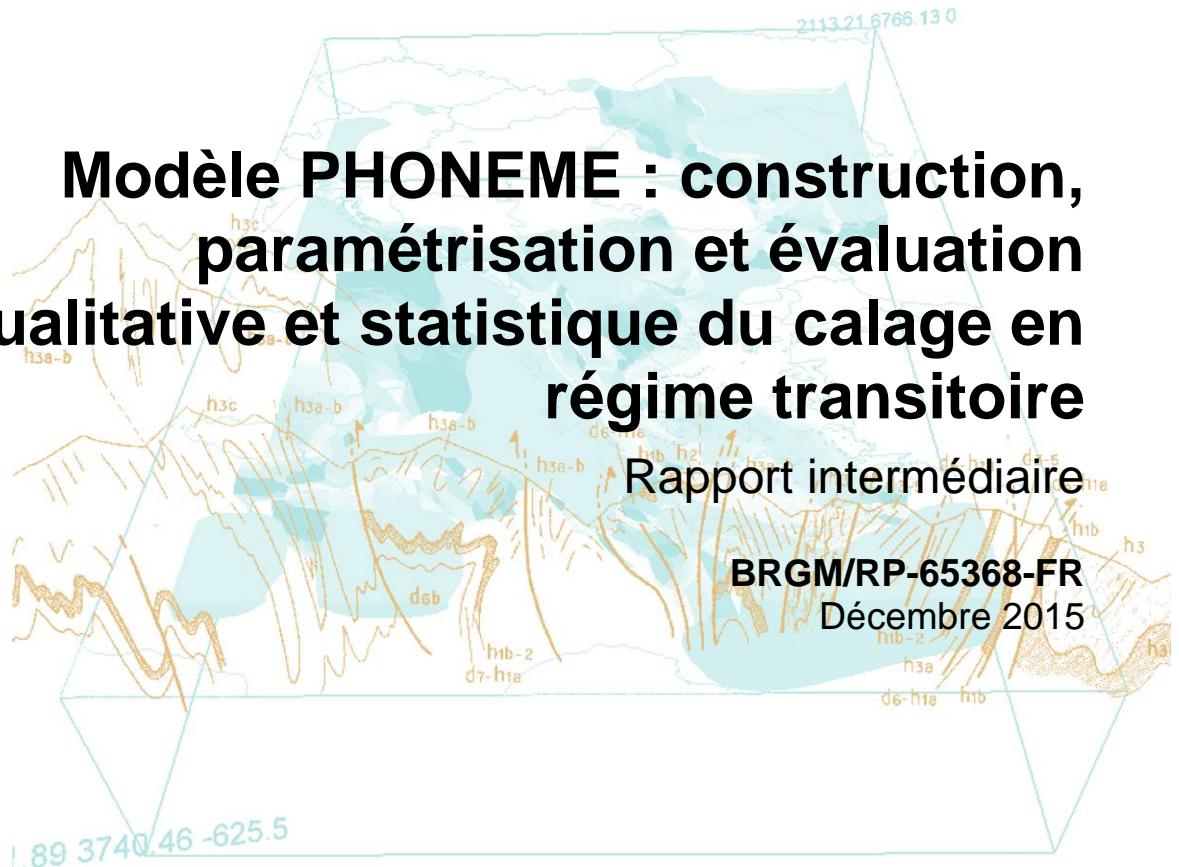




Modèle PHONEME : construction, paramétrisation et évaluation qualitative et statistique du calage en régime transitoire

Rapport intermédiaire

Décembre 2015



Modèle PHONEME : construction, paramétrisation et évaluation qualitative et statistique du calage en régime transitoire

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-65368-FR
Décembre 2015

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

M. Saltel, L. Arnaud

Vérificateur :

Nom : Nadia AMRAOUI
Fonction : Responsable scientifique
Date : 16/12/2015

Approbateur :

Nom : Nicolas PEDRON
Fonction : Directeur du BRGM
Aquitaine
Date : 26/01/2016



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

Mots-clés :

Modélisation géologique, modélisation hydrodynamique, calage, champ captant, Oligocène, Landes du Médoc

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

Salte M. et 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.

Synthèse

Le travail présenté dans ce rapport rend compte du travail de conception d'un modèle hydrodynamique élaboré 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. La robustesse de son calage permet de l'utiliser pour réaliser des simulations prospectives et ainsi 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. 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).

La première étape a donc consisté à construire à l'aide du logiciel GDM (Geological Data Management) un modèle géologique fin à la maille de 100 m sur l'extension du domaine d'intérêt qui correspond à 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 modèle comporte 15 couches correspondant aux horizons aquifères et aux épontes allant du Plio-Quaternaire au Campanien. Cette géométrie a ensuite été insérée sous la forme d'un gigogne au sein d'une extraction du MONA (version 3.3b 2010) pour créer un modèle hydrodynamique local et bénéficier de l'ossature du modèle régional et des données afférentes (perméabilités,

emmagasinement, potentiels imposés,...). Le modèle a ensuite été converti de pseudo-3D à 3D afin d'intégrer le rôle capacitif des épontes. La géométrie du modèle en dehors du gigogne a ensuite été ajustée à partir de la version 4 du MONA pour bénéficier des connaissances les plus récentes sur ce secteur (Saltel et al., 2014).

La deuxième étape correspond à la modélisation hydrodynamique à proprement parler. Lors de cette phase, une attention particulière a été apportée à l'intégration du réseau hydrographique et à la prise en compte de la recharge de manière à pouvoir appréhender dans le modèle le plus finement possible les éventuels impacts de l'exploitation du champ captant sur le Plio-Quaternaire et les eaux superficielles. L'ensemble des chroniques piézométriques de la zone a été utilisé pour ajuster le calage de l'outil en régime transitoire au pas de temps mensuel de 2001 à 2012. Le processus de contrôle et de validation du modèle est décrit en détail dans ce rapport et montre une corrélation tout à fait satisfaisante entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Les résultats montrent un écart moyen proche de zéro sans dérive au cours du temps traduisant une bonne restitution de l'évolution des charges dans le modèle.

A noter que les résultats des simulations d'impact effectuées à l'aide de cet outil seront exposés dans le rapport final de l'étude et ne sont pas décrits ici.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Modélisation géologique.....	11
2.1. OUTILS ET PRINCIPES	11
2.1.1. Principe général de modélisation	11
2.1.2. Constitution de la base de données	12
2.2. ÉLABORATION DU MODELE	15
3. Modélisation hydrodynamique	18
3.1. LOGICIEL	18
3.2. GEOMETRIE DU MODELE	19
3.2.1. Construction de la géométrie du modèle.....	19
3.2.2. Structuration des réservoirs modélisés	20
3.3. PARAMETRES DU MODELE	28
3.3.1. Paramètres spatio-temporels	28
3.3.2. Synthèse.....	36
3.4. CONTROLE ET VALIDATION DU MODELE	38
3.4.1. Points d'observation.....	38
3.4.2. Calage du modèle en régime transitoire.....	39
3.5. ANALYSE DE SENSIBILITE	50
4. Conclusion.....	53
5. Bibliographie	55

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de corrélation diagraphique (Saltet et al., 2014)	12
Figure 2 : Données géologiques utilisées pour l'élaboration du modèle.....	13
Figure 3 : Pile stratigraphique des formations modélisées.....	14
Figure 4 : SIG "Modèle PHONEME" sous MapInfo.....	15
Figure 5 : Validation 3D du modèle.....	16
Figure 6 : Coupe N-S intégrant les données sismiques, les données de forages et les diagraphies.....	17
Figure 7 : Géométrie du modèle.....	18
Figure 8 : Amélioration de la prise en compte du rôle des épontes.....	19
Figure 9 : Carte d'épaisseur du Plio-Quaternaire.....	20
Figure 10 : Log théorique des formations Mio-Plio-Quaternaires du triangle landais (Corbier et al., 2014)	21
Figure 11 : Carte d'épaisseur de l'éponte au sommet du Langhien-Serravallien.....	22
Figure 12 : Carte d'épaisseur du réservoir du Langhien-Serravallien.....	23
Figure 13 : Carte d'épaisseur de l'éponte au sommet de l'Aquitanién.....	24
Figure 14 : Carte d'épaisseur du réservoir de l'Aquitanién.....	25
Figure 15 : Carte d'épaisseur de l'éponte Chattien-Miocène.....	26
Figure 16 : Carte d'épaisseur du réservoir de l'Oligocène.....	27
Figure 17 : Schéma de fonctionnement de la recharge (Thiéry, 2003).....	29
Figure 18 : Mailles SAFRAN utilisées comme zones météo dans le modèle PHONEME.....	30
Figure 19 : Réserve utile des sols calculée à partir de la carte pédologique au 250 000 ^{ème} de l'INRA (Richer de Forges et al, 2015)	30
Figure 20 : Réseau hydrographique dans le modèle PHONEME.....	33
Figure 21 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (Thiéry et al., 2001).....	33
Figure 22 : Géométrie d'un tronçon de rivière (Thiéry et al., 2001).....	34
Figure 23 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos.....	35
Figure 24 : Tableau synthétique des différents paramètres intégrés au modèle.....	37
Figure 25 : Points d'observation (piézomètres).....	38
Figure 26 : Localisation des points d'observation de la piézométrie et du débit des cours d'eau utilisés pour contrôler la validité du modèle.....	39
Figure 27 : Procédure de calage.....	40
Figure 28 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés dans 2 piézomètres.....	41
Figure 29 : Comparaison entre débits observés et débits simulés.....	42
Figure 30 : Localisation des forages et plan schématique du dispositif.....	43
Figure 31 : Reproduction par le modèle des tests d'exploitation réalisés à grande échelle en 2003.	44
Figure 32 : Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles.....	45
Figure 33 : Histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées.	46

Figure 34 : Diagramme de dispersion - hauteurs piézométriques simulées et observées (moyennes et écarts types)	47
Figure 35 : Nappe du Plio-Quaternaire - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.	48
Figure 36 : Nappes du Miocène (Langhien-Serravallien Aquitanien) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.	48
Figure 37 : Nappe de l'Oligocène - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.....	49
Figure 38 : Nappes de l'Éocène (supérieur, moyen et inférieur) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.	49
Figure 39 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des variations appliquées dans le cadre de l'analyse de sensibilité	50
Figure 40 : Impact de la variation de la perméabilité de l'éponte au sommet de l'Aquitainien sur le calage du piézomètre 08022X0010 captant l'Aquitainien à Sainte-Hélène.	51
Figure 41 : Impact sur les niveaux piézométriques d'une variation de -20% de la perméabilité de l'éponte au sommet de l'Aquitainien (pas de temps du 31/12/20012).	51

Liste des annexes

Annexe 1 Le logiciel GDM et son composant Multilayer	59
Annexe 2 Coupes dans la géométrie du modèle géologique numérique (GDM).....	65
Annexe 3 Le logiciel Marthe	83
Annexe 4 Potentiels imposés	105
Annexe 5 Fiches de reconnaissance des caractéristiques du réseau hydrographique	121
Annexe 6 Chroniques de calage	149

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 ces 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 [(Pédron 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 doivent 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, reste 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.

Ce rapport intermédiaire décrit donc la construction du modèle géologique et du modèle hydrodynamique élaboré spécifiquement pour évaluer l'impact du projet de champ captant des landes du Médoc. Il détail les paramètres introduits pour faire fonctionner l'outil, leurs origines et les incertitudes associées.

2. Modélisation 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. Cette zone correspond à l'aire d'influence du champ captant telle qu'elle a été simulée dans le rapport BRGM/RP-61290-FR (Cabaret et al., 2012). Cette géométrie sera insérée sous la forme d'un gigogne au sein d'une extraction du MONA (version 3.3b 2010) pour créer un modèle hydrodynamique local et bénéficier de l'ossature du modèle régional et des données afférentes (perméabilités, emmagasinement, potentiels imposés...).

2.1. OUTILS ET PRINCIPES

Le modèle géologique a été réalisé en utilisant le logiciel GDM (Geological Data Management) et son composant Multilayer, développés par le BRGM (Annexe 1). Ces outils permettent d'interpoler les toits et les murs des formations considérées et de combiner ces surfaces en contrôlant la cohérence par rapport aux données d'entrée.

2.1.1. Principe général de modélisation

Multilayer permet de préparer puis de réaliser la modélisation de formations sédimentaires multicouches, dans le cas où toute formation géologique ne peut être présente qu'une seule fois le long d'une verticale. Autrement dit, le programme ne traite pas les géométries comprenant failles inverses, plis couchés, chevauchements ou autres phénomènes tectoniques provoquant une inversion de l'ordre chronologique des formations. Les formations modélisées sont décrites par une "*pile stratigraphique*" qui spécifie la logique de dépôt et la présence ou non de surfaces d'érosion. Les données pouvant être prises en compte sont :

- les forages avec codage stratigraphique des formations traversées,
- le modèle numérique de terrain (MNT),
- la carte géologique, sous forme de polylinéaires (chaque segment de polylinéaire délimitant deux formations géologiques différentes, avec un code indiquant les noms de ces formations) et de polygones,
- les données en coupes (ex : données sismiques),
- les failles,
- les points ou forages de contrainte permettant de contraindre le modèle.

Le fonctionnement du programme est basé sur trois principes :

1. la définition d'une pile stratigraphique décrivant la succession des formations et les relations entre deux formations successives,
2. l'interprétation des données (leur codage) selon le cadre fourni par cette pile,
3. l'interpolation des surfaces et leur combinaison en fonction des données et de la logique induite par la pile stratigraphique. On part des données « exactes » où le toit et/ou le mur d'une formation ont été reconnus (forages, contacts géologiques) ; à partir de ces données exactes, une interpolation est réalisée au droit de chaque point pour vérifier si les contraintes d'inégalité sont respectées. Lorsque ces inégalités ne sont pas respectées, il faut ajouter des points de contrainte de façon à respecter les structures géologiques et les variations connues des épaisseurs des formations.

2.1.2. Constitution de la base de données

Sources des données utilisées

Les données d'entrée utilisées par le BRGM pour l'élaboration d'un modèle géologique sont les suivantes : données de sondages, données diagraphiques, contacts géologiques des formations modélisées issus des cartes géologiques à 1/50 000, tracé des failles jouant un rôle sur la structuration des réservoirs, données sismiques qui permettent d'affiner les connaissances sur la structuration des formations du Tertiaire. La base de données structurante provient de celle élaborée dans le cadre de la construction du MONA V4 (Saltel et al., 2014). Elle a été complétée pour être exhaustive sur le secteur considéré. Les données sont collectées, organisées, interprétées et mises en cohérence par un géologue régional expérimenté (JP. PLATEL dans le cas du Modèle Nord-Aquitain V4 et du modèle PHONEME) et un hydrogéologue (M. SALTEL dans le cas du Modèle Nord-Aquitain V4 et du modèle PHONEME). L'ensemble des forages de la zone d'étude ayant une description géologique dans la BSS (Banque des données du Sous-Sol) a été intégré au modèle soit au total 147 forages. En compléments des descriptions lithologiques, les données diagraphiques ont été utilisées pour délimiter les horizons réservoirs et les épontes (formations semi-perméables ou imperméables). Sur la zone d'extension du maillage gigogne (Figure 2), 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 (Figure 1).

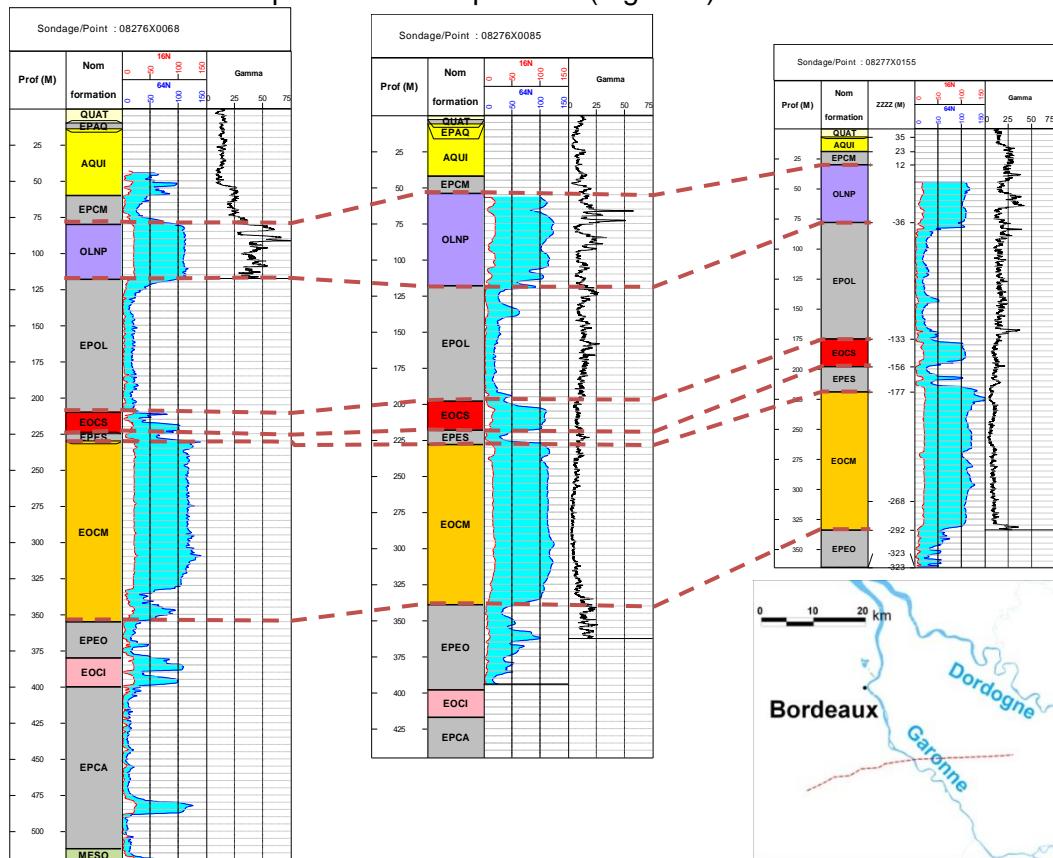


Figure 1 : Exemple de corrélation diagraphique (Saltel et al., 2014).

Les contours des formations modélisées sont extraits du Référentiel **BD-LISA** (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères). Les principales failles jouant un rôle sur la structuration du réservoir ont été digitalisées et utilisées lors de l'interpolation du mur de la formation (Figure 2). Les données sismiques proviennent de travaux réalisés dans le cadre de la thèse de François Larroque (Larroque, 2004) à l'université de Bordeaux 3 (ENSEGID).

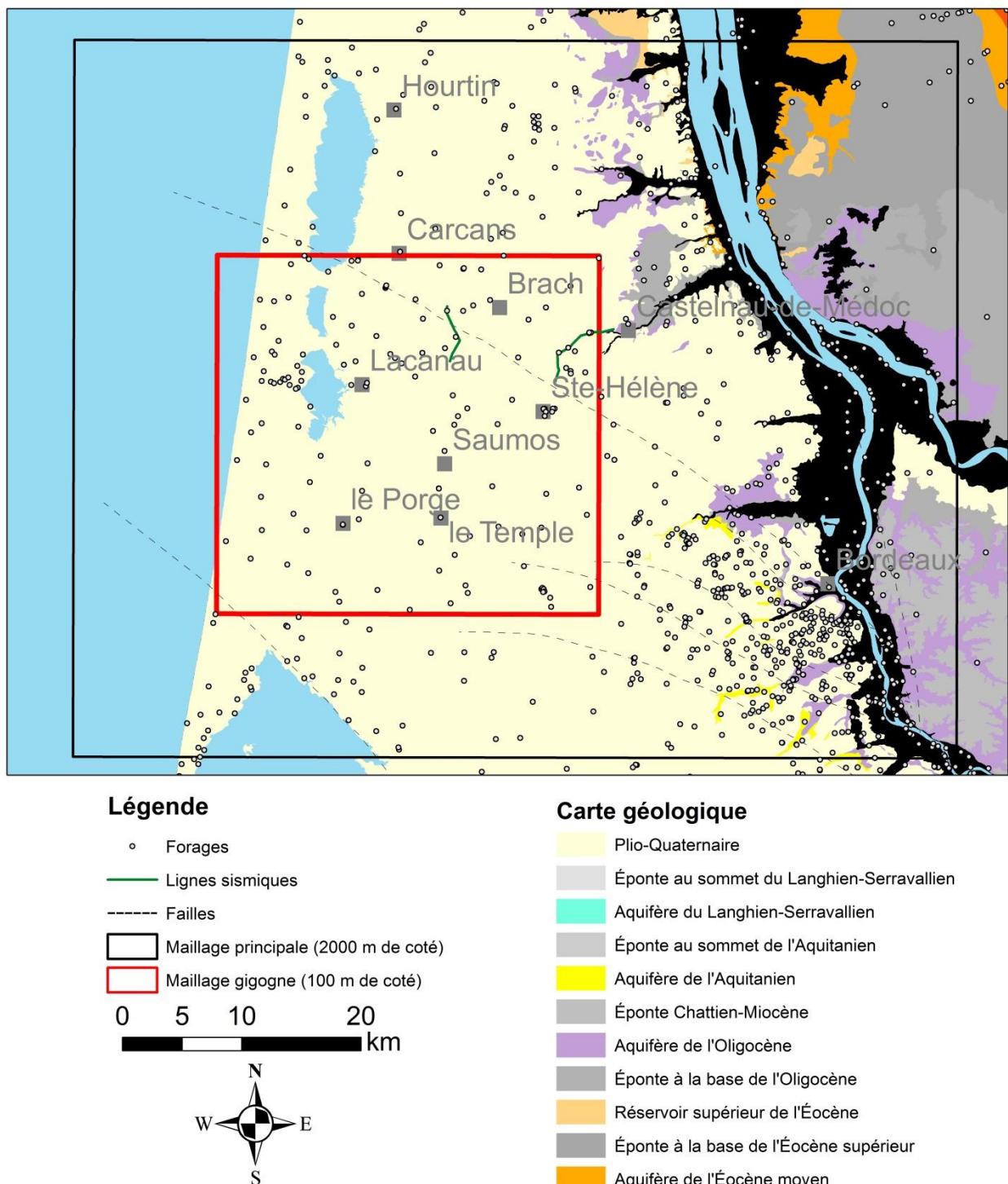


Figure 2 : Données géologiques utilisées pour l'élaboration du modèle.

Lors de la phase d'acquisition des données sismiques, six profils de géophysique sismique « haute résolution » ont été réalisés par le bureau d'études Géolithe, à la demande du SMEGREG (Nadaud et al., 2006). Le linéaire total prospecté est de 21 km, se répartissant comme suit : deux profils de 2 500 m, deux profils de 3 000 m et deux profils de 5 000 m. La sismique « haute résolution » a été réalisée à l'aide d'un vibreur Mertz 22, couplé à un dispositif Geometrics de type Smartseis R48 pour l'acquisition. Les fréquences de vibrations, variant linéairement, étaient comprises entre 30 et 150 Hz. Parallèlement à l'acquisition sismique, quatre forages de différentes profondeurs (150 à 350 m) ont été implantés pour caler la succession lithologique de chaque profil. Une diagraphe de vitesse sonique a été réalisée sur chaque ouvrage. La migration temps–profondeur a été réalisée à partir de ces données et la résolution finale des profils migrés est comprise entre 5 et 10 m (Larroque et al., 2004). Par ailleurs, ces forages réalisés dans le cadre de la thèse ont fait l'objet de datation micropaléontologique pour s'assurer de l'âge des formations échantillonnées. Les profils utilisés pour la modélisation géologique (Figure 2) correspondent à ceux axés dans les sens du pendage des couches : Pme (Les Landes de Méogas) et PCo (La Lande de Cordes).

Le MNT est ré-échantillonné à la maille de 100 m à partir du MNT de l'IGN (2006) au pas de 25 m (BD Alti – IGN). Il sert à définir la surface topographique, qui sera la limite supérieure du modèle. Dans le cadre du processus de modélisation, le MNT permet de faire un contrôle de l'altitude des forages de la base et des valeurs du MNT dans les secteurs correspondants. Cette opération permet de mettre en évidence des incohérences dans la BSS liées le plus souvent à un problème de positionnement du forage.

Codage des données

Les données utilisées pour la construction du modèle (forages, cartes géologiques) font l'objet d'un codage spécifique permettant une analyse de cohérence avant modélisation. Chacun des sondages ainsi que chaque polygone de la carte géologique a été décrit en fonction du codage présenté ci-dessous (Figure 3) :

Code	Description
QUAT	Formations du Quaternaires
EPLS	Éponte au sommet du Langhien-Serravallien
LASE	Aquifère du Langhien-Serravallien
EPAQ	Éponte au sommet de l'Aquitanien
AQUI	Aquifère de l'Aquitanien
EPCM	Éponte Chattien-Miocène
OLNP	Aquifère de l'Oligocène
EPOL	Éponte à la base de l'Oligocène
EOCS	Réservoir supérieur de l'Éocène
EPES	Éponte à la base de l'Éocène supérieur
EOCM	Aquifère de l'Éocène moyen
EPEO	Éponte à la base de l'Éocène moyen
EOCI	Réservoir inférieur de l'Éocène
EPCA	Éponte au sommet du Campanien
CAMP	Aquifère du Campanien

Figure 3 : Pile stratigraphique des formations modélisées.

Le modèle comporte 15 couches allant du Plio-Quaternaire au Campanien.

Gestion des données sous SIG

Toutes les données nécessaires à la modélisation ont été intégrées dans un Système d'Information Géographique (MapInfo®) en prise avec la base de données Access pour la projection cartographique des forages et le logiciel GDM du BRGM pour la réalisation de coupes et de logs géologiques interactifs (Figure 4).

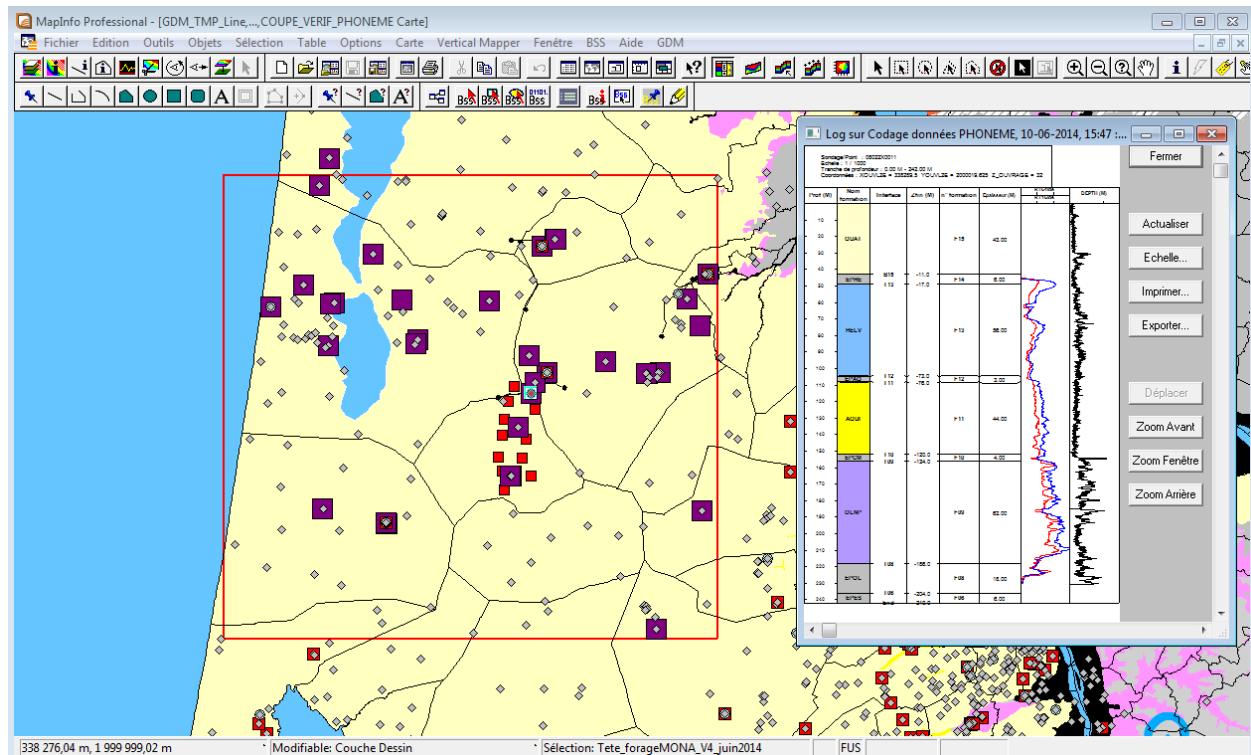


Figure 4 : SIG "Modèle PHONEME" sous MapInfo.

Une telle base de données permet :

- de disposer d'une source d'informations unique et homogène,
- de faire rapidement des mises à jour,
- de superposer aisément différentes couches de données,
- de disposer de fonctionnalités avancées pour réaliser des opérations complexes (requêtes, analyses thématiques...).

2.2. ÉLABORATION DU MODELE

La validation du modèle géologique est réalisée par une mise en cohérence des informations de la carte géologique et des données de forage. En effet, Multilayer permet de comparer la première formation du forage à celle identifiée au même endroit sur la carte géologique, afin de relever d'éventuelles incohérences. Dans le modèle réalisé ici, la quasi-totalité des formations affleurantes sont constituées par les horizons sableux du Plio-Quaternaire. En effet, seules les formations de l'Aquitainien viennent affleurer sur une surface très réduite (≈ 11 hectares) dans la Jalle de la Mouline à l'ouest de Castelnau-de-Médoc.

Par ailleurs, à partir des données exactes (contact entre deux formations successives sans lacunes de sédimentation ou d'érosion), une interpolation est réalisée au droit de chaque point pour vérifier si les contraintes d'inégalité sont respectées : par exemple pour un sondage se

terminant dans la couche A, la surface calculée correspondant au mur de cette couche doit passer sous la fin du forage. Réciproquement pour un sondage débutant dans la couche A, la cote du toit interpolée en ce point doit passer au-dessus du début du forage (les surfaces interpolées au-dessus de la topographie sont éliminées, la surface du sol étant considérée comme une "variable érodante"). Lorsque ces inégalités ne sont pas respectées, des points de contrainte sont ajoutés de façon à respecter les structures géologiques et les variations connues des épaisseurs des formations. Ce travail se fait à partir de l'expertise du géologue (JP. PLATEL) 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 (Figure 5 et Figure 6). L'ensemble des coupes est présenté en annexe 2.

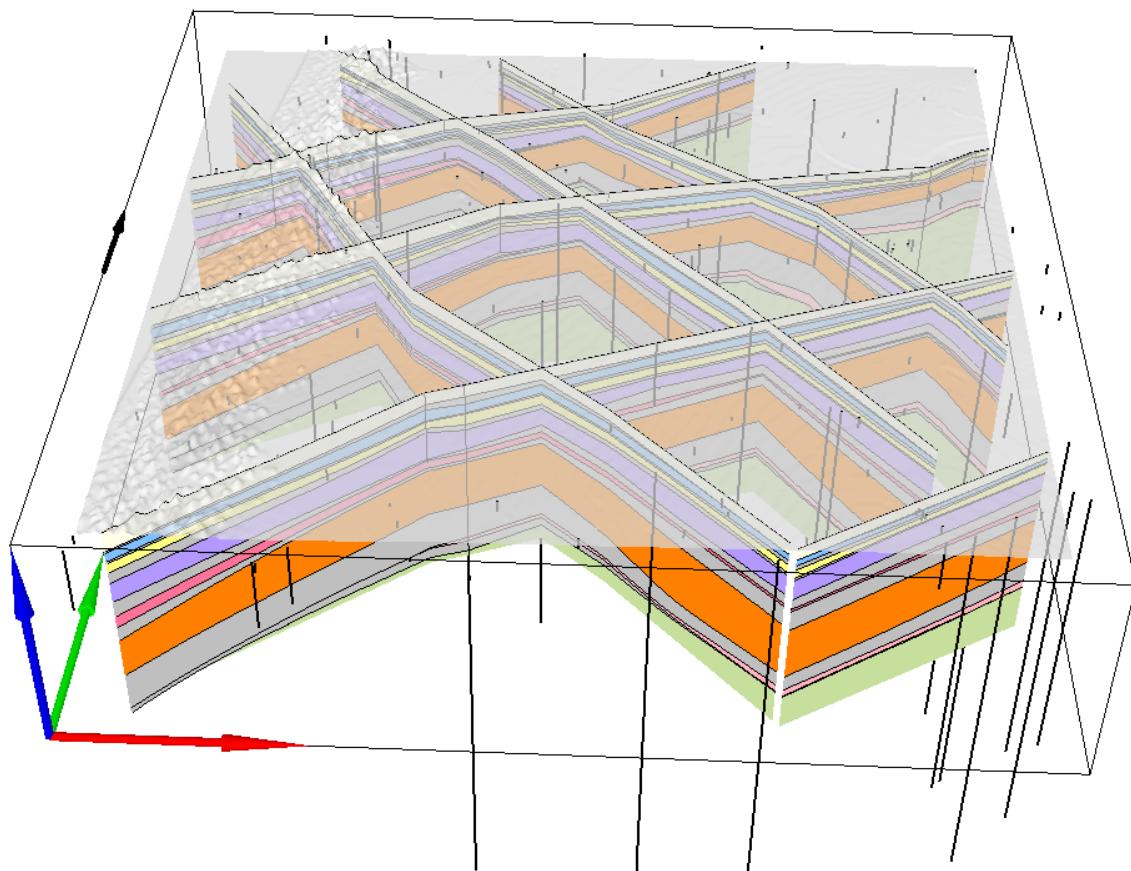


Figure 5 : Validation 3D du modèle.

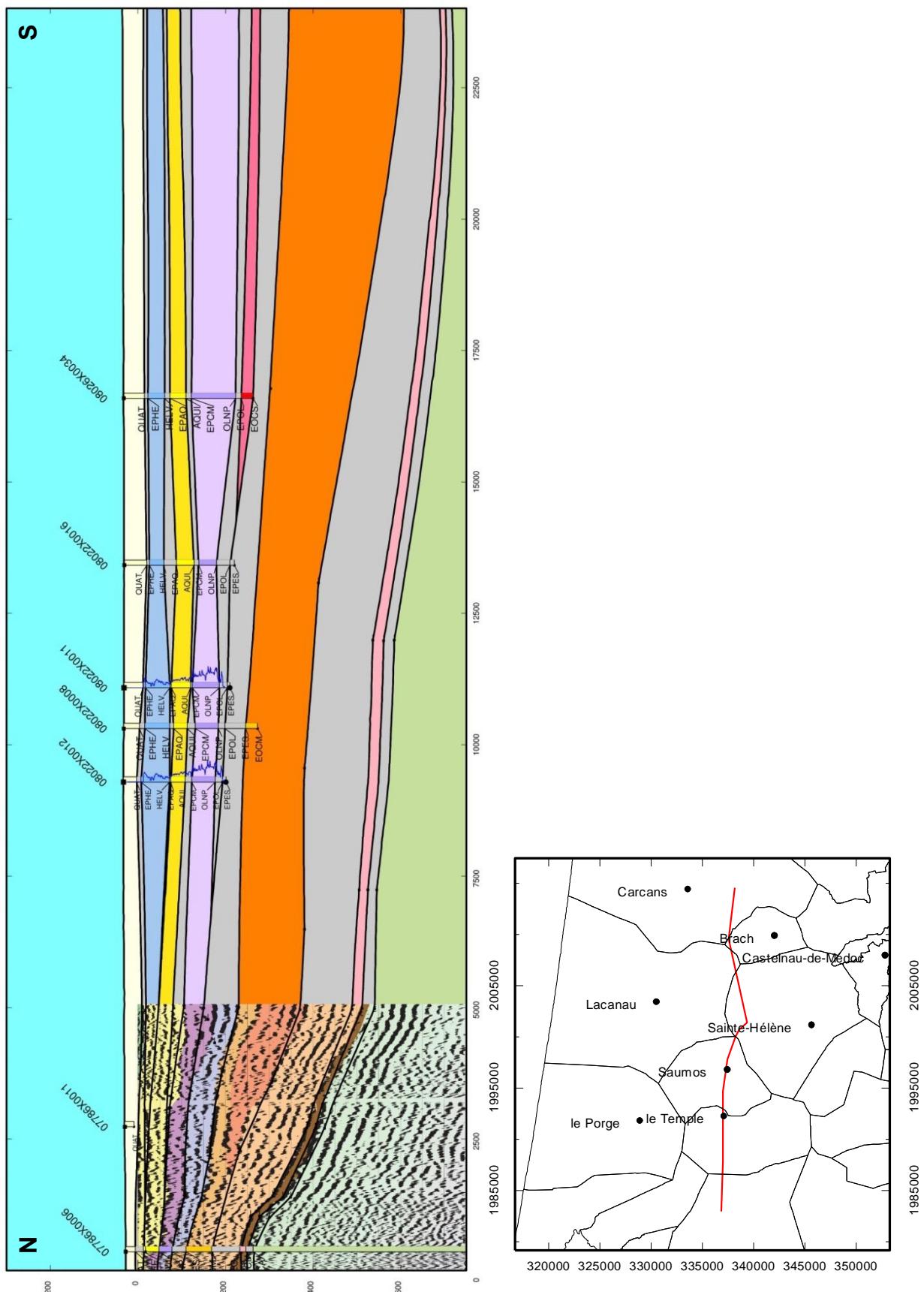


Figure 6 : Coupe N-S intégrant les données sismiques, les données de forages et les diagraphies.

3. Modélisation hydrodynamique

3.1. LOGICIEL

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, 1990) ; (Thiéry, 2003); (Thiéry, 2010)]. Le schéma de résolution utilise les différences finies avec un maillage parallélépipédique (ou rectangulaire) irrégulier. Une description du logiciel est présentée en annexe 3.

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 7).

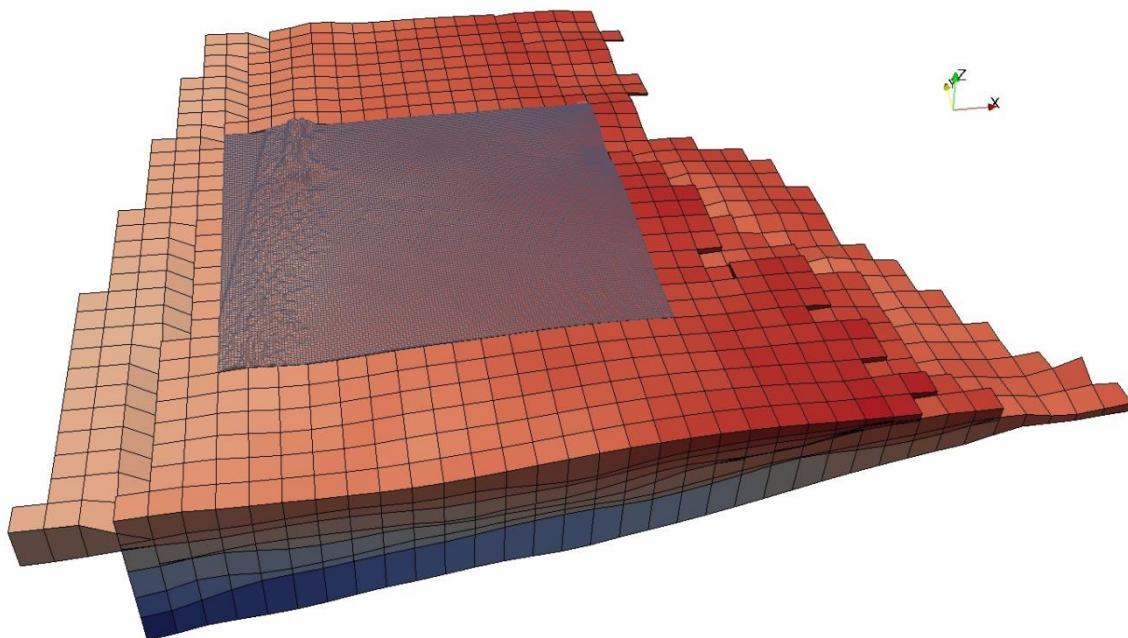


Figure 7 : Géométrie du modèle.

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.

3.2. GEOMETRIE DU MODELE

3.2.1. Construction de la géométrie du modèle

Le modèle hydrodynamique a été construit en plusieurs étapes :

- la première étape a consisté à découper le **MOdèle Nord Aquitain (MONA V3.3)** sur la zone d'intérêt du projet pour créer l'ossature du modèle **PHONEME**,
- la deuxième étape correspond à la création d'un gigogne (grille raffinée à 100 m) centrée sur la zone d'influence potentielle du projet et à l'incorporation de la géométrie affinée issue du modèle GDM à la maille de 100 m.
- le modèle a ensuite été converti de pseudo-3D à 3D afin d'intégrer le rôle capacitif des épontes (Figure 8).

