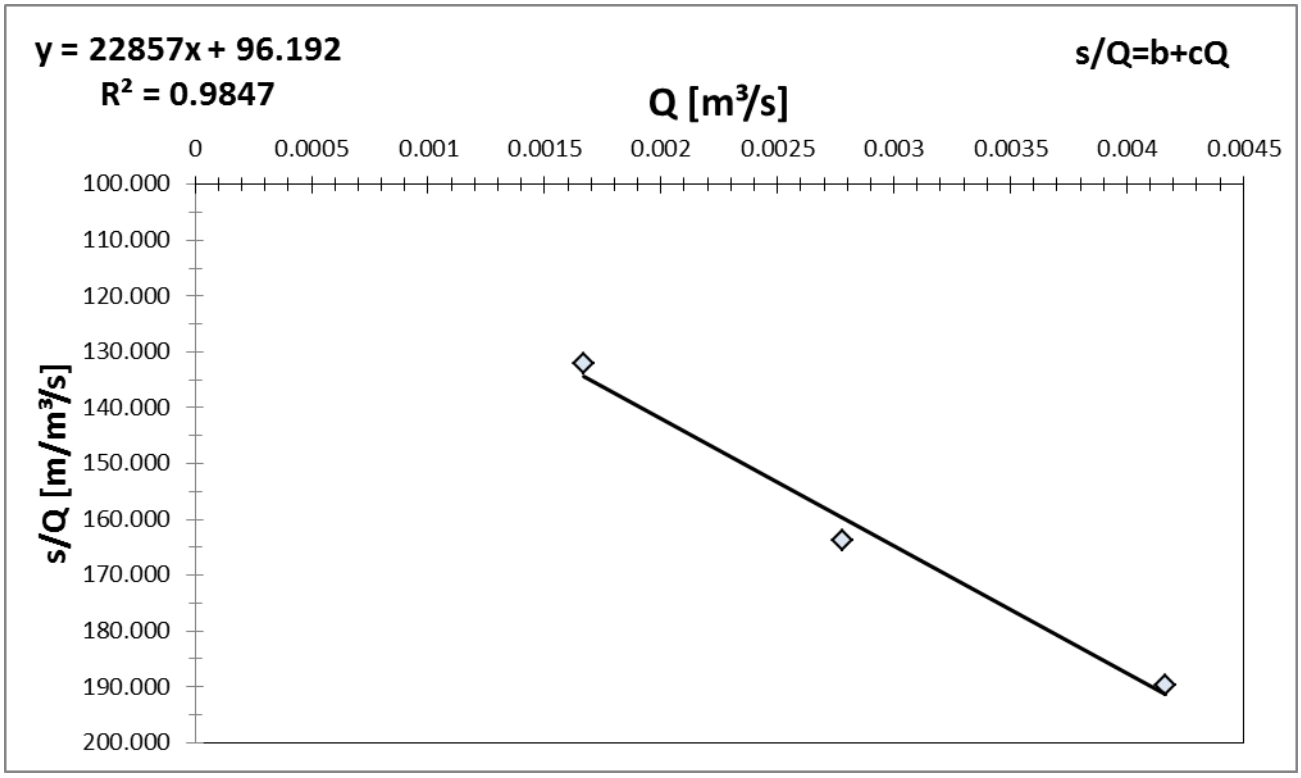
B. Essai par paliers de débit sur le forage de Moulin Lagus. Relation s/Q=b+CQ. 10-12/05/2005. Paliers non-enchainés.



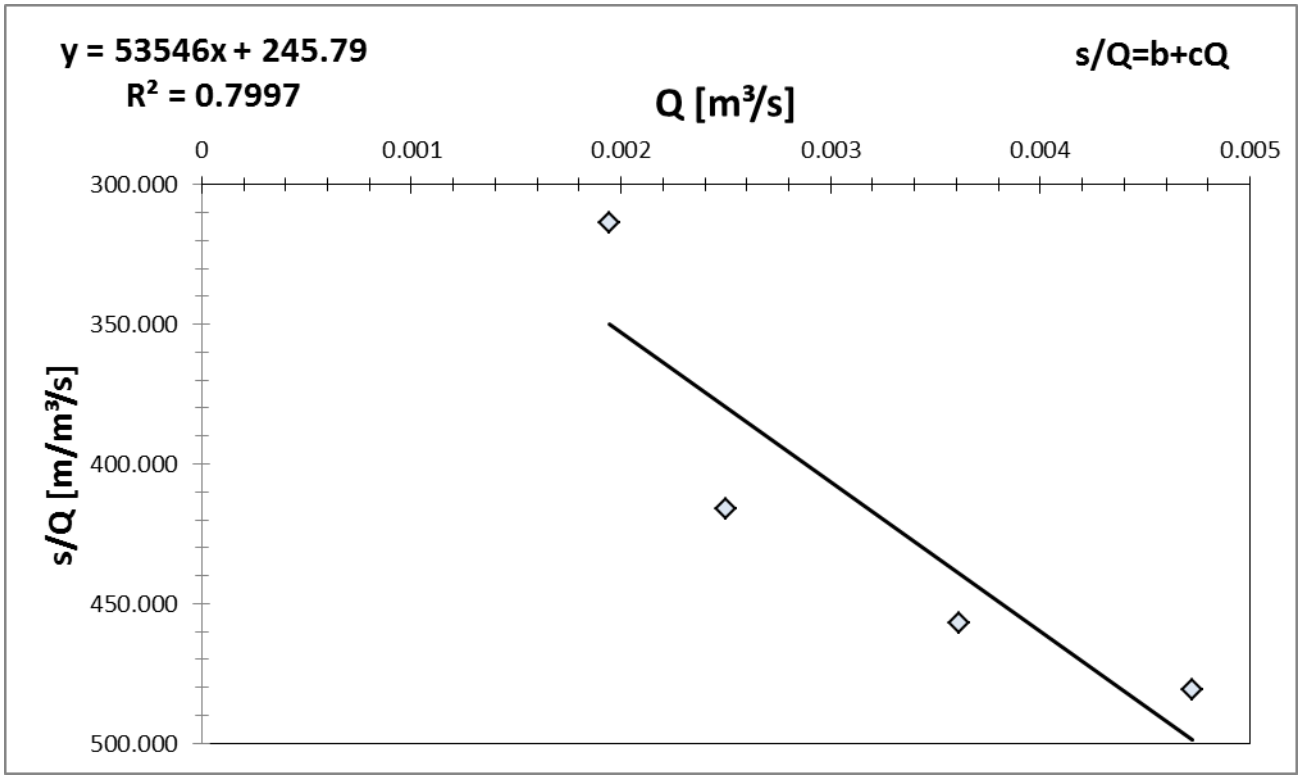
C. Essai par paliers de débit sur le forage de Moulin Lagus. Relation s/Q=b+CQ. 02/09/2014. Paliers non-enchainés.



