

Modèle PHONEME : Apport des investigations de terrain - Évaluation de l'impact du champ captant des Landes du Médoc

Rapport final

BRGM/RP-68406-FR
Décembre 2018

Modèle PHONEME : Apport des investigations de terrain - Évaluation de l'impact du champ captant des Landes du Médoc

Rapport final

BRGM/RP-68406-FR
Décembre 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM PSP14AQI05

M. Saltel, B. Dewandel, P. Bourbon
Avec la collaboration de
O. Douez

Vérificateur :

Nom : Luc ARNAUD

Fonction : Hydrogéologue

Date : 06/12/2018

Signature :

Approbateur :

Nom : Nicolas PÉDRON

Fonction : Directeur du BRGM
Nouvelle-Aquitaine

Date : 07/12/2018

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés :

Modélisation géologique, modélisation hydrodynamique, calage, champ captant, Oligocène, Plio-Quaternaire, Landes du Médoc.

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

Saltei M., Dewandel B., Bourbon P. (2018) - Modèle PHONEME : Apport des investigations de terrain - Évaluation de l'impact du champ captant des Landes du Médoc. Rapport final. BRGM/RP-68406-FR, 80 p., 59 fig., 5 ann.

Synthèse

Le travail présenté dans ce rapport rend compte du travail de modélisation effectué pour évaluer l'impact qu'aurait la mise en service d'un champ captant exploitant la nappe de l'Oligocène dans les Landes du Médoc dans le département de la Gironde. Cette étude s'inscrit dans le cadre du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) des Nappes Profondes de Gironde et relève plus particulièrement de la disposition 14 du SAGE révisé qui porte sur les substitutions de ressources à partir de nouveaux pôles de production (SMEGREG, 2013).

Cette étude fait l'objet d'un partenariat de recherche entre le BRGM et Bordeaux Métropole, porteur de projet pour les études concernant le pôle de production dans les Landes du Médoc. En effet, Bordeaux Métropole, dans l'exercice de sa compétence Alimentation en eau potable, a confirmé son engagement de porter la maîtrise d'ouvrage du 1^{er} projet de ressource de substitution désigné comme le projet « Champ captant des Landes du Médoc ». Ce projet a fait l'objet de nombreuses études préalables auxquelles le BRGM a été associé via l'utilisation du Modèle hydrodynamique Nord-Aquitain (MONA) qui permet de simuler les écoulements au sein des grands aquifères du nord du Bassin. Cet outil permet de réaliser des simulations prospectives et ainsi d'appuyer les acteurs en charge de la gestion de ces ressources.

Il a été utilisé à plusieurs reprises, à la demande du SMEGREG (Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde), pour évaluer l'impact de l'exploitation d'un futur champ captant sur la nappe de l'Oligocène et les réservoirs encadrants [(Pédron, et al., 2009) ; (Saltel, 2012); (Cabaret, et al., 2012)].

Dans le cadre du projet du champ captant des Landes du Médoc, le modèle PHONEME a été construit spécifiquement pour affiner l'évaluation des impacts que pourraient engendrer la mise en place du champ captant (Saltel, et al., 2015). L'outil a été conçu pour orienter les choix de réalisation (emplacement optimum des forages, mise à jour de la géométrie du système multicouche) et, à terme, piloter son exploitation.

L'utilisation du Modèle Nord-aquitain pour créer ce modèle local, dans le cadre d'un partenariat Bordeaux Métropole/BRGM, a permis de disposer d'un outil cohérent avec le modèle régional qui est l'outil de référence utilisé pour aider à la définition des volumes prélevables du SAGE nappes profondes de Gironde. En effet, la capacité du futur champ captant (estimée à 10 millions de m³/an) des « Landes du Médoc » et son impact régionalisé attendu sur la piézométrie nécessitent une prise en compte fine du système. Ce travail partenarial doit donc permettre d'assurer cette cohérence entre les deux outils tout en répondant aux objectifs propres à chacun des deux organismes (connaissance géologique et hydrogéologique régionale, et fiabilité du MONA pour le BRGM ; connaissance géologique et hydrogéologique locale, et outil de pilotage opérationnel du champ captant pour Bordeaux Métropole).

Le rapport précédent, BRGM/RP-65368-FR, décrit la construction d'un modèle géologique fin à la maille de 100 m sur l'extension du domaine d'intérêt et sa transposition en un modèle hydrodynamique.

Le présent rapport montre les améliorations apportées à ces modèles suites aux investigations de terrain réalisées sur les communes de Sainte-Hélène, Saumos et du Temple. Il ressort de cette approche terrain que l'aquifère de l'Oligocène (réservoir fracturé) est très productif tandis que la nappe de l'Aquitainien présente des propriétés hydrodynamiques globalement médiocres.

Par ailleurs, il existe une distinction entre les deux réservoirs miocènes qui présentent des niveaux à l'équilibre (hors pompage) différents, des propriétés hydrodynamiques propres des comportements distincts vis-à-vis des pompages réalisés dans les aquifères encadrants.

Les améliorations apportées au modèle géologique suite aux investigations et données nouvelles acquises sur le secteur du Temple sont ensuite décrites dans ce document. Le modèle hydrodynamique a été recalé en apportant une attention particulière à l'interprétation et à la modélisation des pompages d'essais sur l'ensemble du secteur concerné.

Ce document décrit de manière détaillée le processus de calage du modèle ainsi que les différents résultats de simulations réalisées pour évaluer l'impact du champ capant sur la nappe de l'Oligocène et les aquifères sus-jacents notamment la nappe du Plio-Quaternaire.

Plusieurs approches ont été utilisées pour évaluer l'impact de l'exploitation d'un champ de 14 forages captant la nappe de l'Oligocène dans le secteur de Saumos-Le Temple pour une capacité de 10 millions de m³/an : approche prospective, rétrospective et prospective long terme.

Il ressort pour la nappe de l'Oligocène que l'impact sur les forages proches du projet reste modéré et n'influencera pas de manière significative leur régime d'exploitation (hormis le forage AEP de Saumos).

Les impacts maximums pour la nappe du Plio-Quaternaire sont compris entre 8 et 12 cm. A noter que du fait de la recharge naturelle liée aux précipitations hivernales, cette nappe libre présente des variations saisonnières avec des périodes de basses eaux et des périodes de hautes eaux. Les impacts liés au projet sont donc variables dans le temps et dans l'espace en fonction des saisons.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Actualisation du modèle géologique	11
2.1. APPORT DES FORAGES DU TEMPLE	11
2.2. CORRELATIONS AVEC LES FORAGES ALENTOURS ET MISE A JOUR DU MODELE GEOLOGIQUE.....	15
3. Actualisation du modèle hydrodynamique.....	19
3.1. PARAMETRES DU MODELE	20
3.1.1. Paramètres spatio-temporels	20
3.1.2. Paramètres hydrodynamiques	26
3.2. CALAGE DU MODELE	34
3.2.1. Points d'observation.....	34
3.2.2. Calage du modèle en régime transitoire.....	35
3.2.3. Analyse des écarts.....	49
4. Impact du champ captant	59
4.1. METHODOLOGIE.....	59
4.2. APPROCHE PROSPECTIVE COURT TERME - IMPACT DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES CONTINUES.....	61
4.2.1. Description.....	61
4.2.2. Résultats.....	61
4.3. APPROCHE RETROSPECTIVE - IMPACT DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES CONNUES.....	67
4.3.1. Description.....	67
4.3.2. Résultats.....	67
4.4. APPROCHE PROSPECTIVE LONG TERME - IMPACT DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES CONNUES.....	70
5. Conclusion.....	75
6. Bibliographie	77

Liste des figures

Figure 1 : Profondeur des horizons codés pour le forage oligocène du Temple (BSS003YBRQ/X)	12
Figure 2 : Coupes géologique et technique du forage oligocène du Temple (BSS003YBRQ/X)	14
Figure 3 : Comparaison entre log prévisionnel et log final	15
Figure 4 : Coupe Nord-Sud passant par le forage oligocène du Temple (BSS003YBRQ/X)	16
Figure 5 : Coupe Ouest-Est passant par le forage oligocène du Temple (BSS003YBRQ/X)	17
Figure 6 : Géométrie du modèle	19
Figure 7 : Schéma de fonctionnement de la recharge [(Thiéry, 2014) ; (Thiéry, 2015c)]	21
Figure 8 : Mailles SAFRAN utilisées comme zones météo dans le modèle PHONEME	21
Figure 9 : Réserve utile (en mm) des sols calculée à partir de la carte pédologique au 250 000 ^{ème} de l'INRA (Richer de Forges et al, 2015)	22
Figure 10 : Réseau hydrographique dans le modèle PHONEME	24
Figure 11 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (Thiéry, et al., 2001)	25
Figure 12 : Géométrie d'un tronçon de rivière (Thiéry, et al., 2015 c)	25
Figure 13 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos.	27
Figure 14 : Données de perméabilités disponibles dans la littérature	28
Figure 15 : Localisation des puits suivis lors de l'essai d'avril–mai 2015 sur la commune de Sainte-Hélène	29
Figure 16 : Dispositif de suivi des essais réalisés sur le site de Saumos en décembre 2016	30
Figure 17 : Suivi des mesures (m NGF) réalisées sur le site du Saumos lors des essais de décembre 2016	31
Figure 18 : Dispositif de suivi des essais réalisés sur le site du Temple de septembre à octobre 2017	32
Figure 19 : Suivi des mesures (m NGF) réalisées sur le site du Temple, lors des pompages d'essai de septembre à octobre 2017	33
Figure 20 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques issue des pompages d'essai du Temple	33
Figure 21 : Points d'observation (piézomètres)	34
Figure 22 : Localisation des piézomètres utilisés pour contrôler la validité du modèle	35
Figure 23 : Procédure de calage des charges hydrauliques	36
Figure 24 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés (08025X0009, Plio-quaternaire)	37
Figure 25 : Comparaison entre débits observés et débits simulés à la station de la Garroueyre	38
Figure 26 : Localisation des forages et plan schématique du dispositif	40
Figure 27 : Reproduction par le modèle des tests d'exploitation réalisés à grande échelle en 2003	41
Figure 28 : Schématisation de l'approche analytique, pour évaluer l'impact du pompage oligocène sur la nappe du Plio-Quaternaire	42
Figure 29 : Simulation de l'impact au Plio-Quaternaire lors du pompage à l'Oligocène pendant 7 jours à 200 m ³ /h	43
Figure 30 : Vue en coupe du modèle locale simplifié pour simuler les pompages du Temple	43

Figure 31 : Reproduction du pompage d'essai à l'Oligocène et impact simulé sur l'ensemble des aquifères dans le modèle local simplifié	44
Figure 32 : Illustration de l'hétérogénéité des épontes	45
Figure 33 : Vue en coupe du modèle local complexifié pour simuler les pompages du Temple	45
Figure 34 : Reproduction du pompage d'essai à l'Oligocène et impact simulé sur l'ensemble des aquifères dans le modèle local complexifié	46
Figure 35 : Reproduction du pompage d'essai à l'Oligocène et impact simulé sur l'ensemble des aquifères dans le modèle local simplifié - limitation des impacts dans les aquifères sus-jacents	48
Figure 36 : Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles	49
Figure 37 : Illustration des écarts de calage pour la nappe du Plio-Quaternaire	51
Figure 38 : Nappe du Plio-Quaternaire - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type	52
Figure 39 : Illustration des écarts de calage pour les nappes du Miocène (Aquitainien et Langhien-Serravallien)	53
Figure 40 : Nappes du Miocène (Langhien-Serravallien Aquitanien) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type	54
Figure 41 : Illustration des écarts de calage pour la nappe de l'Oligocène	55
Figure 42 : Nappe de l'Oligocène - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type	56
Figure 43 : Illustration des écarts de calage pour les nappes de l'Éocène	57
Figure 44 : Nappes de l'Éocène (supérieur, moyen et inférieur) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type	58
Figure 45 : Synthèse des travaux d'optimisation du positionnement du champ captant	60
Figure 46 : Positionnement des forages du champ captant dans la configuration J	60
Figure 47 : Exemple de chroniques sur le secteur d'implantation du champ captant	62
Figure 48 : Impacts du projet de champ captant sur la nappe de l'Oligocène -10 millions de m ³ /an après 10 ans d'exploitation (basses eaux) - recharge moyenne sur 30 ans - configuration J - version 3	63
Figure 49 : Impact sur les forages oligocènes alentours	63
Figure 50 : Impacts du projet de champ captant sur la nappe de l'Aquitainien -10 millions de m ³ /an après 10 ans d'exploitation (basses eaux) - recharge moyenne sur 30 ans- configuration J - version 3	64
Figure 51 : Impacts du projet de champ captant sur la nappe du Langhien-Serravallien - 10 millions de m ³ /an après 10 ans d'exploitation (basses eaux) - recharge moyenne sur 30 ans - configuration J - version 3	64
Figure 52 : Impacts saisonniers du projet de champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire -10 millions de m ³ /an- recharge moyenne sur 30 ans- configuration J – version 3	65
Figure 53 : Impact sur le réseau hydrographique	66
Figure 54 : Ecarts min, moy et max pour 8 points de contrôle entre simulations avec et sans champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire - 10 millions de m ³ /an - configuration J - version 3	67
Figure 55 : Impact pour une année de sécheresse (septembre 1989)	68
Figure 56 : Impact pour une année de sécheresse (septembre 2003)	68

Figure 57 : Variation cumulée du stock pour le scénario d'exploitation (avec champ captant) pour l'aquifère de l'Oligocène et les réservoirs sus-jacents - champ captant 10 millions de m ³ /an - configuration J - version 3	70
Figure 58 : Ecarts min, moy et max pour 24 points de contrôle entre simulations avec et sans champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire - 10 millions de m ³ /an - configuration J - recharge calculée à partir du RCP 2.6 - version 2.2	72
Figure 59 : Ecarts min, moy et max pour 24 points de contrôles entre simulation avec et sans champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire - 10 millions de m ³ /an - configuration J - recharge calculée à partir du RCP 8.5 - version 2.2	73

Liste des annexes

Annexe 1 Coupes géologiques des forages du Temple.....	81
Annexe 2 Coupes dans la géométrie du modèle géologique numérique (GDM).....	87
Annexe 3 Carte des épaisseurs des formations modélisées	105
Annexe 4 Synthèse des essais de pompages	115
Annexe 5 Chroniques de calage	135

1. Introduction

Dans le cadre de son approvisionnement en eau potable, Bordeaux Métropole doit répondre aux enjeux suivants :

- la préservation de la ressource et notamment de la nappe de l'Éocène en zone centre,
- l'augmentation programmée de sa population,
- la pollution récente de certaines de ses ressources.

C'est dans ce contexte, et pour répondre aux objectifs d'atteinte du bon état quantitatif des nappes profondes, que le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) Nappes profondes de Gironde a étudié les possibilités de mise en œuvre de nouvelles ressources et a évalué leur impact potentiel sur les aquifères nord-aquitains.

Le SMEGREG (Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde) a ainsi lancé des investigations visant à apprécier les potentialités du réservoir oligocène dans le Médoc. Cet aquifère apparaît comme une solution de substitution intéressante à l'exploitation importante de l'aquifère de l'Éocène et ce pour plusieurs raisons :

- son eau est de bonne qualité ; elle est souvent protégée des infiltrations depuis la surface,
- son potentiel aquifère est équivalent à celui de l'Éocène.

Ainsi, plusieurs forages de reconnaissance et d'exploitation relatifs aux aquifères captifs ont été réalisés dans le Médoc [(Larroque, 2004); (Nadaud, et al., 2006)]. Ces investigations ont permis de recueillir des informations géologiques nouvelles sur ce secteur jusqu'à présent peu renseigné et d'envisager la création d'un champ captant de grande ampleur dans l'Oligocène sur les communes de Sainte-Hélène (33) et de Saumos (33).

Une pré-évaluation de l'impact de l'exploitation du futur champ captant sur la nappe de l'Oligocène et les réservoirs encadrants avait été réalisée à l'aide du modèle régional MONA [(Pédrone et al., 2009) ; (Saltel, 2012); (Cabaret et al., 2012)]. Les résultats avaient mis en évidence que l'abaissement piézométrique simulé pour la nappe de l'Oligocène était acceptable avec les différentes méthodes prises en compte. Les simulations montraient également un impact sur la nappe du Plio-Quaternaire. Cependant, étant donné que le MONA a été conçu dans sa version 3.3 comme un outil régional d'aide à la gestion des nappes captives du Bassin aquitain, les résultats afférents à la couche du Plio-Quaternaire devaient être pris avec toute la réserve nécessaire dans la mesure où le degré de restitution du comportement de cette nappe, lié à des contraintes techniques, restait moindre que celui des autres nappes. En effet, dans cette version du modèle, les relations d'échanges nappes-rivières ne sont pas pris en compte et la résolution du modèle (maillage 2x2 km) n'est pas adaptée pour évaluer finement l'impact sur l'évolution du débit des sources. Le niveau de représentation du modèle ne permet pas de vérifier l'impact éventuel de l'exploitation du champ captant sur les étangs de Lacanau et d'Hourtin même si les faibles rabattements calculés par le modèle dans le Plio-Quaternaire au droit de ces zones laissent supposer un impact très limité.

Ces conclusions ont abouti à la mise en œuvre d'un modèle spécifique pour affiner l'évaluation des impacts que pourraient engendrer la mise en place du champ captant. Le modèle PHONEME a donc été conçu pour orienter les choix de réalisation (emplacement optimum des forages, mise à jour de la géométrie du système multicouche) et piloter à terme l'exploitation du champ si celui-ci était mis en œuvre.

Ce rapport fait suite au rapport intermédiaire décrivant la construction du modèle géologique et du modèle hydrodynamique élaboré spécifiquement pour évaluer l'impact du projet de champ captant des Landes du Médoc (Saltel, et al., 2015). Il détaille les améliorations réalisées dans le modèle géologique et le modèle hydrodynamique suites aux différentes investigations de terrain (réalisation de nouveaux forages, pompages d'essais, ...). Il décrit également le travail réalisé pour évaluer l'impact du champ captant sur la nappe de l'Oligocène et les aquifères sus-jacents en particulier la nappe du Plio-Quaternaire.

2. Actualisation du modèle géologique

Pour les besoins de l'étude, un modèle géologique fin a été construit à la maille de 100 m sur l'extension du domaine d'intérêt (Saltet, et al., 2015). Le modèle géologique a été réalisé en utilisant le logiciel GDM (Geological Data Management) et son composant Multilayer, développés par le BRGM. Ces outils permettent d'interpoler à partir de données connues de toits et de murs des formations considérées afin de créer des grilles spatialisées (modèle numérique des toits et des murs des couches) et de combiner ces surfaces créées en contrôlant la cohérence par rapport aux données d'entrée.

L'ensemble des informations relatives à la construction du modèle géologique figurent dans le rapport BRGM/RP-65368-FR. Seules les investigations et données nouvelles acquises depuis, ayant permis d'affiner la connaissance géologique du secteur et donc le modèle, sont décrites dans le texte qui suit.

2.1. APPOINT DES FORAGES DU TEMPLE

Afin d'apporter de l'information supplémentaire, notamment pour mieux comprendre la disposition des formations géologiques sur le secteur, 4 forages ont été réalisés sur la commune du Temple sur les parcelles 1319 et 1327 de la section OA du cadastre situées le long de la D107 reliant le bourg du Temple au Porge. Les terrains retenus pour cette opération appartiennent au Conseil Départemental de la Gironde.

Les travaux (forages, diagraphie, équipement et pompage) ont eu lieu d'avril 2017 à octobre 2017 sous la maîtrise d'œuvre du bureau d'étude Antea assisté de EURL Marsac-Bernède (Jobard, 2017).

- Le forage BSS003YBTE/X a atteint une profondeur de 38,8 m. Il capte la nappe du Plio-Quaternaire.
- Le forage BSS003YBSS/X a atteint une profondeur de 107 m. Il capte les grès carbonatés du Langhien-Serravallien entre 56 et 102,5 m/sol.
- Le forage BSS003YBSK/X a atteint une profondeur de 137 m. Il capte les grès carbonatés marneux de l'Aquitainien entre 116 et 137 m/sol.
- Le forage BSS003YBRQ/X a atteint une profondeur de 286 m. Il capte les calcaires bioclastiques de l'Oligocène entre 164 et 273 m/sol.

Le forage au Plio-Quaternaire a été réalisé en premier, pour permettre l'alimentation en eau du chantier. Le forage oligocène, le plus profond a été réalisé en suivant, servant ainsi de forage de reconnaissance. Il a fait l'objet d'un suivi géologique fin avec prélèvement tous les mètres. Un total de 5 échantillons a été prélevé et envoyé pour analyse à la société Eradata afin de définir précisément le calage bio-stratigraphique des formations reconnues en forage. Ces analyses associées aux diagraphies de chantier (gamma ray, résistivité, PS, diamètre, verticalité) ont permis de dresser la coupe géologique du forage et d'orienter plus précisément les travaux pour les deux forages suivants, au Langhien-Serravallien puis à l'Aquitainien qui ont également fait l'objet d'un suivi géologique détaillé. Les coupes géologiques de chaque forage sont disponibles en annexe 1.

Sur l'ensemble des forages ont été réalisées les diagraphies de réception d'usage : conductivité (statique et dynamique), température (statique et dynamique), diagraphie de flux, contrôle de cimentation. Il ressort des diagraphies de flux les éléments suivants :

• **Forage au Plio-quaternaire (BSS003YBTE/X) :**

- Répartition homogène des arrivées d'eau sur toute la hauteur crépinée, ce qui est cohérent avec la nature sableuse et homogène du réservoir.
- Les mesures de conductivité et température sont relativement stables ce qui confirme l'homogénéité des arrivées d'eau.

• **Forage au Langhien-Serravallien (BSS003YBSS/X) :**

- 97% du débit est produit entre 56 et 68 m de profondeur par les niveaux sableux. Les niveaux argileux, sableux et de grès carbonatés sous-jacents sont peu ou pas producteurs.
- Les mesures de conductivité mettent en évidence une plus forte minéralisation des niveaux peu producteurs.
- Les niveaux producteurs présentent une température et une conductivité plus élevées que sur le forage au Plio-quaternaire. Cela confirme le rôle d'éponge joué par les niveaux de sables argileux entre 50 et 57 m de profondeur.

• **Forage à l'Aquitainien (BSS003YBSK/X) :**

- Seuls les niveaux de grès grossiers carbonatés sont faiblement producteurs.
- Ces venues d'eau individualisées de la nappe du Serravallien présentent une conductivité corrigée autour de 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une température légèrement supérieure à 15°C.

• **Forage de l'Oligocène (BSS003YBRQ/X) :**

- Les arrivées d'eau sont réparties entre 180 et 250 m de profondeur dans les calcaires bioclastiques de l'Oligocène.
- La conductivité en pompage se situe autour de 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et la température est supérieure à 18°C.

L'ensemble de ces éléments ont permis d'identifier les horizons aquifères et les épontes (Figure 1) selon la "pile stratigraphique" de référence du modèle géologique qui spécifie la logique de dépôt et la présence ou non de surfaces d'érosion (Saltel, et al., 2015).

Toit	Mur	Code	Description
0	50	QUAT	Formations du Quaternaires
50	57	EPLS	Éponge au sommet du Langhien-Serravallien
57	67	LASE	Aquifère du Langhien-Serravallien
67	116	EPAQ	Éponge au sommet de l'Aquitainien
116	127	AQUI	Aquifère de l'Aquitainien
127	160	EPCM	Éponge Chattien-Miocène
160	248	OLNP	Aquifère de l'Oligocène
248	286	EPOL	Éponge à la base de l'Oligocène

Figure 1 : Profondeur des horizons codés pour le forage oligocène du Temple (BSS003YBRQ/X)

La coupe géologique du forage du Temple le plus profond (Oligocène) est présenté en figure 2. Cette coupe illustre l'équipement de l'ouvrage, l'âge des formations, leur lithologie, la délimitation des formations aquifère (AQUI) et des épontes (EPON) ainsi que les diaglyphies (gamma ray et résistivité). A noter que les calcaires fin blancs à niveaux plus ou moins marneux, appartenant stratigraphiquement à l'Aquitainien ont été rattachés au réservoir de l'Oligocène.

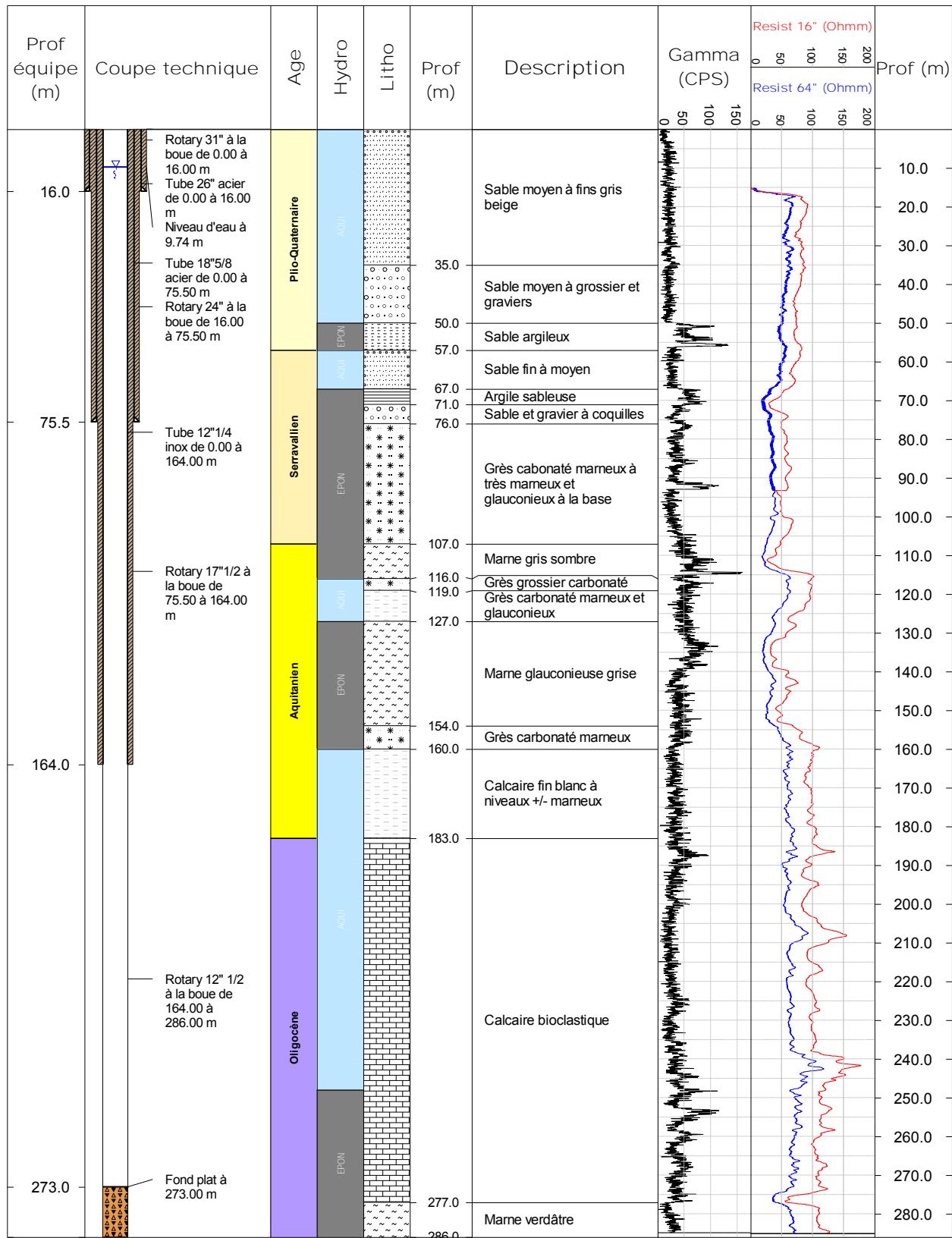


Figure 2 : Coupes géologique et technique du forage oligocène du Temple (BSS003YBRQ/X)

2.2. CORRELATIONS AVEC LES FORAGES ALENTOURS ET MISE A JOUR DU MODELE GEOLOGIQUE

Seul le forage le plus profond (BSS003YBRQ/X), captant l'Oligocène, a été intégré dans la base forage du modèle géologique portant le total de forages présentant une description géologique sur la zone d'étude (en rouge sur les cartes présentées en figure 4 et figure 5). Les informations apportées par les autres forages étant redondantes.

Le forage du Temple a servi de référence pour réinterpréter localement la géométrie des réservoirs. C'est en effet le forage le plus récent de la zone ayant bénéficié d'un nombre conséquent d'analyses (description géologiques, datation micropaléontologique) et mesures physiques (gamma ray, résistivités, ...). Sur la zone d'extension du maillage gigogne, 22 forages présentent des données diagraphiques. Les corrélations de ces différentes mesures (Gamma ray, résistivités, log de production, ...) réalisées sur un ensemble de forages donnent des informations précieuses sur la géométrie et les propriétés des corps aquifères. En s'appuyant sur des mesures physiques, cette approche, utilisée récemment dans des travaux de recherche (Cabaret, 2011), permet d'avoir une vision intégrée des systèmes étudiés et d'aboutir à une définition des réservoirs la plus cohérente possible.

Ainsi, des corrélations ont été réalisées à partir du forage du Temple selon un axe nord-sud (Figure 4) et un axe ouest-est (Figure 5) qui ont permis d'ajuster à la marge la géométrie du modèle. En effet, les informations apportées par ce nouveau forage ont permis de préciser la géologie du secteur bien qu'il y ait eu globalement peu d'écart avec la coupe prévisionnelle basée sur la géométrie PHONEME V2.1 (Saltet, et al., 2015). Les épaisseurs des aquifères ayant été réduites du fait de l'interprétation des diagraphies de flux réalisées dans chaque ouvrage.

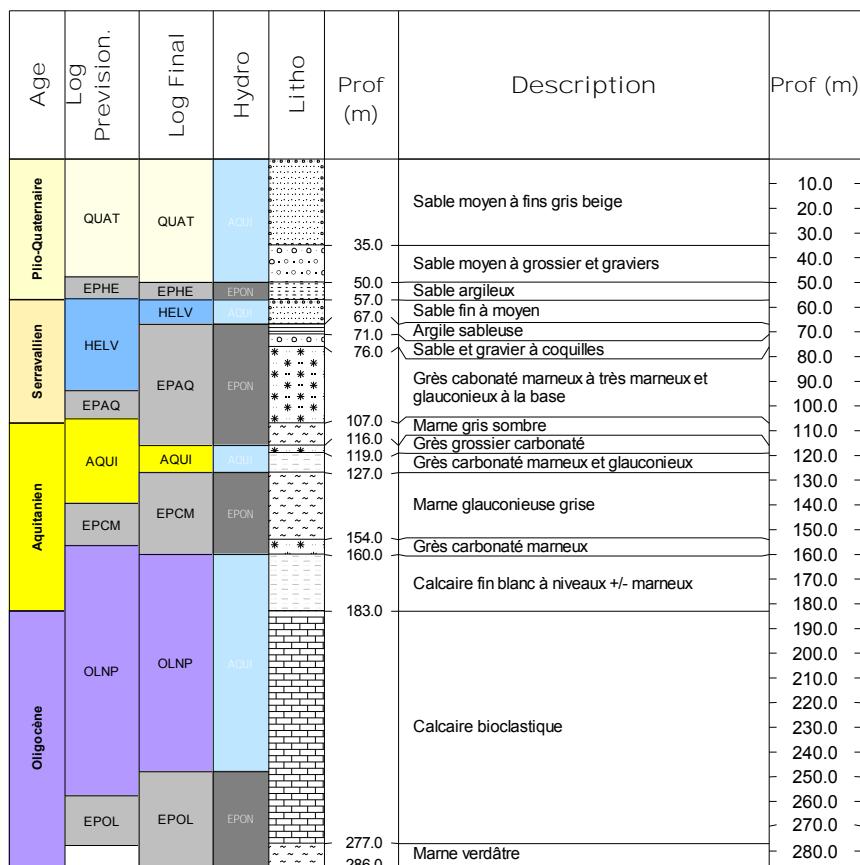


Figure 3 : Comparaison entre log prévisionnel et log final

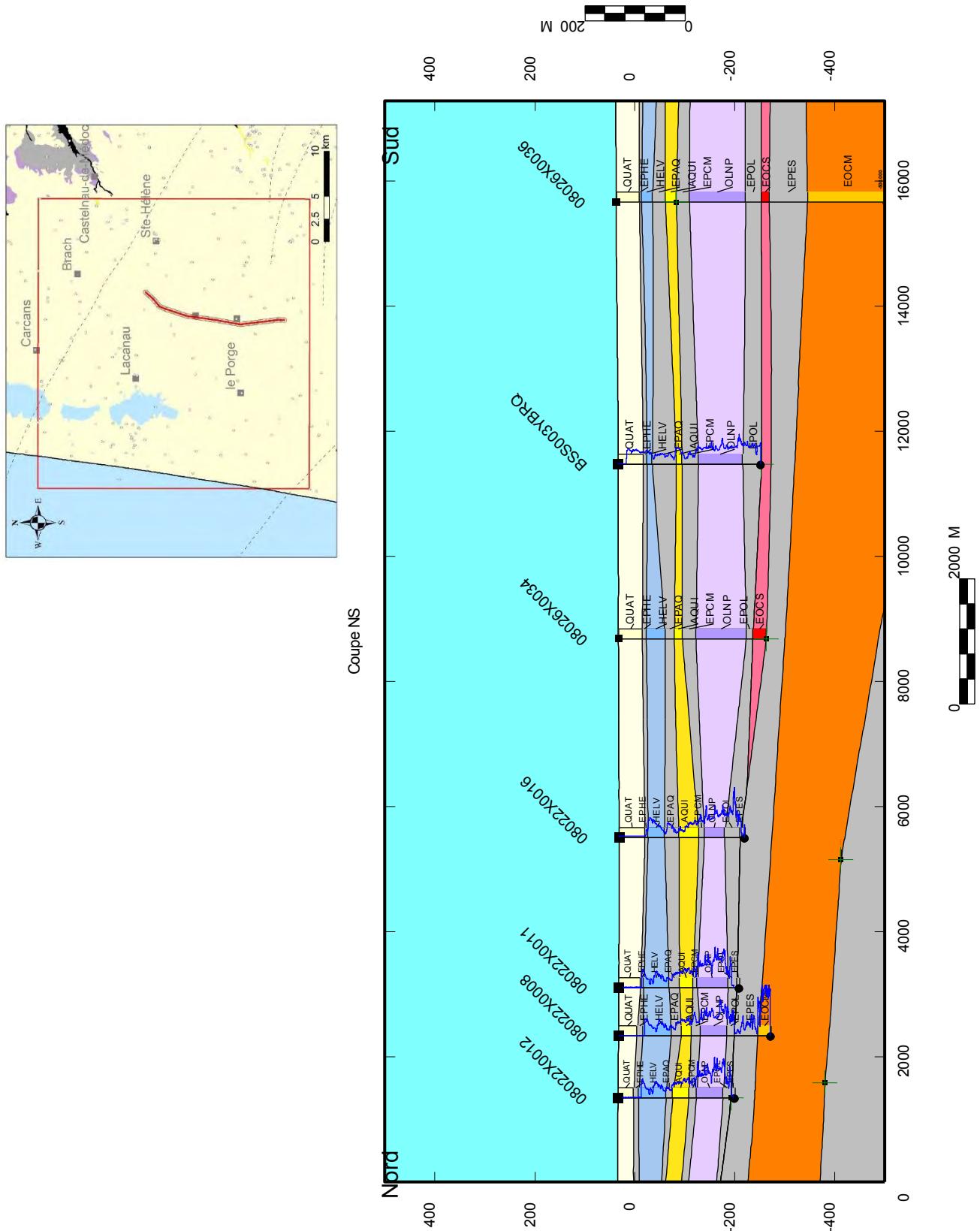


Figure 4 : Coupe Nord-Sud passant par le forage oligocène du Temple (BSS003YBRQ/X)



Figure 5 : Coupe Ouest-Est

Le travail de corrélation et de modélisation géologique a été réalisé à partir de l'expertise des géologues (JP. PLATEL et P. BOURBON) et de l'hydrogéologue (M. SALTEL), et à l'aide de visualisations en plan et en coupe sur lesquelles sont reportés les éléments connus : logs des forages, épaisseurs et cote des formations, coupes interpolées.

La visualisation 3D du modèle géologique complète l'analyse de cohérence. Elle permet d'avoir une vision globale et de déceler des singularités qui pourraient s'avérer incohérentes. L'ensemble du modèle a fait l'objet d'un contrôle par l'intermédiaire d'une série de coupes réalisées dans le modèle. L'ensemble des coupes est présenté en annexe 2. Les cartes d'épaisseurs des différents réservoirs sont fournies en annexe 3.

La géométrie actualisée a ensuite été intégrée pour mettre à jour le modèle hydrodynamique au droit du gigogne correspondant à la zone d'influence potentielle du projet.

3. Actualisation du modèle hydrodynamique

Le modèle construit utilise le code de calcul **MARTHE** (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) développé par le BRGM (actuellement version 7.5) via l'interface **WinMarthe** version 4.7 ([Thiéry, 2015a] ; [Thiéry, 2015b]). Le schéma de résolution utilise les différences finies avec un maillage parallélépipédique (ou rectangulaire) irrégulier.

Cette schématisation en volumes finis fait intervenir des mailles organisées en couches empilées, chaque couche étant formée de mailles organisées en lignes et colonnes (comme dans un tableau). La gestion des couches permet de modéliser des systèmes géologiques complexes (Figure 6).

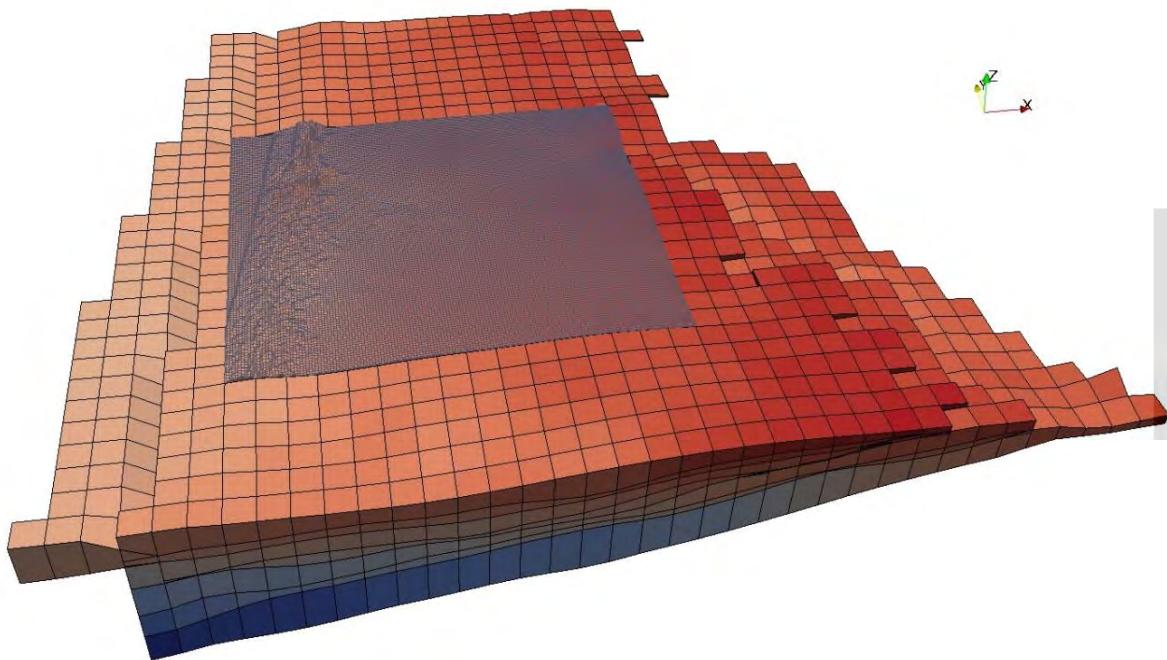


Figure 6 : Géométrie du modèle

WinMarthe est une interface graphique utilisant les conventions classiques de Windows® qui permet de préparer efficacement les données du modèle et de lancer le calcul avec le code MARTHE. Ce n'est pas, comme son nom pourrait le laisser entendre, une version Windows du moteur MARTHE. C'est un pré-processeur, puisqu'il peut être utilisé pour préparer, mettre en forme et contrôler les données numériques avant calculs.

C'est également un post-processeur puisqu'il peut être utilisé, après la réalisation d'une simulation, pour visualiser les résultats obtenus sous forme de plages colorées, en plan ou en coupes verticales, ou sous forme d'isovaleurs. Il permet également l'exportation des résultats de calculs, sous formes compatibles avec des logiciels externes de visualisation.

3.1. PARAMETRES DU MODELE

3.1.1. Paramètres spatio-temporels

Discrétisation temporelle

En régime transitoire, le temps est découpé en un ensemble de périodes. D'un pas de temps au suivant, les paramètres « d'entrée » (recharge, prélèvements, valeurs des charges hydrauliques imposés, ...) peuvent varier ou non. En fonction de chacune de ces variables, le modèle calcule pour chaque période les variables de sorties du modèle (niveaux de nappes, débit des cours d'eau, ...).

Le calage du modèle a été ajusté par rapport à la version 2.1 (Saltel, et al., 2015) en régime transitoire sur une période de 12 ans, de 2001 à 2012 (période la plus complète en termes de données sur la nappe du Plio-Quaternaire). Le calcul de la recharge est réalisé à partir d'un bilan hydroclimatique effectué directement dans MARTHE au pas de temps journalier en utilisant le schéma de surface GARDENIA¹ [(Thiéry, 2014) ; (Thiéry, 2015c)]. Compte tenu de l'inertie de la nappe, le calcul hydrodynamique, c'est-à-dire le calcul des charges hydrauliques et des débits dans les nappes, se fait quant à lui au pas de temps mensuel en fin de chaque mois.

Calcul de la recharge

L'utilisation du module GARDENIA nécessite l'intégration dans le modèle :

- de zones de données météorologiques (pluies et ETP) correspondant ici au maillage SAFRAN ;
- de zones de sol sur lesquelles sont définis la Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (RDE) pour les premiers mètres du sol (équivalent approximativement à une réserve utile RU) et des paramètres qui permettent la répartition entre écoulement rapide (ruissellement) et écoulement lent (percolation vers la nappe) :
 - ✓ Temps de demi-PERColation (TPERC),
 - ✓ Niveau d'équilibre-RUissellement-Percolation (NRUIP).

Le module GARDENIA se base sur le principe des modèles réservoirs (Figure 7) :

- Un premier réservoir U (capacité de rétention du sol) modélise la partie supérieure du sol, sa hauteur maximale est fixée par la RDE. Il se vide ou se remplit suivant la pluie et l'ETP. L'alimentation du réservoir H sous-jacent est possible lorsque la capacité de rétention du sol est atteinte.
- Le second réservoir H modélise la zone non saturée au-dessus du niveau de nappe. Il est alimenté par le réservoir U et est vidangé simultanément par percolation dans la nappe sous-jacente suivant une loi exponentielle de constante de temps TPERC (ALIM aquifère = $H.dt/TPERC$) et par écoulement superficiel. La répartition entre ces deux composantes est contrôlée par le paramètre NRUIP.

L'infiltration dépend donc de trois paramètres RDE, TPERC et NRUIP.

¹ Développé par le BRGM, le logiciel GARDÉNIA sert à la modélisation hydrologique globale d'un bassin versant par bilan Pluie - Débit de rivière - Niveau de nappe.

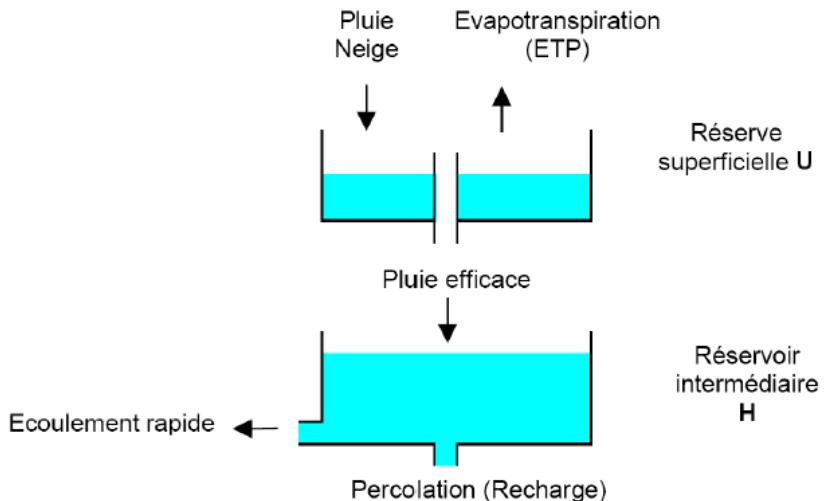


Figure 7 : Schéma de fonctionnement de la recharge [(Thiéry, 2014) ; (Thiéry, 2015c)]

Les données de précipitation et d'évapotranspiration journalières utilisées sont issues des « ré-analyses SAFRAN » (résolution de 8 kilomètres soit 67 mailles sur l'extension du modèle) et ont été fournies par Météo-France (Figure 8). L'utilisation de ce type de données permet en particulier d'avoir une meilleure spatialisation des pluies et de l'évapotranspiration en comparaison de l'utilisation des données ponctuelles provenant des stations météo.

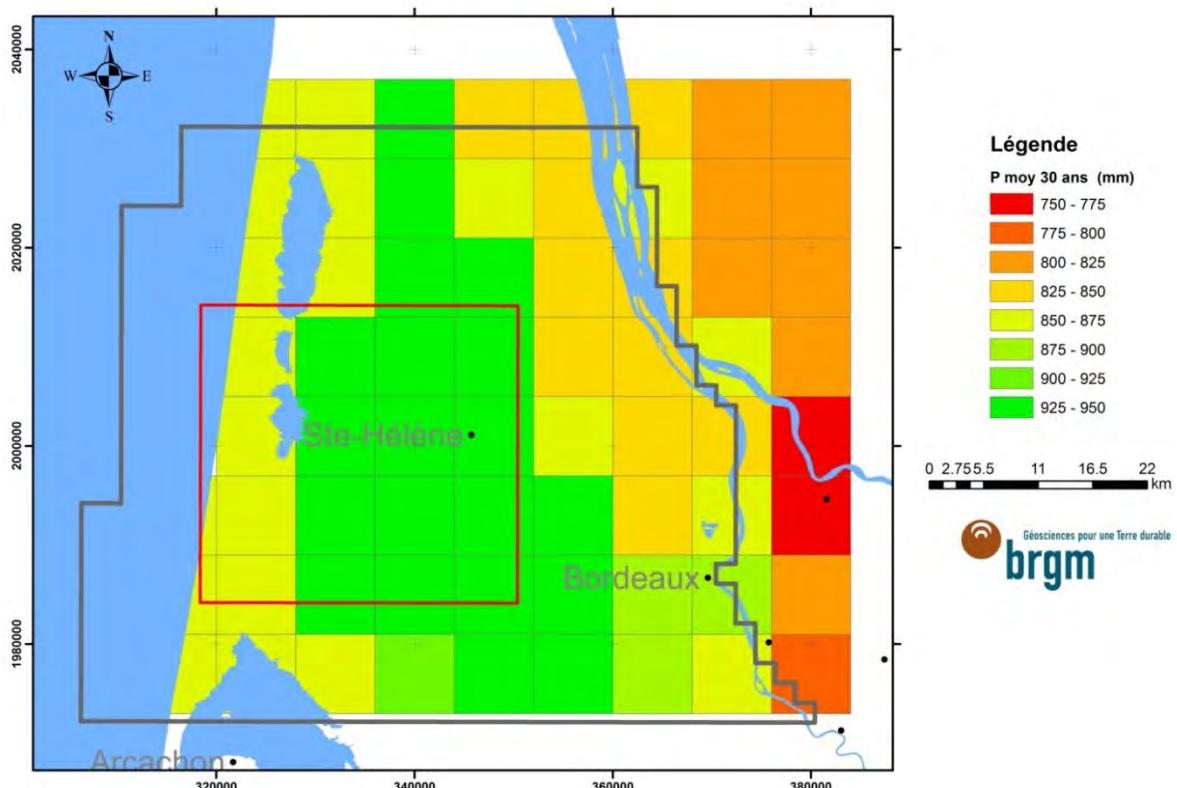


Figure 8 : Mailles SAFRAN utilisées comme zones météo dans le modèle PHONEME

La délimitation des zones de RDE a été effectuée en se basant sur la carte pédologique réalisée par l'INRA au 250 000^{ème} (Figure 9).

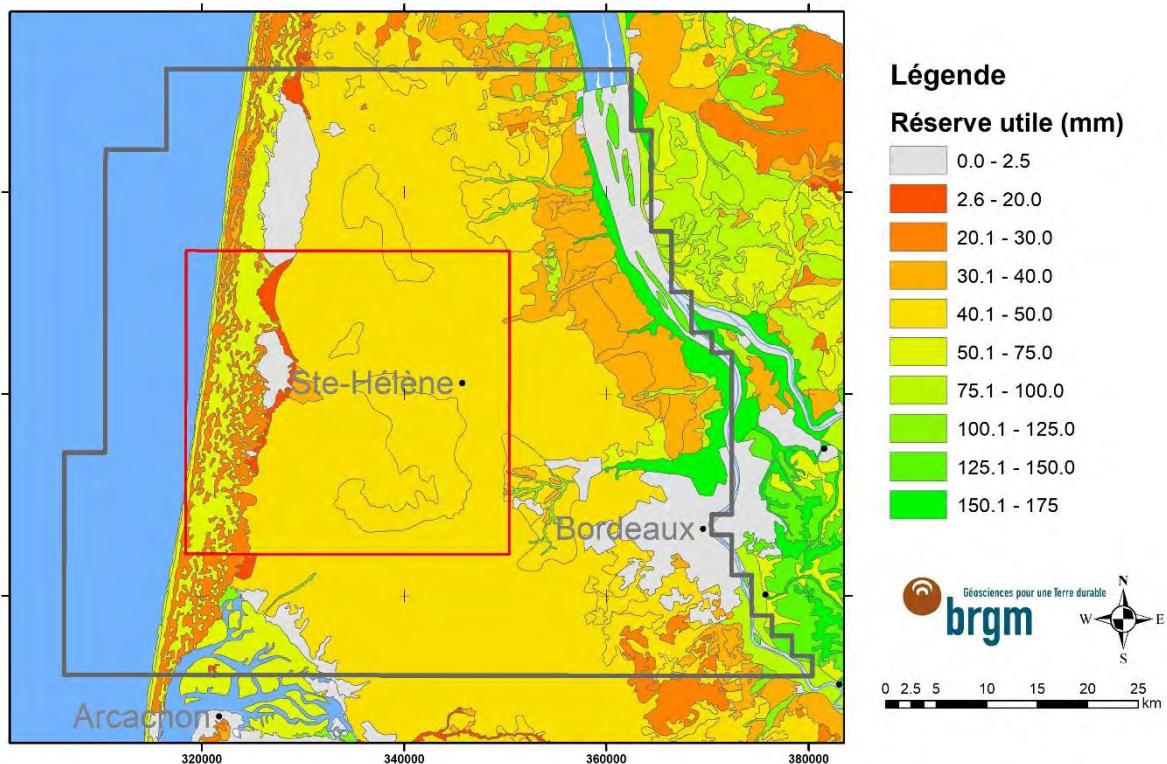


Figure 9 : Réserve utile (en mm) des sols calculée à partir de la carte pédologique au 250 000^{ème} de l'INRA (Richer de Forges et al., 2015)

Les valeurs de la RDE n'étant pas directement fournies dans les tables attributaires de la carte pédologique, celles-ci ont dû être calculées à partir des éléments fournis comme le type d'horizon, la texture et l'épaisseur de sol (Bruand, et al., 2004).

Les valeurs de Réserve Disponible pour l'Évapotranspiration (RDE) estimées ont été intégrées au modèle pour calculer la recharge dans Marthe via le module Gardenia. Ces valeurs ont servi de guide et ont été ensuite été ajustées à la marge lors du calage. Les autres paramètres utilisés pour calculer la recharge (niveau d'équilibre-ruissellement-percolation efficace et le temps de demi-percolation) ont fait l'objet d'un calage par la modélisation Gardénia du bassin de la Garoueyre. Ces paramètres sont affectés d'une certaine incertitude car il est difficile de les extrapoler sur une grande zone géographique.

Prélèvements

La collecte, l'affectation et la validation hydrogéologique des prélèvements effectués dans les forages de Gironde sont réalisées dans le cadre du programme de « suivi des nappes d'eaux souterraines en Gironde » cofinancé par le Département (avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour Garonne) et le BRGM. La répartition des prélèvements par trimestre permet un ajustement en fonction des usages (alimentation en eau potable, eau industrielle, irrigation). Cette répartition est basée sur les travaux du SMEGREG (SMEGREG, 2013). Le principe est d'utiliser un profil historiquement constaté par zone géographique afin de ventiler au pas de temps mensuel des volumes prélevés comptabilisés au pas de temps annuel. L'objectif est une utilisation des mêmes clés de répartition lors de la mise à jour annuelle des modèles.

Une ventilation par usage a été utilisée dont les principes de base sont les suivants :

- usage agricole : volumes prélevés sur la saison d'irrigation uniquement (profil « Agricole »), la répartition mensuelle des prélèvements est fixe d'une année sur l'autre, elle a été établie à dire d'expert avec l'appui du GRCETA (Groupement de Recherche sur les Cultures et Techniques Agricoles des Sols Forestiers d'Aquitaine) ;
- usage AEP : différentes zones géographiques sont définies, avec des profils annuels spécifiques ;
- autres usages : considérés comme uniformément répartis sur l'année (profil « Autres usages »).

Les données sources utilisées pour l'AEP sont issues des diagnostics des réseaux d'eau potable réalisés par les collectivités sur la période 2003-2013 au titre du SAGE Nappes profondes de Gironde. Pour plus de détails se référer à la note rédigée par le SMEGREG (SMEGREG, 2013).

Conditions aux limites

Elles correspondent à toutes conditions hydrodynamiques, de flux ou de potentiels, permanentes ou variables, imposées aux limites ou à l'intérieur d'une couche du modèle. Elles sont matérialisées par des mailles à charge imposée, à flux nul, à cote de débordement (pour les sources en particulier et plus généralement pour toute zone où la nappe est susceptible d'émerger). La position et la nature des conditions imposées sont détaillées couche par couche dans les annexes du rapport BRGM/RP-65368-FR (Saltel, et al., 2015).

- **Charges hydrauliques imposées**

Des charges ont été imposées aux limites ouest de manière à retranscrire les niveaux de l'océan Atlantique et leur influence sur les couches aquifères (Plio-Quaternaire, Langhien-Serravallien, l'Aquitanién, Oligocène, Éocène supérieur moyen et inférieur).

Par ailleurs, la Garonne est également représentée par des potentiels imposés à la nappe de l'Oligocène entre Beautiran et Bordeaux. Les niveaux des nappes de l'Éocène (supérieur, moyen et inférieur) sont également imposés aux limites du modèle de manière à reproduire l'influence de l'exploitation de ces nappes au-delà de l'espace modélisé. Les valeurs sont issues du MOdèle Nord Aquitain (MONA), développé par le BRGM [(Braneyre, et al., 1993) ; (Braneyre, et al., 1993) ; (Braneyre, et al., 1994) ; (Amraoui, et al., 1998) ; (Amraoui, et al., 1999) ; (Seguin, 1999) ; (Seguin, 1999) ; (Seguin, 2002) ; (Pédron, et al., 2003) ; (Pédron, et al., 2005) ; (Pédron, et al., 2006) ; (Pédron, et al., 2006) ; (Pédron, et al., 2008) ; (Pédron, et al., 2008) ; (Gomez, et al., 2010) ; (Saltel, et al., 2011) ; (Saltel, et al., 2012) ; (Saltel, et al., 2014)]. Elles permettent de retranscrire l'évolution des charges hydrauliques aux bornes du système. Par, ailleurs la couche représentant le réservoir du Campanien est entièrement à charge imposée (issue du MONA). Elle a uniquement pour fonction de rendre compte de l'évolution des charges dans la nappe pour pouvoir retranscrire les échanges avec les nappes sus-jacentes.

- **Altitudes de débordement**

Pour tous les aquifères, les mailles situées au droit d'affleurements ont été considérées comme "débordantes". Il s'agit de secteurs où la nappe est libre et donc susceptible de déborder. Il y a débordement si la charge calculée par le modèle est supérieure à l'altitude de débordement (surface du sol). Les dimensions du maillage (au pas d'espace de 100 m) permettent ainsi une bonne restitution de la topographie et donc des grands axes de drainage.

- **Limite étanches**

Cette condition est appliquée à toutes les limites du domaine qui ne sont pas régies par les conditions de charge imposée. Ces limites correspondent :

1. soit à la disparition des aquifères par biseautage à proximité des zones d'affleurement ou à la faveur de lacunes au niveau de grandes structures anticliniales (ex : Blaye-Listrac),
2. soit à une limite fixée arbitrairement (cas de la limite sud et nord du modèle).

Réseau hydrographique

La restitution du réseau hydrographique a fait l'objet d'une attention particulière. En effet, les principaux cours d'eau du secteur d'étude ont été intégrés dans le modèle (Figure 10).

Le modèle hydrodynamique est couplé au réseau hydrographique principal. Ce dernier, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents (Figure 11). Un tronçon est décrit par sa géométrie (longueur, largeur, et altitude du fond de la rivière ou bathymétrie), par ses propriétés physiques (épaisseur et perméabilité du lit et des berges), par ses termes source (pompages ou injections) et par son état (cote absolue de l'eau dans la rivière) (Figure 12).