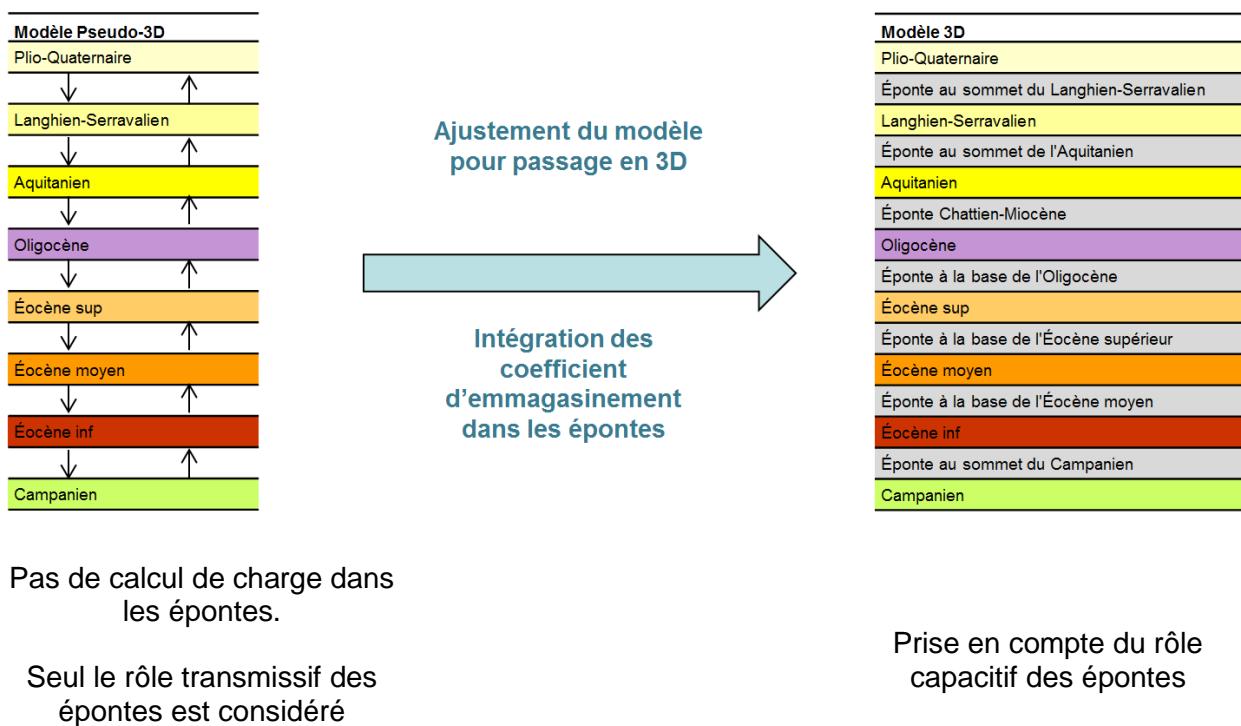


Figure 8 : Amélioration de la prise en compte du rôle des épontes.

- la géométrie du modèle en dehors du gigogne a été ajustée à partir de la version 4 du MONA pour bénéficier des connaissances les plus récentes sur ce secteur (Saltel et al., 2014).

3.2.2. Structuration des réservoirs modélisés

Les formations du Plio-Quaternaire voient leurs épaisseurs augmenter d'est en ouest pour dépasser les 110 m à proximité du littoral au droit de la zone dunaire (Figure 9). Sur la zone d'étude, on remarque que la zone située au nord-est de Lacanau et de Saumos présente des épaisseurs plus faibles (de l'ordre de 30 m) contre des valeurs supérieures à 50 m dans la zone sud-ouest. A noter que la géométrie de ce réservoir a été simplifiée à une seule couche aquifère dans le cadre de ces travaux alors que cet horizon est en réalité bien plus complexe (Dubreuilh et al., 1995). Ces formations correspondent en effet au dépôt de plusieurs séquences progradantes aboutissant à la formation d'un ensemble multicouche (Figure 10).

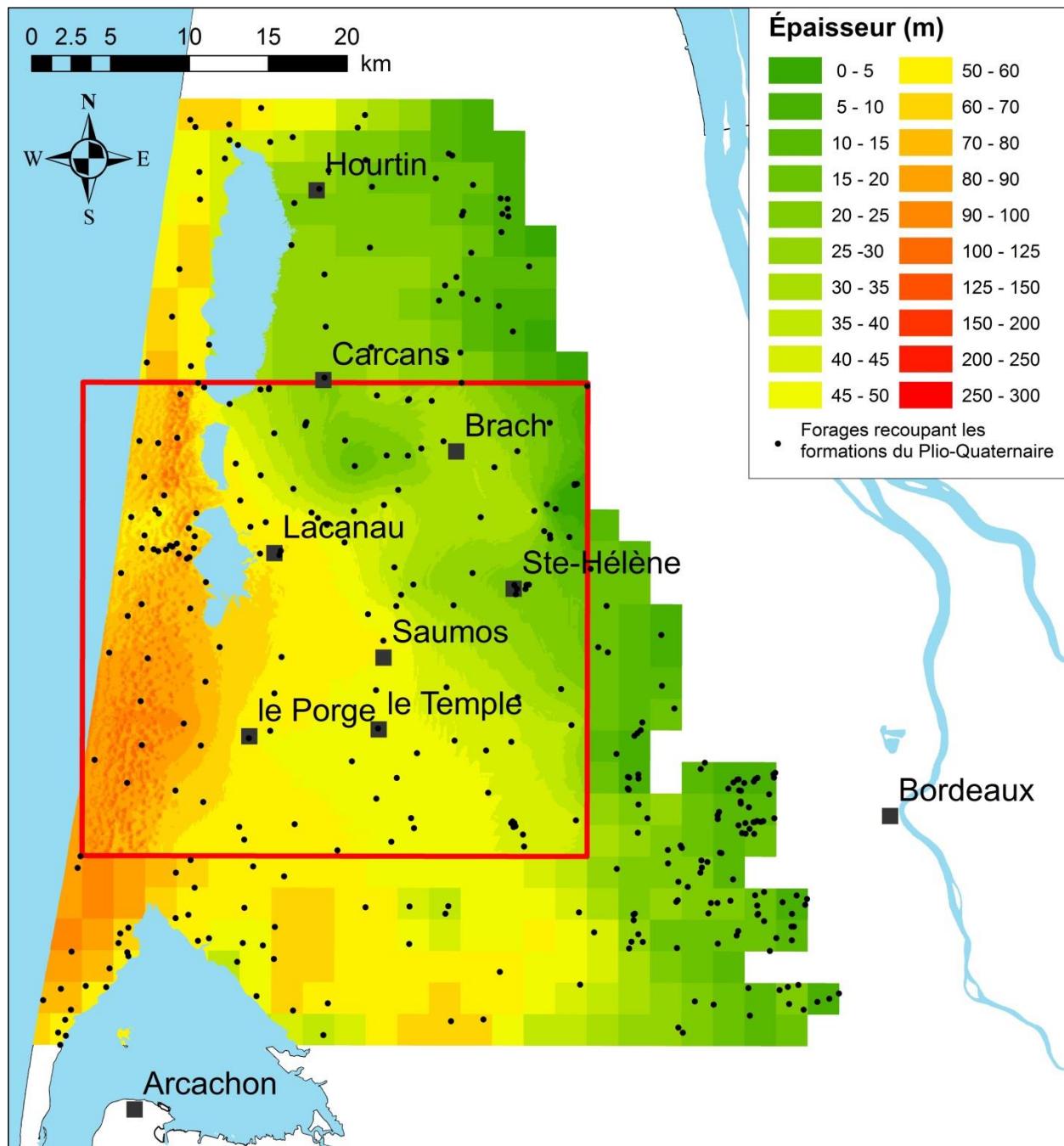


Figure 9 : Carte d'épaisseur du Plio-Quaternaire.

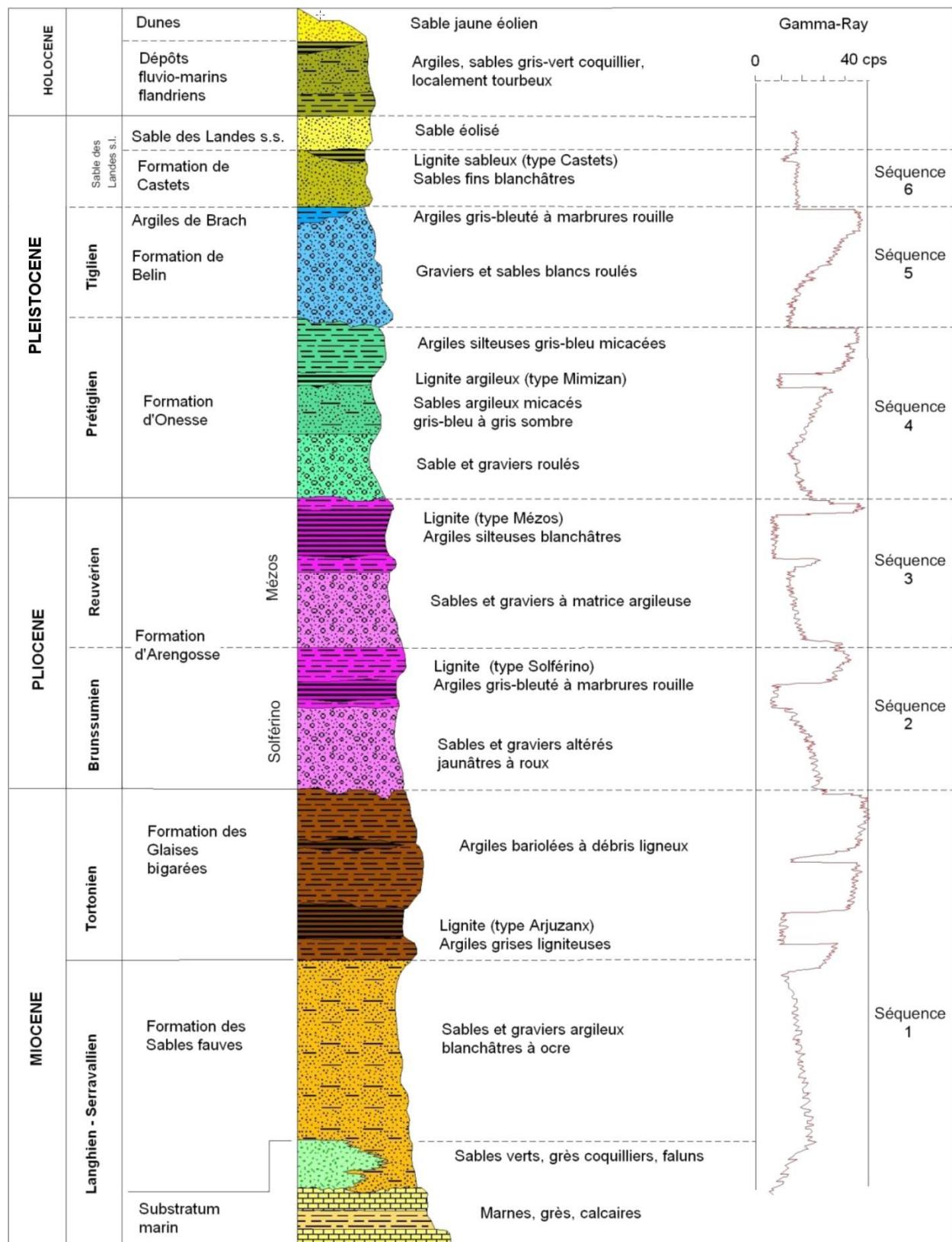


Figure 10 : Log théorique des formations Mio-Plio-Quaternaires du triangle landais (Corbier et al., 2014).

L'éponte au sommet du Langhien-Serravallien présente une épaisseur variant de 0 à près de 25 m (Figure 11). Cette formation correspond aux formations des Sables fauves et aux Glaises bigarrées. Sur le secteur de Saumos-Le Temple, l'épaisseur de cette éponte est de l'ordre de 5 à 10 m. Une zone de lacune a été identifiée au sud-est du Temple mettant localement en communication l'aquifère du Plio-Quaternaire et celui du Langhien-Serravallien.

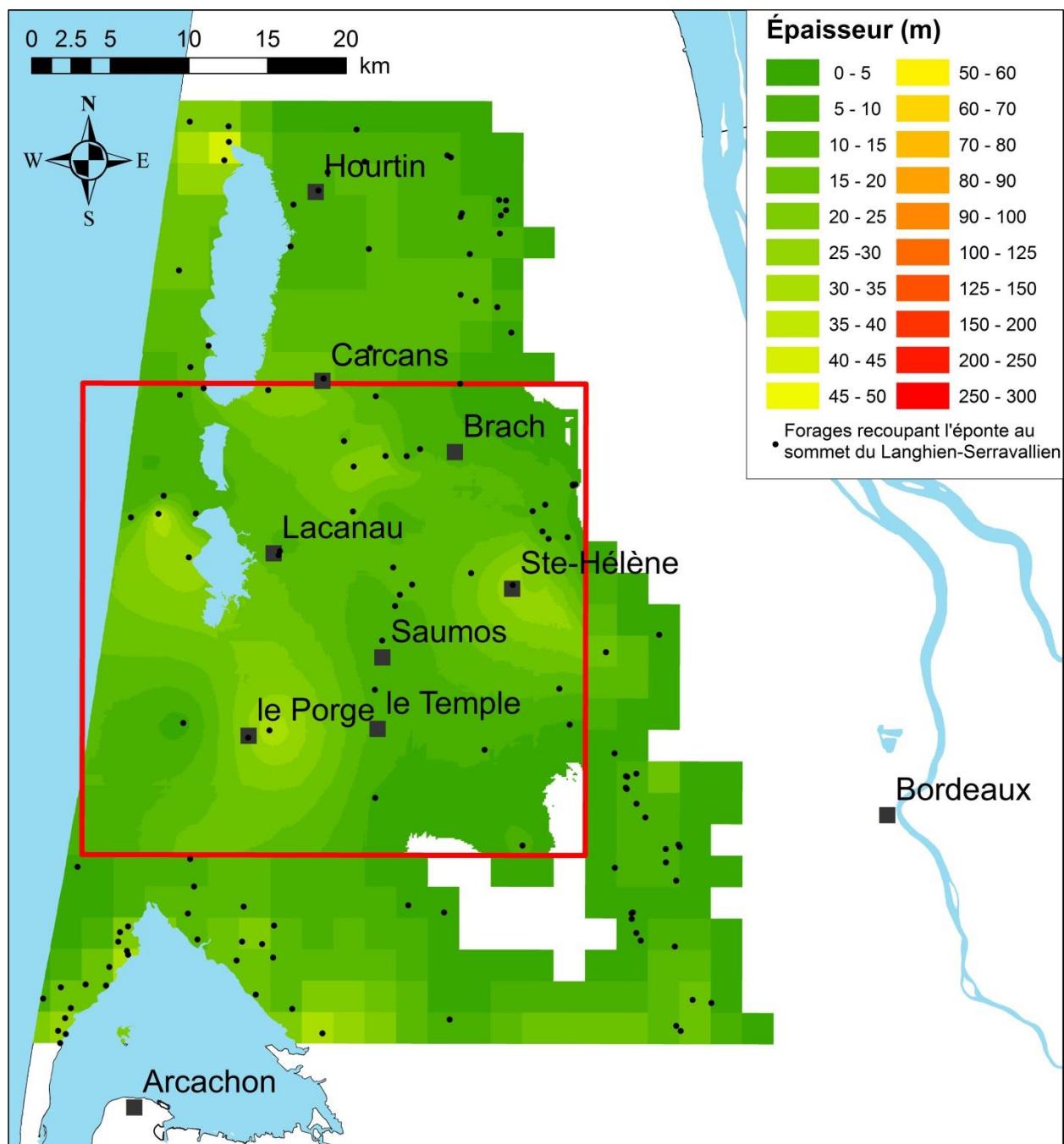


Figure 11 : Carte d'épaisseur de l'éponte au sommet du Langhien-Serravallien.

L'aquifère du Langhien-Serravallien est celui qui présente la plus faible extension sur l'ensemble des aquifères représentés dans le modèle (Figure 12). Il est en effet absent au nord-est de Carcans, Brach et Sainte-Hélène. Son épaisseur tend à augmenter vers l'ouest pour atteindre au maximum des valeurs proches de 60 m. A noter cependant que le Langhien-Serravallien constitue le réservoir le moins épais sur ce secteur dans le modèle et que ses propriétés réservoirs peuvent être considérées comme médiocre (Allard, 1981).

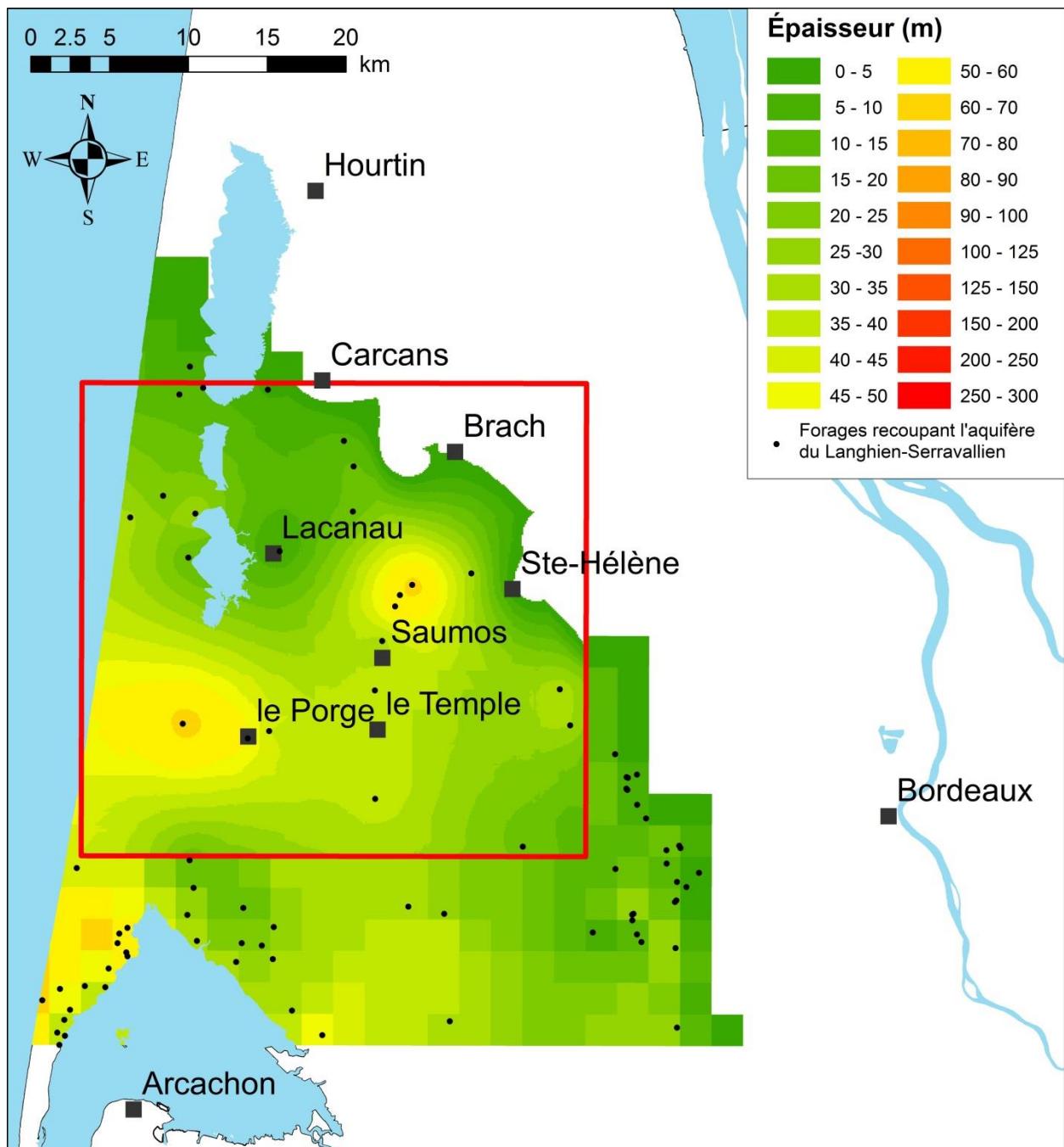


Figure 12 : Carte d'épaisseur du réservoir du Langhien-Serravallien.

L'éponte séparant les deux réservoirs du Miocène (Langhien-Serravallien et Aquitanien) est bien caractérisée sur les différentes diaglyphies en forage. Elle présente une épaisseur faible de l'ordre de la dizaine de mètre et son extension est moins importante que celle des réservoirs qui l'encadrent (Figure 13). Il peut donc y avoir une communication directe entre les deux aquifères sur certains secteurs (zone située au sud de Brach). Par ailleurs, une zone de lacune a été identifiée au nord du Bassin d'Arcachon.

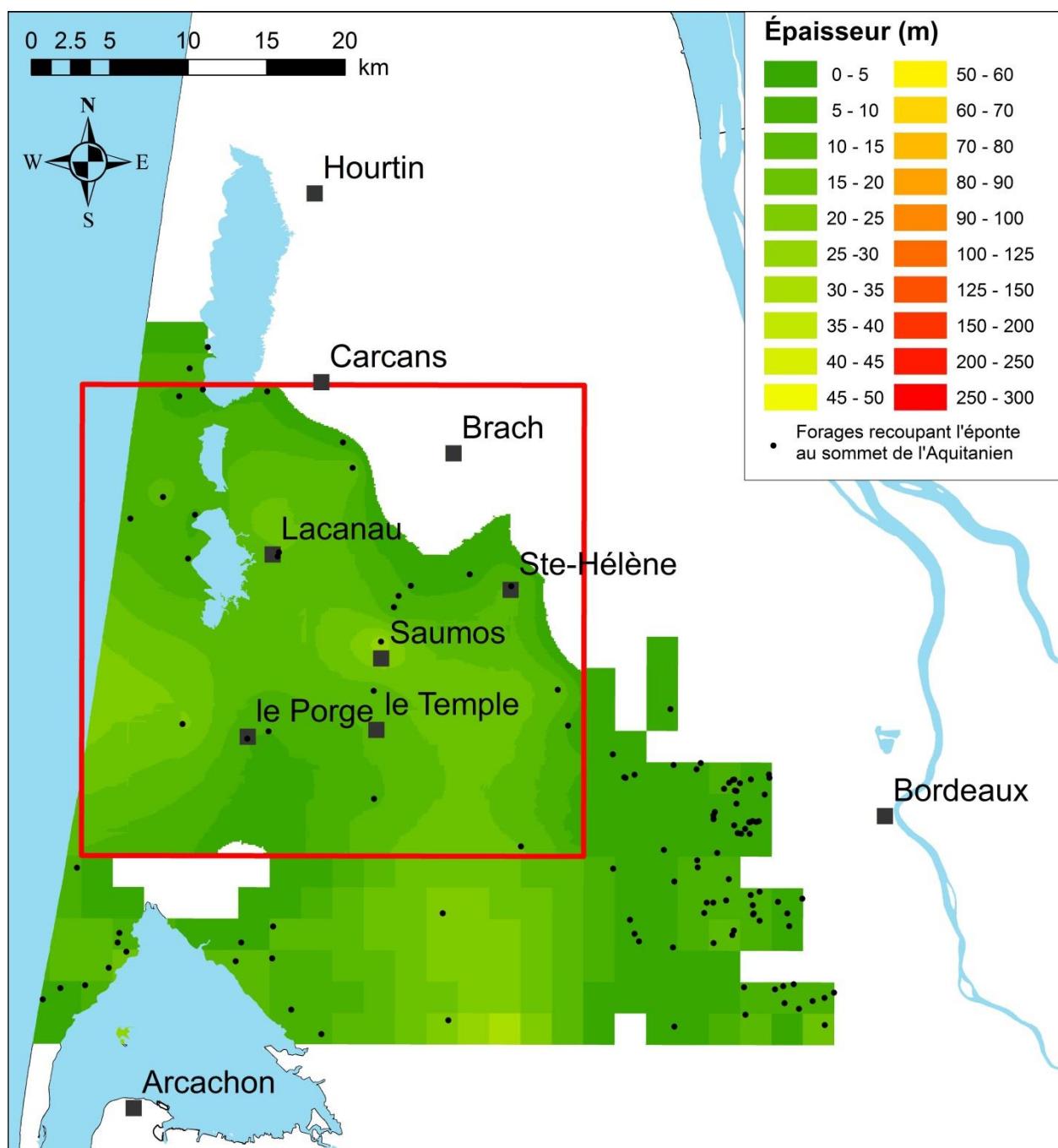


Figure 13 : Carte d'épaisseur de l'éponte au sommet de l'Aquitainien.

Le réservoir de l'Aquitainien constitue un réservoir plus épais en comparaison du réservoir du Langhien-Serravallien. Sur le domaine modélisé, l'épaisseur est maximale au niveau de la flèche du Cap-Ferret où elle atteint près de 80 m. Sur le secteur de Saumos-Le Temple, l'épaisseur est comprise entre 30 et 45 m (Figure 14). A noter que tout comme le réservoir du Langhien-Serravallien, les propriétés du réservoir sont médiocre (Allard, 1981), ce qui a conduit à l'abandon des premiers forages réalisés dans ces horizons pour l'alimentation en eau potable. C'est notamment le cas à Saumos où le forage réalisé en 1963 dans l'Aquitainien (08026X0001) a été abandonné au profit d'un forage réalisé dans l'Oligocène en 1990 (08026X0034). En effet, le débit spécifique du forage captant l'Aquitainien était relativement faible 0,16 m²/h soit un rabattement de 71,77m pour un débit de seulement 11,33 m³/h.

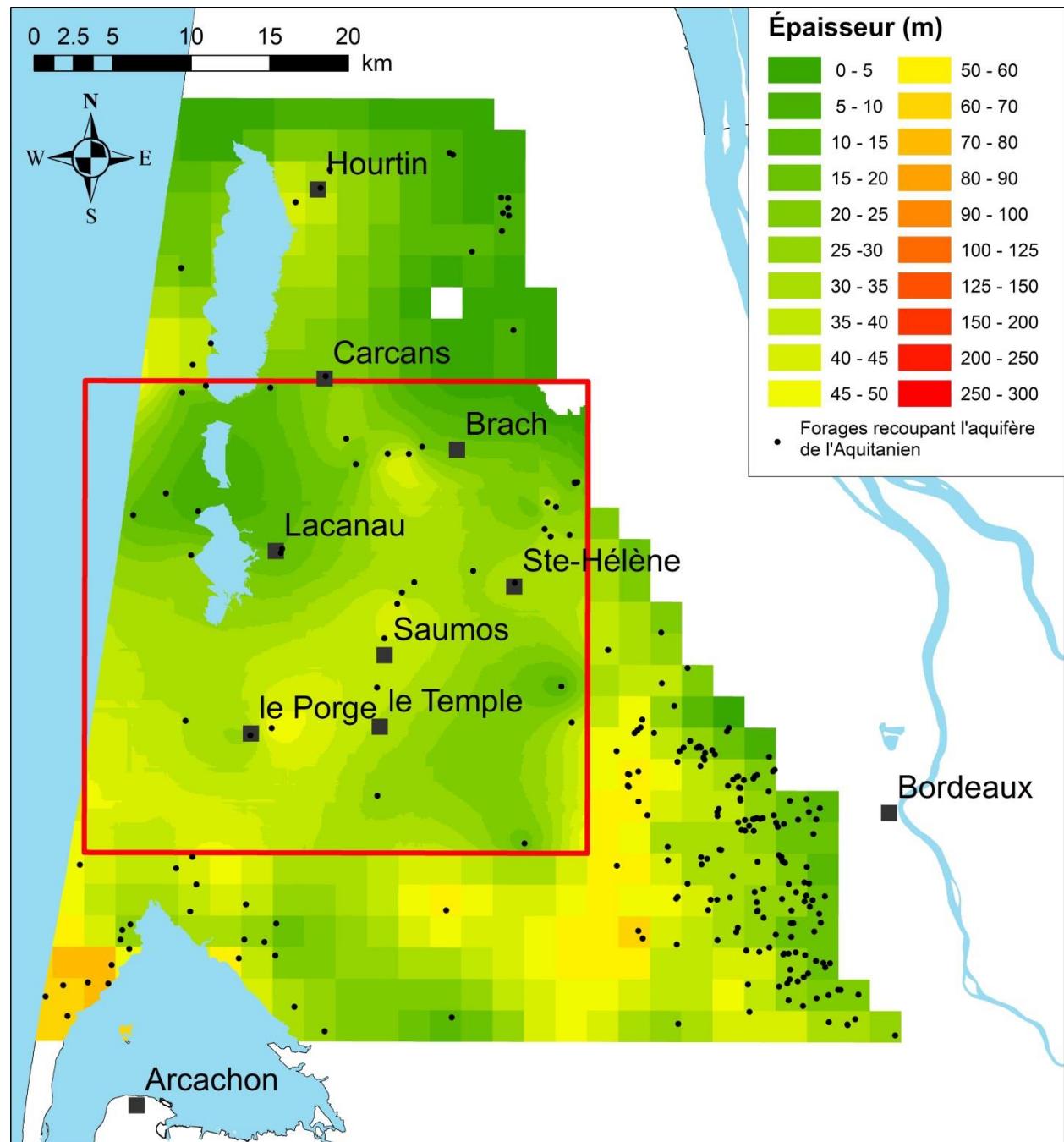


Figure 14 : Carte d'épaisseur du réservoir de l'Aquitainien.

L'éponte Chattien-Miocène séparant l'aquifère de l'Aquitainien de celui de l'Oligocène voit son épaisseur augmenter d'est en ouest pour atteindre au maximum 65 m à proximité du Bassin d'Arcachon (Figure 15). Sur le secteur de Saumos-Le Temple, l'épaisseur est comprise entre 10 et 25 m. A noter qu'il existe plus au nord, à proximité de Brach et au sud-est d'Hourtin une zone de lacune où cette éponte est absente mettant en communication les aquifères de l'Aquitainien et de l'Oligocène.

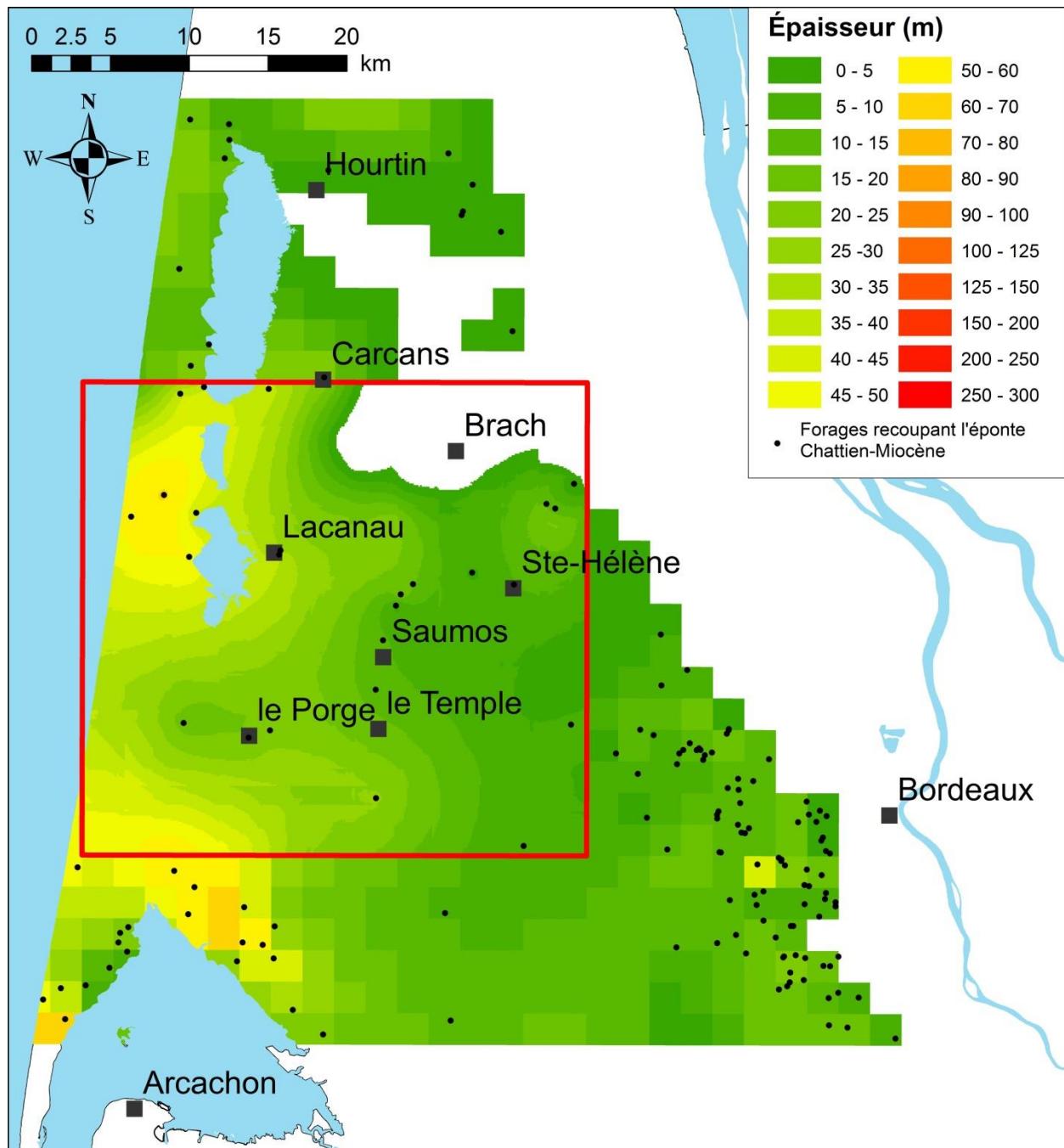


Figure 15 : Carte d'épaisseur de l'éponte Chattien-Miocène.

Le réservoir de l'Oligocène présente des épaisseurs plus importantes en comparaison des aquifères sus-jacents. L'aquifère s'épaissit en direction du sud-ouest pour atteindre des valeurs supérieures à 100 m à l'ouest de Lacanau et au sud du Porge et du Temple. Une lacune, liée au prolongement de l'anticlinal de Blaye-Listrac, est présente au nord-ouest de Sainte-Hélène (Figure 16).

Ce réservoir représente localement la meilleure ressource pour l'alimentation en eau potable. Les paramètres hydrodynamiques sont bien meilleurs que ceux mesurés sur les aquifères sus-jacents c'est pourquoi la plupart des communes du secteur (Sainte-Hélène, Saumos, Lacanau, Le Porge, Brach) sollicitent cette nappe pour l'alimentation en eau potable.

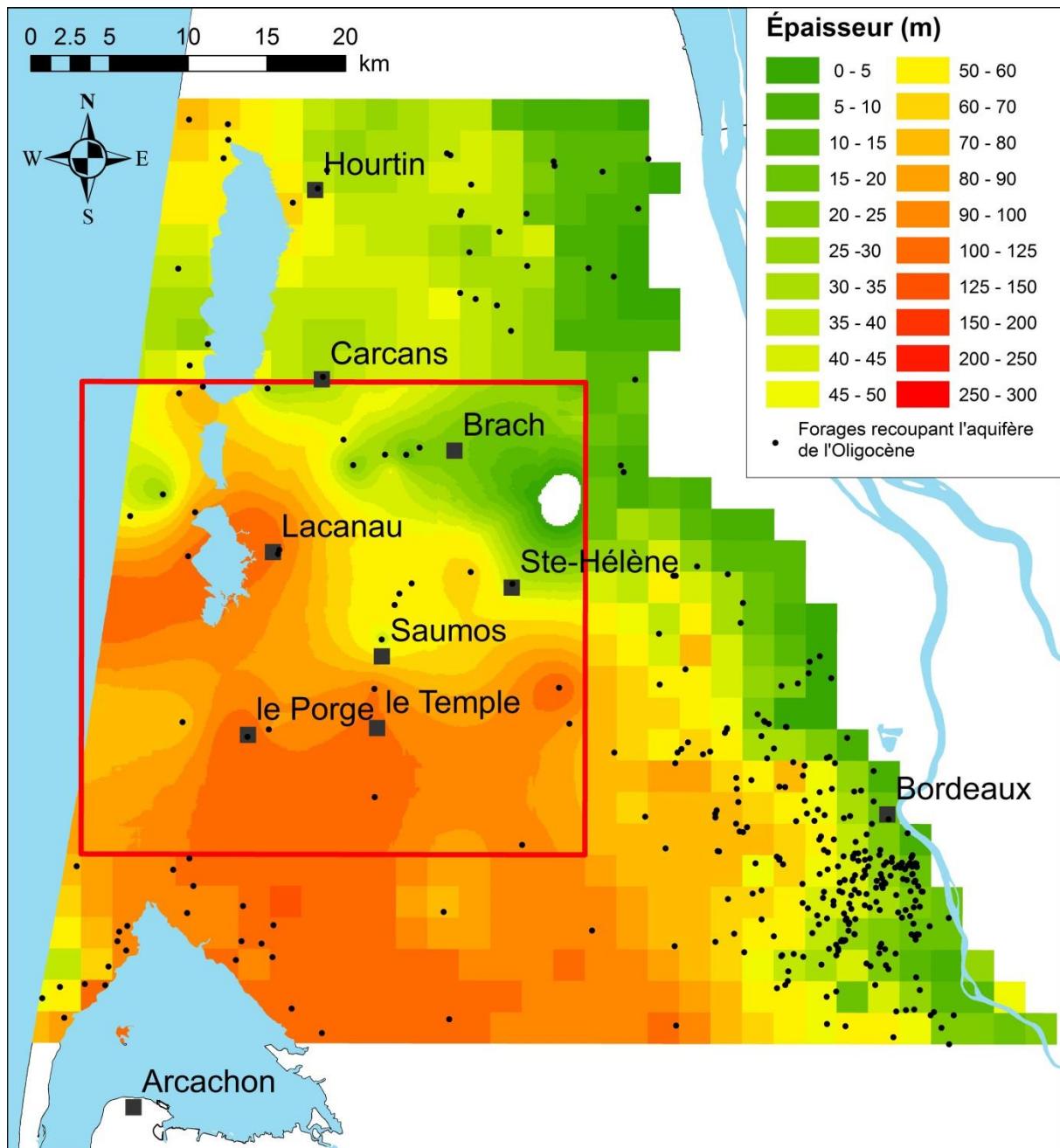


Figure 16 : Carte d'épaisseur du réservoir de l'Oligocène.

3.3. PARAMETRES DU MODELE

3.3.1. Paramètres spatio-temporels

Discrétisation temporelle

En régime transitoire, le temps est découpé en un ensemble de périodes. D'un pas de temps au suivant, certains paramètres vont varier : recharge, prélèvements, valeurs des potentiels imposés, ...

Dans un premier temps, le modèle a été calé en régime transitoire sur une période totale de 41 ans, de 1972 à 2012 de manière à partir d'un état initial le moins influencé possible. Par ailleurs, un découpage de la durée de simulation selon les variations saisonnières (calcul hydrodynamique au pas de temps trimestriel), représentant les périodes de hautes eaux et de basses eaux, a été effectué afin de mieux cerner le champ des coefficients d'emmagasinements (version modèle du 27 février 2015 ; Phoneme 1.0). Les bilans climatiques et le calcul de la recharge étaient réalisés en amont de la modélisation sous Excel au pas de temps décadaire à partir des données de la station météorologique de Mérignac.

Dans un second temps (version modèle du 1^{er} octobre 2015 ; Phoneme 2.0), le calcul de la recharge dans le modèle a été amélioré en intégrant les données spatialisées (Pluie et évapotranspiration potentielle « ETP ») issues des grilles SAFRAN de Météo France (67 mailles carrés de 8 km de côté) et en se basant sur les cartes INRA pour calculer la Réserve Utile des sols. Le bilan hydroclimatique se fait donc maintenant directement dans le modèle en utilisant le schéma de surface GARDENIA¹ de Marthe au pas de temps journalier. Le calcul hydrodynamique se fait quant à lui au pas de temps mensuel en fin de chaque mois. Ces modifications engendrant des temps de calculs importants, la période de simulation a été réduite à 12 ans (de 2001 à 2012). Cette période a été choisie car c'est la plus complète en termes de données sur la nappe du Plio-Quaternaire.

Recharge

La détermination des flux de recharge est réalisée par l'intermédiaire du calcul de bilans hydroclimatiques avec le schéma GARDENIA (Thiéry, 2003) intégré dans le code MARTHE. Cette méthode, beaucoup plus souple, nécessite une fois les paramètres du module GARDENIA calés, d'intégrer directement les données de pluies et ETP et de ne pas recalculer pas de temps par pas de temps une recharge et un ruissellement.

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 à la 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).

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.

Le module GARDENIA se base sur le principe des modèles réservoirs (Figure 17) :

- 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 par percolation dans le réservoir souterrain (aquifère) suivant une loi exponentielle de constante de temps TPERC (ALIM aquifère = $H.dt/TPERC$) et par ruissellement suivant le paramètre NRUIP.

L'infiltration doit donc être « calée » en ajustant les trois paramètres RDE, TPERC et NRUIP.

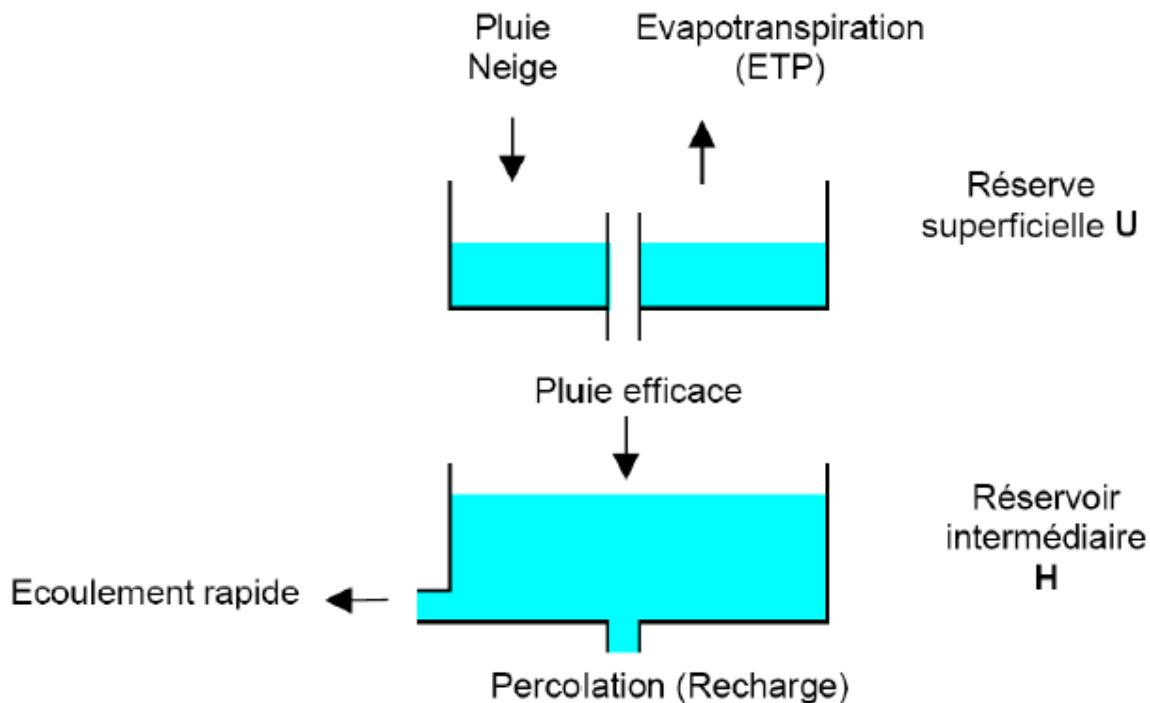


Figure 17 : Schéma de fonctionnement de la recharge (Thiéry, 2003).