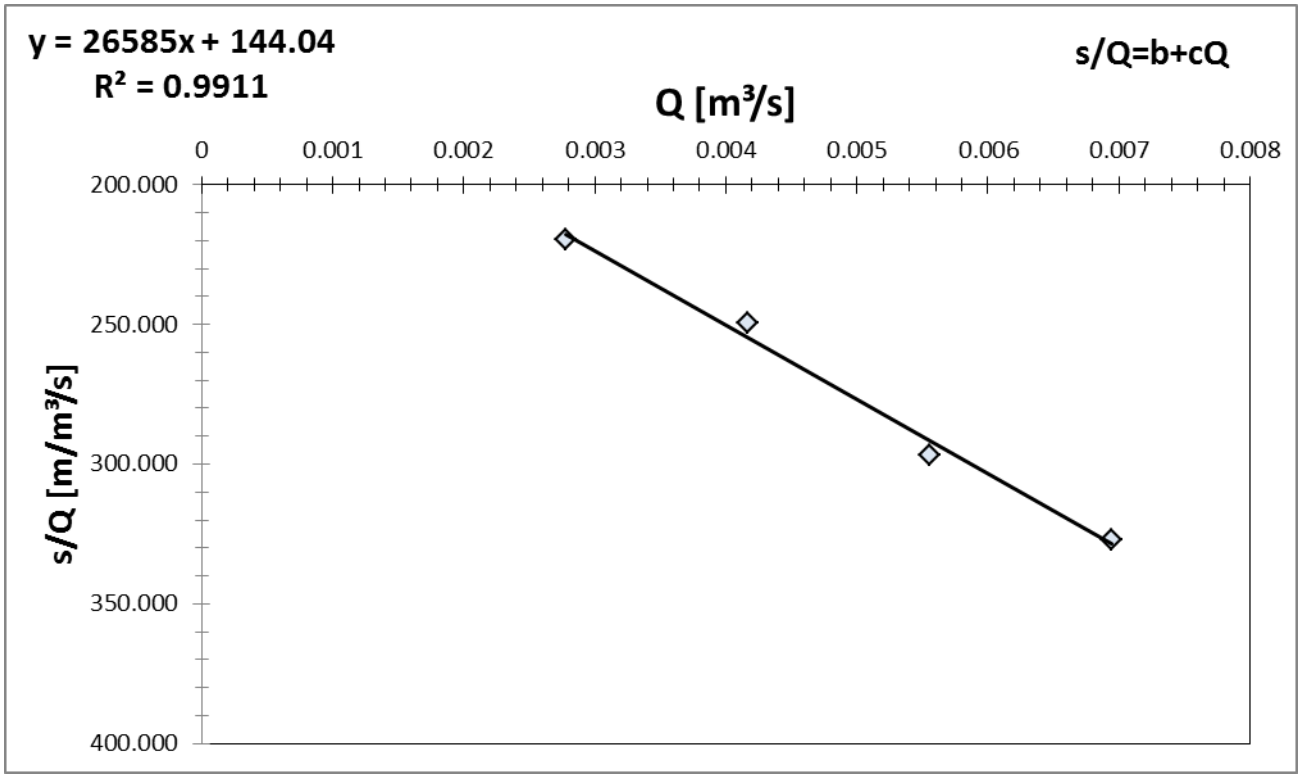
D. Essai par paliers de débit sur le forage de Moulin d'Augey (08276X0131). Relation s/Q=b+CQ. 18/11/2013. Paliers non-enchainés.



E. Essai par paliers de débit sur le forage de Jacoulet (08277X0312). Relation s/Q=b+CQ. 03/12/2013. Paliers non-enchainés.