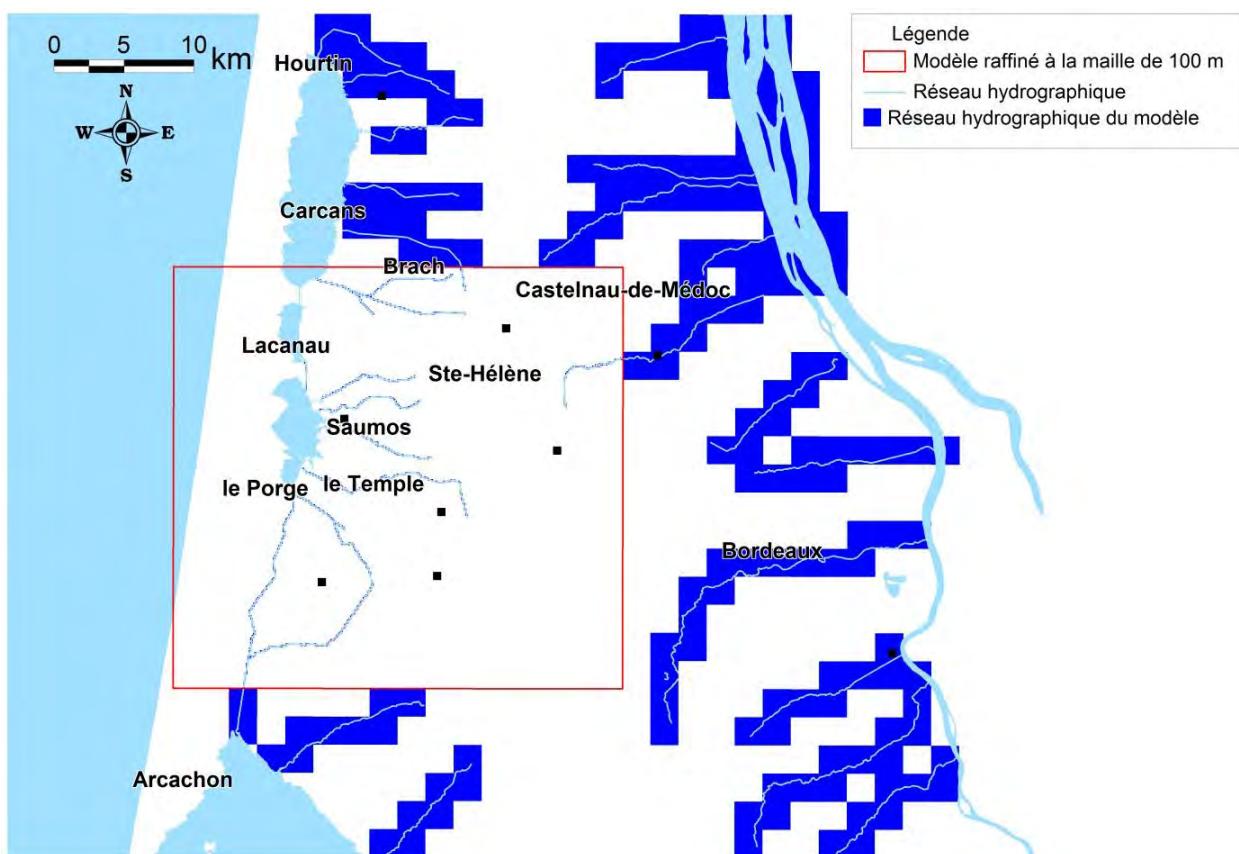


Figure 10 : Réseau hydrographique dans le modèle PHONEME

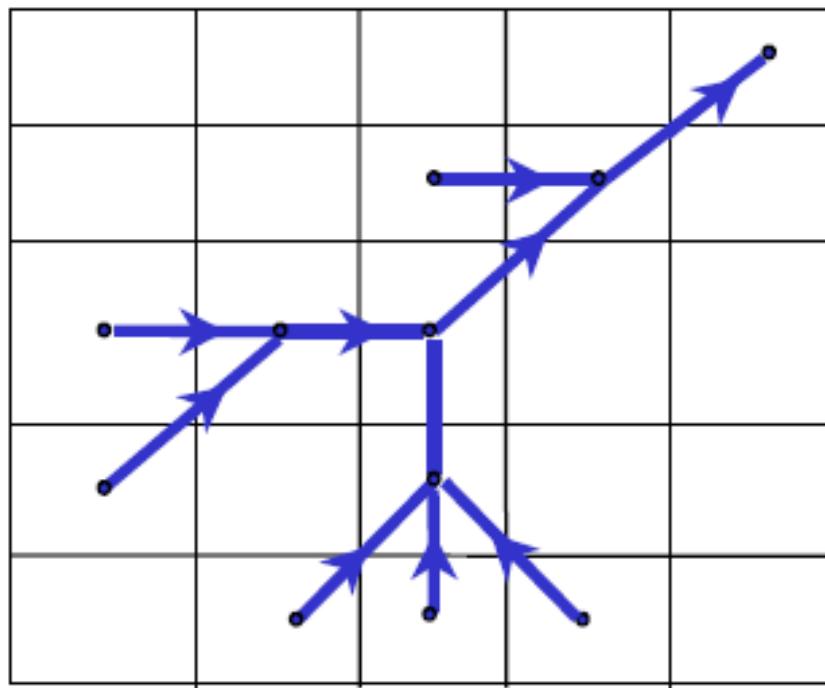


Figure 11 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (Thiéry, et al., 2001)

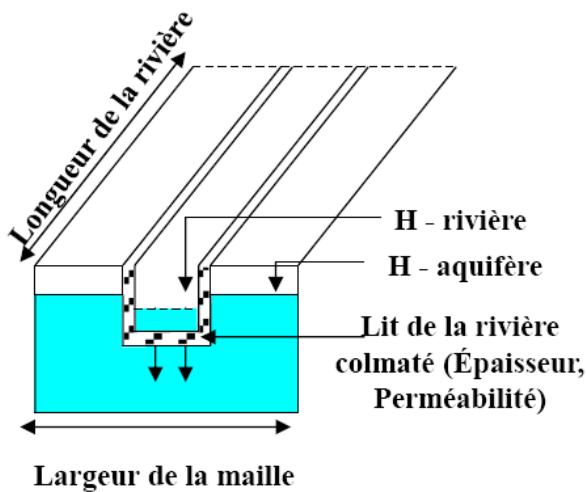


Figure 12 : Géométrie d'un tronçon de rivière (Thiéry, et al., 2015 c)

La définition des différents paramètres de la géométrie des tronçons a fait l'objet sur le secteur potentiellement impacté par le projet d'une reconnaissance de terrain (Saltel, et al., 2015). Par ailleurs, nous nous sommes basés, pour les autres cours d'eau sur les documents fournis par la fédération de pêche de la Gironde pour définir leurs largeurs et leurs profondeurs (FDAAPPMA33, 2010). Cette approche a été complétée par un traitement sur SIG à partir des tables fournies par le SIAELVEG (Syndicat Intercommunal d'Aménagement des Eaux du Bassin Versant des Étangs du Littoral Girondin) et de la BD Carthage pour calculer les longueurs des différents tronçons dans chacune des mailles concernées.

De plus, les bassins versants ont été délimités dans le modèle en définissant pour chaque maille de surface la direction aval pour le ruissellement. Cette approche permet d'orienter les flux de ruissellement et de débordement du modèle vers les exutoires en respectant la topographie des bassins versants.

A noter que l'épaisseur de colmatage du fond de la rivière a été considérée comme constante (1 m) et que les perméabilités ont fait l'objet d'un calage pour retranscrire au mieux les échanges nappes rivières à partir des données à notre disposition.

Bilan des débits dans un tronçon de rivière

Le débit dans un tronçon de rivière résulte de l'équilibre du bilan de tous les termes de débits : amont (Q_{AM}), aval (Q_{AV}), échanges avec l'aquifère (Q_{ECH}), ruissellement (Q_{RUIS}), termes sources (Q_{INJ}) et, lorsque le routage est pris en compte, terme de stockage (STO). L'équation d'écoulement s'écrit comme suit :

$$Q_{AV} = Q_{AM} + Q_{ECH} + Q_{RUIS} + Q_{INJ} - \frac{d_{STO}}{d_t}$$

où « d_t » est la durée du pas de temps. Dans le cas d'une section rectangulaire, le terme de stockage STO est le produit de la largeur du tronçon par la hauteur d'eau dans la rivière H_{RL} .

3.1.2. Paramètres hydrodynamiques

L'interprétation des pompages d'essai 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 pompages d'essai et de poser un diagnostic aussi fin que possible sur ceux-ci avant toute modélisation. 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 et 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 $1/2$, 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 $-1/2$, un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. La figure 13 présente comme exemple les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage 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.

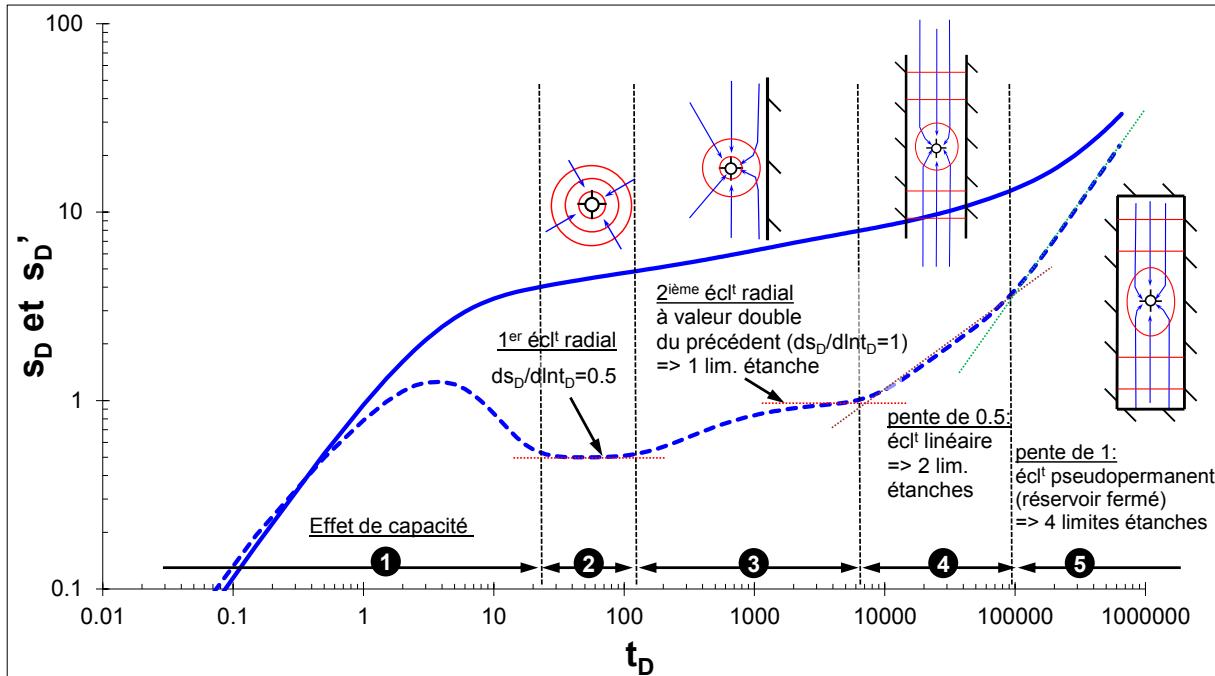


Figure 13 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos.

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 comme par exemple dus 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.

Dans le cadre de la modélisation maillée, l'analyse du champ de transmissivités permet en première approche d'identifier les zones plus ou moins productives des réservoirs. Les perméabilités recalculées à partir des épaisseurs captées permettent également de cerner le champ des perméabilités et ainsi de guider les affectations au moment de la phase de calage.

Cependant, une incertitude demeure sur la perméabilité des épontes qui reste un paramètre de calage et qui ne peut être approché facilement par des mesures in-situ.

L'inventaire des pompages d'essais réalisés sur la zone d'étude a permis de faire un état des données disponibles. Ainsi, les forages suivants avaient déjà fait l'objet d'évaluation des perméabilités.

Numéro BSS	Ancien code	Nappe	Commune	K (m/s)	Source
BSS001XTPU	08018X0019	Oligocène	Le Porge	3.80E-05	Hydro assistance, 2006
BSS001XTSA	08022X0009/SP2	Oligocène	Sainte-Hélène	4.50E-05	Larroque , 2004
BSS001XTSB	08022X0010/SP3	Aquitainien	Sainte-Hélène	2.10E-06	Larroque , 2004
BSS001XTSC	08022X0011/SF1	Oligocène	Sainte-Hélène	4.20E-05	Larroque , 2004
BSS001XTSD	08022X0012/SF2	Oligocène	Sainte-Hélène	4.90E-05	Larroque , 2004
BSS001XTSY	08022X0031	Oligocène	Sainte-Hélène	3.00E-05	Marsac,2014
BSS001XTUS	08023X0039/F3	Oligocène	Sainte-Hélène	1.01E-04	Mazurier, 1992
BSS001XTSH	08022X0016/SF3	Oligocène	Saumos	4.22E-05	Nadaud et Martin, 2006

Figure 14 : Données de perméabilités disponibles dans la littérature

Sur certains sites, les essais de pompage ont été réinterprétés quand les mesures d'origine étaient disponibles (08023X0039-Oligocène Sainte Hélène ; 08026X0034-Oligocène Saumos).

Par ailleurs, de nouveaux essais ont été réalisés sur certains sites lorsque les dispositifs le permettaient.

• Tests réalisés à Sainte-Hélène

Historiquement, le premier forage 08023X0001 (BSS001XTTC) réalisé sur la commune de Sainte-Hélène a été exécuté en 1950 pour la lutte contre les incendies. Il a servi également à l'alimentation en eau potable de la moitié de la population en complément du forage 08023X0036 (BSS001XTUP). Ces deux forages qui captent les formations du Miocène, n'étaient pas très productifs avec des débits spécifiques² faibles (0,36 à 0,43 m³/h/m).

Afin de diversifier et d'améliorer la qualité de l'approvisionnement en eau potable, le forage 08023X0039/F3 (BSS001XTUS) a été réalisé au début des années 90 pour capter le réservoir de l'Oligocène (Mazurier, 1992). Ce forage, beaucoup plus productif (débit spécifique de 17,4 m³/h/m) vient alors remplacer les deux forages existants.

Afin d'améliorer les connaissances des propriétés des réservoirs sur la zone, un pompage longue durée a été réalisé sur le forage 08023X0001 (BSS001XTTC) du 27 avril au 4 mai 2015. En parallèle, un suivi sur les nappes de l'Oligocène (forage AEP-08023X0039), du Plio-Quaternaire (puits particulier) et du Langhien-Serravallien (forage DFCI-08023X0001) a été réalisé du 13 mars au 4 mai 2015 (Figure 15). La commune étant approvisionnée par un seul ouvrage, il a été impossible de refaire un pompage sur le forage AEP (08023X0039). Une réinterprétation de l'essai effectué lors de la création de l'ouvrage en 1992 a été réalisée.

² Débit pompé dans un puits rapporté à la hauteur de rabattement dans le puits, dans des conditions définies



Figure 15 : Localisation des puits suivis lors de l'essai d'avril–mai 2015 sur la commune de Sainte-Hélène

De ces essais il ressort les éléments suivant :

- Le forage DFCI (08023X0001) est peu productif (16,23 m de rabattement pour un débit à 6,3 m³/h) ce qui se traduit par une transmissivité de $1,55 \cdot 10^{-4}$ m²/s soit une perméabilité de $1,07 \cdot 10^{-5}$ m/s. Au cours du pompage le forage se comporte comme un captage partiel et sollicite donc une épaisseur de réservoir plus importante que la zone captée.
- Le forage AEP captant la nappe de l'Oligocène est plus productif (6,3 m de rabattement pour un débit à 82 m³/h) ce qui se traduit par une par une transmissivité de $4,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s soit près de 30 fois plus transmissif que le forage DFCI. Un effet de drainance est visible en fin de pompage.
- On note une influence des pompages réalisés sur le forage oligocène de Sainte Hélène sur le forage DFCI mais aucun impact sur la nappe du Plio-Quaternaire lors du suivi.

Les tableaux des paramètres hydrodynamiques déduits des modèles ainsi que les modélisations des essais sont disponibles en annexe 4.

- **Pompages de Saumos**

La commune de Saumos a d'abord réalisé au sud du bourg un forage au Miocène (08026X0001) pour son alimentation en eau potable. Ce forage étant peu productif (débit spécifique de 0,16 m³/h/m), il a été remplacé au début des années 90 par le forage 08026X0034/F2 (BSS001XUGB) captant le réservoir de l'Oligocène. Ce forage, réalisé à quelques mètres du précédent, est caractérisé par un débit spécifique de 4,2 m³/h/m. Ce site présente donc l'intérêt de disposer sur la même parcelle de deux forages captant des réservoirs superposés. Il a donc été décidé de profiter du dispositif en place pour réaliser des essais en décembre 2016.

Pour compléter le dispositif, un piézomètre captant la nappe du Plio-Quaternaire a été réalisé pour effectuer un suivi des niveaux. La pompe en place et la colonne d'exhaure du forage de l'Aquitanien (08026X0001) ont été extraites. La pompe n'était plus fonctionnelle et présentait un état de corrosion avancé. Une pompe provisoire a été mise en place pour la réalisation des essais. Des capteurs de niveaux ont été installés pour assurer le suivi avant le début des essais (du 1er décembre au 5 décembre 2016). Le dispositif de suivi utilisé est schématisé en figure 16.

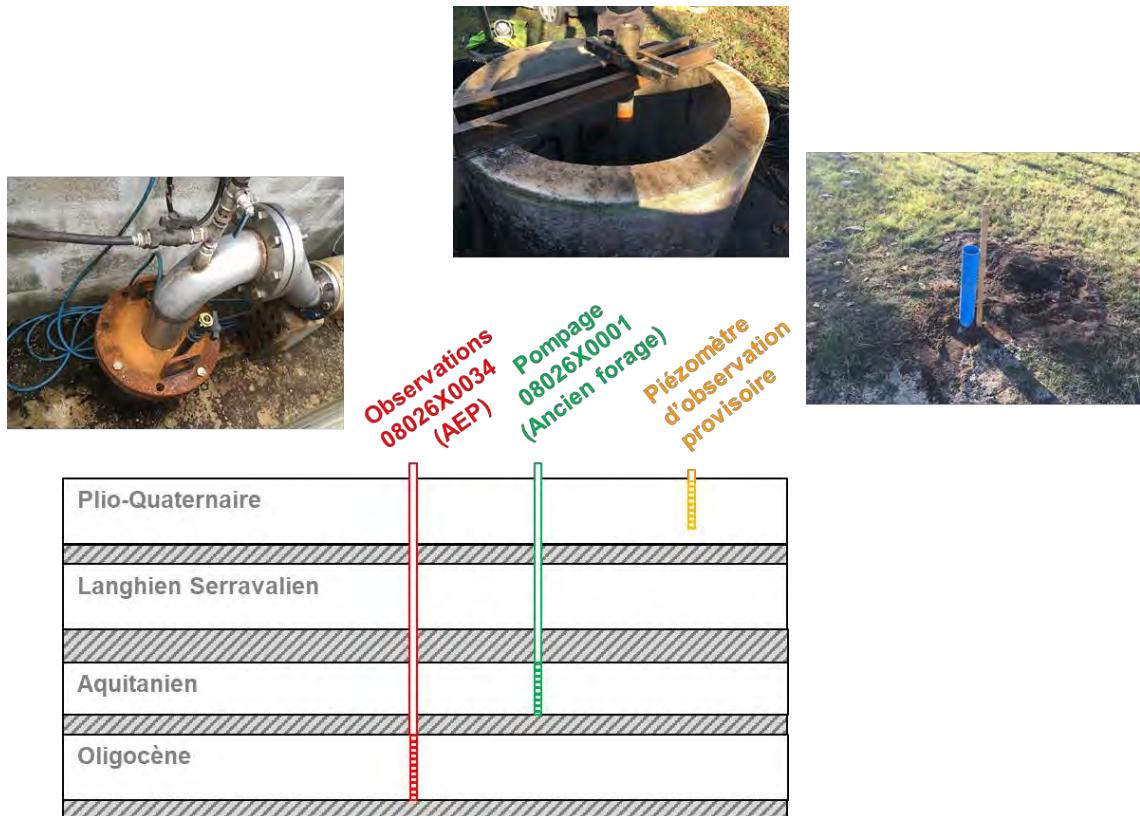


Figure 16 : Dispositif de suivi des essais réalisés sur le site de Saumos en décembre 2016

Le pompage sur la nappe de l'Oligocène avec suivi de la descente et de la remontée a été réalisé du 5 décembre au 10 décembre 2016. Un suivi a été effectué en parallèle sur la nappe de l'Aquitanien et la nappe du Plio-Quaternaire. Le pompage a été restreint dans le temps pour ne pas perturber la distribution d'eau potable sur les communes Saumos-Le Temple. La durée du test est cependant suffisamment longue pour acquérir les paramètres hydrodynamiques. En suivant, du 12 décembre au 14 décembre 2016, un second pompage sur la nappe de l'Aquitanien a eu lieu avec suivi de la descente et de la remontée. Les niveaux ont été mesurés en parallèle sur la nappe de l'Oligocène et la nappe du Plio-Quaternaire (Figure 17).

Les essais réalisés ont permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques pour les aquifères de l'Oligocène ($T = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) et de l'Aquitanien ($T = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$). L'aquifère de l'Oligocène est fracturé. Il est plus transmissif que celui de l'Aquitanien mais les forts rabattements observés sur l'Aquitanien ne sont pas uniquement liés à la capacité du réservoir mais à une mauvaise conception de l'ouvrage (équipement générant beaucoup de pertes de charges). Les différents tests ont permis d'identifier une influence lors du pompage dans le réservoir oligocène (23 m³/h) sur la nappe de l'Aquitanien de l'ordre de la dizaine de centimètres pour une durée de pompage de 4 jours. Aucune influence n'a été observée sur la nappe du Plio-Quaternaire durant les essais.

Les tableaux des paramètres hydrodynamiques déduits des modèles ainsi que les modélisations des essais sont disponibles en annexe 4.

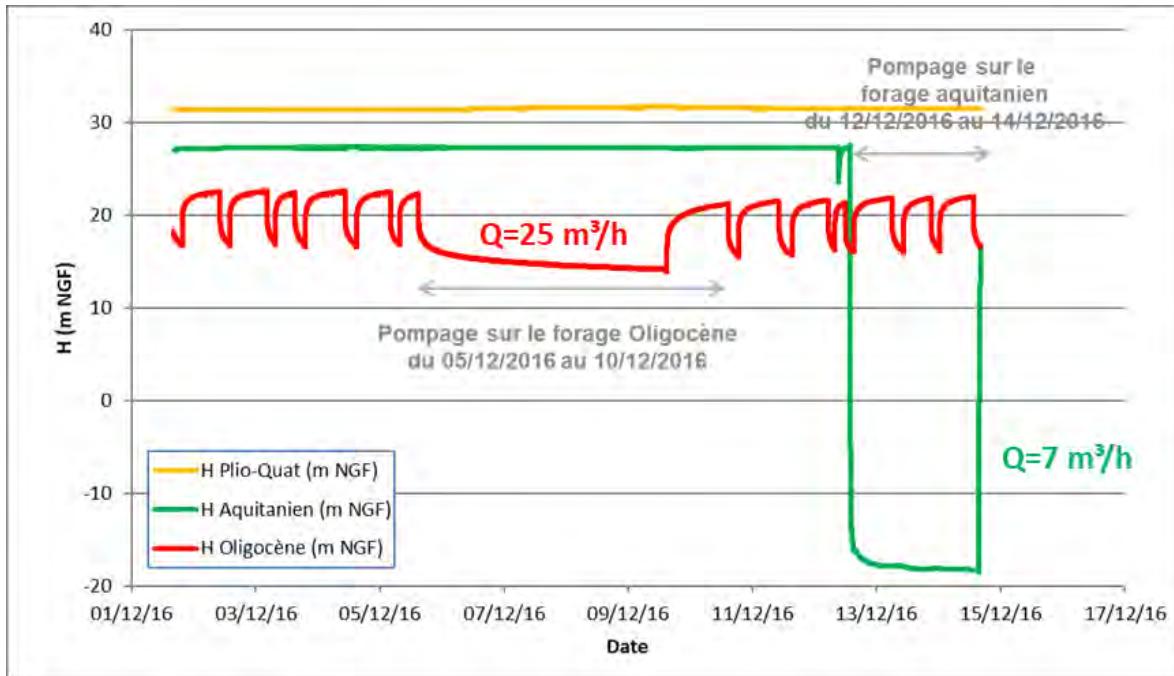


Figure 17 : Suivi des mesures (m NGF) réalisées sur le site du Saumos lors des essais de décembre 2016

- **Pompages du Temple**

Les 4 forages réalisés au Temple ont chacun fait l'objet d'un pompage longue durée. L'objectif était de caractériser pour chaque aquifère les propriétés des réservoirs et d'identifier les différents échanges entre les nappes. En effet, l'approche par pompages successifs permet de mieux appréhender le comportement de ce système aquifère multicouche. Le dispositif de suivi utilisé est rappelé en figure 18. Il s'inspire de celui mis en place lors des essais très longue durée effectués à Sainte-Hélène en 2003 (Nadaud, et al., 2006).

Le premier pompage (Figure 19) a été réalisé sur le forage oligocène à un débit de 200 m³/h pendant 11 jours (du 11/09/2017 au 22/09/2017) avec un rabattement maximum de 43,85 m. Sur cette période, aucun impact n'a été observé sur les nappes du Langhien-Serravallien et du Plio-Quaternaire, seul l'Aquitainien a été impacté (3,95 m).

Le deuxième pompage a été effectué sur le forage du Langhien-Serravallien à un débit de l'ordre de 75 m³/h pendant 3 jours (du 25/09/2017 au 28/09/2017) avec un rabattement maximum de 8,32 m. Un impact a été observé sur les niveaux de l'Aquitainien (1,65 m) et très légèrement au Plio-Quaternaire (27 cm).

Le troisième test a concerné la nappe Plio-Quaternaire avec un pompage à 50 m³/h pendant 3 jours (du 02/10/2017 au 05/10/2017) avec un rabattement maximum de 6 m. L'Oligocène et l'Aquitainien ne sont pas impactés et continuent leur remontée. Seul le Langhien-Serravallien a été légèrement influencé avec un rabattement de 13 cm.

Le dernier pompage a été réalisé sur le forage captant l'Aquitainien qui correspond au réservoir le moins productif. En effet, le forage n'a pu être pompé qu'à 6 m³/h pendant 3 jours (du 09/10/2017 au 12/10/2017) avec un rabattement maximum de 37,12 m. Seul le Langhien-Serravallien a été influencé par le pompage à l'Aquitainien avec un rabattement de 15 cm.

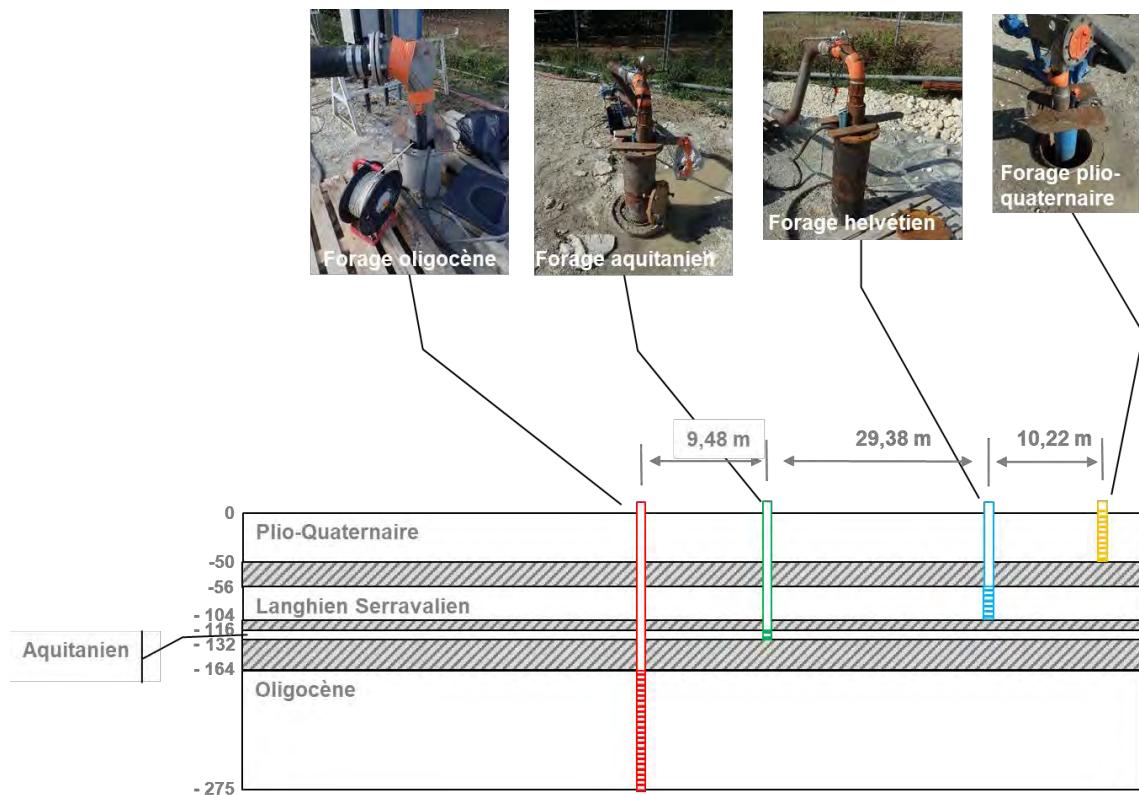


Figure 18 : Dispositif de suivi des essais réalisés sur le site du Temple de septembre à octobre 2017

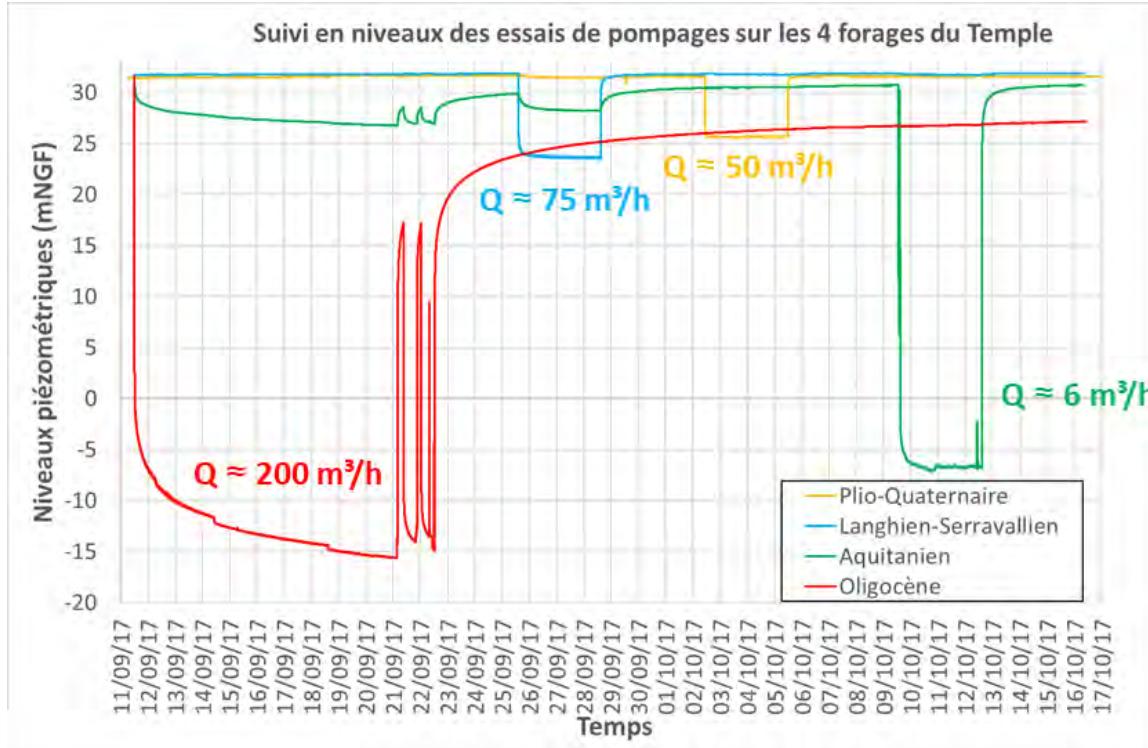


Figure 19 : Suivi des mesures (m NGF) réalisées sur le site du Temple, lors des pompages d'essai de septembre à octobre 2017

Les essais réalisés ont permis de déterminer une valeur de référence pour les paramètres hydrodynamiques pour chacun des aquifères :

Aquifère	Transmissivité en m ² /s	Perméabilité en m/s
Plio-Quaternaire	$4,5.10^{-3}$	$9,4.10^{-5}$
Langhien-Serravallien	$3,5.10^{-3}$	$3,5.10^{-4}$
Aquitaniens	$1,9.10^{-4}$	$1,36.10^{-5}$
Oligocène	$1,4.10^{-3}$	$1,6.10^{-5}$

Figure 20 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques issue des pompages d'essai du Temple

L'aquifère de l'Oligocène est le plus productif (réservoir fracturé) avec un débit d'exploitation de $200 \text{ m}^3/\text{h}$. La nappe de l'Aquitaniens présente des propriétés médiocres comme c'était le cas à Saumos. Ces essais montrent qu'il y a bien une distinction des deux réservoirs miocènes qui présentent des niveaux à l'équilibre (hors pompage) différents, des propriétés hydrodynamiques propres ainsi que des comportements distincts vis-à-vis des pompages réalisés dans les aquifères encadrants.

Les tableaux des paramètres hydrodynamiques déduits des modèles ainsi que les modélisations des essais sont disponibles en annexe 4.

3.2. CALAGE DU MODELE

3.2.1. Points d'observation

Les points d'observation sont utilisés pour évaluer le calage et la validation du modèle. Les chroniques piézométriques qui servent de base à l'élaboration du fichier de points d'observation permettent la comparaison des valeurs observées aux valeurs restituées par le modèle. Le BRGM est opérateur des réseaux de suivi piézométrique sur le département de la Gironde pour le compte du Conseil Départemental (maître d'ouvrage du réseau dit « départemental ») et de l'AFB (ouvrages RCS). Les données piézométriques sont bancarisées dans la BSS-EAU et dans ADES (banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines). La totalité des chroniques disponibles dans les bases de données de référence a été utilisée. Au total, 90 piézomètres de contrôle ont pu être utilisés pour valider l'évolution des charges au cours du temps (Figure 21 et Figure 22). La fréquence de mesure pouvant évoluer au cours de la période de suivi pour un même point (de plus en plus de points sont équipés de capteurs télétransmis au fil des ans permettant un suivi quasi continu (pas de temps horaire à journalier)). La carte présentée en figure 22 illustre la fréquence de mesure sur les différents points d'observation. Cette fréquence correspond à une moyenne annuelle calculée en chaque point sur la période de suivi du point.

Toutes les données disponibles ont été prises en compte, même les points qui ne présentent qu'une seule mesure. En effet, ces derniers peuvent renseigner sur le niveau approximatif de la nappe dans des secteurs dépourvus d'informations. De même, des piézomètres disposant de seulement quelques mesures peuvent fournir des indications sur les amplitudes de variations saisonnières ou inter-annuelles de la nappe, et sur l'évolution de la nappe dans le temps (stabilité, baisse...).

Sur le même principe, des piézomètres récents captant la nappe de l'Oligocène (N° BSS 08027X0153 et 08022X0031) ont servi de guide pour le calage même si les données issues de ces points (2014) sont postérieures à la période de calage (1972 – 2012).

Fin 2012, 34 points étaient suivis en continu. Les points nivelés, validés géologiquement, suivis en continu et disposant de chroniques de mesures sur une longue période sont bien sûr toujours privilégiés et utilisés comme piézomètres de référence.

Nappe considérée	Nombre de points d'observation
Plio-Quaternaire	12
Eponte au sommet du Langhien-Serravallien	1
Langhien-Serravallien	1
Aquitanien	4
Oligocène	40
Éocène sup	1
Éocène moyen	28
Éocène inf	3
Total	90

Figure 21 : Points d'observation (piézomètres)

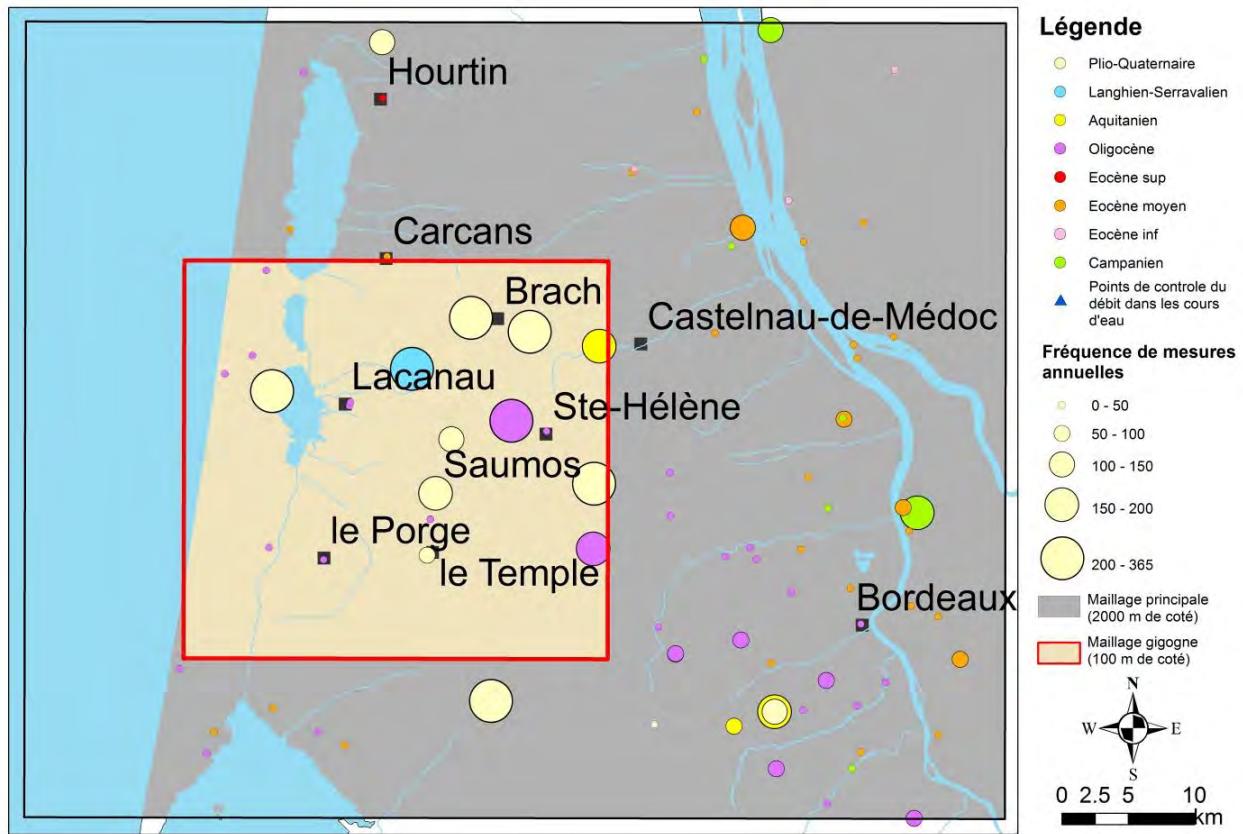


Figure 22 : Localisation des piézomètres utilisés pour contrôler la validité du modèle

Les chroniques les plus complètes, couvrant la période la plus longue, sont utilisées pour le calage du modèle en régime transitoire. Par ailleurs, les points présentant des chroniques partielles ou des mesures ponctuelles servent de référence pour le calcul des écarts entre les mesures observées et les valeurs restituées par le modèle dans les secteurs peu ou pas renseignés.

Par ailleurs, 11 points d'observations ont été intégrés pour contrôler les débits des cours d'eau simulés par le modèle. Une majorité des points ne dispose que de mesures de jaugeages ponctuelles qui permettent uniquement de contrôler l'ordre de grandeur des débits. Cependant 2 cours d'eau présentent des chroniques de débits mesurés : la Matouse (de fin 1989 à 2014) et la Garroueyre (de 1975 à 1996).

3.2.2. Calage du modèle en régime transitoire

Le rapport BRGM/RP-65368-FR (Saltel, et al., 2015) retrace le calage de la **version 2.1** du modèle.

Par ailleurs, lors de la phase de concertation du projet, une **version 2.2**, plus pénalisante a été présentée. Cette dernière intègre, sur la base de l'analyse de sensibilité effectuée en 2015, l'incertitude sur les perméabilités des épontes. L'objectif était d'avoir un calage tout aussi satisfaisant (du moins le moins dégradé possible en termes de restitution des charges aux différents points de contrôle) en créant une version alternative du calage maximisant les échanges entre nappes par l'augmentation des perméabilités des épontes (donc majorants les impacts). A noter que cette version 2.2 est cependant considérée comme moins réaliste car les perméabilités appliquées dans les aquifères s'éloignent alors des valeurs mesurées à partir des

interprétations de pompage d'essai (réajustements des perméabilités des aquifères nécessaires pour aboutir à des versions comparables en termes de calage). Cette approche permet néanmoins de donner une gamme d'incertitude, ou plutôt une borne supérieure, sur les impacts produits par le modèle.

Le calage présenté ici correspond à la **version 3 du modèle PHONEME** qui a été réalisée suite aux investigations de terrain : réalisation de nouveaux forages, ajustement de la géométrie, évaluation des paramètres hydrodynamiques à partir des différents pompages d'essai. Le calage a donc été contraint pour respecter les mesures *in situ* rendant obsolètes les versions 2.1 et 2.2.

La procédure de calage suivie est illustrée par le schéma ci-dessous (Figure 23) :

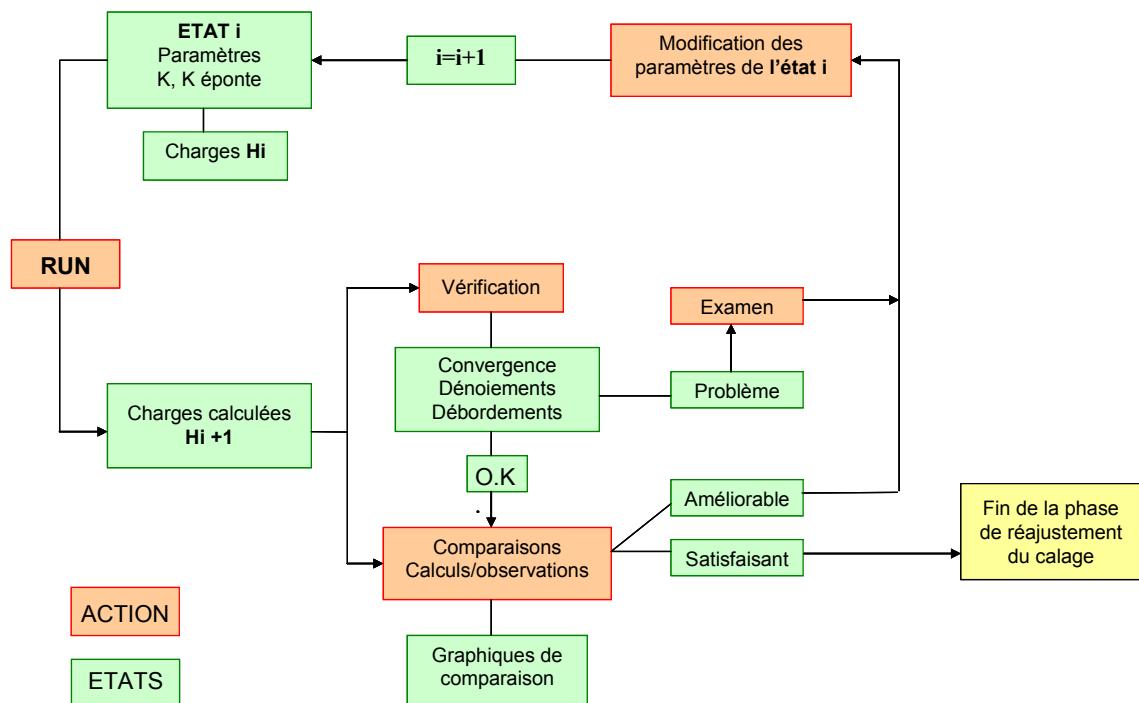


Figure 23 : Procédure de calage des charges hydrauliques

Le calage effectué sur les différents points d'observation dépend de la nature et de la qualité des points d'observations. Il est important de garder à l'esprit qu'un modèle reste une représentation schématique d'un système complexe et il est donc, dans les faits, impossible de représenter dans le détail l'ensemble des valeurs observées. Lors de la phase de calage, qui s'avère généralement très longue, l'objectif du modélisateur sera toutefois de minimiser les écarts sur le maximum de points de calage (restitution des chroniques piézométriques observées) tout en conservant une cohérence d'ensemble, des ordres de grandeur et une distribution spatiale plausible de chacun des paramètres physiques intégrés au modèle. Les procédures de calage automatique utilisées dans des systèmes simples et pour des temps de calcul limités permettent de minimiser les écarts entre valeurs observées et valeurs estimées. Toutefois, ces méthodes ne peuvent s'appliquer dans des systèmes aussi complexes. L'analyse des valeurs de charges calculées comparées aux valeurs de charges observées par l'intermédiaire de diagrammes de dispersion et des informations concernant l'évolution dans le temps des écarts moyens et des écarts types permettent de réaliser une analyse objective des résultats du calage. Il existe indéniablement une part de subjectivité dans le calage de tels systèmes, mais c'est le rôle du modélisateur de la minimiser autant que possible par la production et l'examen de nombreuses simulations sous des hypothèses différentes. L'expertise du modélisateur restera toujours indispensable même si un calage automatique devenait possible, car l'automatisation (aveugle même sous contrainte) ne

garantit pas l'obtention de résultats physiquement acceptables (du fait d'un grand nombre de paramètres avec des effets de compensation possibles). L'exemple présenté en figure 24 illustre le format de restitution des données avec en bleu les mesures brutes observées et en vert les charges calculées par le modèle.

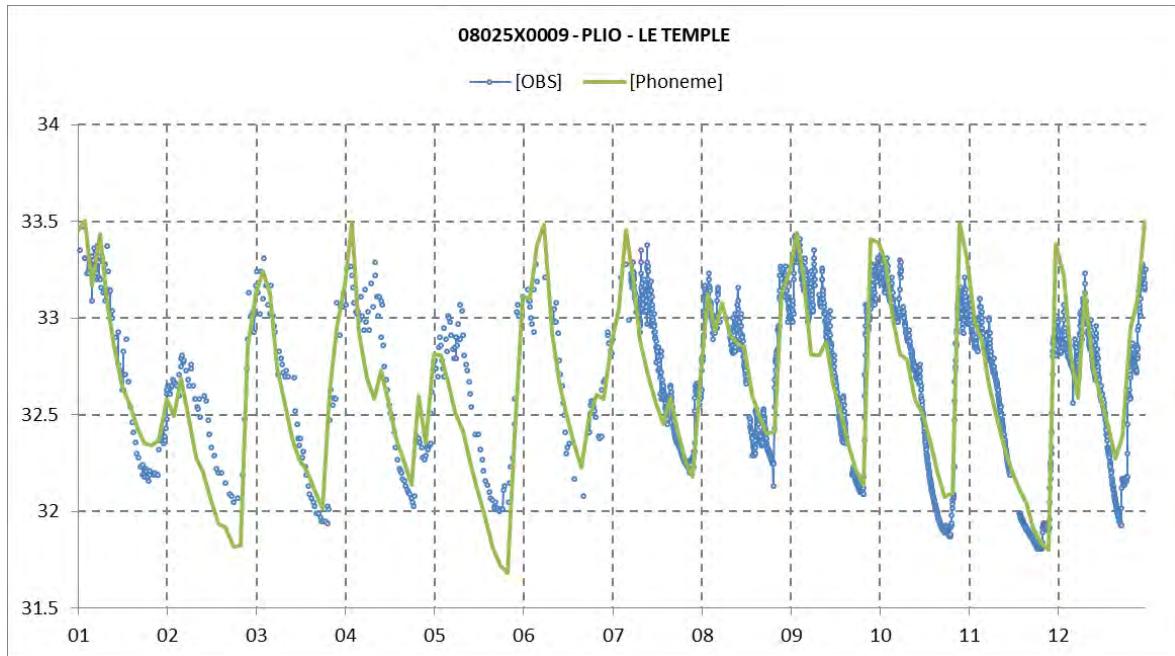


Figure 24 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés (08025X0009, Plio-quaternaire)

L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant sur la grande majorité des chroniques de calage pour les nappes considérées. La plupart des points sont bien reproduits en niveaux, en phase, en pente et en amplitude de variations (Annexe 5).

La validité du modèle a également été vérifiée (Figure 25) en comparant les débits des cours d'eau simulés aux chroniques provenant des stations de la Banque Hydro (Garroueyre et Matouse) et aux mesures ponctuelles provenant de jaugeages ponctuels (Corbier, 2012). La valeur du coefficient de Nash calculé pour ce point est de 0,5. A noter que le modèle a tendance à sous-estimer les débits en hautes eaux.

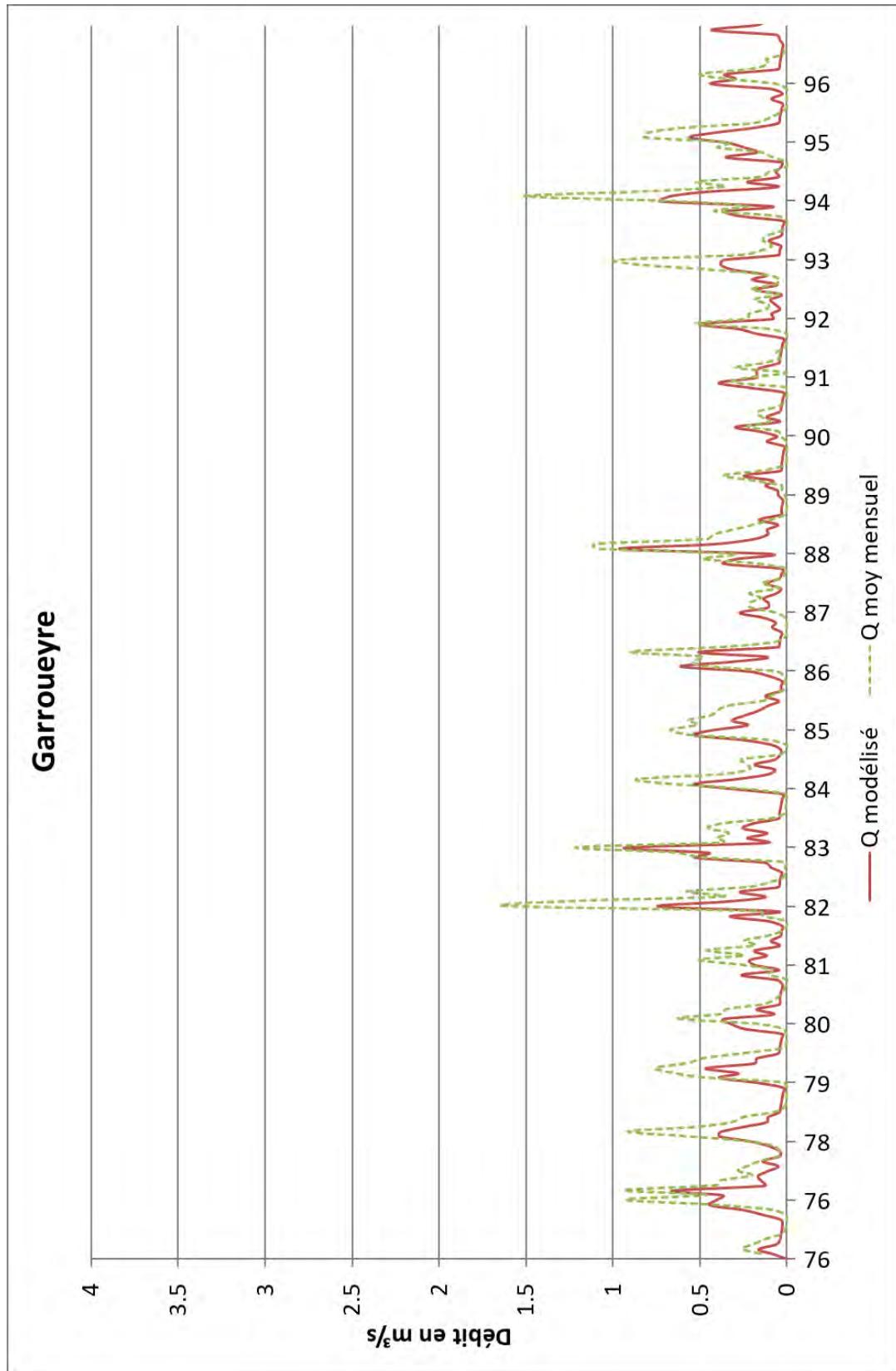


Figure 25 : Comparaison entre débits observés et débits simulés à la station de la Garroueyre

Malheureusement, les stations de jaugeages sont situées au nord de la zone d'intérêt représentée par la zone d'influence du champ captant telle qu'elle a été simulée dans le rapport du BRGM BRGM/RP-61290-FR (Cabaret et al., 2012). Ce sont tous les deux des affluents du Lac d'Hourtin. Cependant, les débits restitués par le modèle sont tout à fait comparables aux observations réalisées en période d'étiage. C'est notamment le cas pour la restitution des débits à la station de la Garroueyre qui a fait l'objet de simulations de calage spécifiques du fait que les données réelles sont disponibles pour la période allant de 1976 à 1991 (Figure 25).

Les mesures ponctuelles (une à deux mesures en hautes eau et basses eaux) servent seulement à vérifier que les débits simulés sont compris dans des gammes réalistes mais ne permettent pas de réaliser un calage fin sur la restitution des débits.

Reproduction par le modèle des tests d'exploitation réalisés à grande échelle en 2003

En complément de l'approche consistant à reproduire les observations mesurées au sein de piézomètres, un calage spécifique a été réalisé pour simuler dans le modèle un pompage d'essai de très longue durée réalisé en 2003 sur la commune de Saumos (Nadaud, et al., 2006). L'objectif étant de comparer les résultats de simulations aux mesures réalisées pendant les essais. Le pompage de très longue durée a été réalisé du 29 octobre au 28 novembre 2003 et concerne deux forages : SF1 (08022X0011) et SF2 (08022X0012). Des pompages d'essai ayant été effectués au préalable dans chacun de ces forages (entre le 23 et le 26 septembre 2003 pour SF1 et entre le 21 et le 24 octobre pour SF2). Pendant ces différentes phases, des enregistrements en continu ont été réalisés sur une série de piézomètres situés entre les deux forages SF1 et SF2. Ces points d'observation sont disposés en « flute de pan » et captent donc différents aquifères (Figure 26) :

- SP0 (08022X0013) capte la nappe du Plio-Quaternaire
- SP3 (08022X0010) capte la nappe du Miocène
- SP2 (08022X0009) capte la nappe de l'Oligocène
- SP1 (08022X0008) capte la nappe de l'Éocène moyen

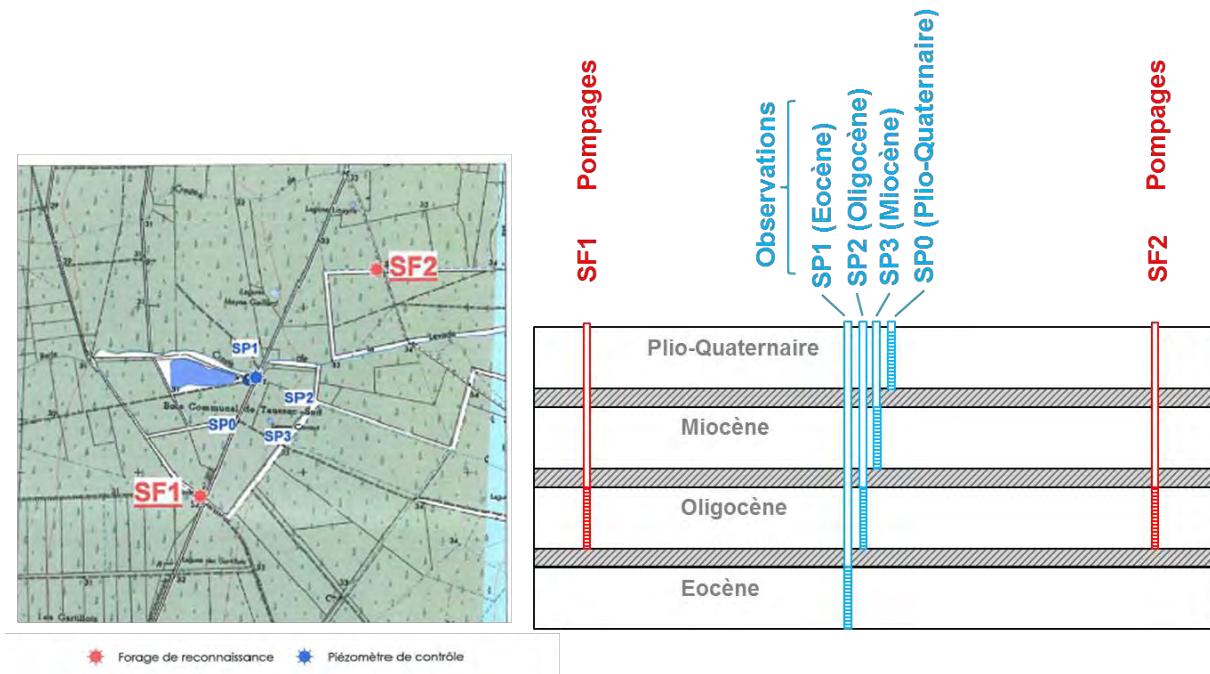


Figure 26 : Localisation des forages et plan schématique du dispositif

Ces tests montrent que l'aquifère du Miocène (Aquitainien) réagit très fortement aux pompages effectués dans la nappe d'Oligocène, les rabattements induits sont très similaires. A contrario, aucune incidence n'est observée sur les nappes de l'Éocène et du Plio-Quaternaire. Des hausses de la piézométrie sont observées sur la nappe du Plio-Quaternaire suite aux recharges correspondant aux précipitations ayant eu lieu pendant cette période.

La restitution par le modèle de ces pompages d'essai et de leurs impacts sur les différentes nappes est relativement satisfaisante (Figure 27). Aucun impact n'est généré dans la nappe du Plio-Quaternaire ce qui sous-entend que cet impact n'est donc pas surestimé. Les comportements des nappes de l'Oligocène, du Miocène (Aquitainien) et de l'Éocène sont bien reproduits.

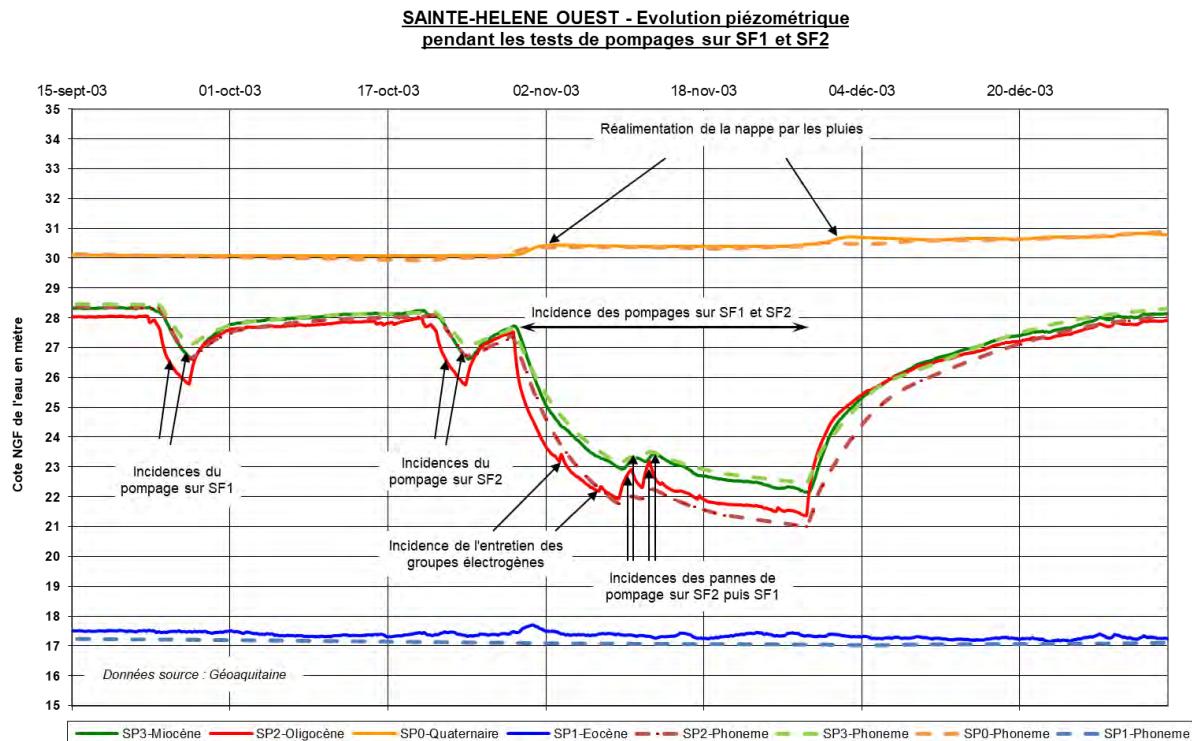


Figure 27 : Reproduction par le modèle des tests d'exploitation réalisés à grande échelle en 2003

Reproduction par modélisation des essais réalisés au Temple et éléments de réflexion

L'interprétation des pompages d'essai réalisés sur le site du Temple a permis de mieux appréhender le comportement de ce système aquifère multicouche et de déterminer les paramètres hydrodynamiques pour chacun des aquifères testés. Chacun des essais a permis d'évaluer l'ordre de grandeur de la perméabilité des épontes en reproduisant les impacts observés dans les réservoirs encadrant l'aquifère testé (voir page 31).