Les données de précipitation et d'évapotranspiration journalières utilisées sont issues des « ré-analyses SAFRAN » (résolution de 8 kilomètres soit 67 mailles réparties sur l'extension du modèle) et ont été fournies par Météo-France (Figure 18).

L'utilisation de ce type de données permet en particulier d'avoir une meilleure spatialisation des pluies et de l'évapotranspiration par rapport à l'utilisation de quelques stations météo (1 station météo utilisée dans le modèle précédent).

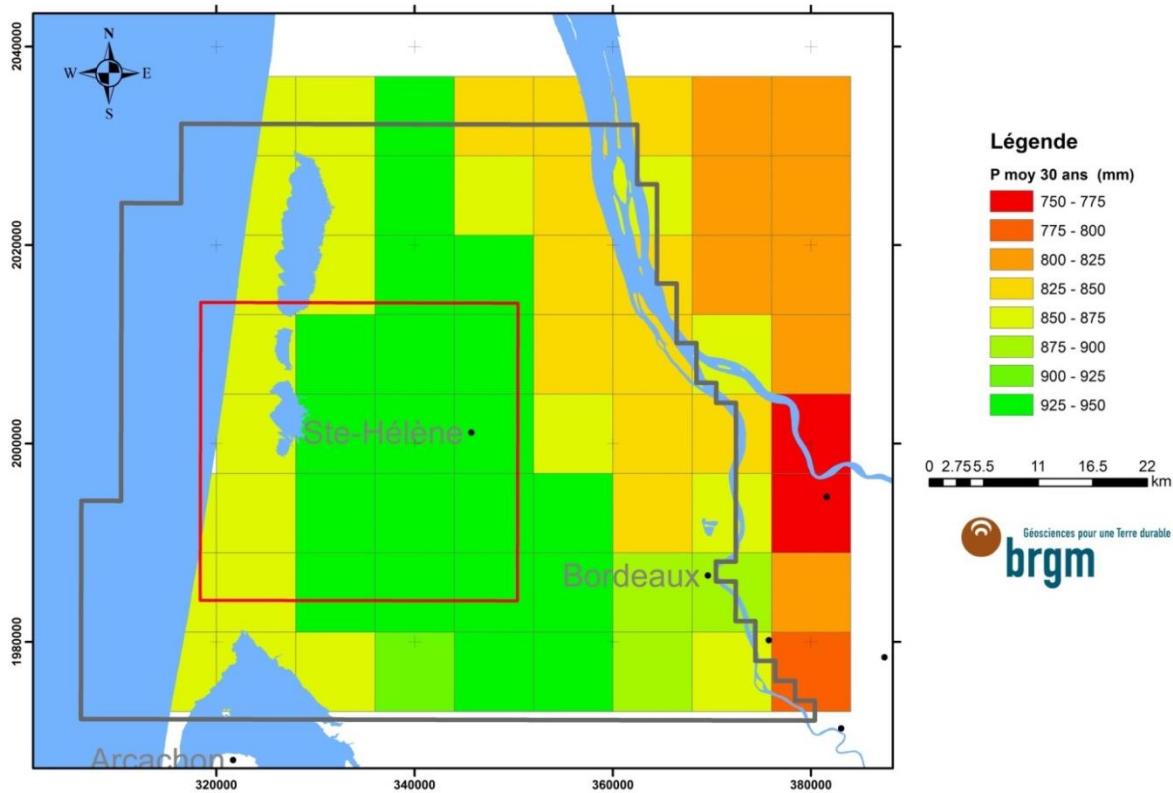


Figure 18 : Mailles SAFRAN utilisées comme zones météo dans le modèle PHONEME.

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 19).

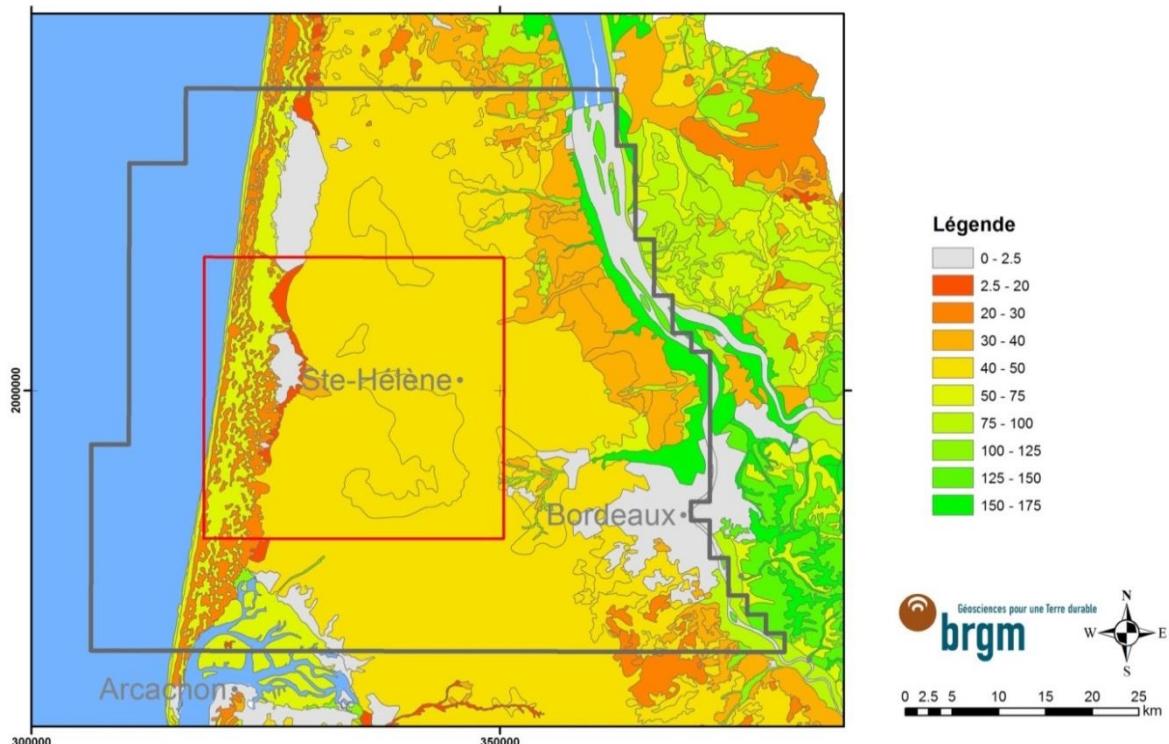


Figure 19 : Réserve utile des sols calculée à partir de la carte pédologique au 250 000^{ème} de l'INRA (Richer de Forges et al, 2015).

La valeur de la RDE n'est pas directement fournie dans les tables attributaires de la carte mais les éléments fournis permettent de la calculer en utilisant le type d'horizon et sa texture (Bruand et al., 2004).

Les valeurs de Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (RDE) estimées ont été intégrées au modèle pour calculer la recharge dans Marthe via le module Gardenia. 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 cadré par la modélisation Gardénia réalisé sur le bassin de la Garroueyre. Un certain degré d'incertitude reste adossé à ces paramètres car ils ne peuvent être déduits de mesures de terrain à grande échelle.

Prélèvements

La collecte, l'affectation et la validation hydrogéologique des prélèvements effectués dans les forages de Gironde sont réalisées dans le cadre du programme « Contrôle qualité et gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » cofinancé par le Conseil Départemental (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.

Il semble pertinent d'utiliser une ventilation par usage dont les principes de base sont les suivants :

- usage agricole : volumes prélevés sur la saison d'irrigation uniquement (profil « Agricole ») ;
- 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 potables réalisés par les collectivités sur la période 2003-2013 au titre du SAGE Nappes profondes de Gironde.

Conditions imposées

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 côté 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 est détaillée couche par couche en annexe 4.

- **Potentiel imposé**

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'Aquitainien, 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) ; (Pédrone et al., 2003) ; (Pédrone et al., 2005) ; (Pédrone et al., 2006) ; (Pédrone et al., 2006) ; (Pédrone et al., 2008) ; (Pédrone 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. 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.

- **Cotes 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 la cote de débordement (surface du sol). Les dimensions du maillage (pas de 100 m) permettent ainsi une bonne restitution de la topographie et donc des grands axes de drainage.

- **Flux nuls**

Cette condition est appliquée à toutes les limites du domaine qui ne sont pas régies par les conditions de potentiels ou de flux imposés. 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 20).

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 21). 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 (hauteur d'eau dans la rivière) (Figure 22).

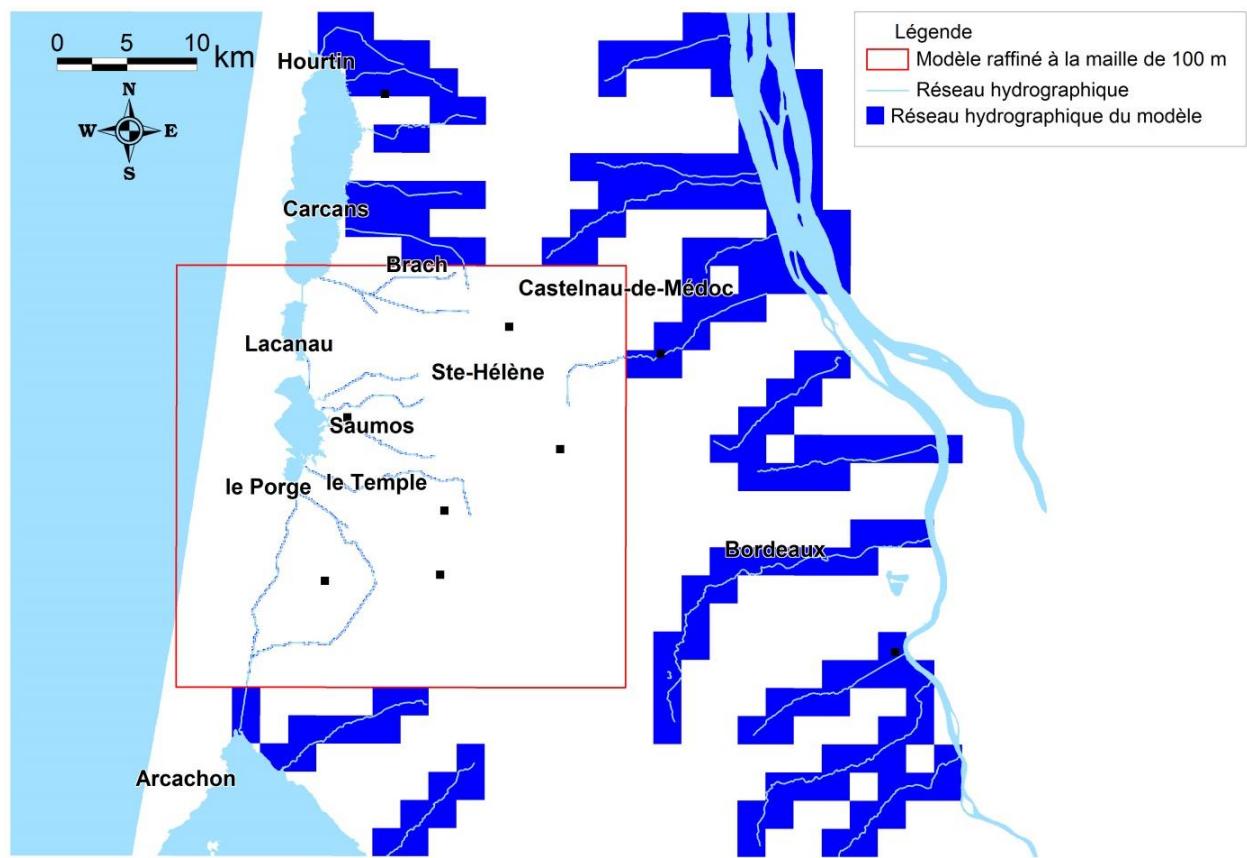


Figure 20 : Réseau hydrographique dans le modèle PHONEME.

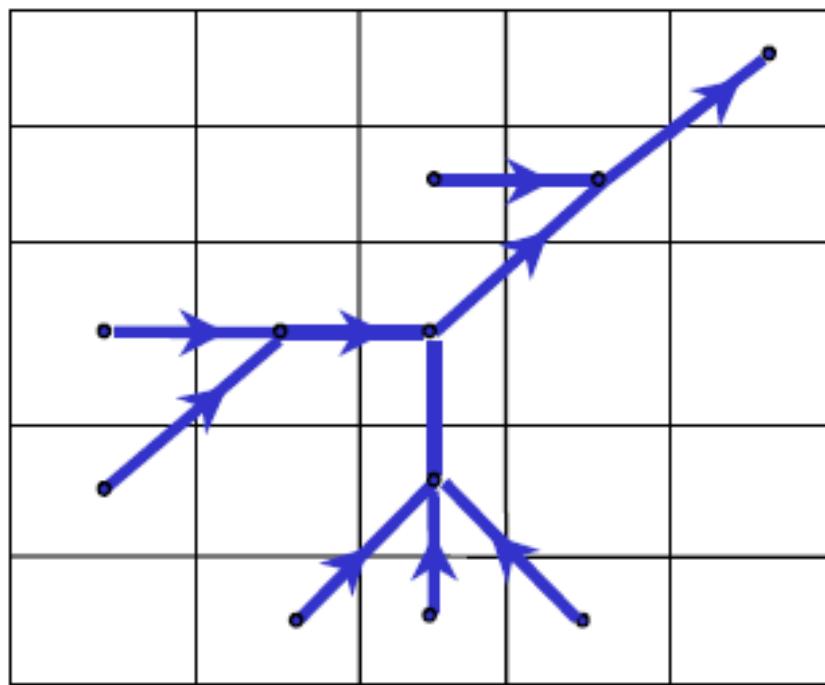


Figure 21 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (Thiéry et al., 2001).

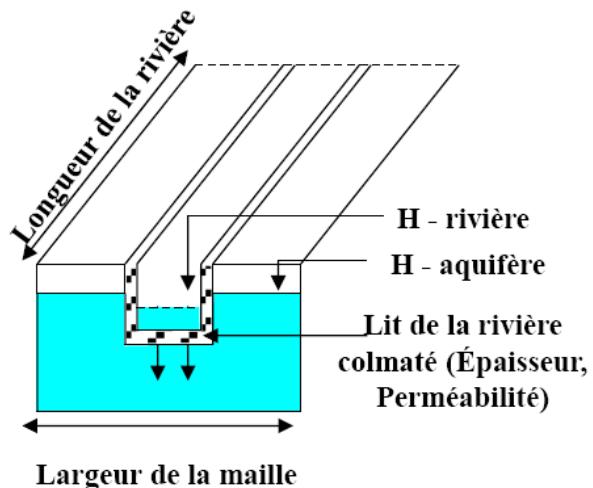


Figure 22 : Géométrie d'un tronçon de rivière (Thiéry et al., 2001).

La définition des différents paramètres définissant la géométrie des tronçons a fait l'objet sur le secteur potentiellement impacté par le projet d'une reconnaissance de terrain. Des fiches descriptives sont présentées en annexe 5. 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 Etangs 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 les directions aval pour le ruissellement. Cette approche permet d'orienter les flux de ruissellement et de débordement du modèle et d'éviter qu'ils aillent alimenter un bassin éloigné.

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 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} .

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 $\frac{1}{2}$, 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 $-\frac{1}{2}$, un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. La figure 23 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.

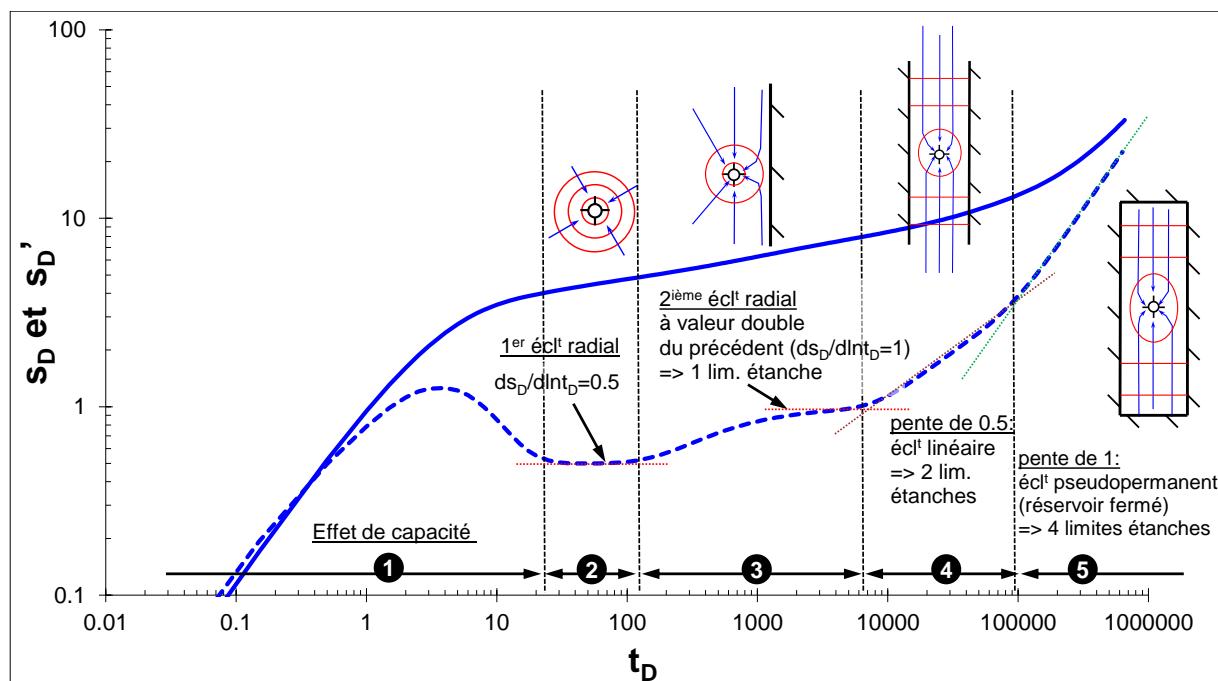


Figure 23 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos.

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 (isotope, anisotope, 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 transmissivité 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.

3.3.2. Synthèse

Le tableau présenté en figure 24/figure 24 synthétise les paramètres intégrés au modèle. Pour chacun d'entre eux est précisé s'il fait l'objet d'un calage ou si les données utilisées pour le définir sont fixées sans être modifiées par ailleurs. La source des données est précisée ainsi qu'une description sommaire du degré d'incertitude associé.

Au sein des paramètres calés, les valeurs introduites sont parfois cadrées par des mesures réalisées sur le terrain (pompage d'essai pour les paramètres hydrodynamiques des aquifères) ou par des modélisations annexes (Modélisation sous Gardenia pour les paramètres de recharge).

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques attribuées aux épontes sont les plus incertaines car les mesures directes sont difficiles à obtenir en raison de la nature des formations et sont donc très rares.

Paramètre	Type de données	Source	Incertitude
Géométrie du modèle	Fixé	Forage/carte géologique/sismique/diagraphie	Faible
Recharge			
Précipitation	Fixé	Météo France	Faible
Evapotranspiration	Fixée	Météo France	Faible
Réserve Utile (RU ou RDE)	Fixée	INRA	Faible
Équilibre ruissellement percolation	Calée	Cadré par une approche globale GARDENIA	Moyenne
Temps de demi percolation	Calée	Cadré par une approche globale GARDENIA	Moyenne
Prélèvements	Fixé	Inventaire BRGM/AEAG/ CA de la Gironde	Faible
Conditions imposées	Fixé	Cote altimétrique de la Garonne et de l'Océan	Faible
Réseau hydrographique			
Largeur de cours d'eau	Fixé	Mesures sur le terrain et bibliographie	Faible
Longueur du cours d'eau	Fixé	Traitemet SIG	Faible
Cote du fond de la rivière	Fixée	Traitemet SIG et mesures sur le terrain	Faible
Épaisseur du colmatage du fond de la rivière	Calée	Fixé à 1 m sur l'ensemble des cours d'eau	Moyenne
Perméabilité du colmatage du lit de rivière	Calée	Cadré par l'analyse des débits restitués dans le modèle	Moyenne
Hauteur absolue de l'eau dans la rivière	Fixé	MNT	Faible
Paramètre hydrodynamique			
Perméabilité des aquifères	Calée	Cadré par les valeurs issues des pompages d'essais	Faible
Emmagasinement des aquifères	Calée	Cadré par les valeurs issues des pompages d'essais	Faible
Perméabilité des épontes	Calée	Déduite du calage + littérature	Forte
Emmagasinement des épontes	Calée	Déduit du calage + littérature	Forte

Figure 24 : Tableau synthétique des différents paramètres intégrés au modèle.

3.4. CONTROLE ET VALIDATION DU MODELE

3.4.1. 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). Les données piézométriques sont bancarisées dans la BSS-EAU et dans ADES (banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines). Un recensement exhaustif des piézomètres assurant le suivi du niveau des nappes, du Plio-Quaternaire au Campanien a été réalisé. Au total, 91 piézomètres de contrôle ont pu être utilisés pour valider l'évolution des charges au cours du temps (Figure 25 et Figure 26).

Nappe considérée	Nombre de points d'observation
Plio-Quaternaire	12
Eponte au sommet du Langhien-Serravallien	1
Langhien-Serravallien	1
Aquitaniens	5
Oligocène	40
Éocène sup	1
Éocène moyen	28
Éocène inf	3
Total	91

Figure 25 : Points d'observation (piézomètres).

Les chroniques piézométriques correspondent soit à des mesures manuelles, soit à des enregistrements continus. Le pas d'échantillonnage des mesures est variable d'un point à un autre. Les chroniques les plus complètes, couvrant la période la plus longue, sont utilisées pour le calage du modèle en régime transitoire. Par ailleurs les autres mesures servent de référence pour le calcul des écarts entre les mesures observées et les valeurs restituées par le modèle.

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 disposent 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).

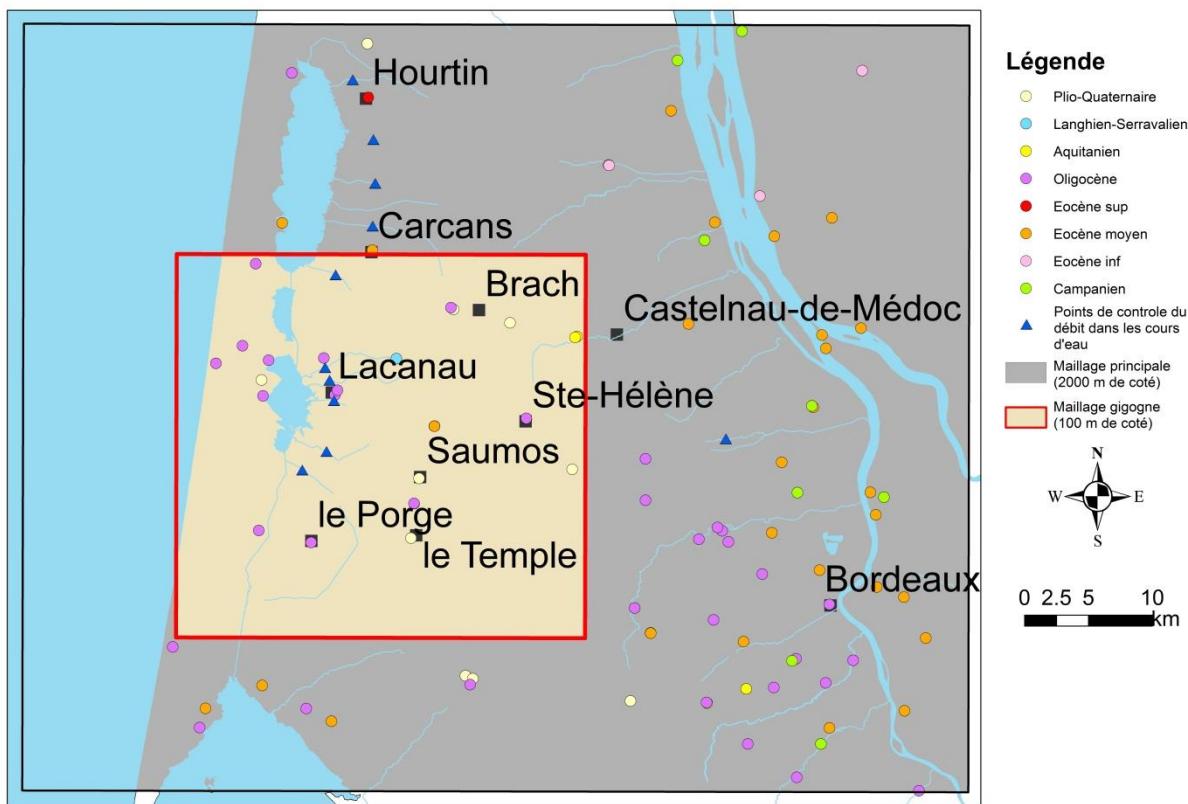


Figure 26 : Localisation des points d'observation de la piézométrie et du débit des cours d'eau utilisés pour contrôler la validité du modèle.

3.4.2. Calage du modèle en régime transitoire

Deux phases de calage ont été réalisées. Une première sur la période 1972-2012 au pas de temps trimestriel sur la version présentée le 27 février 2015 et une seconde au pas de temps mensuel de 2001 à 2012 (12 ans) sur la version du 1er octobre 2015.

Le calage des paramètres hydrodynamiques des couches aquifères considérées (Plio-Quaternaire, Langhien-Serravallien, Aquitanien, Oligocène, Éocène supérieur, Éocène moyen, Éocène inférieur) a été effectué en privilégiant la comparaison par points de mesures plutôt que la comparaison par cartes.

En effet, les cartes piézométriques représentent une interprétation parmi d'autres et plusieurs tracés alternatifs sont possibles. De plus, elles sont généralement réalisées à partir de mesures non synchrones.

Elles ne constituent donc pas des références absolues et il serait illusoire de rechercher une adéquation parfaite entre les isovaleurs calculées et les isovaleurs des cartes tracés sur la base d'une interprétation.

Une troisième phase peut être réalisée à postériori pour valider le modèle sur une période donnée dans le but de tester la réaction du modèle sans intervention de l'opérateur.

La procédure de calage suivie est illustrée par le schéma ci-dessous (Figure 27) :

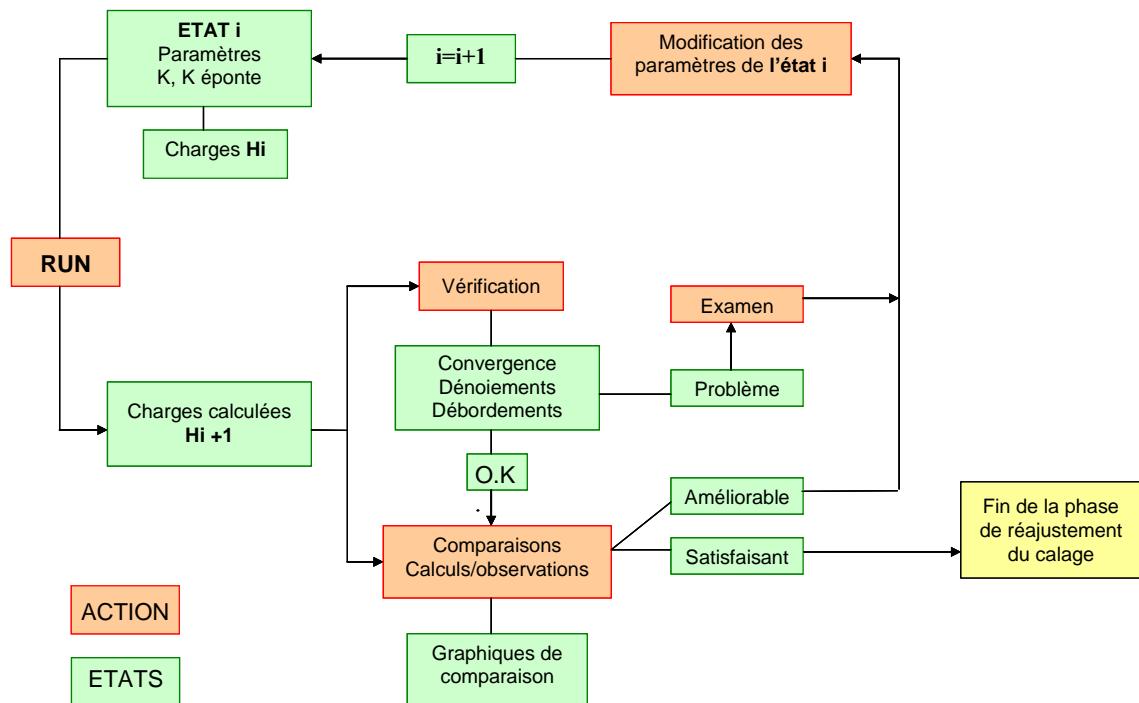


Figure 27 : Procédure de calage.

L'exemple présenté en figure 28 illustre le format de restitution des données avec en bleu les mesures brutes observées et en vert les charges calculées par le modèle avec la version au pas de temps mensuel du 1er octobre 2015.

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 6).

La validité du modèle a également été vérifiée 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).

Malheureusement, les stations de jaugeages sont situées plus au nord par rapport à 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 spécifiques du fait que les données réelles sont disponibles pour la période allant de 1976 à 1991 (Figure 29).

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.

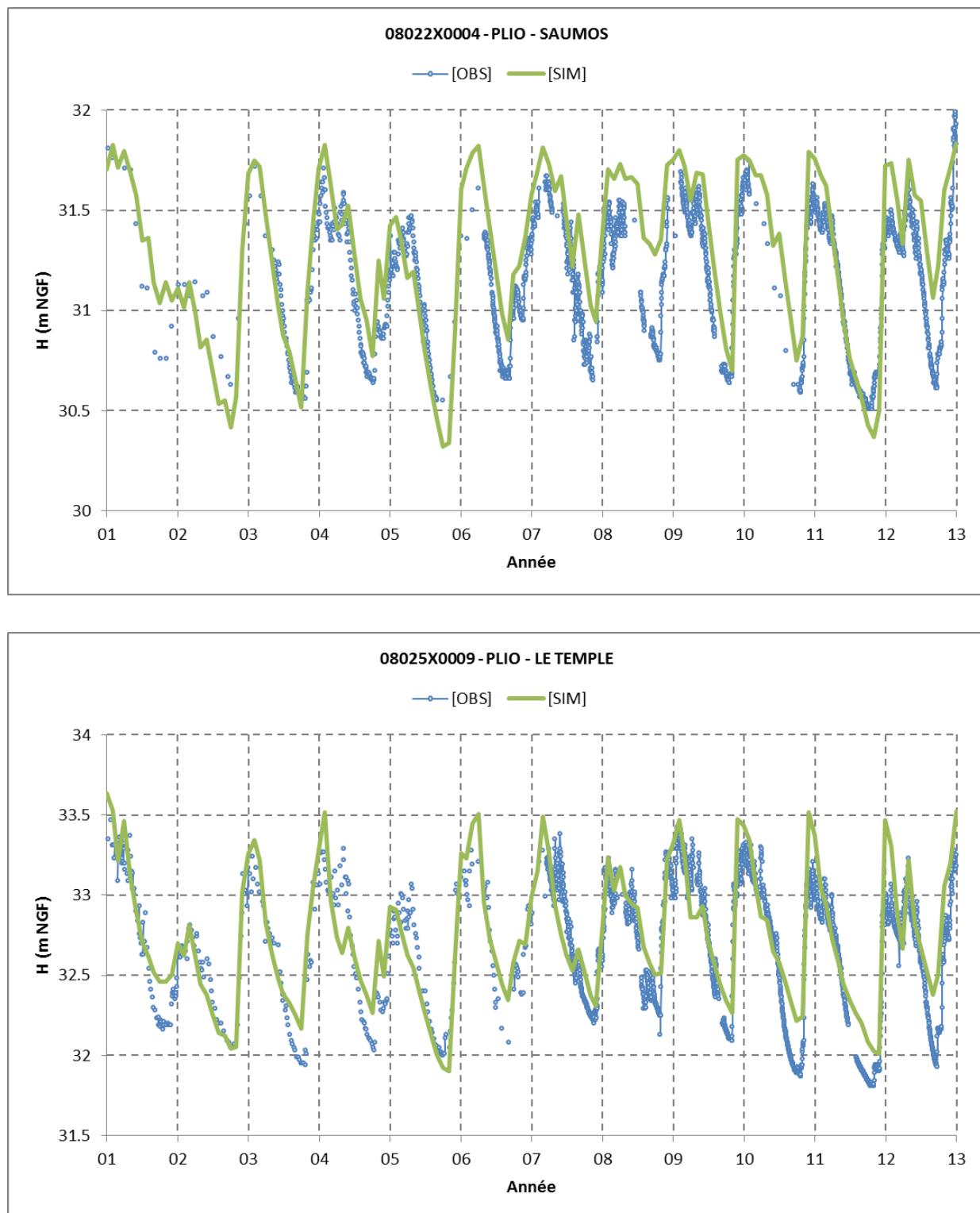


Figure 28 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés dans 2 piézomètres.

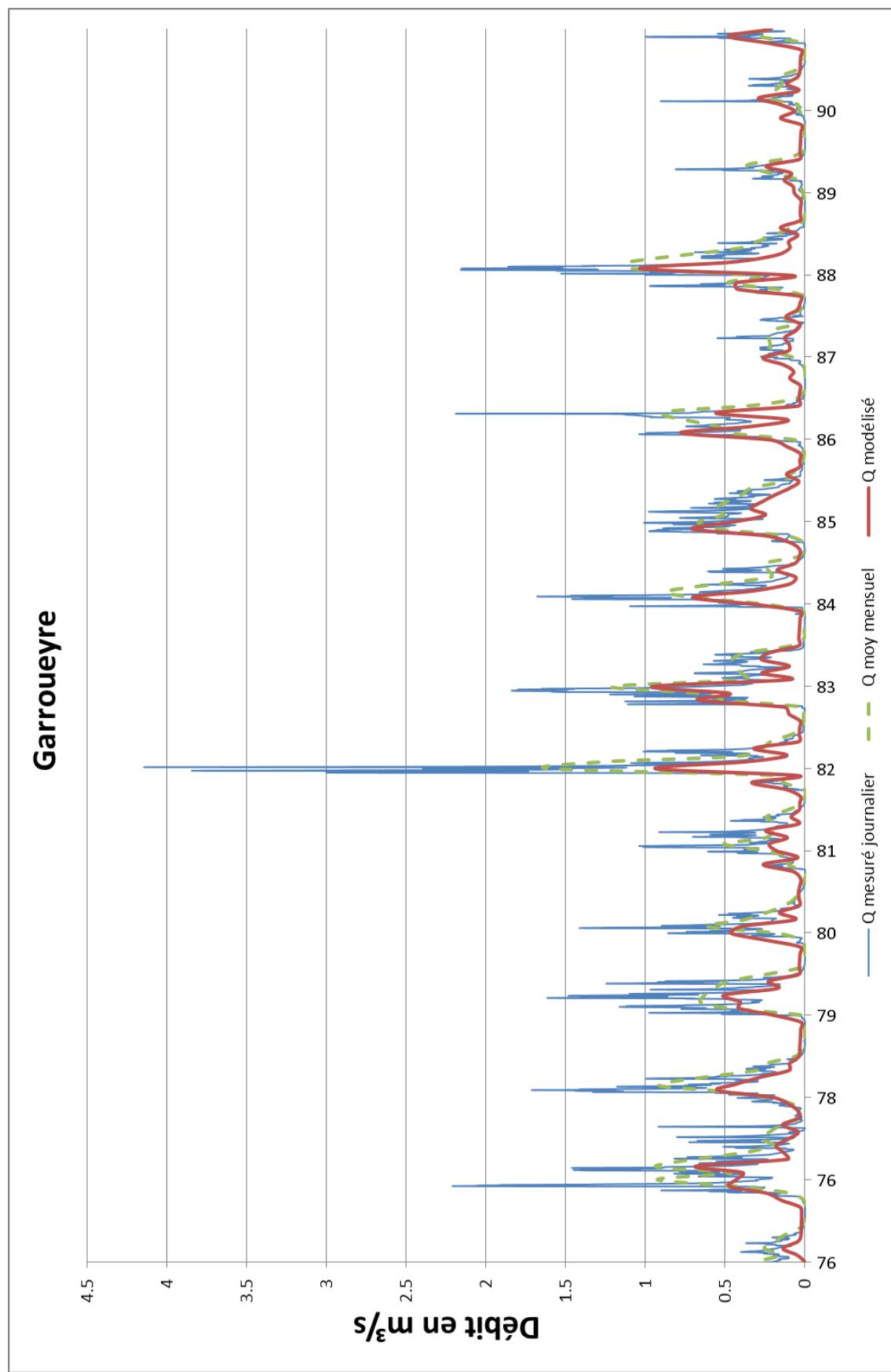


Figure 29 : Comparaison entre débits observés et débits simulés.

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, une validation supplémentaire a été effectuée en simulant 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 continue ont été réalisées 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 30) :

- 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

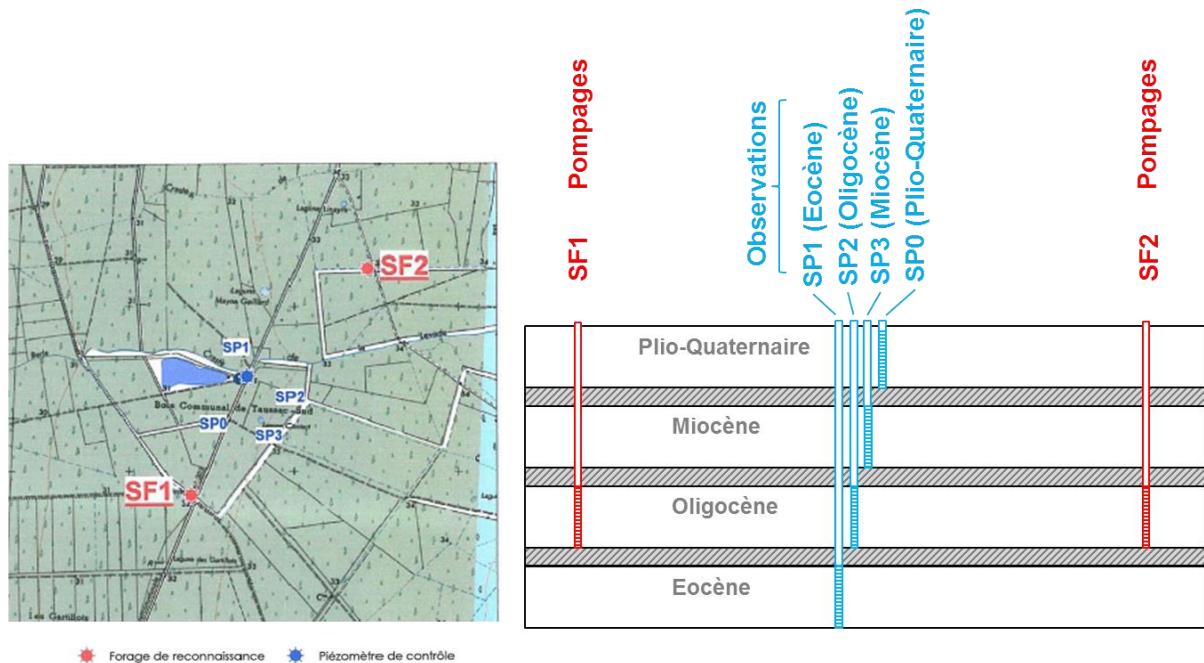


Figure 30 : Localisation des forages et plan schématique du dispositif.

Ces tests montrent que l'aquifère du Miocène réagit très fortement et de manière très similaire aux pompages effectués dans la nappe d'Oligocène. 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.

La restitution par le modèle de ces pompages d'essai et de leurs impacts sur les différentes nappes est relativement satisfaisante (Figure 31). On ne génère pas d'impact dans la nappe du Plio-Quaternaire ce qui sous-entend que ces derniers ne sont pas surestimés. Le comportement des nappes de l'Éocène et du Miocène sont bien reproduits. Seul l'impact sur la nappe de l'Oligocène est surestimé (de l'ordre d'un mètre).