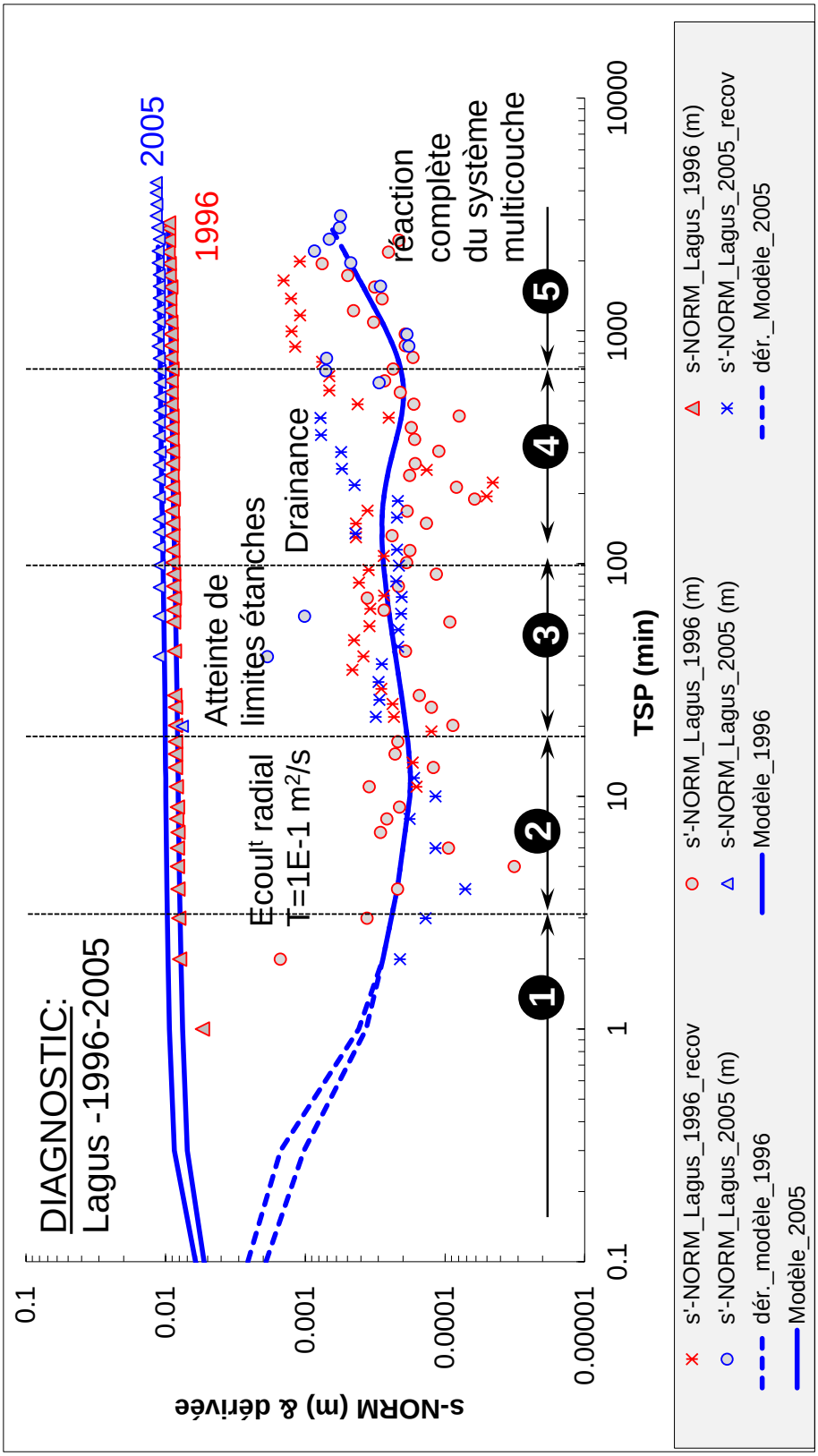
F. Essai par paliers de débit sur le forage du Péloua (08276X0138). Relation s/Q=b+CQ. 03/11/2014. Paliers non-enchainés.



G. Essai par paliers de débit sur le forage de la Migelane (08276X0139). Relation s/Q=b+CQ. 27/11/2015. Paliers non-enchainés.

Annexe 5

Diagnostic des essais réalisés en 1996 et 2005 au forage Moulin Lagus. Aquifère libre



Sur la figure ci-dessus on note un décalage des rabattements normalisés : il indique, un rabattement plus fort en 2005 qu'en 1996 lié à l'augmentation des pertes de charge liées au puits, ce qui est conforme aux essais par paliers de débit.

Annexe 6

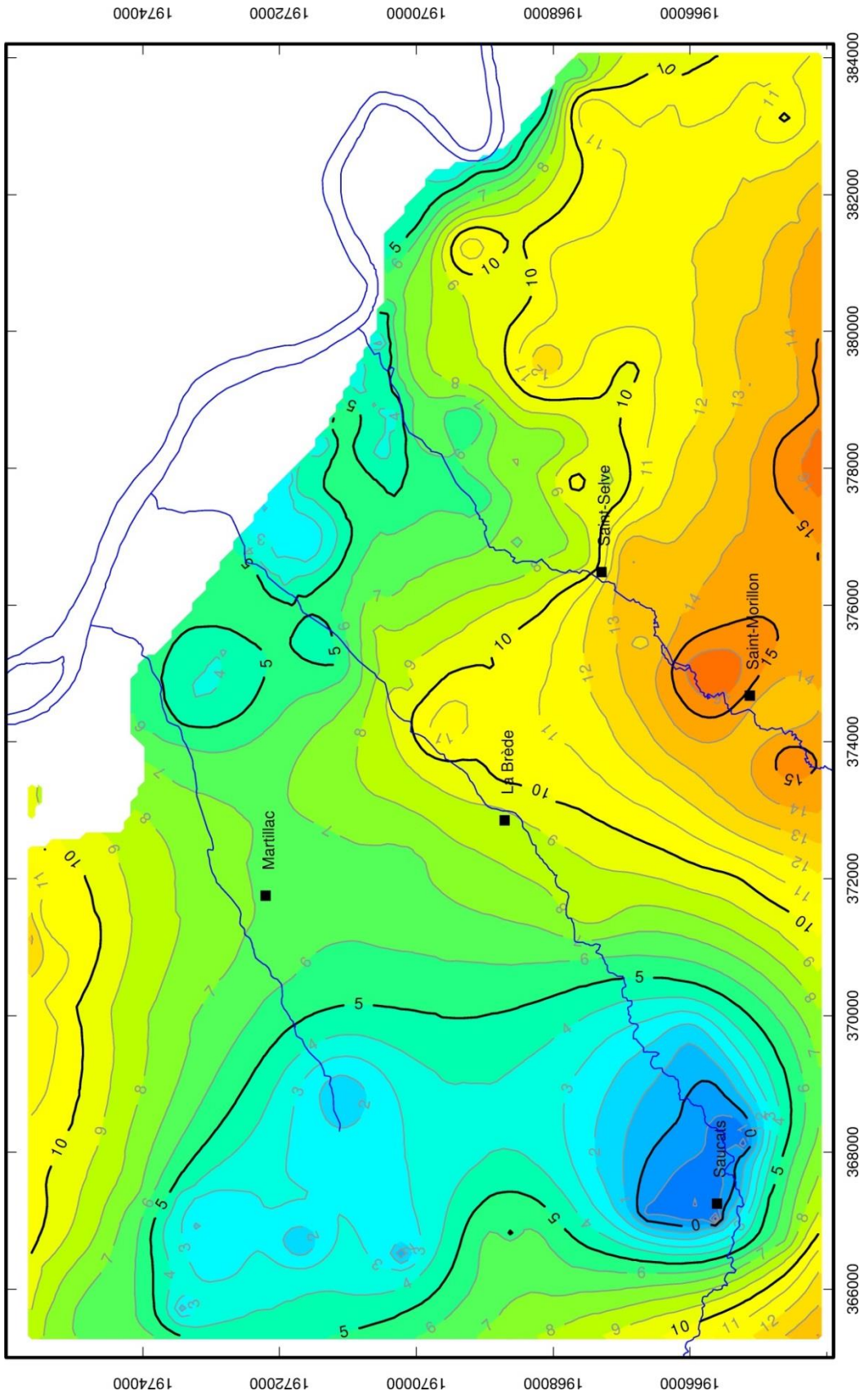
Campagne de mesure piézométrique sur la nappe de l'Oligocène - Tableau synthétique