Pour ajuster au mieux les perméabilités des épontes, une évaluation par modèle mathématique analytique (solution de Boulton) a été utilisée pour encadrer la gamme des paramètres plausibles. Dans cette approche simplificatrice dans sa conception, un seul semi-perméable est utilisé pour représenter les 5 couches (3 épontes et 2 aquifères) entre le Plio-Quaternaire et l'Oligocène en partant des interprétations des pompages d'essais réalisé en 2017 (Figure 28). L'objectif ici est donc de déterminer les gammes de perméabilités des épontes sur la nappe du Plio-Quaternaire lors d'un pompage à l'Oligocène d'une durée de 7 jours à 200 m³/h en écartant les gammes de valeurs reproduisant un impact dans la nappe du Plio-Quaternaire (aucun impact n'ayant été observé lors des essais de pompage).

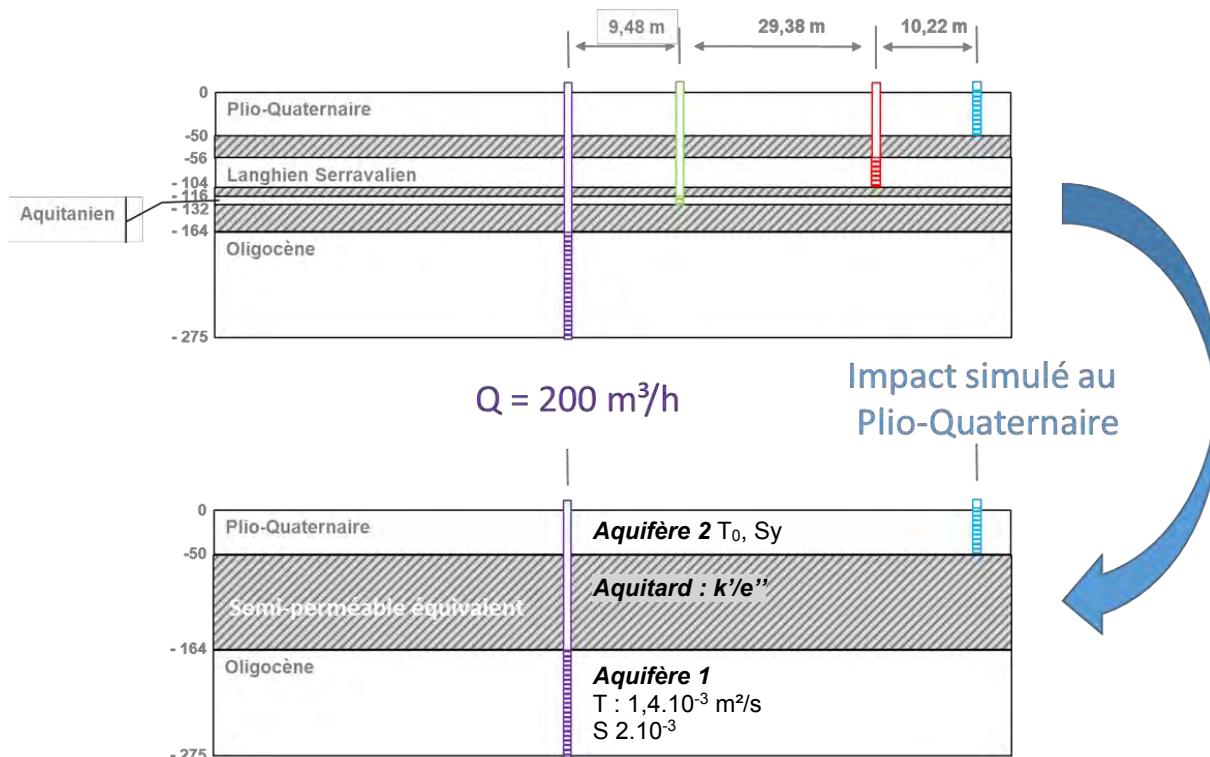
Deux paramètres influent sur l'impact en surface : la perméabilité des épontes (traduit par le paramètre k'/e') et l'emmagasinement du Plio-Quaternaire (S_y).

Le paramètre k'/e' se traduit de la manière suivante :

$$k'/e' = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (e'/k')}$$

où (e'/k') est le rapport de l'épaisseur d'une couche i à sa perméabilité. Ce rapport est calculé pour les n couches représentant le semi-perméable entre l'Oligocène (aquifère pompé) et le Plio-Quaternaire. Dans la pratique, l'impact (ou non) est contrôlé par la couche qui présente la plus petite valeur (e'/k') . Dans notre cas l'éponge entre le Langhien-Serravalien et l'Aquitainien.

Cependant, si ce sont bien les impacts dans la nappe du Plio-Quaternaire qui sont simulés, les observations réalisées lors des essais réalisés en 2017 ne montrent aucun rabattement dans la nappe de surface en réponse aux prélèvements réalisés à l'Oligocène. L'objectif ici est donc de ne garder que les gammes de valeurs de paramètres ne restituant aucun impact du pompage dans l'Oligocène sur le Plio-Quaternaire.



En prenant comme hypothèse majorante une erreur sur la mesure manuelle ne pouvant dépasser le centimètre (rabattement <0.01 m). Sur la durée du pompage, les simulations ne doivent pas faire réagir le Plio-Quaternaire au-delà de cette valeur seuil (Figure 29). Ainsi toutes les combinaisons de paramètres induisant des impacts supérieurs au centimètre sur la nappe du Plio-Quaternaire au bout de 7 jours de pompage à l'Oligocène ($200 \text{ m}^3/\text{h}$) ont été écartées. Les combinaisons de valeurs plausibles sont encadrées en orange sur la figure 29.

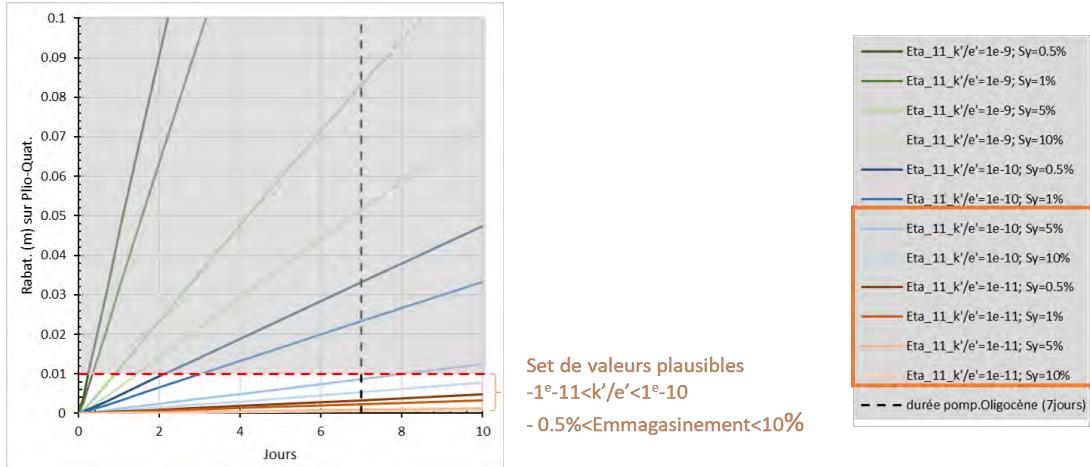


Figure 29 : Simulation de l'impact au Plio-Quaternaire lors du pompage à l'Oligocène pendant 7 jours à 200 m³/h

A partir de ce jeu de paramètres un modèle Marthe dédié à la reproduction fine des 4 essais de pompages réalisés en 2017 a été élaboré. Ce modèle a une conception identique au modèle PHONEME (les couches sont identiques) et la géométrie des réservoirs correspond à celle des terrains reconnus sur les forages du Temple.

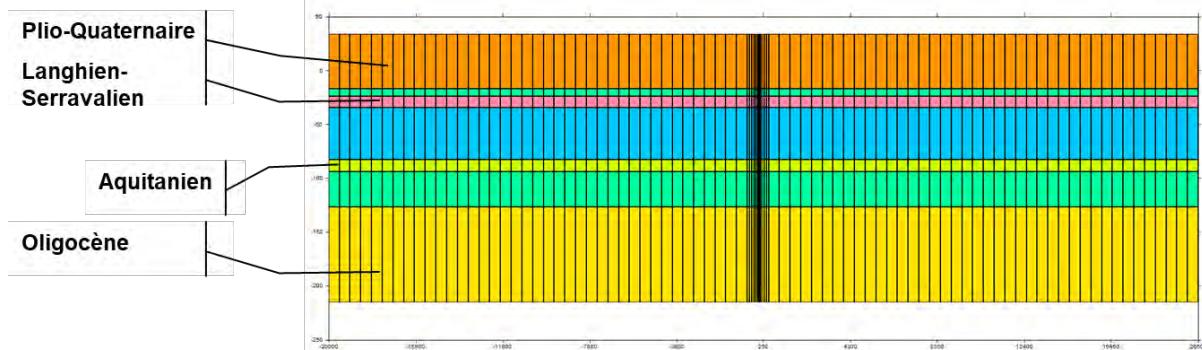


Figure 30 : Vue en coupe du modèle locale simplifié pour simuler les pompages du Temple

Ce modèle comporte 7 couches avec un total de 122 850 mailles sur une superficie de 1 600 km². La dimension du modèle a été choisie de manière à ce que les limites n'influencent pas les pompages. Sont représentés au centre, les 4 forages (Oligocène, Aquitanien, Langhien-Serravallien et Plio-Quaternaire) réalisés sur la commune du Temple. Le maillage est irrégulier (maillage écossais), de manière à disposer d'un maillage affiné sur la zone d'implantation des forages. Les mailles les plus grandes font 500 m de côté. Les mailles les plus fines font 2 m de côté. La charge hydraulique au puits est calculée à partir de la valeur moyenne de la maille dans laquelle est situé le forage en prenant en compte la dimension de la maille ainsi que le rayon du puits. Les valeurs de pertes de charges linéaires et quadratiques sont également utilisées pour corriger la charge au puits. Contrairement au modèle analytique, le modèle local considère l'ensemble des aquifères et épontes et donc le système multicouche dans son intégralité, l'objectif étant ici d'affiner les paramètres hydrodynamiques dans un modèle multicouche simplifié mais transposable au modèle PHONEME. A l'issue d'une première phase de calage, les résultats des simulations montrent une bonne reproduction de l'essai à l'Oligocène et de dans une moindre mesure l'impact induit à l'Aquitanien (Figure 31). A noter que les valeurs des perméabilités des épontes sont plus fortes que celles issues de l'interprétation initiale des pompages d'essai. Il apparaît cependant que le modèle génère des impacts simulés très forts au Langhien-Serravallien (1 m) et au Plio-Quaternaire (31 cm) alors que les impacts observés sur ces 2 nappes

sont nuls. Ceci traduit la difficulté de reproduire à la fois les impacts des rabattements observés dans l'Oligocène sans générer des impacts dans les aquifères sus-jacents (non observés).

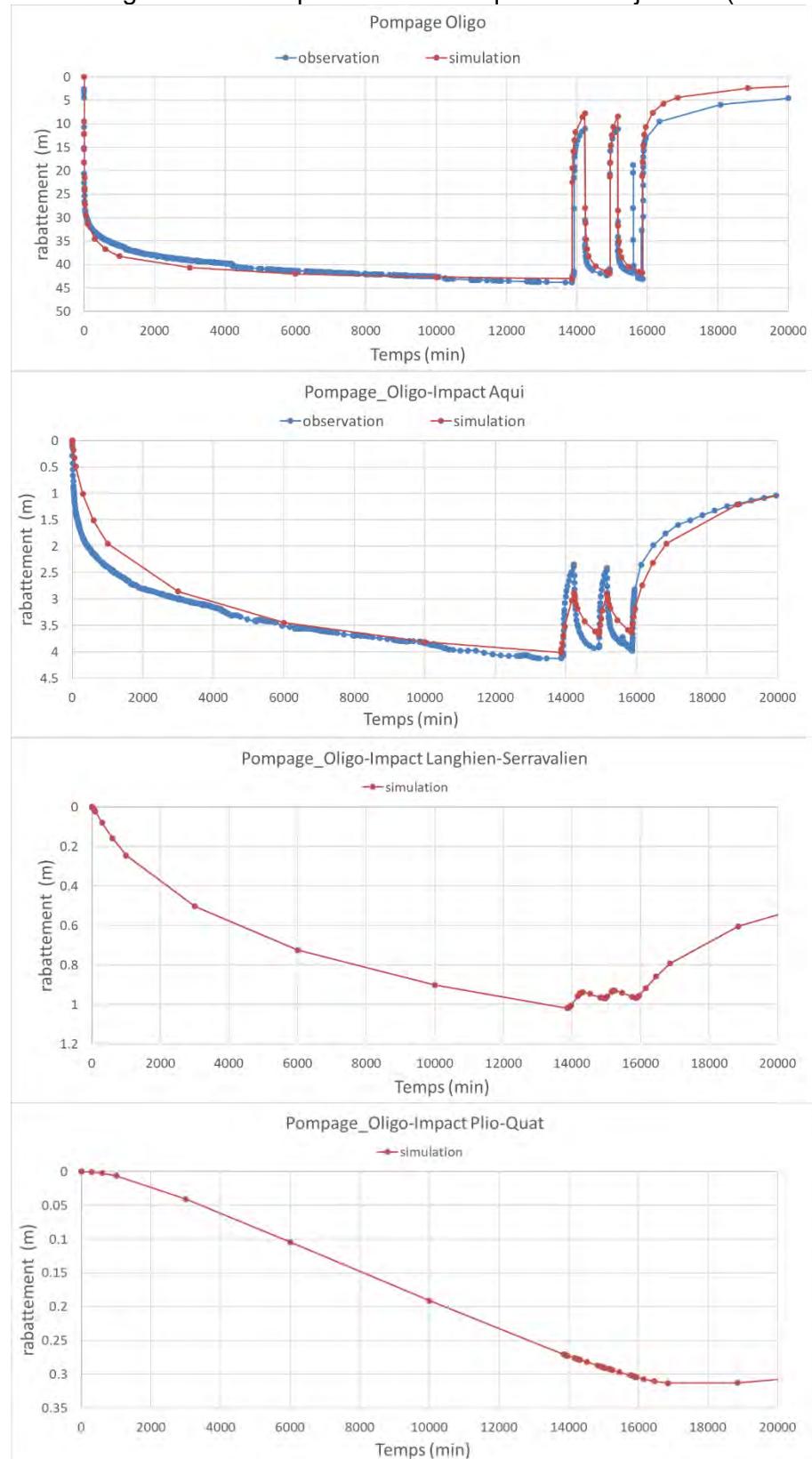
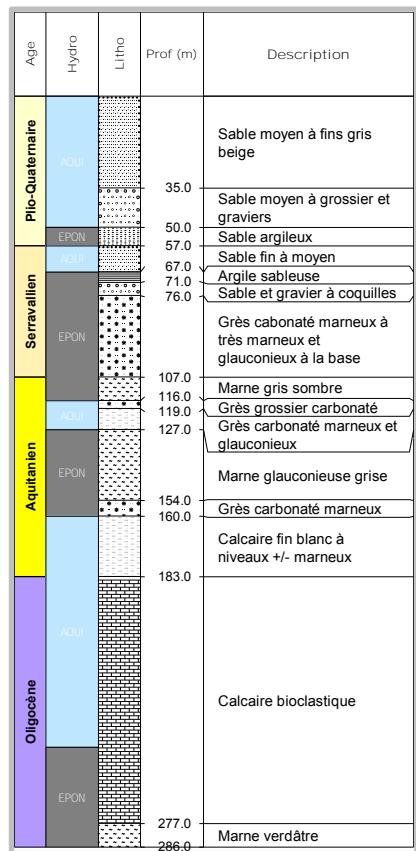


Figure 31 : Reproduction du pompage d'essai à l'Oligocène et impact simulé sur l'ensemble des aquifères dans le modèle local simplifié

La conceptualisation choisie reste simple et hétérogène et complexe que le découpage de l'éponte entre le Langhien-Serravalien et l'Aquitainien est décrit par 4 unités dans la coupe géologique.



Age Modèle PHONEME : investigations de terrain - impact du pompage

Hydro

Litho

AQUI

EPON

AQUI

EPON

AQUI

EPON

EPON

183.0

154.0

160.0

107.0

116.0

119.0

76.0

50.0

57.0

67.0

71.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35.0

50.0

57.0

67.0

71.0

76.0

35

Les résultats de la simulation sont décrits dans la figure 34.

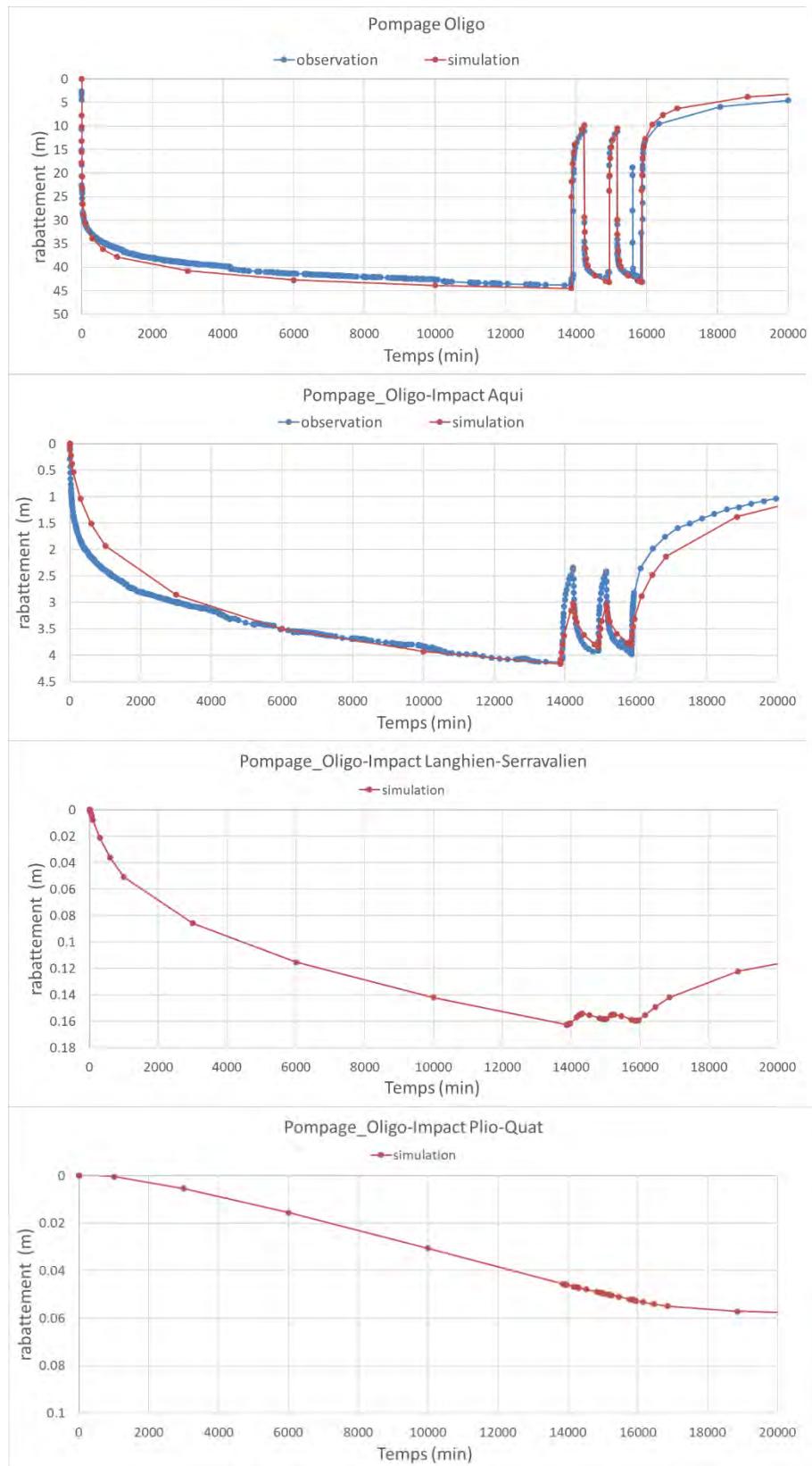


Figure 34 : Reproduction du pompage d'essai à l'Oligocène et impact simulé sur l'ensemble des aquifères dans le modèle local complexifié

Les résultats de la simulation montrent une bonne reproduction de l'essai à l'Oligocène et de l'impact induit à l'Aquitanien. Dans cette configuration, les impacts simulés ont été fortement atténués dans les aquifères sus-jacents mais n'ont pu être complètement annulés. Le modèle génère malgré tout des impacts au Langhien-Serravallien de 16 cm (contre 1 m précédemment) et de 6 cm au Plio-Quaternaire (contre 31 cm précédemment) alors que l'impact observé est nul. **Ces résultats traduisent donc le fait que les modèles numériques réalisés restent des simplifications du système étudié et qu'ils ont tendance à surestimer les impacts dans les aquifères encadrants.** Des hétérogénéités horizontales peuvent peut-être également être responsables des écarts observés.

Une complexification du modèle PHONEME en termes de nombre de couche n'étant pas envisageable du fait de l'impossibilité de spatialiser le redécoupage des épontes faute de données suffisantes pour le faire et de l'augmentation importante des temps de calcul que cela générerait, il a été décidé de rester sur la configuration du modèle local initial et de s'attacher à reproduire les ordres de grandeur des impacts dans le modèle local. L'accent a été mis sur l'essai de pompage effectué à l'Oligocène qui est à la fois le plus long et le plus représentatif du phénomène que l'on cherche à reproduire.

Les résultats montrent une bonne reproduction de l'essai à l'Oligocène (Figure 35). L'ordre de grandeur de l'impact à l'Aquitanien est respecté. Les impacts sont limités au Langhien-Serravallien (3 cm) mais restent surévalués et aucun impact n'est simulé au Plio-Quaternaire.

Les paramètres hydrodynamiques issues de cette approche locale ont été intégré et validé dans le modèle PHONEME.

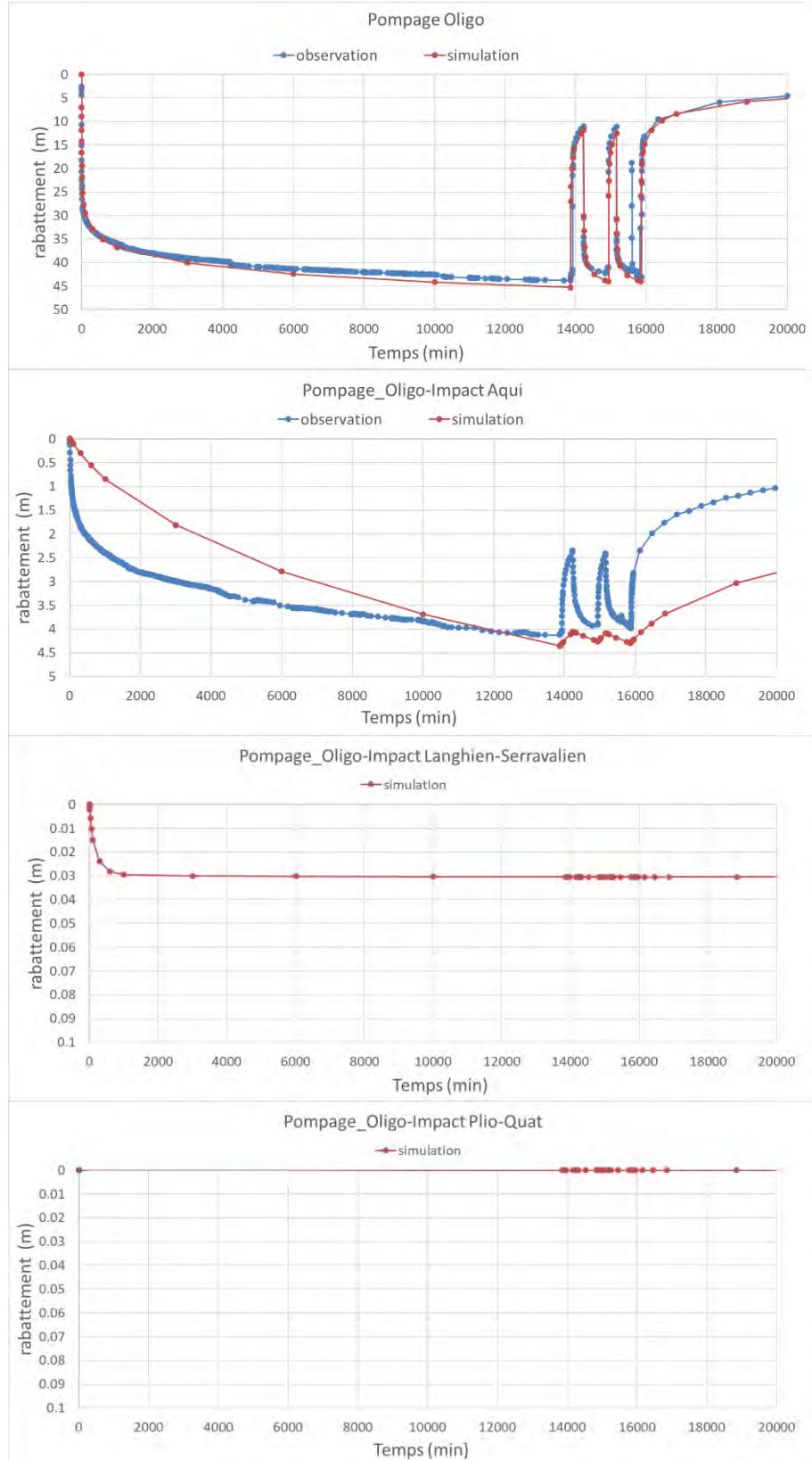


Figure 35 : Reproduction du pompage d'essai à l'Oligocène et impact simulé sur l'ensemble des aquifères dans le modèle local simplifié - limitation des impacts dans les aquifères sus-jacents

3.2.3. Analyse des écarts

Afin de quantifier l'ajustement obtenu, les écarts entre observations et simulations relevés sur les chroniques de calage ont été calculés. La démarche suivie pour l'analyse de ces écarts reprend celle mise en œuvre pour l'expertise du **MOdèle Nord Aquitain** dans sa version 5 km [(Ackerer, et al., 1998) ; (Seguin, 1999)].

L'analyse porte sur les chroniques piézométriques des nappes du Plio-Quaternaire, du Miocène (Langhien-Serravallien et Aquitanien), de l'Oligocène et de l'Éocène (inférieur, moyen et supérieur). L'analyse porte sur la période allant de 2001 à 2012 pour laquelle nous disposons d'un grand nombre de valeurs pour la nappe du Plio-Quaternaire. Le nombre de pas de temps pris en compte est de 144 mois. Sur cette période, pas de temps par pas de temps, et piézomètre par piézomètre, les écarts individuels ($H_{obs} - H_{sim}$) entre la valeur observée (H_{obs}) la plus proche dans le temps et le niveau simulé par le modèle (H_{sim}) sont calculés. Afin de mettre en évidence une éventuelle dérive dans la piézométrie simulée, la moyenne des écarts sur l'ensemble des piézomètres retenus (= écarts moyens) est calculée, pas de temps par pas de temps, ainsi que l'écart type correspondant. Les valeurs obtenues sont reportées sur un graphique en fonction du temps et une analyse de régression est effectuée.

Écarts individuels Hobs-Hsim

Au total, l'analyse concerne 91 piézomètres soit 4 207 mesures. Les paramètres statistiques de base sur la période considérée sont donnés dans la figure 36.

	Ensemble	Plio-Quaternaire	Miocène	Oligocène	Eocène
Nombre de valeurs	4207	978	474	1293	1483
Moyenne m (en m)	0.34	0.05	-0.10	0.49	0.57
Ecart type σ (en m)	1.27	0.60	0.50	1.35	1.60
Moyenne abs (en m)	0.92	0.42	0.39	1.02	1.35
RMSE (en m)	1.32	0.60	0.51	1.43	1.70
Médiane (en m)	0.27	-0.02	-0.18	0.08	0.53
Minimum (en m)	-5.66	-2.27	-3.88	-3.40	-5.66
Maximum (en m)	5.56	2.33	1.33	4.93	5.56

Figure 36 : Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles

La moyenne des écarts entre piézométrie observée et simulée est très proche de zéro pour les nappes du Plio-Quaternaire et du Miocène. Elle est de 0,34 m sur l'ensemble des points. Mais les écarts positifs et négatifs peuvent se compenser c'est pourquoi il est intéressant de calculer la moyenne des écarts absolus.

$$|m| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{obs} - H_{sim}|$$

Il ressort que la moyenne des écarts absolus est de 0,92 m sur l'ensemble des valeurs. Les écarts maximum et minimum observés sont compris dans une gamme de l'ordre de $\pm 5,5$ m et sont liés à la restitution du modèle dans la nappe de l'Éocène.

Le calcul du RMSE (Root Mean Squared Error), c'est-à-dire de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est un autre indicateur statistique fréquemment utilisé pour évaluer la qualité du calage d'un modèle. Le RMSE présente des valeurs 30 % à 40 % plus grandes que celles de la moyenne des valeurs absolues des écarts.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{obs} - H_{sim})_i^2 \right]^{0,5}$$

Il n'existe pas de critères universels définissant l'amplitude acceptable pour la moyenne des valeurs absolues des écarts ou pour le RMSE en dehors du fait qu'il est souhaitable de minimiser les valeurs des écarts de simulation. Bien que l'utilité de critères standards soit reconnue, des critères de calage uniformes n'ont pas été adoptés par la communauté de modélisation. Cela illustre le fait que toute modélisation exige un jugement subjectif et que l'acceptabilité d'un calage dépend des objectifs des modèles.

Par la suite, l'analyse des écarts est présentée nappe par nappe par le biais d'un ensemble d'illustrations (figure 37 à figure 44) :

- carte présentant la moyenne des écarts absolus,
- histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées,
- diagramme de dispersion - hauteurs piézométriques simulées et observées (moyennes et écarts types),
- évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.

La piézométrie de la nappe du Plio-Quaternaire apparaît particulièrement bien restituée par le modèle (Figure 37). En effet, les valeurs moyennes issues des points de contrôle pour cette nappe sont très bien alignées sur la droite d'écart zéro entre valeurs simulées et valeurs observées sur le diagramme de dispersion (Figure 37, en bas à gauche). Sur cette figure, chaque point correspond à un piézomètre. La barre horizontale des croix correspond à l'écart type temporel des écarts observés en ce piézomètre. La barre verticale des croix correspond à l'écart type temporel des écarts simulés en ce piézomètre. Seul un point apparaît présenter des écarts un peu plus importants. Il est localisé dans la partie sud-est du modèle en dehors de la zone d'intérêt du projet sur la commune de Pessac. Il s'agit du forage 08271X0299. Les écarts maximum et minimum observés sont compris dans une gamme de l'ordre de $\pm 2,5$ m.

L'histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et simulées ne présente pas ici une allure gaussienne. En effet, la distribution des écarts sur l'ensemble des observations ne s'organise pas tout à fait selon une loi normale selon les tests de normalité réalisés. On remarque une légère dissymétrie sur la forme de l'histogramme qui traduit une légère tendance à la sous-estimation (les écarts positifs traduisant des valeurs simulées en deçà des observations). En fait, les écarts moyens étant relativement resserrés autour de la valeur 0, traduisant un bon calage par rapport aux observations, l'histogramme ne peut être considéré comme une gaussienne. En dépit du fait que les résidus du modèle ne sont pas parfaitement gaussiens, la loi des grands nombres s'applique. Elle n'est valable que pour un échantillon de valeurs iid (indépendantes et identiquement distribuées). Pour la nappe du Plio-Quaternaire, le calcul des intervalles de confiance est ainsi statistiquement biaisé par la forte autocorrélation entre les différents points d'observation du fait de leur réaction simultanée aux événements climatiques (recharges).

Si on calcule cependant l'intervalle de confiance à 95% de la moyenne m donné par :

$$\left[\bar{x} - t_{\alpha} \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_{\alpha} \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}} \right]$$

où \bar{x} est la moyenne, $\sigma(x)$ l'écart-type observé, n le nombre d'observations et t_{α} la valeur t de Student. Pour un intervalle de confiance à 95 %, $t_{\alpha}=1,96$. D'où l'intervalle de confiance pour la nappe du Plio-Quaternaire : ICG = [0,01 ; 0,09] pour la moyenne 0,05 m.

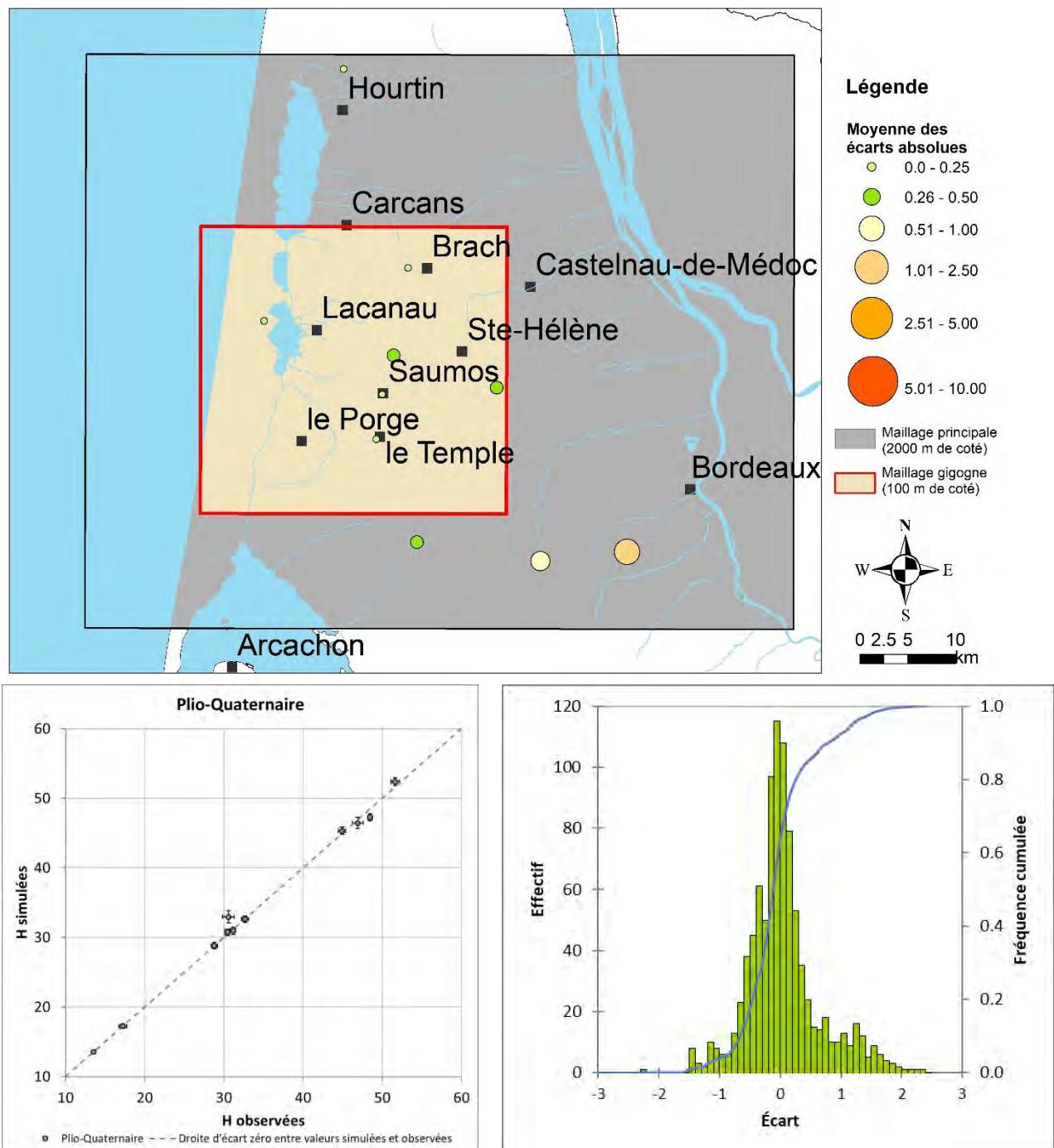


Figure 37 : Illustration des écarts de calage pour la nappe du Plio-Quaternaire

L'évolution de ces écarts est présentée pour la nappe du Plio-Quaternaire (Figure 38). L'analyse du graphique d'évolution des écarts moyens semble indiquer qu'au cours du temps les charges simulées sont très proches des charges observées. Le report graphique de l'écart type des écarts en fonction du temps montre que la précision du modèle ne se dégrade pas sur la période considérée. Sur les 12 années simulées, les écarts restent stables. Les écarts type des écarts montrent une très légère tendance à la baisse au cours du temps.

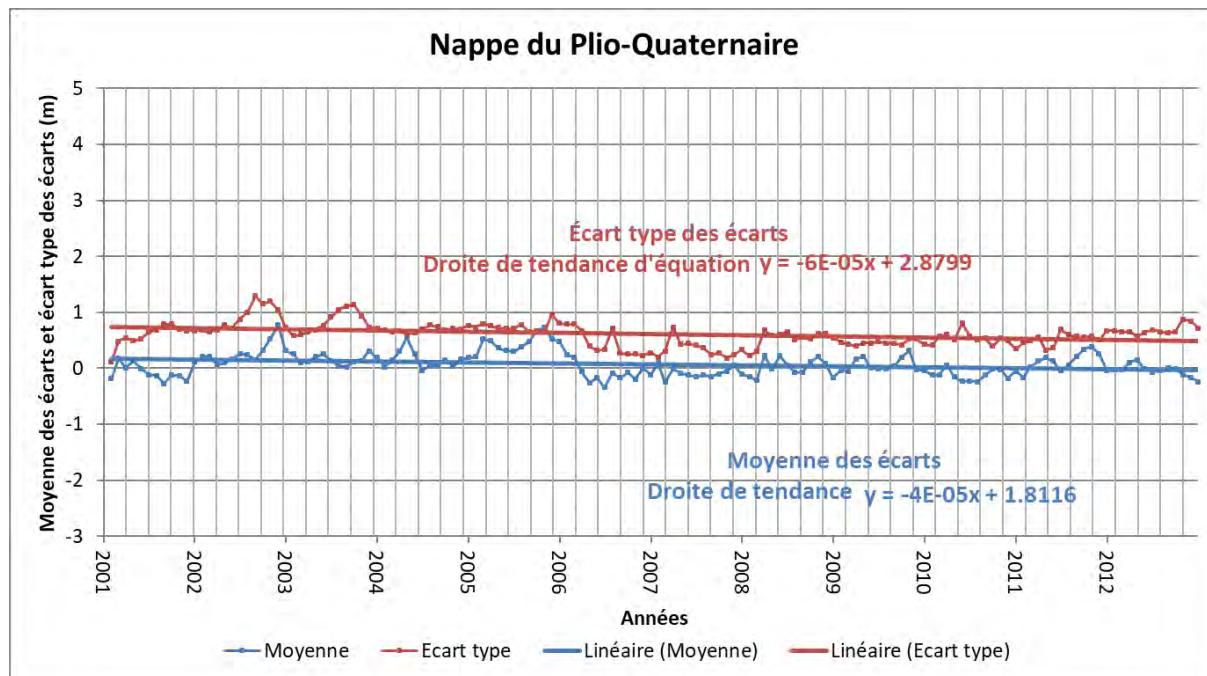


Figure 38 : Nappe du Plio-Quaternaire - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type

La piézométrie des nappes du Miocène (Aquitainien et Langhien-Serravallien) est très bien reproduite par le modèle (Figure 39). En effet, les valeurs moyennes issues des points de contrôle pour ces nappes sont bien alignées sur la droite d'écart zéro entre valeurs simulées et valeurs observées sur le diagramme de dispersion. Il faut noter que les aquifères du Miocène ne comptent que 6 points de contrôle avec 474 mesures utilisables pour comparer observations et simulations.

Les points présentant les écarts les plus importants (moyenne des écarts absolus compris entre 0,5 m et 1 m) sont les suivants : 07787X0010 (Moulis en Médoc) pour une valeur de 0,51 m et 08271X0003 (Cestas) pour une valeur de 0,51 m.

Les écarts maximum positifs et négatifs observés sont respectivement de 1,33 m et -3,88 m. A noter cependant que la valeur de la borne inférieure est très isolée et ne concerne qu'un seul pas de temps. L'histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et simulées ne présente clairement pas une allure gaussienne. Ainsi, la distribution des écarts sur l'ensemble des observations ne s'organise pas selon une loi normale comme le confirme les tests de normalité réalisés. On remarque une dissymétrie sur la forme de l'histogramme qui traduit une tendance à la surestimation (les écarts négatifs traduisant des valeurs simulées supérieures aux observations). En fait, les écarts moyens sont inférieurs à la valeur 0, la quasi-totalité des valeurs étant comprises entre -1 m et 1 m. En dépit du fait que les résidus du modèle ne sont pas parfaitement gaussiens, la loi des grands nombres s'applique. Elle n'est valable que pour un échantillon de valeurs iid (indépendantes et identiquement distribuées). Les intervalles de confiance peuvent être calculés pour les nappes captives où l'autocorrélation des écarts autorise le calcul des intervalles de confiance.

L'intervalle de confiance à 95% de la moyenne m pour les nappes du Miocène on obtient : ICG = [-0,14 ; -0,05] pour une moyenne de -0,10 m.

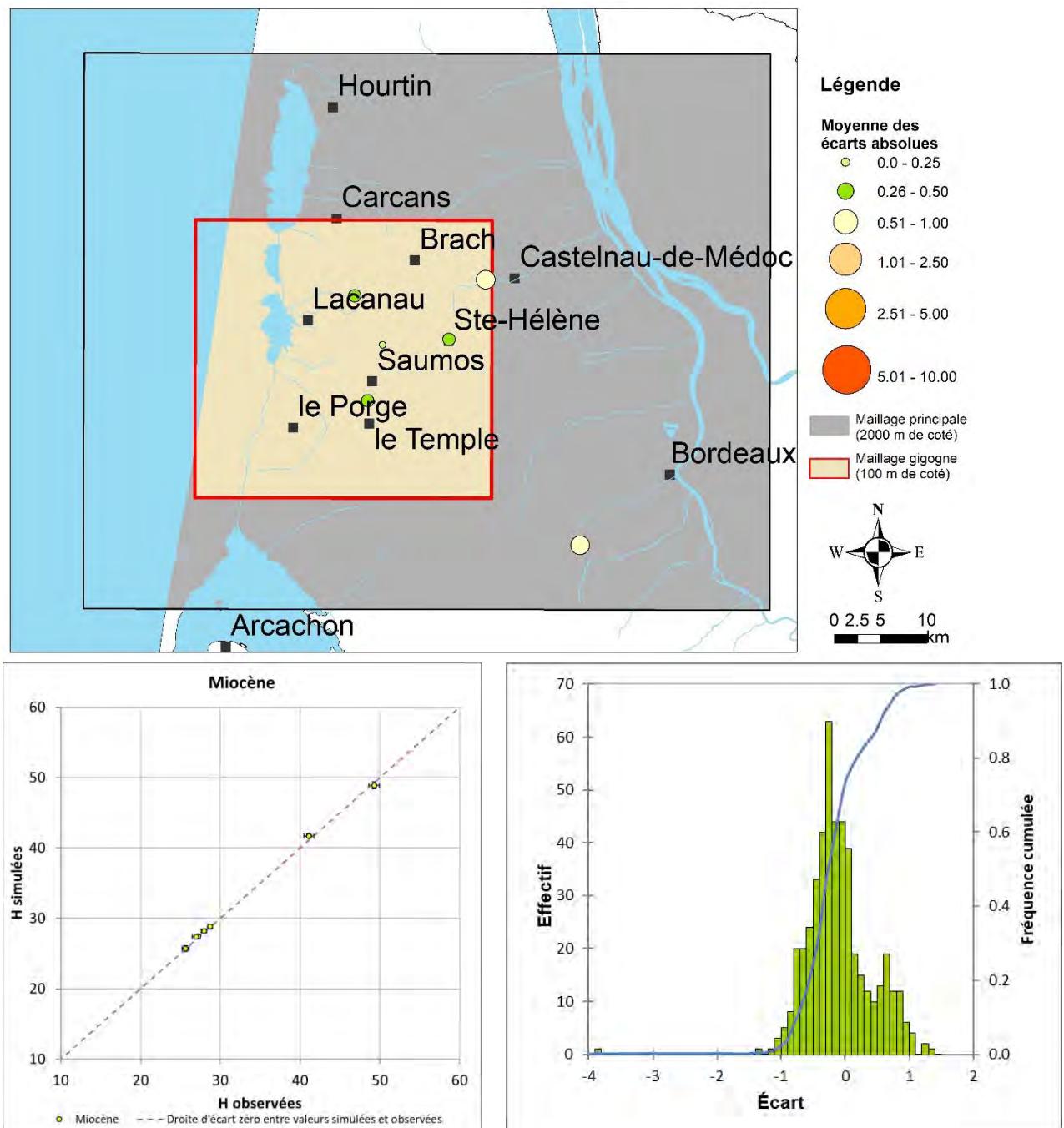


Figure 39 : Illustration des écarts de calage pour les nappes du Miocène (Aquitainien et Langhien-Serravallien)

Pour les nappes du Miocène la comparaison des piézométries observées et simulées montre un écart moyen quasi nul sans dérive au cours du temps traduisant une bonne restitution de l'évolution des charges dans le modèle (Figure 40). Les écart-types des écarts sont eux aussi très faibles et très stables dans le temps.

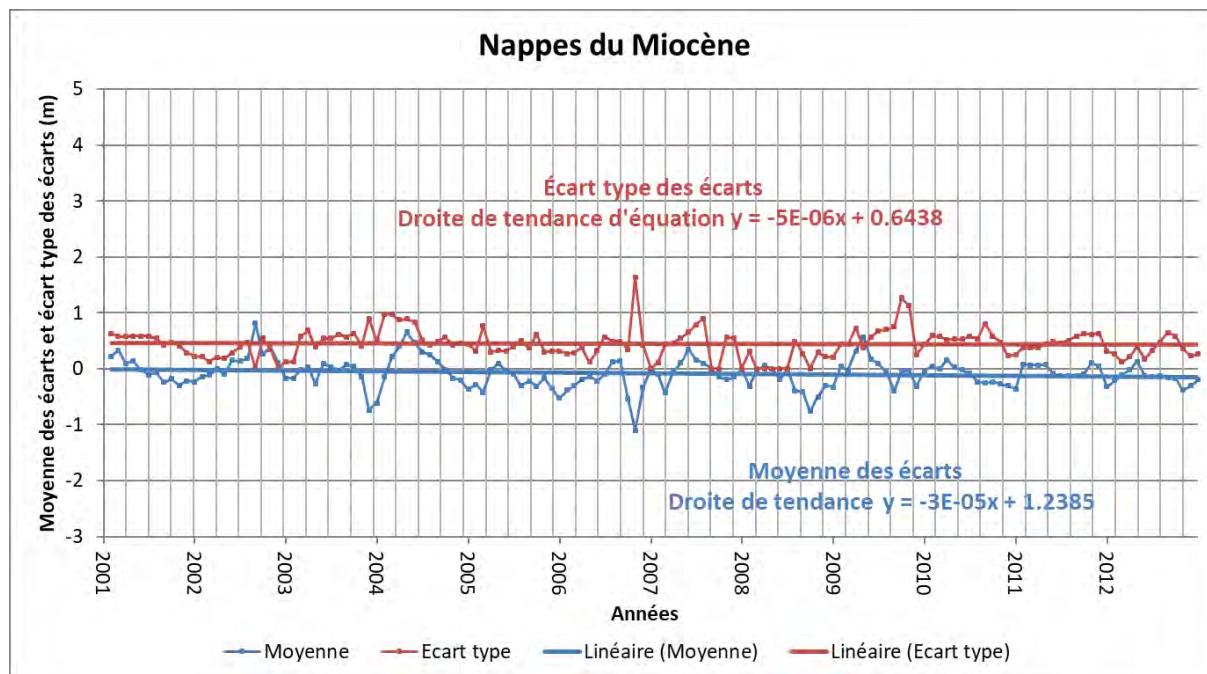


Figure 40 : Nappes du Miocène (Langhien-Serravallien Aquitanien) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type

La nappe de l'Oligocène est celle qui présente le plus grand nombre de points de contrôle du calage (Figure 41). Deux points situés en dehors de la zone d'intérêt du projet peuvent être considérés comme moins bien calés. C'est notamment le cas dans les secteurs de Léognan (08276X0006) et de Saint-Aubin du Médoc (08024X0019) où les niveaux simulés sont en deçà des observations (Annexe 5). Ces points présentent peu d'observations, seulement des mesures ponctuelles.

Les écarts maximum positifs et négatifs sont respectivement de 4,93 m et -3,4 m. L'histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et simulées ne présente clairement pas une allure gaussienne. Ainsi, la distribution des écarts sur l'ensemble des observations ne s'organise pas selon une loi normale comme le confirme les tests de normalité réalisés.

La moyenne des écarts à 0,49 m traduit une tendance à la sous-estimation (les écarts positifs traduisant des valeurs simulées en deçà des observations). L'analyse de l'histogramme traduit cependant que les effectifs les plus importants sont observés pour un écart légèrement inférieur à 0 et 90 % des écarts sont compris entre -2,5 m et 2,5 m ce qui traduit un bon calage général dans le modèle. A noter qu'il apparaît un deuxième pic pour la valeur de 2 m lié à la sous-estimation des valeurs sur les forages de Canéjan (08271X0106) et de Saint-Jean d'Illac (08264X0012) qui présentent tous les deux un grand nombre de valeurs d'observation et ont donc un grand poids sur l'allure de l'histogramme des écarts individuels et sur la valeur moyenne des écarts.

L'histogramme ne suit pas une loi Normale. L'intervalle de confiance à 95% de la moyenne m pour la nappe de l'Oligocène on obtient : ICG = [0,41 ; 0,56] pour la moyenne 0,49 m.

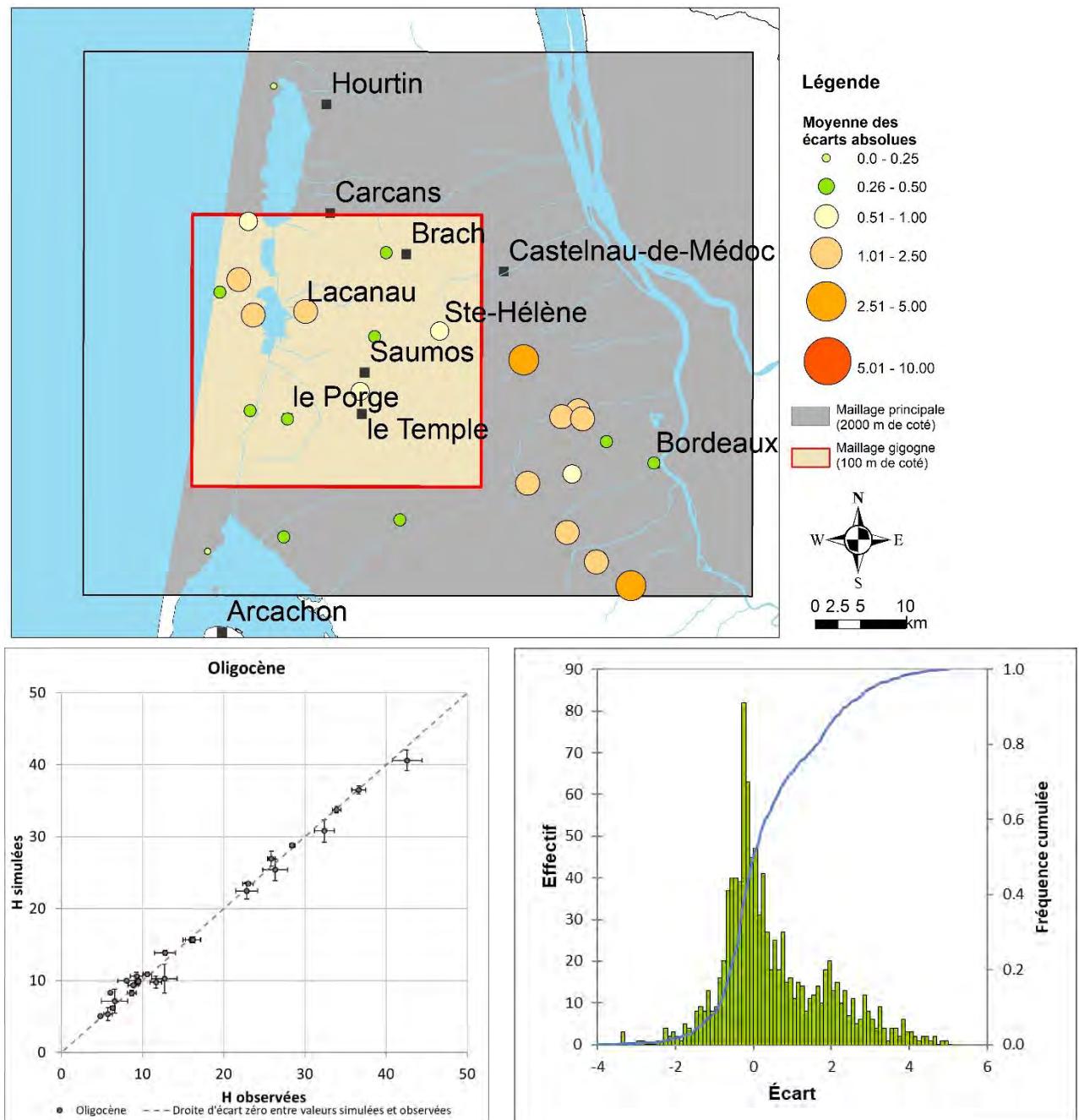


Figure 41 : Illustration des écarts de calage pour la nappe de l'Oligocène

L'évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type pour la nappe de l'Oligocène (Figure 42) traduit une légère sous-estimation des charges simulées par rapport aux charges observées principalement lié à deux points de calage. Aucune dérive n'est mise en évidence au cours du temps sur l'écart moyen qui reste stable.

Les écarts type des écarts ne montrent pas de tendance à la hausse et restent globalement inférieurs à 2 m.

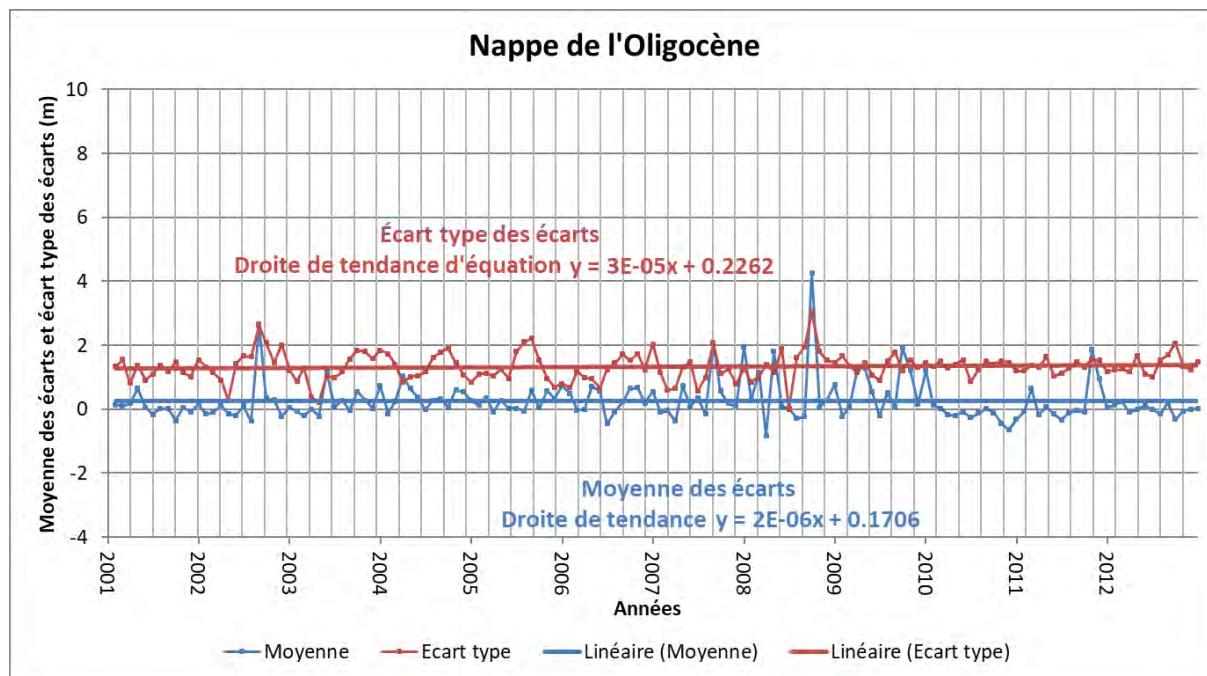


Figure 42 : Nappe de l'Oligocène - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type

Les nappes de l'Éocène (supérieur, moyen et inférieur) présentent également un grand nombre de points de contrôle du calage. A noter cependant qu'il n'existe qu'un seul forage dans la zone d'intérêt du projet (Figure 43).

La moyenne des écarts à 0,57 m traduit une tendance à la sous-estimation (les écarts positifs traduisant des valeurs simulées en deçà des observations).

Les valeurs moyennes issues des points de contrôle pour ces nappes restent dans une fourchette comprise entre ± 3 m sur le diagramme de dispersion.

Les points présentant les écarts les plus importants (moyenne des écarts absolus compris entre 0,5 m et 1 m) sont les suivants : 08033X0237 (Bassens) pour une valeur de 2,62 m et 08037X0425 (Cenon) pour une valeur de 2,88 m. Ils présentent tous les deux des valeurs simulées en deçà des observations.

Les écarts maximums positifs et négatifs observés sont respectivement de 5,56 m et -5,66 m.

L'analyse de l'histogramme traduit cependant que les effectifs les plus importants sont observés pour un écart légèrement inférieur à 0,2 et 90 % des écarts sont compris entre ± 3 m. L'histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et simulées ne présente pas une allure gaussienne. Ainsi, la distribution des écarts sur l'ensemble des observations ne s'organise pas selon une loi normale comme le confirme les tests de normalité réalisés. On remarque une dissymétrie sur la forme de l'histogramme qui traduit une tendance à la sous-estimation (les écarts positifs traduisant des valeurs simulées en deçà des observations).

Au vu de sa forme, l'histogramme ne peut être considéré comme une gaussienne. L'intervalle de confiance à 95% de la moyenne m pour les nappes de l'Éocène on obtient : $ICG = [0,49 ; 0,65]$ pour la moyenne 0,57 m.