**SAINTE-HELENE OUEST - Evolution piézométrique
pendant les tests de pompages sur SF1 et SF2**

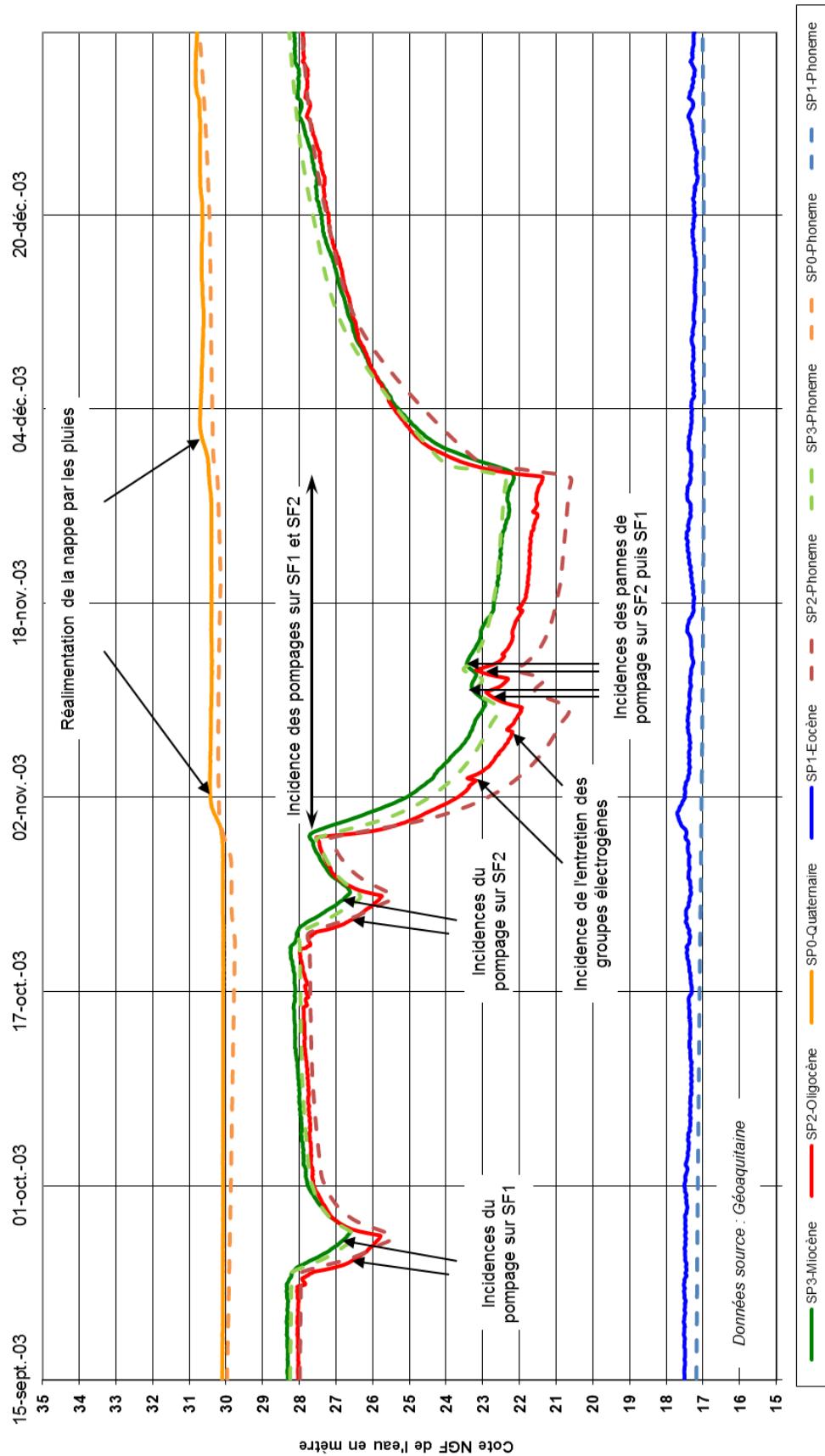


Figure 31 : Reproduction par le modèle des tests d'exploitation réalisés à grande échelle en 2003.

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 **MO**dèle **N**ord **A**quitain 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 de plus de valeurs pour la nappe du Plio-Quaternaire. Le nombre de pas de temps pris en compte est de 144. 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}) 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.

- **Ecarts individuels H_{obs} - H_{sim}**

Au total, l'analyse concerne un total de 91 piézomètres soit 4 228 mesures. Les paramètres statistiques de base sur la période considérée sont donnés dans la figure 32.

	Ensemble	Plio-Quaternaire	Miocène	Oligocène	Eocène
Nombre de valeurs	4228	978	474	1293	1483
Moyenne m (en m)	0.37	-0.08	0.02	0.73	0.46
Ecart type σ (en m)	1.50	0.78	0.48	1.83	1.65
Moyenne abs (en m)	0.77	0.35	0.11	0.87	0.95
Médiane (en m)	0.24	-0.09	-0.01	0.53	0.43
Minimum (en m)	-7.48	-4.56	-3.81	-7.48	-7.05
Maximum (en m)	8.02	2.31	1.39	8.02	5.54

Figure 32 : 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 la nappe du Plio-Quaternaire et du Miocène. Elle est de 0,37 m au sur l'ensemble des points ce qui est satisfaisant. Mais les erreurs positives et négatives 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 l'erreur moyenne absolue est de 0,77 m sur l'ensemble des valeurs. Cette valeur peut être considérée comme un résultat tout à fait acceptable.

Les écarts maximum et minimum observés sont compris dans une gamme de l'ordre de ± 8 m ce qui reste admissible. La distribution des écarts sur l'ensemble des observations ne s'organise pas tout à fait selon une loi normale (Figure 33). 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).

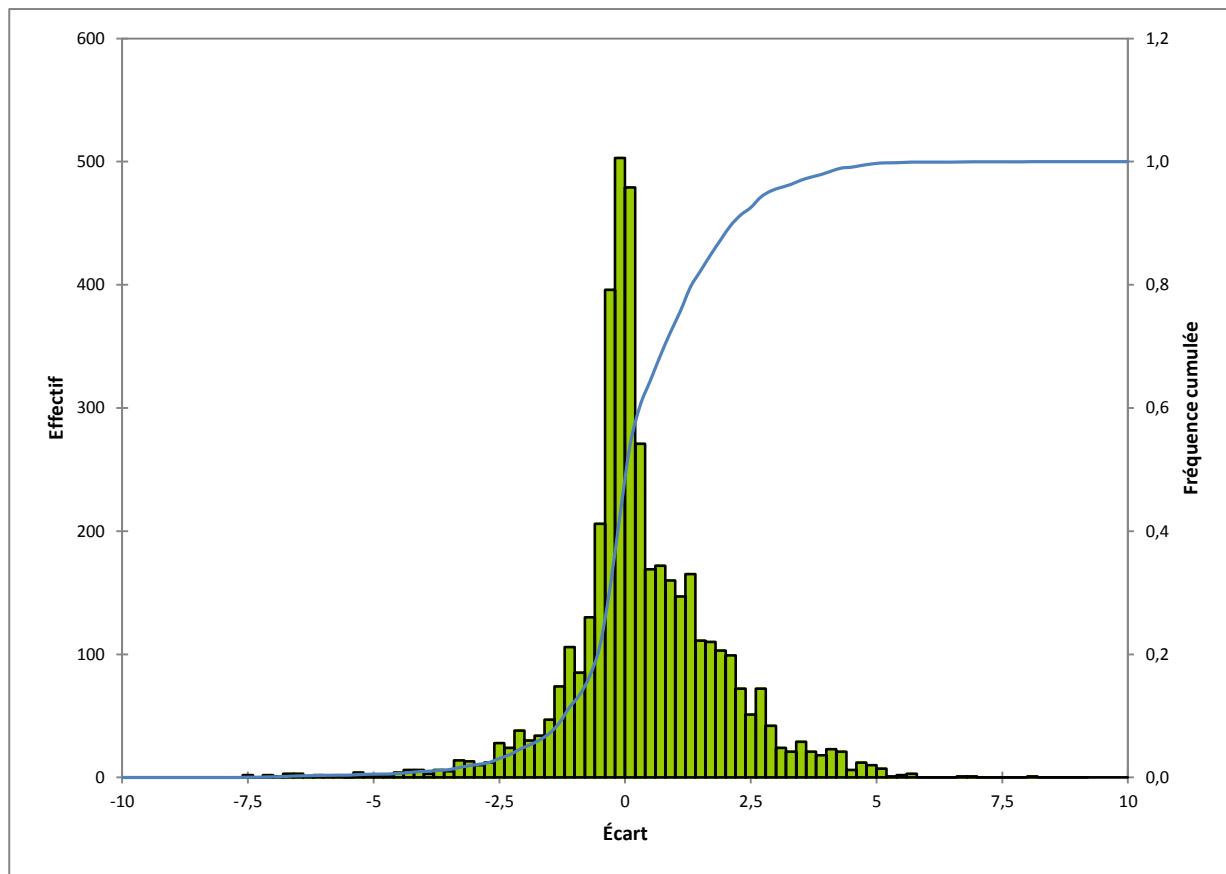


Figure 33 : Histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées.

75,3 % des écarts sont compris entre $(m-1\sigma) = -1,37$ et $(m+1\sigma) = +1,63$

93,6 % des écarts sont compris entre $(m-2\sigma) = -2,87$ et $(m+2\sigma) = +3,13$

Le diagramme de dispersion présenté en figure 34, montre que les valeurs simulées présentent une corrélation tout à fait satisfaisante avec les valeurs observées. La piézométrie des nappes du Plio-Quaternaire et du Miocène (Aquitainien et Langhien-Serravallien) est particulièrement bien restituée par le modèle. En effet, les valeurs moyennes issues des points de contrôle pour ces nappes sont très bien alignées sur la droite d'écart zéro entre valeurs simulées et valeurs observées. Les corrélations dans les nappes de l'Oligocène et de l'Éocène (inférieur, moyen et supérieur) restent dans une gamme tout à fait acceptable. A noter que certains chroniques sont très éloignées des zones d'intérêt et ont fait l'objet d'une attention moindre et peuvent être considérées comme moins bien calées. C'est notamment le cas dans le secteur de Pessac pour la nappe du Plio-Quaternaire (Annexe 6). Les résultats de calage obtenus peuvent donc être considérées comme très satisfaisants, malgré la prise en compte ces chroniques.

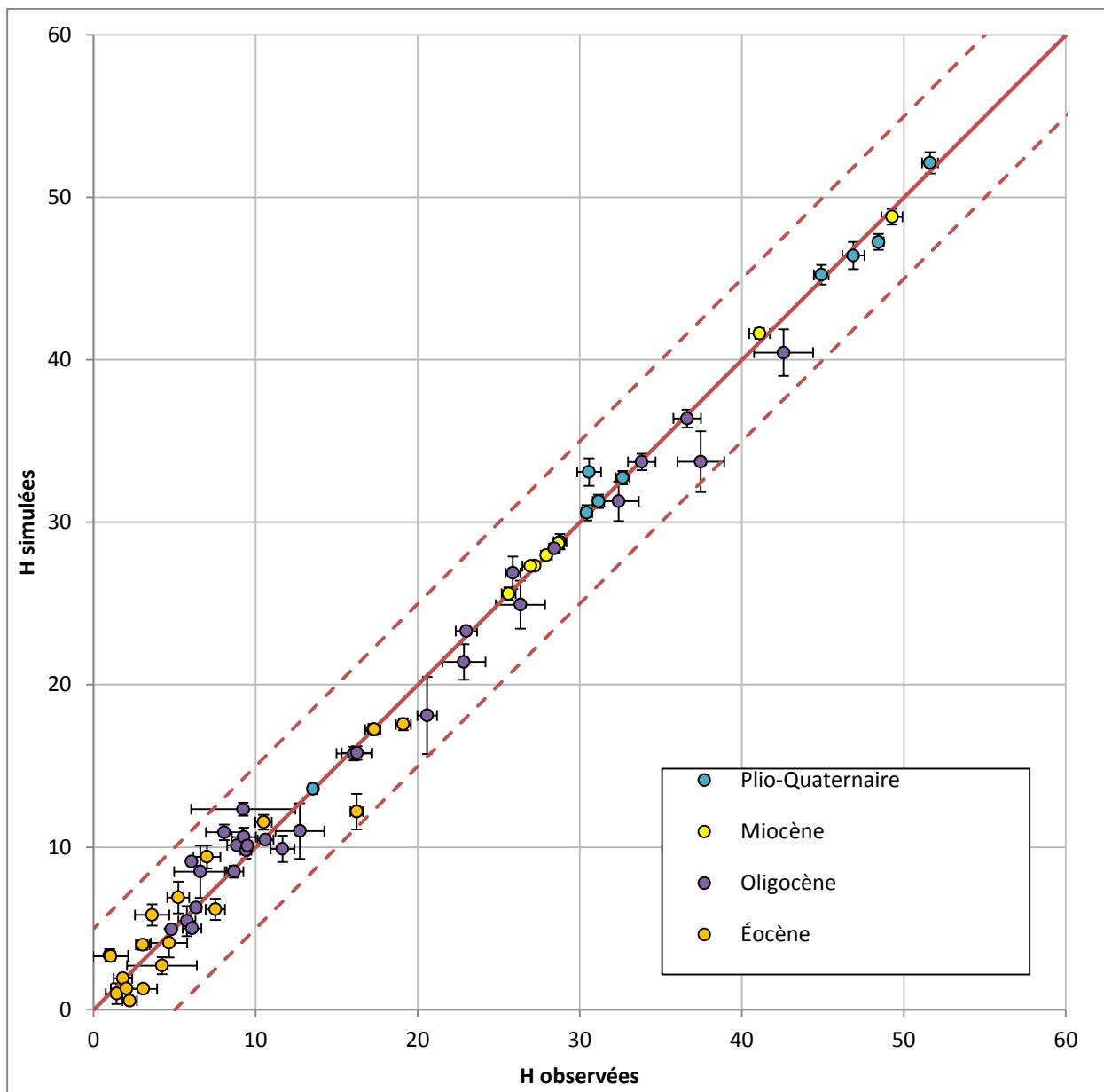


Figure 34 : Diagramme de dispersion - hauteurs piézométriques simulées et observées (moyennes et écarts types).

- **Evolution des écarts moyens**

L'évolution de ces écarts est présentée pour la nappe du Plio-Quaternaire (Figure 35). 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 hausse au cours du temps.

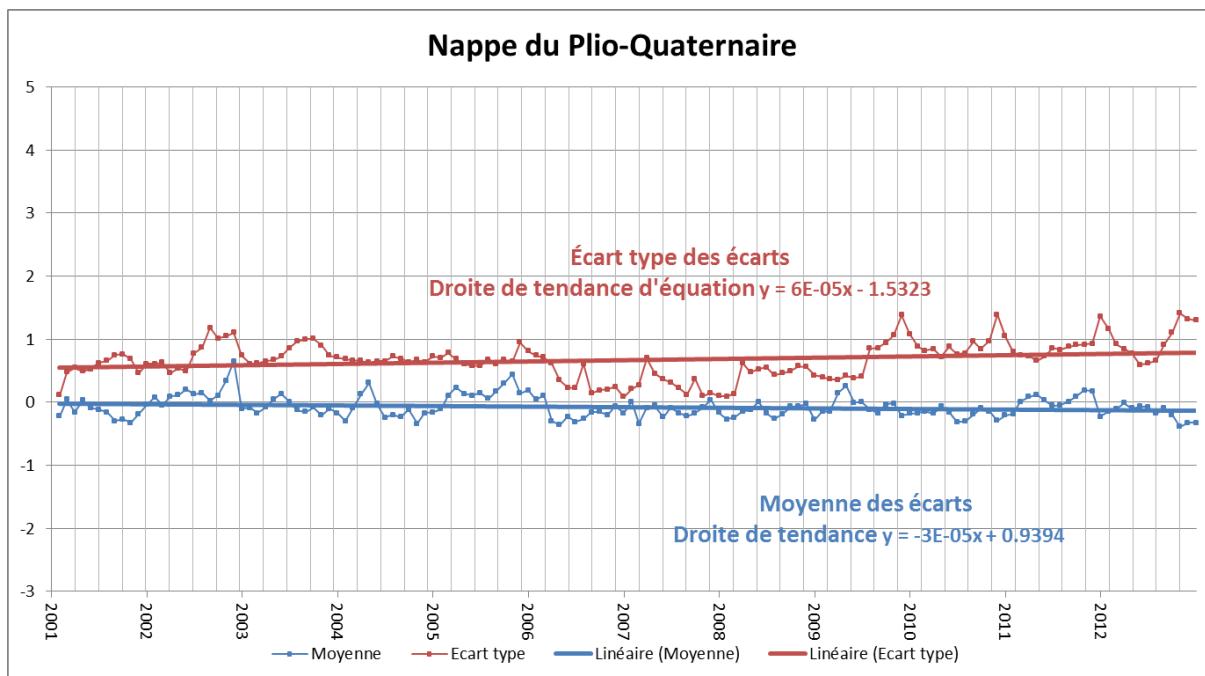


Figure 35 : Nappe du Plio-Quaternaire - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.

Les nappes du Miocène montrent un écart moyen quasi nul sans dérive au cours du temps traduisant une bonne restitution de l'évolution des charges dans le modèle (Figure 36). Les écart-types des écarts sont eux aussi très faibles et très stables dans le temps.

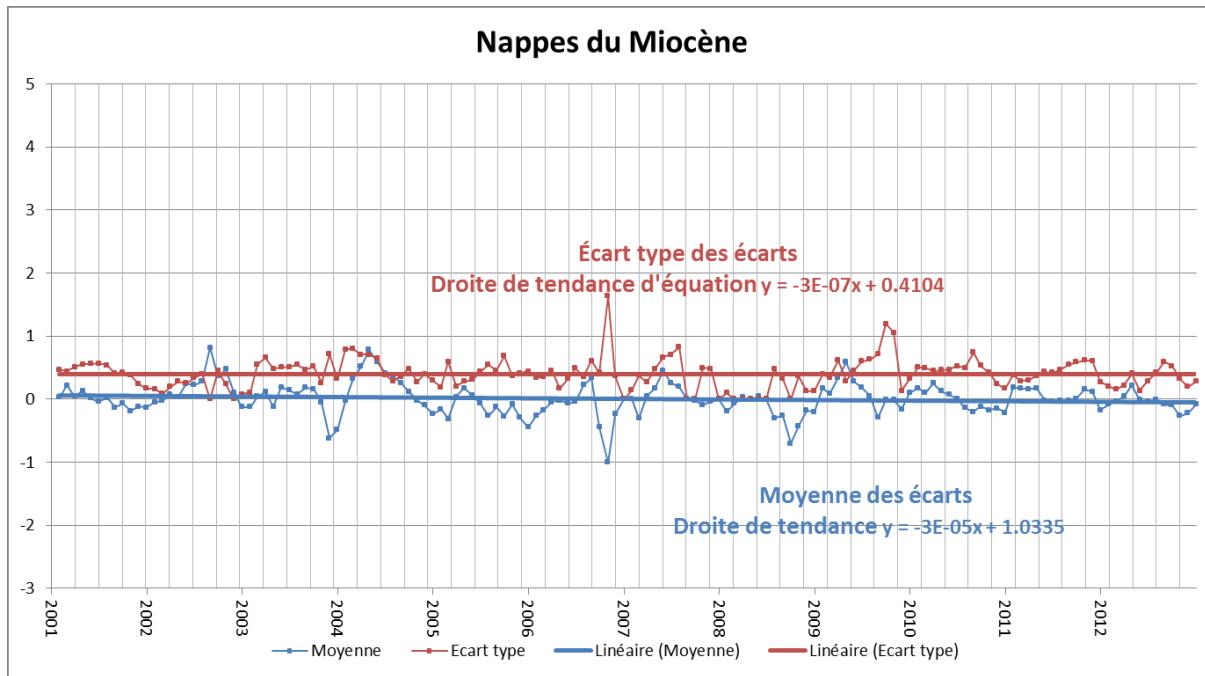


Figure 36 : Nappes du Miocène (Langhien-Serravallien Aquitainien) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.

Pour la nappe de l'Oligocène (Figure 37), l'écart moyen est de 0,73 m, ce qui traduit une légère sous-estimation des charges simulées par rapport aux charges observées. Cependant, 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.

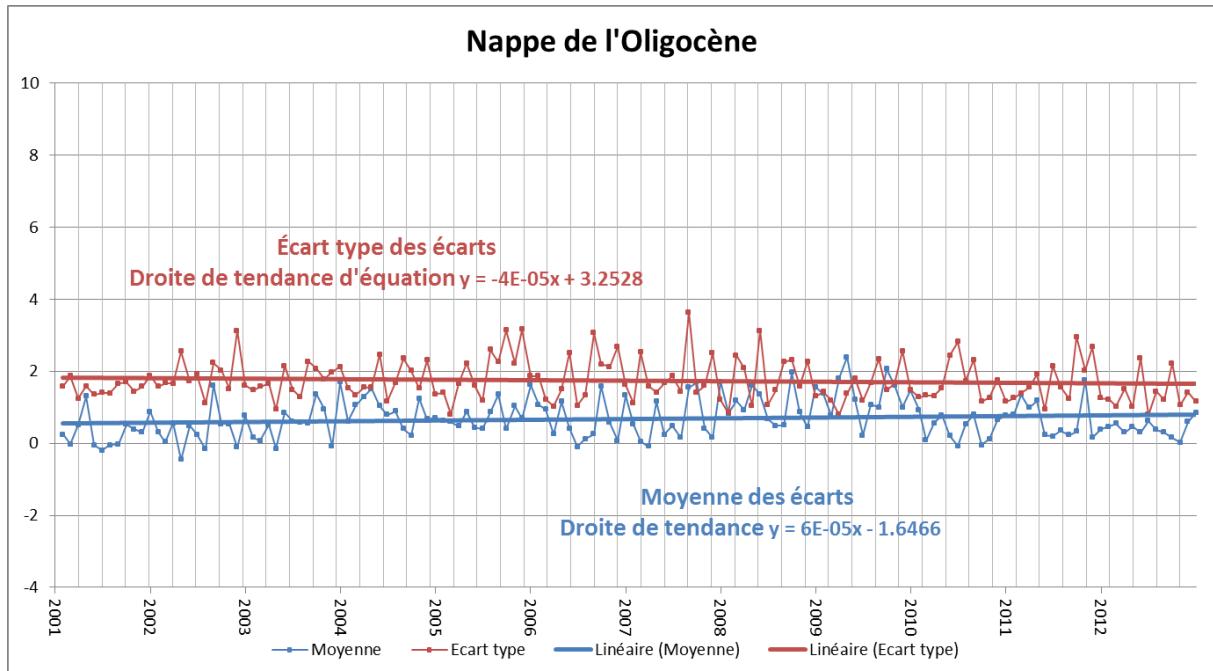


Figure 37 : Nappe de l'Oligocène - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.

Les nappes de l'Éocène (Figure 38), montrent un écart moyen de 0,46 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.

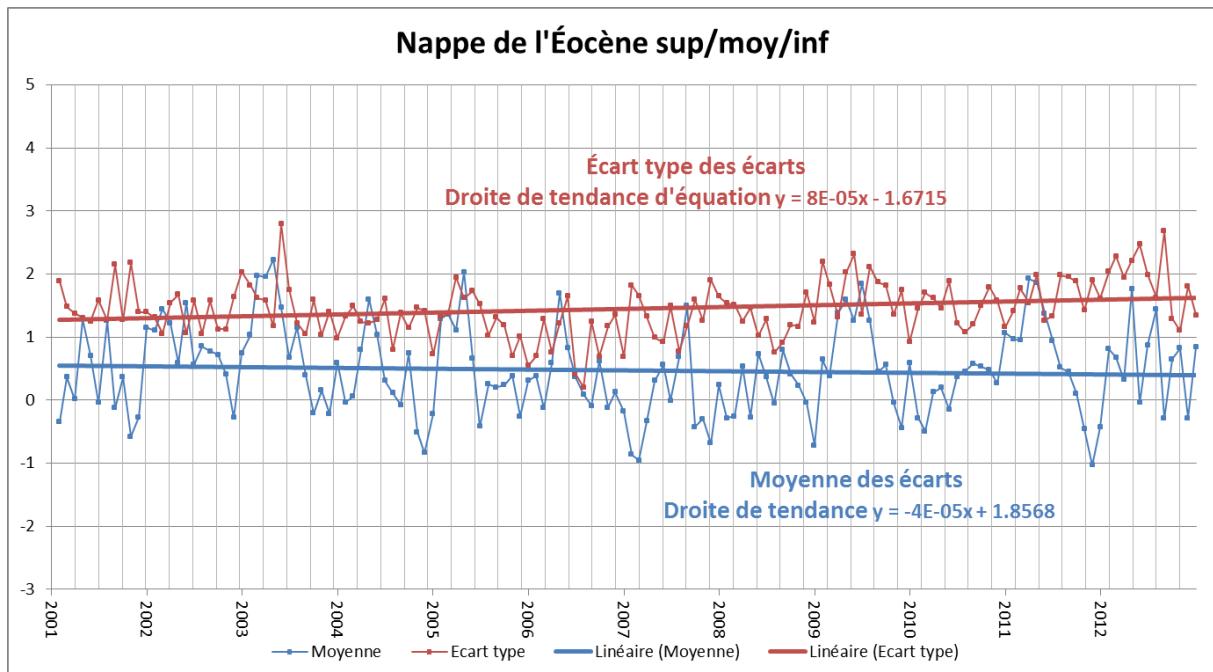


Figure 38 : Nappes de l'Éocène (supérieur, moyen et inférieur) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.

3.5. ANALYSE DE SENSIBILITE

Pour valider les choix effectués lors du calage, on fait varier les paramètres sur lesquels une incertitude existe pour évaluer si les modifications sur les résultats sont importants ou non : c'est le processus d'analyse de sensibilité.

Cette analyse a consisté à faire varier, à grande échelle, sur l'ensemble d'une couche, les valeurs de perméabilités (ex : +10% ; +20% ; -10% ; -20% ;...), de coefficient d'emmagasinement (ex : x10, $\div 10$,...) ou de recharge (ex : RU à 50, 60, 70, 80 mm). Le tableau ci-dessous récapitule les tests réalisés :

Nom de la couche	Perméabilité	Coef. d'emm.	Recharge
Plio-Quaternaire	-	$\div 2$, $\div 5$ et $\times 2$, $\times 5$	Calcul de la recharge avec une réserve utile de : 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm et 80mm
Éponte au sommet du Langhien-Serravallien	-20, -40, +20 et + 40 %	-	
Langhien-Serravallien	-10, -20, -40, -60, +10, +20, +40 et + 60 %	$\div 10$, $\div 100$, $\times 10$ et $\times 100$	
Éponte au sommet de l'Aquitainien	-20, -40, +20 et + 40 %	-	
Aquitainien	-	$\div 10$, $\div 100$, $\times 10$ et $\times 100$	
Éponte Chattien-Miocène	-20, -40, +20 et + 40 %	-	
Oligocène	-	$\div 10$, $\div 100$, $\times 10$ et $\times 100$	

Figure 39 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des variations appliquées dans le cadre de l'analyse de sensibilité

A noter que cette approche a été réalisée pendant la phase de calage ayant abouti à la version présentée lors de la réunion du 27 février 2015 (**version modèle du 27 février 2015 ; Phoneme 1.0**).

Ce processus a permis d'évaluer un à un l'impact de ces paramètres et d'observer les gammes de variations induites. A titre d'exemple, la figure 40 retranscrit l'influence de la variation de la perméabilité de l'éponte au sommet de l'Aquitainien sur le calage du piézomètre 08022X0010 captant l'Aquitainien à Sainte-Hélène. Les modifications étant réalisées à grande échelle, les variations induites dépendent de la spatialisation des données dans le modèle (exemple champ de perméabilité du modèle au moment où l'analyse est mise en œuvre). Ainsi, c'est surtout les tendances générales qui apportent des informations. Par exemple, la modification de la perméabilité de l'éponte au sommet de l'Aquitainien a peu d'influence sur la nappe du Plio-Quaternaire. Par contre la modification de ce paramètre influe sur le flux transitant dans les nappes sous-jacentes par l'intermédiaire de la drainance entre nappes. Ce sont donc les nappes de l'Aquitainien et de l'Oligocène qui sont les plus impactées (Figure 41). Cette approche est donc utile à la compréhension du fonctionnement du modèle. Elle a permis d'orienter le travail lors du calage du modèle dans sa **version 1.0** (modèle du 27 février 2015) et de donner les pistes d'amélioration qui ont abouti à la création d'une nouvelle version du modèle **version 2.0** (modèle du 1er octobre 2015).

En effet, l'analyse de sensibilité a montré l'importance de la recharge dans le calage du modèle or dans la **version 1.0** les bilans climatiques et le calcul de la recharge étaient réalisés en amont de la modélisation sous Excel au pas de temps décadaire à partir des données de la station météorologique de Mérignac. La spatialisation de la recharge s'effectuant uniquement à partir des différentes zones de réserve utile.

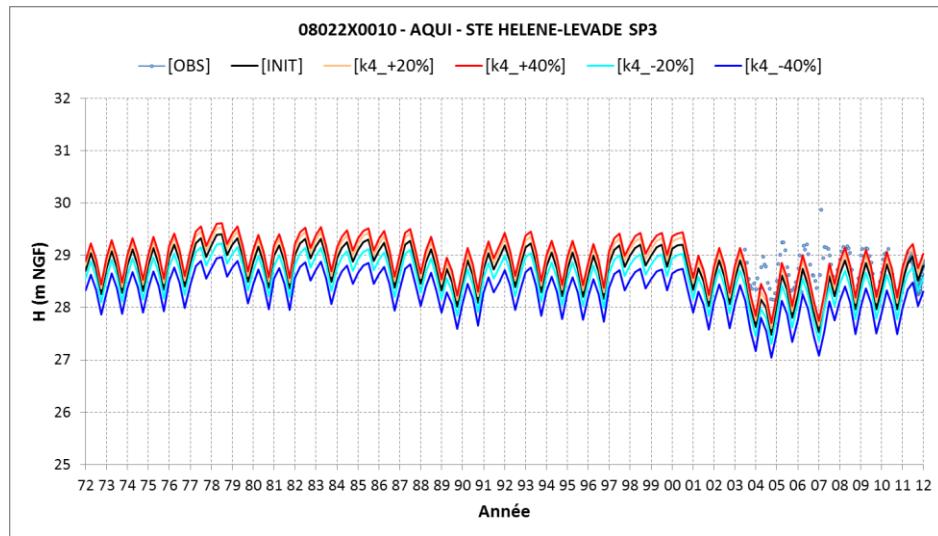


Figure 40 : Impact de la variation de la perméabilité de l'éponte au sommet de l'Aquitainien sur le calage du piézomètre 08022X0010 captant l'Aquitainien à Sainte-Hélène.

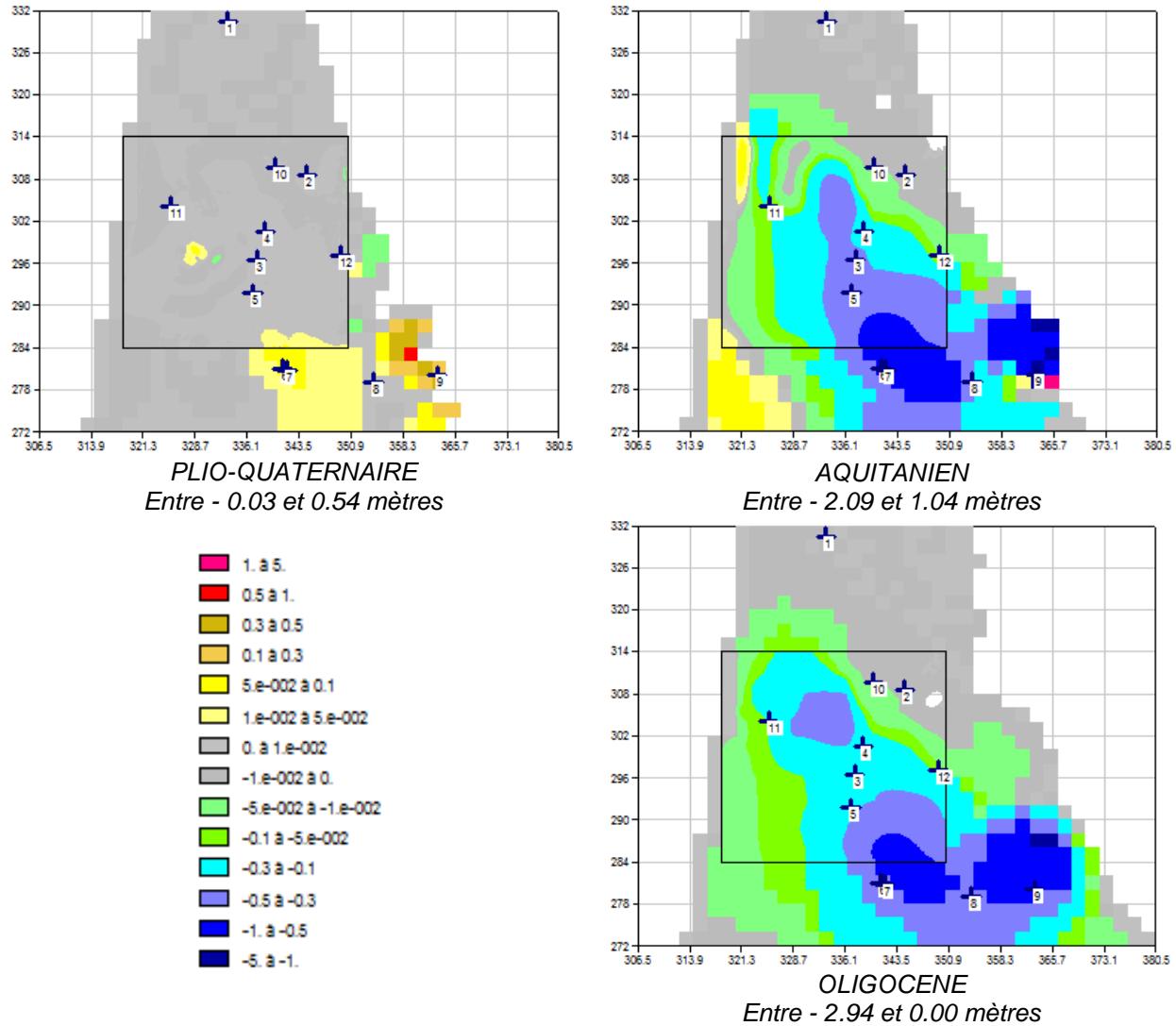


Figure 41 : Impact sur les niveaux piézométriques d'une variation de -20% de la perméabilité de l'éponte au sommet de l'Aquitainien (pas de temps du 31/12/20012).

Il a donc paru nécessaire d'améliorer la prise en compte de la recharge dans le modèle en intégrant les données spatialisées (pluie et évapotranspiration potentielle « ETP ») issues des grilles SAFRAN de Météo France (67 mailles carrés de 8 km de côté) et en se basant sur les cartes INRA pour calculer la Réserve Utile des sols. Le bilan hydroclimatique dans **la version 2.0** se fait directement dans le modèle en utilisant le schéma de surface GARDENIA de Marthe au pas de temps journalier. Le calcul hydrodynamique se fait quant à lui au pas de temps mensuel en fin de chaque mois. Ces modifications engendrant des temps de calculs importants, la période de simulation a été réduite à 12 ans (de 2001 à 2012). Cette période a été choisie car c'est la plus complète en termes de données sur la nappe du Plio-Quaternaire.

Les valeurs de perméabilités introduites dans les aquifères sont cadrées par des mesures réalisées sur le terrain. Les valeurs des paramètres hydrodynamiques attribuées aux épontes sont les plus incertaines car les mesures directes sont difficiles à obtenir en raison de la nature des formations et sont donc très rares.

Afin de prendre en compte l'incertitude sur les paramètres hydrodynamiques deux versions du modèle ont été utilisée :

- **Version Phoneme 2.1** : cette version est issue du résultat du calage (perméabilités des aquifères déduites des valeurs provenant des pompages d'essais),
- **Version Phoneme 2.2** : version plus pénalisante, intégrant l'incertitude sur les paramètres (perméabilité des épontes majorée).

A titre d'exemple, la perméabilité de l'éponte au sommet du Langhien-Serravalien a été augmentée d'un ordre de grandeur passant de 3.10^{-9} m.s⁻¹ dans la version **Phoneme 2.1** à 5.10^{-8} m.s⁻¹ dans la version **Phoneme 2.2**. Ces modifications, ont affectées toutes les épontes. Elles peuvent cependant être régionalisées (exemple de la perméabilité de l'éponte au sommet du Langhien-Serravalien), ou plus localisée pour d'autres épontes. A noter que les différences entre les deux versions impliquent également des réajustements sur les aquifères pour aboutir à des versions comparables en terme de calage.

4. Conclusion

Ce rapport décrit la construction du modèle géologique et du modèle hydrodynamique élaboré spécifiquement pour évaluer l'impact du projet de champ captant des Landes du Médoc. Il détaille les paramètres introduits pour faire fonctionner l'outil, leurs origines et les incertitudes associées.

Dans un premier temps, un modèle géologique fin à la maille de 100 m a été construit à l'aide du logiciel GDM (Geological Data Management), sur l'extension de la zone d'intérêt correspondant à l'aire d'influence du champ captant, telle qu'elle a été simulée dans le rapport BRGM/RP-61290-FR (Cabaret et al., 2012). Un total de 15 couches ont été modélisées de manière à représenter, en 3D, les aquifères et les épontes allant du Plio-Quaternaire au Campanien. La géométrie de ce modèle a été intégrée sous forme d'un gigogne dans un modèle hydrodynamique de plus grande extension correspondant à une extraction du MONA (version 3.3b 2010). L'objectif est de créer un modèle hydrodynamique local pour étudier plus spécifiquement l'influence du projet de champ captant des Landes du Médoc en bénéficiant de l'ossature du modèle régional et des données afférentes (perméabilités, emmagasinement, potentiels imposés,...) tout en affinant au mieux des connaissances actuelles sur le secteur d'intérêt. Afin de mieux intégrer le rôle capacatif des épontes, le modèle a été converti de pseudo-3D à 3D. En dehors du gigogne, la géométrie du modèle a été ajustée à partir de la version 4 du MONA pour bénéficier des connaissances les plus récentes sur ce secteur (Saltel et al., 2014).

Dans un second temps, le modèle hydrodynamique a été calé en apportant une attention particulière à la nappe du Plio-Quaternaire et à son drainage par le réseau de crastes existant dans ce secteur. L'objectif étant de pouvoir appréhender dans le modèle, le plus finement possible, les éventuels impacts de l'exploitation du champ captant. Ainsi, la prise en compte de la recharge du système et l'intégration du réseau hydrographique ont été réalisés de la manière suivante :

- La détermination des flux de recharge et du ruissellement est réalisée par l'intermédiaire du calcul de bilans hydro-climatiques avec le schéma GARDENIA (Thiéry, 2003) intégré à MARTHE. Elle est basée sur les données de précipitation et d'évapotranspiration des « ré-analyses SAFRAN » fournies par Météo-France et sur les délimitations des zones de Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration déterminée à partir de la carte pédologique réalisée par l'INRA au 1/250 000^{ème}.
- Les principaux cours d'eau du secteur d'étude ont été intégrés dans le modèle. La définition des différents paramètres définissant la géométrie des cours d'eau s'est appuyée sur une reconnaissance terrain complétée des éléments recueillis dans la bibliographie. De plus, les bassins versants ont été délimités dans le modèle en définissant pour chaque maille les directions aval pour le ruissellement. Cette approche permet d'orienter les flux de ruissellement et de débordement du modèle afin de mieux restituer le débit des cours d'eau.

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 contrôle et de validation du modèle est décrit en détail dans ce rapport et montre une corrélation tout à fait satisfaisante entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Les résultats montrent un écart moyen proche de zéro sans dérive au cours du temps traduisant une bonne restitution de l'évolution des charges dans le modèle.

Au sein des paramètres calés, les valeurs introduites sont parfois cadées par des mesures réalisées sur le terrain (pompages d'essai pour les paramètres hydrodynamiques des aquifères) ou par des modélisations annexes (Modélisation sous Gardenia pour les paramètres de recharge).

Ce rapport intermédiaire ne fait pas état des résultats de simulations d'impact qui seront exposés dans le rapport final.

A noter que des investigations complémentaires ont été identifiées pour améliorer le modèle. Ainsi, un processus de localisation des différents points de mesures de la nappe du Plio-Quaternaire a déjà été initié par le bureau d'étude Antéa et un réseau de suivi venant compléter le réseau existant doit être mis en place. Ces futures chroniques permettront d'affiner le calage du modèle sur le secteur d'intérêt. La mise en place d'un tel réseau prend du temps. Ainsi, la récolte des données et leur exploitation dans le modèle ne pourra se faire que sur le long terme.

A plus court terme, afin d'améliorer la connaissance des échanges inter-nappes, il serait possible de réaliser des tests de pompage dans la nappe de l'Oligocène et de mesurer leurs influences dans les réservoirs sus-jacents (Aquitainien, Langhien-Serravallien, Plio-Quaternaire). Pour ce faire, il est possible d'utiliser les infrastructures existantes comme c'est le cas sur la commune de Saumos où la présence d'un forage captant l'Aquitainien (08026X0001/F1) à seulement 20 m du forage oligocène utilisé pour l'alimentation en eau potable (08026X0034/F2). Plus au sud, sur la commune du Temple, la réalisation d'une série de forage en flute de pan permettrait de mettre en place un dispositif similaire à celui réalisé en 2003 sur la commune de Saumos (cf. page 43). Ce dispositif présente l'intérêt de pouvoir déterminer pour chaque aquifère des valeurs locales des perméabilités et de déterminer comment l'influence d'un pompage se propage aux nappes encadrantes.

5. Bibliographie

Ackerer P., Delay F., Porel G., De Marsily G. (1998) - Expertise de la restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes, 43 p., 20 fig., 10 tab.