BSS	Commune	Lieu-dit	X (Lambert II étendue)	Y (Lambert II étendue)	Z (m)	H (m NGF) mai 2013	H (m NGF) oct 2013	H (m NGF) mai 2014	H (m NGF) oct 2014
08272X1520	Leognan	-	367998.2	1974721.5	26.00			23.25	
08272X1521	Martillac	Route de la Haille	371414.6	1975335.4	20.00			11.17	9.92
08276X0001	Saucats	Bourg	367171.0	1965577.0	51.50	-1.01	-1.06	-0.62	
08276X0116	Leognan	Mignoy	365729.0	1973394.0	46.00			7.10	
08277X0175	Saint Selve	Lagrange	378333.0	1964339.0	35.00	15.60	15.39	18.63	
08277X0341	La Brede	rue des Templiers	372386.3	1968375.4	18.00			9.29	
08278X0285	Portets	Carriere Ségalier	379130.3	1967962.0	30.00			16.14	
08512X0044	Cabanac et villagrains	La Lande	368614.0	1961682.0	64.00	14.73	14.03	14.94	
08513X0049	Cabanac et villagrains	Cabanac stade	371500.0	1961630.0	42.00			21.94	
08272X0275	Cadaujac	Chemain de Pavin	371183.0	1976018.4	24.00	12.63	16.86	17.72	16.85
08272X0456	Leognan	Sausette	365750.0	1975112.0	57.00	7.21	10.59	10.75	10.79
08276X0006	Leognan	Rambouillet	366947.0	1973248.0	40.59	2.02	2.39	2.66	2.66
08276X0067	Saucats	Sabatey	367146.0	1966604.0	55.59	-1.28	-1.20	-0.63	-0.30
08276X0068	Leognan	Pins Vert	366745.0	1969830.0	57.94	8.64	3.27	2.37	3.14
08276X0088	Leognan	Bonois	366681.0	1971657.0	54.00	1.48	1.01	1.63	-1.83
08276X0089	Saucats	Mijelaine	366829.0	1968666.0	59.00	5.17	3.54	3.31	3.67
08276X0090	Saucats	Ancien Moulin Laguës	368129.0	1965199.0	51.00	-2.33	-2.23	-1.85	-1.47
08276X0091	Martillac	La Cape	368920.0	1971141.0	52.00	1.14	1.35	2.56	2.56
08276X0131	La Brede	Moulin d'Augey	371530.0	1967482.0	29.75	8.61	8.73	9.09	8.86
08277X0010	La Brède	Lycée Château La Sauque	374346.0	1969694.0	18.00			11.03	11.20
08277X0066	Saint Morillon	Lagenie	373837.0	1964591.0	24.00			17.18	17.12
08277X0080	Saint Selve	Garaingail	378171.0	1965555.0	33.50	13.13	13.03	16.03	14.33
08277X0118	Beautiran	M.Cailleaux	377469.0	1970409.0	22.00	5.22	5.13	5.35	4.90
08277X0157	La Brede	Guigeot	375145.0	1968952.0	31.00	9.88	10.06	11.01	9.49
08277X0163	Saint Medars d'Eyrans	Pontet	373524.0	1972125.0	21.88			7.26	7.26
08277X0164	Saint Medars d'Eyrans	Blayet 2	373969.0	1971091.0	18.00	7.59	7.36	8.24	7.36
08277X0166	La Brede	La Sauque	374155.0	1969654.0	17.50	11.21	11.01	11.95	11.36
08277X0169	Martillac	Haut Nouchet	372082.0	1971332.0	42.00	6.47	6.56	7.42	7.20
08277X0234	Saint Selve	Puits communal mairie	376553.0	1967409.0	12.90		9.59	10.05	9.70
08277X0302	Castres Gironde	Rocher	377160.0	1968450.0	12.14	7.50	7.40	8.90	8.03
08277X0304	Castres Gironde	Grand Bos	377460.0	1968073.0	22.99	7.99	7.96	9.55	8.55
08277X0305	Castres Gironde	Brame-Pan	377644.0	1968508.0	18.53			8.01	7.32
08277X0306	Saint Selve	Janicon Ouest	377798.0	1967279.0	24.71			11.06	9.90
08277X0312	Saint Morillon	Jacoulet	371967.0	1965383.0	53.40	9.75	9.87	10.08	9.89
08277X0316	Saint Selve	Bigard	375449.0	1966621.0	14.15	13.00	12.62	13.21	12.15
08277X0319	Beautiran	Couloumey	378218.0	1970574.0	17.56	3.94	3.98	4.09	3.96
08277X0321	La Brede	Perrucade	373405.8	1968823.1	18.00	9.91	9.83	10.97	9.93
08277X0322	Castres Gironde	Brame-Pan	377967.4	1968711.2	27.59	7.71	7.79	8.10	7.86
08277X0324	Saint Morillon	Moussurot	374819.6	1965465.3	18.46	16.41	16.19	16.80	15.90
08277X0326	Saint Selve	Montalier	375982.0	1967350.0	13.53	12.28		12.43	11.70
08277X0327	Saint Selve	Les Argelins	376726.0	1966932.0	26.55	13.77	13.77	15.15	14.27
08277X0333	Saint Selve		376432.3	1967316.3	13.00		11.39	11.90	11.20
08277X0336	Ayguemorte les Graves		377243.2	1971833.2	14.00			6.24	5.80
08277X0337	Castres Gironde		377623.8	1968993.3	9.00			5.69	5.51
08277X0338	Castres Gironde	Grand Bos	377800.0	1967650.0	32.00			12.59	11.49