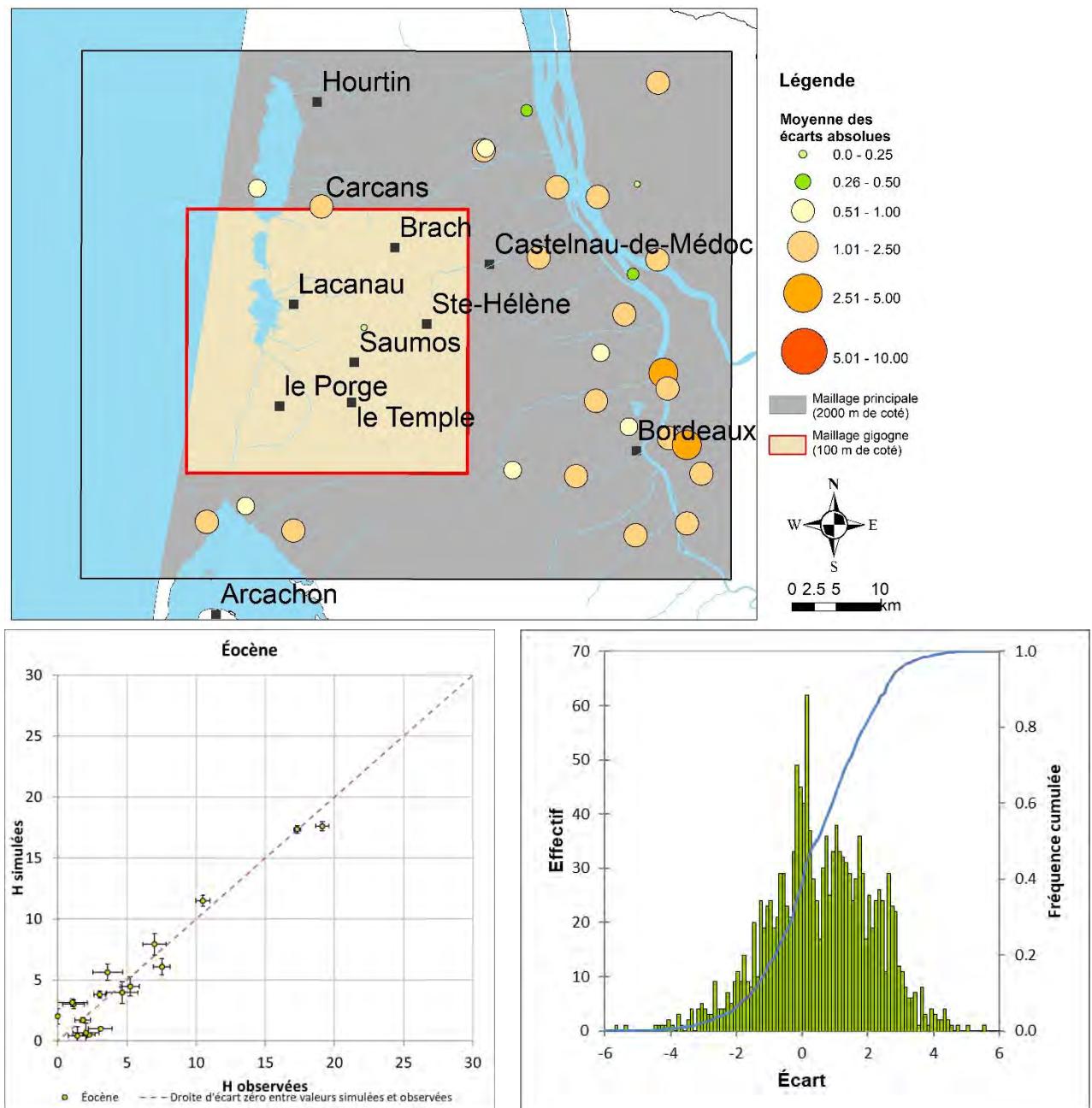


Figure 43 : Illustration des écarts de calage pour les nappes de l'Éocène

Les nappes de l'Éocène (Figure 44) montrent un écart moyen de 0,57 m, correspondant comme pour l'Oligocène à une légère sous-estimation des charges simulées par rapport aux charges observées. Sur la période d'observation, l'écart moyen peut être considéré comme stable. Les écarts type des écarts montrent une légère tendance à la hausse.

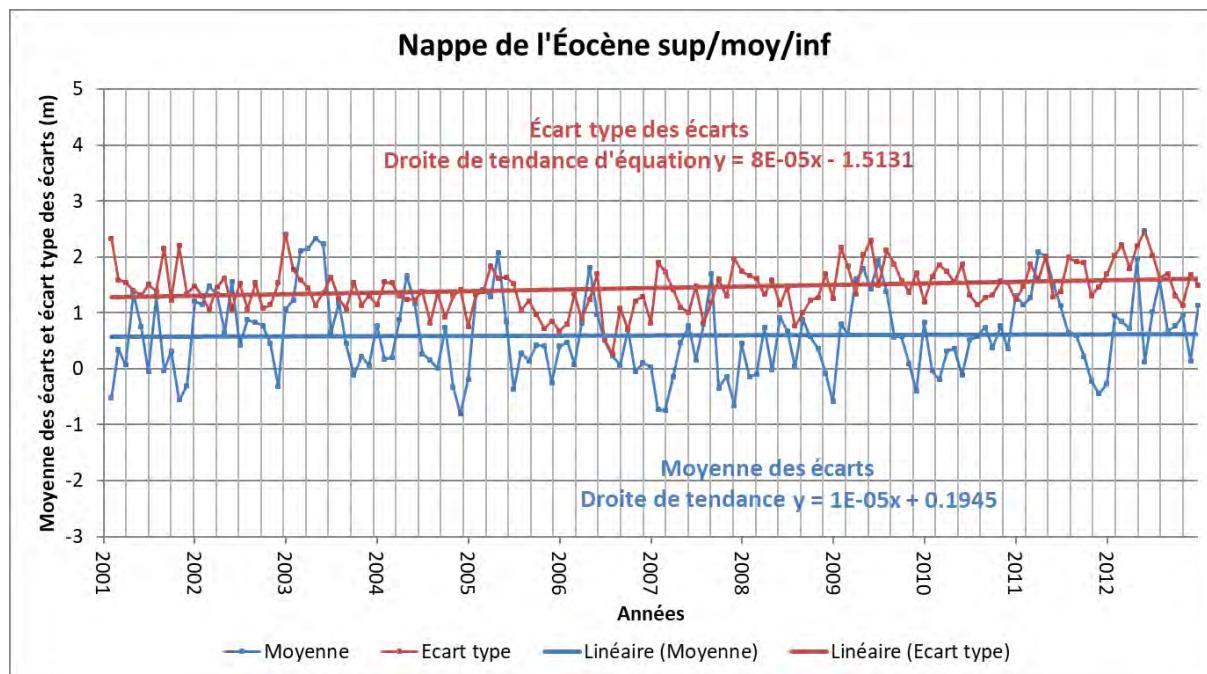


Figure 44 : Nappes de l'Éocène (supérieur, moyen et inférieur) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type

4. Impact du champ captant

4.1. METHODOLOGIE

Pour évaluer l'impact de l'exploitation d'un champ de 14 forages captant la nappe de l'Oligocène dans le secteur de Saumos-Le Temple pour une capacité de 10 millions de m³/an, plusieurs approches ont été utilisées. Pour chaque approche, deux simulations sont réalisées. La première correspond à un scénario tendanciel sans champ captant, la seconde présente les mêmes caractéristiques (conditions climatiques, prélèvements, ...) avec en plus la mise en œuvre du parc de forages des Landes du Médoc. Les deux scénarios (tendanciel et exploitation) sont simulés sur des périodes variables selon les approches et comparées entre elles pour évaluer l'impact du projet.

Le scénario tendanciel a pour but d'établir un état de « référence » nécessaire à l'estimation de l'impact du projet indépendamment de toute interférence induite par d'autres phénomènes.

Le scénario d'exploitation reprend les mêmes hypothèses que le scénario tendanciel mais introduit les prélèvements correspondant à la mise en service du champ captant des Landes du Médoc.

Le champ captant est prévu pour produire 10 millions de m³/an. Ce volume est ramené à un débit fictif continu de 2 000 m³/j pour 20 heures d'exploitation journalière à 100 m³/h (soit 730 000 m³/an) réparti de façon homogène sur chacun des 14 forages d'exploitation. Les débits sont considérés constants tout au long de l'exploitation du champ captant quel que soit l'approche considérée. L'impact du champ captant sur la piézométrie des aquifères est restitué par comparaison des niveaux piézométriques simulés issus des scénarios tendanciel (état de référence) et d'exploitation. La représentation des résultats d'impact se fait sous forme de :

- Cartes de rabattements déduites de la différence, calculée pour une même période, entre les cartes piézométriques issues du scénario d'exploitation et du scénario tendanciel (état de référence). Ces cartes représentent l'abaissement piézométrique induit par le projet dans les couches.
- Chroniques piézométriques sur les différents ouvrages d'observation identifiés. Celles-ci permettent d'observer l'évolution des niveaux piézométriques au cours du temps, l'impact du champ captant en un point donné.
- Chroniques de rabattement illustrant pour un point d'observation (pas forcément lié à un point de calage) la différence entre le scénario tendanciel et le scénario d'exploitation.
- Les variations de stock d'un pas de temps au suivant ont été cumulées à partir de l'état initial du terme stockage (en valeur algébrique et exprimés en débits) calculé directement dans MARTHE selon l'état de la maille de calcul.

La configuration du champ captant a fait l'objet d'un grand nombre de simulations par une approche essai/erreur pour définir une implantation générant l'impact le plus faible possible sur la nappe du Plio-Quaternaire :

- Position géographique du champ captant pour exploiter la puissance la plus importante du réservoir oligocène et s'éloigner des zones de lacune.
- Architecture (orientation, espacement) du champ captant lui-même pour limiter les interactions entre forages.

Ce travail d'optimisation de positionnement du champ captant a été réalisé sur les versions 2.1 et 2.2 du modèle (Saltel, et al., 2015). L'ensemble des résultats est retracé dans le tableau récapitulatif présenté en figure 45.

Configuration	Impact max (cm)	surface <10 cm	Surface 10 cm- 20 cm	Surface 20 cm- 30 cm	Total surface impactée
V init	29	13 500 ha	6 800 ha	4 200 ha	24 600 ha
A V2.1	14	26 100 ha	2 700 ha	-	28 800 ha
B V2.1	20	24 700 ha	10 600 ha	400 ha	35 700 ha
C V2.1	16	22 200 ha	10 300 ha	-	33 100 ha
D V2.1	15	18 300 ha	2 700 ha	-	21 000 ha
E V2.1	18	20 200 ha	5 000 ha	-	25 200 ha
F V2.1	14	24 100 ha	2 300 ha	-	26 300 ha
G V2.1	13	24 800 ha	4 200 ha	-	29 000 ha
H V2.1	12.5	22 200 ha	1 500 ha	-	23 800 ha
I V2.1	11	17 000 ha	600 ha	-	17 700 ha
J V2.1	9.5	12 000 ha	0 ha	-	12 000 ha
J V2.2	10.75	9 500 ha	200 ha	-	9 700 ha

Figure 45 : Synthèse des travaux d'optimisation du positionnement du champ captant

C'est la version J (Figure 46) qui présente les impacts les plus faibles en termes d'impact maximum et de surface totale impactée. Entre la version initiale du champ captant et la version J, on a une surface impactée diminuée de moitié et un impact maximum divisé par 3. C'est donc cette implantation qui a été utilisée pour l'ensemble des évaluations d'impact présentés dans ce rapport.

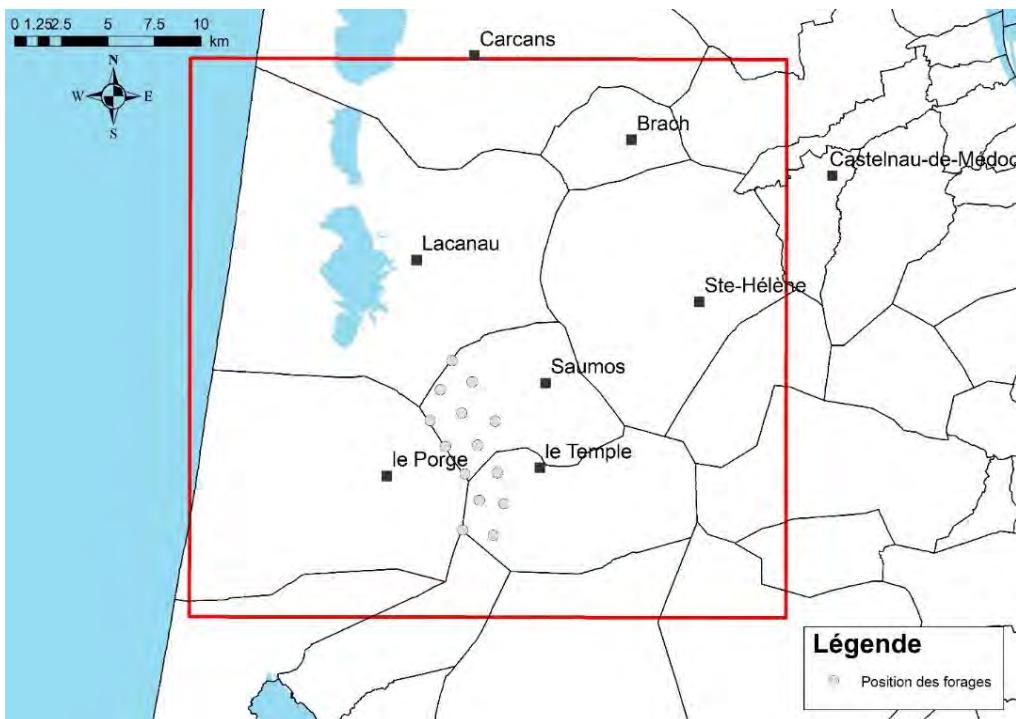


Figure 46 : Positionnement des forages du champ captant dans la configuration J

Trois approches ont été utilisées pour évaluer l'impact du champ captant :

- une approche prospective court terme considérant des conditions climatiques constantes et continues dans le temps,
- une approche rétrospective utilisant les conditions climatiques connues (de 1976 à 2012),
- une approche prospective long terme à partir des projections climatiques basées sur les scénarios d'émission de gaz à effet de serre du GIEC.

4.2. APPROCHE PROSPECTIVE COURT TERME - IMPACT DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES CONTINUES

4.2.1. Description

L'approche prospective court terme consiste à considérer une exploitation du champ captant à l'issue de la période de calage dans le modèle (fin 2012) et d'observer l'impact au bout de 10 ans d'exploitation (jusqu'en 2022). Sur la période prospective, ce sont les prélèvements trimestriels de l'année 2012 qui sont utilisés ainsi que les conditions aux limites de cette même année. Les conditions climatiques³ correspondent à une recharge moyenne calculée sur la moyenne des 30 dernières années. C'est la version 3 du modèle qui a été utilisé pour évaluer les impacts dans cette approche.

4.2.2. Résultats

Les chroniques piézométriques permettent d'observer l'impact du champ captant en un point donné sur les différents ouvrages d'observation identifiés.

Les graphiques présentés en figure 47 montrent que ce sont les forages localisés dans la nappe de l'Oligocène qui présentent naturellement les impacts les plus importants, de l'ordre de 15 m sur le forage oligocène de Saumos (08026X0034) contre 9 m sur le forage aquitanien de Saumos (08026X0001). Aucun impact n'est visible à cette échelle sur le graphique du forage Plio-Quaternaire du Temple. La différence entre scénario tendanciel et scénario d'exploitation montre des écarts compris entre 0 et 7 cm.

Les rabattements les plus importants sont logiquement observés dans l'Oligocène (Figure 48) où le champ captant est implanté. L'impact est maximum dans les mailles au droit des forages d'exploitation avec des abaissements piézométriques allant jusqu'à 34 m. A noter que les niveaux piézométriques se stabilisent rapidement au bout de deux années d'exploitation (Figure 47). L'impact sur les forages du secteur captant la nappe de l'Oligocène est synthétisé dans le tableau de la figure 49. Les impacts les plus forts (de l'ordre de 15 m) concernent le forage de Saumos (08026X0034) du fait de la proximité avec le projet de champ captant. Ce forage serait abandonné dans le cadre des interconnexions avec le parc de forage nouvellement créé. Les forages du Porge – Gleize vieille (08018X0004) et de Lacanau - Stade ville (08021X0002) présentent des impacts moyens supérieurs au mètre. A noter que ce dernier forage a été rebouché début 2017 par la société Foradour. Les autres forages du secteur peuvent être considérés comme faiblement impactés par le champ captant.

³ Le climat peut être défini comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné (température, précipitations, ...) calculées d'après les observations d'au moins 30 ans (défini par l'Organisation Météorologique Mondiale).

D'une manière générale, hormis le forage de Saumos, l'impact sur les forages proches du projet reste modéré et n'influencera pas de manière significative leur régime d'exploitation.

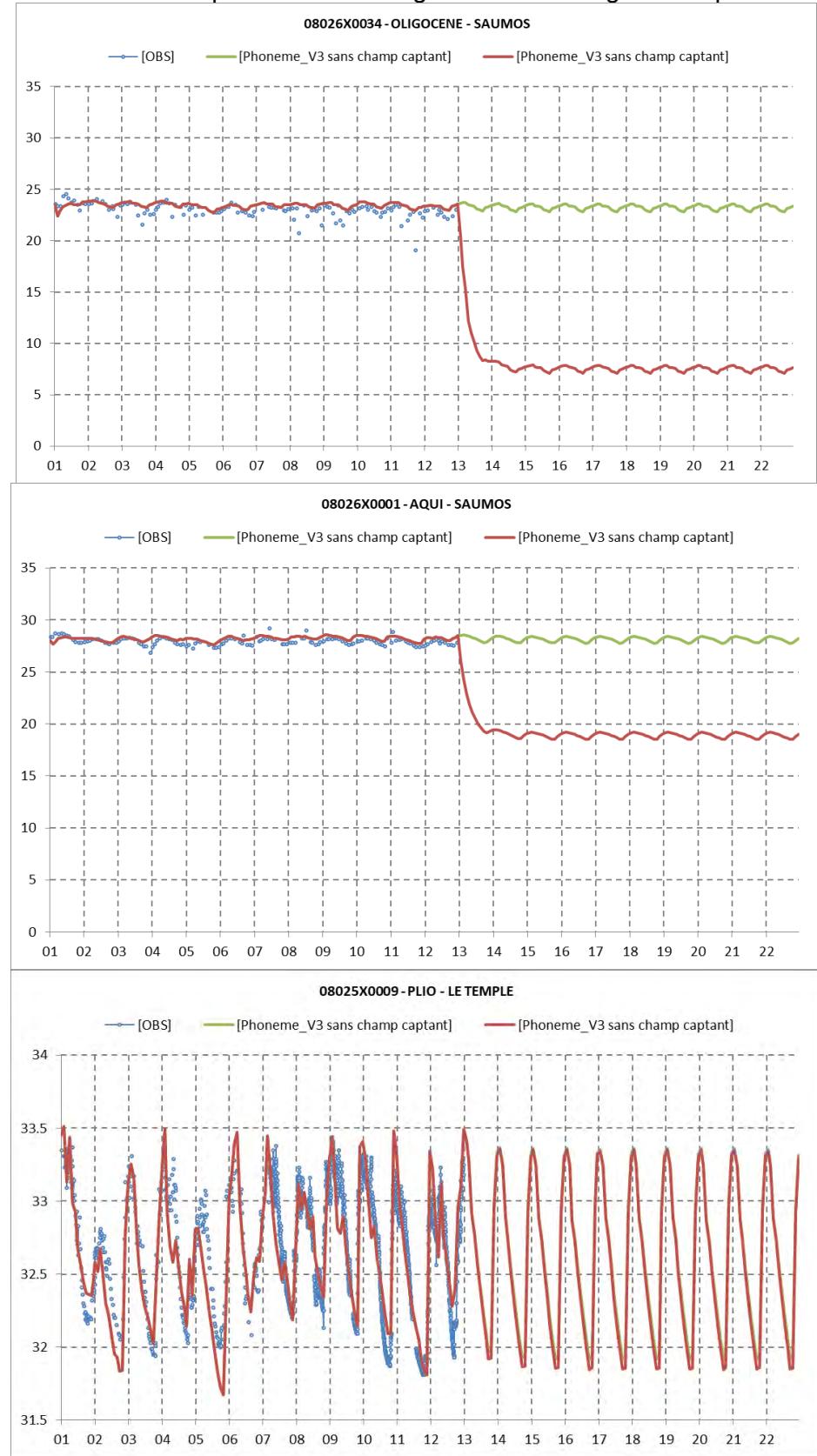


Figure 47 : Exemple de chroniques sur le secteur d'implantation du champ captant

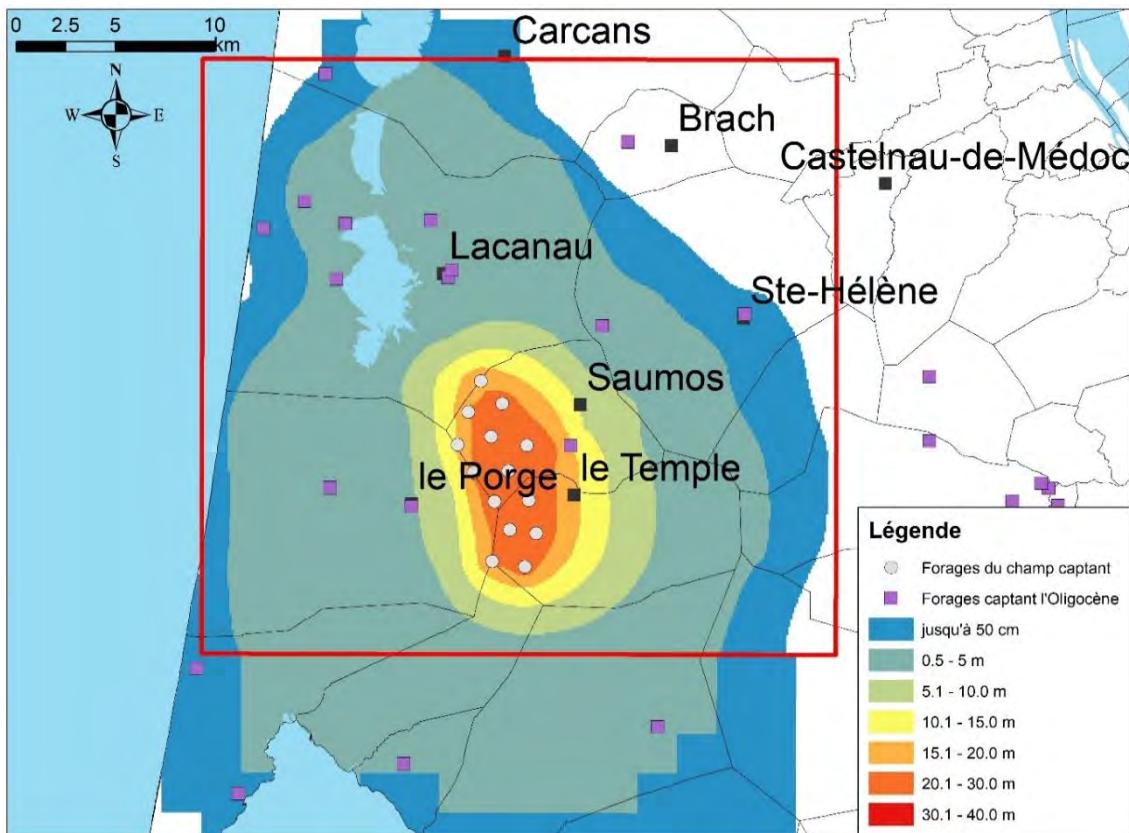


Figure 48 : Impacts du projet de champ captant sur la nappe de l'Oligocène -10 millions de m³/an après 10 ans d'exploitation (basses eaux) - recharge moyenne sur 30 ans - configuration J - version 3

Numéro BSS	Ancien code	Commune	Lieu-dit	Impact moyen	Ecart type
BSS001XUGB	08026X0034	Saumos	Communal	15.31	1.66
BSS001XTPD	08018X0004	Le Porge	Gleize Vieille	1.82	0.1
BSS001XTQK	08021X0002	Lacanau	Stade Ville	1.67	0.14
BSS001XTLV	08014X0004	Lacanau	Escourette	0.65	0.05
BSS001ZCYG	08254X0011	Andernos	Saint-Hubert	0.53	0.06
BSS001XTUS	08023X0039	Sainte-Hélène	Station	0.2	0.03
BSS001WVPC	07786X0001	Brach	Le Mayne	0.02	0.01

Figure 49 : Impact sur les forages oligocènes alentours

Les impacts maximums sur la nappe de l'Aquitainien sont inférieurs à 25 m, soit une atténuation de l'ordre de 10 m par rapport à l'Oligocène. La réduction des impacts est encore plus forte entre le Langhien-Serravallien et l'Aquitainien puisque les impacts sont inférieurs à 50 cm.

Les rabattements maximums simulés dans la nappe libre du Plio-Quaternaire sont de 11 cm (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Du fait de la recharge naturelle liée aux précipitations hivernales, cette nappe libre présente des variations saisonnières avec des périodes de basses eaux et des périodes de hautes eaux. Les impacts liés au projet sont donc variables dans le temps et dans l'espace en fonction des saisons. En considérant une recharge moyenne calculée sur les 30 dernières années, les impacts maximums sont compris entre 9 cm et 11 cm et les surfaces impactées varient entre 6 000 hectares (en mars) et 16 500 hectares (en septembre).

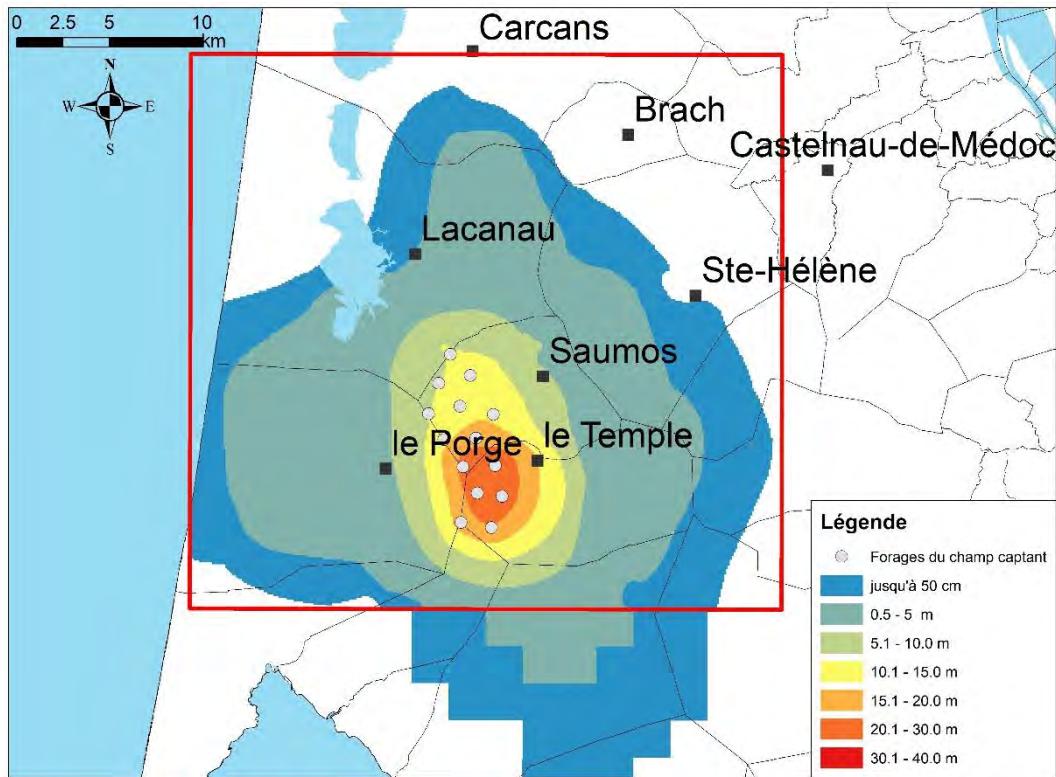


Figure 50 : Impacts du projet de champ captant sur la nappe de l'Aquitainien -10 millions de m³/an après 10 ans d'exploitation (basses eaux) - recharge moyenne sur 30 ans- configuration J - version 3

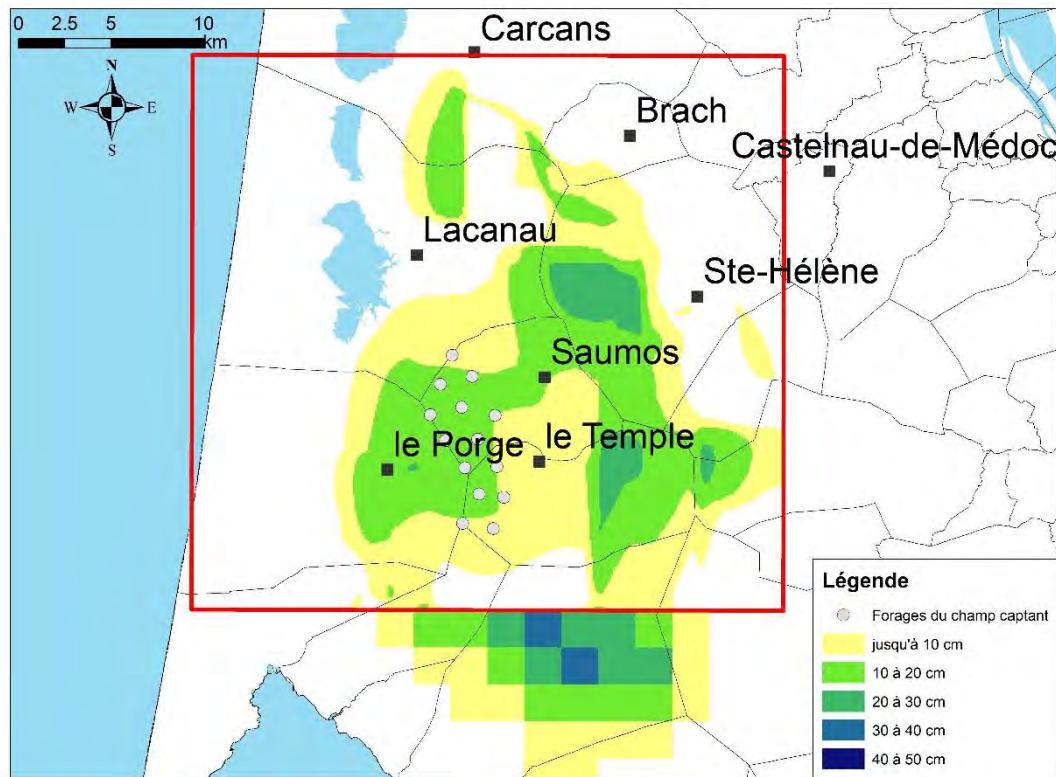


Figure 51 : Impacts du projet de champ captant sur la nappe du Langhien-Serravallien - 10 millions de m³/an après 10 ans d'exploitation (basses eaux) - recharge moyenne sur 30 ans - configuration J - version 3

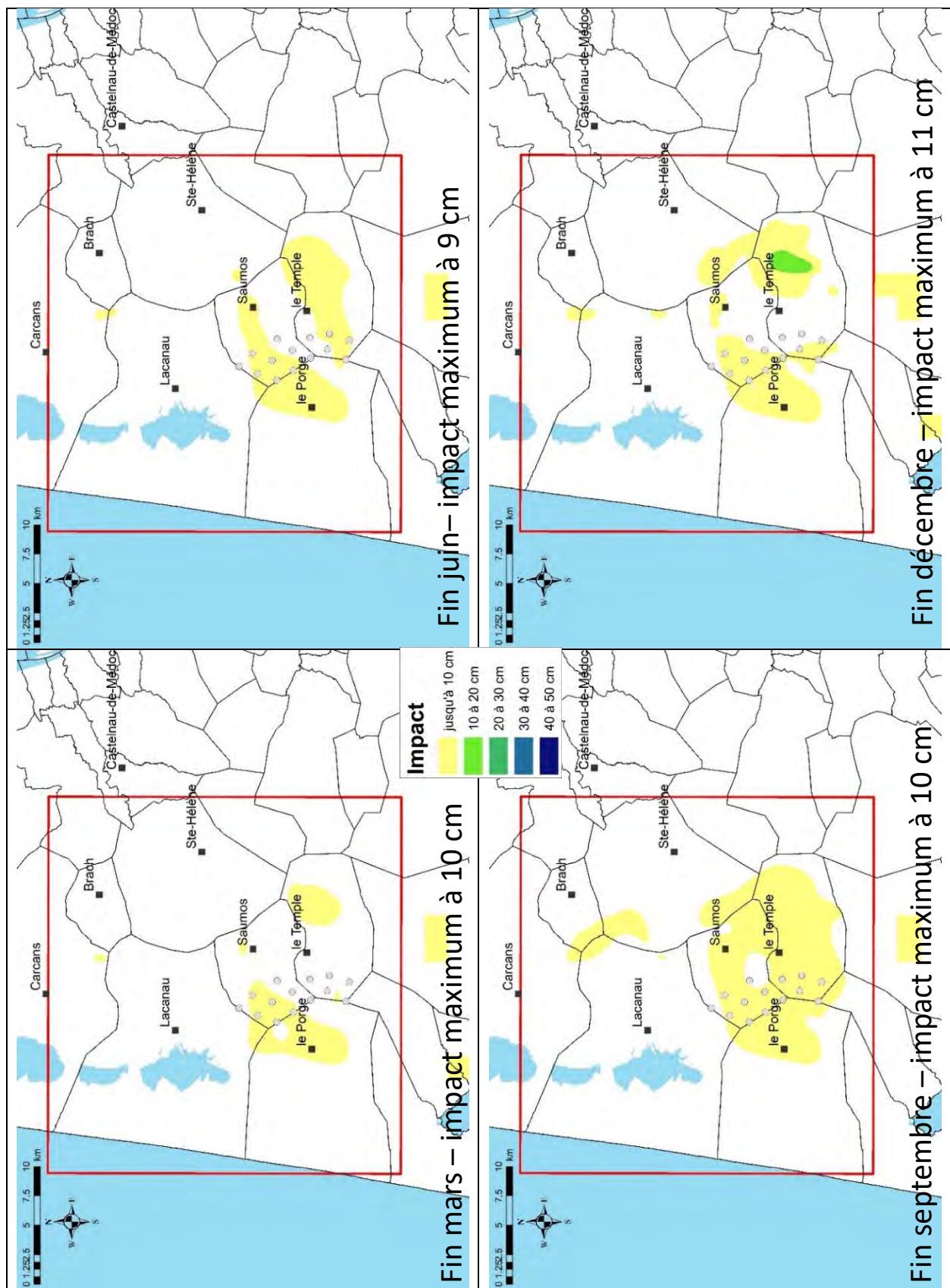


Figure 52 : Impacts saisonniers du projet de champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire -10 millions de m³/an- recharge moyenne sur 30 ans- configuration J – version 3

L'impact sur le réseau hydrographique (Figure 51) a également été évalué en comparant sur la période prospective les écarts de débits entre scénario tendanciel (sans champ captant) et scénario d'exploitation (avec champ captant). Les écarts observés sont non nuls mais cependant négligeables car inférieurs à l'erreur potentielle sur une mesure de débit de l'ordre de 5 %.

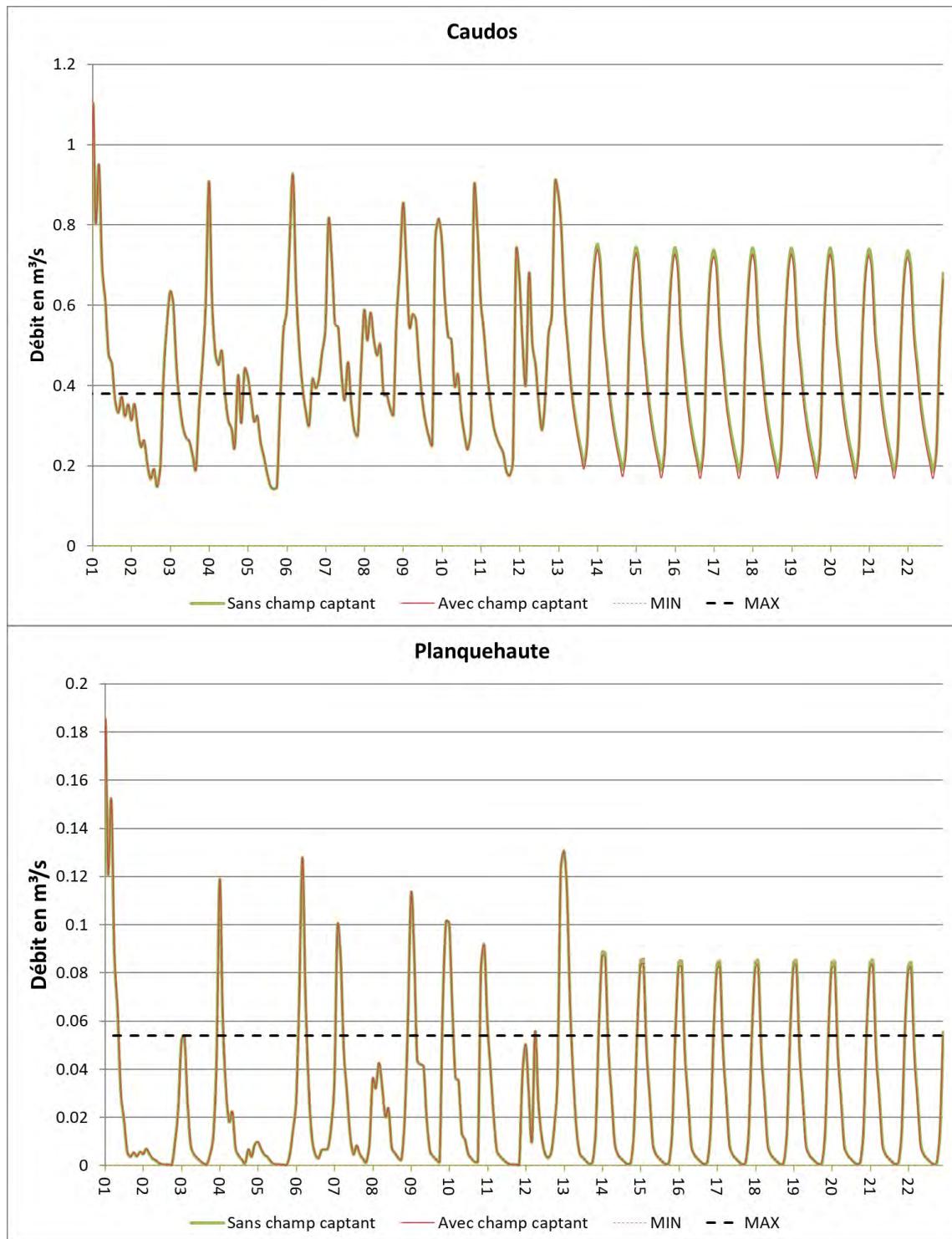


Figure 53 : Impact sur le réseau hydrographique

4.3. APPROCHE RETROSPECTIVE - IMPACT DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES CONNUES

4.3.1. Description

L'approche rétrospective consiste à considérer une exploitation du champ captant dans des conditions climatiques déjà observées de manière à pouvoir analyser les résultats d'impact au regard d'évènements climatiques particuliers tels que les périodes de sécheresse majeures. Dans ce cadre le modèle simule les écoulements sur la période 1976-2012 avec une mise en place fictive du champ captant à partir de 1980 et jusqu'en 2012. Différents points de contrôle sont utilisés pour observer les impacts générés. Les prélèvements et les conditions climatiques sont les mêmes que celles utilisées pour le calage du modèle.

4.3.2. Résultats

Ici c'est surtout l'impact au Plio-Quaternaire qui fait l'objet des analyses effectuées dans le cadre de cette approche. Au total 8 points ont été utilisés pour réaliser le graphique en figure 54. Ils ont été choisis pour intégrer les secteurs présentant les rabattements les plus importants simulés dans le cadre de l'approche prospective. Les rabattements montrent des fluctuations saisonnières, ils sont quasi nuls en période de hautes eaux et atteignent au maximum 13 cm pour la valeur simulée la plus basse (décembre 2002). La valeur moyenne de l'impact sur ces différents points de contrôle est de 4 cm. Il apparaît donc que l'utilisation des conditions climatiques réelles se traduit par des impacts simulés moyens moins forts que l'utilisation de valeurs moyennées sur 30 ans. Les impacts les plus forts sont simulés pour les périodes de basses eaux faisant suite à un hiver peu pluvieux avec une faible recharge de la nappe (ex hiver 2002-2003).

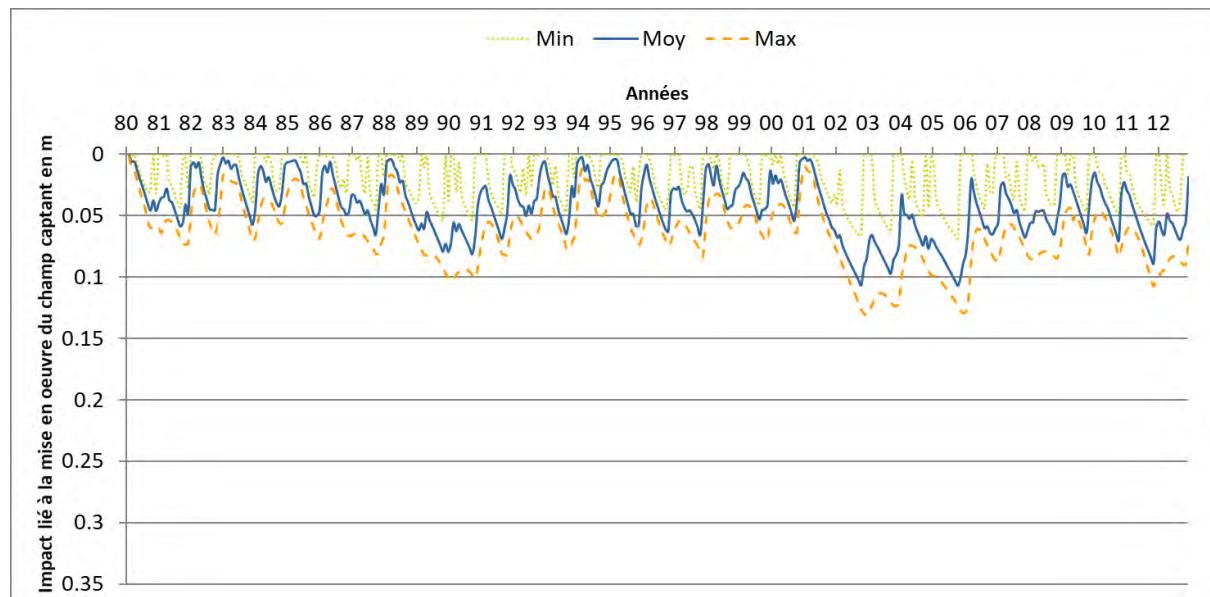
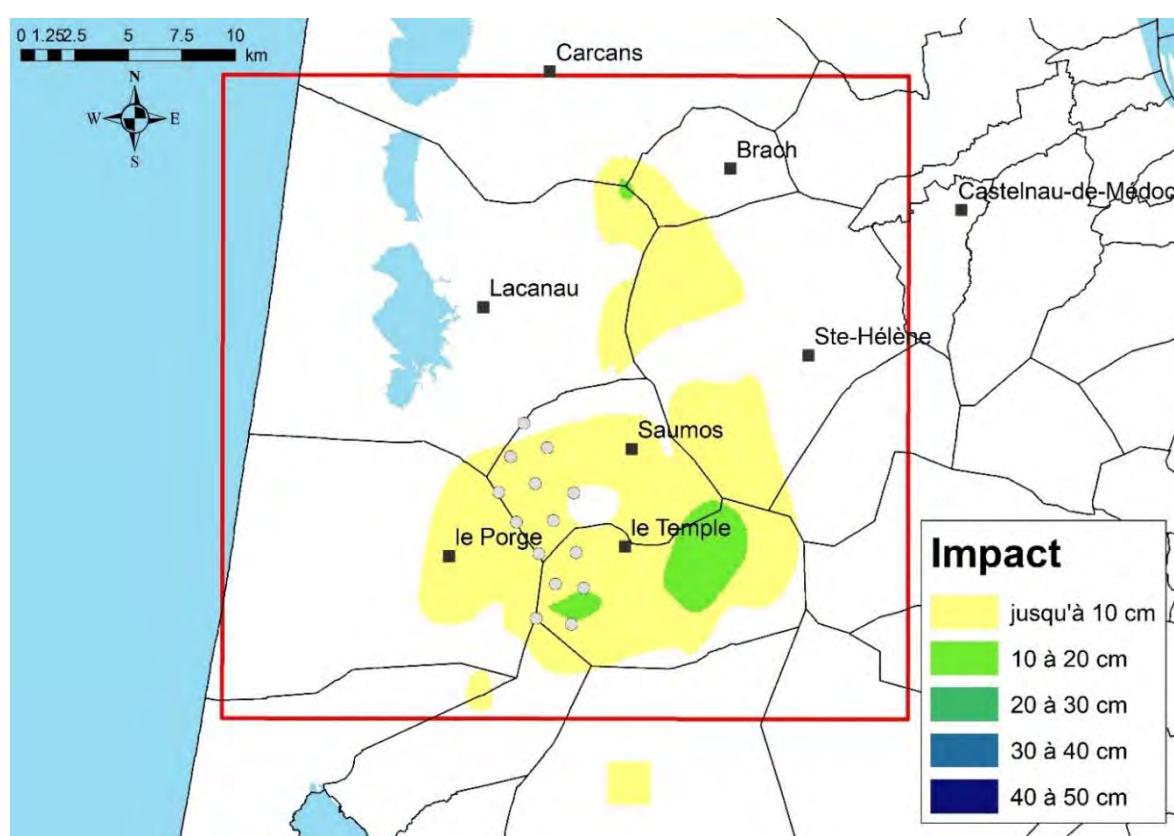
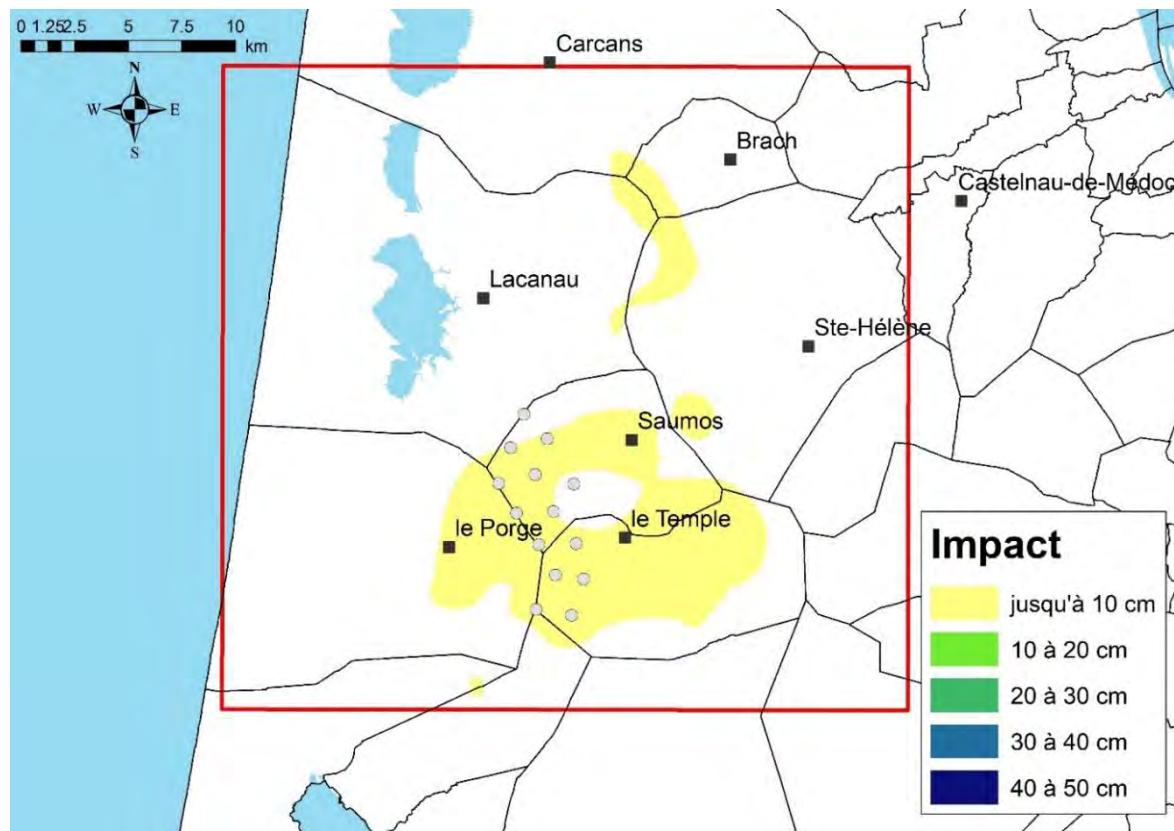


Figure 54 : Ecarts min, moy et max pour 8 points de contrôle entre simulations avec et sans champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire - 10 millions de m³/an - configuration J - version 3

Les périodes de sécheresse de septembre 1989 (Figure 55) et septembre 2003 (Figure 56) qui correspondent aux événements les plus marquants, montrent respectivement des impacts maximums de 9 et 12 cm ce qui reste dans la gamme des impacts simulés dans l'approche prospective.



Le calcul des termes de stockage (en valeur algébrique et exprimés en débits), s'effectue dans MARTHE selon l'état de la maille de calcul (en charge ou pas), le logiciel utilisera donc :

- soit le coefficient d'emmagasinement libre S_L si la maille reste à surface libre pendant tout le pas de calcul,
- soit le coefficient d'emmagasinement captif ($S_C = S_s \times e$) si la maille reste captive pendant tout le pas de calcul (avec S_s le coefficient d'emmagasinement captif spécifique et e l'épaisseur de la maille),
- soit, si l'état change pendant le temps de calcul, le débit de stockage Q_S

$$Q_S = SURF \times \frac{S_C \times [H(t) - TOIT] + S_L \times [TOIT - H(t - dt)]}{dt}$$

si la maille devient en charge

$$Q_S = SURF \times \frac{S_L \times [H(t) - TOIT] + S_C \times [TOIT - H(t - dt)]}{dt}$$

si la maille devient à surface libre.

Dans tous les cas, le débit de stockage s'écrit :

$$Q_S = SURF \times \frac{S_F \times [H(t) - TOIT] + S_D \times [TOIT - H(t - dt)]}{dt}$$

Avec :

- S_F = coefficient d'emmagasinement à l'état final
- S_D = coefficient d'emmagasinement à l'état initial
- $TOIT$ = cote du toit de l'aquifère

Quand $S_F = S_D$ on obtient :

$$Q_S = SURF \times S \times \frac{[H(t) - H(t - dt)]}{dt}$$

Les variations cumulées de stock au cours du temps dans un aquifère sont influencées par des facteurs climatiques (recharge plus ou moins importante), anthropiques (prélèvements) et hydrogéologiques (propriétés physiques des réservoirs : perméabilité et coefficient d'emmagasinement). Sur la période de référence (1976 – 2012) les paramètres climatiques et anthropiques (variables dans le temps) contrôlent l'évolution des stocks.

Pour évaluer l'impact du champ captant sur l'évolution du stock dans les différentes couches du modèle, les variations de stock (algébriques) d'un pas de temps au suivant ont été cumulées à partir du premier pas de temps de cette simulation soit, janvier 1976 (Figure 57).

Les variations cumulées de stock sont beaucoup plus importantes en relatif pour la nappe libre du Plio-Quaternaire du fait de la valeur de coefficient d'emmagasinement. Elles varient de manière saisonnière en liaison avec la recharge et la vidange naturelle de la nappe. Les valeurs reviennent régulièrement à des valeurs équivalentes à l'état initial de janvier 1976. Il n'y a pas de tendance significative au déstockage de la nappe du Plio-Quaternaire. Le stock des aquifères de l'Oligocène et du Miocène (Aquitainien et Langhien-Serravallien) reste également stable. L'ordre de grandeur des variations est beaucoup plus faible en raison des valeurs de coefficient d'emmagasinement des nappes captives. Pour le scénario avec champ captant il n'apparaît pas

de tendance au déstockage. La mise en œuvre du champ captant n'induirait donc pas pour les réservoirs considérés, de déstockage significatif.

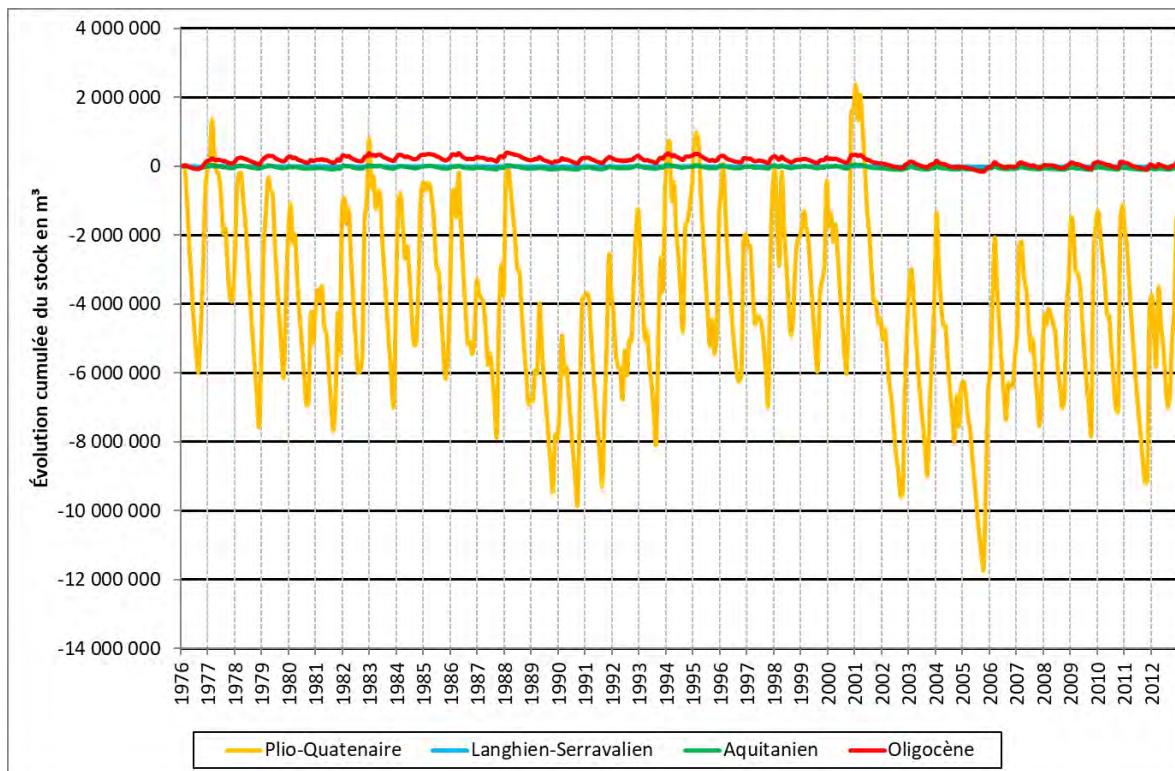


Figure 57 : Variation cumulée du stock pour le scénario d'exploitation (avec champ captant) pour l'aquifère de l'Oligocène et les réservoirs sus-jacents - champ captant 10 millions de m³/an - configuration J - version 3

4.4. APPROCHE PROSPECTIVE LONG TERME - IMPACT DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES CONNUES

L'approche prospective long terme a été réalisée en utilisant les projections climatiques basé sur les scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP 2.6 et RCP 8.5 provenant du portail DRIAS de météo France issues de l'expérience CNRM2014. Le modèle climatique utilisé est le modèle ALADIN (ALADIN-Climat v4). Les scénarios RCP 2.6 et 8.5 ont été utilisés lors du 5ème rapport du GIEC en 2014 (Moss, et al., 2010). Ils constituent des scénarios de référence de l'évolution du climat sur la période 2006-2300. Le scénario RCP 8.5 est considéré comme le plus « pessimiste », le scénario RCP 2.6, correspond schématiquement aux engagements de la conférence de Paris 2015.

Dans cette approche, le modèle simule les écoulements sur la période 1976-2100 avec une mise en place fictive du champ captant à partir de 1980 et jusqu'en 2100. Sur la période 1976-2012, les prélèvements et les conditions climatiques sont les mêmes que celles utilisées pour le calage du modèle. Les projections climatiques de Météo France ont été intégrées de 2012 à 2100 au pas de temps journalier pour calculer les bilans hydroclimatiques dans le module Gardenia. Sur cette même période, ce sont les prélèvements trimestriels de l'année 2012 qui sont utilisés ainsi que les conditions aux limites de cette même année.

Un total de 24 points de contrôle a été utilisé pour observer les impacts générés au niveau de la nappe du Plio-Quaternaire (Loustau, et al., 2017).. Les points ont été positionnés en croisant les

surfaces occupées par des pins (source CRPF) et les maximums d'impacts générés par les versions 2.1 et 2.2 du modèle PHONEME dans le cadre d'approche prospectives court terme de manière à obtenir un échantillonnage représentatif des classes d'impact du champ captant dans sa configuration J.

Dans cette approche, quatre simulations ont été réalisées. En effet, pour chaque scénario d'émission de gaz à effet de serre (RCP 2.6 et RCP 8.5) une simulation sans champ captant (scénario tendanciel) et une simulation avec champ captant (scénario d'exploitation) ont été réalisées.

Les résultats des simulations réalisées avec le scénario RCP 2.6 (Figure 58) montrent une valeur moyenne de l'impact sur ces différents points de contrôle de 2 cm. Les impacts les plus forts atteignant 11 cm, des écarts supérieurs à 10 cm n'ont été atteint que 6 fois sur une période de 90 ans. L'impact maximum atteint le plus fréquemment la valeur de 8 cm. Il faut cependant garder à l'esprit que ce scénario est considéré comme favorable et que la tendance actuelle d'évolution du climat a tendance à s'éloigner de cette trajectoire.