Allard A. (1981) - La nappe du Miocène dans les Landes de Gascogne. *BRGM Service géologique régional Aquitaine*, 35 p

Amraoui N., Bichot F., Platel J.P., Seguin J.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., Bichot F., Seguin J.J., Platel J.P., Sourisseau B. (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, A Ayoub J, M Pirard Y (1983) - A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*, Vol. 196, 95-106.

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

Braneyre M., Seguin J.J., Lambert M. (1993) - Modèle conceptuel sommaire - Multicouche aquitain. Rapport BRGM R37322 BOR AQI 93, 12 p., 7 fig., 1 ann..

Braneyre M., Chigot D., Lambert M., Moreau C.F., Sourisseau B., Platel J.P., Dubreuilh J., Gaaloul N. (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.

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*, Vol. Volume 11, 3, 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. *Thèse de doctorat : Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3*, 308 p.

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., Cabaret O. (2014) - Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 6 - Année 4. Rapport final. BRGM/RP-63168-FR, 113 p., 81 ill., 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.

Richer de A., Arrouays D., Wilbert J. (2015) - 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..

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

Dubreuilh J., Capdeville J.P., Farjanel G., Karnay G., Platel J.P. (1995) - Dynamique d'un comblement continental néogène et quaternaire : l'exemple du bassin d'Aquitaine.. Géologie de la France, Vol. N°4, 3-26.

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., Pédrone 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.

Larroque F. (2004) - Gestion globale d'un système aquifère complexe - Application à l'ensemble aquifère multicouche médocain. *Thèse de doctorat : Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 253p,*

Larroque Francois, Dupuy Alain (2004) - Apports de la méthode sismique réflexion haute résolution à l'identification des structures profondes des formations tertiaires en Médoc (Gironde, France) : implications hydrogéologiques. Comptes Rendus Geosciences, Vol. 336, 1111-1120.

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.

Pédrone 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.

Pédrone N., Abou-Akar A., Platel J.P. (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.

Pédrone N., Platel J.P., 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.

Pédrone N., Platel J.P., Bourgine B., Loiseau J.B. (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.

Pédrone N., P. Platel J., 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.

Pédrone N., Seguin J.J., Capdeville J.P. (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.

Pédrone 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.

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

Saltel M., Pédrone N., Platel J.P., Bourgine B., Gutierrez T. (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.

Saltel M., Faucher A., B. Bourgine (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., 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. (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.

Schlumberger (2002) - Well test interpretation.

Seguin J.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.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.

Seguin J.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.

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.

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

Thiéry D. (2010) - Didacticiel du code de calcul Marthe v7.0 - Votre premier modèle - BRGM/RP-58632-FR..

Thiéry D., Amraoui N. (2001) - Hydrological modelling of the Saone basin sensitivity to the soil model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* , Vol. 26, 467-472.

Thiéry D. (2003) - Logiciel GARDENIA. version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig, 3 ann.

Thiéry D. (1990) - Logiciel MARTHE Modélisation d'Aquifère par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements - R-32210.

Annexe 1

Le logiciel GDM et son composant Multilayer



Information géologique Modélisation et visualisation

GDM 2014 - Standard Edition (v. 7.1)



Le logiciel des géologues

> Descriptif

GDM est utilisé pour la représentation et la modélisation de données géologiques pourvues de coordonnées X, Y et Z,

- de tout type : limites géologiques, failles, sondages, échantillons,
- et de toute forme : codes géologiques, textes descriptifs, résultats d'analyses, diagraphies, images.

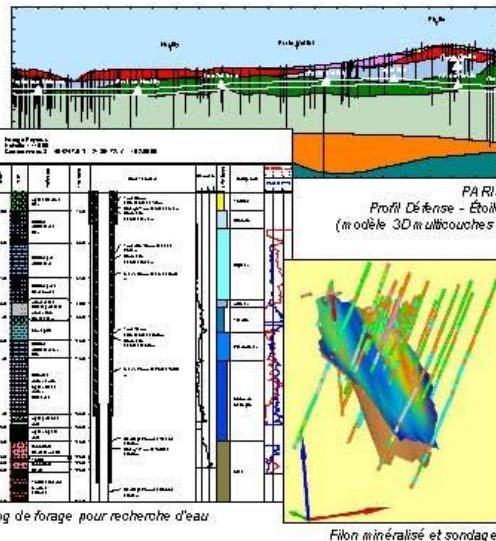
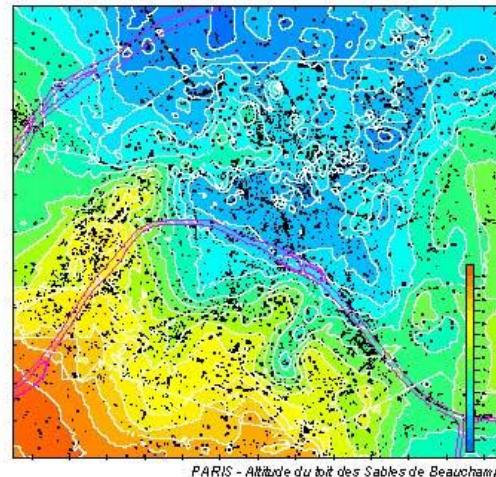
GDM lit directement des données Texte / Excel / Access / Oracle / SQL Server / PostgreSQL / MySQL

GDM produit des graphiques vecteur :

- multicouches : cartes, sections verticales,
- multicolonnes : logs de sondages, et des vues 3D dynamiques (raster).

La modélisation peut être faite :

- sur cartes et sur sections,
- avec prise en compte de failles et limites,
- de façon automatique (interpolation) ou manuelle (digitalisation).



> Domaines d'application

- Exploration et exploitation de ressources minérales,
- Gestion des ressources en eau,
- Conception de tunnels, barrages, sites de stockage souterrains,
- Aménagement du territoire,
- Diagnostics de pollution du sous-sol,

> Conditions / Tarification

- Application Windows GDM 2014 Standard Edition (v 7.1) :
Licence mono-utilisateur : 5 000 € HT
Tarif dégressif pour les licences suivantes.
Licences université : nous consulter
- Composants pour intégrer les fonctions de GDM dans un SIG ou dans une application Internet : nous consulter

> Contact

brgm

Direction des Systèmes d'Information

Tél. : 02 38 64 30 44

Fax : 02 38 64 39 70

Mél : gdm@brgm.fr

Web : <http://gdm.brgm.fr>

GDM 2014 - Standard Edition (v. 7.1)

Fiche technique

GESTION DES DONNEES

Caractéristiques générales

- Connexion directe aux bases Access 2007, Oracle, SQLServer, MySQL, PostgreSQL, (lecture seule)
- Connexion directe aux fichiers Excel 2007, dBase, Texte (lecture seule)
- De plus, il est possible d'importer tous les formats ci-dessus dans GDM
- Connexion à des données de sondages GeoSciML
- Utilisation de coordonnées locales et générales, avec des unités variées
- Nombre illimité d'enregistrements
- Jusqu'à 256 champs
- Champs textes : jusqu'à 5000 caractères
- Champs codes : jusqu'à 20 caractères
- Champs numériques : distinction entre valeurs nulles et absentes
- Calcul automatique et conservation des paramètres statistiques des champs numériques
- Critères de sélection définissables sur tous les champs
- Exportations : XLS, XLSB, DBF, MDB, ACCDB, DXF, MIF, SHP
- Gestion de sondages verticaux ou déviés
- Fusion de données de sondages en fonction de la profondeur
- Détermination de formations et de composites à partir des bases de sondages

Dans les bases GDM

- Définition, sauvegarde et réutilisation de modèles de bases de données
- Suppression, addition, insertion, copie, couper-coller d'enregistrements
- Recherche, remplacement, saisie répétitive de valeurs
- Digitalisation à l'écran de points, courbes, polygones 3D sur plans ou sections rectilignes ou non
- Autres importations : MIF, SHP, ESRI Ascii grid
- Mise à jour (par champ clef), et concaténation d'enregistrements
- Valorisation de champs avec des opérateurs et des fonctions
- Calcul de surface de polygones 3D projetés sur un plan

INTERPOLATION

- Prise en compte de failles, de limites polygonales, de variable indicatrice
- Estimation de points, de grilles de points, ou de grilles de blocs 2D
- 8 méthodes d'interpolation dont le krigeage
- Calcul de la variance d'estimation
- Définition de dérive polynomiale et/ou externe
- Recherche de voisinage global, ou rectangulaire, ou par octants avec prise en compte de regroupement des données en profils ou en clusters
- Contrôle du pré-classement des données et du seuil de fusion
- Sauvegarde et réutilisation des paramètres d'interpolation
- Calcul d'histogrammes, calcul et modélisation de variogrammes, validation croisée

GRAPHIQUES

Caractéristiques générales

- Catalogues de figurés, de symboles 2D/3D et de types de traits
- Affichage d'images référencées dans des sources de données de points ou de sondages : JPG, BMP, GIF, TIF, PNG, WMF
- Export WMF des plans, sections et logs, export raster des vues 3D
- Un clic de la souris dans les données repère la donnée correspondante sur tous les plans, sections, logs de sondage ou vues 3D affichés
- Un clic sur le plan, la section ou la vue 3D affiche le log de sondage, ou pointe sur la donnée dans la base
- Un clic dans le log de sondage pointe sur la donnée dans la base, ou repère la donnée sur tous les plans, sections ou vues 3D affichés

Plans et sections

- Représentation en coordonnées locales ou générales
- Structure en couches du dessin (jusqu'à 20 couches, 9 types de couches)
- Superposition des données sur une ou plusieurs images en fond de plan
- Calculs de distances et angles
- Sections rectilignes, ou non rectilignes dépliées (profils en long)
- Sections séries

- Échelles horizontale et verticale distinctes sur les sections

- Représentation des échantillons : symbole déterminé par valeur d'un champ, identifiant au choix, et 8 positions de valeurs autour du symbole

- Représentation des données de sondages : trace du sondage, report de textes / valeurs, figurés, diagrammes en barres / linéaires, symboles

- Représentation des données de courbes : types de traits et/ou remplissages par figurés déterminés par valeurs de champs

- Représentation des données interpolées par des courbes isovaleurs avec ou sans remplissage, ou par des blocs colorés

- Représentation des formations interpolées sur les sections (rectilignes ou non)

Logs de sondages

- Cartouche standard ou importé
- Jusqu'à 200 colonnes définies par l'utilisateur
- 14 types de colonnes : textes, figurés, images, équipement de forage, diaporamas, symboles, etc.
- Duplication, déplacement et superposition des colonnes
- Impression/ exportation de logs en série
- Mise en page pour impression feuille à feuille ou en un seul morceau

Vues 3D dynamiques

- Types de couches graphiques : points, sondages, courbes 3D, failles, grilles (surfaces calculées par interpolation), sections verticales rectilignes ou non
- Rotation, zoom et translation
- Dilatation selon la coordonnée Z
- Deux coupes mobiles verticales

- Disponible pour Windows 7 et 8 en version monoposte ou réseau
- Interface avec menus contextuels sur une structure de projet
- Interface Documents Multiples (MDI)
- Technologie .Net, 32/64 bits



Direction des Systèmes d'Information
Tél : 02 38 64 30 14 - Fax : 02 38 64 39 70
Mèl : adm@brgm.fr
Web : <http://gdm.brgm.fr>

© BRGM Copyright 1987-2014
Ce document a été conçu dans un but informatif et n'a pas de valeur contractuelle
GDM est une marque déposée du BRGM
Toutes les marques citées sont déposées par leurs sociétés respectives



Information géologique Modélisation et visualisation

MultiLayer Construction de modèles géologiques



> Descriptif

MultiLayer est une extension de GDM 2014 permettant de construire très rapidement des modèles géologiques 3D « multicouche » et d'obtenir des gains de productivité importants.

MultiLayer permet d'exploiter facilement les données géologiques stockées dans un projet GDM et se charge de gérer pour vous le workflow de la construction du modèle géologique.

Une fois définie la pile stratigraphique des formations géologiques à modéliser, des outils d'analyse de cohérences croisées entre les différents types de données permettent de vérifier, corriger et interpréter les données.

Un assistant vous guide ensuite dans la construction du modèle. L'ensemble des paramètres de construction du modèle sont conservés et peuvent être réutilisés.

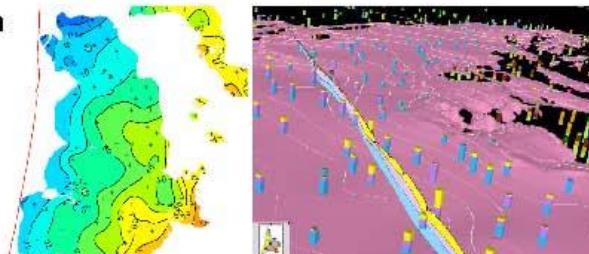
Le modèle peut être exploité facilement par la production automatique de cartes, coupes, vues 3D et export vers différents formats.



Arbre MultiLayer visualisant la pile stratigraphique modélisée

> Domaines d'application

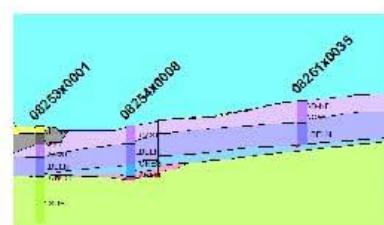
- Exploration et exploitation de ressources minérales,
- Gestion des ressources en eau,
- Géotechnique et génie civil,
- Conception de tunnels, barrages, sites de stockage souterrains,
- Aménagement du territoire,
- Géothermie.



Bassin Aquitain. Carte isohypse issue du modèle et vue 3D d'une surface

> Conditions / Tarification

- MultiLayer 2014 est une application Windows
- Licence mono-utilisateur : 7 500 €
- Tarif dégressif pour les licences suivantes.
- Licences université : nous consulter
- Nécessite de disposer d'une licence de GDM 2014 standard édition



Coupe dans le modèle 3D

> Contact

brgm

Direction des Systèmes d'information
Tél. : 02 38 64 30 14
Fax : 02 38 64 39 70
Mèl : gdm@brgm.fr
Web : <http://gdm.brgm.fr>



MultiLayer (extension de GDM 2014)

Fiche technique

GESTION DES DONNEES

Caractéristiques générales

- MultiLayer lit ses données à travers GDM et donc utilise tous types de données accessibles depuis GDM (données stockées dans des bases Access 2007, Oracle, SQLServer, MySQL, PostgreSQL, Excel 2007, dBasis, Texte, ou données au format GDM).
- En plus des fonctions d'import/Export disponibles dans GDM, MultiLayer offre des fonctions d'export performantes des modèles géologiques vers des formats standards avec choix du nombre de décimales (grilles au format ESRI Ascii Grid, au format texte CSV, au format Texte avec colonnes de largeur fixe).

DONNEES GÉOLOGIQUES PRISES EN COMPTE

Diverses types de données peuvent être intégrées dans le processus de construction du modèle :

- Sondages verticaux (directement), ou non verticaux (par l'intermédiaire des points de passage)
- Coupes géologiques ou géophysiques interprétées,
- Carte géologique vectorisée,
- Points de passage des toits/bases,
- Epaisseur des formations géologiques (observations à l'affleurement),
- Modèle numérique de terrain,
- Limites d'extension maximale des formations géologiques,
- Failles.

METHODE DE CONSTRUCTION

- Définition de la série des formations à modéliser et leur type de relation (dépôt/érosion).
- Possibilité de modéliser les toits/bases de formations ou leurs épaisseurs.
- Possibilité d'imposer une surface modélisée par ailleurs.
- Réseau de failles pouvant être différents selon les formations géologiques.
- Délimitation de la zone modélisée par un polygone.
- Prise en compte de limites d'extension maximale des formations.
- Prise en compte de grilles lâches permettant d'accélérer les calculs.
- Méthodes d'interpolation géostatistiques (krigeage) ou conventionnelles.
- Possibilité de numériser des points de contrainte afin de bien affiner le modèle.
- Sauvegarde et réutilisation des paramètres de construction du modèle.

GRAPHIQUES

Génération de graphiques automatiques:

- Cartes de localisation
- Cartes isophaques
- Cartes isohypses
- Coupes (rectilignes ou brisées)
- Vues 3D

Tous les graphiques peuvent être conservés et exploités dans GDM.

Ils sont mis à jour automatiquement si le modèle est actualisé.

Les graphiques utilisent les couleurs des formations définies dans la pile stratigraphique.

CONTROLES DE COHERENCE

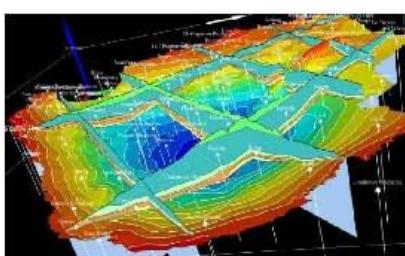
Nombreux outils de contrôle de cohérence des données :

- Sondages versus MNT
- Sondages vs Carte géologique vs Limites d'extension maximale des formations
- Cohérence entre données proches
- Recherche de doublons
- Comparaison des données à un modèle existant
- Analyses statistiques et géostatistiques : histogramme, variogramme, validation croisée
- Contrôle des contraintes d'inégalités lors de la construction du modèle et outil de gestion/correction de ces contraintes

Ces outils de contrôle produisent des graphiques et/ou des compte rendus pouvant être exploités facilement dans GDM, Excel, ...

EXPLOITATION DU MODELE

- Export automatisé du modèle vers des formats standards (ESRI Ascii Grid, CSV, Texte) avec gestion du nombre de décimales
- Calcul de volumes
- Calcul de sondages prévisionnels



- Disponible pour Windows 7 ou 8 en version monoposte ou réseau
- Interface avec menus contextuels et barres d'outils, sur une structure de projet
- Interface Documents Multiples (MDI)
- Technologie .Net, 32/64 bits

brgm

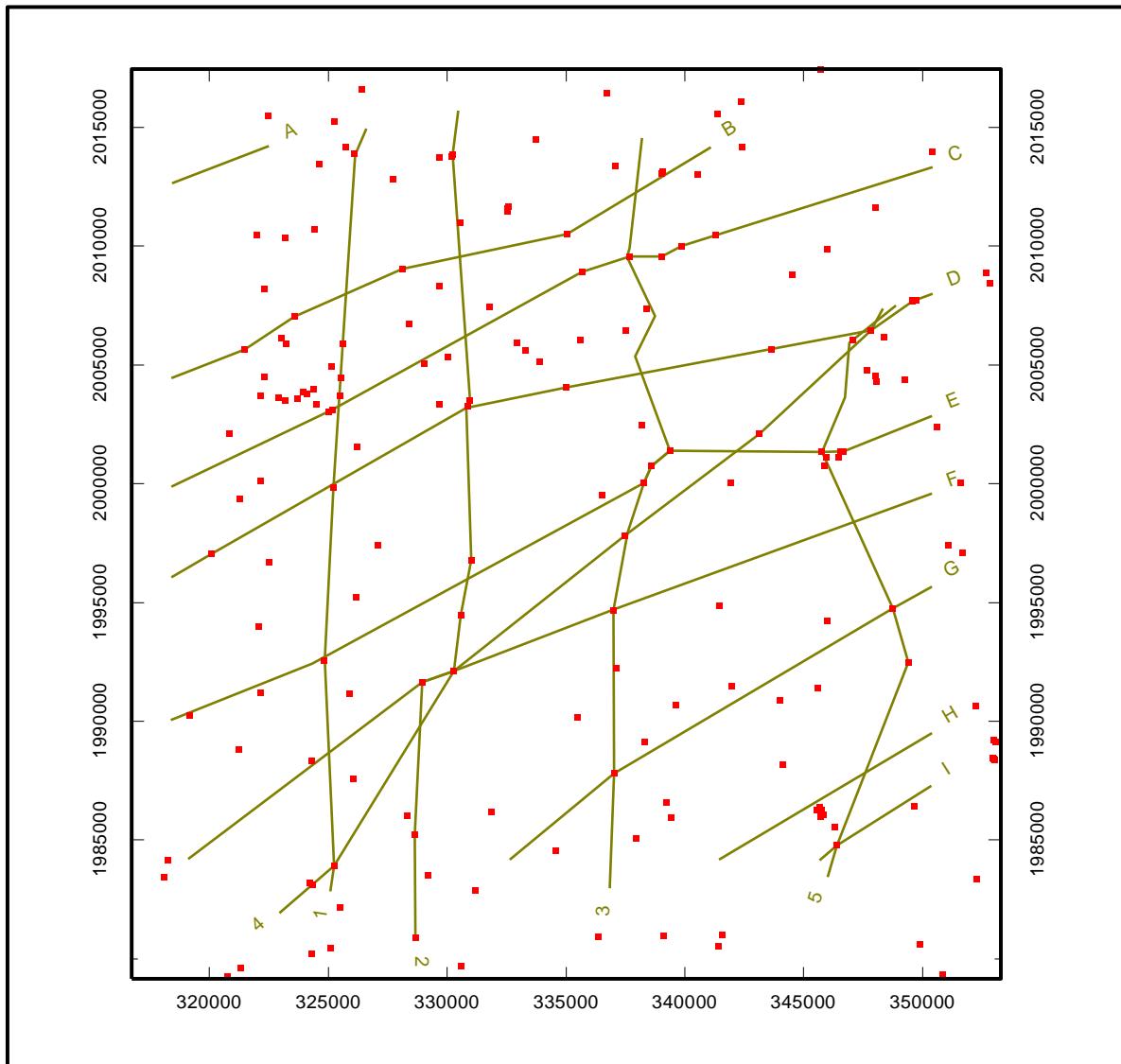
Direction des Systèmes d'information
Tél : 02 38 64 30 14 - Fax : 02 38 64 39 70
Mèl : adm@brgm.fr
Web : <http://gdm.brgm.fr>

© BRGM Copyright 1987-2014
Ce document a été conçu dans un but informatif et n'a pas de valeur contractuelle
GDM est une marque déposée du BRGM
Toutes les marques citées sont déposées par leurs sociétés respectives

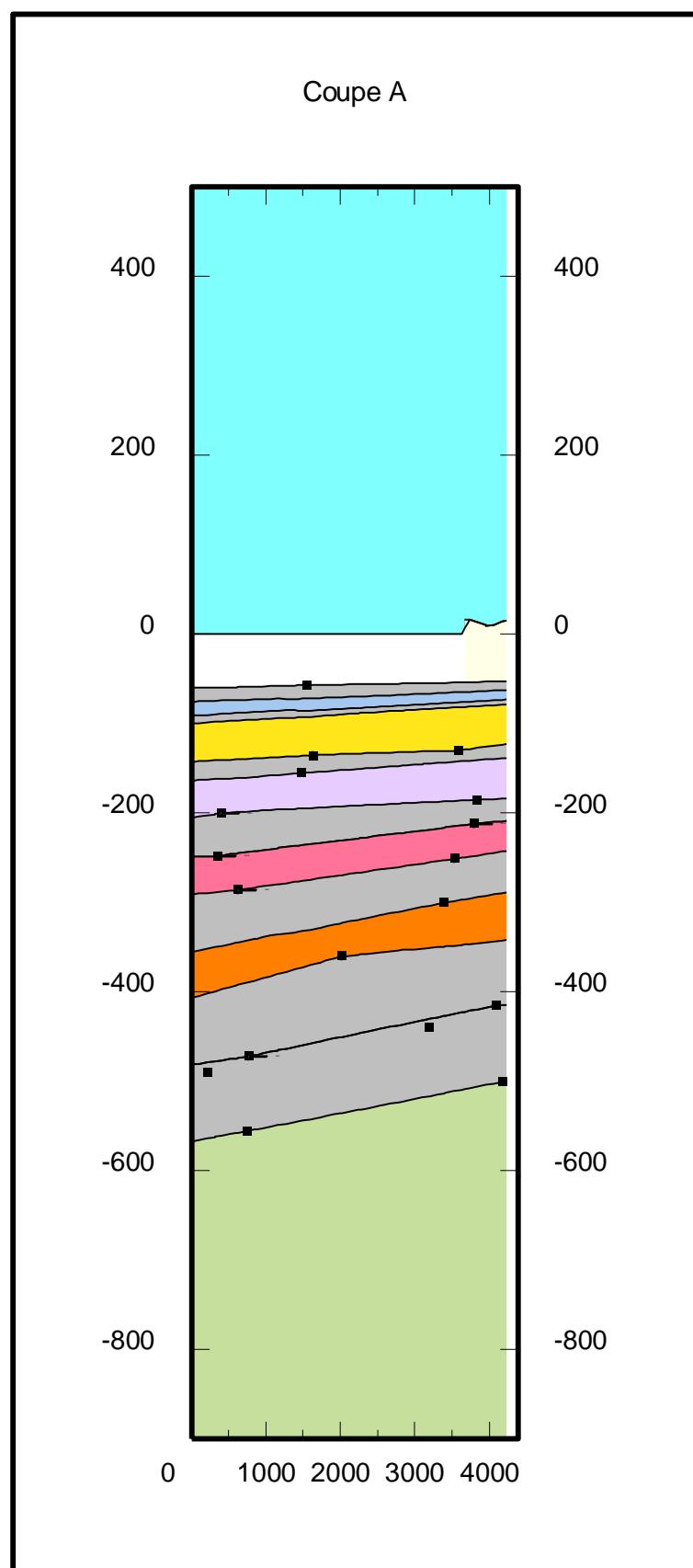
© brgm - octobre 2014

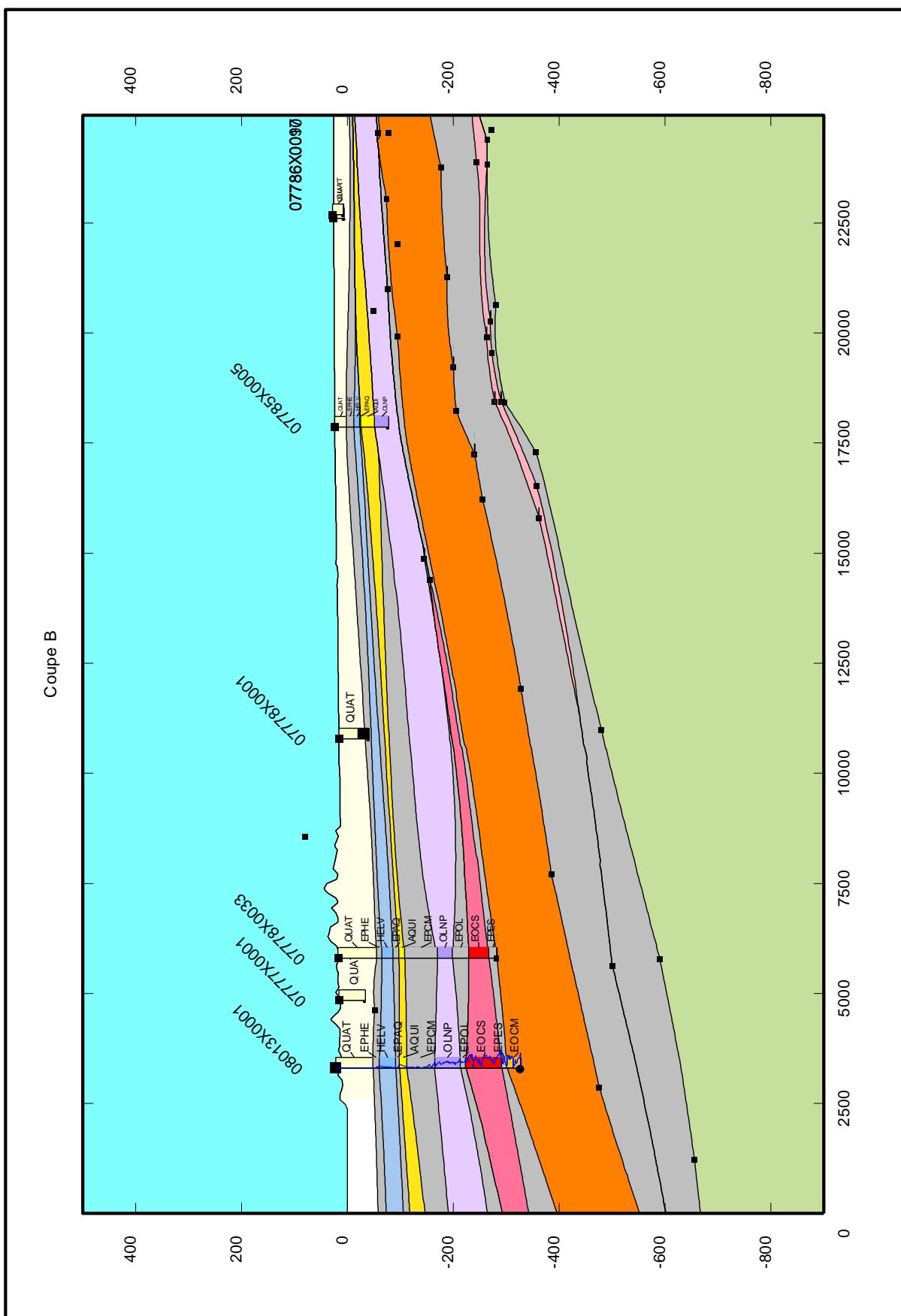
Annexe 2

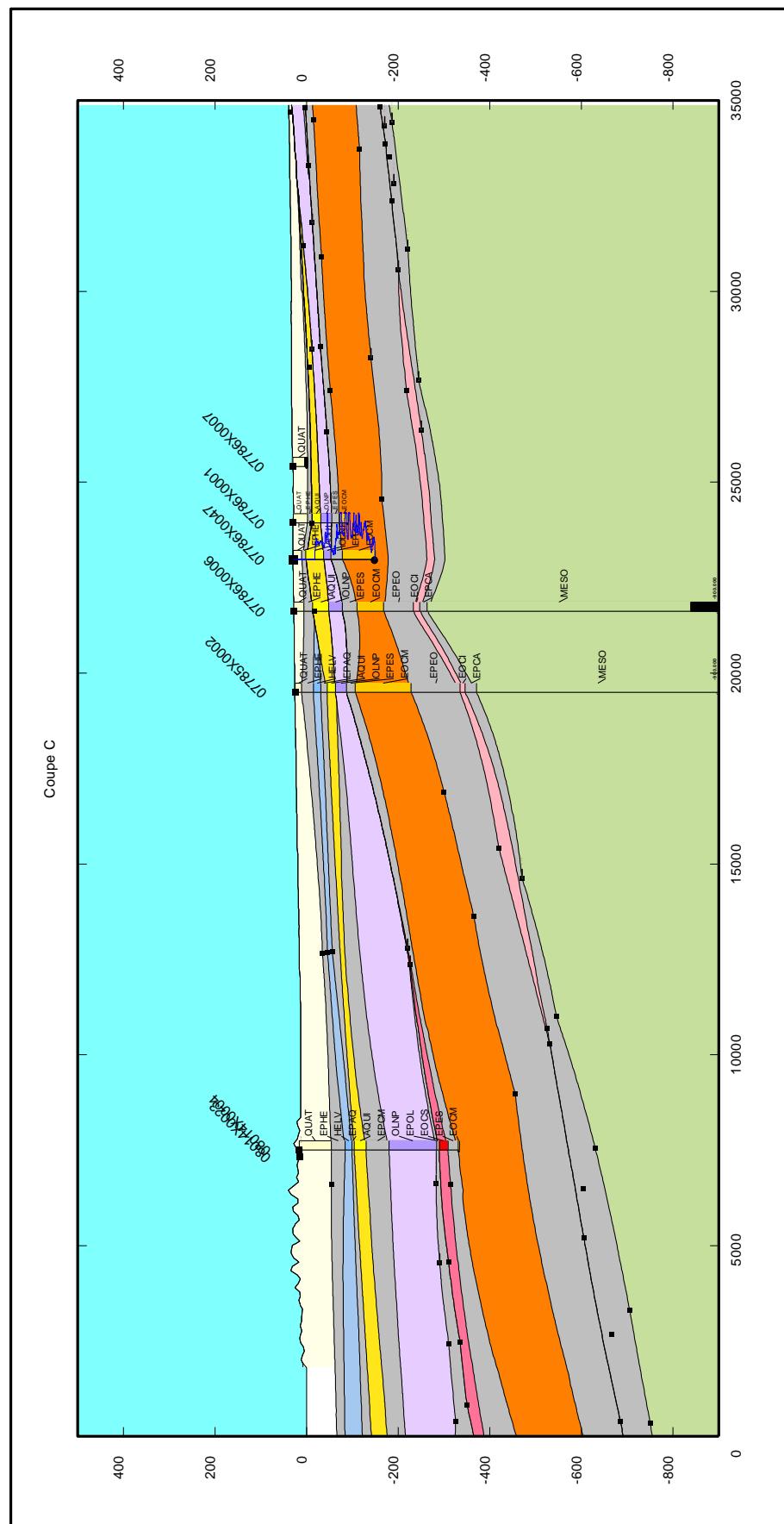
Coupes dans la géométrie du modèle géologique numérique (GDM)

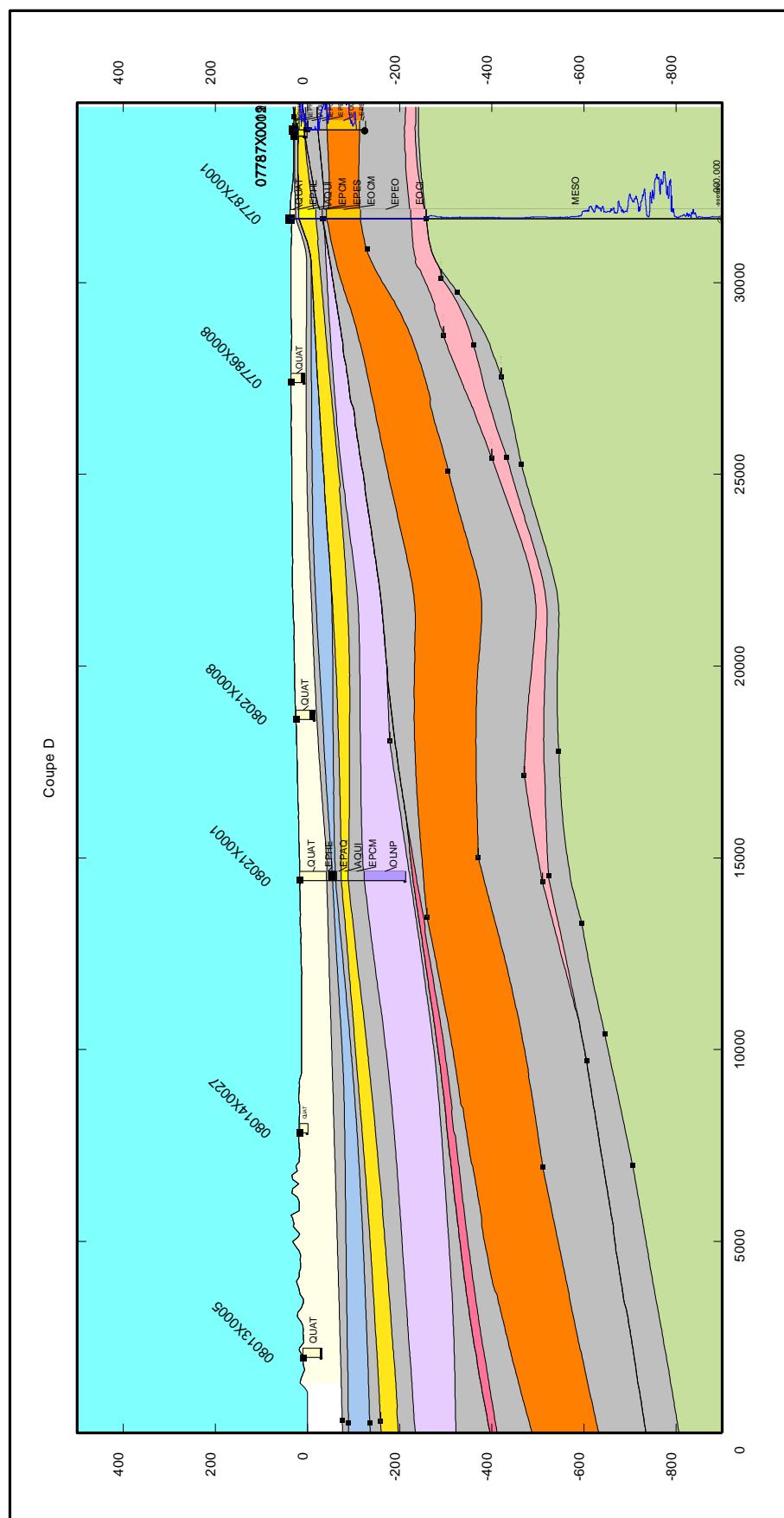


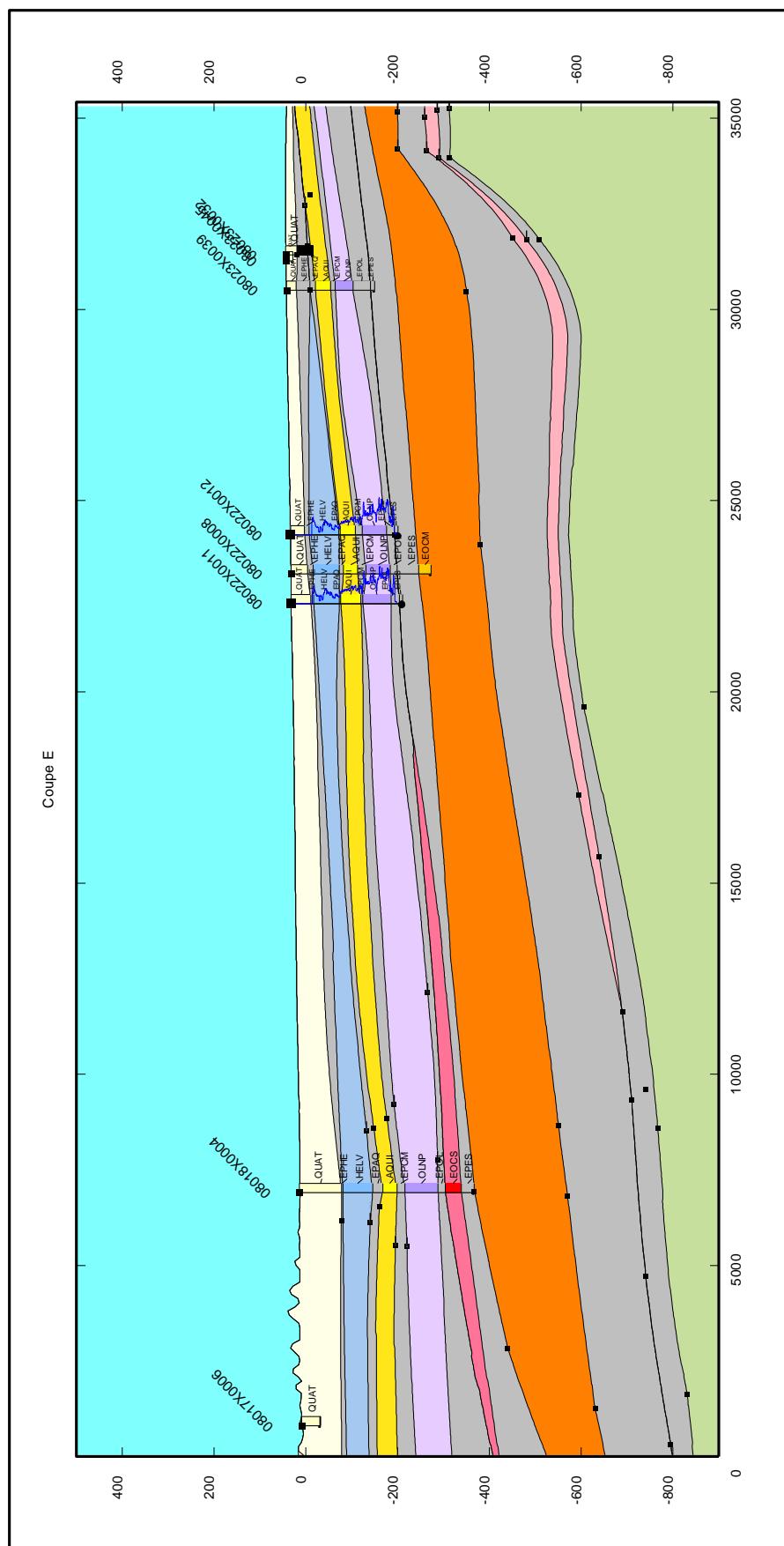
1 Coupes réalisées dans le modèle
Ouvrages (utilisés pour la construction du modèle)