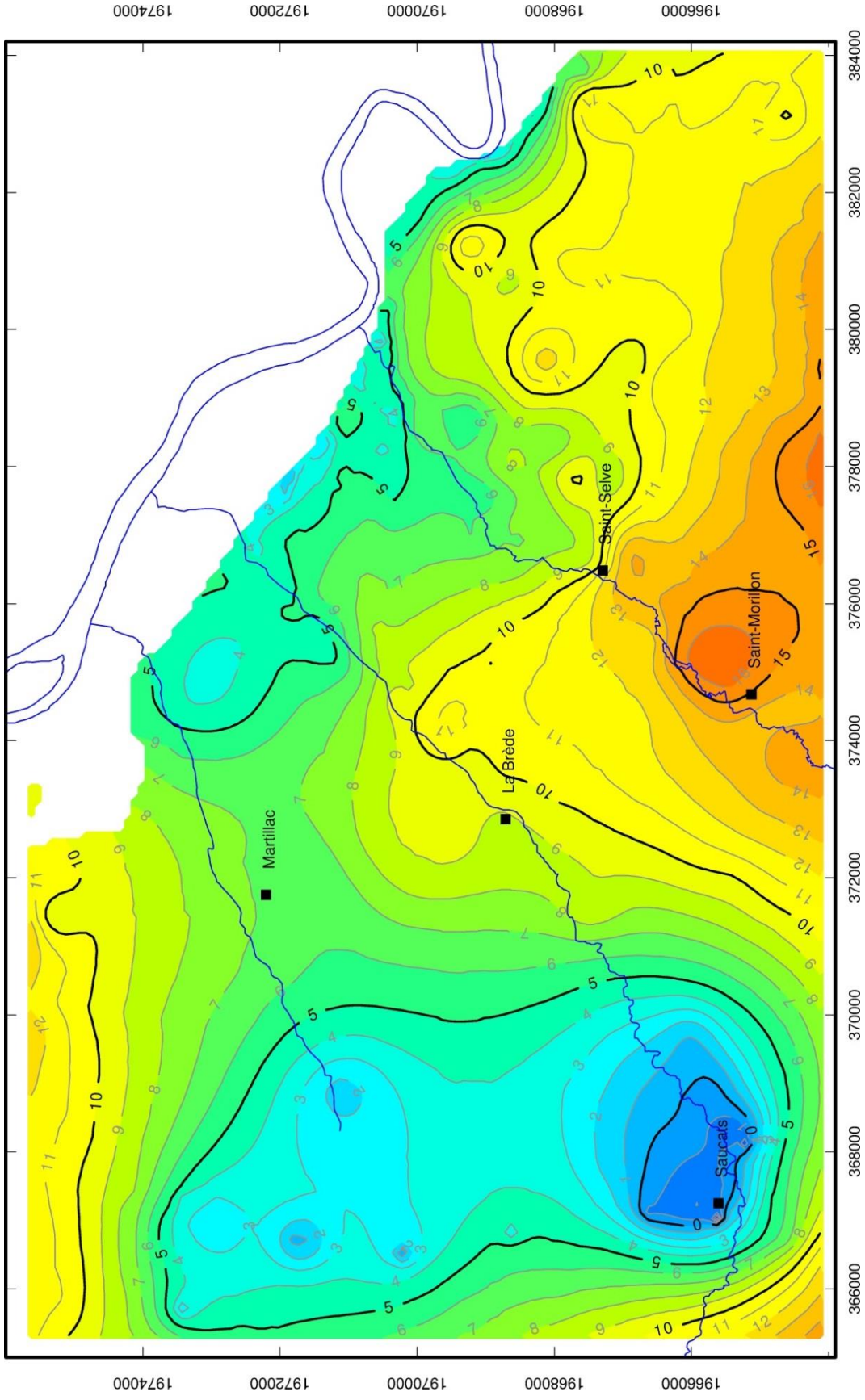
BSS	Commune	Lieu-dit	X (Lambert II étendue)	Y (Lambert II étendue)	Z (m)	H (m NGF) mai 2013	H (m NGF) oct 2013	H (m NGF) mai 2014	H (m NGF) oct 2014
08277X0339	Castres Gironde	Roqueton	378362.4	1967992.5	26.00			9.67	8.37
08277X0340	La Brede		372314.8	1968444.2	19.00			18.36	
08277X0342	La Brede		372779.6	1968682.0	17.00			9.35	8.60
08277X0343	La Brede		373043.4	1968996.7	15.00			9.77	8.96
08277X0344	Saint Morillon	La Cassagne	373629.6	1964681.4	28.00			16.12	16.49
08277X0346	Saint Morillon		374621.8	1964988.9	20.00			16.78	
08277X0348	Saint Selve		376523.2	1967334.2	13.00			10.73	10.23
08277X0349	Saint Selve	Foncroise	376944.1	1967773.1	15.00			9.20	4.39
08278X0029	Portets	Commune	381249.0	1969282.0	16.00			11.47	11.41
08278X0030	Portets	Commune	380988.8	1968870.2	20.00			10.82	10.10
08278X0031	Portets	Commune	381800.0	1968905.0	16.67	8.34	8.36	8.39	8.10
08278X0033	Portets		381644.9	1969517.2	13.00	7.54	7.60	7.84	7.41
08278X0036	Portets	Cournau	380728.0	1968593.0	26.00	9.10	8.87	10.12	9.21
08278X0058	Arbanats	Poste	383368.0	1967628.0	16.00			10.11	10.36
08278X0061	Castres Gironde	M.Pugie	379490.0	1970286.0	15.00			5.20	4.46
08278X0063	Castres Gironde	Faures	378778.0	1969246.0	25.50	5.53	5.49	6.12	5.56
08278X0128	Portets	Grangeneuve	379394.0	1966594.0	31.95	10.45	10.43	13.10	11.46
08278X0135	Portets	Curcie Petiton	380997.0	1967902.0	27.00	11.32	11.06	12.68	11.54
08278X0255	Portets	La grande Neuve-Sud	379330.0	1966425.0	30.52			14.41	12.55
08278X0256	Portets	Terre Neuve Nord	378719.0	1966046.0	29.76	11.65	11.42	13.65	12.25
08278X0257	Portets	La grande Neuve-Sud	379270.0	1966244.0	30.81	11.35	11.73	14.11	12.15