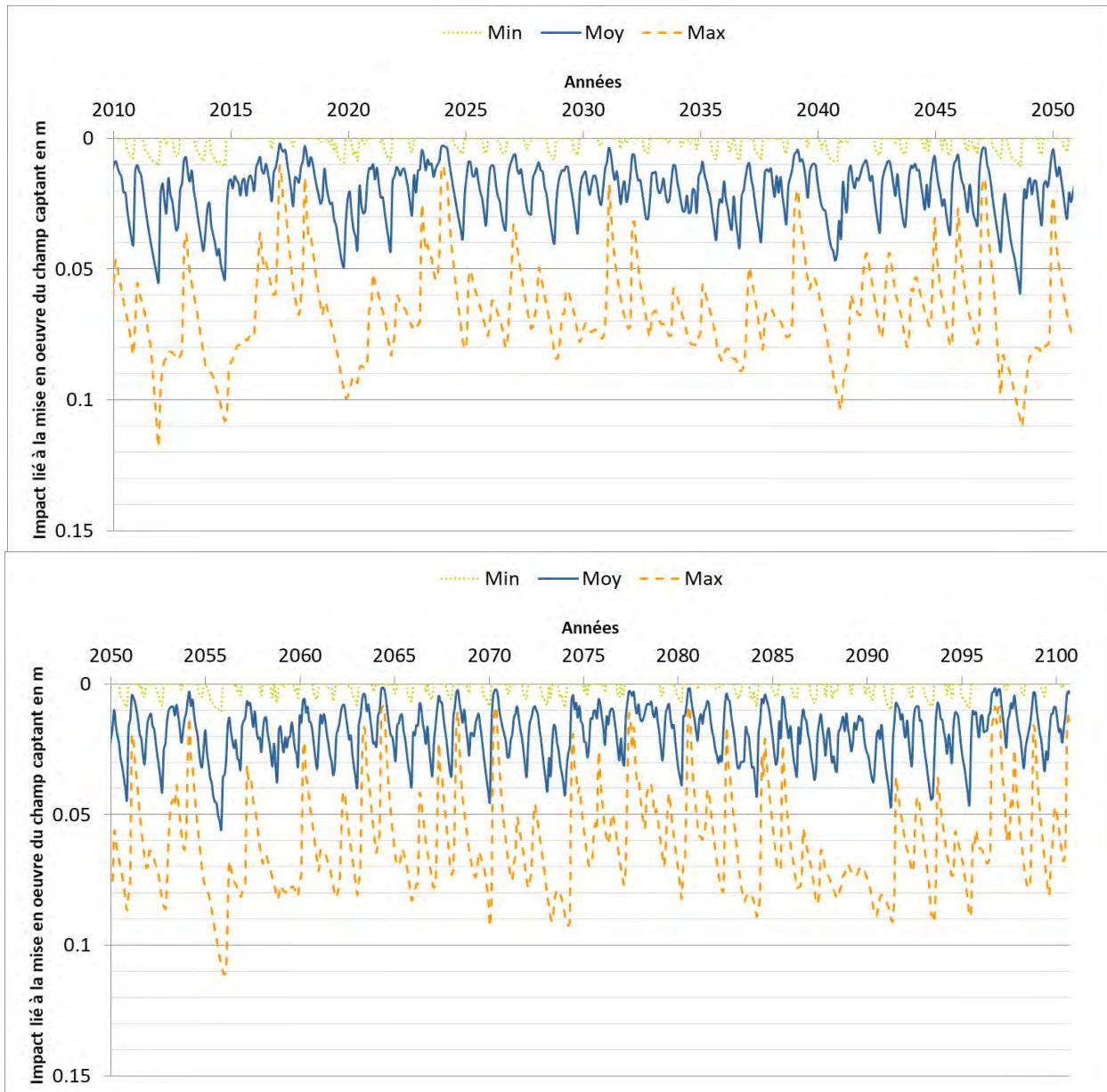


Figure 58 : Ecarts min, moy et max pour 24 points de contrôle entre simulations avec et sans champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire - 10 millions de m³/an - configuration J - recharge calculée à partir du RCP 2.6 - version 2.2

Les résultats des simulations réalisées avec le scénario RCP 8.5 (Figure 59) montrent une valeur moyenne de l'impact sur ces différents points de contrôle identique à celle du scénario RCP 2.6 de 2 cm. Les impacts les plus forts atteignant 15 cm. Les écarts supérieurs à 10 cm sont plus fréquents puisqu'ils sont atteints 44 fois sur une période de 90 ans. L'impact maximum atteint le plus fréquemment reste à une valeur de 8 cm. Ce scénario, considéré comme le plus « pessimiste », se traduit donc par des impacts plus intenses et plus fréquents. Ces valeurs restent cependant dans des gammes cohérentes avec les autres approches utilisées (prospectives et rétrospectives).

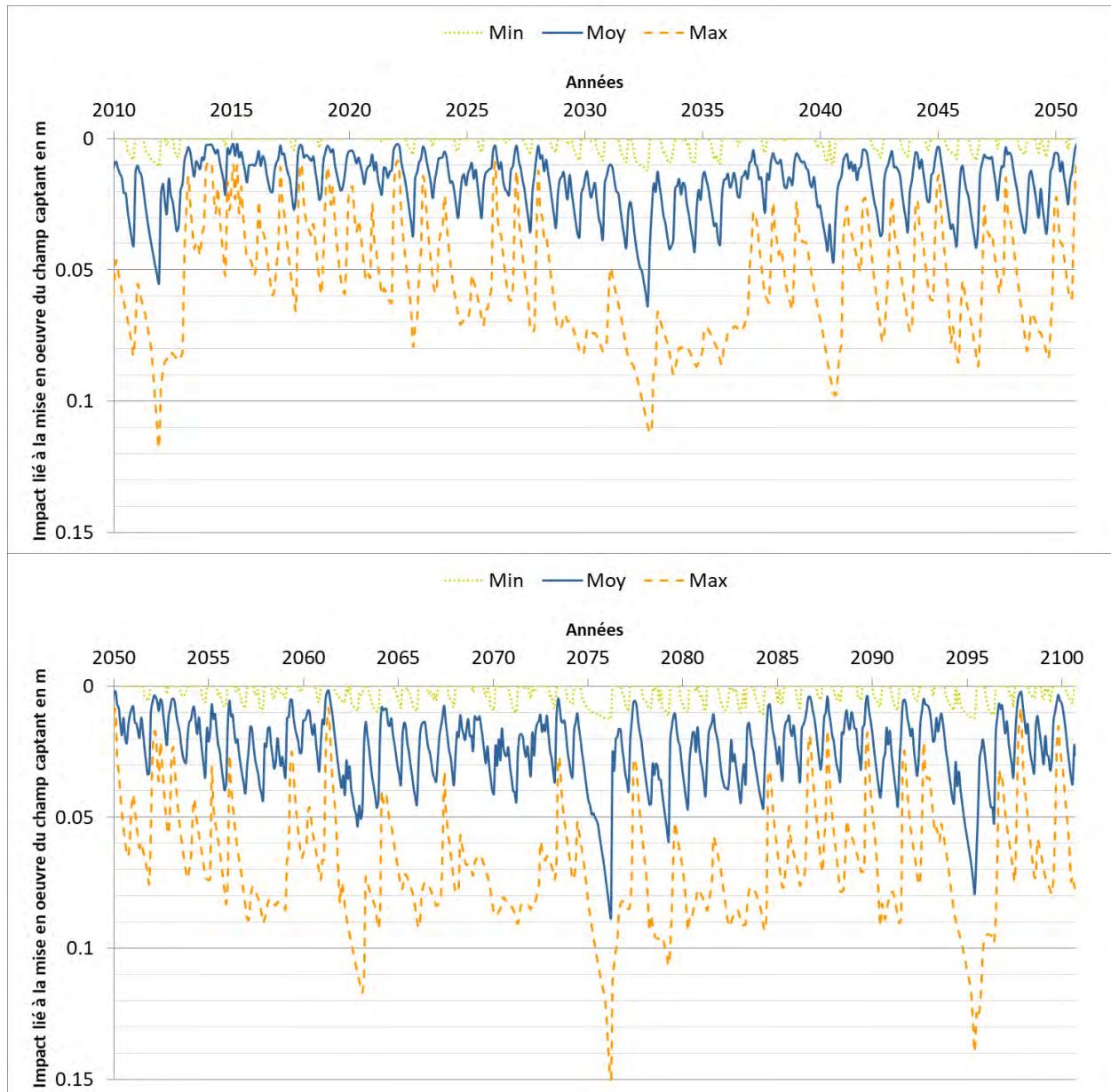


Figure 59 : Ecarts min, moy et max pour 24 points de contrôles entre simulation avec et sans champ captant dans la nappe du Plio-Quaternaire - 10 millions de m³/an - configuration J - recharge calculée à partir du RCP 8.5 - version 2.2

Les résultats sur la modification du régime de la nappe du Plio-Quaternaire sur la productivité de peuplements de Pin maritime sont décrits dans le rapport de l'INRA (Loustau, et al., 2017).

5. Conclusion

Ce rapport décrit l'actualisation du modèle géologique et du modèle hydrodynamique élaboré spécifiquement pour évaluer l'impact du projet de champ captant des Landes du Médoc (Saltel, et al., 2015). Il détaille les améliorations apportées au modèle géologique suite aux investigations et données nouvelles acquises sur le secteur du Temple. En effet, les nouveaux forages ont permis de préciser la géologie du secteur bien qu'il y ait eu globalement peu d'écart avec la coupe prévisionnelle basée sur la géométrie PHONEME V2.1. Les épaisseurs des aquifères ayant été réduites du fait de l'interprétation des diagrphies de flux réalisées dans chaque ouvrage. La géométrie actualisée a ensuite été intégrée pour mettre à jour le modèle hydrodynamique au droit du gigogne correspondant à la zone d'influence potentielle du projet.

Dans un second temps, le modèle hydrodynamique a été recalé en apportant une attention particulière à l'interprétation et à la modélisation des pompages d'essais sur l'ensemble du secteur concerné. Ces différents essais montrent que :

- l'aquifère de l'Oligocène est très productif (réservoir fracturé),
- la nappe de l'Aquitainien présente des propriétés hydrodynamiques globalement médiocres,
- il existe une distinction entre les deux réservoirs miocènes qui présentent des niveaux à l'équilibre (hors pompage) différents, des propriétés hydrodynamiques propres des comportements distincts vis-à-vis des pompages réalisés dans les aquifères encadrants.

Les tests réalisés à Saumos en 2003 montrent que l'aquifère de l'Aquitainien réagit très fortement aux pompages effectués dans la nappe d'Oligocène, les rabattements induits sont très similaires. A contrario, aucune incidence n'est observée sur les nappes de l'Éocène et du Plio-Quaternaire. Des hausses de la piézométrie sont observées sur la nappe du Plio-Quaternaire suite aux précipitations ayant eu lieu pendant cette période. Les tests réalisés au Temple permettent de mieux appréhender le comportement de ce système aquifère multicouche. Il a fait l'objet de nombreuses simulations (modélisations analytiques, modèles simplifiés) pour cadrer au mieux les paramètres hydrodynamiques régissant les échanges inter-aquifères. Il ressort de ce travail que les modèles numériques réalisés restent des simplifications du système étudié et qu'ils ont tendance à surestimer les impacts dans les aquifères encadrants.

Par ailleurs, l'ensemble des chroniques piézométriques disponibles dans la zone d'étude a été utilisé pour contraindre le calage de l'outil en régime transitoire au pas de temps mensuel de 2001 à 2012. Le processus de calage du modèle est décrit en détail dans ce rapport.

Pour évaluer l'impact de l'exploitation d'un champ de 14 forages captant la nappe de l'Oligocène dans le secteur de Saumos-Le Temple pour une capacité de 10 millions de m³/an, plusieurs approches ont été utilisées. Pour chaque approche, deux simulations sont réalisées avec la nouvelle version du modèle PHONEME (V3). La première correspond à un scénario tendanciel sans champ captant, la seconde présente les mêmes caractéristiques (conditions climatiques, prélèvements, ...) avec en plus la mise en œuvre du parc de forages des Landes du Médoc. Les deux scénarios (tendanciel et exploitation) sont simulés sur des périodes variables selon les approches et comparées entre elles pour évaluer l'impact du projet.

Trois approches ont été utilisées pour évaluer l'impact du champ captant :

- une approche prospective court terme considérant des conditions climatiques constantes et continue dans le temps,

- une approche rétrospective utilisant les conditions climatiques connues (de 1976 à 2012),
- une approche prospective long terme à partir des projections climatiques élaborées par Météo France sur la base de deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre du GIEC.

L'approche prospective montre que pour la nappe de l'Oligocène, hormis le forage AEP de Saumos, l'impact sur les forages proches du projet reste modéré et n'influencera pas de manière significative leur régime d'exploitation.

Les impacts maximums sur la nappe de l'Aquitainien sont inférieurs à 25 m, soit une atténuation de l'ordre de 10 m par rapport à l'Oligocène. La réduction des impacts est encore plus forte entre le Langhien-Serravallien et l'Aquitainien puisque les impacts sont inférieurs à 50 cm.

Les rabattements maximums simulés dans la nappe libre du Plio-Quaternaire sont de 11 cm. Du fait de la recharge naturelle liée aux précipitations hivernales, cette nappe libre présente des variations saisonnières avec des périodes de basses eaux et des périodes de hautes eaux. Les impacts liés au projet sont donc variables dans le temps et dans l'espace en fonction des saisons. En considérant une recharge moyenne calculée sur les 30 dernières années, les impacts maximums sont compris entre 9 cm et 11 cm et les surfaces impactées varient entre 6 000 hectares (en mars) et 16 500 hectares (en septembre).

Les résultats des simulations rétrospectives et prospectives long terme viennent confirmer le fait que l'ordre de grandeur maximum de l'impact est compris entre 8 et 12 cm.

6. Bibliographie

- Ackerer, P., Delay, F., Porel, G. & Marsily, G. D., 1998. Expertise de la restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes, 43 p., 20 fig., 10 tab.
- Amraoui, N., Bichot, F., Platel, J. & Seguin, J., 1998. Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 2 - Evaluation des ressources. Ajout des couches du Santonien-Turonien, du Cénomanien et du Jurassique moyen et supérieur au modèle nord aquitain. BRGM/RR-40110-FR, 59 p. 24 fig., 13 tab., 6 ann.
- Amraoui, N. et al., 1999. Restructuration du modèle nord aquitain de gestion des nappes. Réalisation de 6 simulations pour le Schéma de Gestion des Eaux du département de la Gironde. BRGM/RR-40224-FR, 17 p.
- Bourdet, D., Ayouba, A. & Pirard, Y., 1989. Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation. Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, Volume 4, pp. 293-302.
- Bourdet, D., Ayoub, J. A. & Pirard, Y. M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis. World Oil, 196(6), pp. 95-106.
- Braneyre, M. et al., 1993. Modélisation mathématique multicouche de trois aquifères exploités du sédimentaire nord-aquitain (Oligocène - Eocène - Crétacé). R-37361, 26 p., 7 fig., 2 ann.
- Braneyre, M., Lambert, M. & Sourisseau, B., 1994. Rapport de synthèse du modèle régional multicouche du Bassin Nord-Aquitain : Calage en régime transitoire et simulations. Rapport BRGM R38006 SGN SP 94, 42 p, 29 fig, 9 ann.
- Braneyre, M., Seguin, J. & Lambert, M., 1993. Modèle conceptuel sommaire - Multicouche aquitain. Rapport BRGM R37322 BOR AQI 93, 12 p., 7 fig., 1 ann.
- Bruand, A., Duval, O. & Cousin, I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. Étude et Gestion des sols, Volume 11, 3, pp. 323-332.
- Cabaret, O., 2011. Caractérisation physique et approche numérique du rôle des aquitards dans les systèmes aquifères multicouches - Application au complexe tertiaire nord-aquitain.
- Cabaret, O. & Saltel, M., 2012. Simulations d'impacts d'un champ captant d'une capacité de 10 et 12 millions de m³ dans l'Oligocène à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) – Sainte-Hélène (33) – Rapport BRGM/RP-61290-FR, 81 p., 62 fig., 3 ann.
- Corbier, P., 2012. Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 6 - Année 3 - BRGM/RP-61303-FR, 112 pages, 59 figures, 5 annexes.
- Deruyck, B., Ehlig-Economides, C. & Joseph, J., 1992. Testing Design an Analysis. Oilfield Review, Volume 4, 2, pp. 28-45.
- FDAAPPMA33, 2010. Plan départemental pour la protection des milieux aquatiques et la gestion de la ressource piscicole de la Gironde - Extrait territoire Centre Gironde.

FDAAPPMA33, 2010. Plan départemental pour la protection des milieux aquatiques et la gestion de la ressource piscicole de la Gironde - Territoire Arcachonnais ouest Gironde.

FDAAPPMA33, 2010. Plan départemental pour la protection des milieux aquatiques et la gestion de la ressource piscicole de la Gironde - Territoire Médoc.

Gomez, E., Pétron, N. & Buscarlet, E., 2010. Utilisation du Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du Nord du Bassin aquitain - BRGM/RP-57878-FR, 61 p., 30 fig. 13 ann.

Hydro Assistance, 2006. Forage F2bis - Commune de Le Porge (Gironde). Dossier d'autorisation et étude préalable à la définition des périmètres de protection du forage.

Jobard, A., 2017. Champ captant des Landes du Médoc - DOE Réalisation des forages de reconnaissance du Temple Antéa Group.

Larroque, F., 2004. Gestion globale d'un système aquifère complexe - Application à l'ensemble aquifère multicouche médocain,

Loustau, D. & Picart-Deshors, D., 2017. Projet de Champ Captant des Landes du Médoc – Mission d'étude des impacts de la modification du régime de la nappe plio-quaternaire sur la productivité de peuplements de Pin maritime - Rapport technique de la Phase 2. Analyse détaillée de l'impact du régime de la nappe phréatique dans le périmètre même du champ captant.

Marsac-Bernède, M., 2014. Suivi de la nappe de l'Oligocène - Réalisation d'un piézomètre F SH1 Lieu-dit « Touriac » - Saint Hélène (33) (N° BSS 08022X0031) - Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE).

Mazurier, C., 1992. Commune de Sainte-Hélène (Gironde) - Crédit et équipement d'un forage profond à Sainte-Hélène destiné à l'alimentation en eau potable, R 34445 AQI 4S 92, 21 p., 10 fig., 7 ann.

Moss, R. H. et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, feb, Volume 463, pp. 747--.

Nadaud, H. & Martin, G., 2006. Recherche de ressources nouvelles pour l'alimentation en eau potable dans l'aquifère de l'Oligocène dans les environs de SAINT-HELENE - Compte rendu des études 2000-2006.

Pétron, N., Abou-Akar, A. & Gomez, E., 2009. Simulation d'impact d'un champ captant dans l'aquifère Oligocène sur le secteur de Sainte-Hélène (33) à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) – BRGM/RC-57035-FR, 36 p., 11 fig., 6 ann.

Pétron, N., Abou-Akar, A. & Platel, J., 2008. Évaluation de la ressource en eau de l'Éocène dans le Bergeracois. Phase 2 : Finalisation de l'inventaire, intégration des données au modèle régional et simulations. BRGM/RP-56301-FR, 72 p., 7 ann.

Pétron, N. & Lopez, B., 2006. Actualisation du modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. Période 2001 - 2003. Rapport final - BRGM/RP-54220-FR, 26 p. 1 ann.

Pétron, N., Platel, J., Bourgine, B. & Loiseau, J., 2008. Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Année 4 - Module 4 - BRGM/RP-56614-FR, 99 p., 49 fig., 6 ann.

Pétron, N., Platel, J. & Lopez, B., 2005. Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord Aquitain de gestion des nappes - Modules 4 - Année 2 - Rapport final - BRGM/RP-53659-FR, 96 p., 43 fig., 8 tab., 8 ann.

Pétron, N., Platel, J. P. & Bourgine, B., 2006. Gestion des eaux souterraines en région aquitaine. Développement et maintenance du modèle nord-aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 3 - BRGM/RP-55242-FR, 56 p., 24 fig., 3 ann.

Pétron, N., Seguin, J. & Capdeville, J., 2003. Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine. Développements et maintenance du modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 1 - BRGM/RP-52602-FR, 56 p., 25 fig., 5 tab., 7 ann.

Renard, P., Glenz, D. & Mejias, M., 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, 17(3), pp. 589-600.

Richer de Forges A., Arrouays D. et Wilbert J. (2015). Couverture graphiques du Référentiel Régional Pédologique de la région Aquitaine : carte des pédopaysages de Gironde à 1/250 000, en format ArcInfo (shapefile). INRA InfoSol.

Saltel, M., 2012. Simulation d'impact d'un champ captant d'une capacité de 10 millions de m³ par an dans l'aquifère oligocène sur le secteur de Sainte-Hélène (33) à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) –Rapport BRGM/RP-60822-FR, 40 p., 18 fig., 3 ann.

Saltel, M. & Arnaud, L., 2015. Modèle PHONEME : construction, paramétrisation et évaluation qualitative et statistique du calage en régime transitoire. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-65368-FR, 58 p., 41 fig., 6 ann.

Saltel, M., Cabaret, O., Bourgine, B. & Loiselet, C., 2014. Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 4. BRGM/RP-63381-FR, 49 p., 28 ill., 5 ann.

Saltel, M., Faucher, A. & B., B., 2012. Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 3 – BRGM/RP-61614-FR, 45 pages, 24 figures, 3 annexes.

Saltel, M. et al., 2011. Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 2 – BRGM/RP-59 959-FR, 63 p., 38 fig., 6 ann.

Schlumberger, 2002. Well test interpretation.

Seguin, J., 1999. Contrôle qualité et gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde. Actualisation du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Période 1997-1998. BRGM/RR-40760-FR, 22 p., 10 fig., 8 tab.

Seguin, J., 1999. Restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Correction du biais de calage du modèle. BRGM/RR-40711-FR, 16 p., 11 fig.

Seguin, J., 2002. Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Actualisation du modèle nord-aquitain. Période 1999-2000. BRGM/RP-51758-FR, 22 p., 8 fig., 8 tab.

SMEGREG, 2013. Note sur la ventilation mensuelle des prélèvements en Gironde.

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

Spane, F. & Wurstner, S., 1993. DERIV: a computer program for calculating pressure derivatives for use in hydraulics test analysis. *Groundwater*, 31(5), pp. 814-822.

Thiéry, D. & Amraoui, N., 2001. Hydrological modelling of the Saône basin sensitivity to the soil model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(Issues 5–6), pp. 467-472.

Thiéry, D. (2014) – Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 126 p., 65 fig., 2 ann.

Thiéry D. (2015a) – Code de calcul MARTHE - Modélisation 3D des écoulements dans les hydrossystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.

Thiéry, D. (2015b) – Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5. Exploration des fonctionnalités de modélisation des hydrossystèmes. Rapport BRGM/RP-64997-FR. 343 p., 227 fig.

Thiéry, D. (2015c) – Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.

Annexe 1

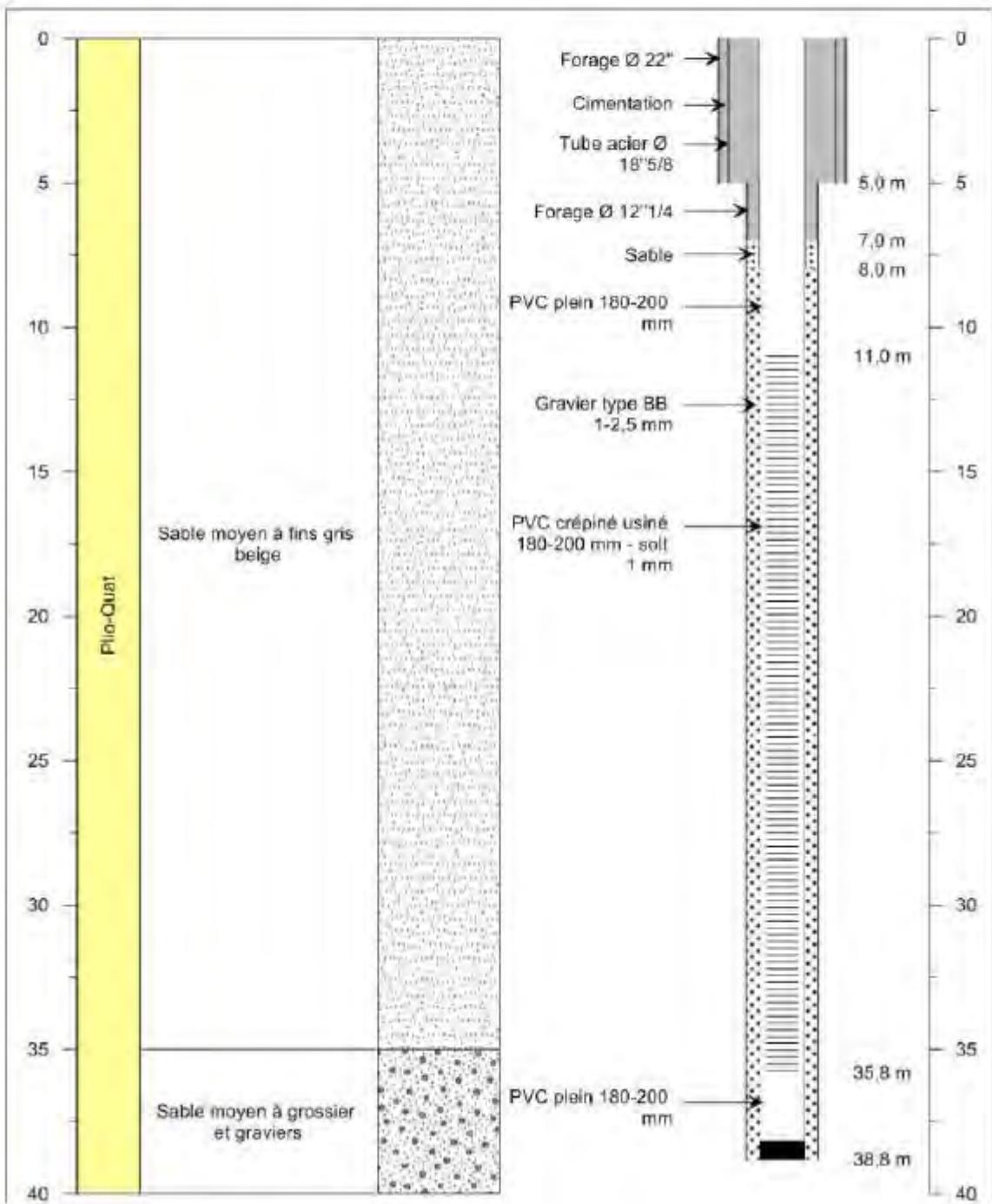
Coupes géologiques des forages du Temple



Coupe technique et géologique du forage Plio-Quaternaire au Temple

Coupe lithologique

Coupe technique

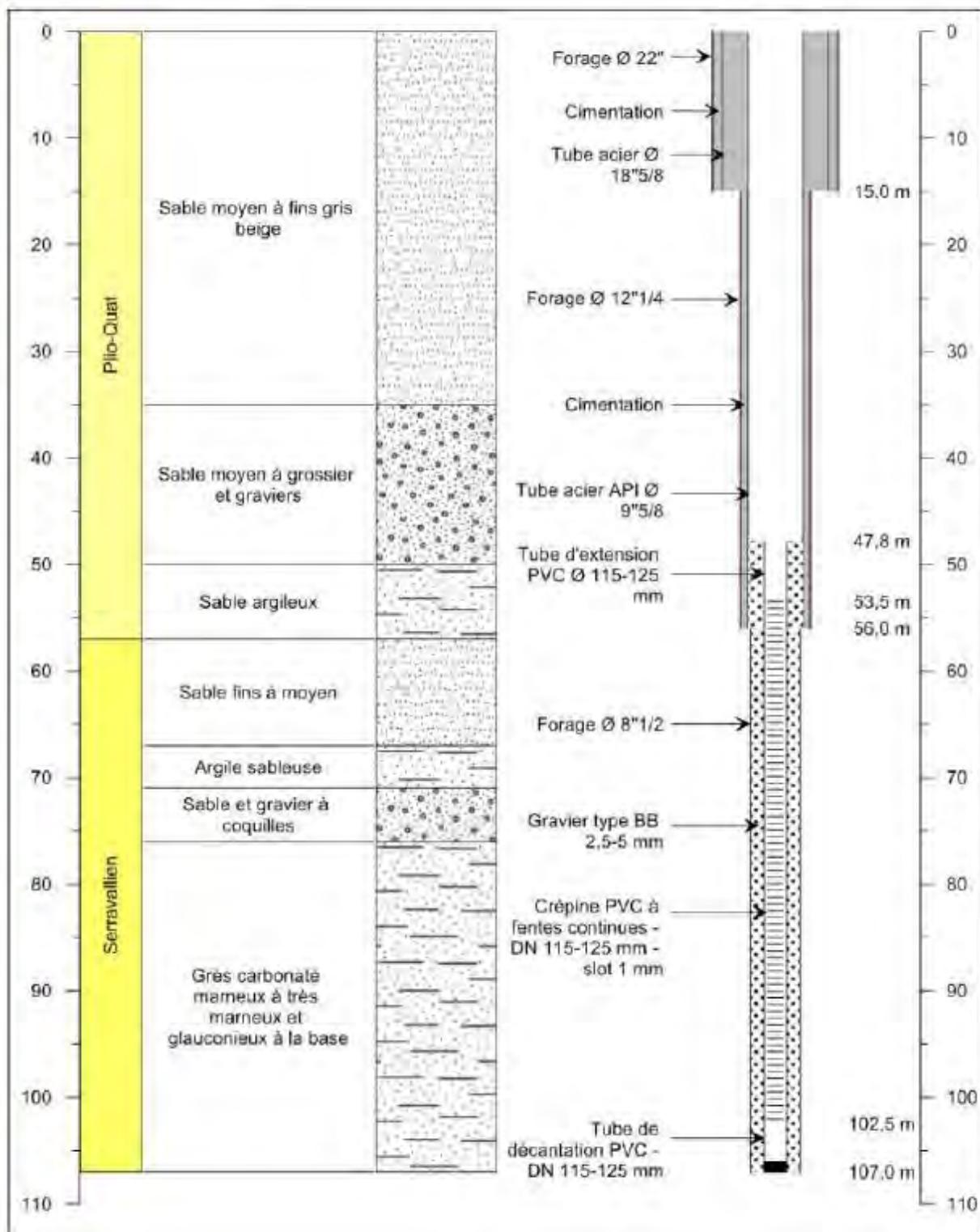




Coupe technique et géologique du forage Serravallien au Temple

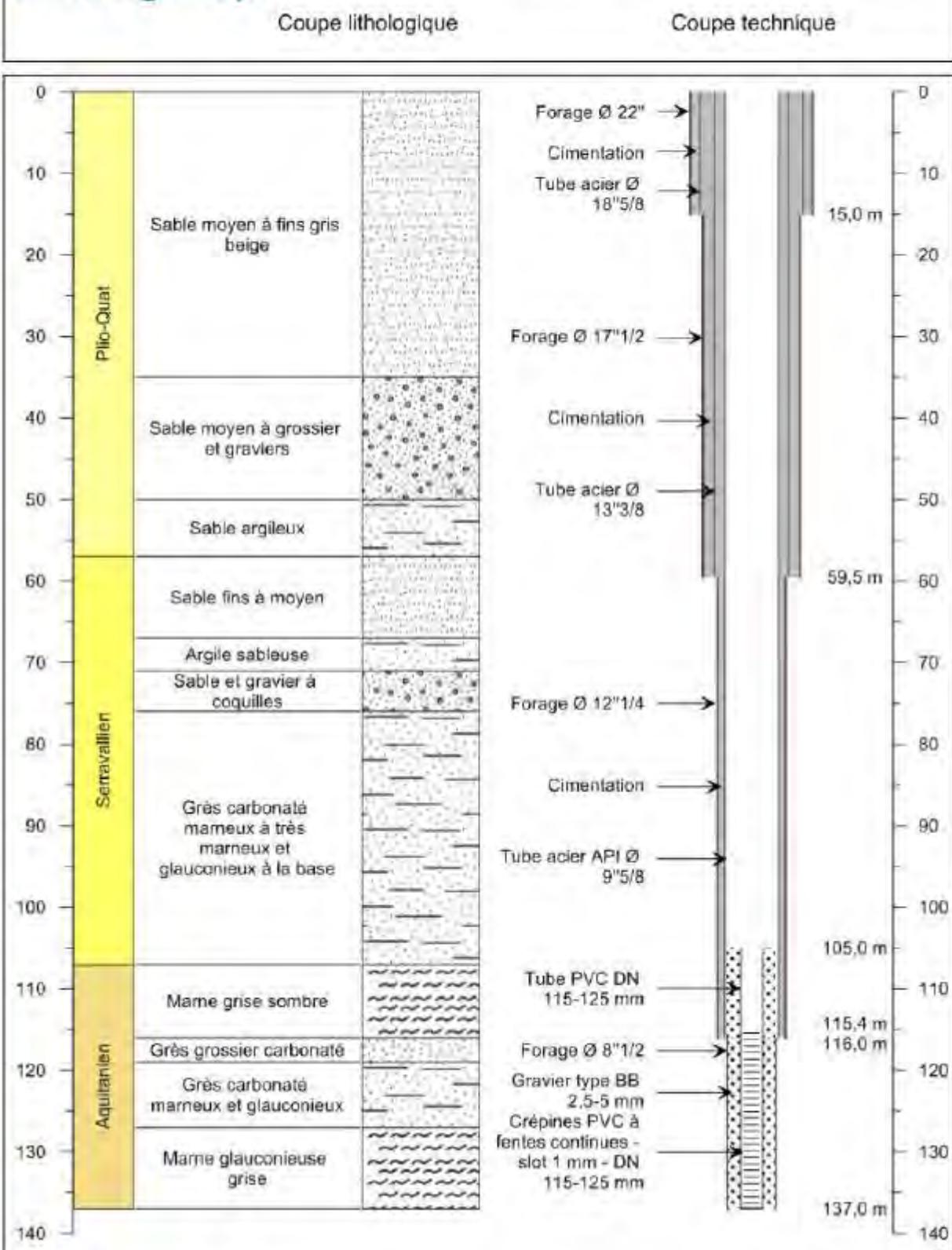
Coupe lithologique

Coupe technique





Coupe technique et géologique du forage Aquitanien au Temple

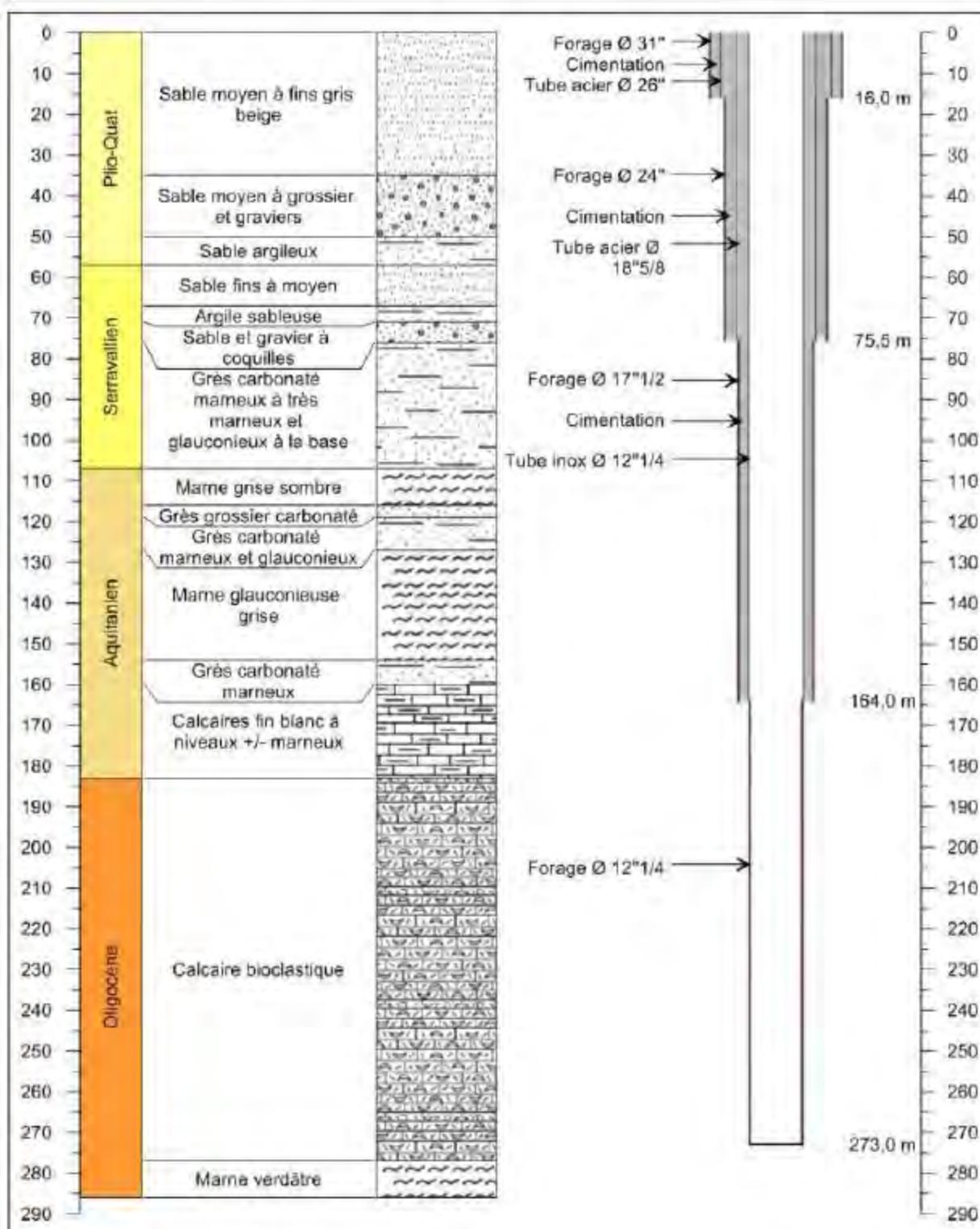




Coupe technique et géologique du forage Oligocène au Temple

Coupe lithologique

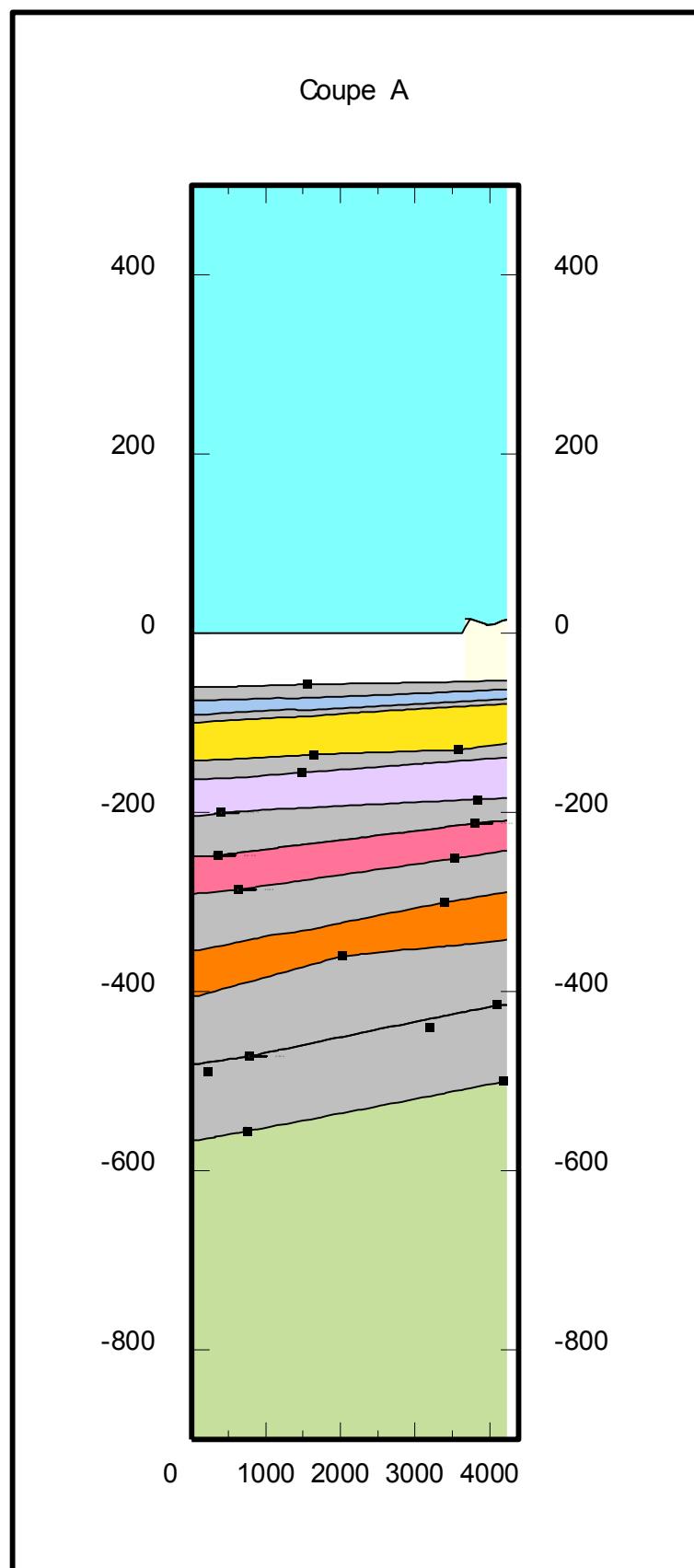
Coupe technique

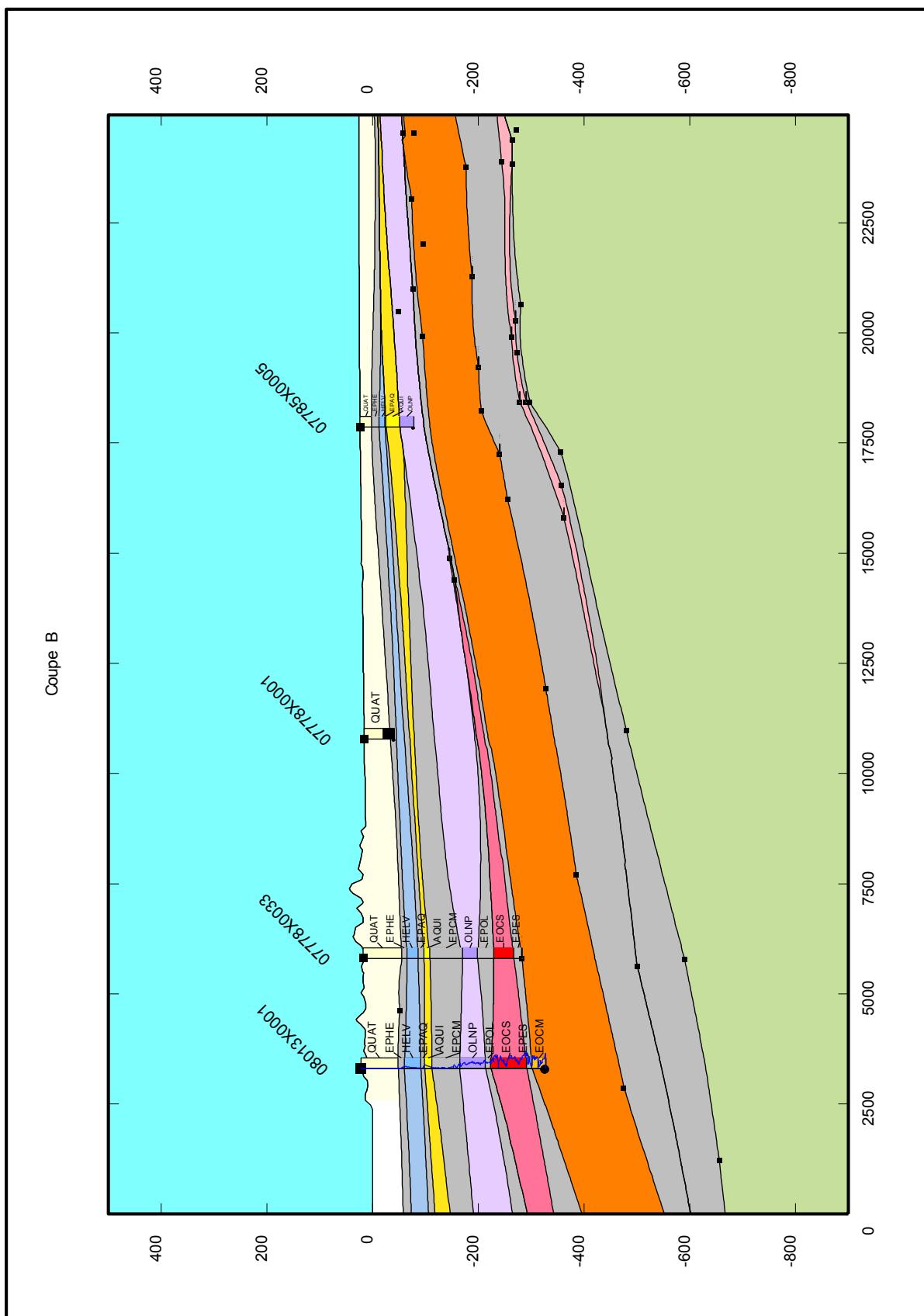


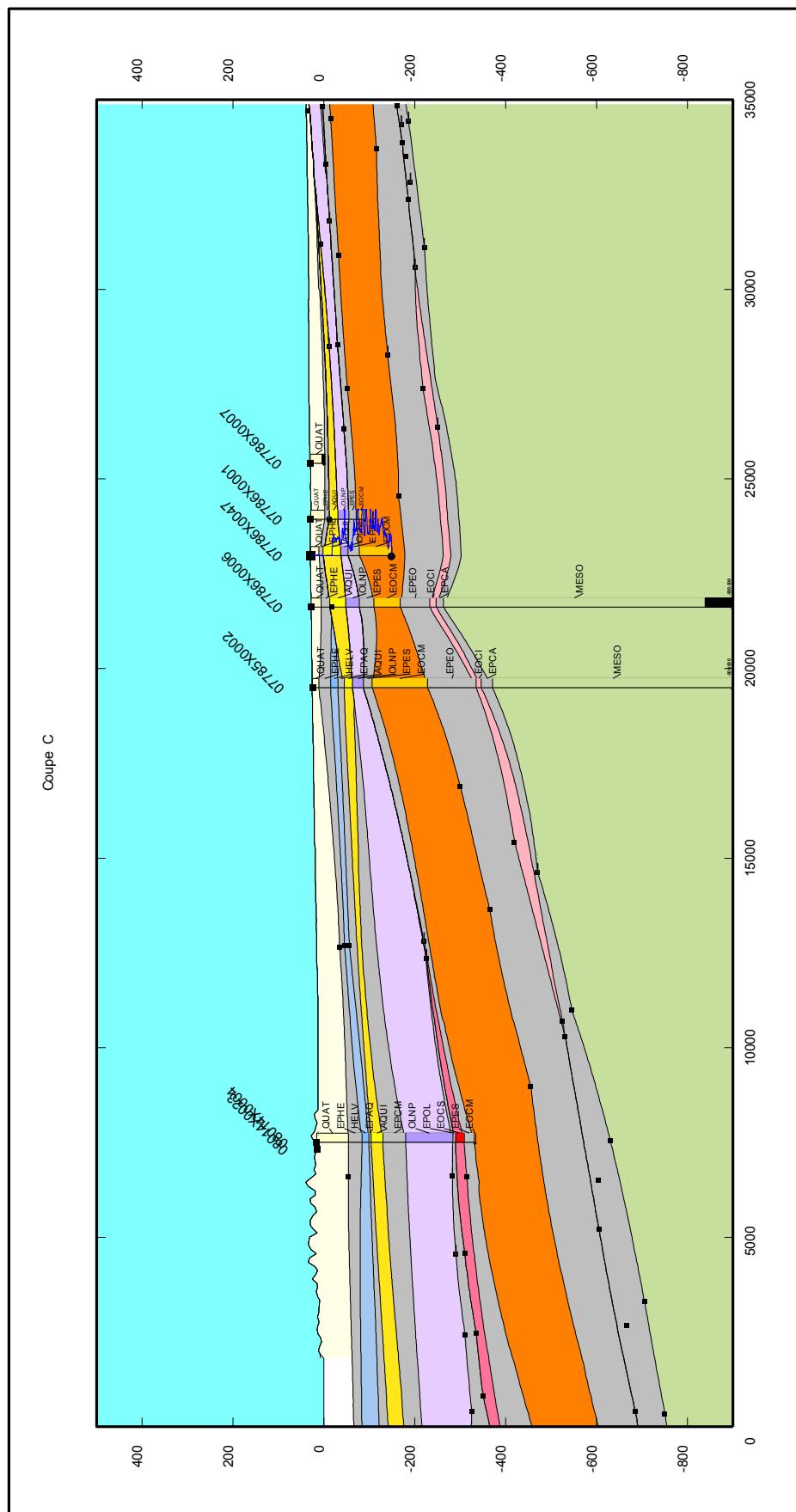
Annexe 2

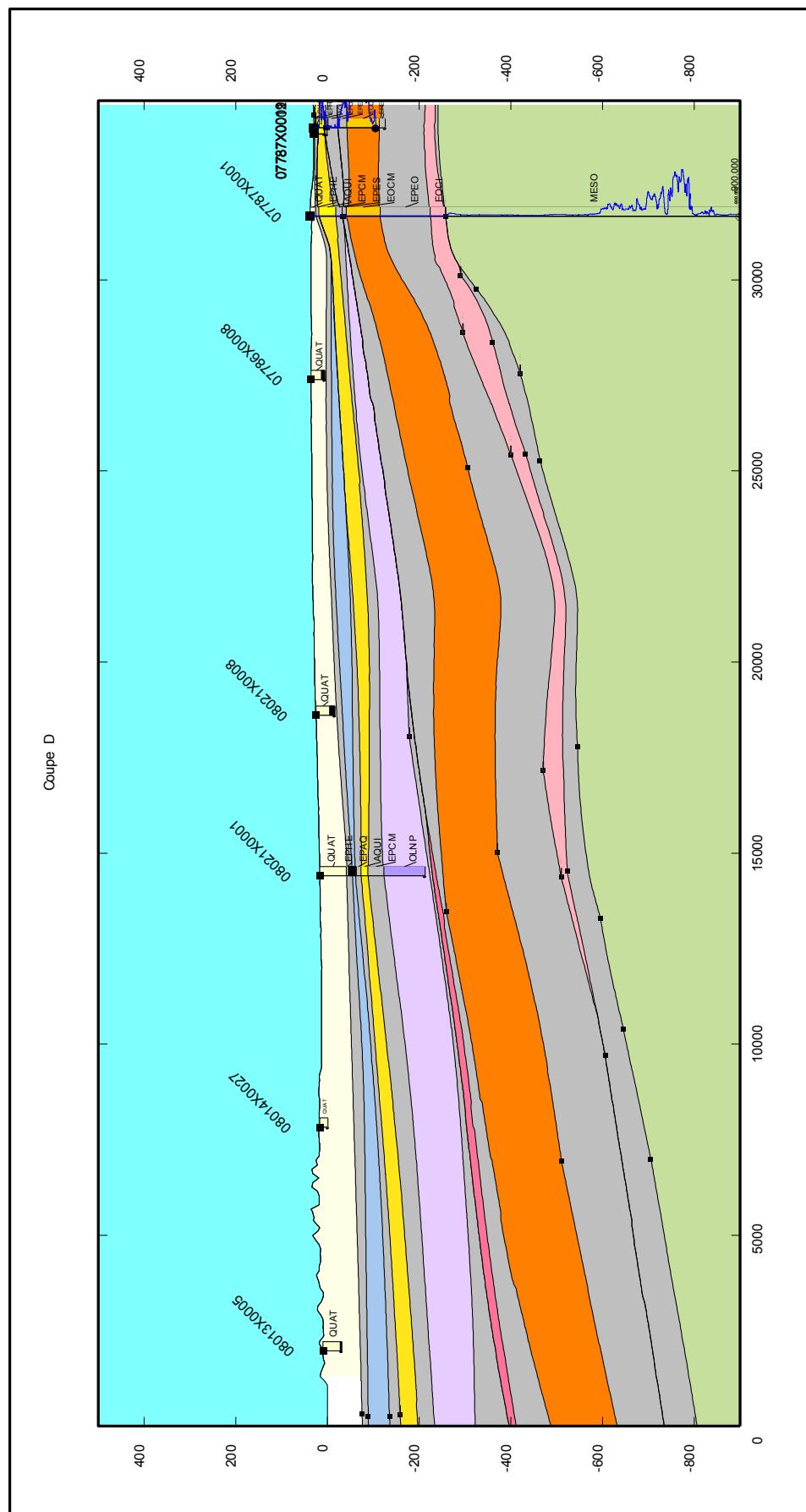
Coupes dans la géométrie du modèle géologique numérique (GDM)

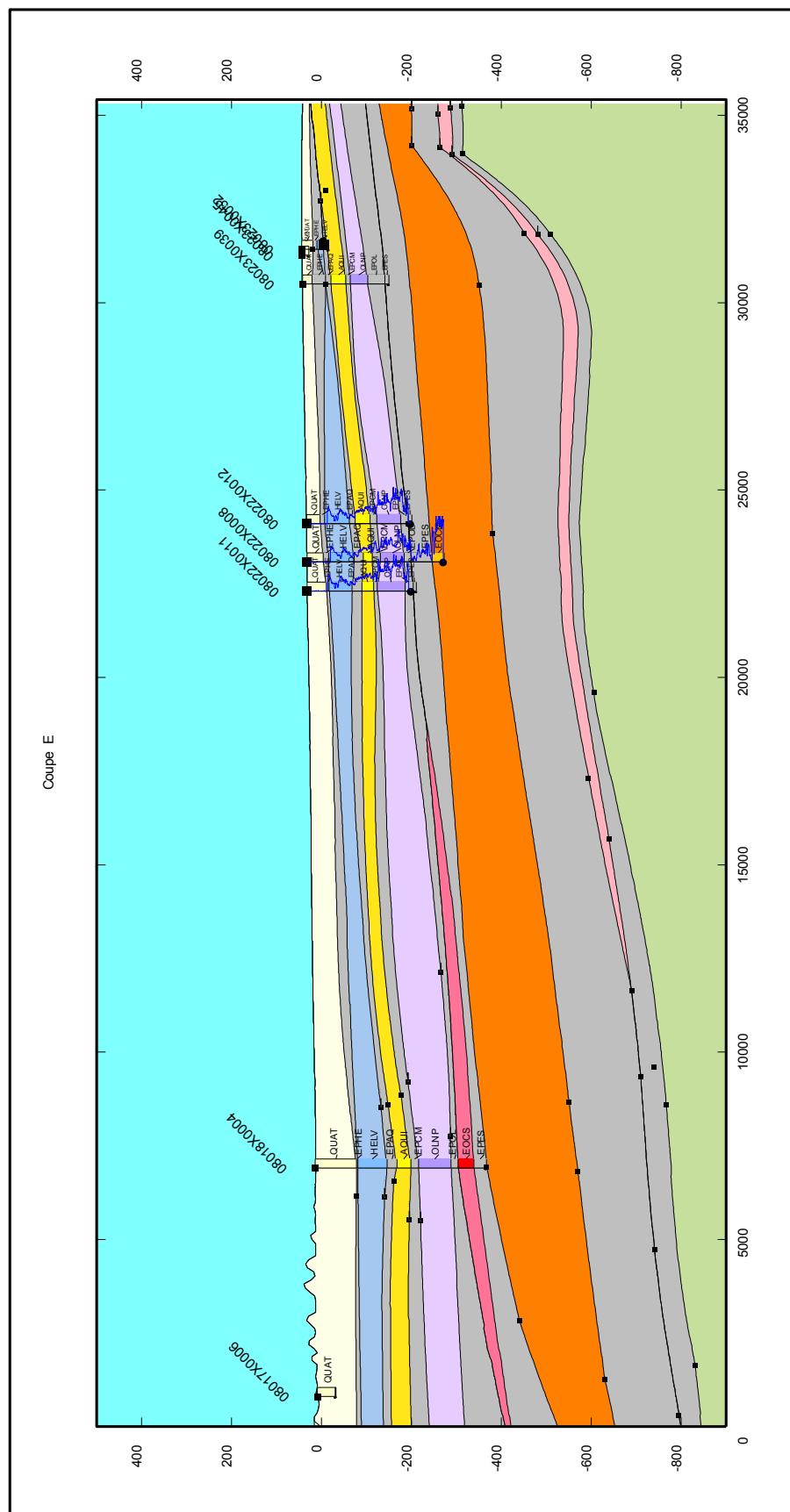
- 1  Coups réalisées dans le modèle
Ouvrages (utilisés pour la construction du modèle)