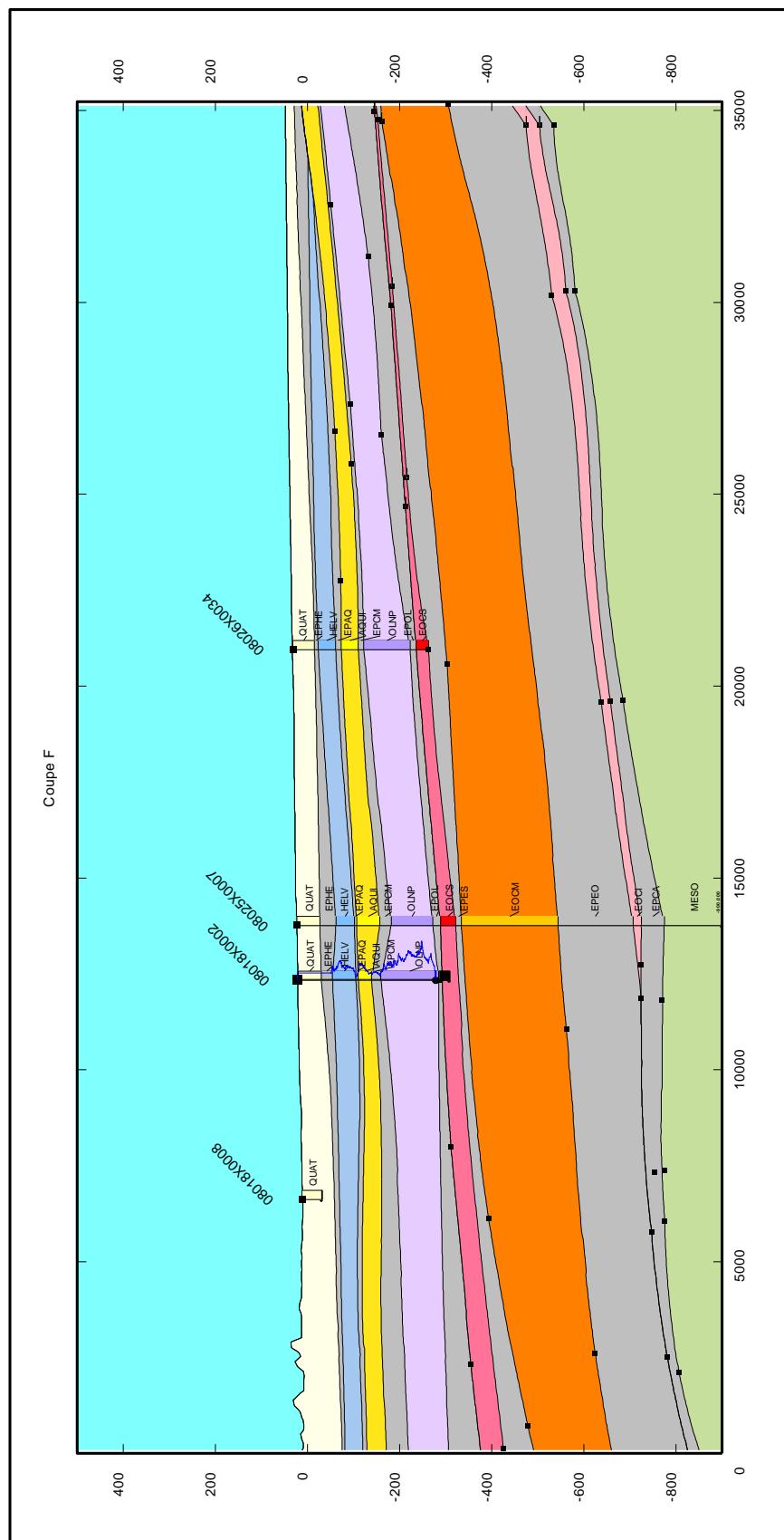


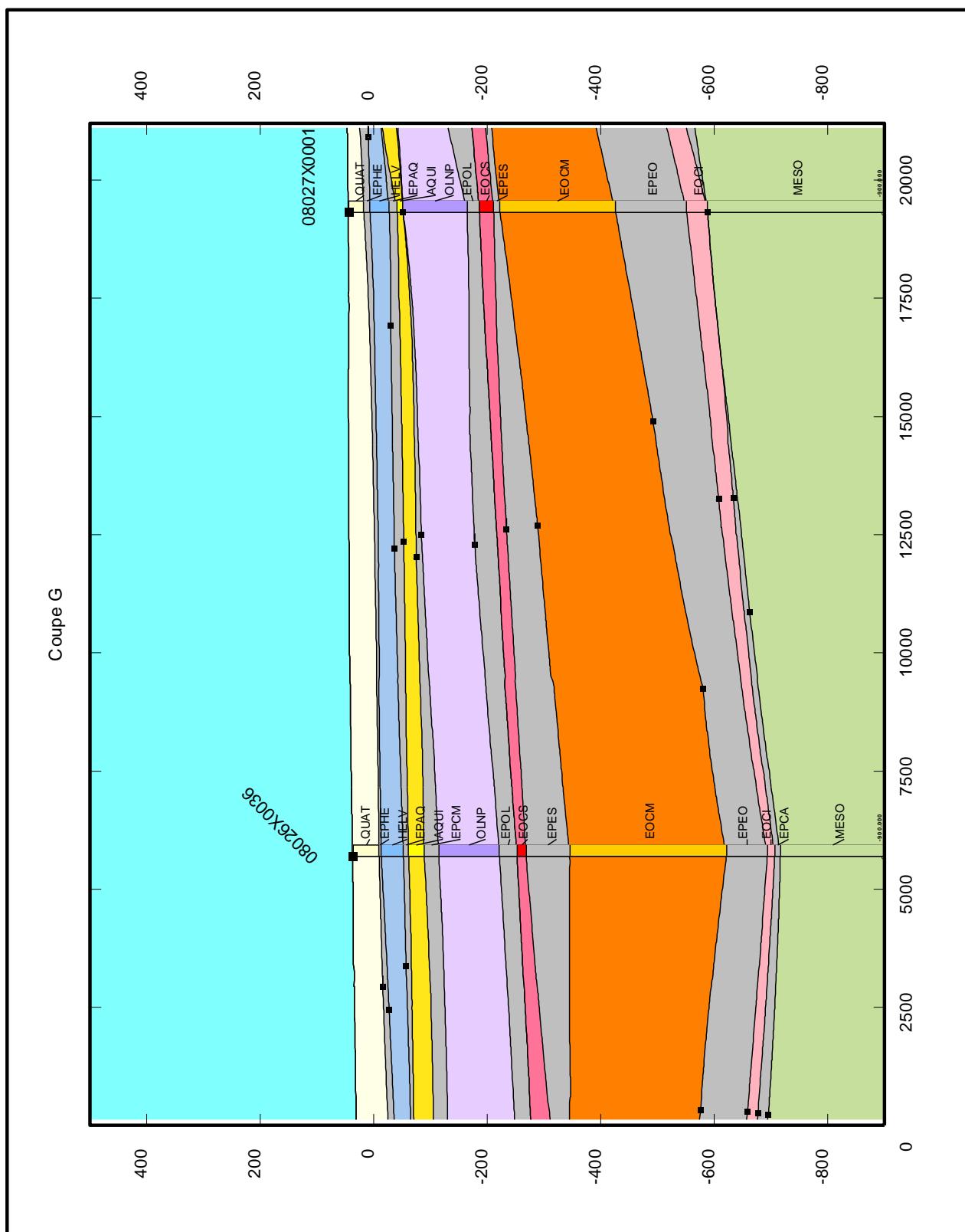


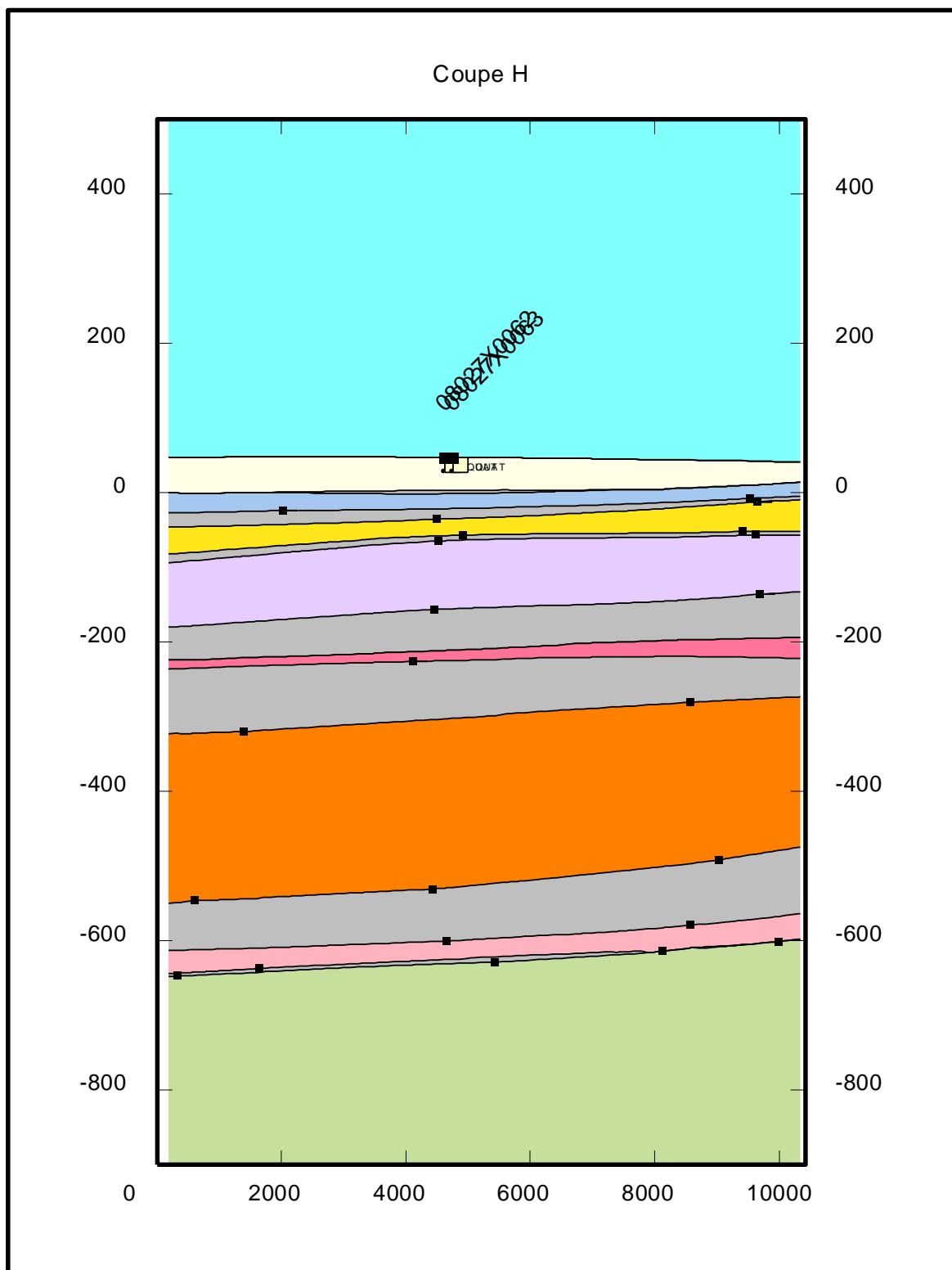


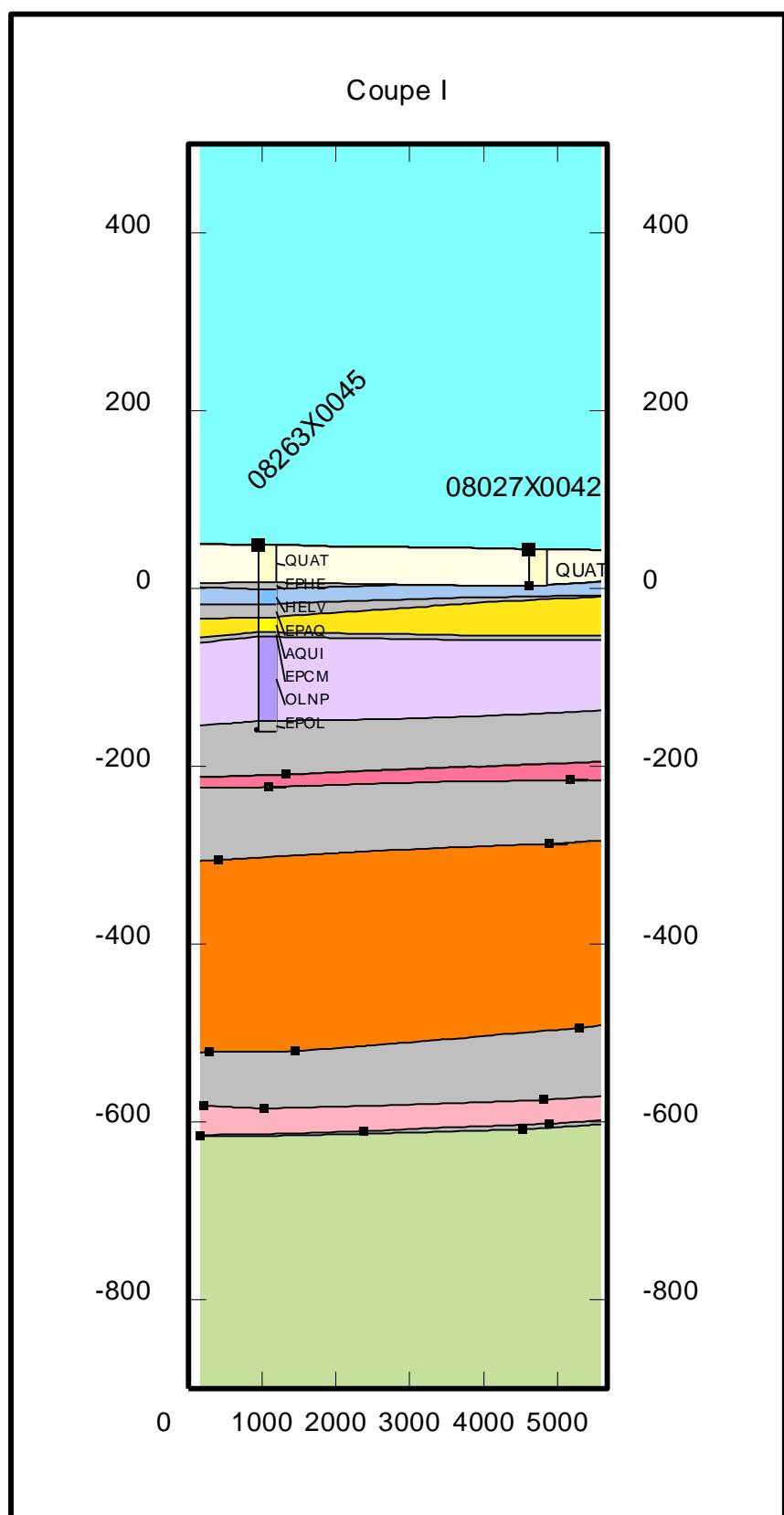


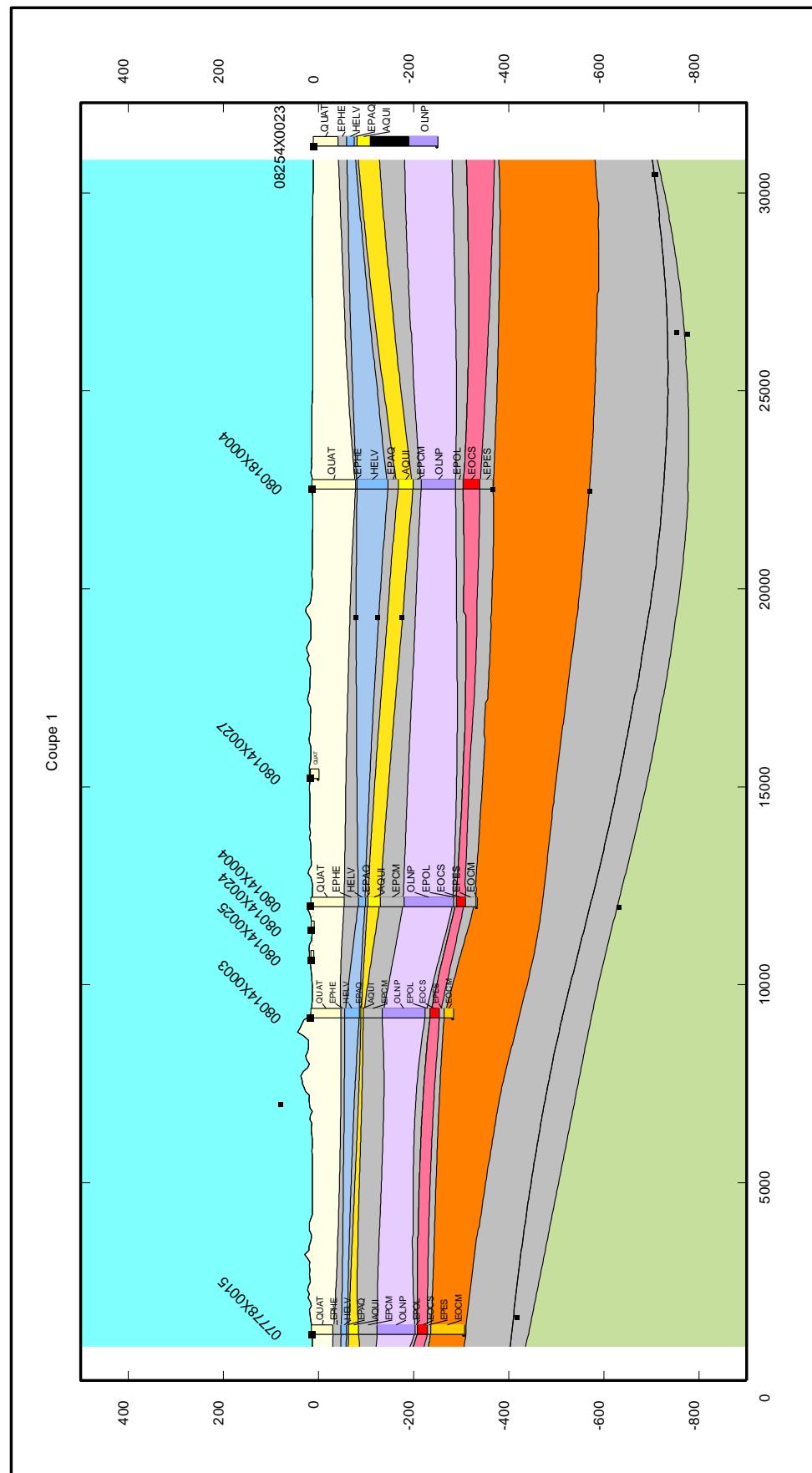


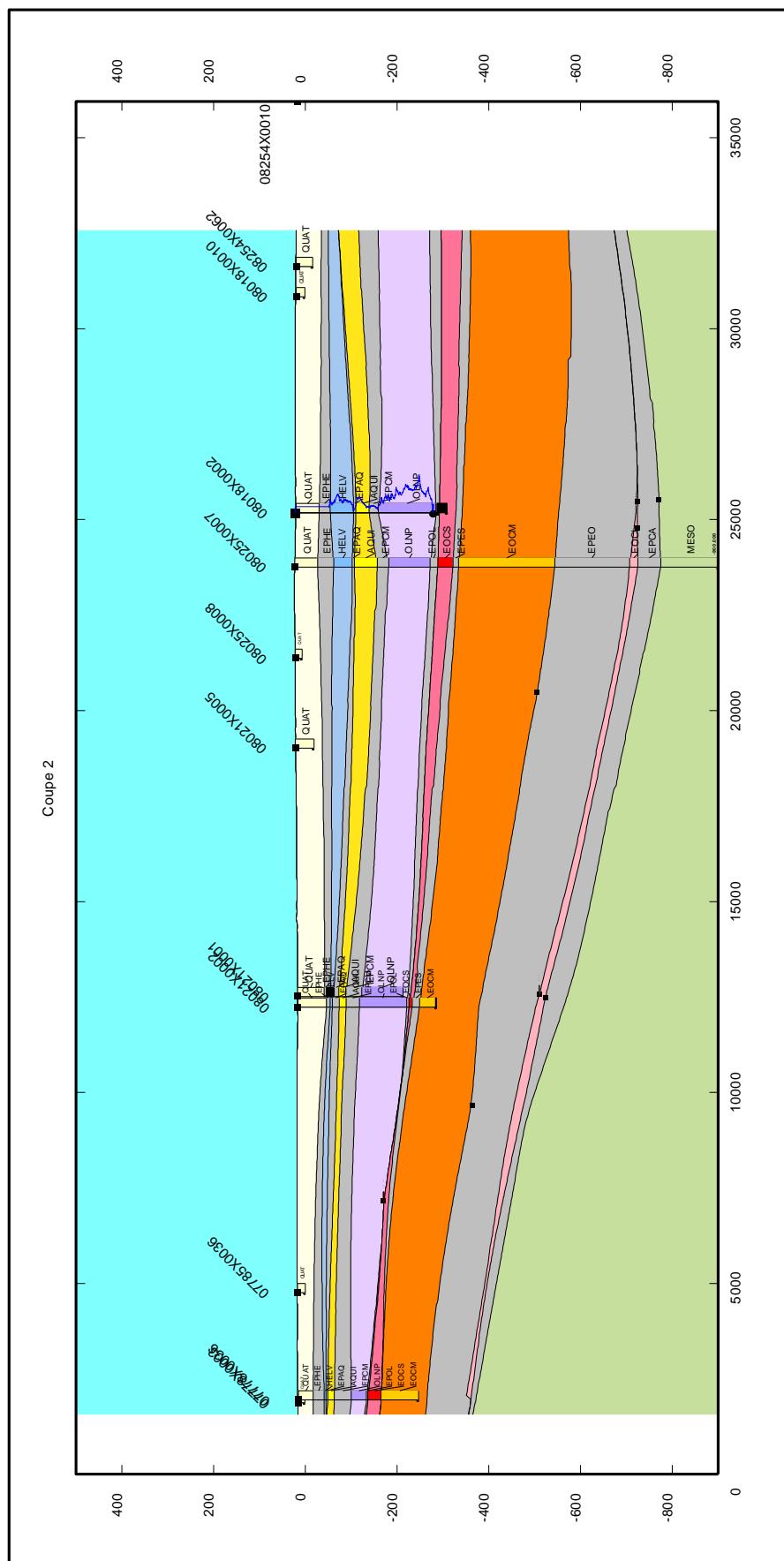


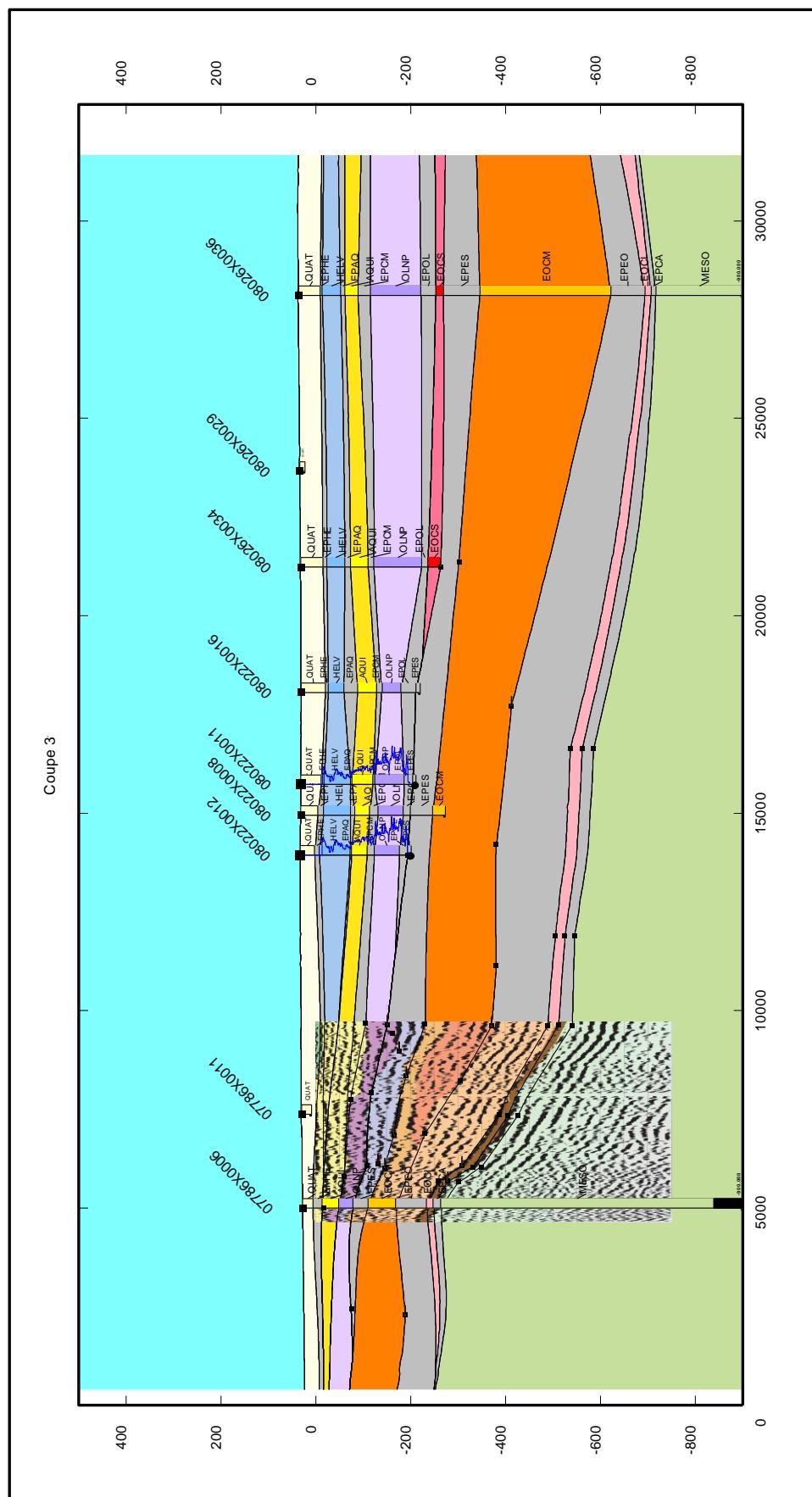


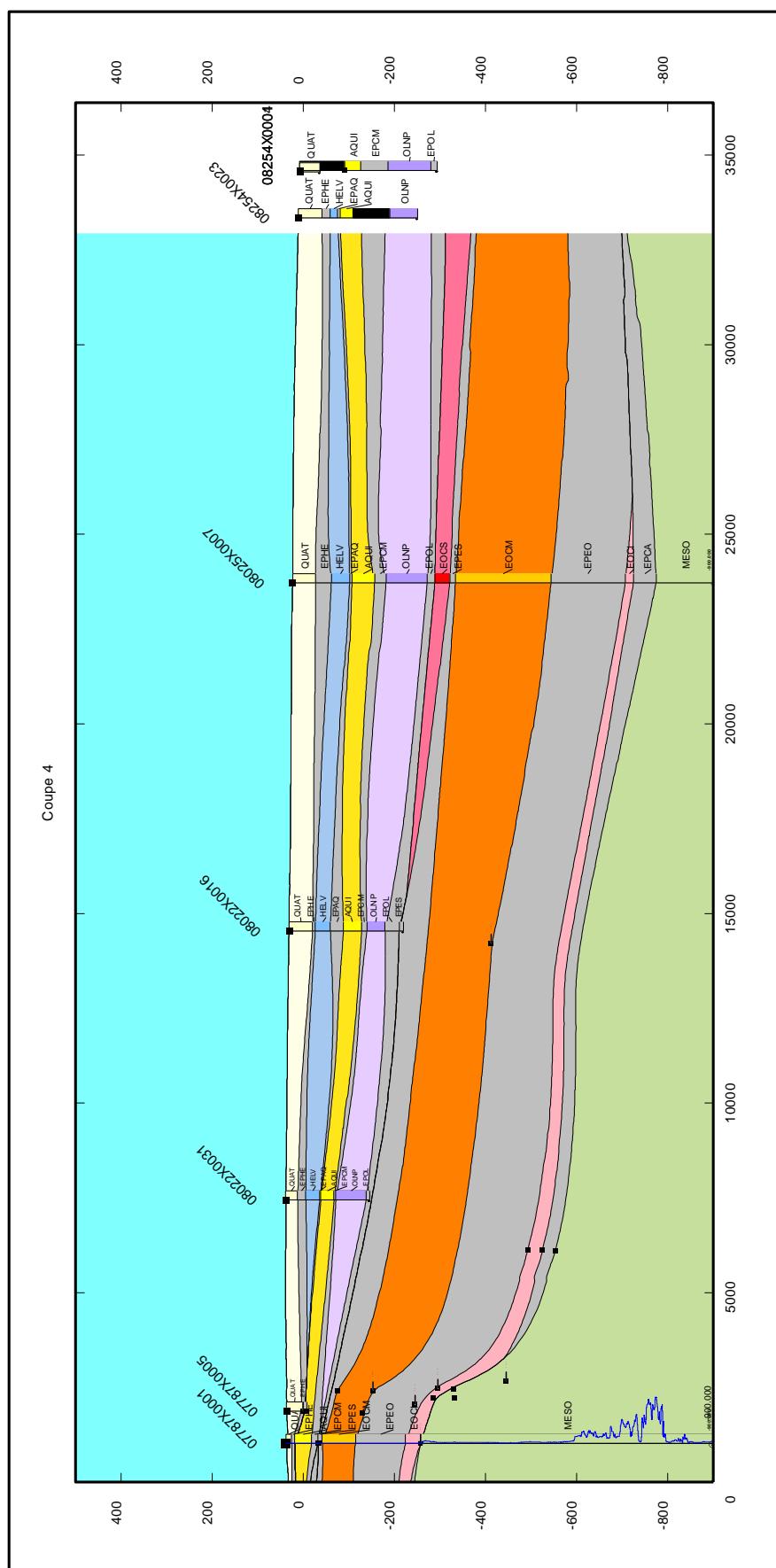


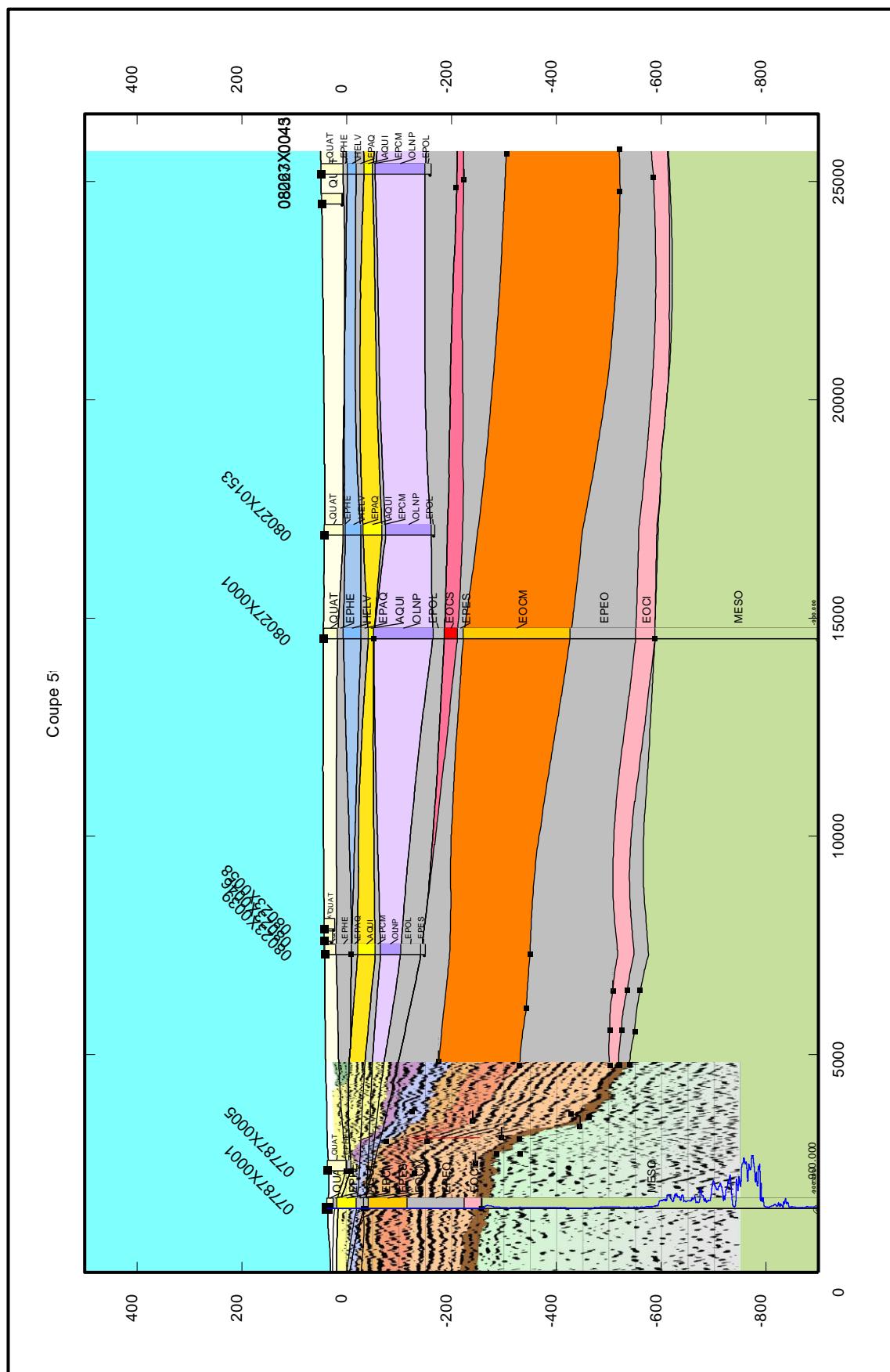












Annexe 3

Le logiciel Marthe

M A R T H E

MODÉLISATION D'AQUIFÈRES AVEC MAILLAGE RECTANGULAIRE, TRANSPORT ET HYDRODYNAMIQUE

DOMAINE D'APPLICATION

Conçu et réalisé au groupe BRGM pour la **modélisation hydrodynamique et hydrodispersive des écoulements souterrains en milieu poreux**, le code de calcul MARTHE est destiné à modéliser les problèmes d'écoulement rencontrés dans des contextes variés :

- Gestion des ressources aquifères :
 - Évaluation des termes du bilan hydraulique d'un système aquifère : recharge par infiltration pluviale, apports latéraux par les bassins versants, circulations souterraines et flux associés, fluctuations annuelles, stockages-déstockages saisonniers ...
 - Impacts hydrodynamiques d'aménagements existants ou à créer : pompages, irrigation, drainage, gravières, bassins d'infiltration ...
 - Gestion et optimisation de champs captants.
 - Étude de l'influence de la variabilité climatique et des effets prévus du changement climatique.
- Génie civil :
 - Assèchement de fouilles.
 - Effets hydrauliques de parois étanches.
 - Travaux souterrains (métros, parking, tunnels, ...).
- Environnement :
 - Infiltration d'un polluant en zone non saturée, percolation jusqu'à la nappe, puis migration souterraine.
 - Simulation du panache de pollution s'échappant d'une zone contaminée : trajectoires, vitesses de déplacement, concentrations atteintes à l'aval. Modélisation de scénarios hydrauliques de confinement ou de décontamination.
 - Impacts de décharges domestiques et industrielles sur les eaux souterraines.
 - Étude du confinement de stockages souterrains.
- Exploitation minière :
 - Calcul de débits d'exhaures miniers et des rabattements associés.

REFERENCES

Au cours des 20 dernières années, MARTHE a été utilisé pour modéliser plus de 250 contextes aquifères répartis dans une vingtaine de pays, sur des financements français, nationaux et internationaux.

Manuels d'utilisation :	Ordinateurs :
Rapports BRGM : R 32210, R 37762, R 38018, R 38085, R 38149	Micro-ordinateurs PC sous Windows (Également environnement LINUX)
Langage de programmation :	Langues :
Fortran 95 Pré-post processeurs : C++	Français, Anglais

M A R T H E

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

MARTHE permet de simuler de nombreux types d'écoulement en milieu poreux, en zones saturées et non saturées, en milieux monophasiques et diphasiques. Plusieurs niveaux d'utilisation sont distingués :

- **Hydrodynamique classique :**

- Maillages 2D (en plan, en coupe verticale, en coordonnées cylindriques) ou 3D.
- Aquifères monocouches ou multicouches (empilement d'aquifères séparés par des épontes semi-perméables).
- Nappes libres, captives ou semi-captives en régime hydraulique permanent ou transitoire.
- Prise en compte de discontinuités telles que plans d'eau à surface libre (lacs, gravières), assèchements locaux de nappe (et remise en eau), y compris en aquifères multicouches, débordements de nappe (cours d'eau, sources, drains), parois étanches (palplanches, ...).
- Limitation automatique du débit des pompages en fonction du dénoiement des crépines
- Couplage total avec les réseaux hydrographiques.
- Bilan hydro-climatique couplé.
- Anisotropies horizontale et verticale des perméabilités.
- Calcul de trajectoires (directes et inverses) en régime hydraulique permanent ou transitoire.

- **Transport hydrodispersif :**

- Migration hydro-dispersive d'un effluent dans la nappe et la zone non saturée.

- **Zone Non Saturée, Densité, Température :**

- Traitement continu de la zone saturée et de la zone non saturée.
- Transferts d'énergie.
- Effets densitaires induits par des salinités et/ou des températures hétérogènes.
- Variation de viscosité avec la température.

- **Calage automatique, Optimisation :**

- Calage automatique du modèle, selon des zones homogènes ou maille par maille.
- Analyse de sensibilité aux paramètres de calage.

- **Utilisations spéciales :**

- Fractures verticales par transmissivités équivalentes ; Réseaux de galeries.
- Transport avec interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice poreuse.
- Écoulements diphasiques : eau douce et eau salée, eau et air, eau et "huile".
- Écoulements de gaz.
- Prise en compte du développement de la végétation.

- **Maillages :**

Le domaine à modéliser est discrétré selon un maillage rectangulaire de type "écossais" : chaque ligne et chaque colonne de mailles a une largeur constante, mais l'utilisateur est libre d'adapter la largeur de chacune de ces lignes et colonnes en fonction des hétérogénéités locales, de la densité des informations disponibles, et de la précision recherchée.

Il est possible d'affiner localement le maillage par des sous-maillages emboîtés (gigognes).

Selon les configurations, il est possible de gérer des maillages de plus de 2 millions de mailles sur un ordinateur PC de 32 bits (1.5 millions de mailles avec transport).

M A R T H E

Les données des maillages peuvent être définies maille par maille, ou bien par zones, par couches ou globalement pour tout le maillage.

• **Représentations graphiques :**

Les mailles du modèle sont automatiquement associées à des coordonnées géographiques, ce qui permet de superposer les données initiales et les résultats des simulations à des fonds cartographiques préalablement digitalisés.

Les résultats de modélisation sont édités dans des fichiers texte. Ils peuvent être édités et représentés graphiquement : Post-processeur WinMarthe, Model3D, exportations Mapinfo ®, VRML, VTK, Paraview ®.

Les débits calculés (débits aux potentiels imposés, débits résiduels de convergence) peuvent être présentés maille par maille, ou bien par zones, par couches, ou encore pour tout le modèle.

• **Contrôle de la convergence des calculs :**

La convergence des calculs est contrôlée par plusieurs critères : écarts de charge (moyen et maximal entre deux itérations successives) et débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle, et ponctuel dans chacune des mailles).

SCHÉMAS DE CALCULS

Calcul des écoulements

Les calculs hydrodynamiques sont effectués selon une méthode aux volumes finis (Différences Finies Intégrées). Plusieurs algorithmes de résolution par gradients conjugués sont proposés (gradients conjugués avec pré-conditionnement de Choleski, méthode Eisenstat).

Calcul du transport

Selon le type de problème posé (dominance de la convection ou de la dispersion), l'utilisateur peut choisir entre trois techniques de calcul pour optimiser le schéma de transport mis en oeuvre :

- méthode TVD (Total Variation Diminishing) à limiteur de flux ;
- volumes finis ;
- méthode des caractéristiques (MOC) utilisant des particules ;
- méthode des déplacements aléatoires (Random Walk), dite aussi méthode des particules ;

Le transport en nappe est simulé sous ses composantes convective, diffusive et dispersive. Plusieurs options sont proposées pour le transport réactif :

- décroissance exponentielle de l'effluent en fonction du temps (fonction de la teneur en eau et de la température) ;
- dégradation en chaîne ;
- facteur de retard avec coefficient de partage K_d (phénomènes d'adsorption-désorption) ;
- prise en compte de la double porosité (avec cinétique ou en équilibre) ;
- isothermes de Freundlich ou de Langmuir.

Interactions géochimiques

MARTHE a été couplé avec deux solveurs géochimiques : Le module hydrogéochimique REACT du code de calcul TOUGHREACT (Lawrence Berkeley National Laboratory) et les modules hydrogéochimiques IPHREEQC de l'USGS. Les interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice peuvent être simulées au choix par une de ces versions couplées. [Diffusion restreinte]

M A R T H E

AVANTAGES DE MARTHE PAR RAPPORT À D'AUTRES CODES

MARTHE présente un certain nombre d'avantages par rapport à des codes de calcul de référence.

Avantage	MODFLOW	FEFLOW	TOUGH2
Dialogues, entrées-sorties en français	N	N	N
Couches qui peuvent se biseauter et disparaître, comme les vraies couches géologiques.	N		
Modifications de n'importe quel champ (géométrie, perméabilités, cours d'eaux, conditions aux limites) en cours de calcul, à n'importe quel pas de temps.	N	N	N
Réseau hydrographique (rivières) totalement couplé avec les aquifères.		N*	N
Bilan hydroclimatique (Pluie, ETP, fonte de neige, ruissellement vers les cours d'eau, infiltration).	N	N	N
Maillages gigognes couplés.	N*		
Transferts d'énergie (géothermie) simultané au transport de masse et de salinité : permet la prise en compte de la température sur la densité et la salinité.	N		
Transport de masse et d'énergie totalement couplé, dans un même exécutable ce qui évite des fichiers très volumineux et permet une bonne efficacité.	N		
Transferts d'énergie avec une solution analytique (Vinsome) dans les épontes : ce qui réduit considérablement le nombre de mailles.	N	N	
Vraie modélisation du continuum Zone Non Saturée – Zone Saturée (Loi de Richards).	N		
Modélisations en « nappe libre » par utilisation de charge hydraulique, de cotes de débordement.			N
En nappe libre : assèchement (dénouement de mailles), et re-saturation ultérieure sans aucun problème.	N*		
Limitation des débits de pompages par rapport aux dénoiements et altitudes de crépines.	N	N	N
Calcul des charges au puits en fonction du diamètre de l'ouvrage par rapport à la dimension de la maille.	N	N	N
Transport avec dispersion (dispersivités).			N
Transport par schéma TVD et MOC.		N	N
Bilan de nitrates dans le sol (applications d'engrais, besoins des cultures, minéralisation du sol).	N	N	N
Développement de la végétation et des racines des cultures avec Évapotranspiration fonction du stress.	N	N	N
Réseaux couplé de drains en charge.	N		
Prise en compte de plus d'un million de mailles sur un ordinateur de bureau.			N

« N » = Non disponible à notre connaissance ; * = Disponible dans certaines versions.