08278X0258	Portets	La grande Neuve-Sud	379501.0	1966199.0	33.04	11.53	11.45	14.30	12.27
08278X0282	Arbanats	Teychon	383022.1	1967367.0	21.00	11.72	11.62	12.15	11.72
08278X0283	Arbanats	Commune Arbanats	383323.5	1967596.7	17.00			11.30	10.97
08278X0284	Castres Gironde		379483.9	1970321.4	7.00			6.06	5.68
08278X0286	Portets	Carriere Ségalier	379528.2	1968146.6	30.00			14.51	13.35
08278X0287	Portets		381602.4	1969221.4	13.00			9.15	9.04
08278X0288	Portets	Commune	381915.4	1968934.3	15.00			7.22	7.24
08278X0289	Portets	Chaye	382253.3	1968868.3	14.00			9.60	9.55
08278X0290	Virelade		384155.9	1966683.6	13.00			7.28	
08512X0022	Saucats	Cassiney	366451.0	1963973.0	63.50			15.34	14.21
08272X0271	Martillac	Coutet	371313.0	1975302.0	18.00	10.43	9.77		
08277X0170	La Brède	Marsalette	372438.0	1970073.0	46.00		9.10		
08277X0279	Saint Medars d'Eyrans	Parcelle A 2195	374717.0	1973024.0	7.00	3.99	3.77		
08277X0303	Castres Gironde	Rocher	377016.3	1968248.9	11.23	7.53	7.44		
08277X0307	Castres Gironde	Grand Bos	378081.0	1967668.0	28.29	9.34	9.17		
08277X0315	Saint Selve	Rochet	376757.0	1967837.0	10.77	8.08	8.05		
08277X0317	Saint Morillon	Lacanau	375012.0	1966184.0	17.60		14.69		
08277X0318	Ayguemorte les Graves	Les Chambres	377593.0	1971702.0	5.40	3.85	3.78		
08277X0320	Ayguemorte les Graves	Le Mayne	377094.0	1971771.0	9.04	2.30			
08277X0323	Saint Morillon	Le Claron	373563.0	1964708.0	30.70	15.02	14.35		
08277X0325	Saint Morillon	Le Notaire	374526.0	1965071.0	18.21	13.91	14.17		
08278X0281	Saint Selve	Sarransot	378990.0	1964470.0	29.80	13.99	13.77		
08276X0138	Saucats	Pelloua	369740.0	1966010.0	44.00				1.28