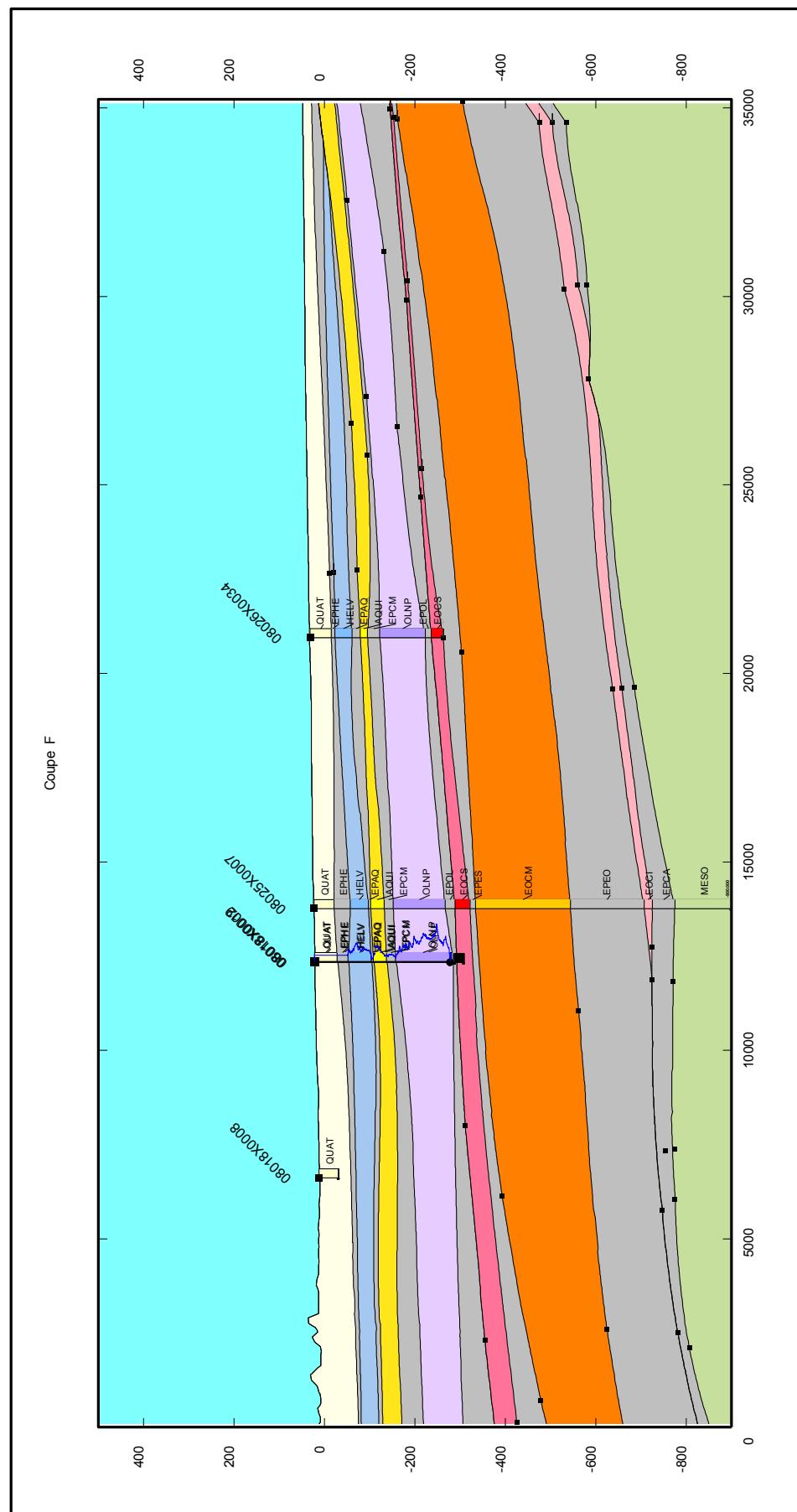


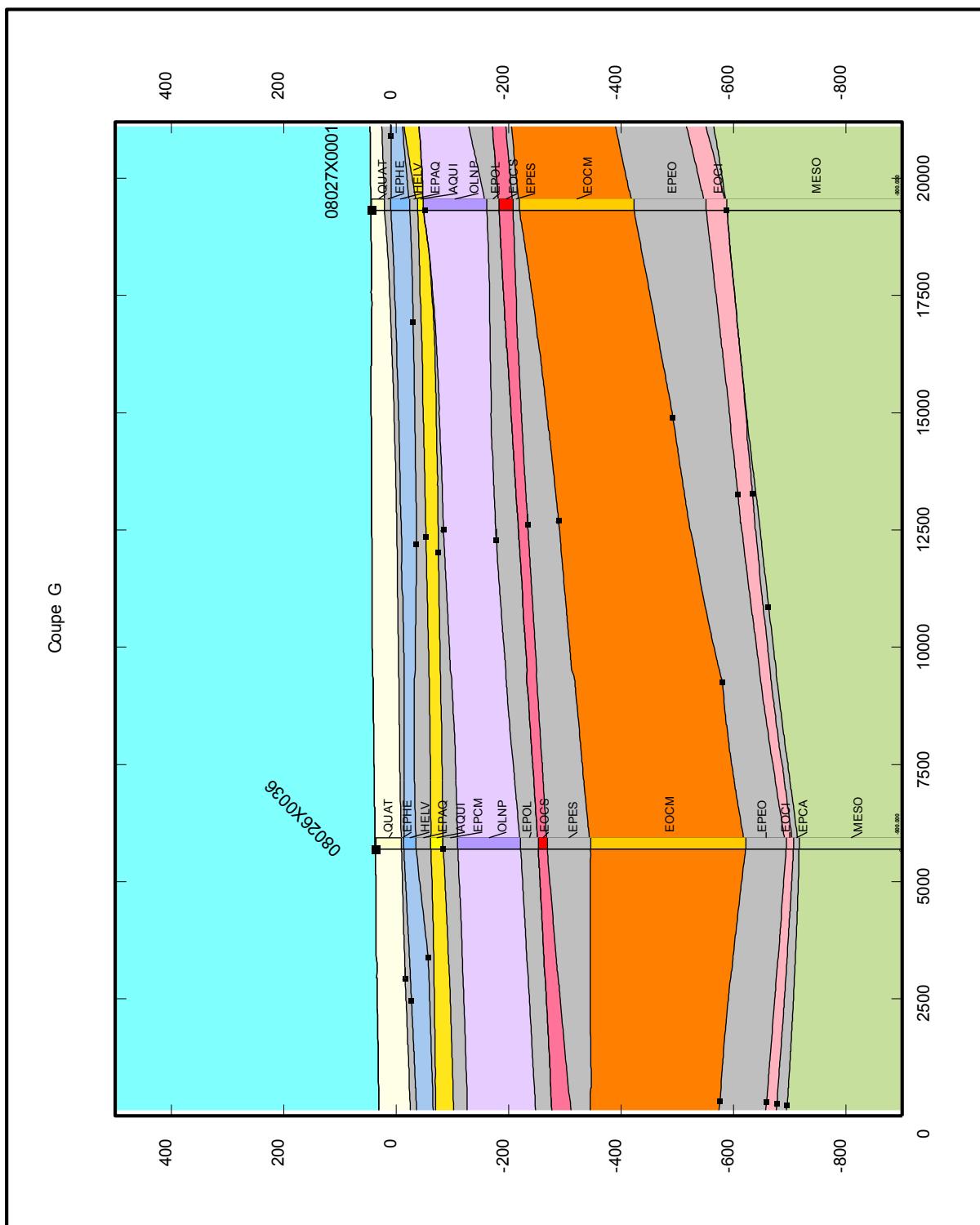


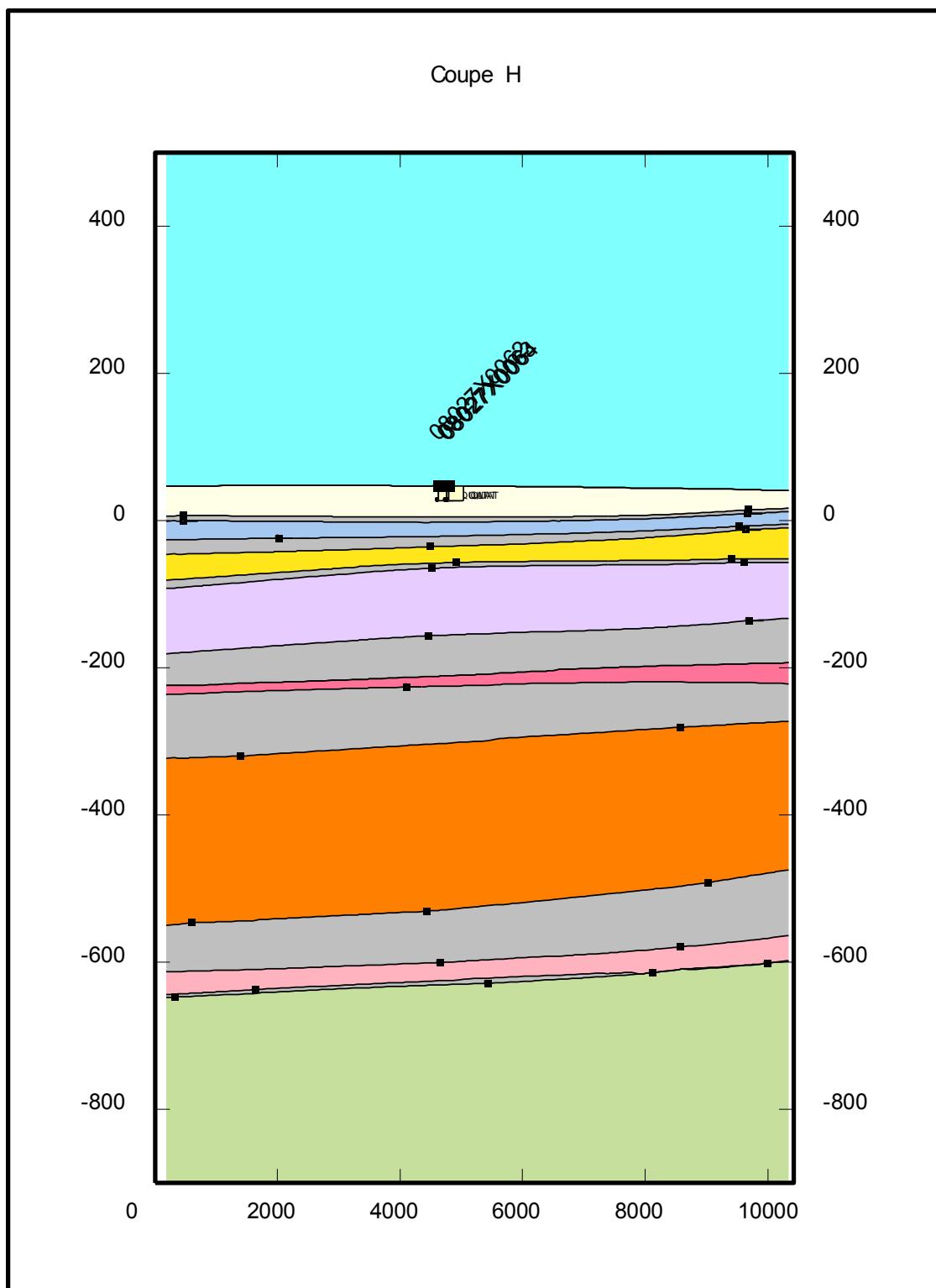


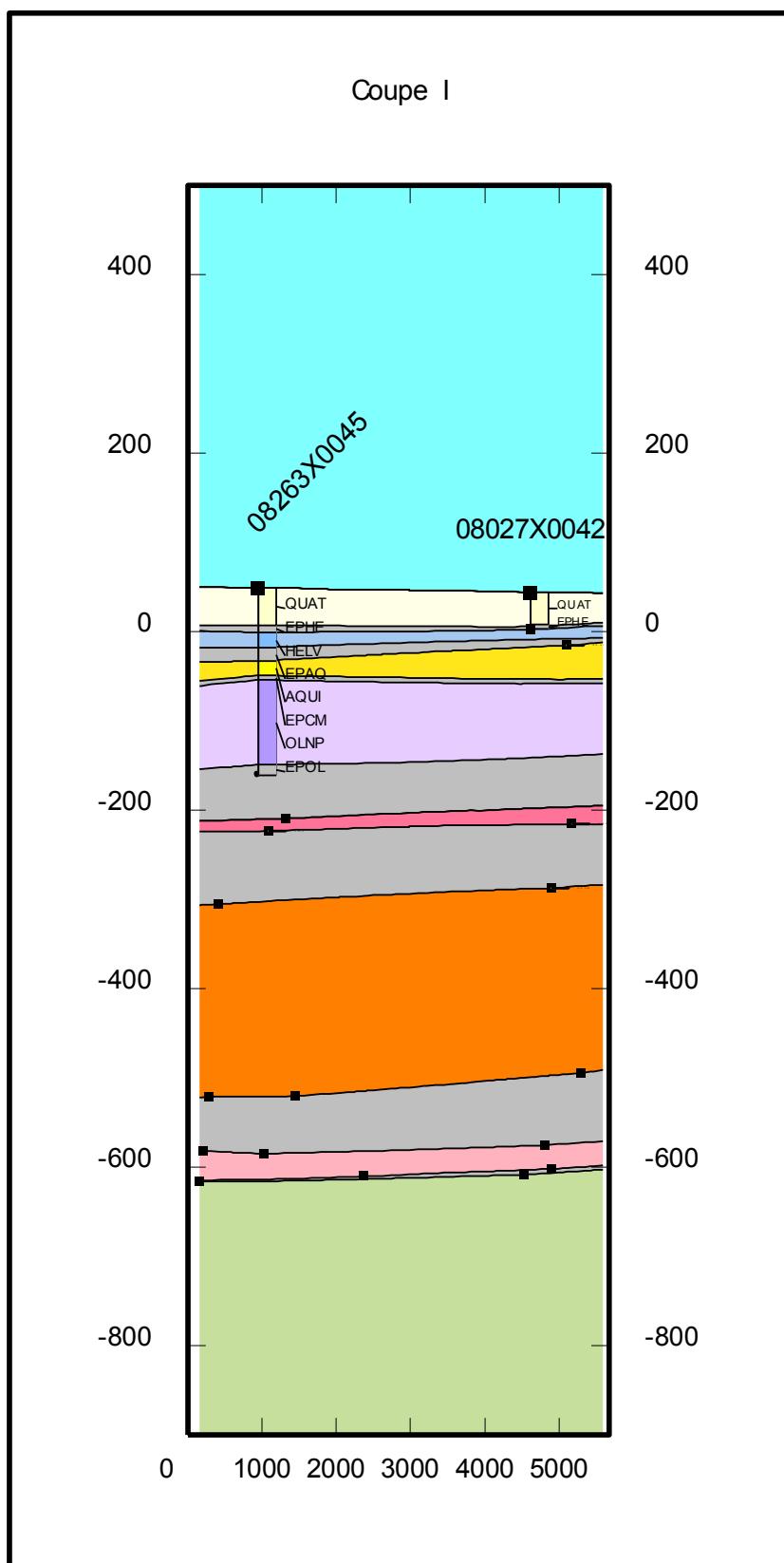


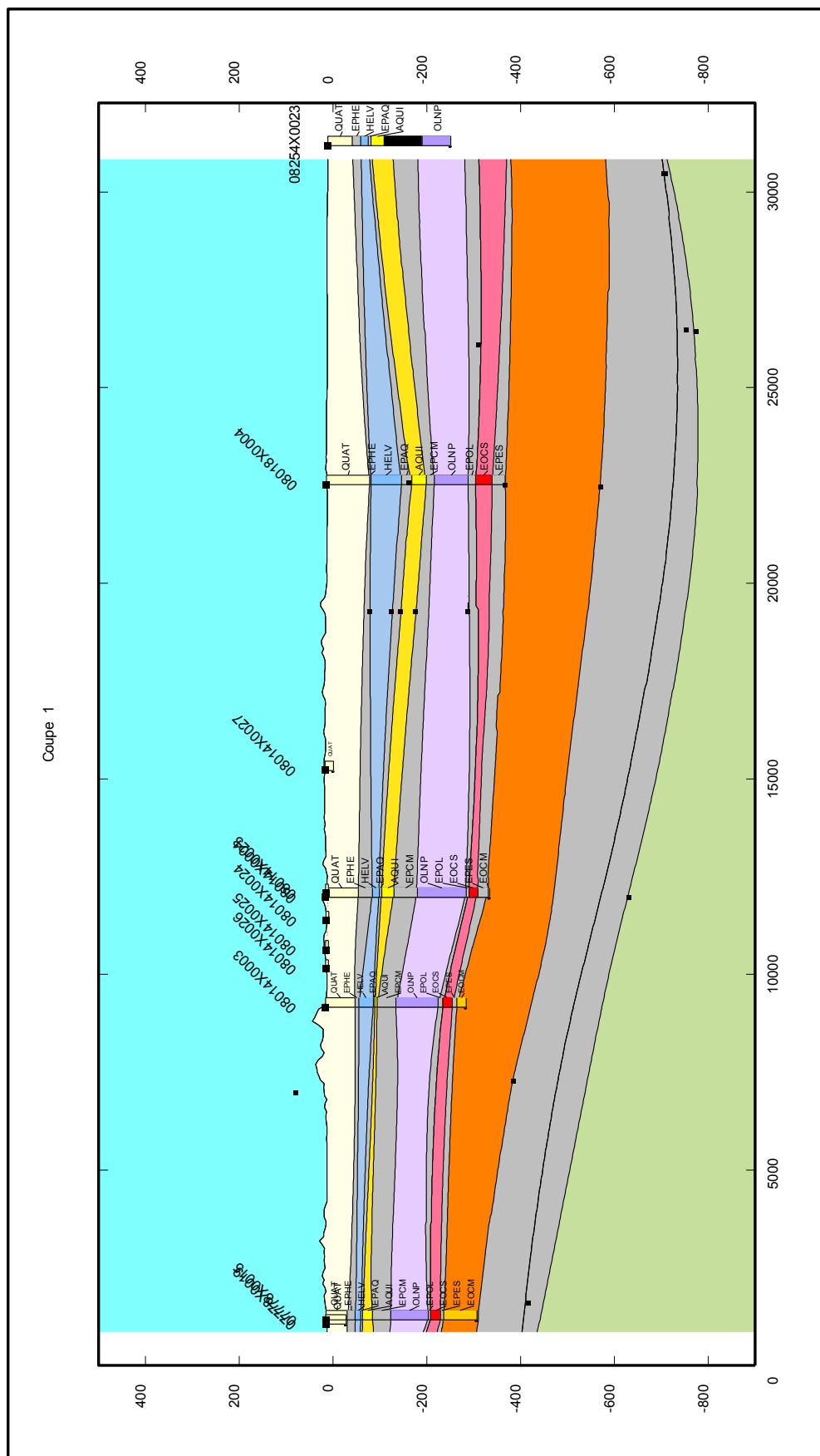


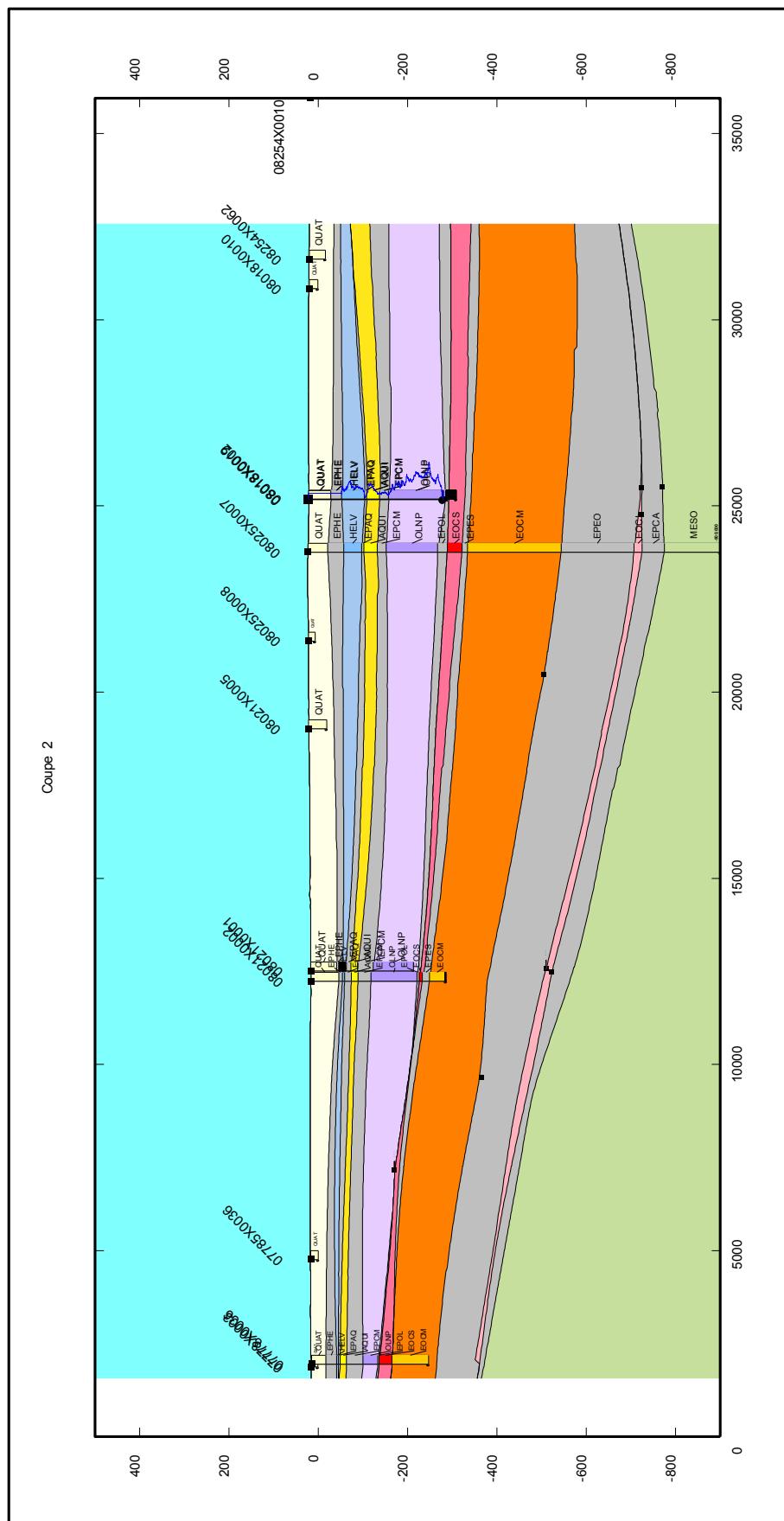


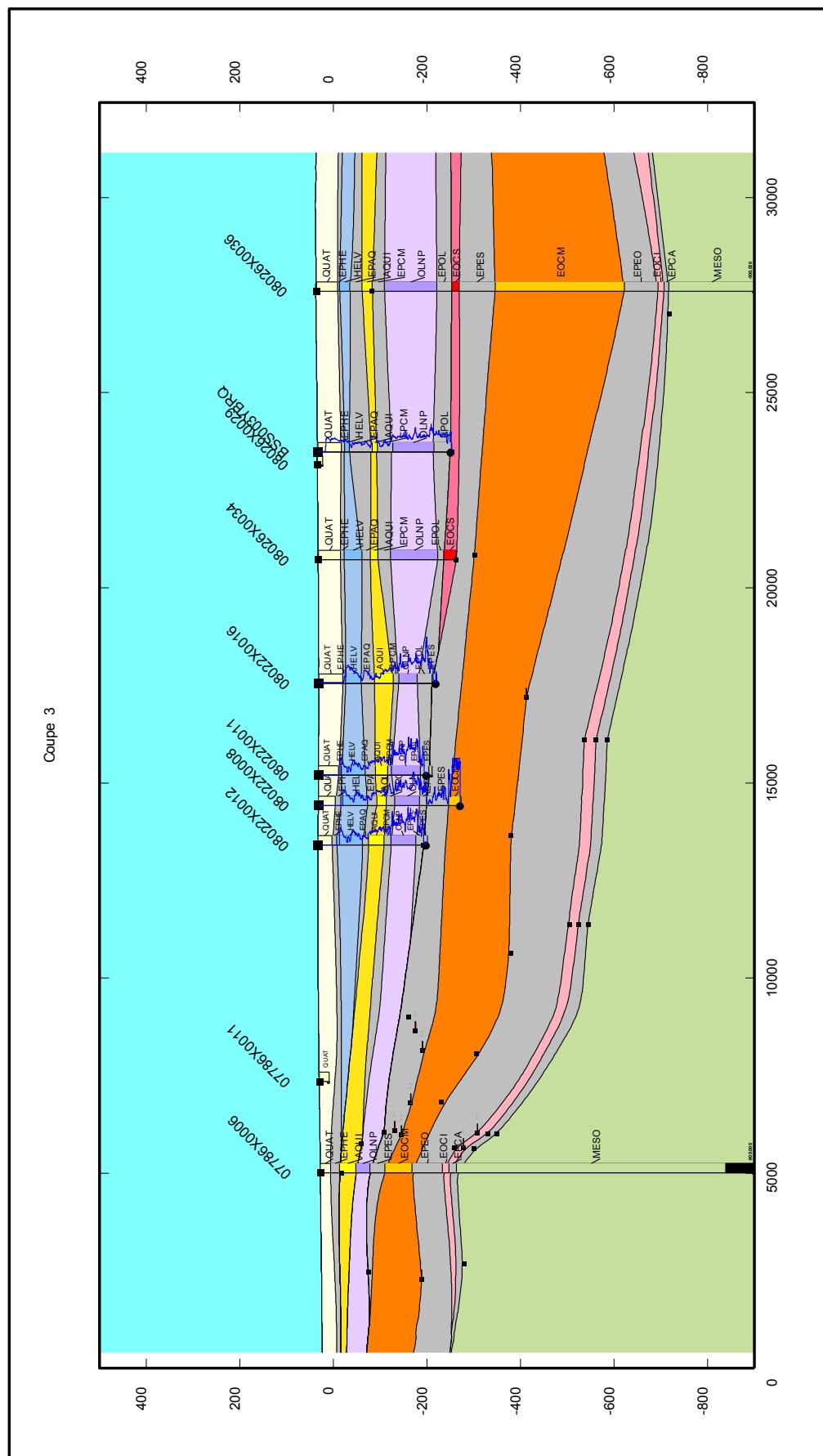


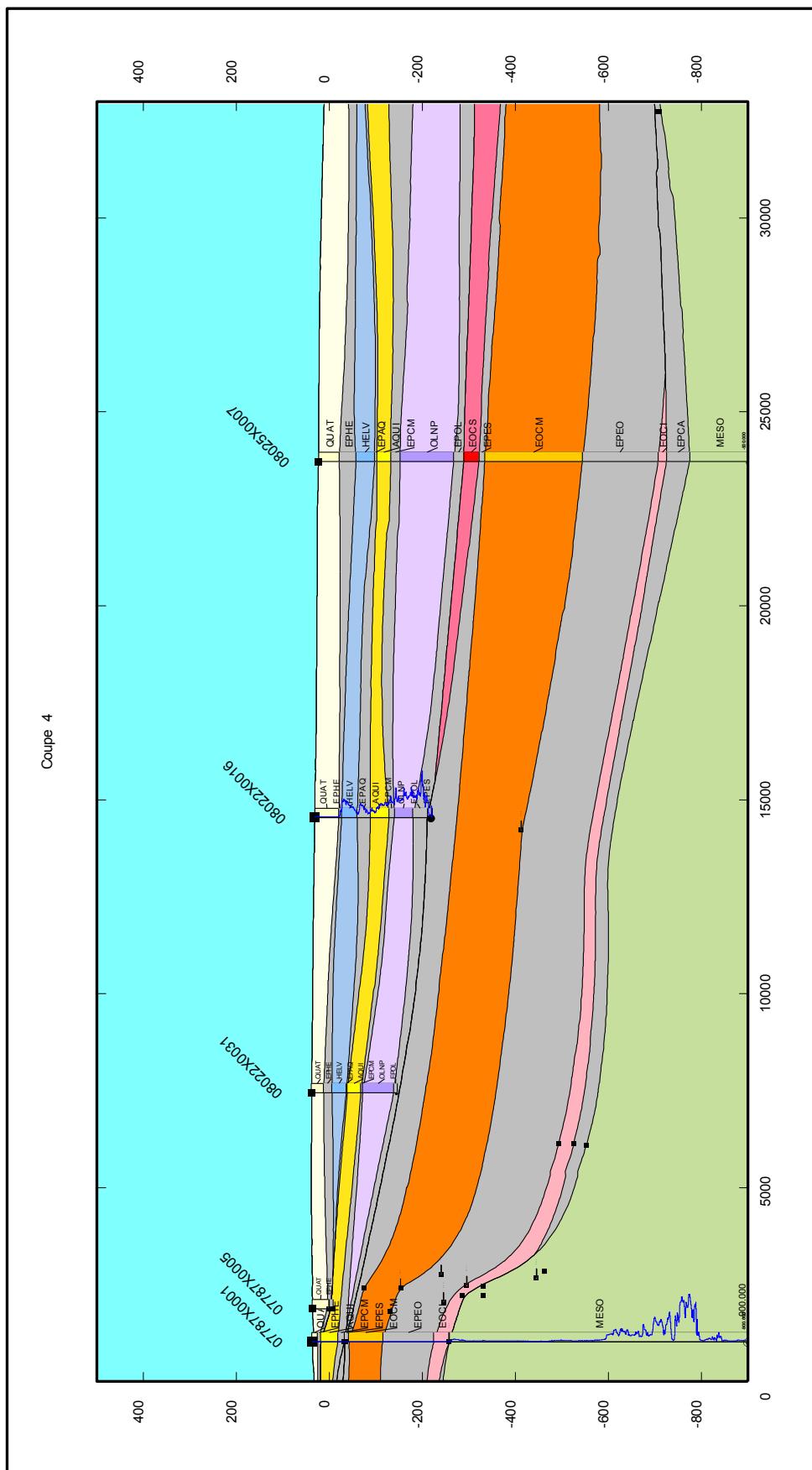


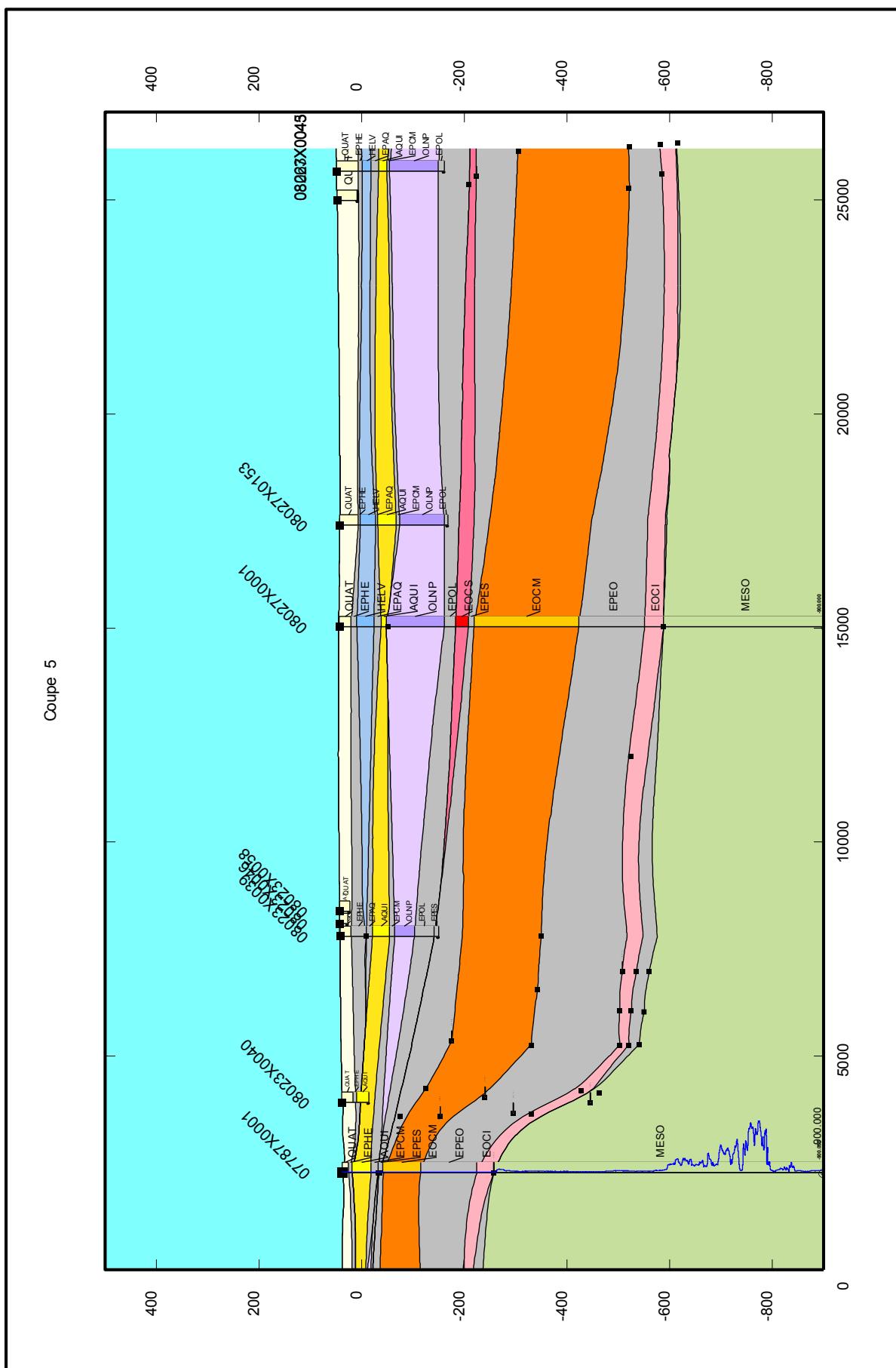


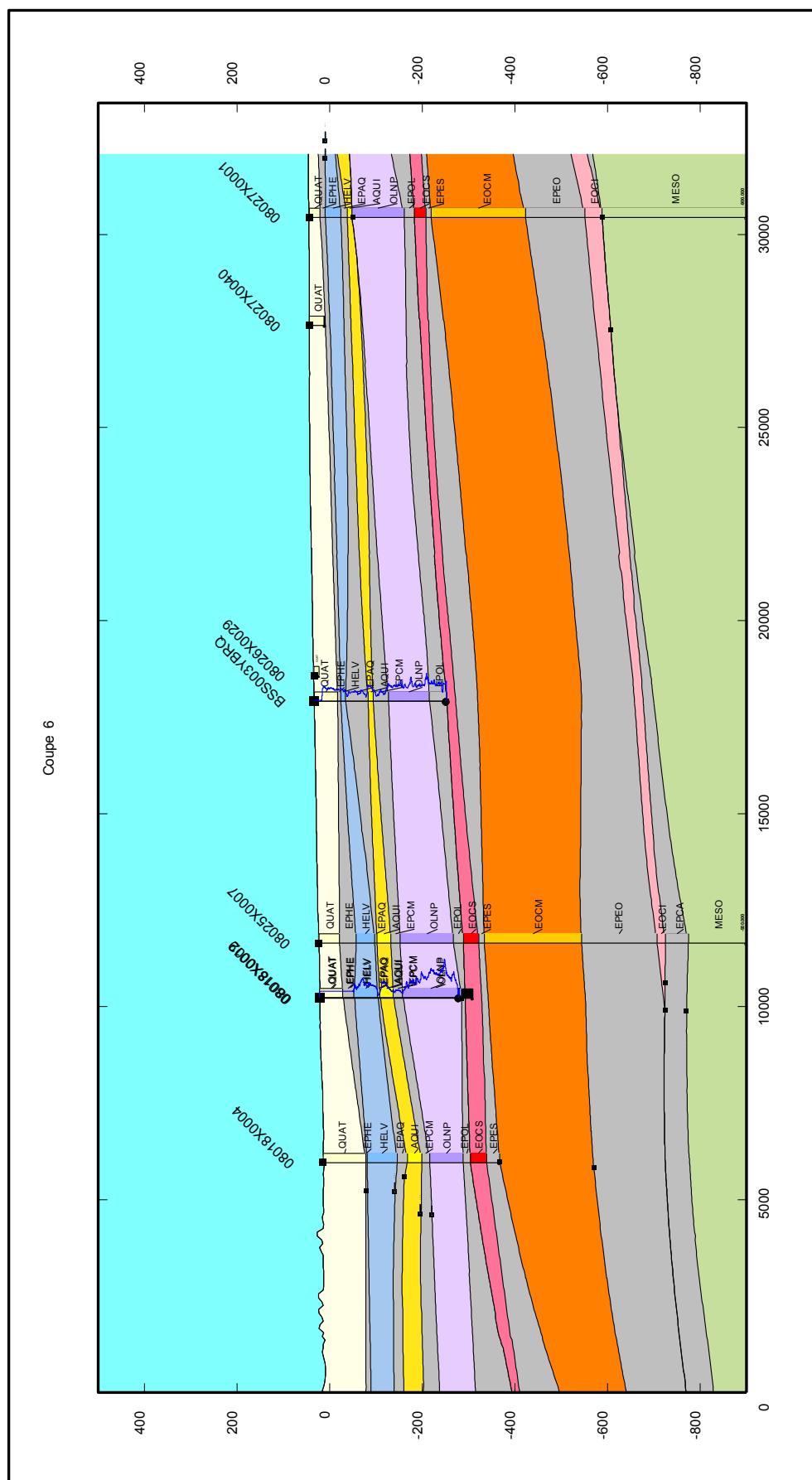








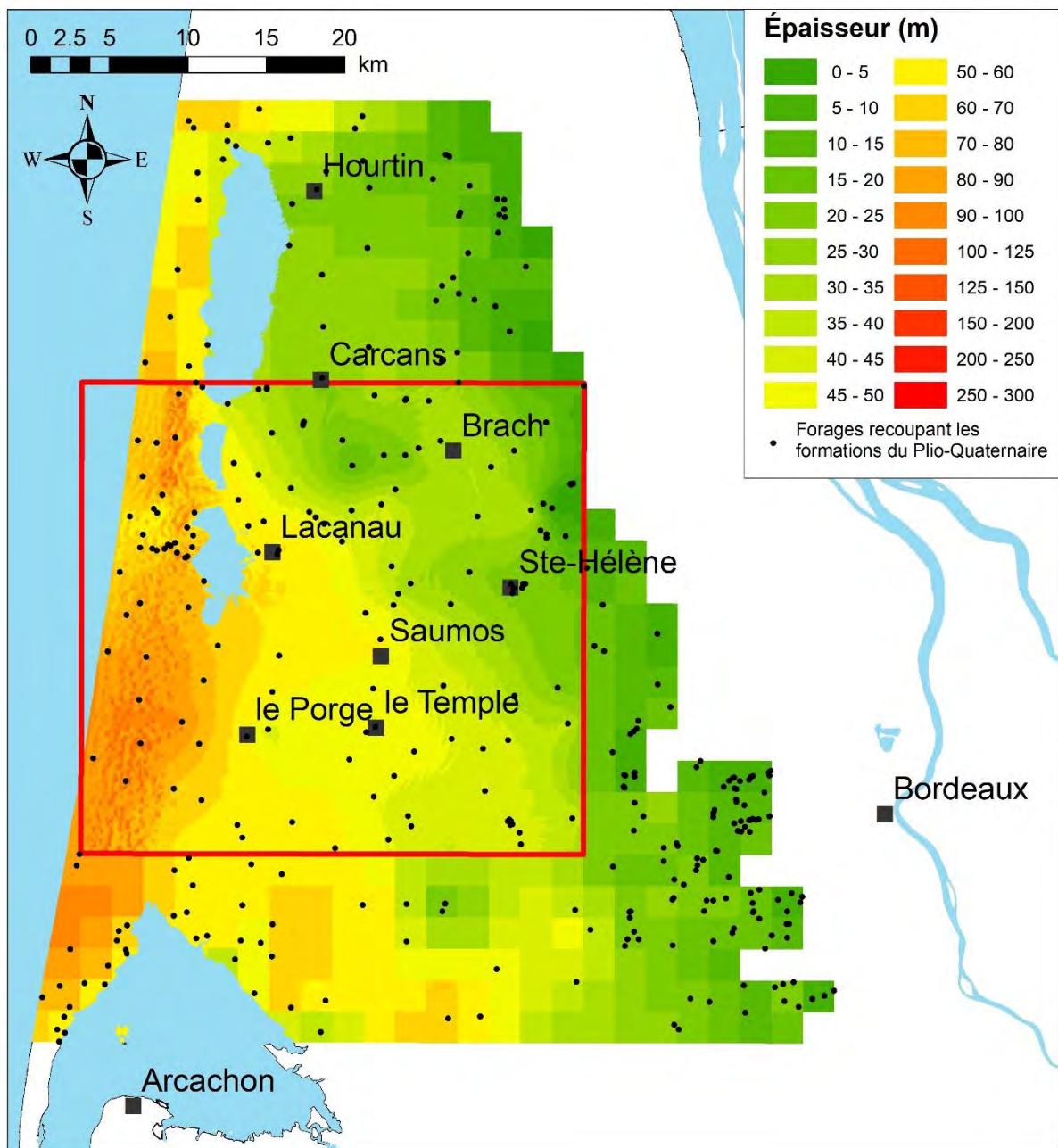




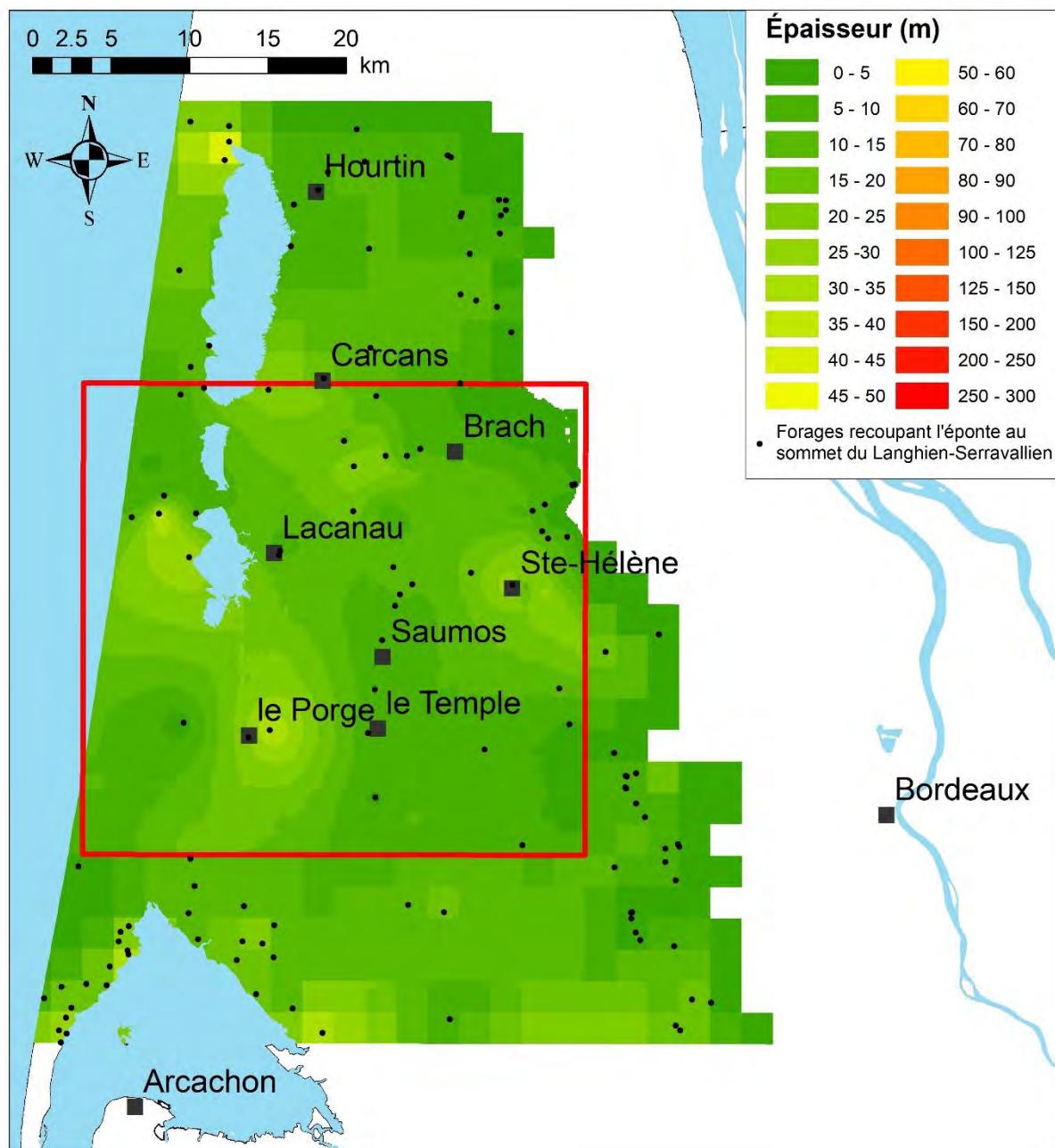
Annexe 3

Carte des épaisseurs des formations modélisées

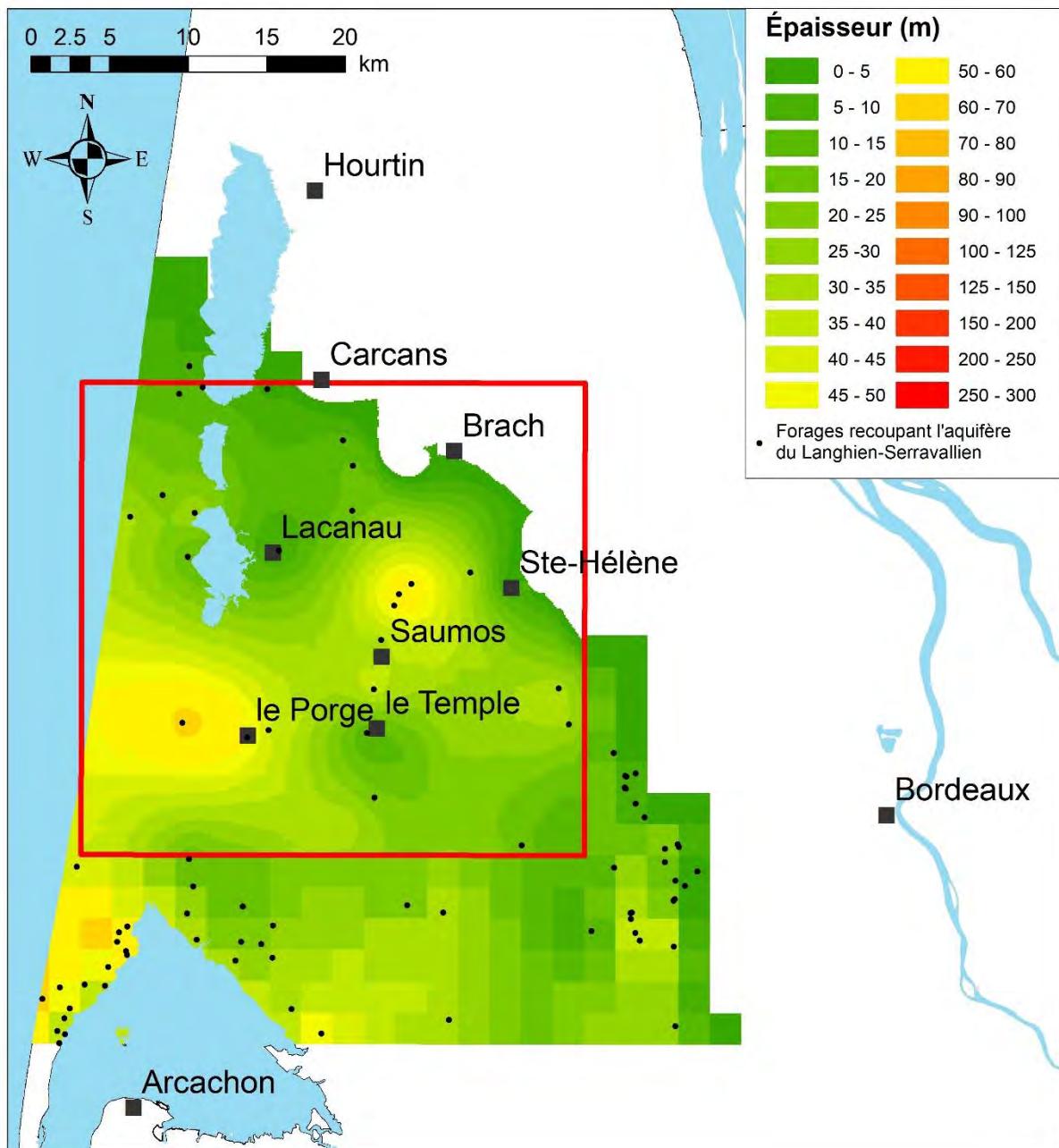
Carte d'épaisseur du Plio-Quaternaire



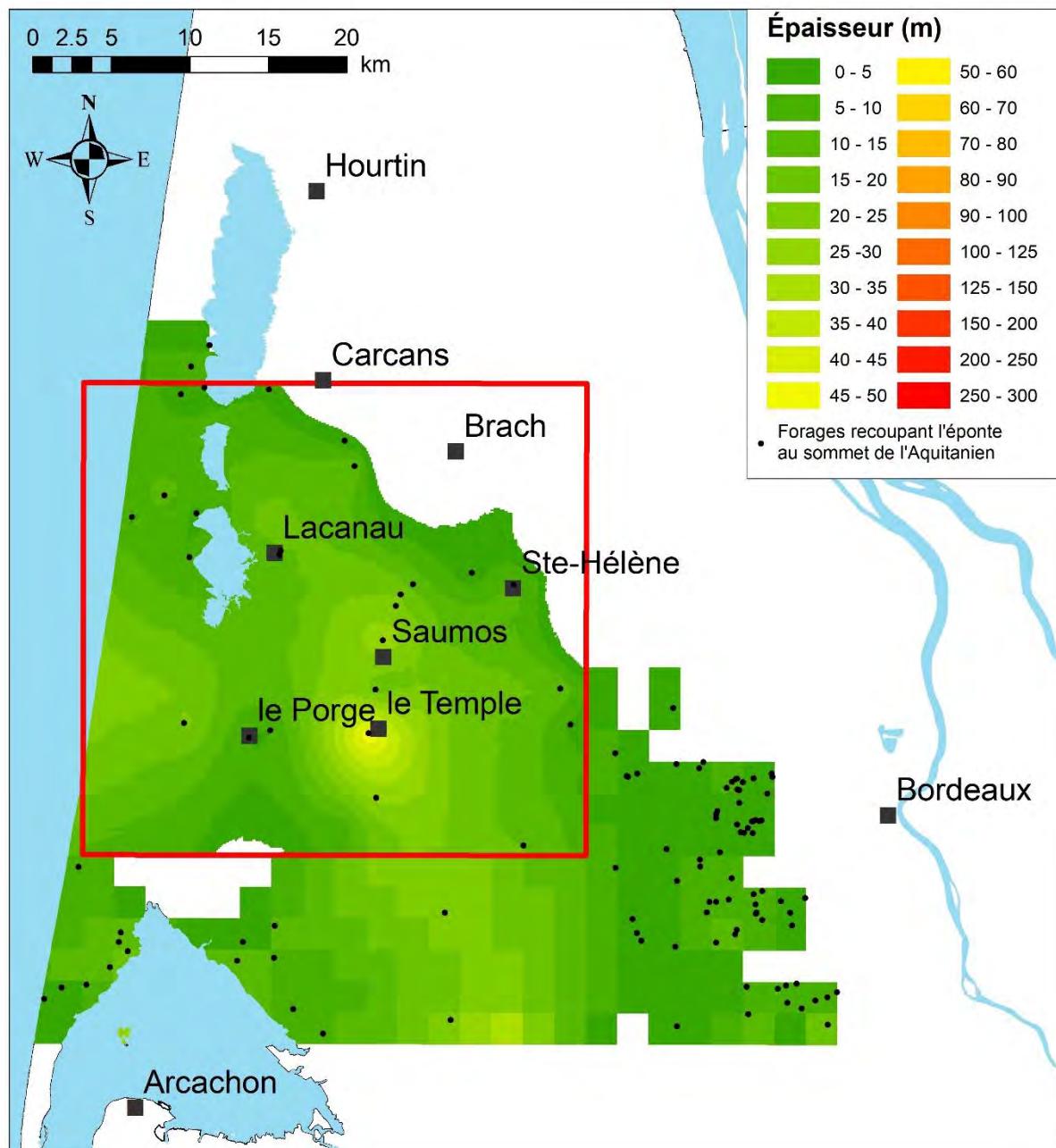
Carte d'épaisseur de l'éponte au sommet du Langhien-Serravallien



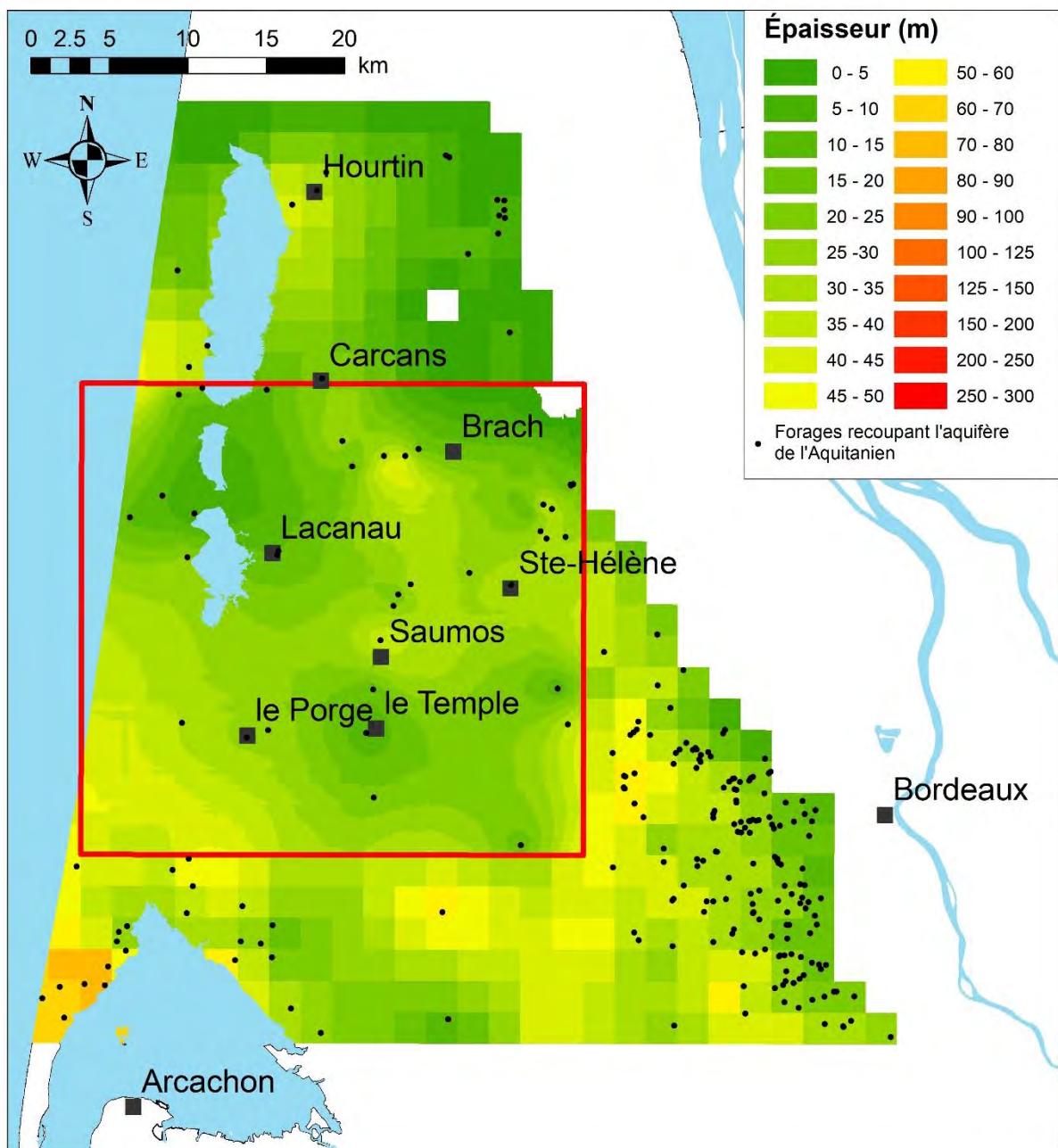
Carte d'épaisseur du réservoir du Langhien-Serravallien



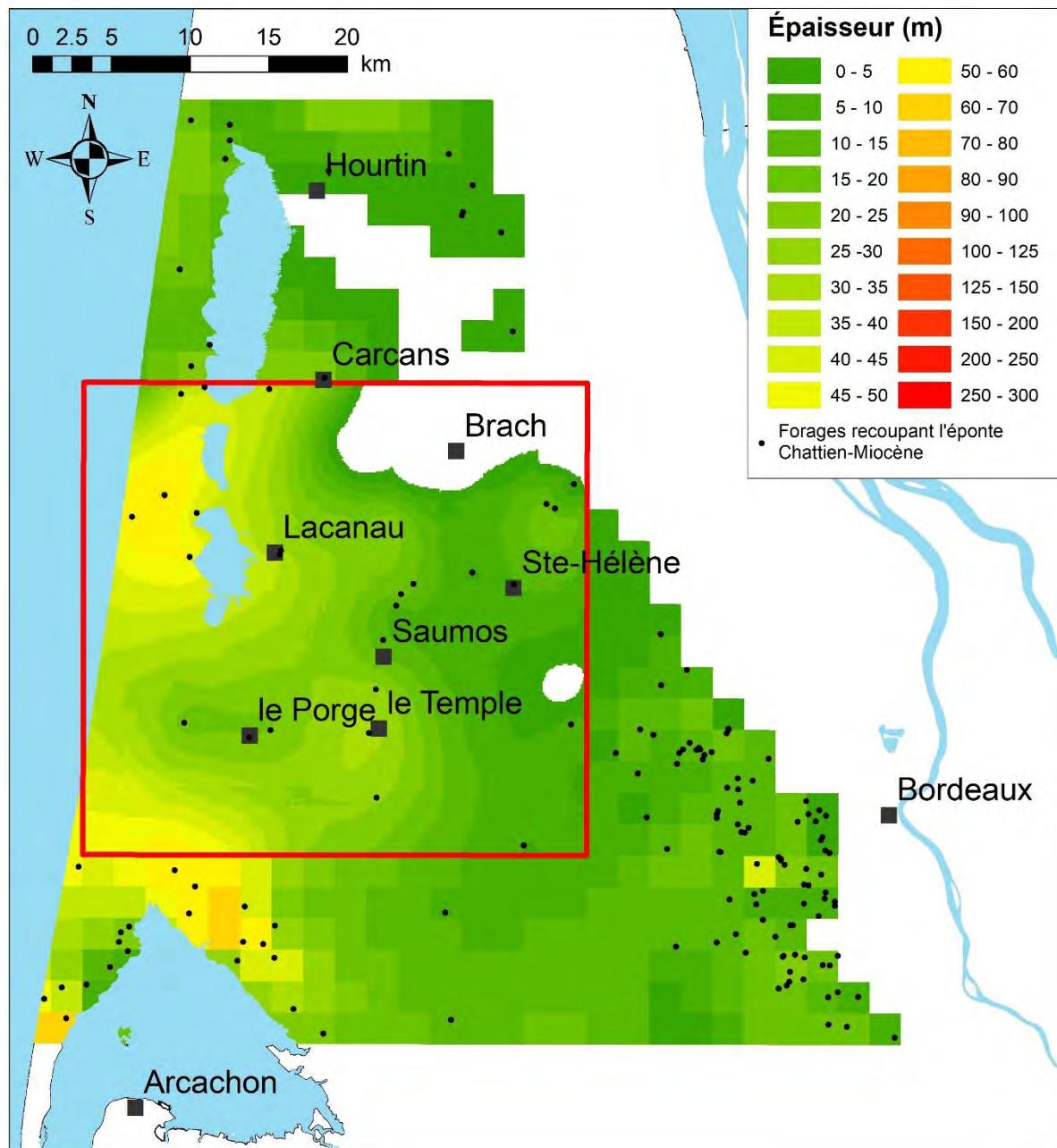
Carte d'épaisseur de l'éponte au sommet de l'Aquitainien



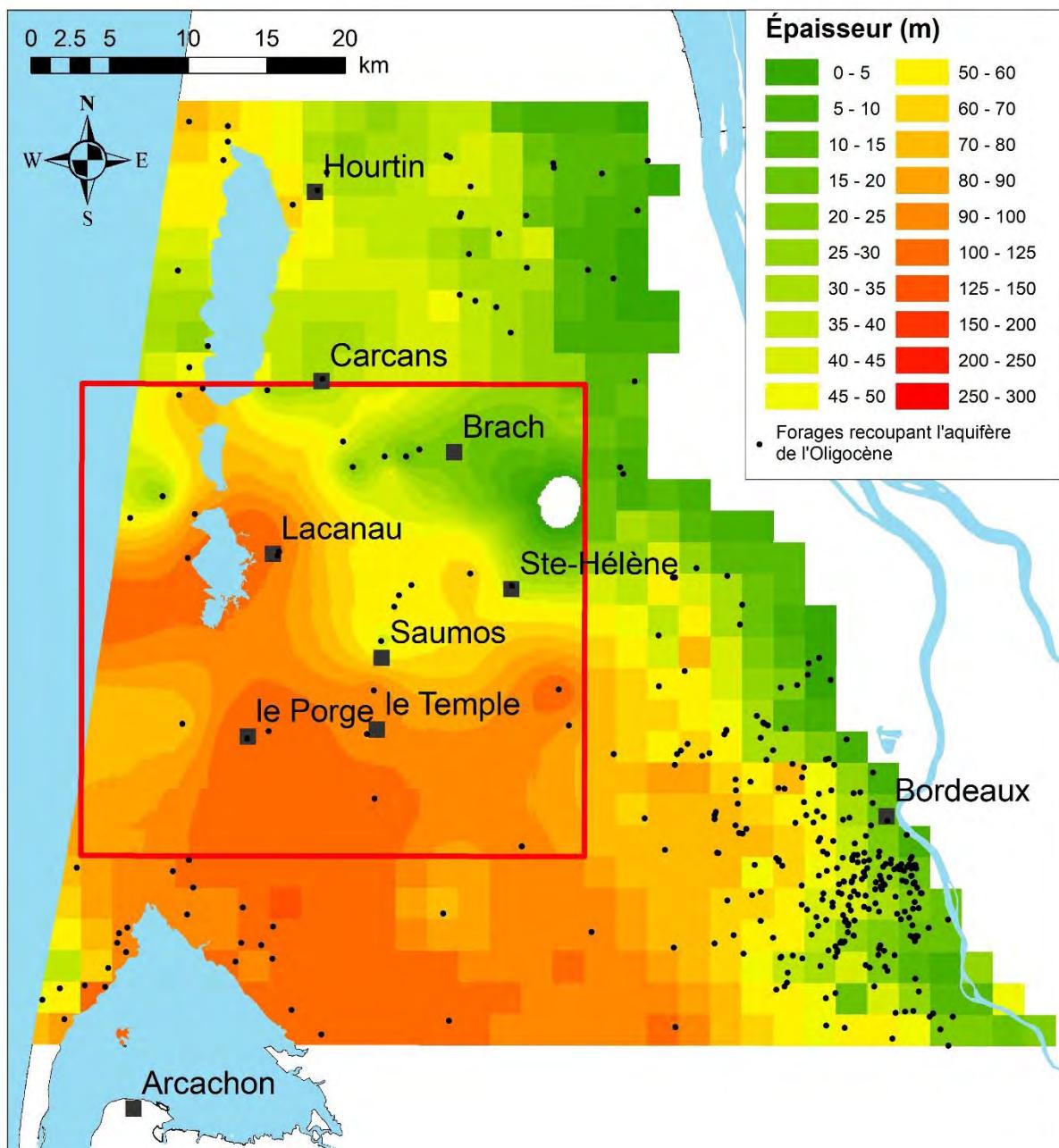
Carte d'épaisseur du réservoir de l'Aquitainien