La comparaison s'applique à la version standard des codes (ex. MODFLOW de l'USGS), et provient des informations des manuels d'utilisation officiels.

Il convient de remarquer que ces codes de références présentent par ailleurs certains avantages non disponibles dans MARTHE. Par exemple : multiphasique complexe avec changement de phase avec TOUGH2 ou discrétilsation très raffinée avec FEFLOW.

M A R T H E

STRUCTURE DU LOGICIEL

Au module de calcul hydrodynamique et hydrodispersif (MARTHE proprement dit), sont associés des modules de préparation, gestion et représentation graphique des données et des résultats de modélisation ces modules sont centralisés dans l'interface WinMarthe :

WinMarthe

Définition et modification graphique, sous environnement Windows, d'un maillage écossais, en superposition à un fond cartographique digitalisé.

Visualisation des données couche par couche ou en coupe verticale Ouest-Est ou Nord-Sud

Opérations diverses sur les données de maillages :

- opérations algébriques, logiques ou géographiques sur les données d'un maillage,
- combinaisons algébriques, logiques ou géographiques entre les données de plusieurs grilles de données.

Représentation graphique des fichiers de résultats générés par MARTHE :

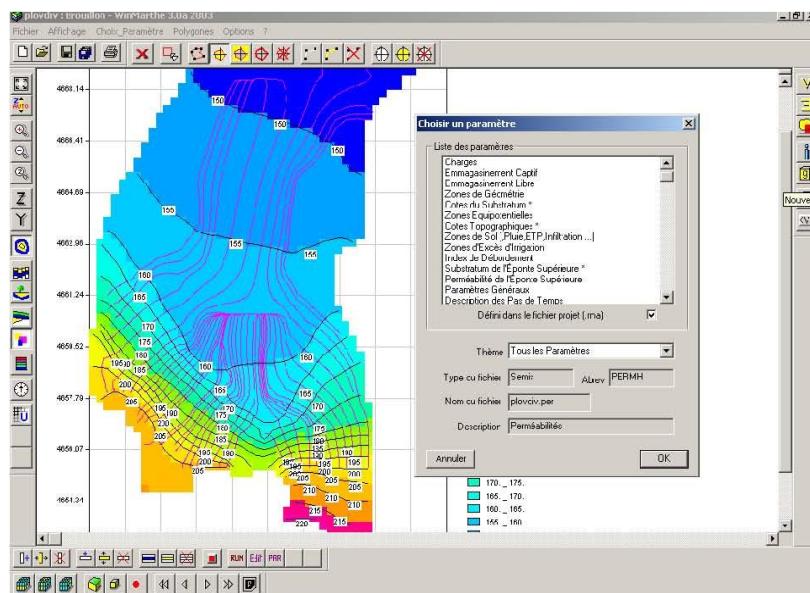
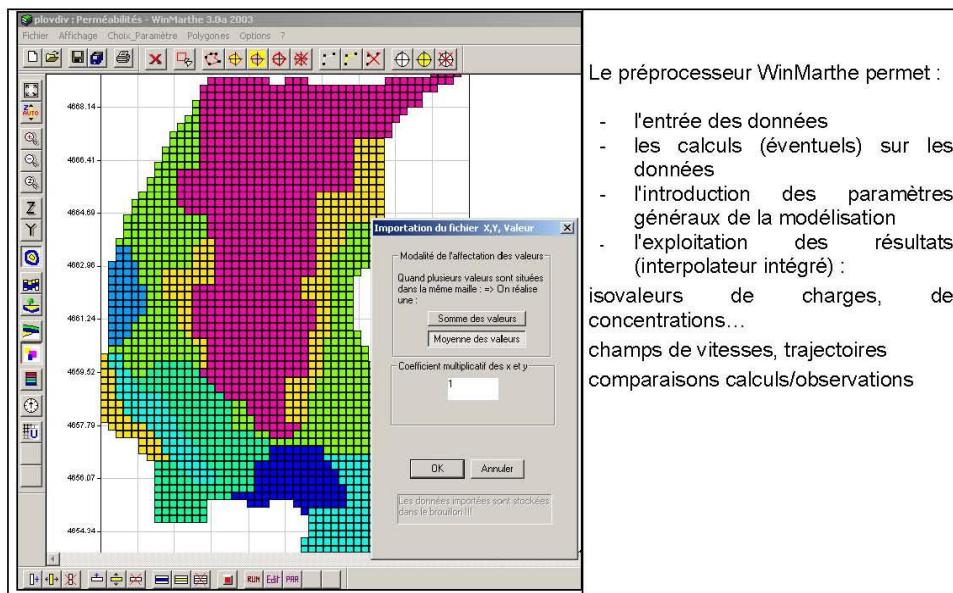
- courbes isovaleurs (piézométrie, rabattements, épaisseurs mouillées, Visualisation 3D, ...)

CONTACTS

Dominique THIERY : BRGM Service EAU
marthe@brgm.fr

M A R T H E

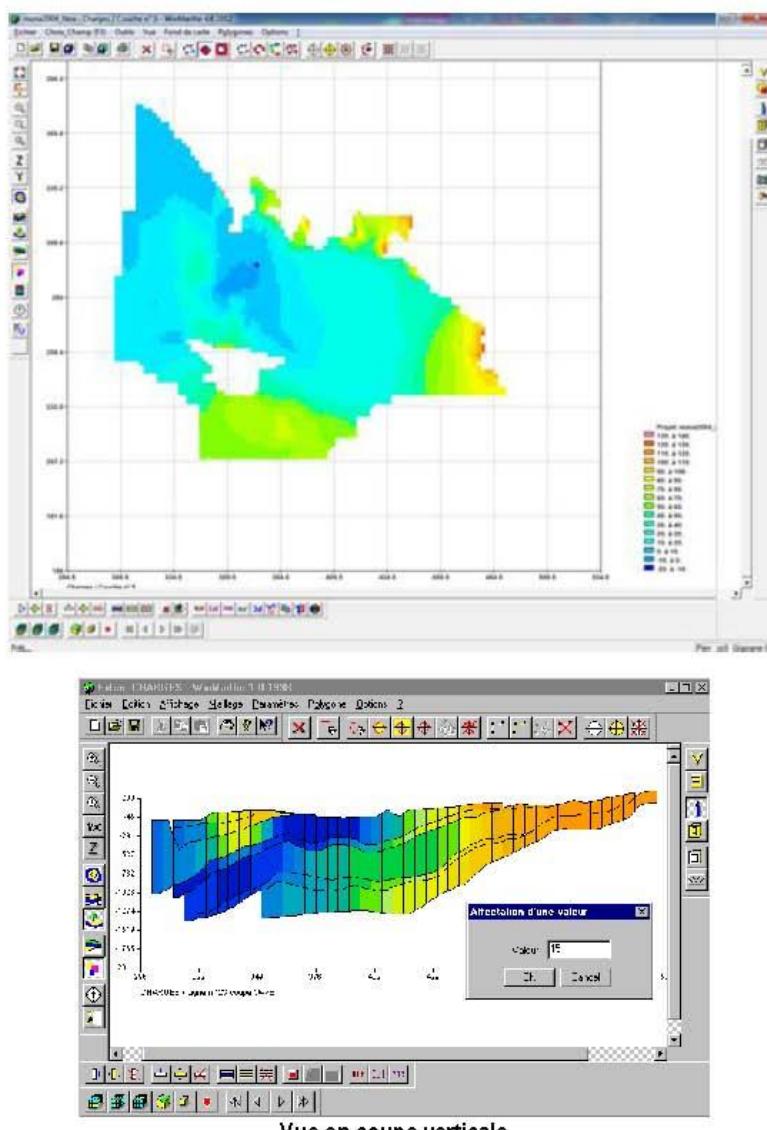
Préparation et visualisation des données avec le préprocesseur WinMarthe



Visualisation de la piézométrie simulée et des trajectoires

M A R T H E

Vue en plan et en coupe verticale avec le préprocesseur WinMarthe
Multicouche aquitain : charges hydrauliques dans l'Éocène



M A R T H E

Préprocesseur WinMarthe : exportation vers MAPINFO ®

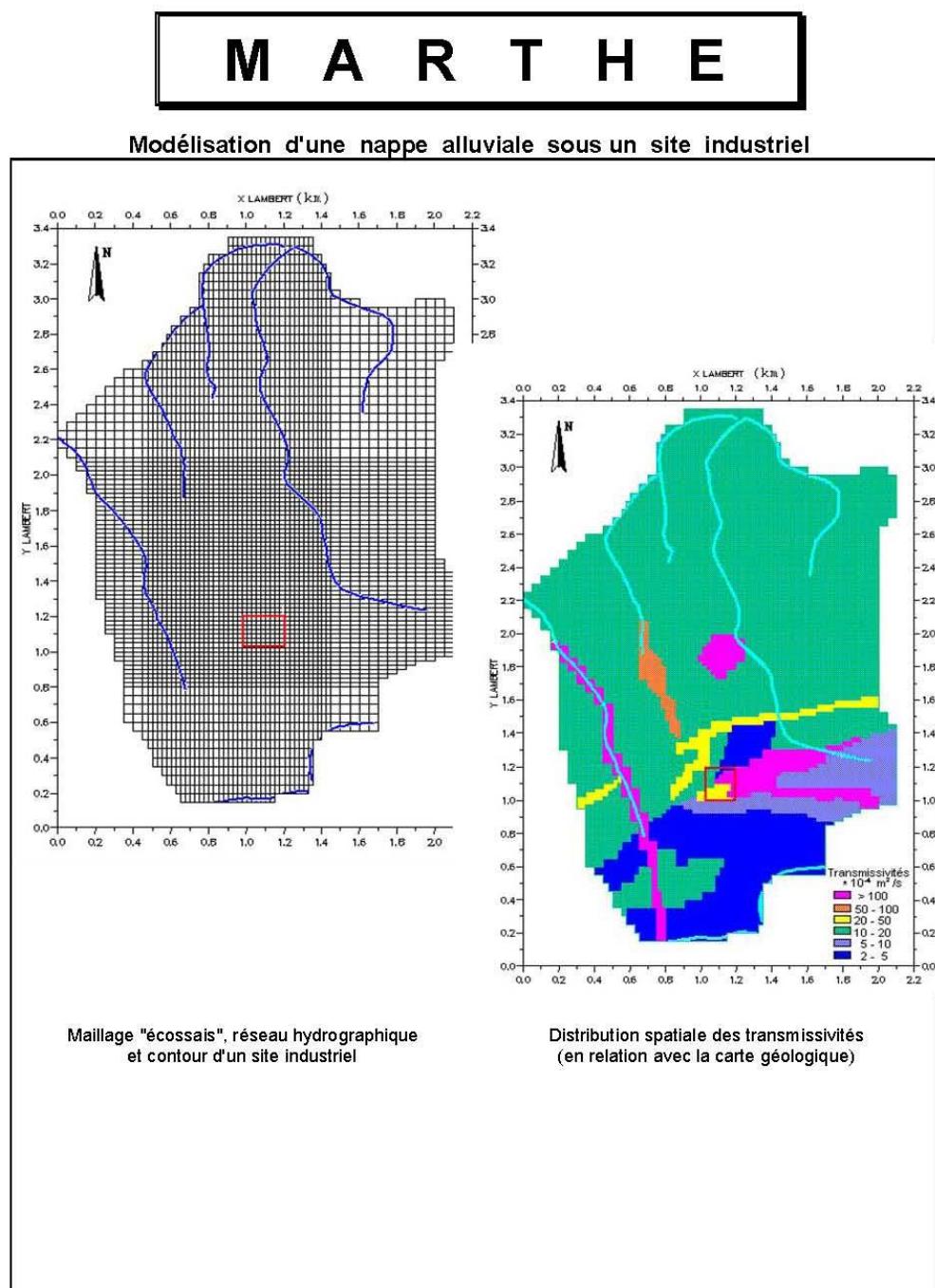
Le préprocesseur WinMarthe permet d'exporter les résultats des calculs vers MAPINFO directement sous forme de grilles, permettant ainsi une analyse thématique directe et la réalisation de cartes de synthèses. Exemple ci-dessous

Utilisation du modèle nord aquitain dans le cadre du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de Gironde

sage
Gironde

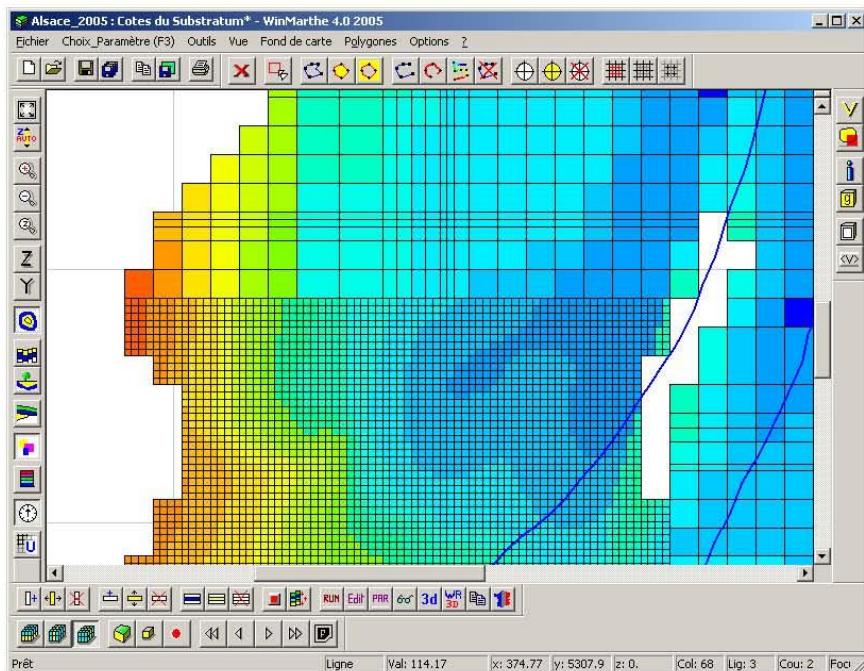
Le scénario "économies et substitutions", définit un état piézométrique considéré comme objectif de gestion devant être atteint en 2015

Résorption de la dépression



M A R T H E

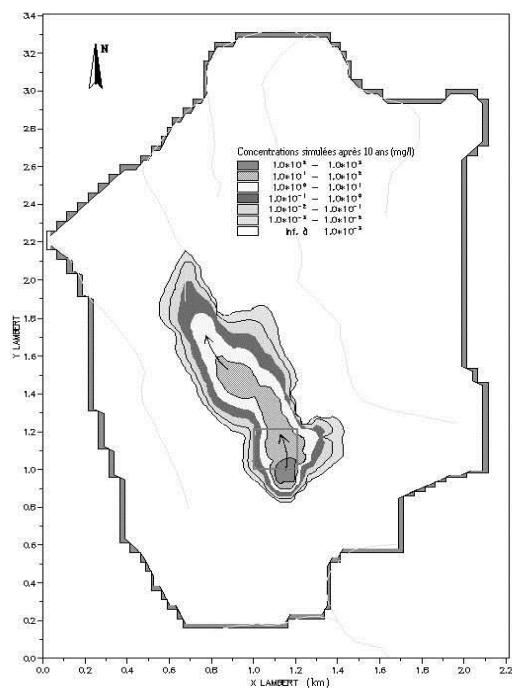
Modélisation avec un maillage irrégulier et un maillage gigogne emboîté



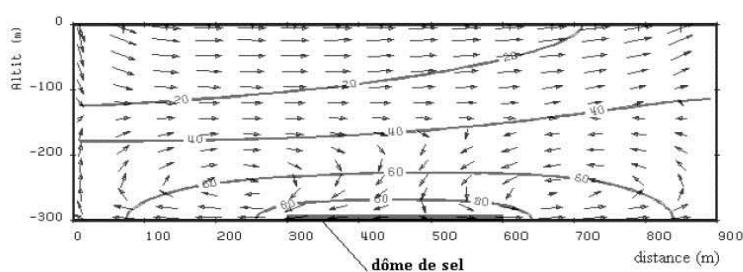
Modélisation en 3D de la plaine d'Alsace avec un maillage "écossais" contenant un maillage gigogne emboîté

M A R T H E

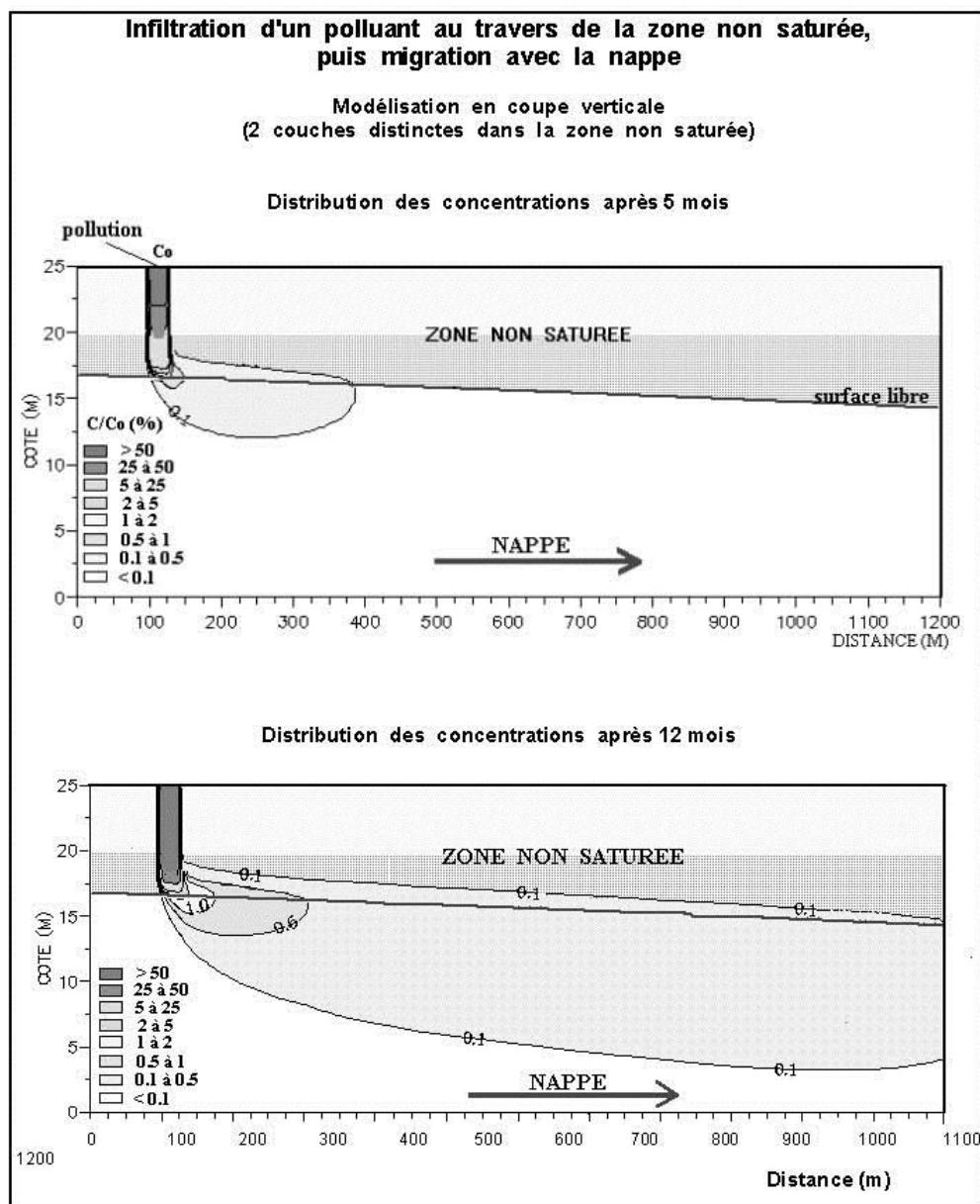
Simulation de la migration d'un panache de pollution

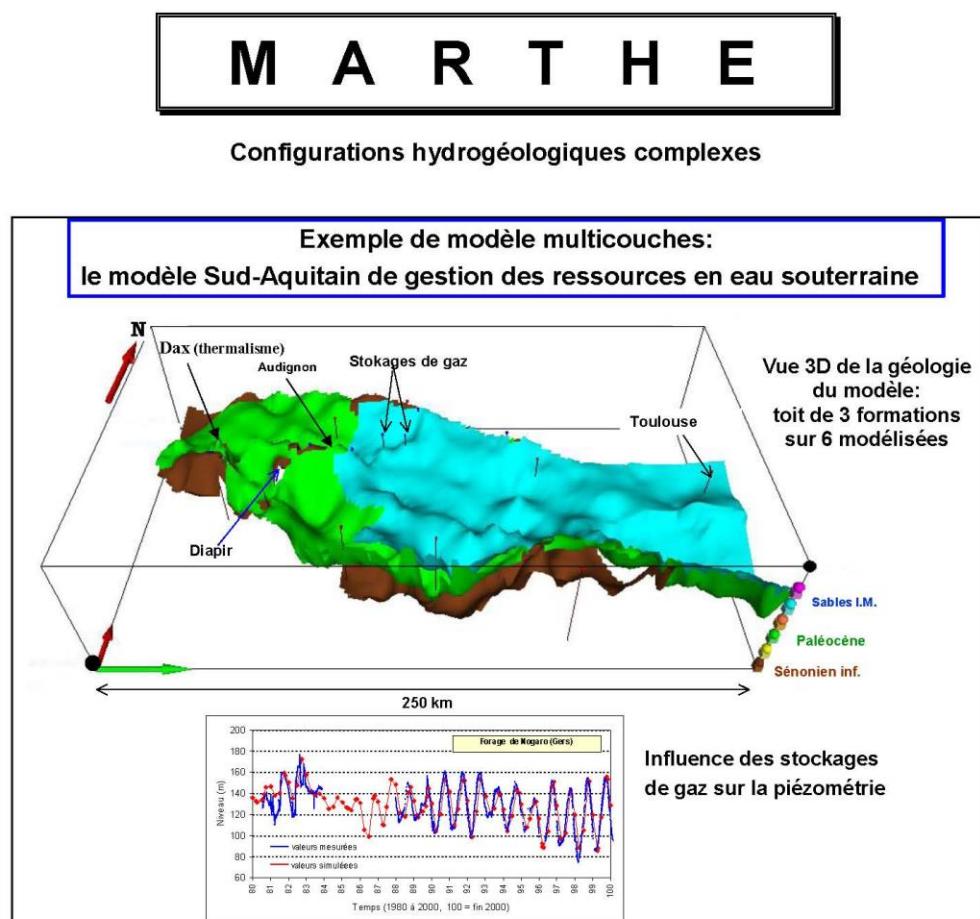


Cellules de convection induites dans une nappe par un dôme de sel
(Champ des vitesses et courbes iso-concentrations en sel - Coupe verticale)



M A R T H E



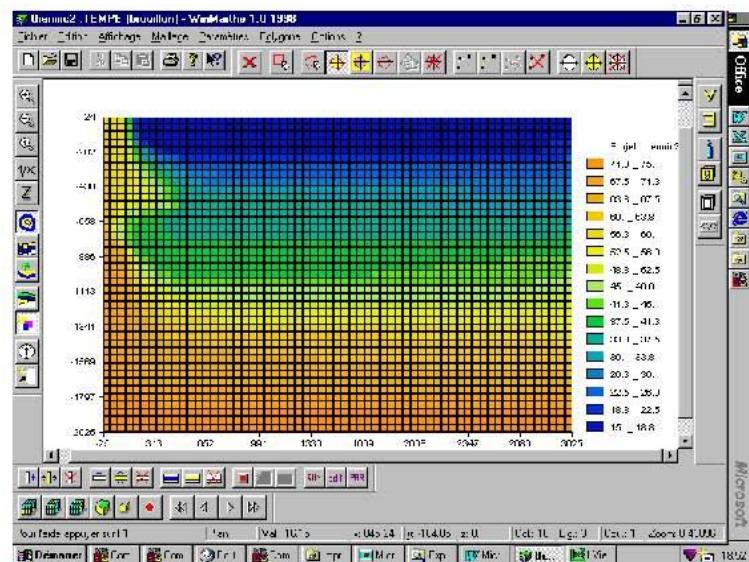
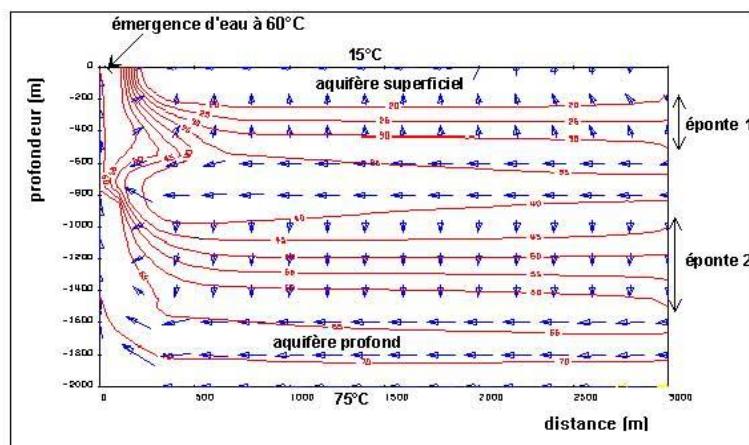


Le logiciel permet de traiter des configurations hydrogéologiques complexes comme des systèmes multicouches d'extension régionale.

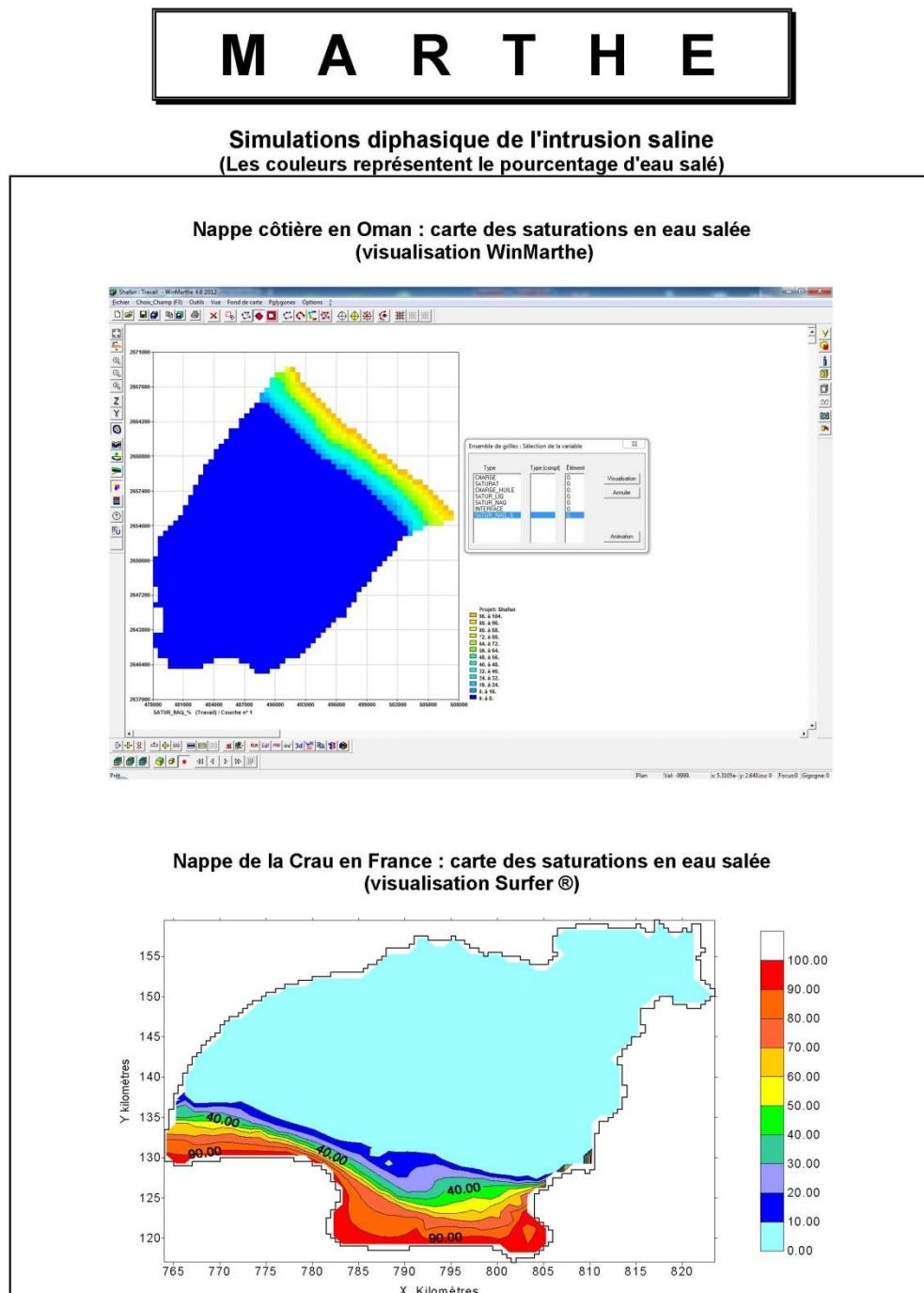
M A R T H E

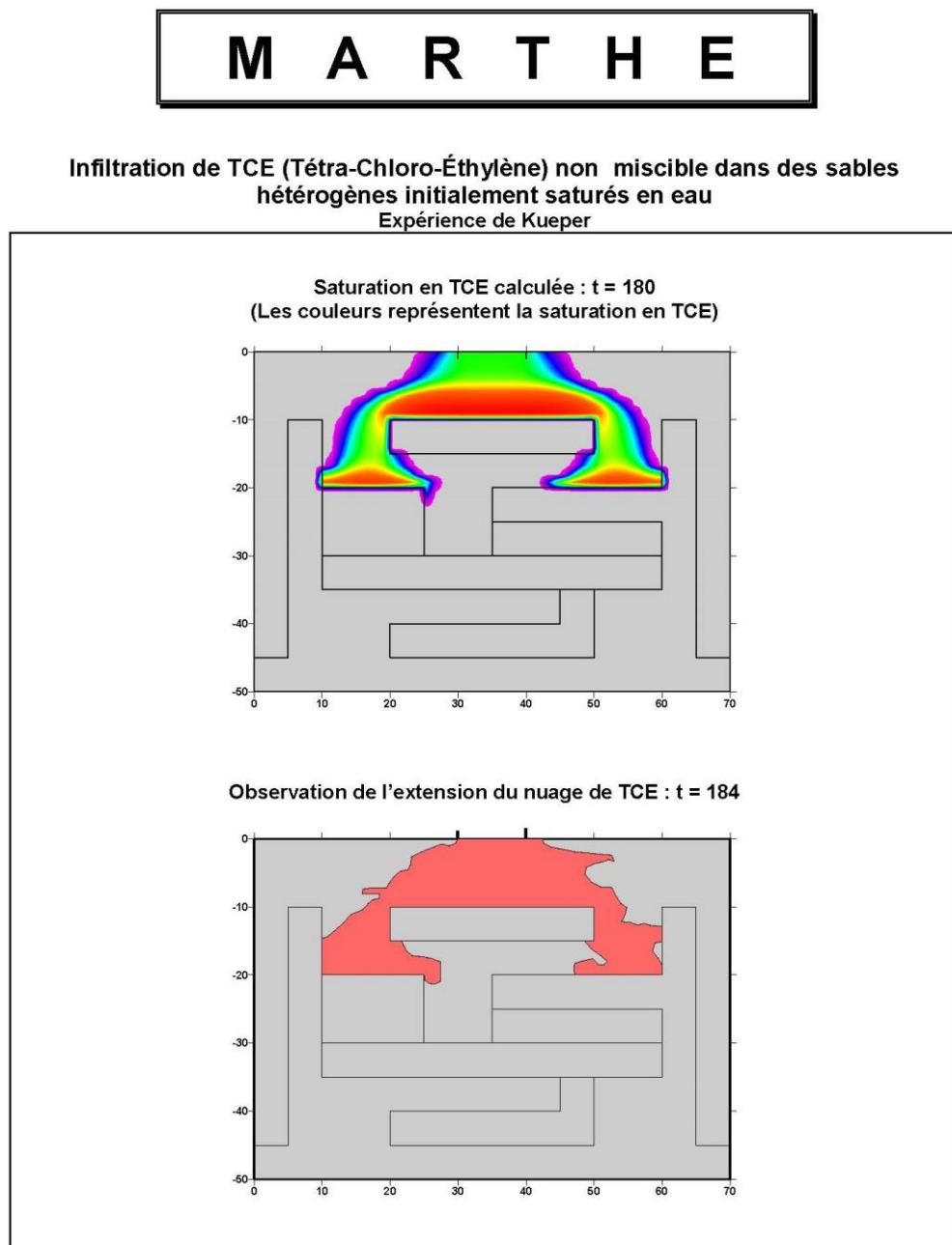
Effets densitaires - simulation couplée hydraulique et thermique

Émergence d'une source chaude (vue en coupe verticale)



Températures calculées : (préprocesseur WinMarthe)

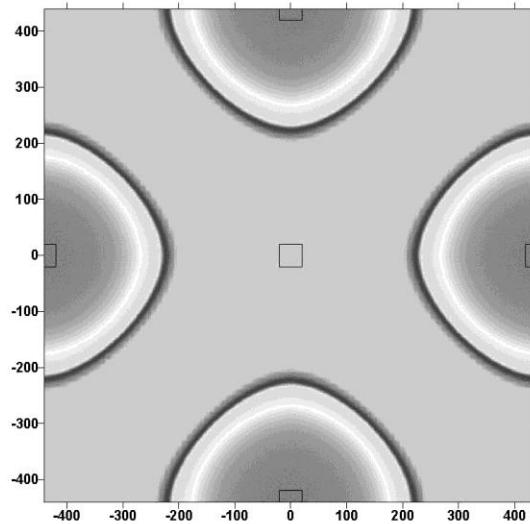




M A R T H E

Simulation diphasique de l'injection d'eau en 4 points dans une formation saturée en hydrocarbure
(Les couleurs représentent le pourcentage de saturation en eau)

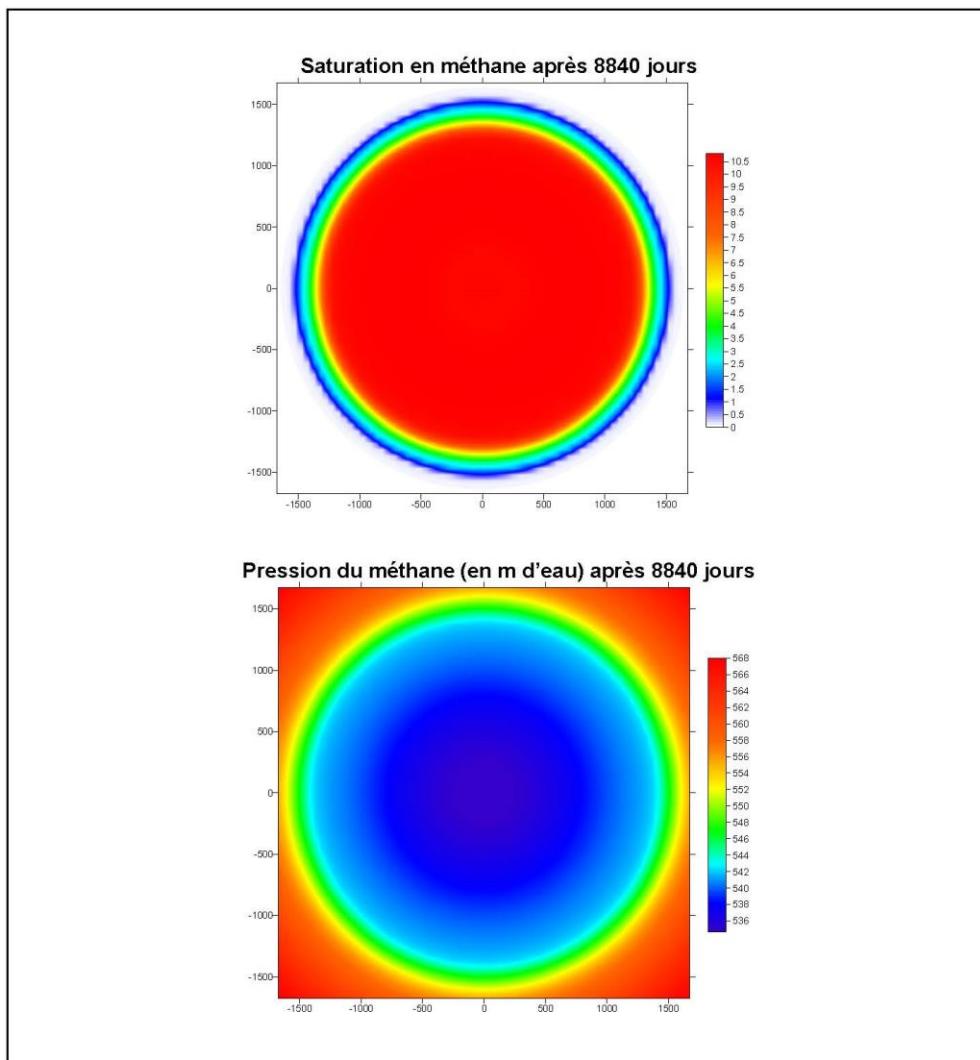
Problème « Five Spots » : Saturation en eau après 1209 jours



(visualisation Surfer ®)

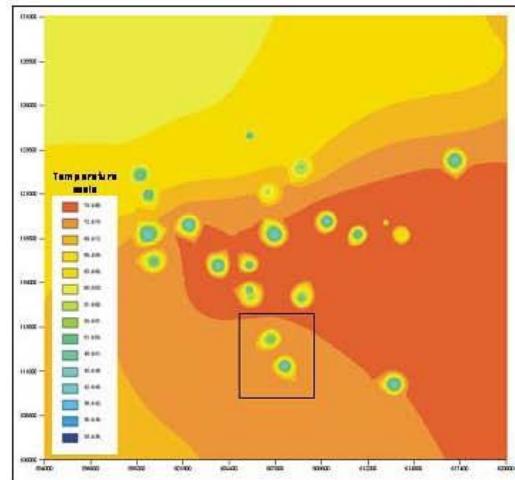
M A R T H E

Simulation diphasique d'un stockage de méthane dans un aquifère

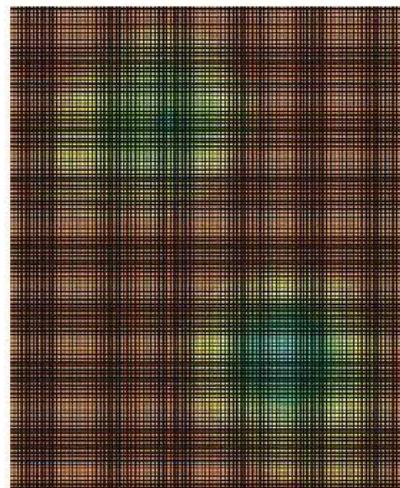


M A R T H E

Simulation de doublets géothermiques dans le Dogger



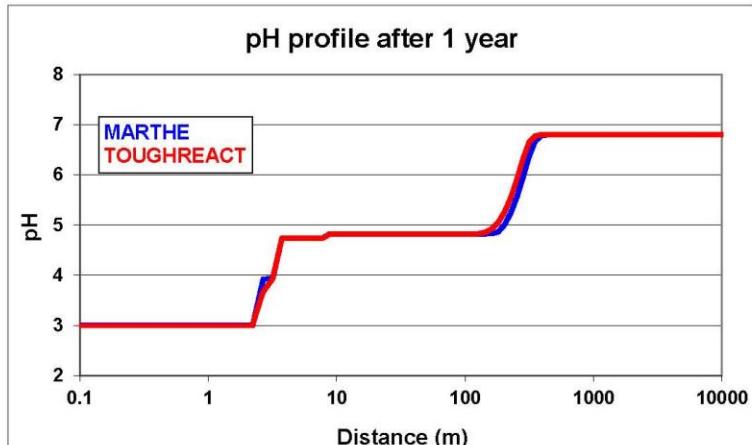
Doublets géothermiques dans le Dogger : vue en plan



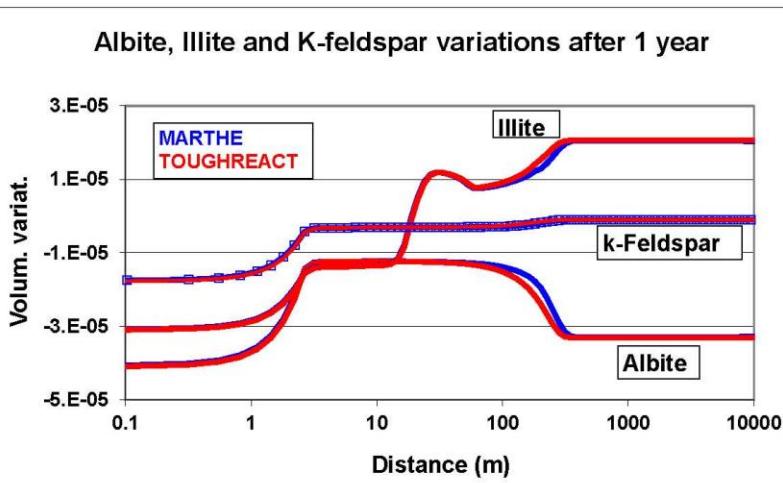
Détail de la zone centrale montrant le maillage utilisé

M A R T H E

Injection d'une eau saturée en CO₂ dans l'aquifère du Dogger (Bassin de Paris).
Maillage 2D radial
Solveur Géochimique REACT du code TOUGHREACT du LBNL (Berkeley)