Annexe 7

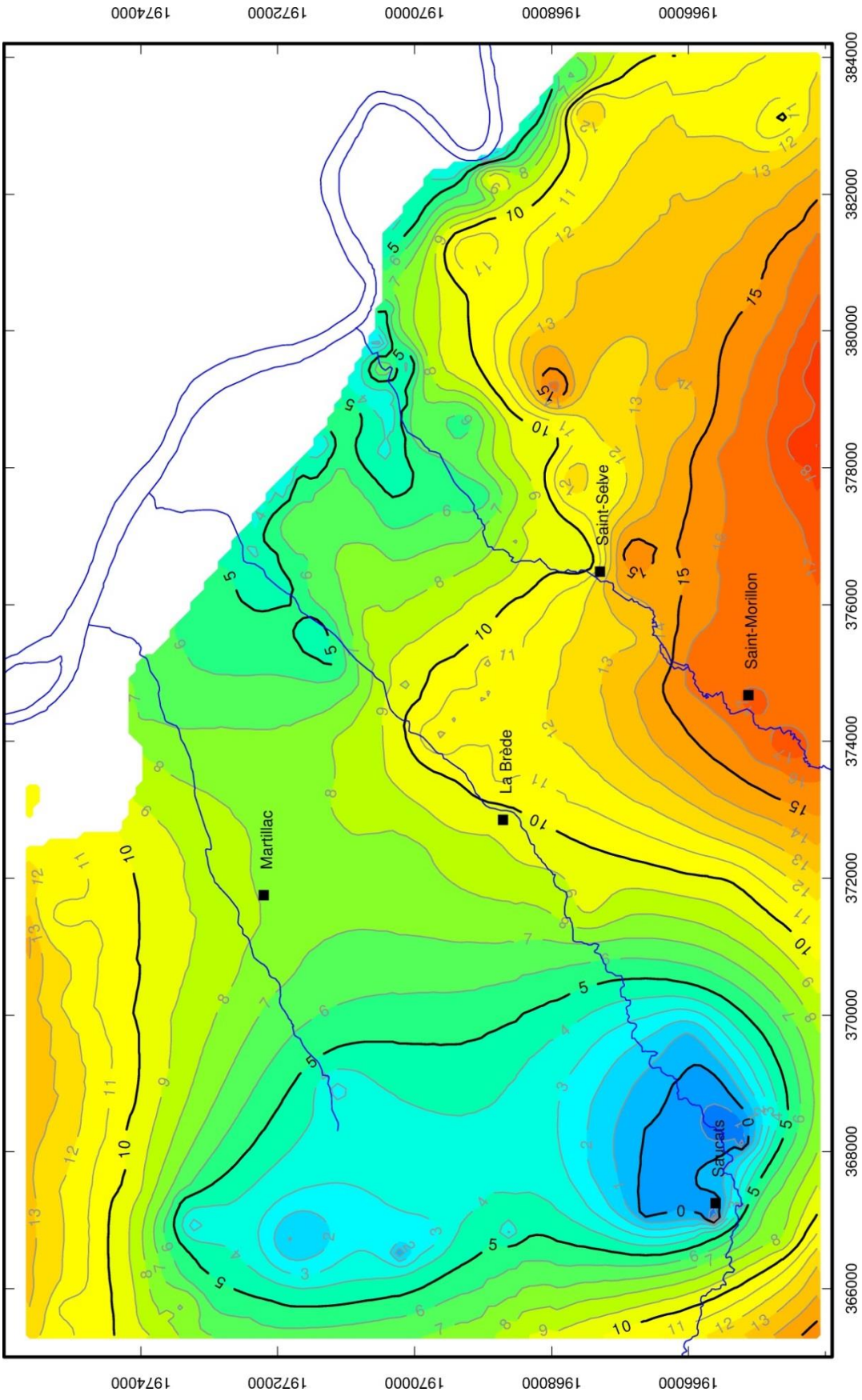
Cartes piézométriques



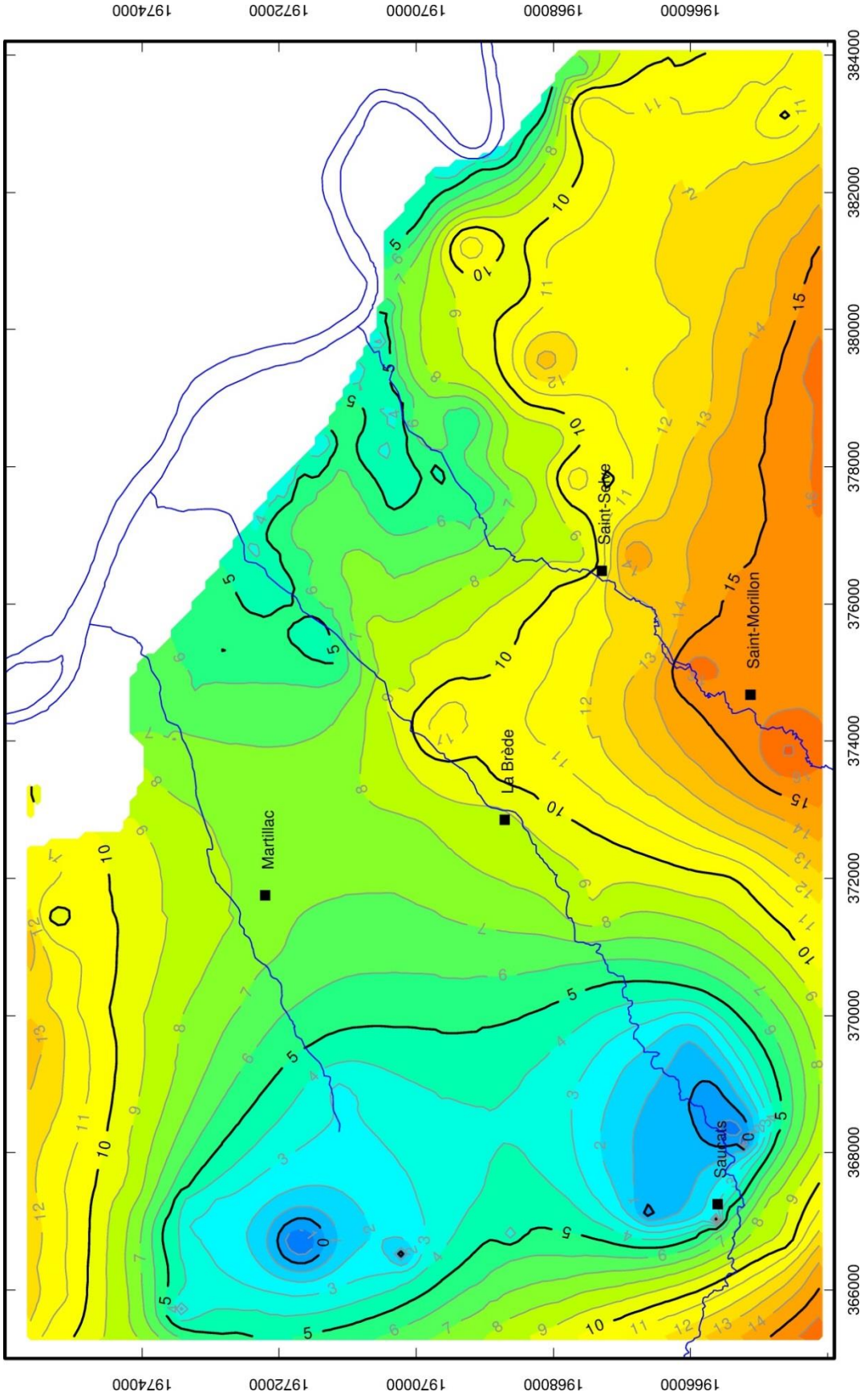
Carte piézométrique de la nappe Oligocène - mai 2013



Carte piézométrique de la nappe Oligocène - octobre 2013



Carte piézométrique de la nappe Oligocène - mai 2014



Carte piézométrique de la nappe Oligocène - octobre 2014

Annexe 8

Campagne de mesures de débit sur les cours d'eau du Saucats et du Gât-Mort - Tableaux synthétiques