Carte d'épaisseur de l'éponte Chattien-Miocène



Carte d'épaisseur du réservoir de l'Oligocène

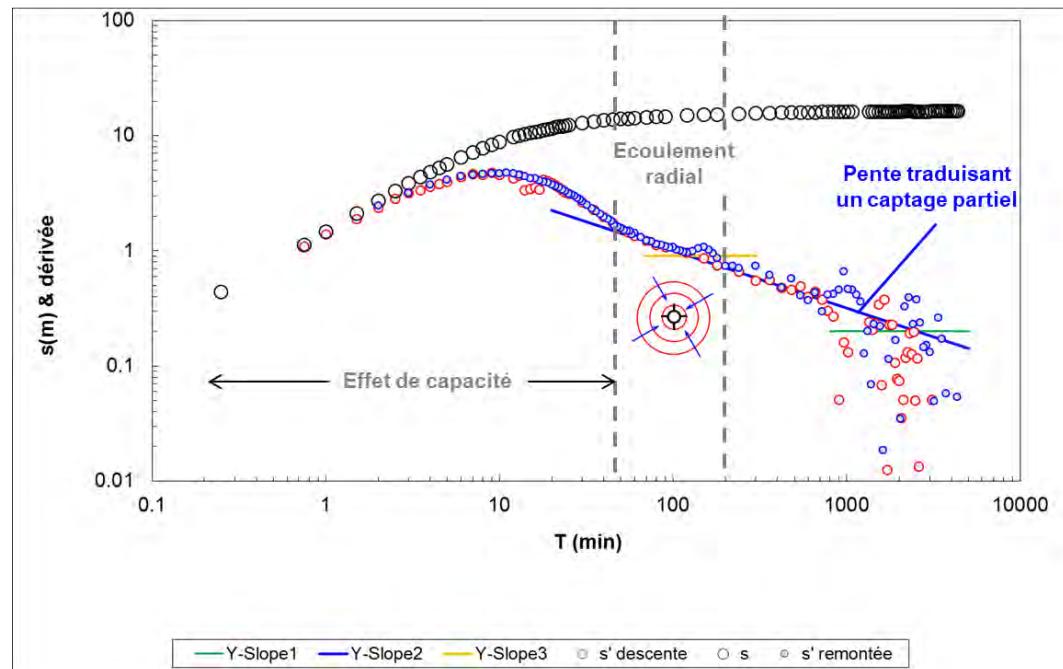


Annexe 4

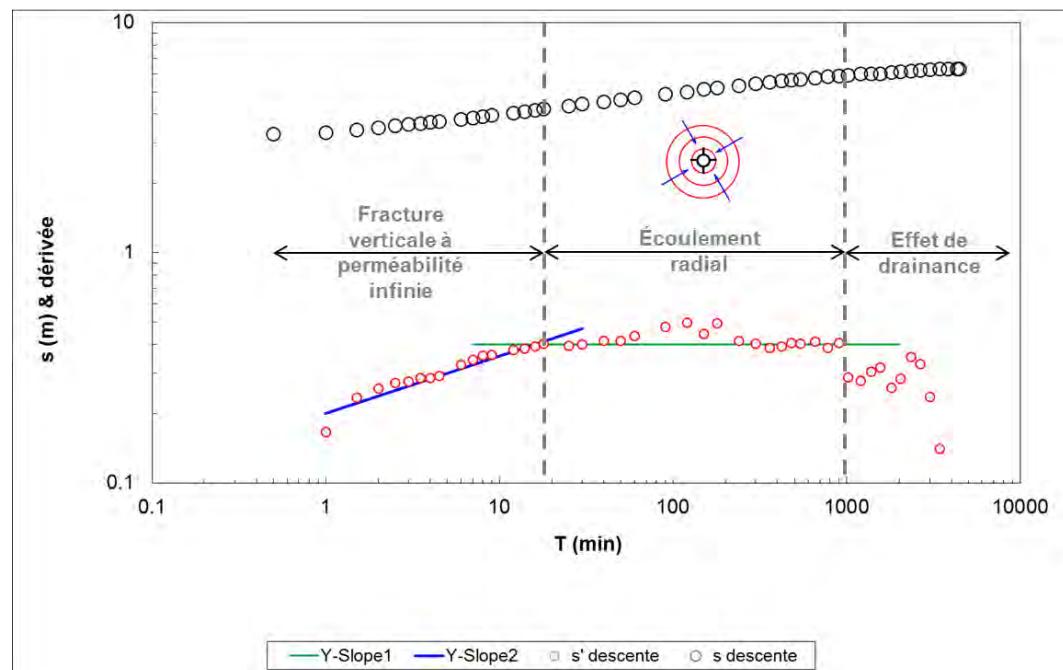
Synthèse des essais de pompage

Pompage de Sainte-Hélène

- Forage au Langhien-Serravallien DFCI - 08023X0001(BSS001XTTC)



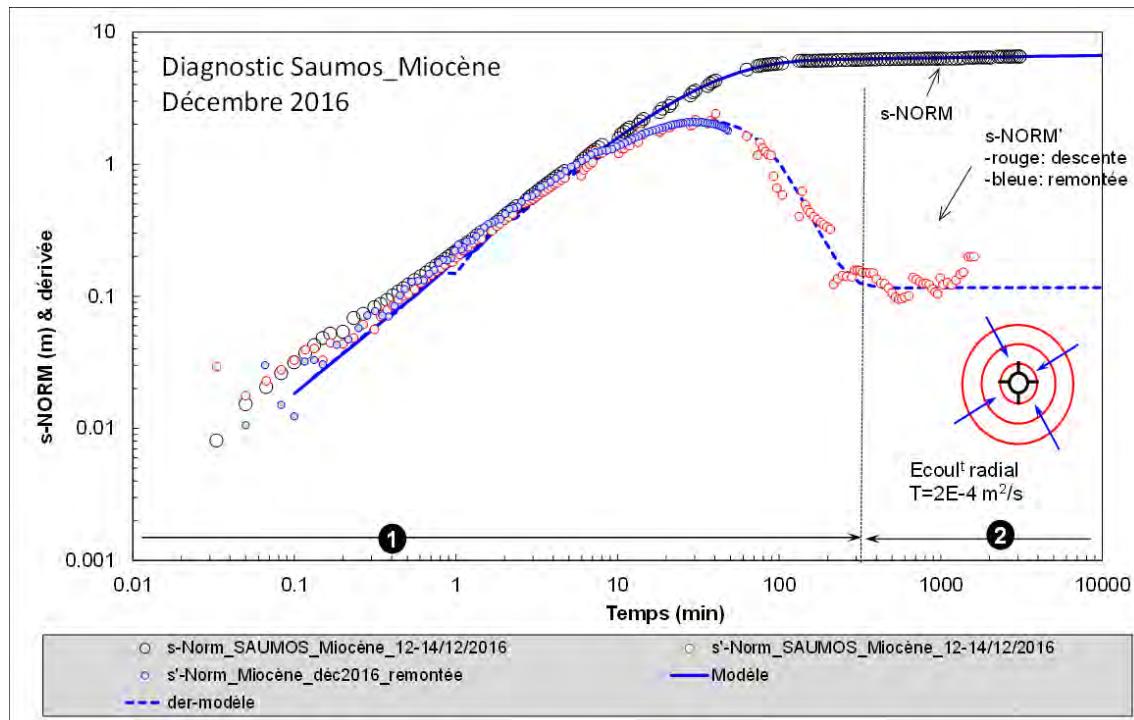
- Forage à l'Oligocène - 08023X0039 (BSS001XTUS)



Pompage de Saumos

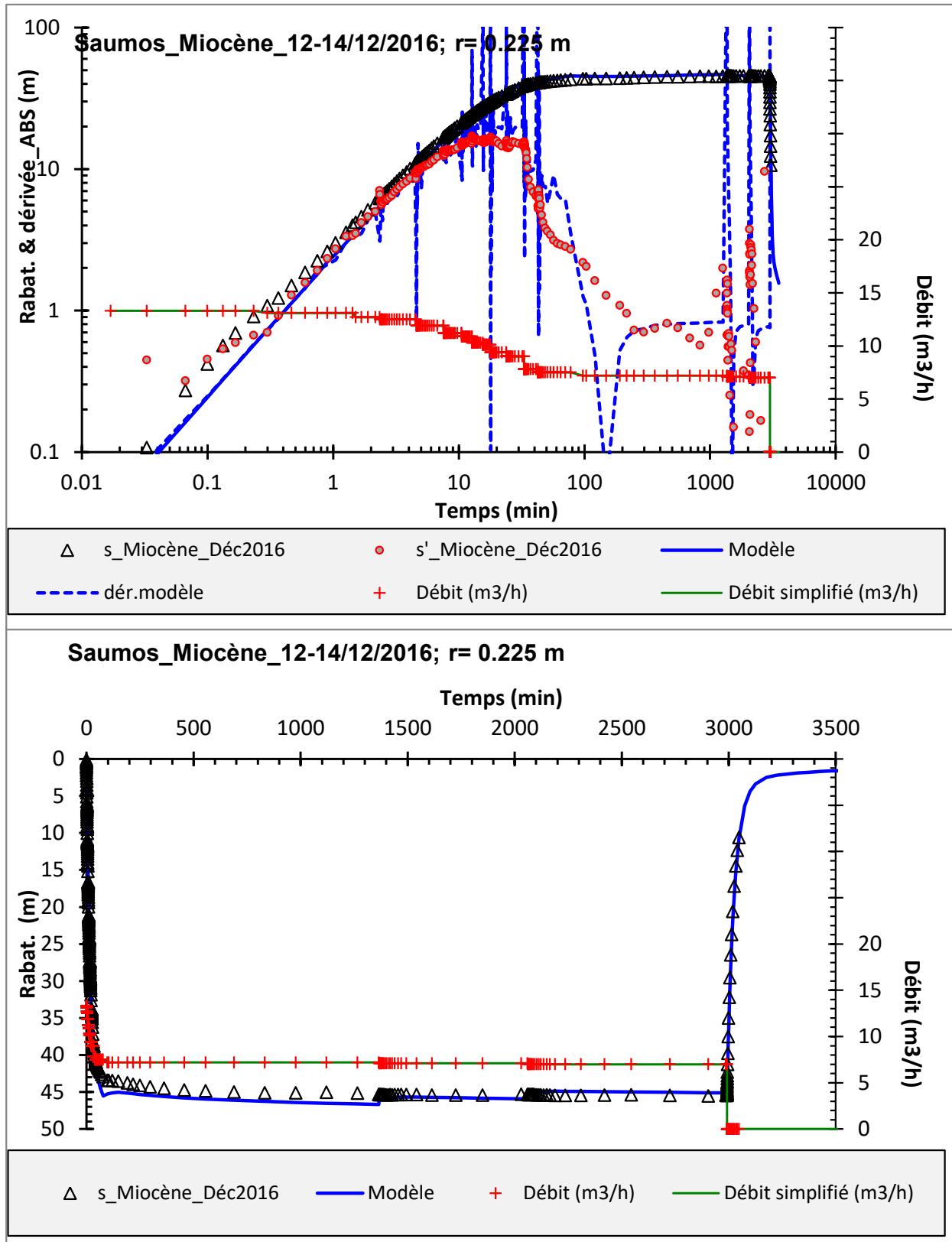
- Forage à l'Aquitainien - 08026X0001 (BSS001XUES)

Diagnostic



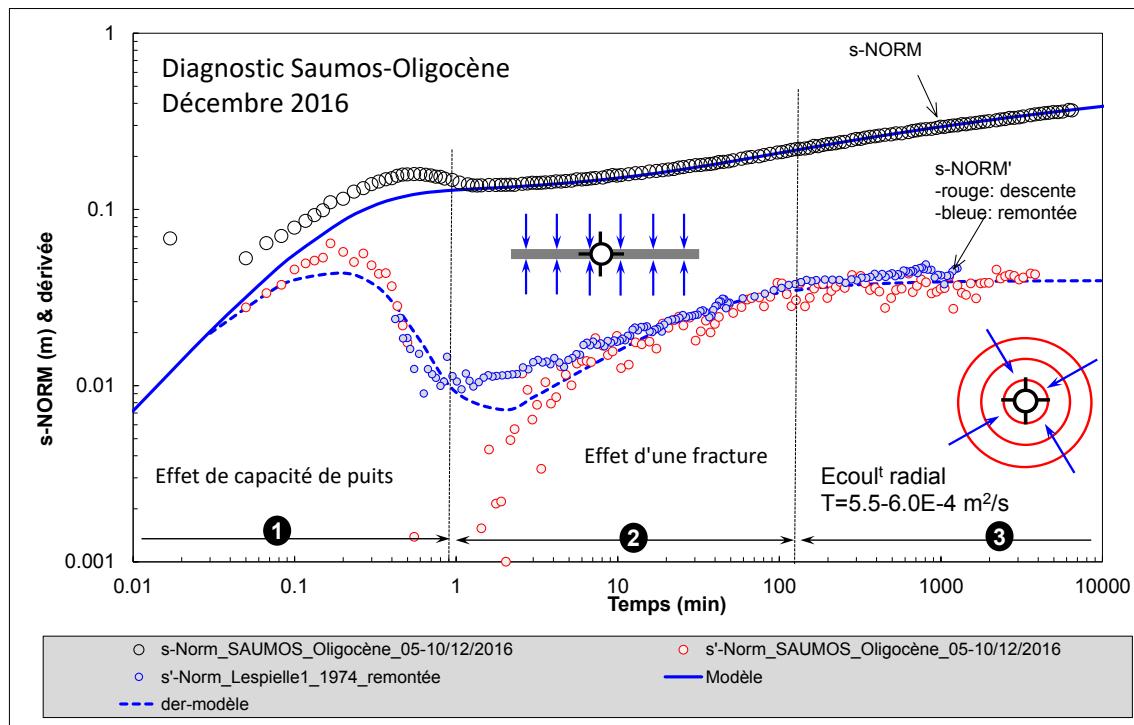
Modélisation

Saumos_Miocène_12-14/12/2016		
	r (m)	0.225
Aquifère capté (inférieur)	T (m ² /s)	1.90E-04
Aquifère capté (inférieur)	S (-)	3.0E-04
Semi-perméable	k' (m/s)	1.00E-17
Semi-perméable	b' (m)	1
Aquifère supérieur	T0 (m ² /s)	-
Aquifère supérieur	Sy (-)	-
	C (m-5s ²)	60000000
Effet de capacité (m)	Rc (m)	0.17



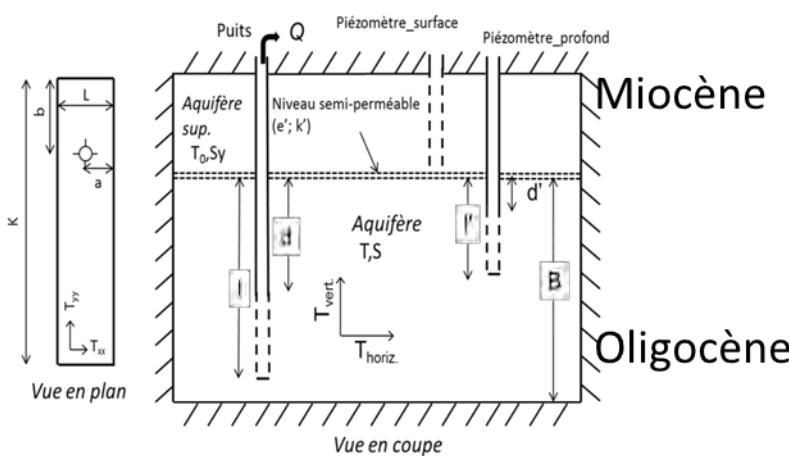
• Forage à l'Oligocène - 08026X0034 (BSS001XUGB)

Diagnostic

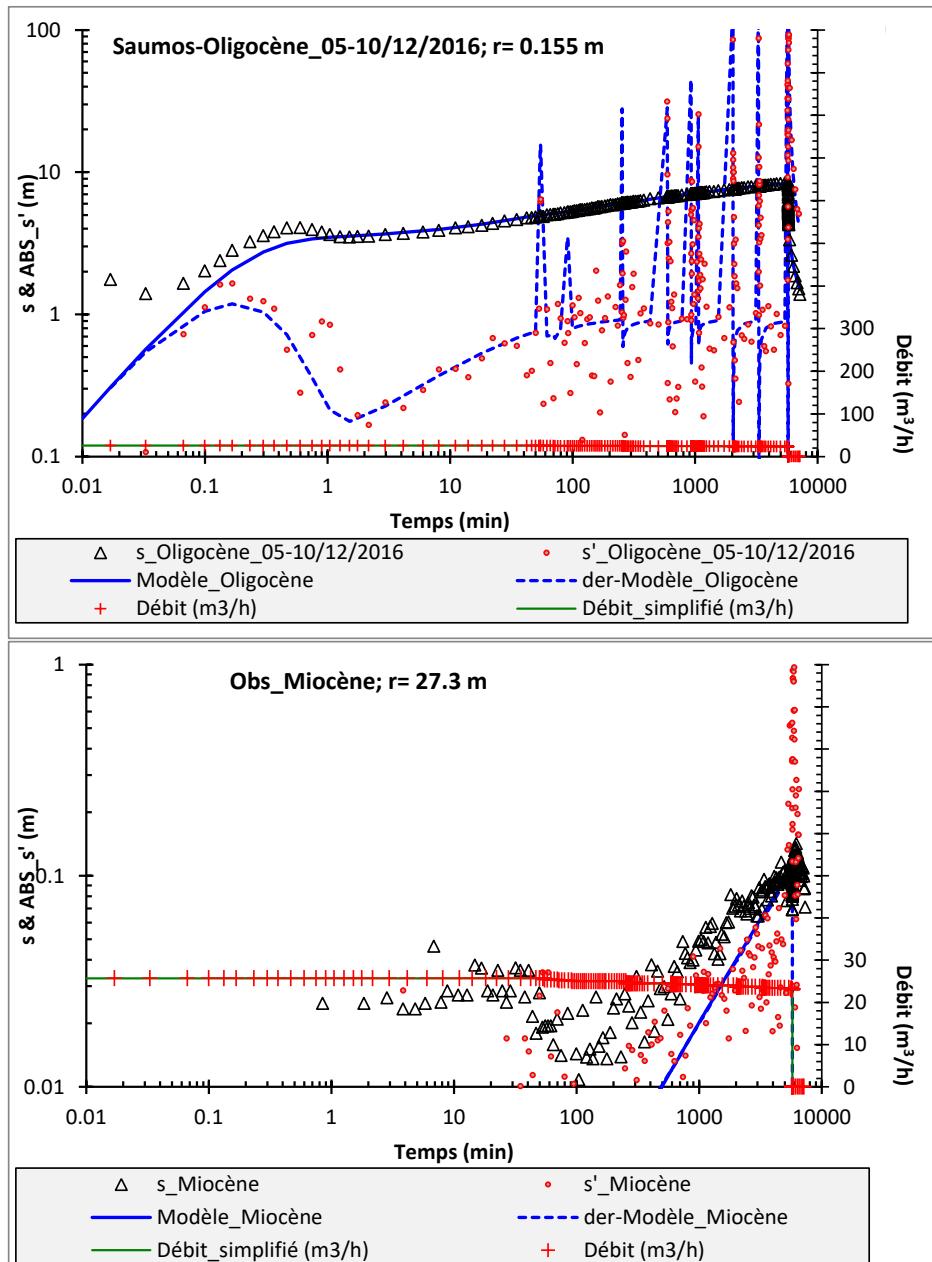


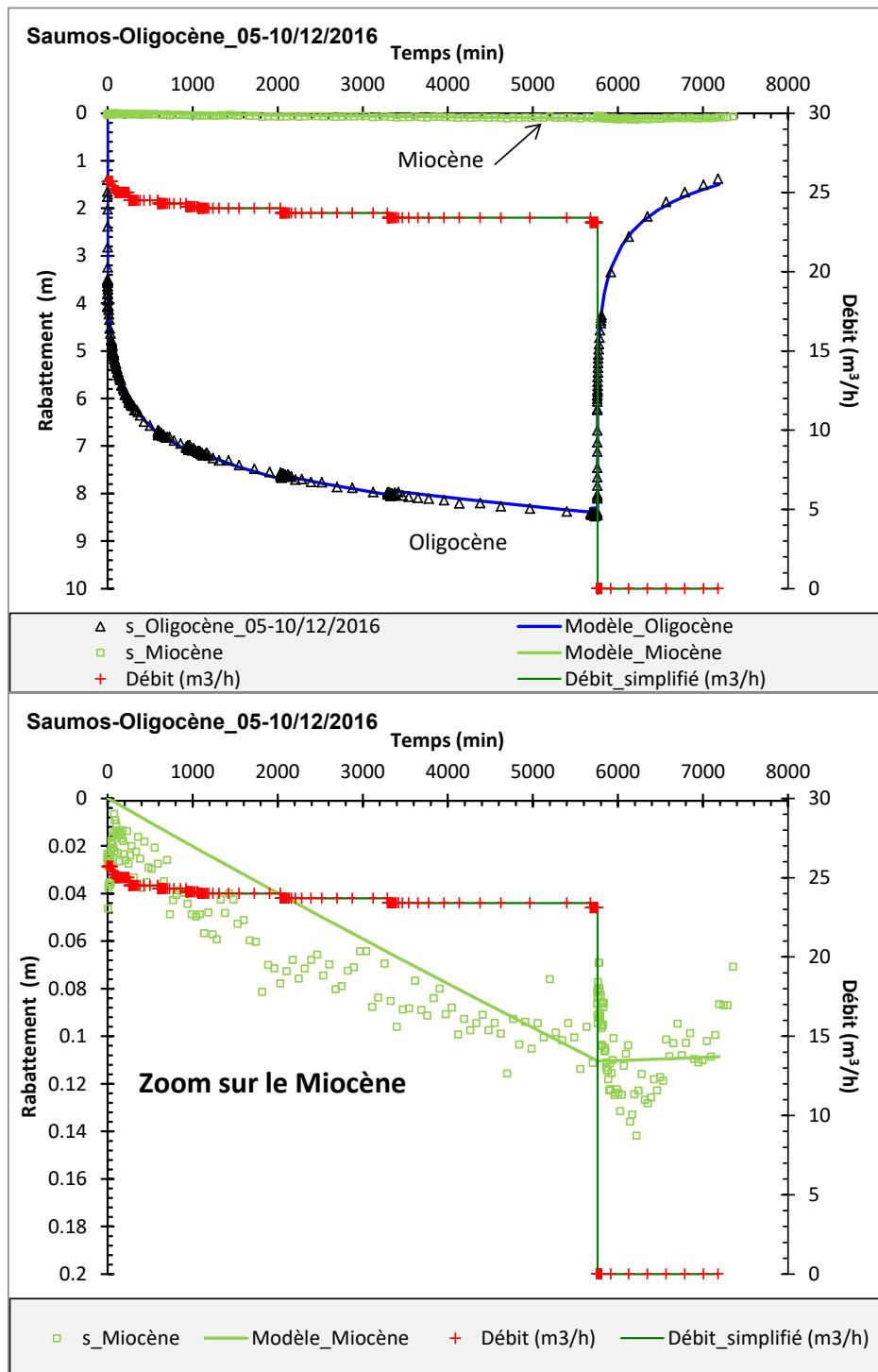
Modélisation

Deux modèles ont été utilisés pour l'interprétation. Le modèle de Gringarten pour reproduire l'essai à l'Oligocène et prendre en compte l'effet de fracture verticale. Pour reproduire l'influence du pompage à l'Oligocène sur la nappe de l'Aquitainien, un modèle bicouche a été mis en œuvre.



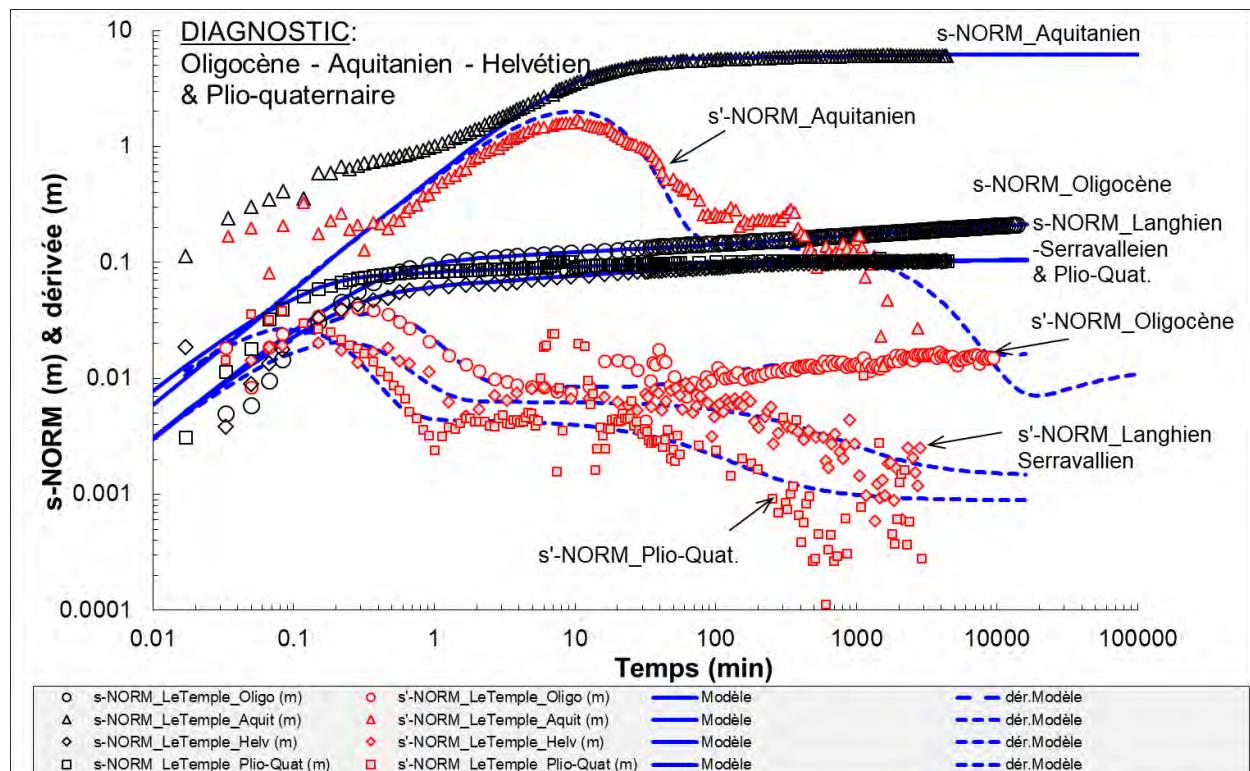
Pompage Oligocène 05-10/12/2016	Oligocène	Miocène	
Rayon (m)	0.155	27.3	
Transmissivité aquifère pompé (m ² /s)	5.60E-04	5.60E-04	
Emmagasinement aquifère pompé (-)	3.00E-04	3.00E-04	! Estimation au puits
demi-long. fracture verticale (m)	150.0	-	
Transmissivité aquifère sup. (m ² /s)	-	1.90E-04	
Emmagasinement aquifère sup. (-)	-	3.00E-04	! Estimation au puits
Perm.éponge (m/s)	-	6.50E-11	
Epaisseur éponte (m)	-	1	
Pertes de charge quadratiques (m-5s ²)	63500.0	-	
Effet de capacité (m)	0.2	-	





Pompage du Temple

Diagnostic

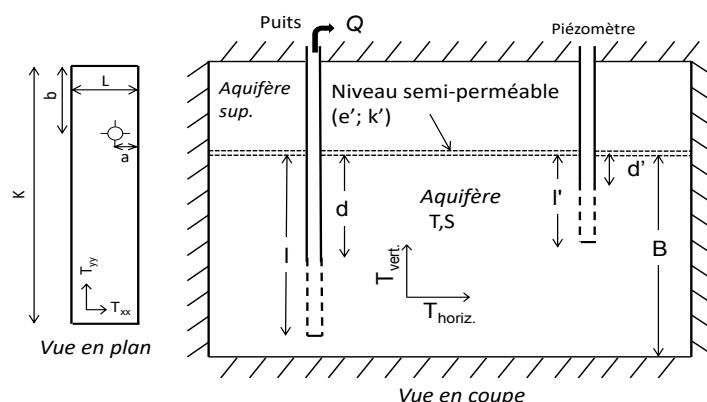


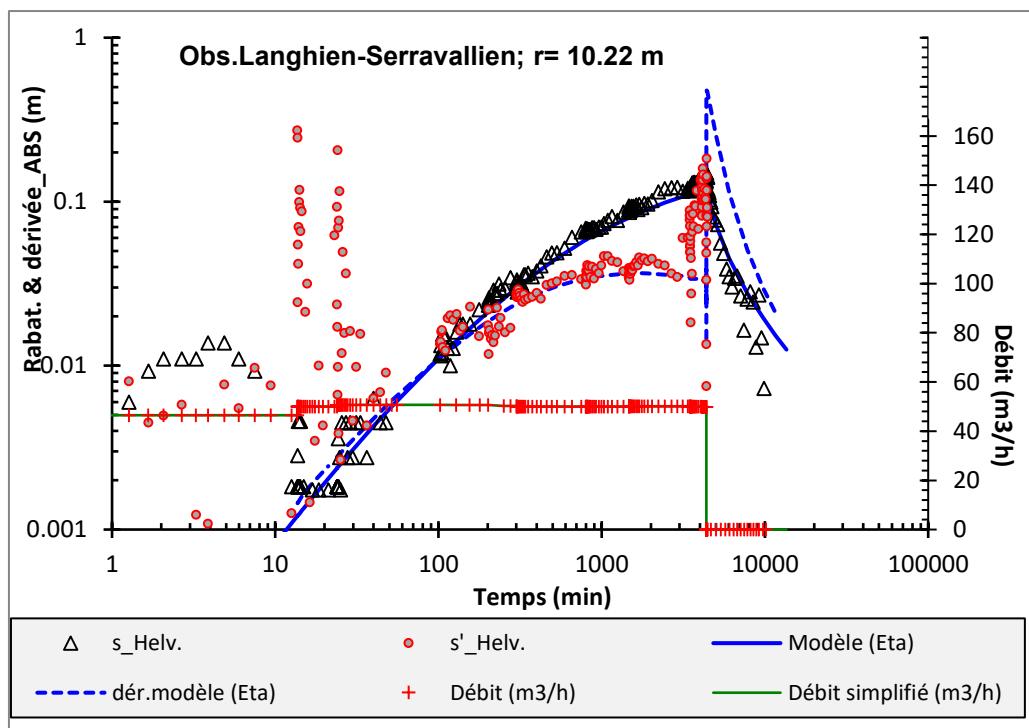
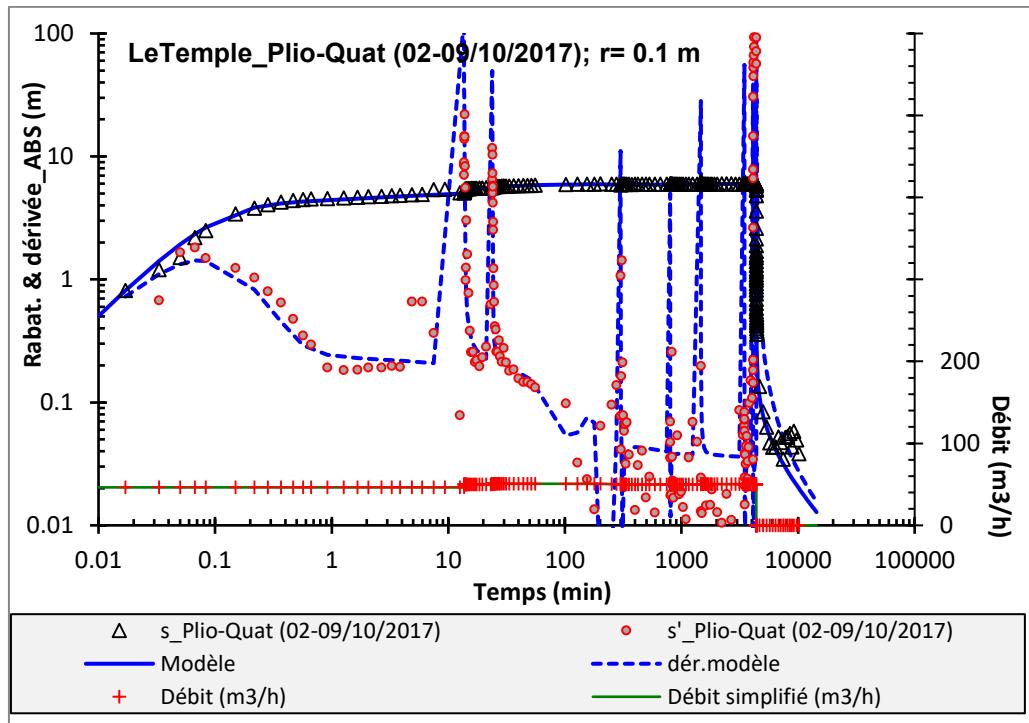
Tous les aquifères réagissent comme un aquifère de type multicouche. L'Oligocène présente en plus les caractéristiques d'un aquifère fracturé et un effet de limite est observé. Les transmissivités déduites des diagnostics sont les suivantes :

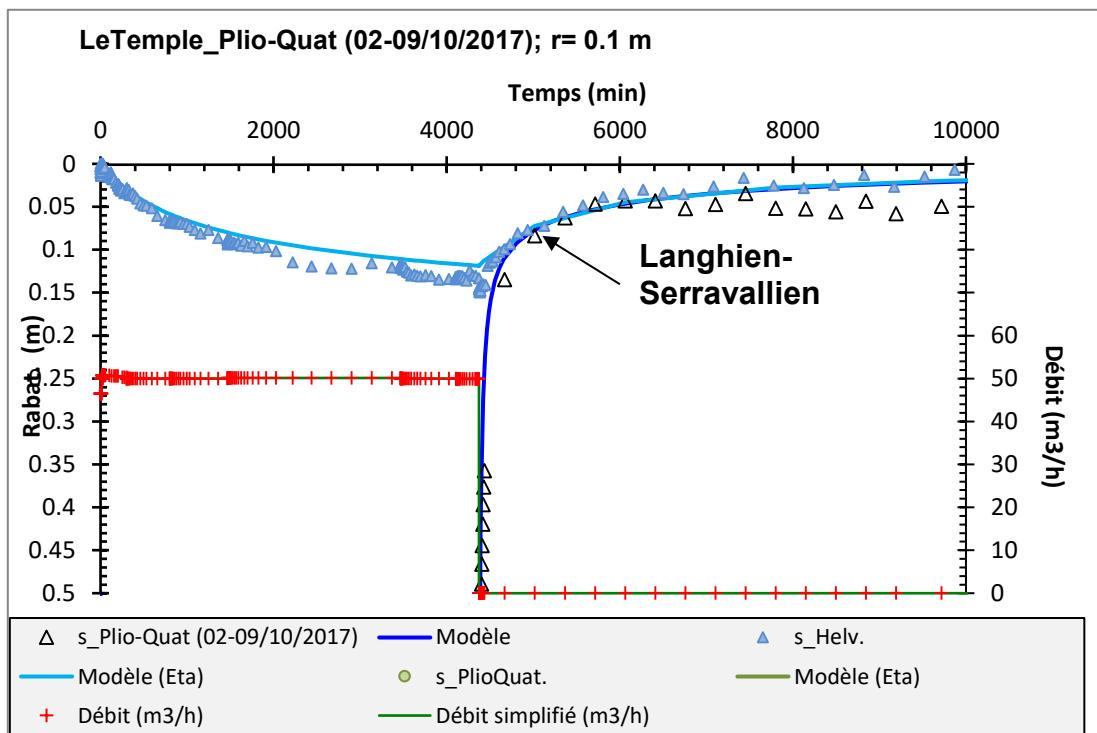
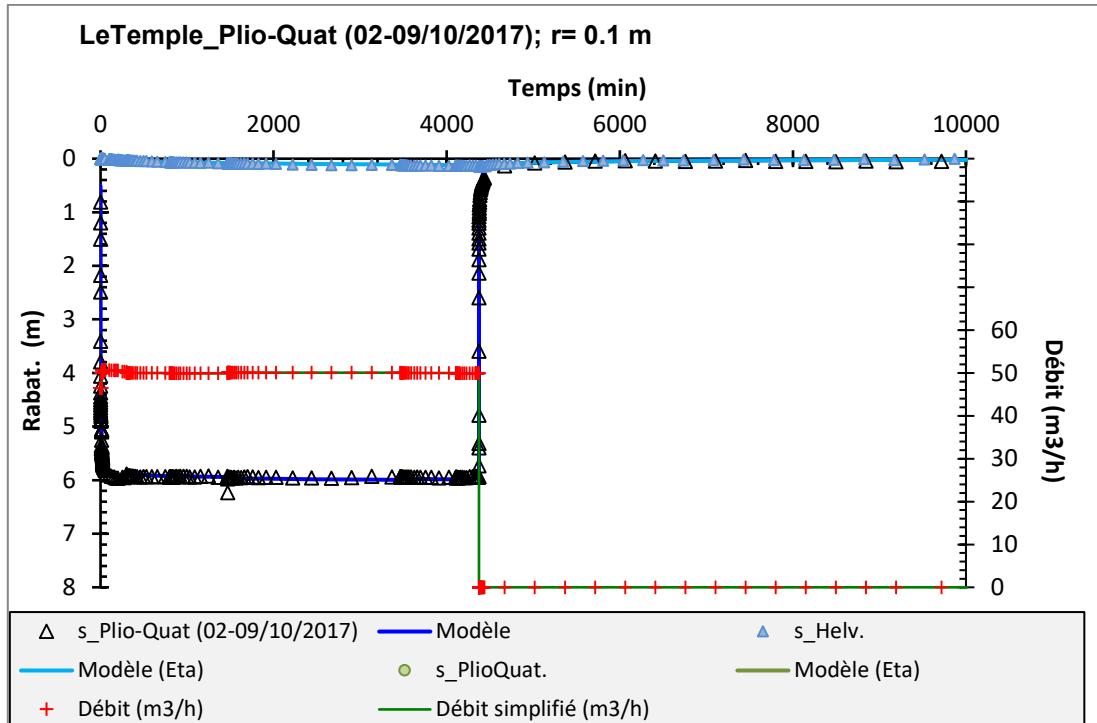
- T Plio-Quat. : $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- T Langhien-Serravallien : $3,5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- T Aquit. : $1.5E-4 \text{ m}^2/\text{s}$
- T Oligo: $1,4.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$:

- **Forage au Plio-Quaternaire (BSS003YBTE/X)**

Modélisation

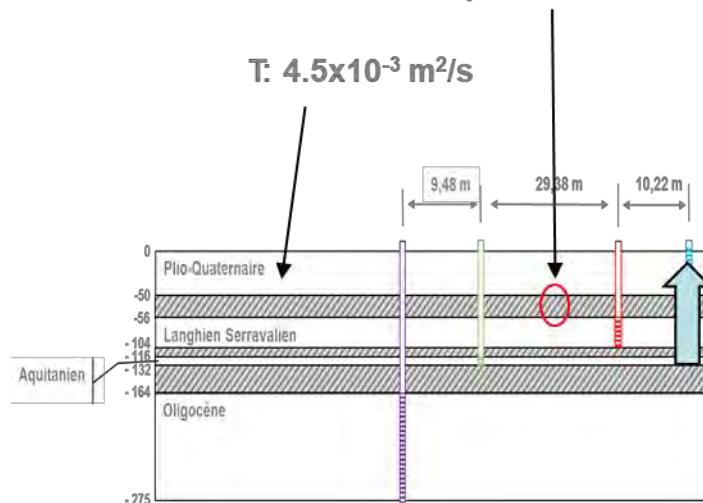






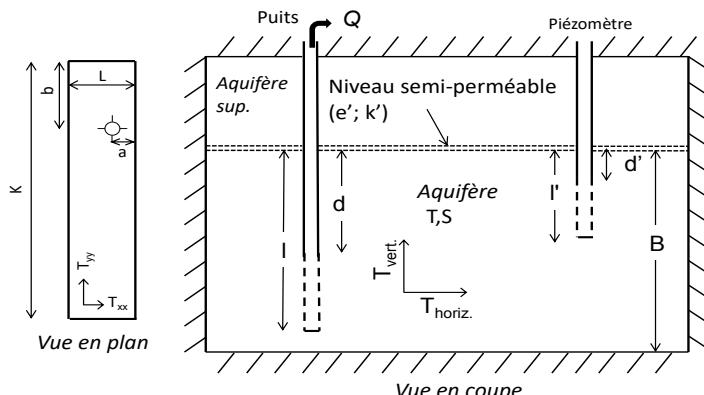
LeTemple_Plio-Quat (02-09/10/2017)		Obs.Langhien-Serravallien
	r (m)	0.1
Aquifère capté (inférieur)	T (m ² /s)	4.50E-03
Aquifère capté (inférieur)	S (-)	1.0E-03
Semi-perméable	k' (m/s)	2.00E-07
Semi-perméable	b' (m)	1
Aquifère supérieur	T_0 (m ² /s)	2.70E-02
Aquifère supérieur	S_y (-)	1.5E-03
Longueur du puits	l (m)	40
Haut crête / toit de l'aquifère (puits)	d (m)	0
Epaisseur aquifère	B (m)	50
Pertes de charge quadratiques	C (m-5s ²)	8000
Effet de capacité	R_c (m)	0.06
		0.001

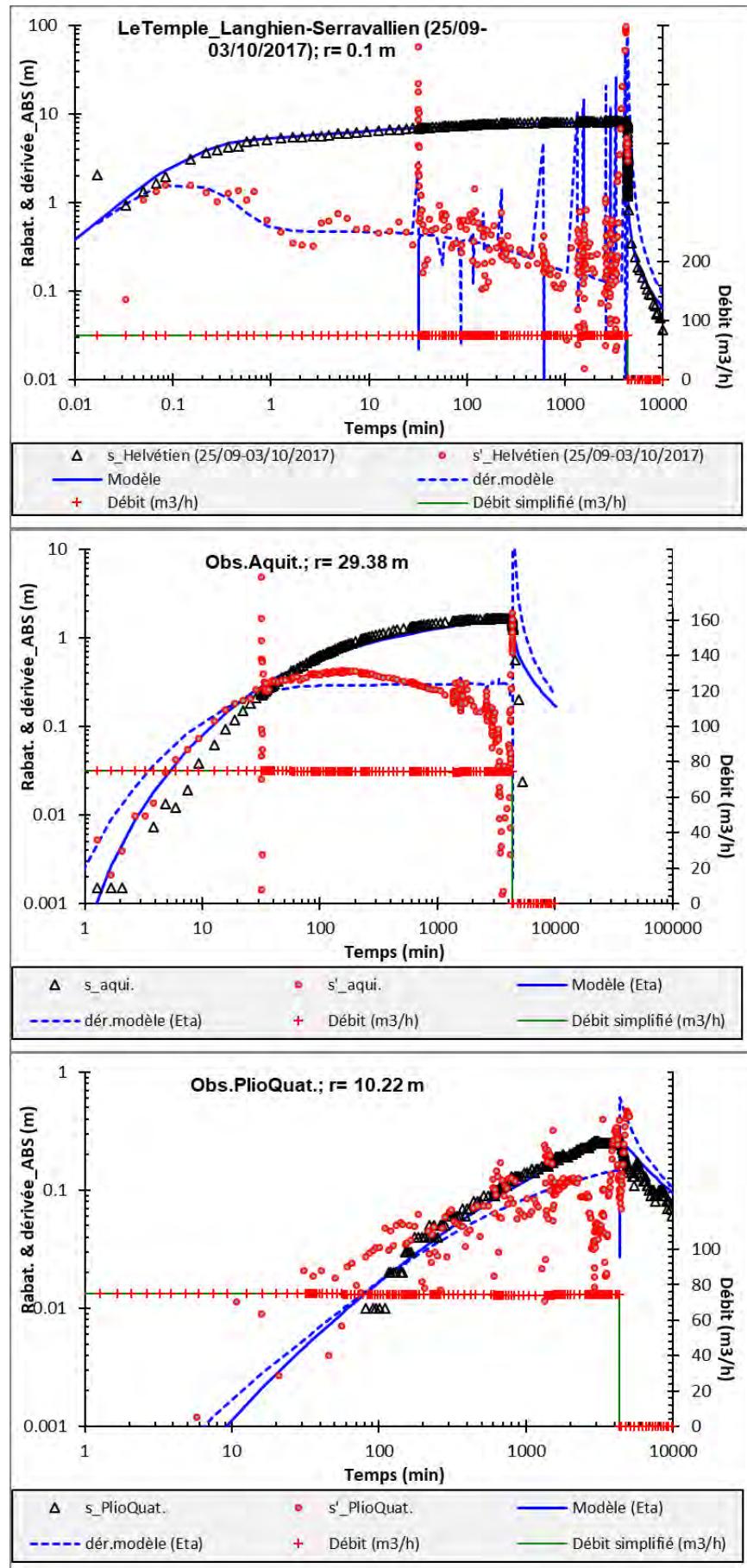
k' : $1-2 \times 10^{-7}$ m/s
pour $b'=1$ m

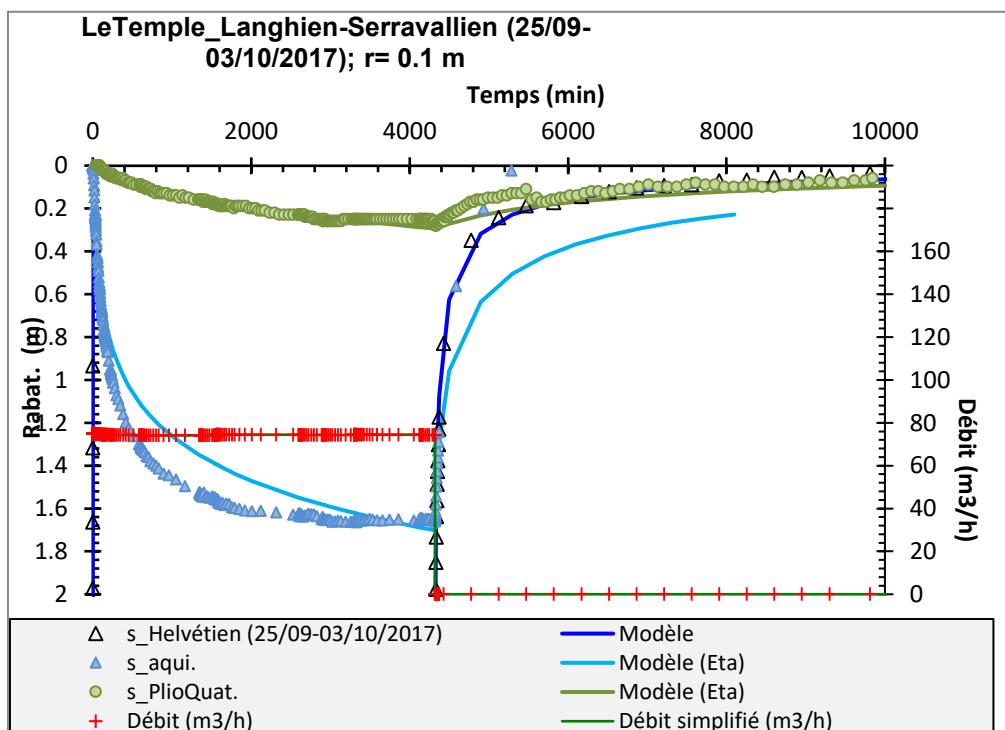
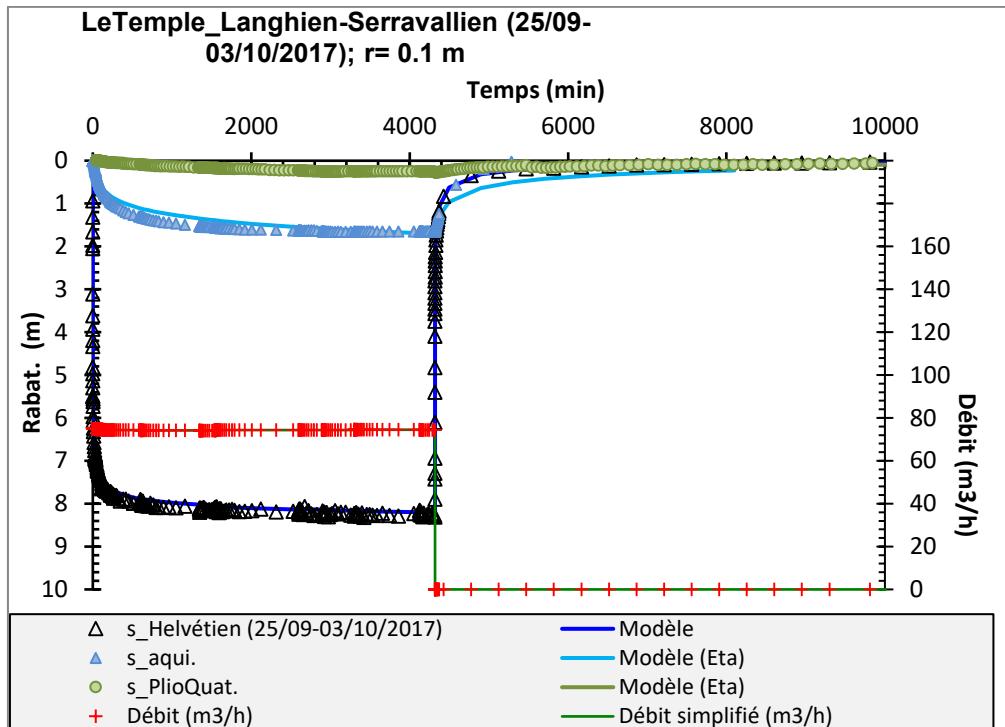


- Forage au Langhien-Serravallien (BSS003YBSS/X)

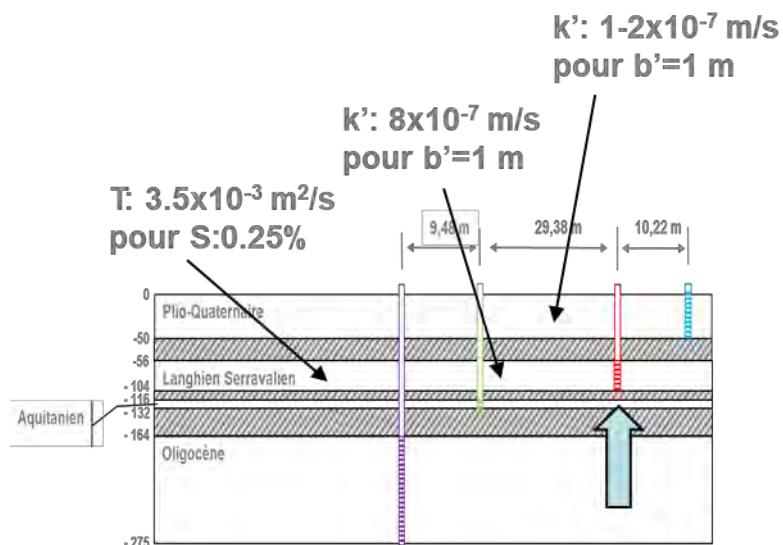
Modélisation





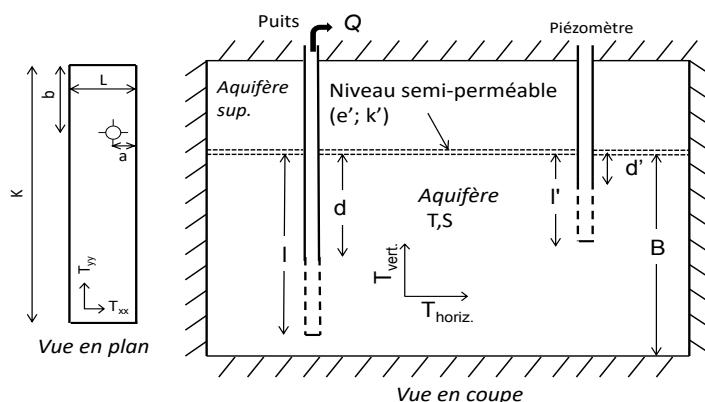


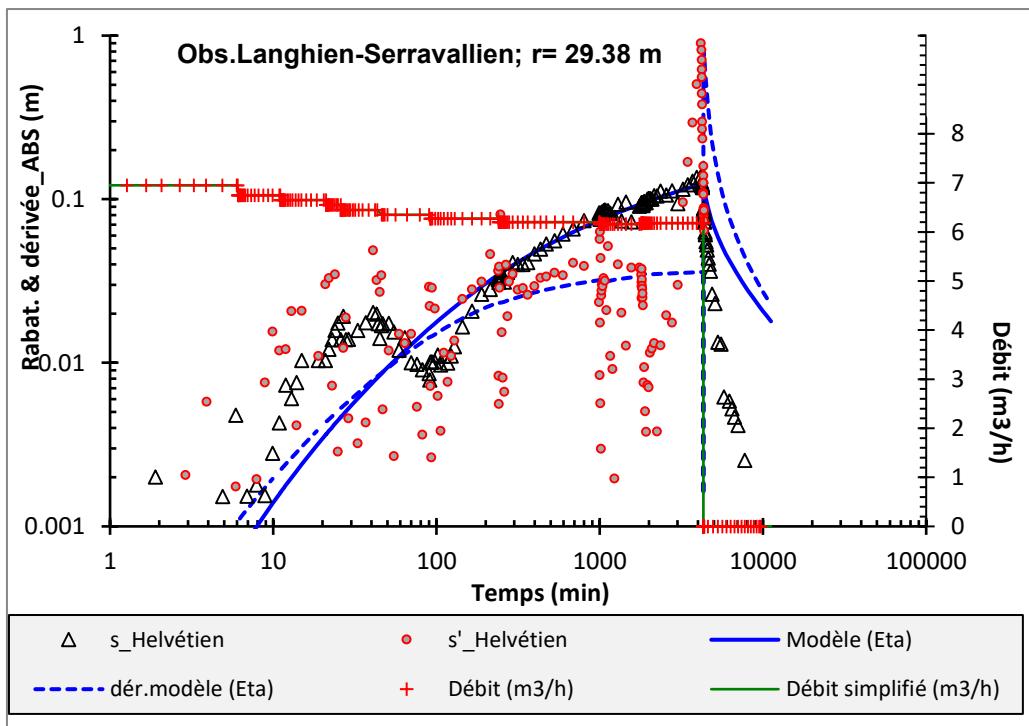
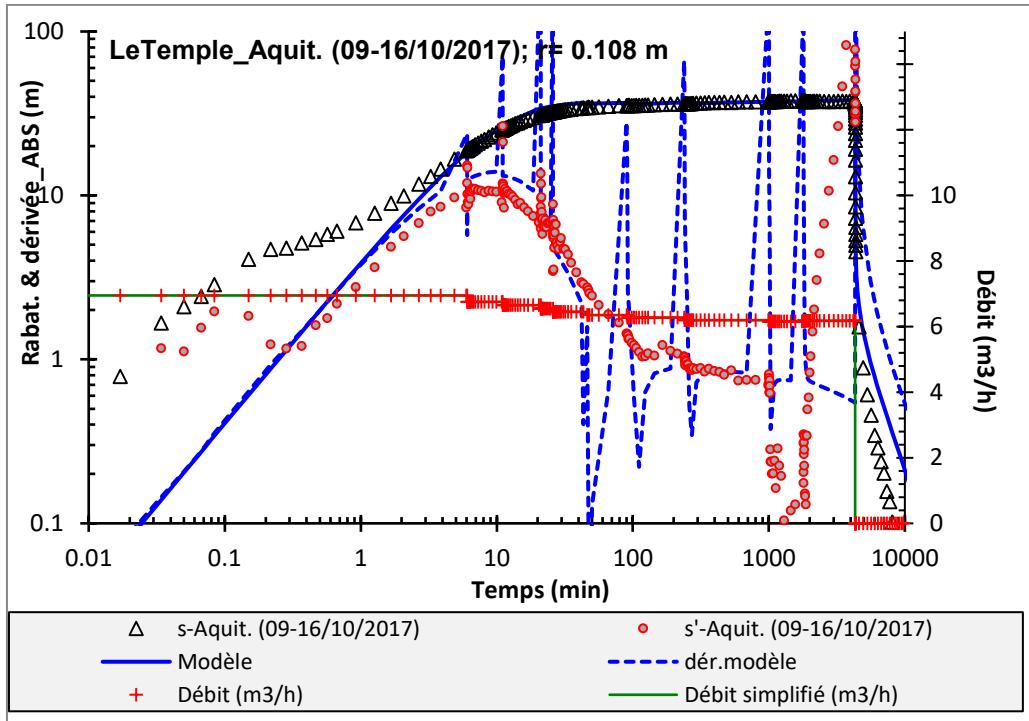
LeTemple_Langhien-Serravallien (25/09-03/10/2017)			Obs.Aquit.	Obs.PlioQuat.
	r (m)	0.1	29.38	10.22
Aquifère capté (inférieur)	T (m ² /s)	3.50E-03	3.5E-03	3.5E-03
Aquifère capté (inférieur)	S (-)	2.5E-03	2.5E-03	2.5E-03
Semi-perméable	k' (m/s)	1.00E-07	8.00E-07	2.00E-07
Semi-perméable	b' (m)	1	1	1
Aquifère supérieur	T0 (m ² /s)	1.20E-02	2.00E-03	5.00E-03
Aquifère supérieur	Sy (-)	1.0E-03	1.1E-03	1.0E-01
Pertes de charge quadratiques	C (m-5s ²)	1600	0	0
Effet de capacité	Rc (m)	0.1	0.001	0.001