Tableaux synthétiques - ruisseau du Saucats

Code Hydro	X lambert II	Y lambert II	Date de mesure	Température (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	Débit (L/s)	Débit (m3/s)	Débit (m3/j)
S0000100	370862,4	1967340,9	oct-14	12.9	8.11	464	155	0.155	13 392
			juin-14	14.4	7.98	317	422	0.422	36 461
			oct-13	12.30	7.89	398.0	170	0.17	14 688
			avr-13	14.40	7.64	259.0	857	0.857	74 045
S0000200	371754,9	1967864,5	oct-14	14.60	8.10	451.0	158	0.158	13 651
			juin-14	14.2	7.994	322	437	0.437	37 757
			oct-13	13.10	7.93	403.0	204	0.204	17 626
			avr-13	14.9	7.65	265.0	779	0.779	67 306
S0000201	371759,0	1967975,6	oct-14	0.00	0.00	0.0	9	0.009	778
			juin-14	13.3	8.322	400	70	0.07	6 048
			oct-13	13.70	8.10	482.0	19	0.019	1 642
			avr-13	13.40	7.80	238.0	116	0.116	10 022
S0000202	372330,2	1968399,7	oct-14	0.00	0.00	0.0	0.7	0	0
			juin-14	13.8	8.045	528	5	0.005	432
			oct-13	14.00	7.95	603.0	2	0.002	173
			avr-13	14.70	7.68	360.0	2	0.002	173
S0000203	372151,3	1967849,9	oct-14	0.00	0.00	0.0	7		0
			juin-14	15	8.153	551	5	0.005	432
			oct-13	16.40	8.05	521.0	7	0.007	605
			avr-13	15.50	7.92	328.0	27	0.027	2 333
S0000300	372484,7	1968282,8	oct-14	14.30	8.10	465.0	127	0.127	10 973
			juin-14	14.1	8.003	332	573	0.573	49 507
			oct-13	13.90	8.00	422.0	243	0.243	20 995
			avr-13	15.80	7.73	291.0	1090	1.09	94 176
S0000301			oct-14	14.00	8.04	452.0	101	0.101	8 726
S0000400	373147,3	1969037,5	oct-14	15.40	8.07	394.0	175	0.175	15 120
			juin-14	14.1	8	335	431	0.431	37 238
			oct-13	14.20	8.01	423.0	233	0.233	20 131
			avr-13	15.90	7.78	270.0	1108	1.108	95 731
S0000500	373630,9	1969242,4	oct-14	14.80	8.02	461.0	129	0.129	11 146
			juin-14	14.2	7.93	338	449	0.449	38 794
			oct-13	13.30	7.79	447.0	220	0.22	19 008
			avr-13	13.70	7.83	276.0	1044	1.044	90 202
S0000600	374047,4	1969783,6	oct-14	14.80	7.98	472.0	137	0.137	11 837
			juin-14	14.3	8.01	342	622	0.622	53 741
			oct-13	13.20	7.80	445.0	222	0.222	19 181
			avr-13	14.20	7.82	280.0	1060	1.06	91 584

Tableaux synthétiques - ruisseau du Gât-Mort

Code Hydro	X lambert II	Y lambert II	Date de mesure	Température (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	Débit (L/s)	Débit (m3/s)
GM000100	372979,8	1962256,6	oct-14	14.8	7.84	297	158	0.521
			juin-14	14.4	7.73	218	521	0.521
			oct-13	13.00	7.74	252.0	294	0.294
			avr-13	14.10	7.37	170.5	1010	1.01
GM000101	374011,4	1962219,1	oct-14	0	0	0	0.5	0
			juin-14	14.2	7.86	419	7	0.007
			oct-13	13.30	7.95	481.0	3	0.003
			avr-13	15.70	7.55	234.0	15	0.015
GM000102	372686,7	1962934,8	oct-14	14.4	8.08	455	9	0.009
			juin-14	13.5	7.95	313	29	0.029
			oct-13	12.70	7.50	360.0	20	0.02
			avr-13	12.50	7.51	164.2	87	0.087
GM000103	373274,4	1963803,5	oct-14	15.3	8.03	633	0.7	0.0007
			juin-14	15.9	8.05	526	5	0.005
			oct-13	13.60	7.90	559.0	4	0.004
			avr-13	16.30	7.95	381.0	30	0.03
GM000200	373595,8	1963903,1	oct-14	14.2	8	317	196	0.196
			juin-14	15	7.83	239	615	0.615
			oct-13	13.30	7.80	270.0	342	0.342
			avr-13	15.40	7.48	178.6	1336	1.336
GM000201	374238,5	1964102,3	oct-14	0	0	0	0.5	0.016
			juin-14	15.5	8.268	604	16	0.016
			oct-13	16.40	8.20	597.0	3	0.003
			avr-13	17.60	7.80	340.0	29	0.029
GM000300	374008,6	1964333,2	oct-14	14.3	8.02	319	174	0.174
			juin-14	14.4	7.85	164.7	561	0.561
			oct-13	13.90	7.74	279.0	342	0.342
			avr-13	13.70	7.41	184.5	1297	1.297
GM000400	374512,7	1965093,8	oct-14	13.9	7.92	319	151	0.151
			juin-14	15.5	7.78	241	573	0.573
			oct-13	13.90	7.90	279.0	304	0.304
			avr-13	14.80	7.50	185.8	1270	1.27
GM000500	374766,7	1965529,6	oct-14	13.9	7.95	320	158	0.158
			juin-14	15.1	7.91	245	631	0.631
			oct-13	14.00	8.14	280.0	309	0.309
			avr-13	15.80	7.57	186.0	1305	1.305
GM000600	375512,5	1966392,8	oct-14	13.8	7.94	323	190	0.19
			juin-14	14.2	7.83	244	510	0.51
			oct-13	14.10	8.10	280.0	299	0.299
			avr-13	15.00	7.53	188.0	1207	1.207
GM000700	376087,6	1966928,4	oct-14	14.6	7.82	329	160	0.16
			juin-14	15.5	7.73	244	636	0.636
			oct-13	14.40	7.90	280.0	320	0.32
			avr-13	15.40	7.52	190.0	1291	1.291
GM000800	376420,7	1967361,5	oct-14	14.8	7.83	330	172	0.172
			juin-14	15.4	7.73	241	560	0.56
			oct-13	14.50	7.90	280.0	326	0.326
			avr-13	15.40	7.54	191.1	1205	1.205
GM000900	376603,2	1968022,5	oct-14	14.4	7.69	378	203	0.203
			juin-14	13.6	7.58	273	599	0.599
			oct-13	14.60	7.73	301.0	317	0.317
			avr-13	15.50	7.49	200.0	1295	1.295

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 - **www.brgm.fr**

Direction régionale
Aquitaine-Limousin-Poitou-Charentes
Parc Technologique Europarc
24 Avenue Léonard de
33 600 – Pessac– France
Tél. : 05 57 26 52 70