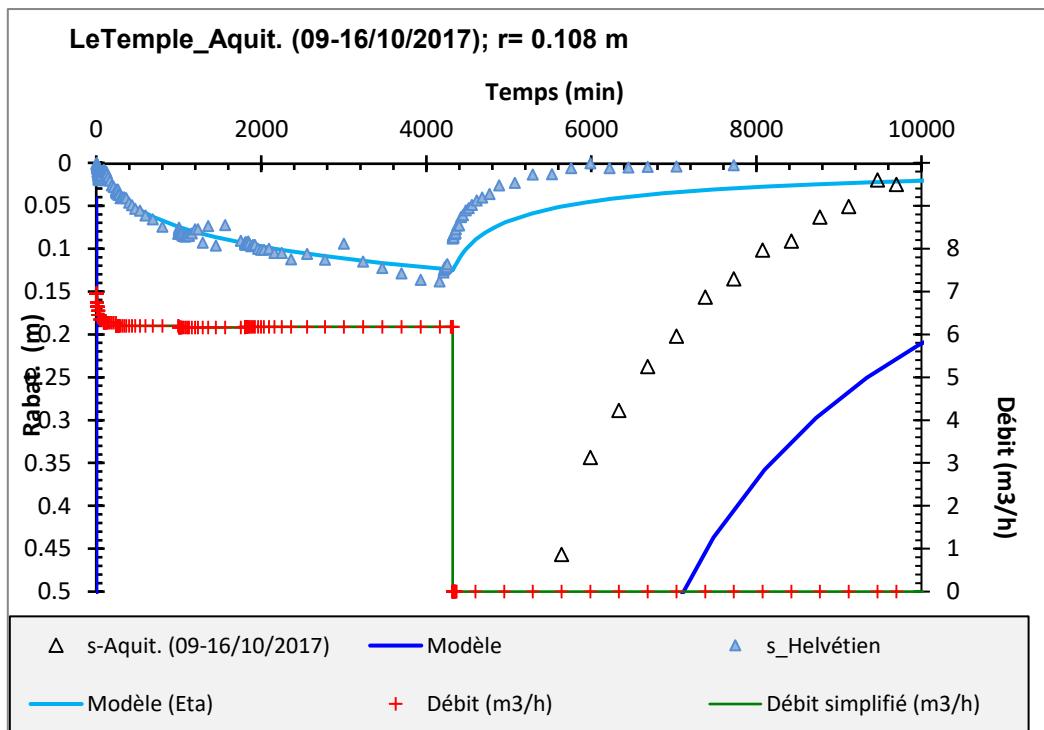
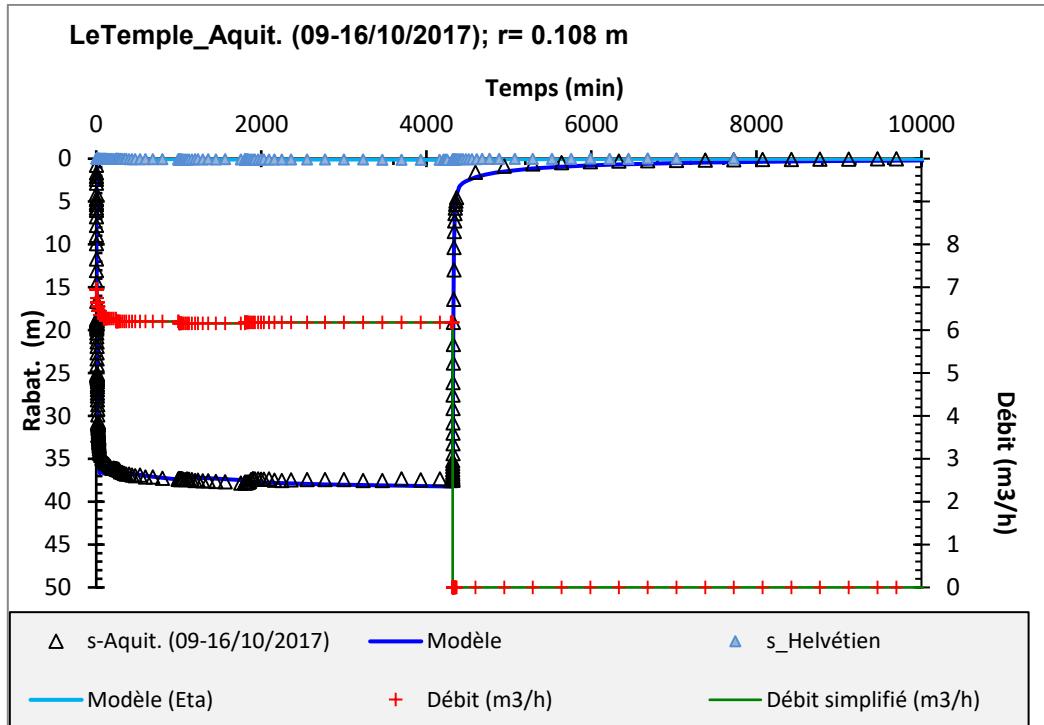


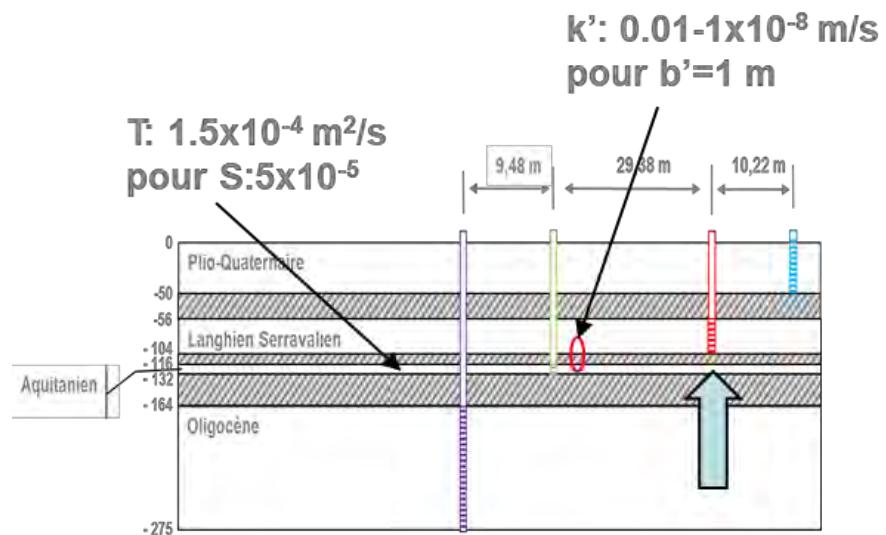
- Forage à l'Aquitainien (BSS003YBSK/X)

Modélisation





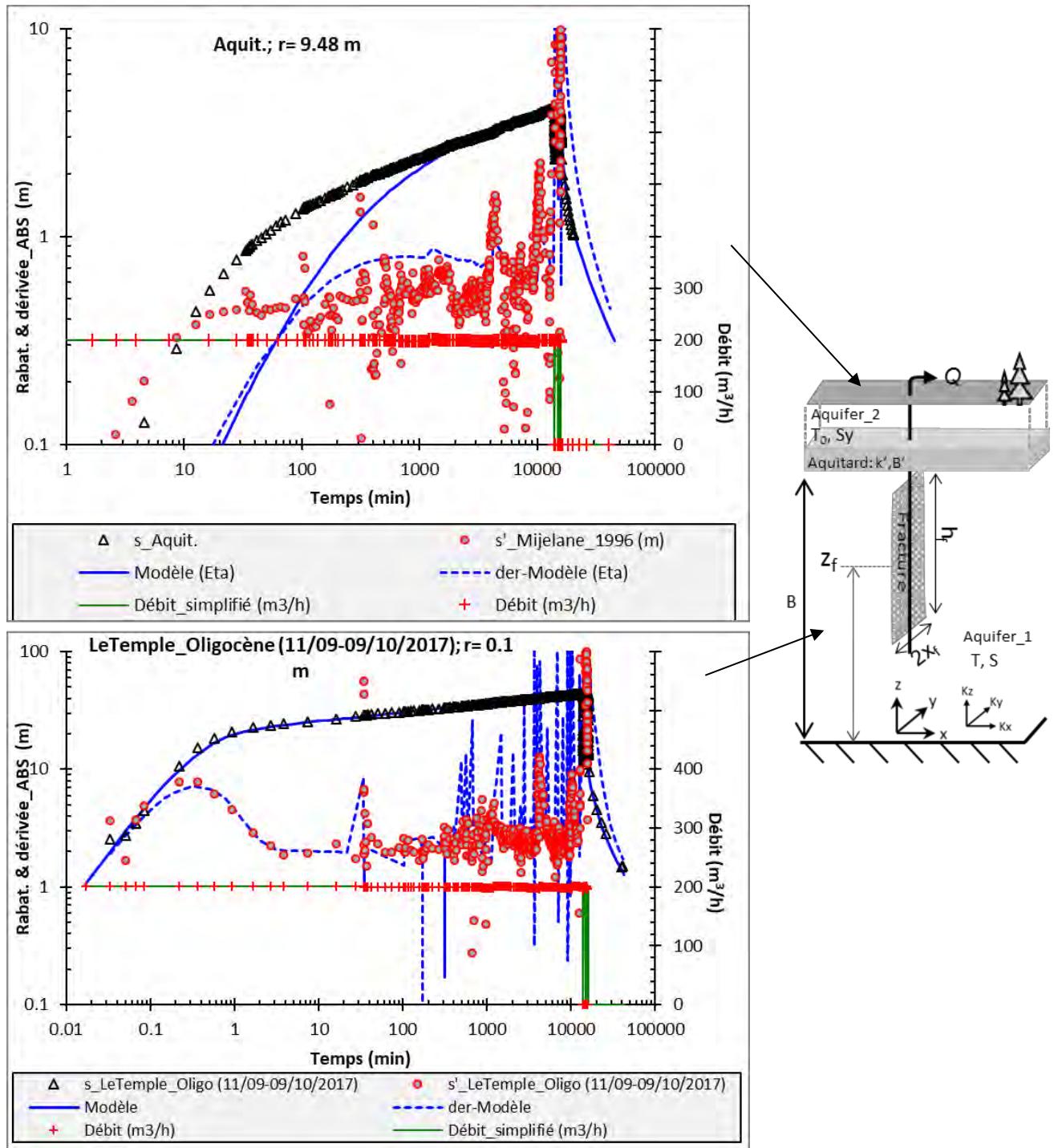


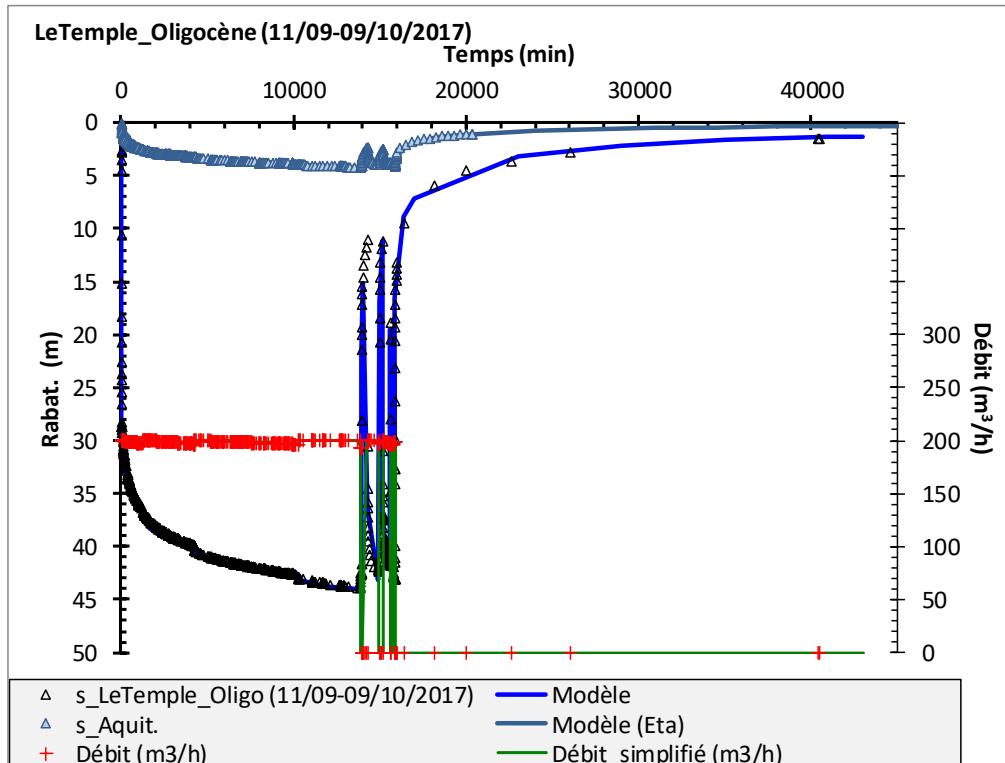


LeTemple_Aquit. (09-16/10/2017)			Obs.Langhien-Serravallien
	r (m)	0.108	29.38
Aquifère capté (inférieur)	T (m ² /s)	1.50E-04	1.5E-04
Aquifère capté (inférieur)	S (-)	5.0E-05	5.0E-05
Semi-perméable	k' (m/s)	1.00E-10	1.00E-08
Semi-perméable	b' (m)	1	1
Aquifère supérieur	T ₀ (m ² /s)	1.55E-03	3.50E-03
Aquifère supérieur	S _y (-)	4.0E-03	4.0E-03
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)	7300000	0
Effet de capacité	R _c (m)	0.095	0.001

- Forage à l'Oligocène (BSS003YBRQ/X)

Modélisation

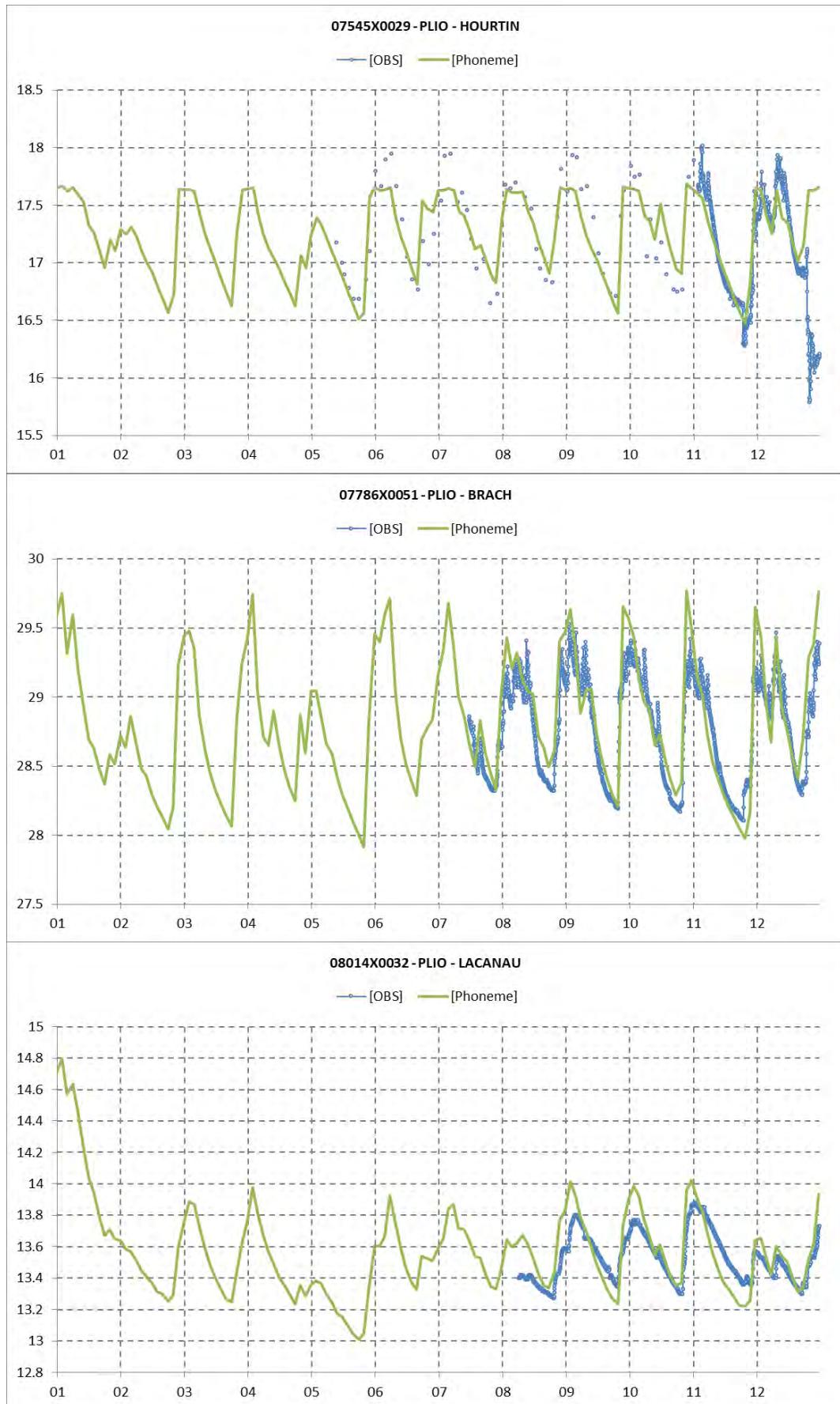


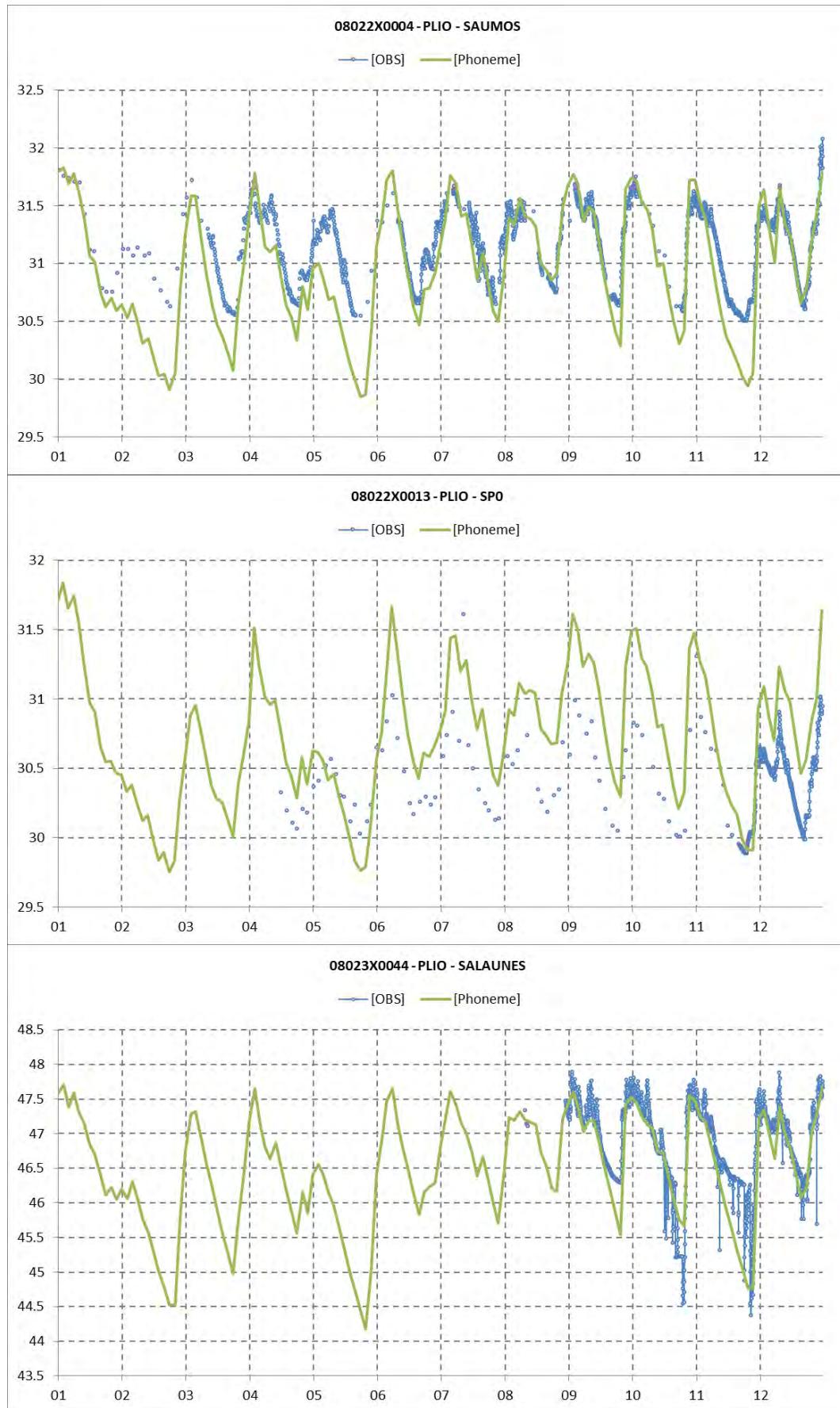


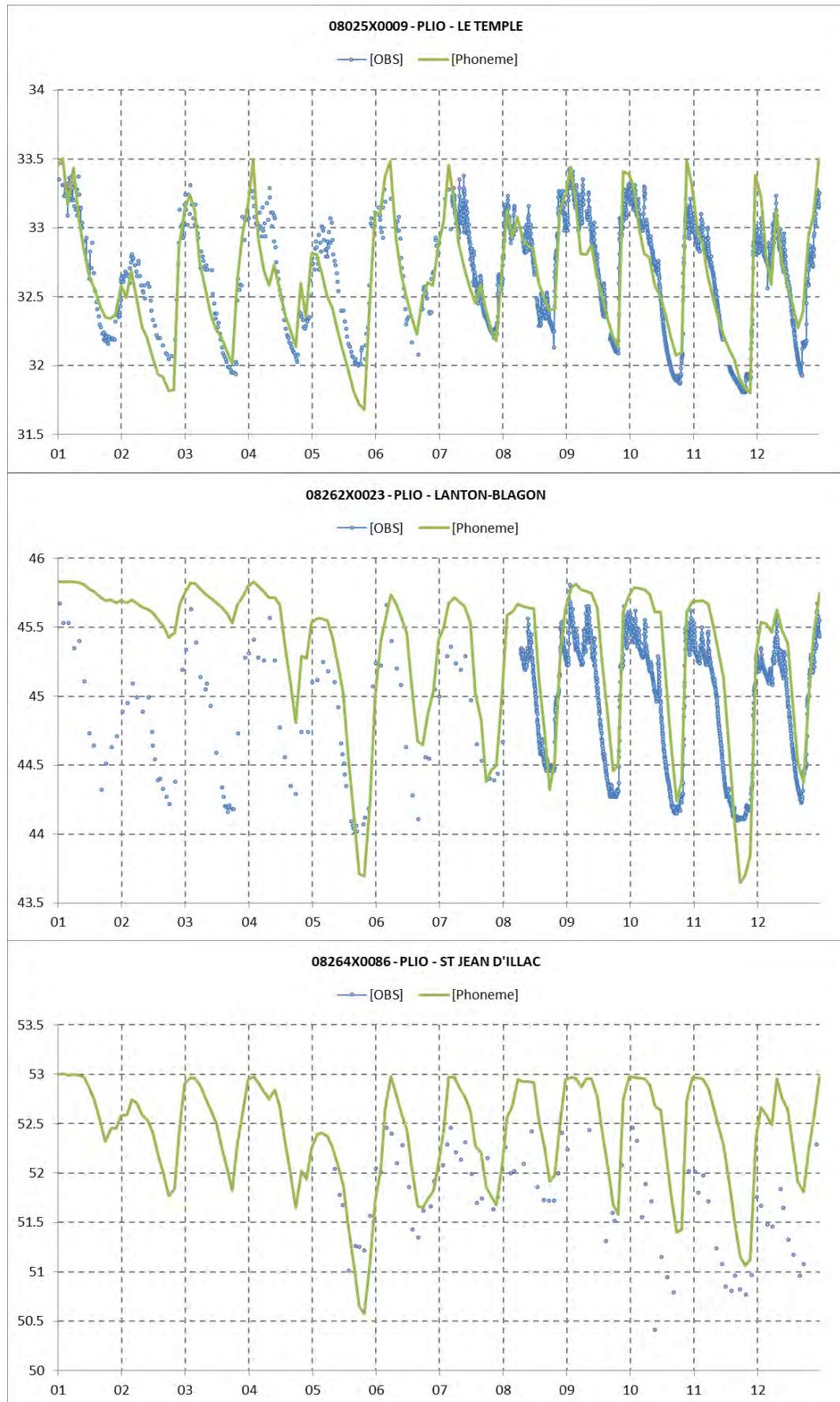
LeTemple_Oligocène (11/09-09/10/2017)	LeTemple_Oligocène (11/09-09/10/2017)	Aquit.
Rayon (m)		0.1
Transmissivité aquifère (m ² /s)	1.40E-03	1.40E-03
Emmagasinement aquifère (-)	2.00E-03	2.00E-03
Long. fracture verticale (m)	200.00	200.00
l=prof de l fracture ds l'aquifère pompé	67.50	67.50
d=dist. Toit de l'aquifère/fracture	62.50	62.50
Epaisseur Aquifère (m)	130.00	130.00
Perm. aquitard, k' (m/s)	9.50E-08	9.50E-08
Epaisseur aquitard, b' (m)	1.00	1.00
Transmissivité aquifère non-pompé, T0 (m ² /s)	1.50E-04	4.50E-03
Emmagasinement aquifère non-pompé, Sy (-)	1.00E-04	4.00E-04
Pertes de charge quadratiques (m-5s ²)	3000.0	-
Effet de capacité (m)	0.03	-

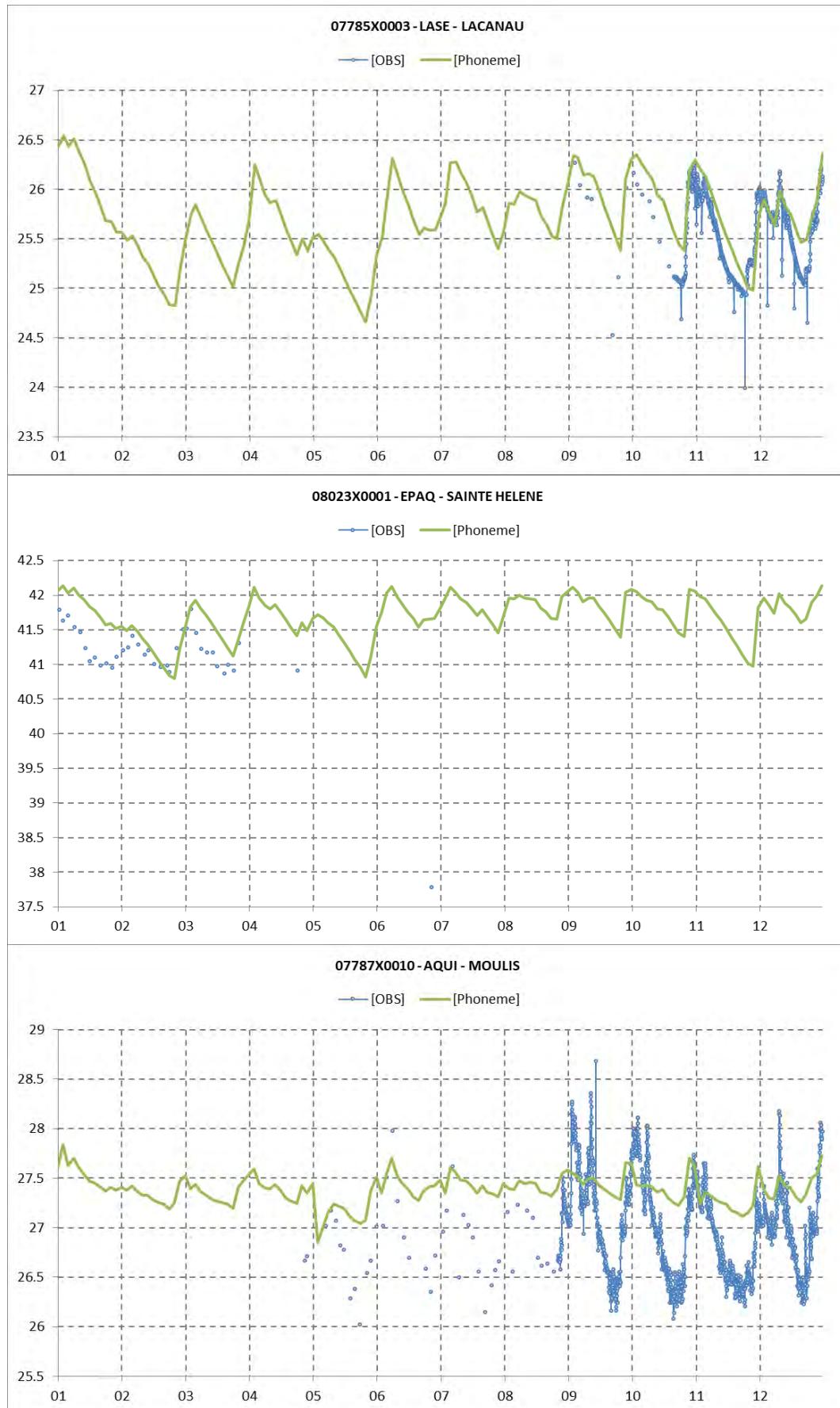
Annexe 5

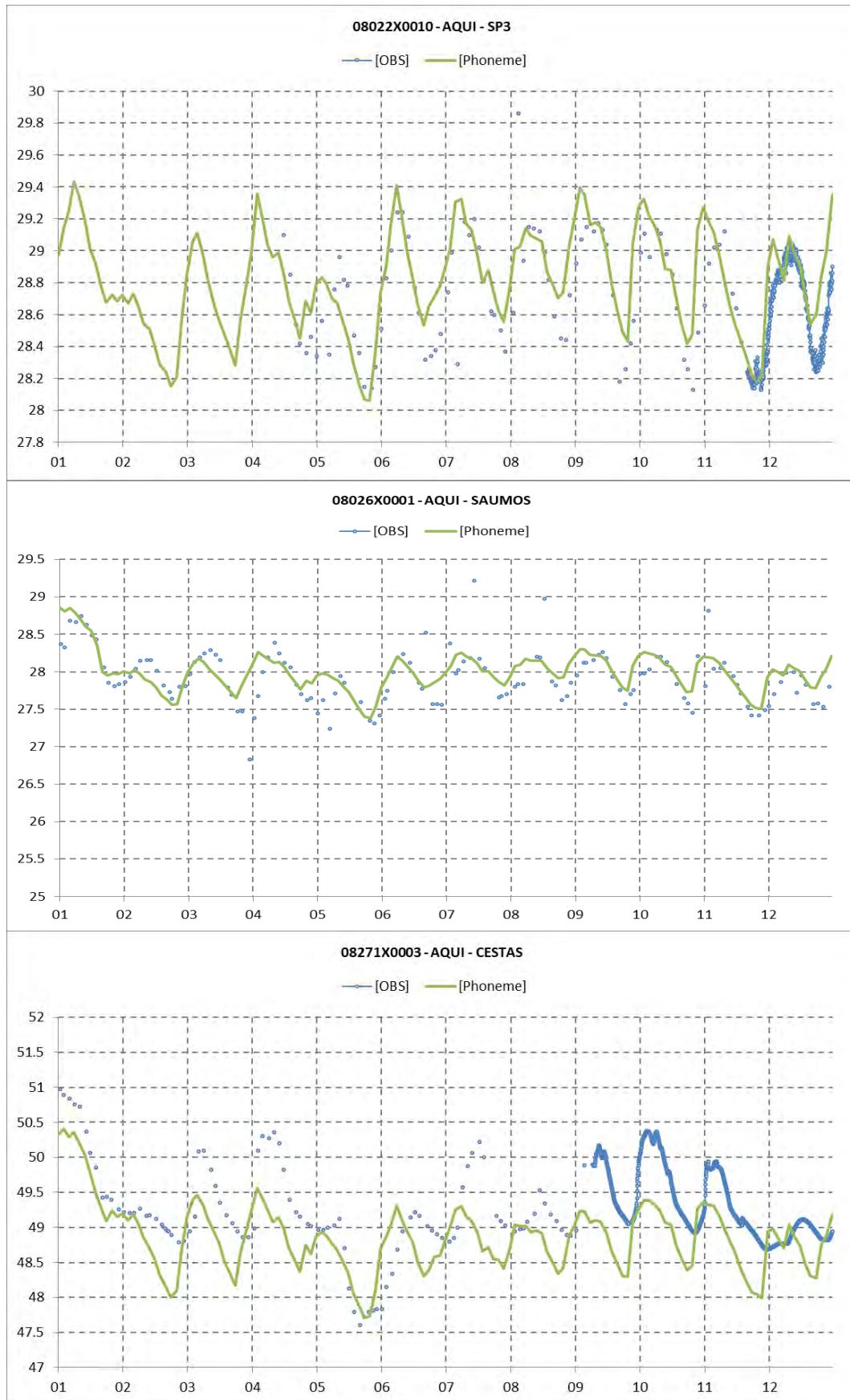
Chroniques de calage

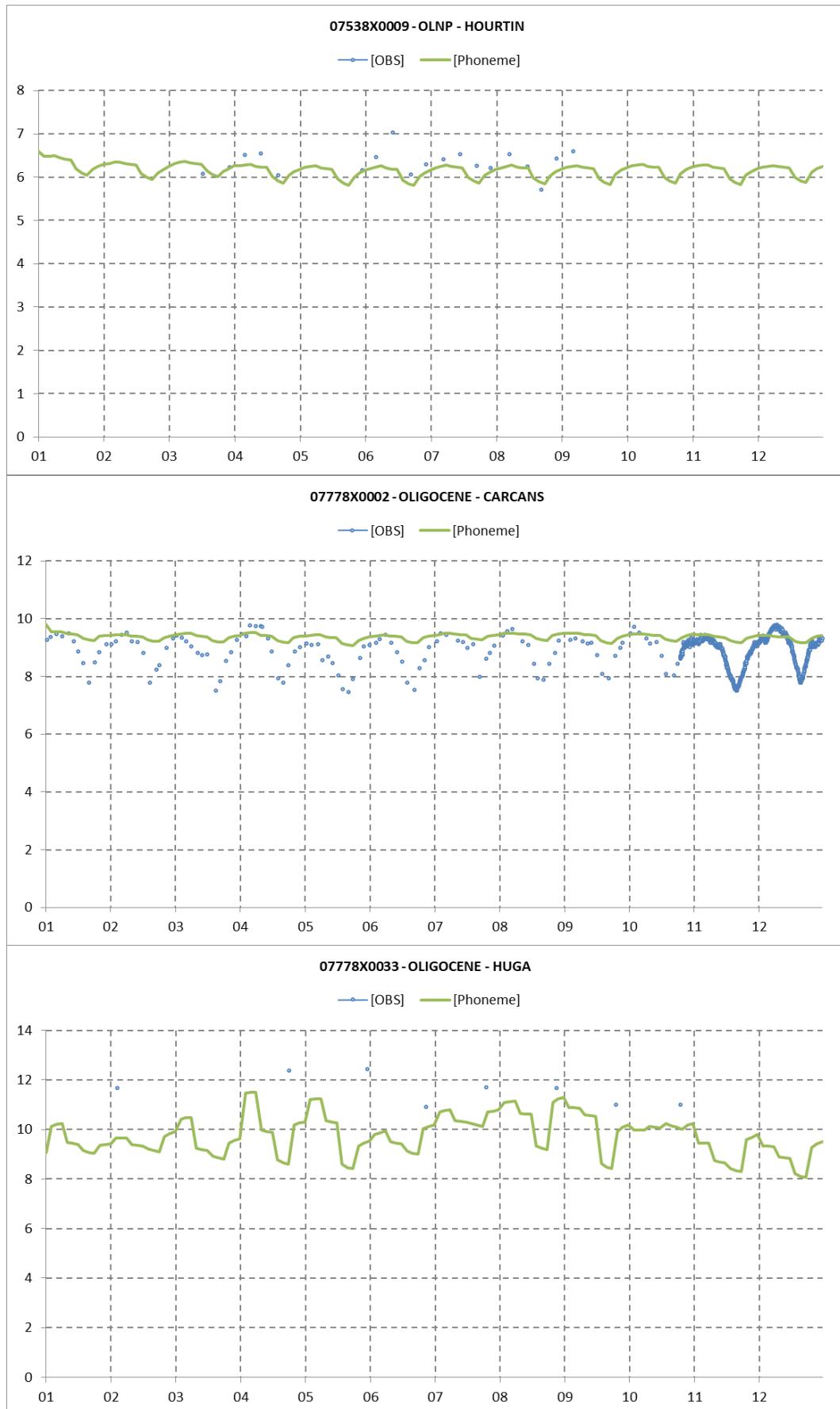


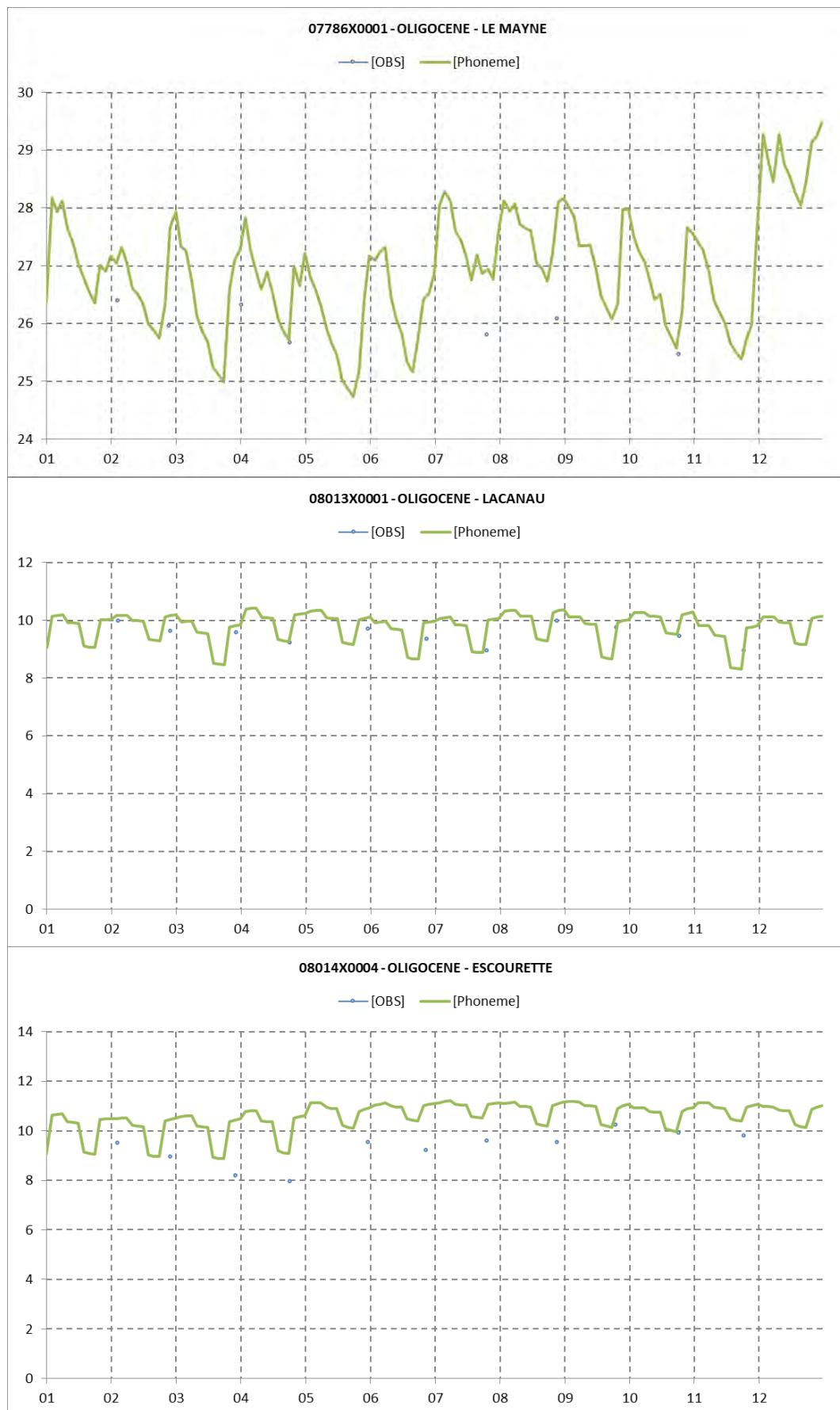


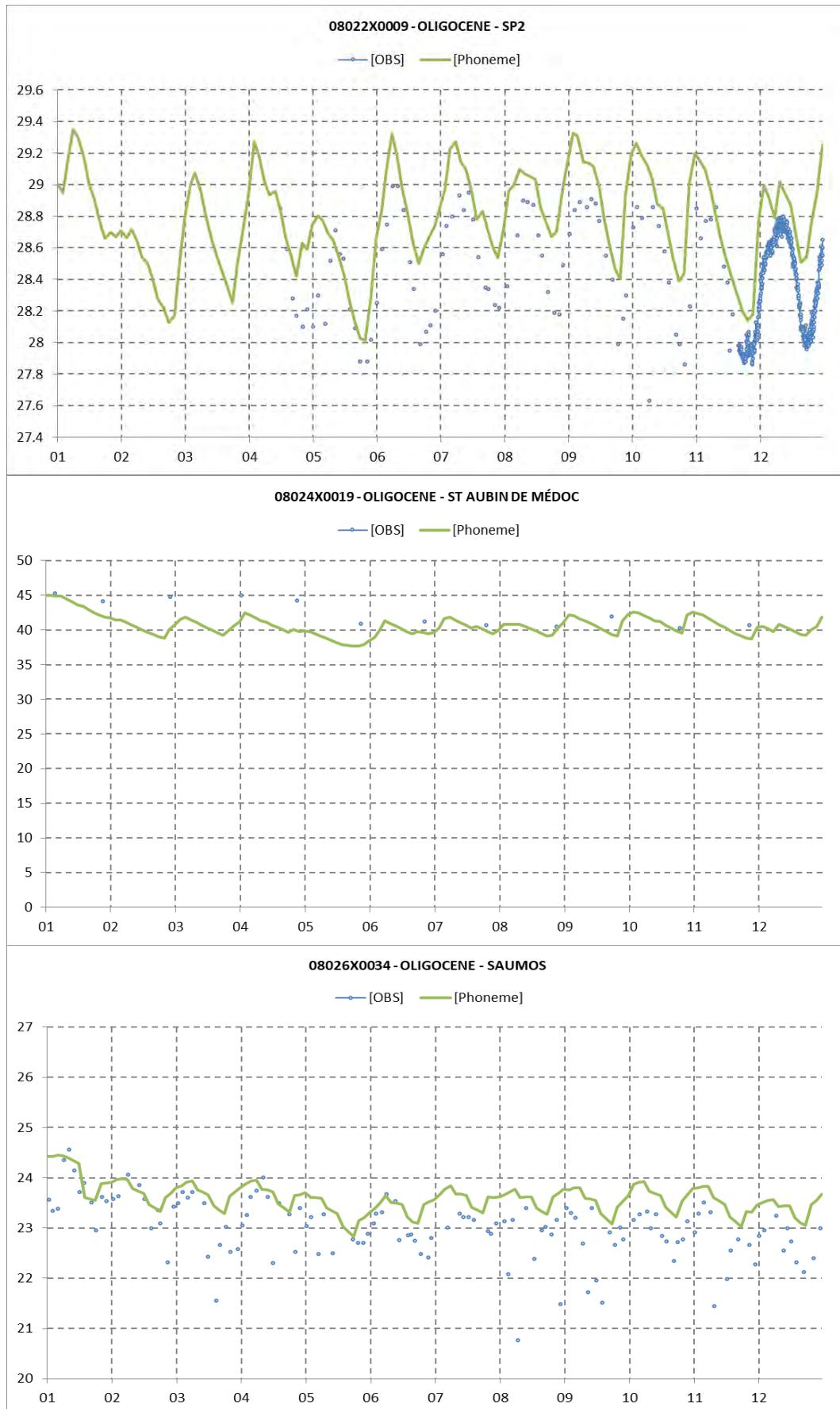


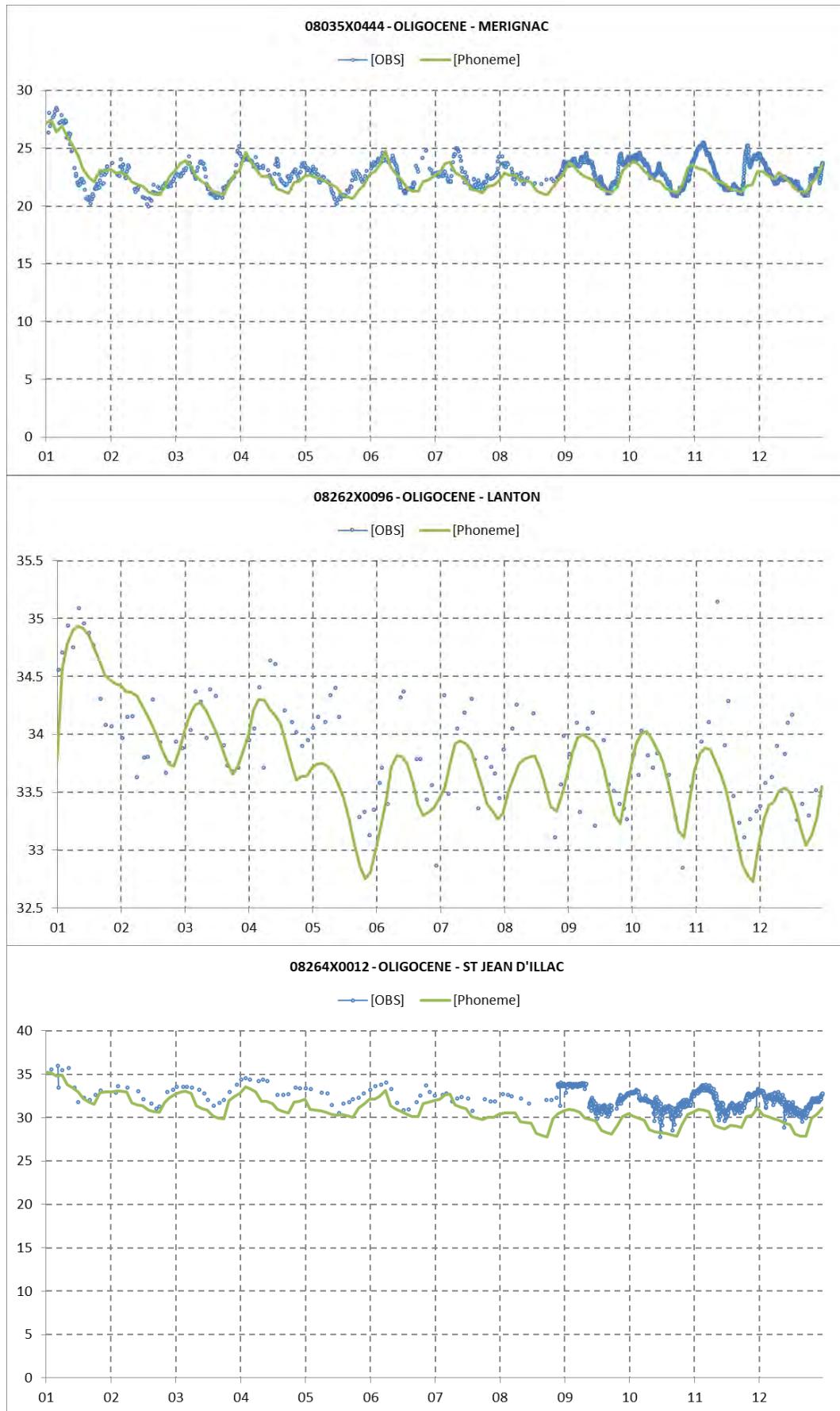


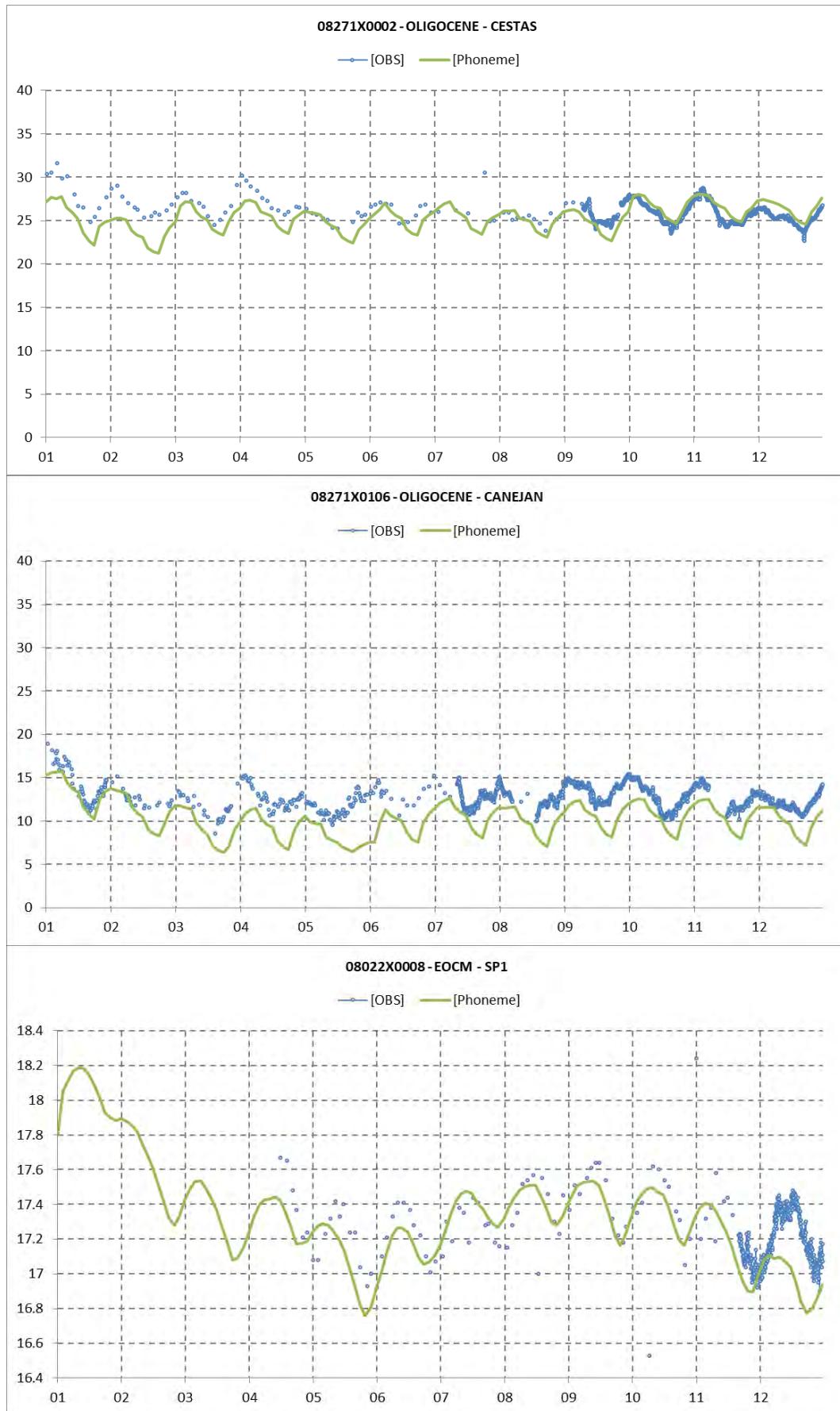


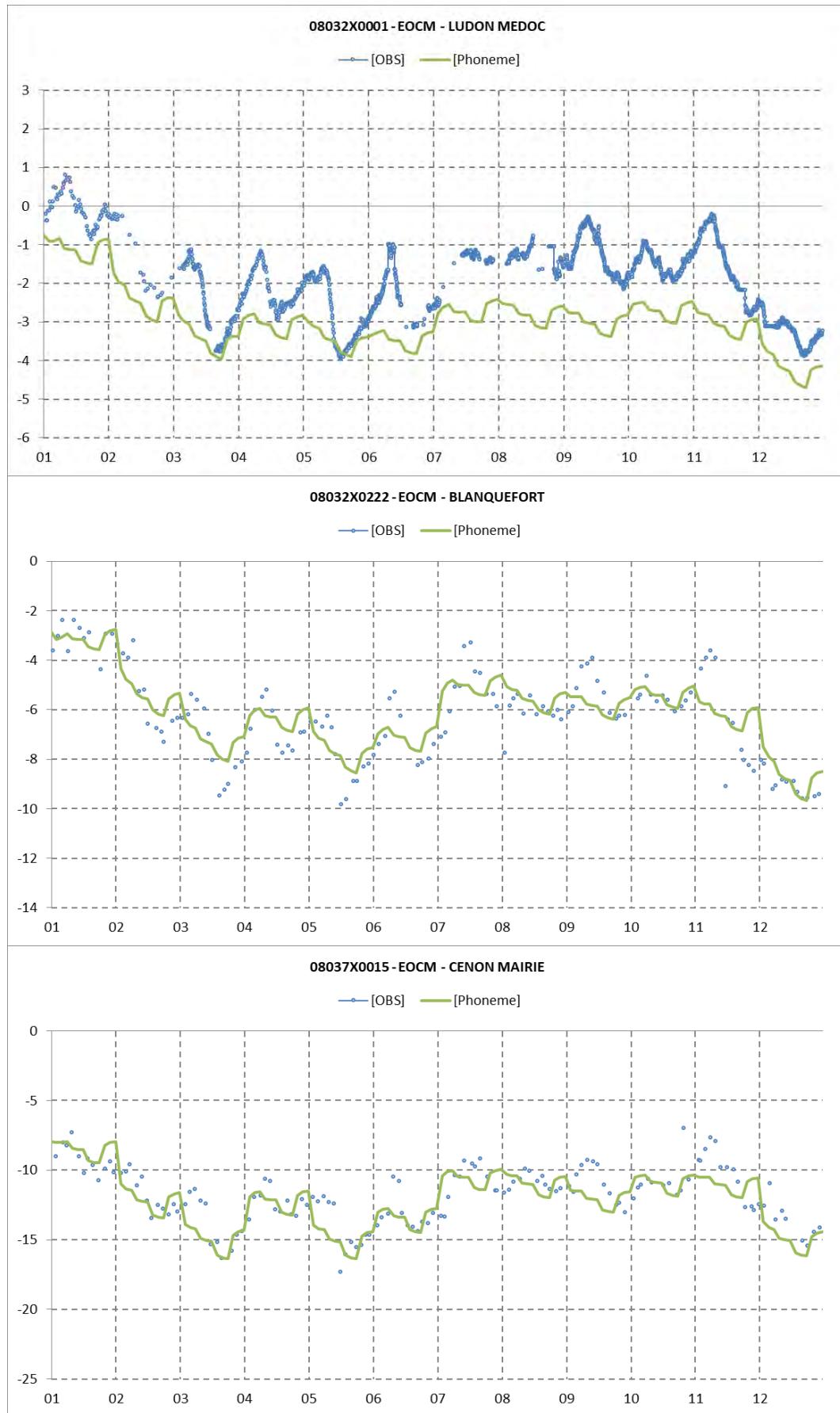


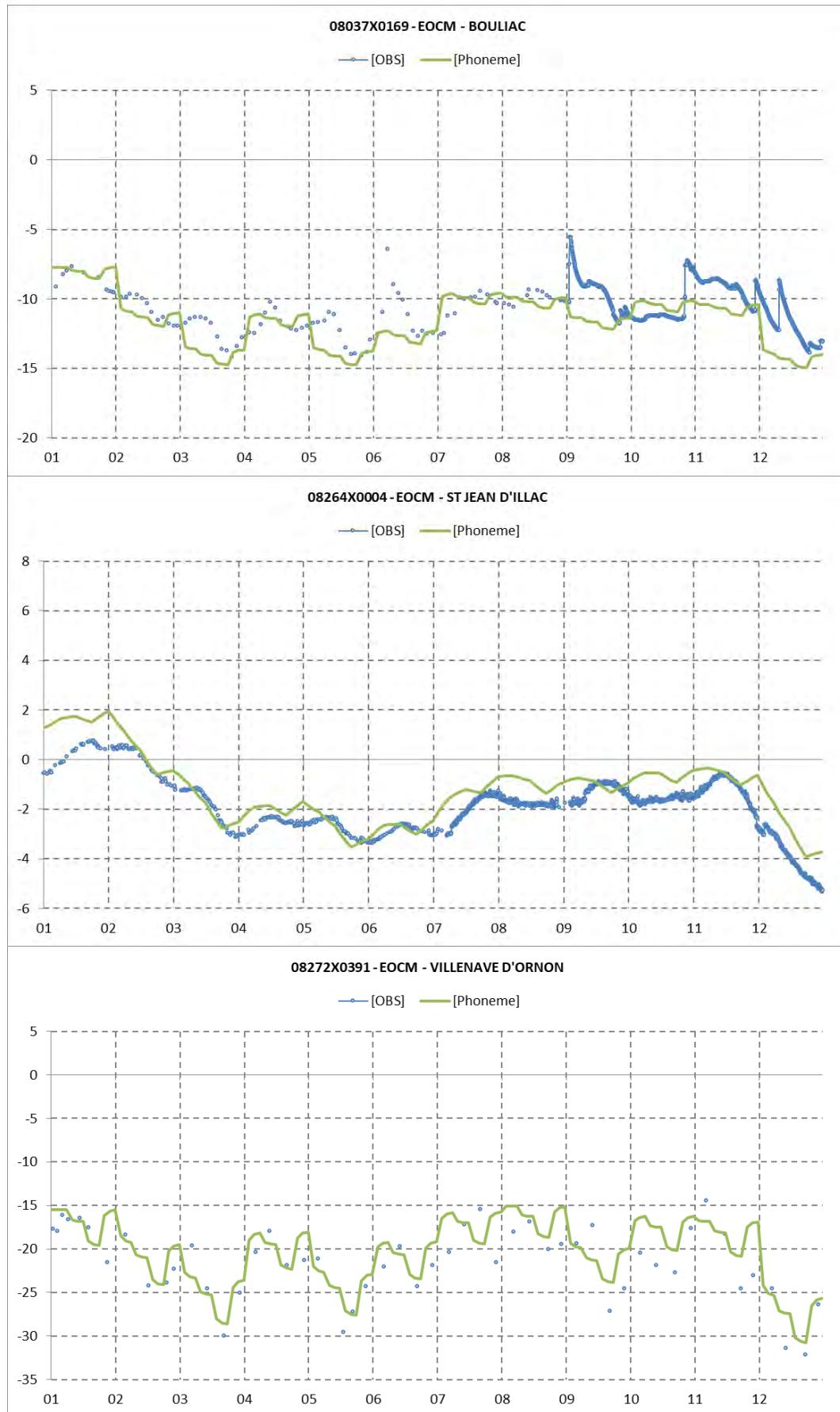


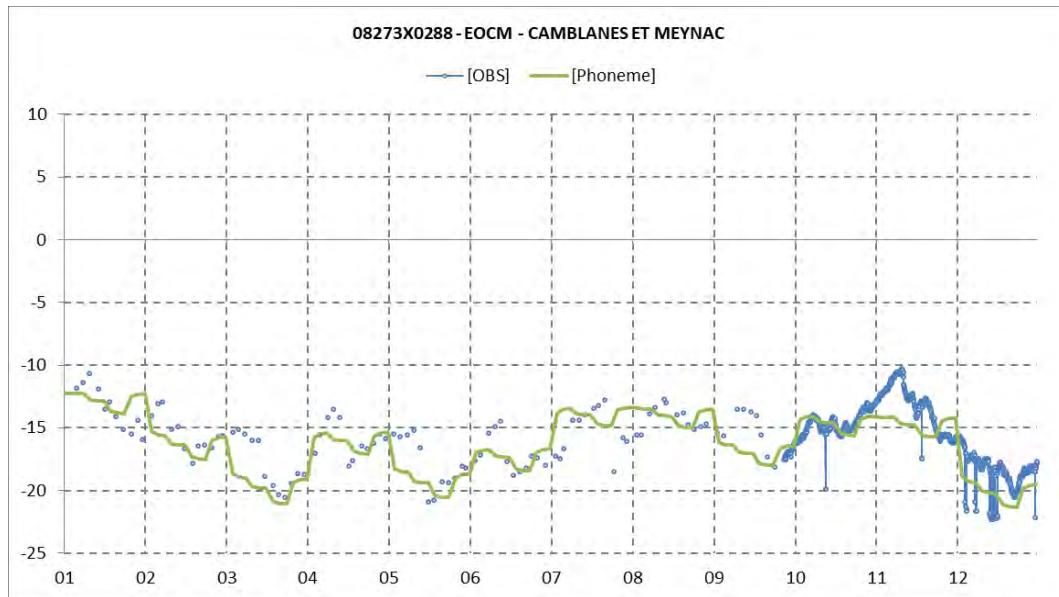














Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33 600 – Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 71