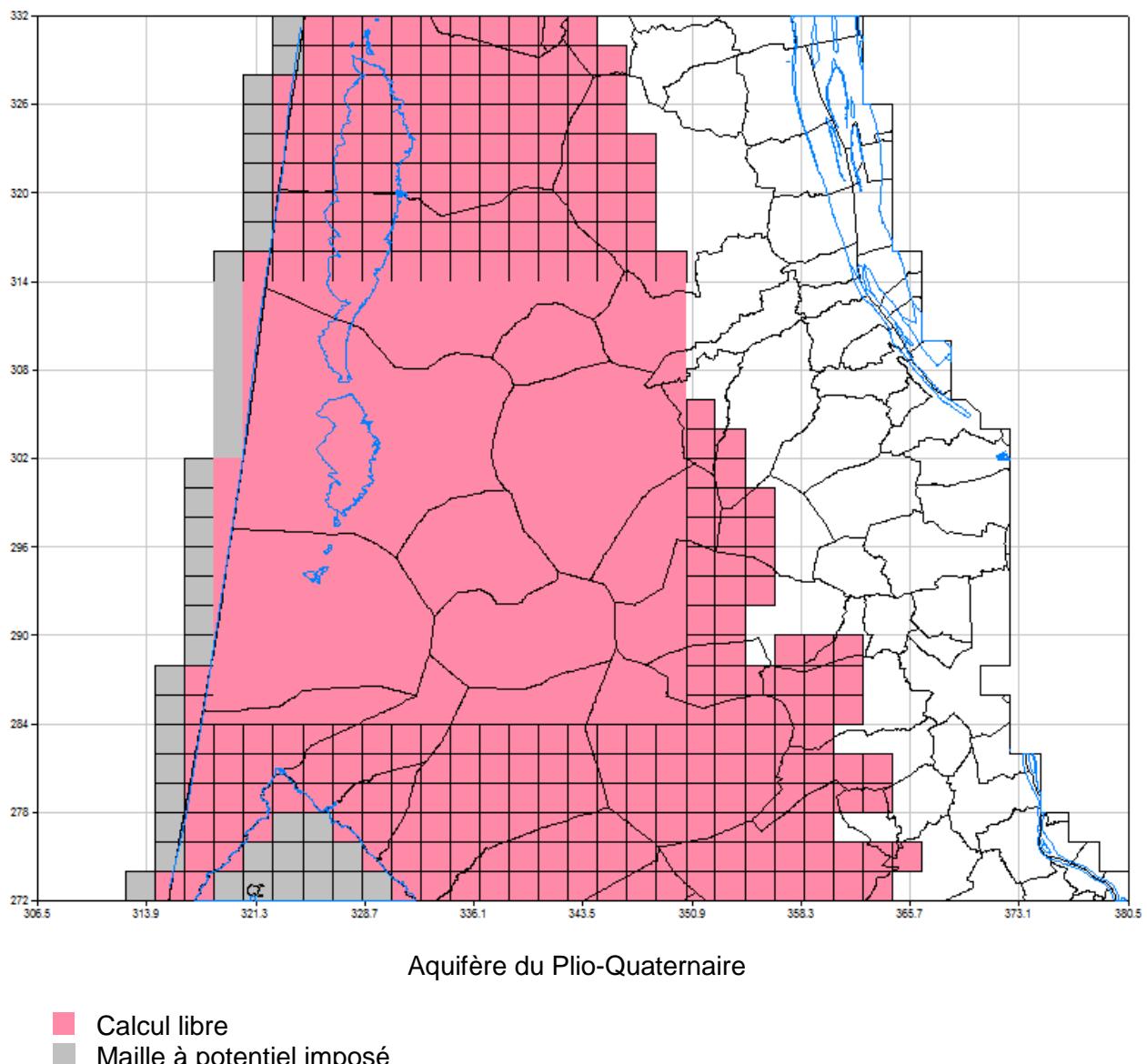
Profil de pH en fonction de la distance au point d'injection

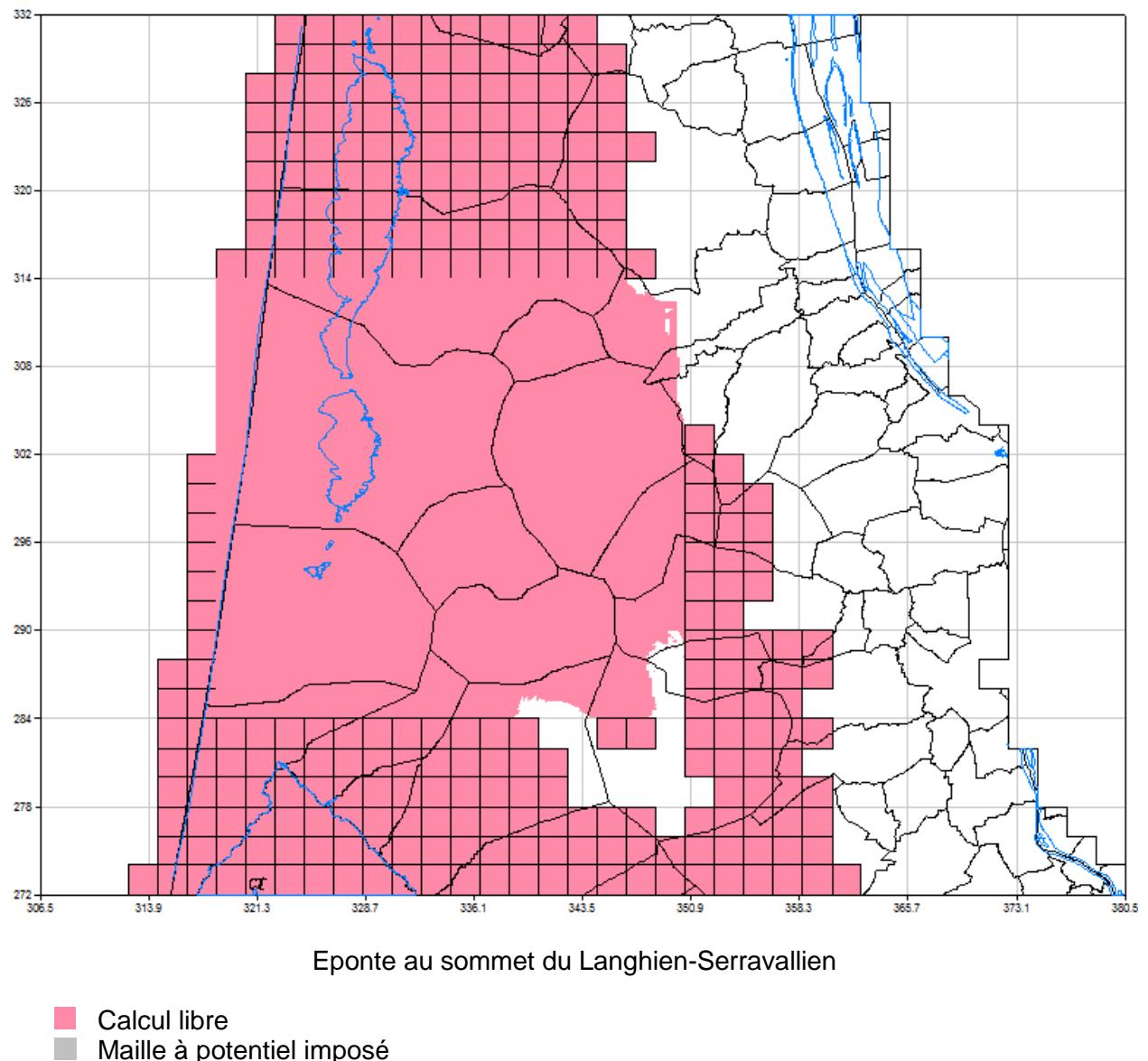


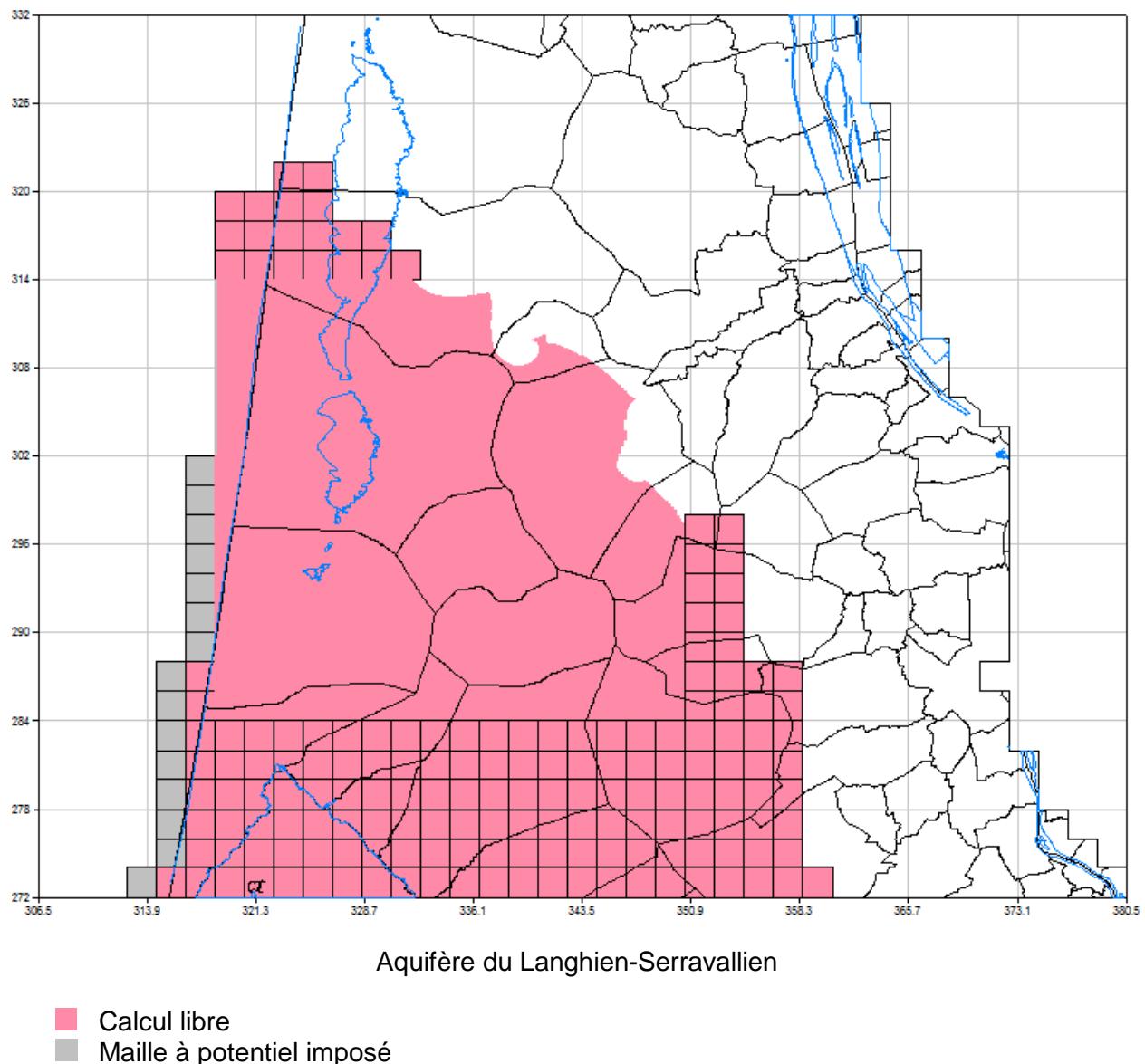
Variation des volumes de certains minéraux de la matrice

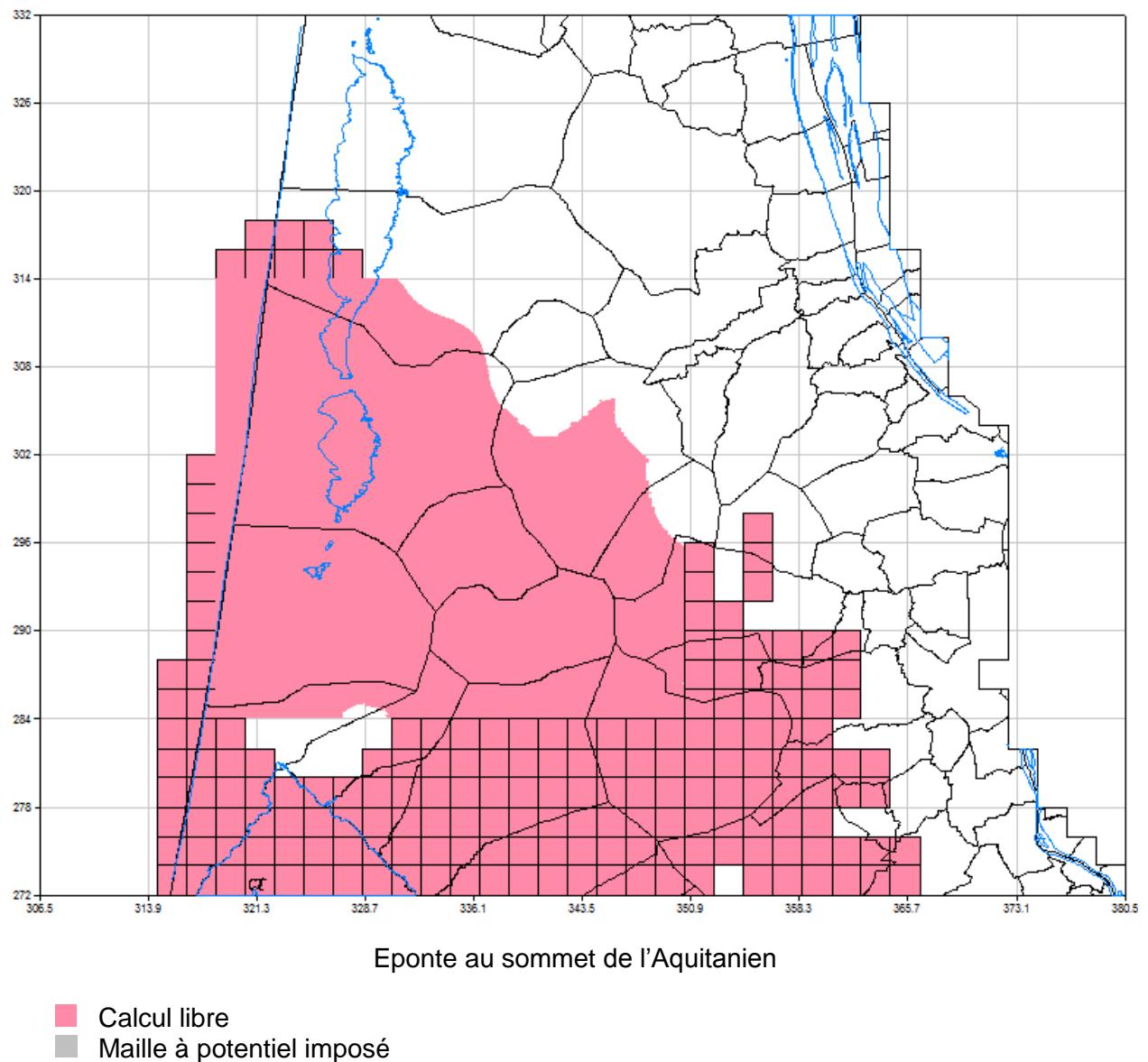
Annexe 4

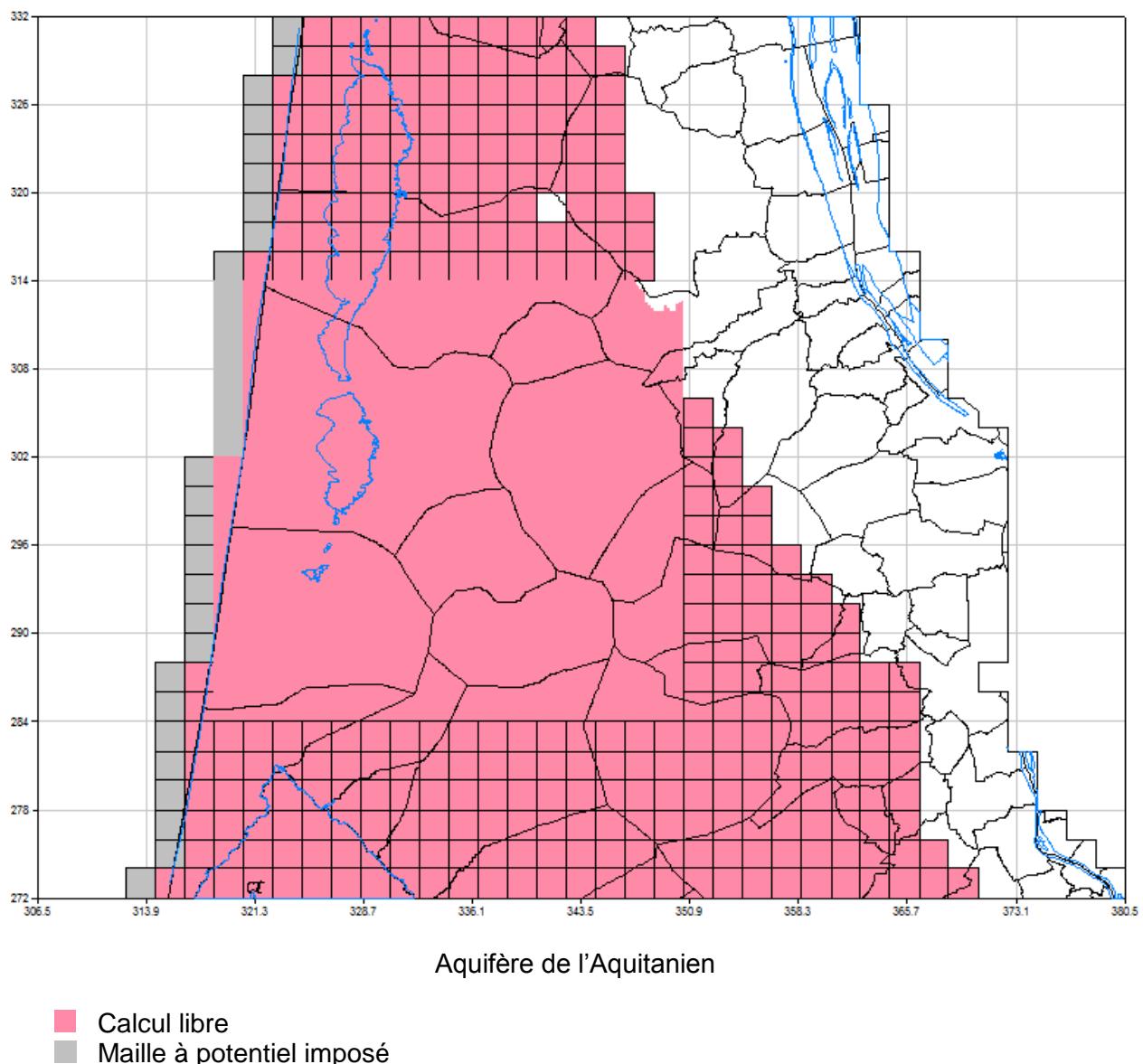
Potentiels imposés

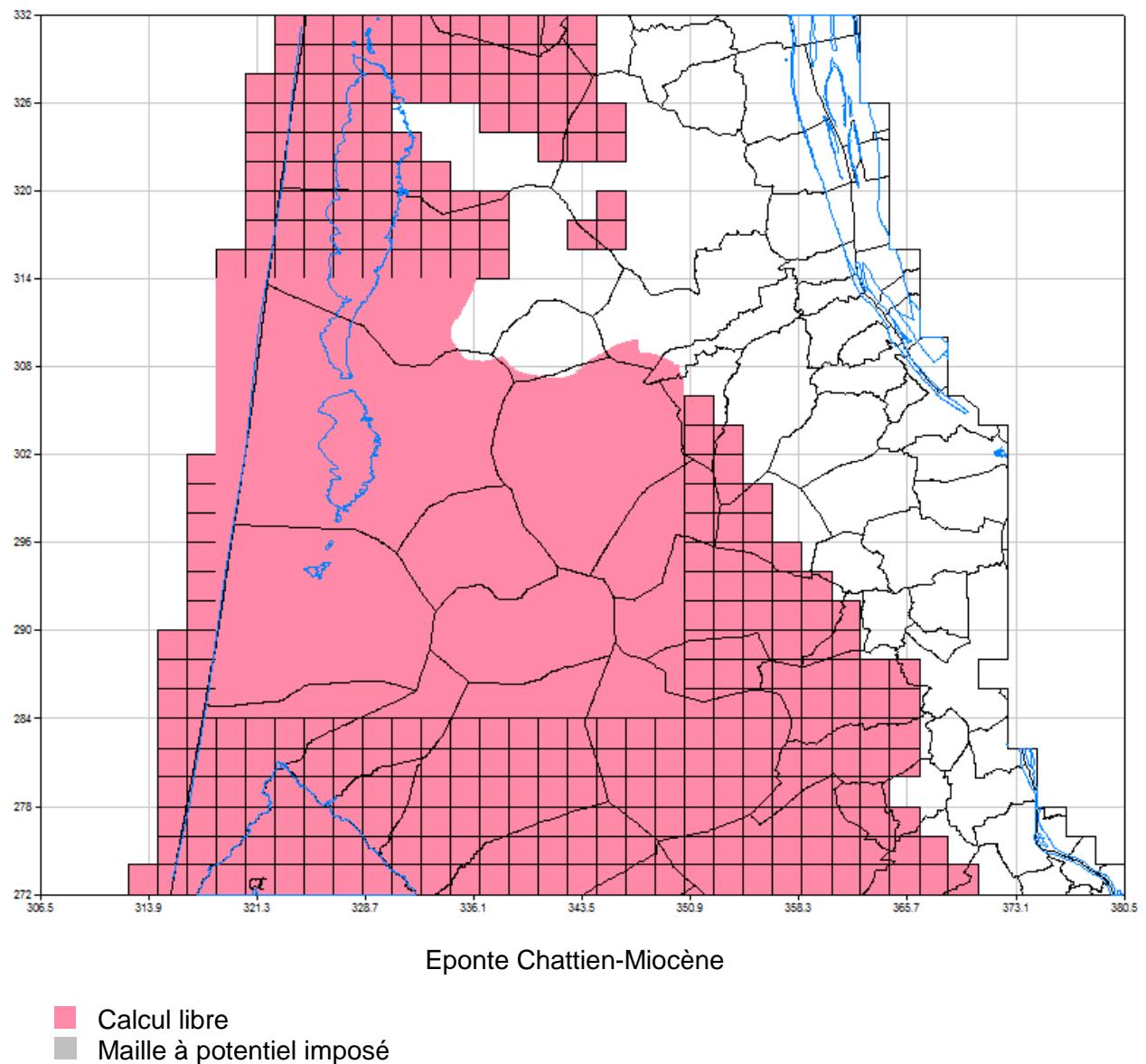


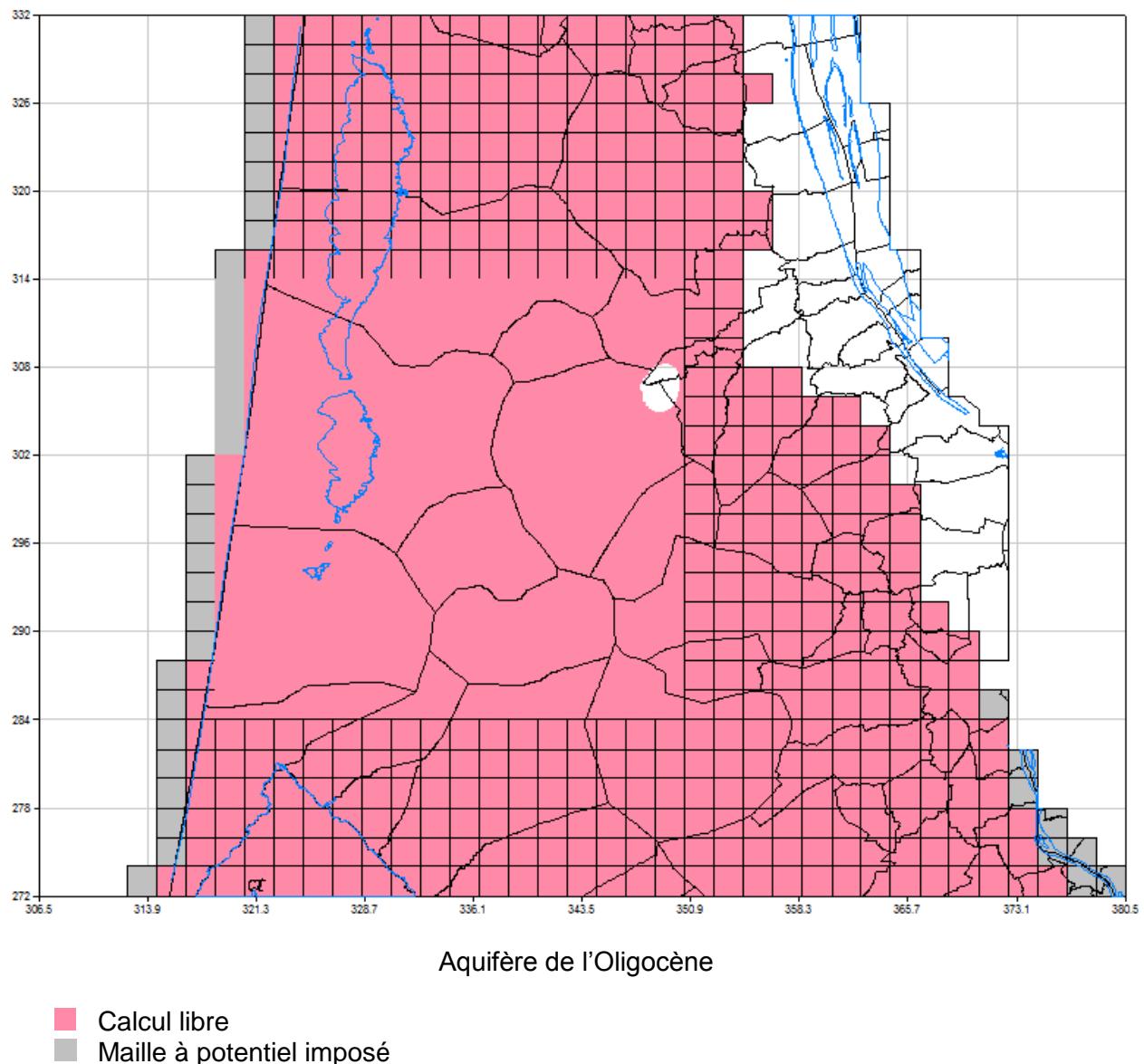


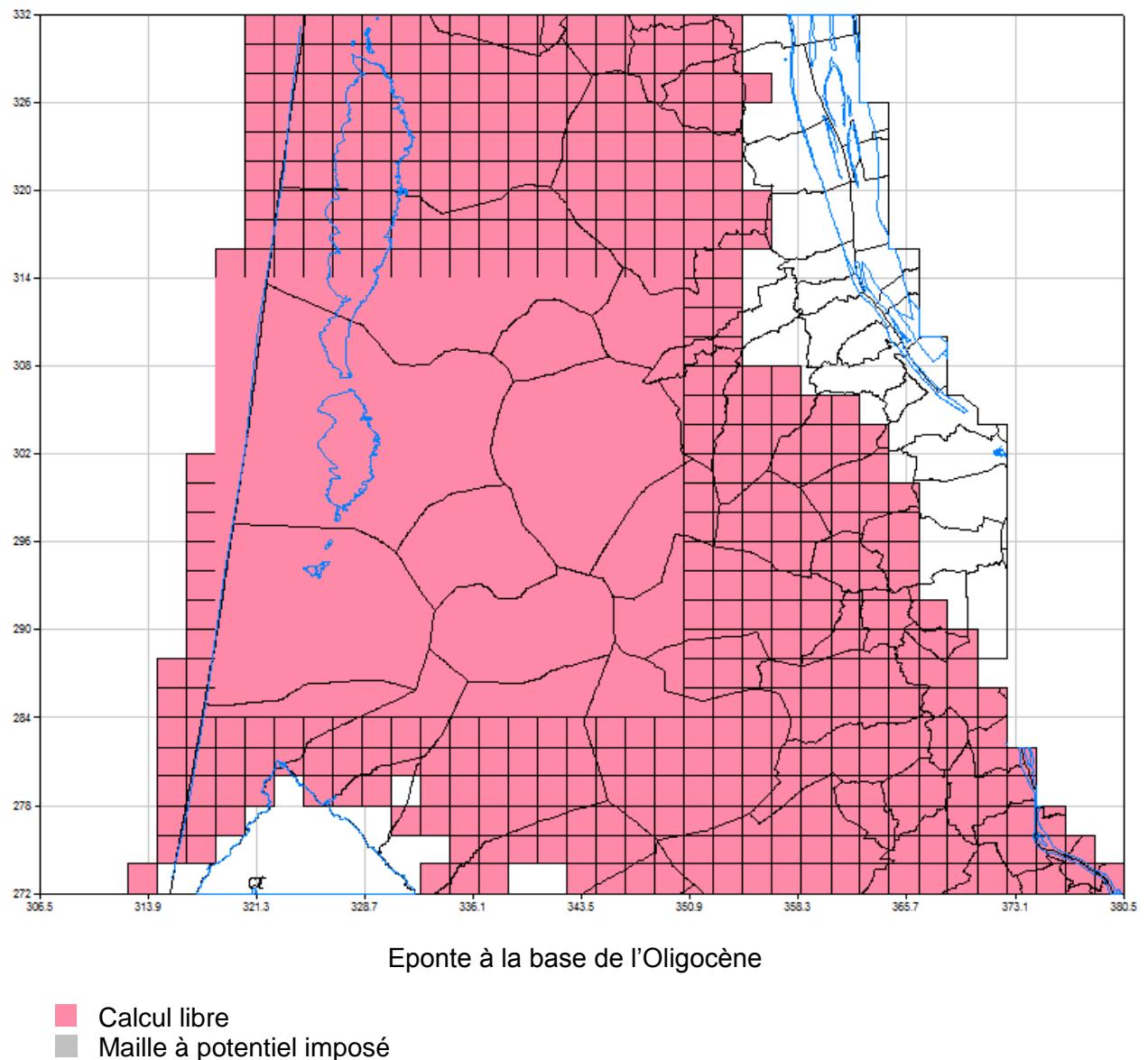


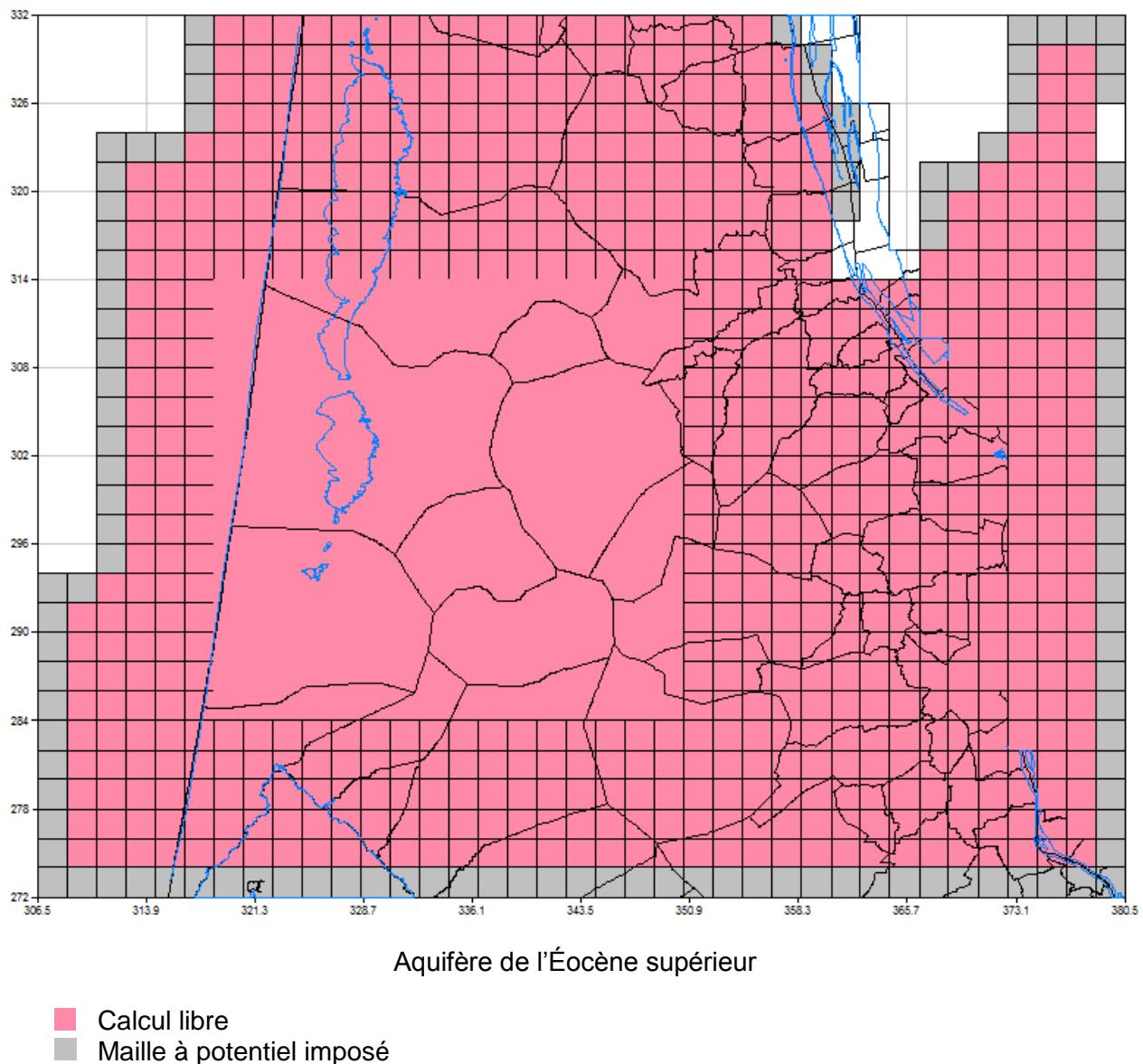


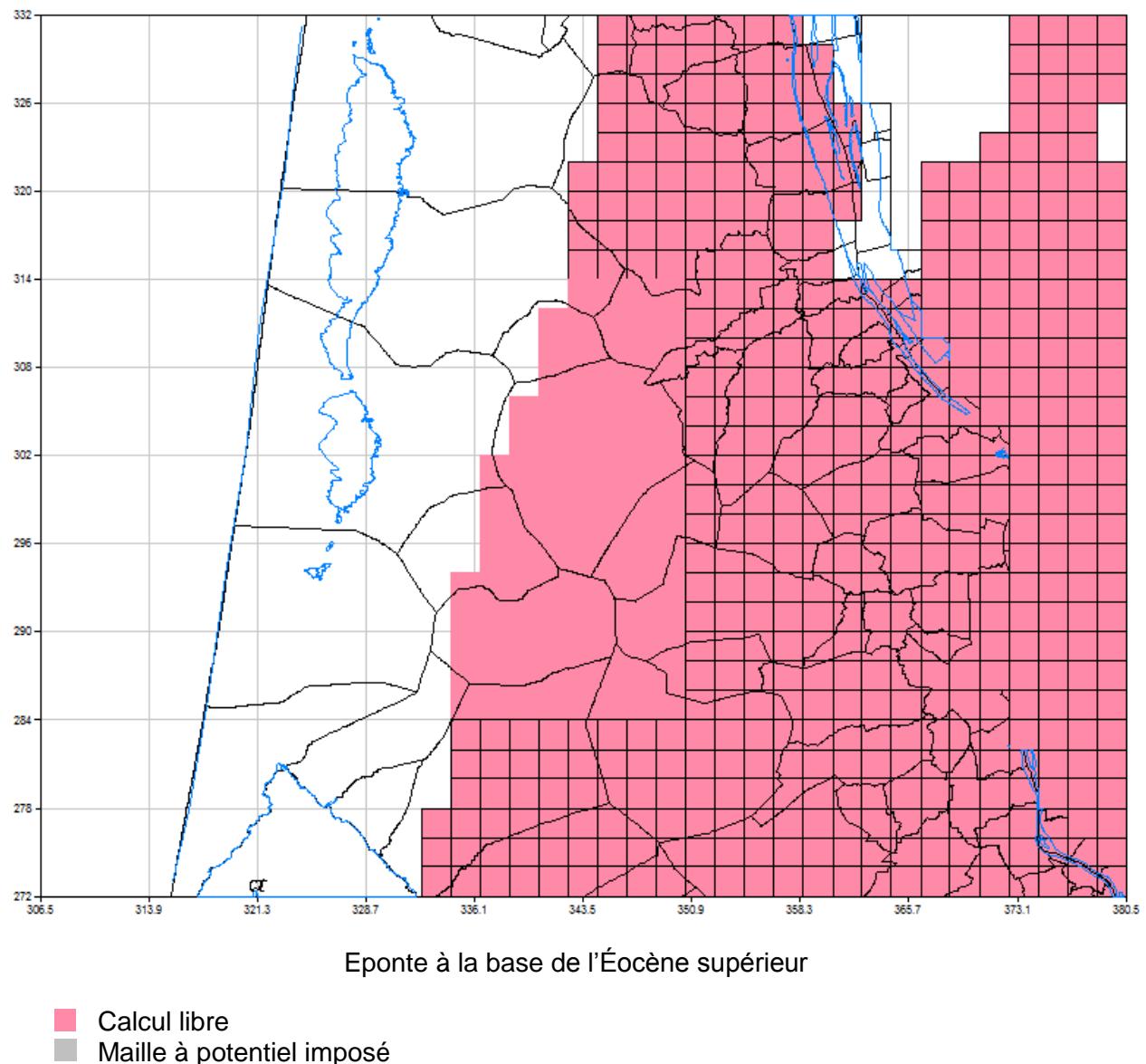


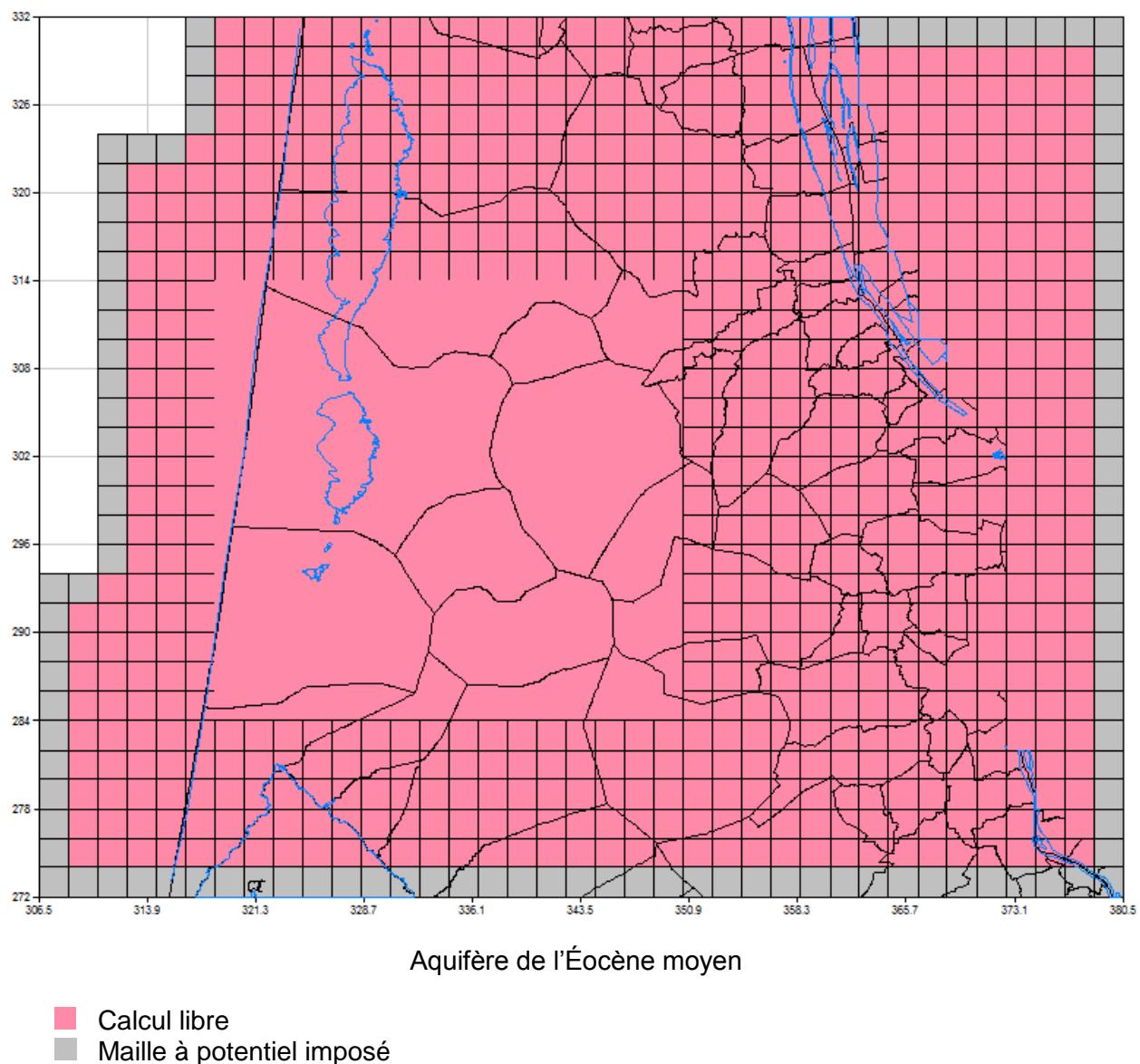


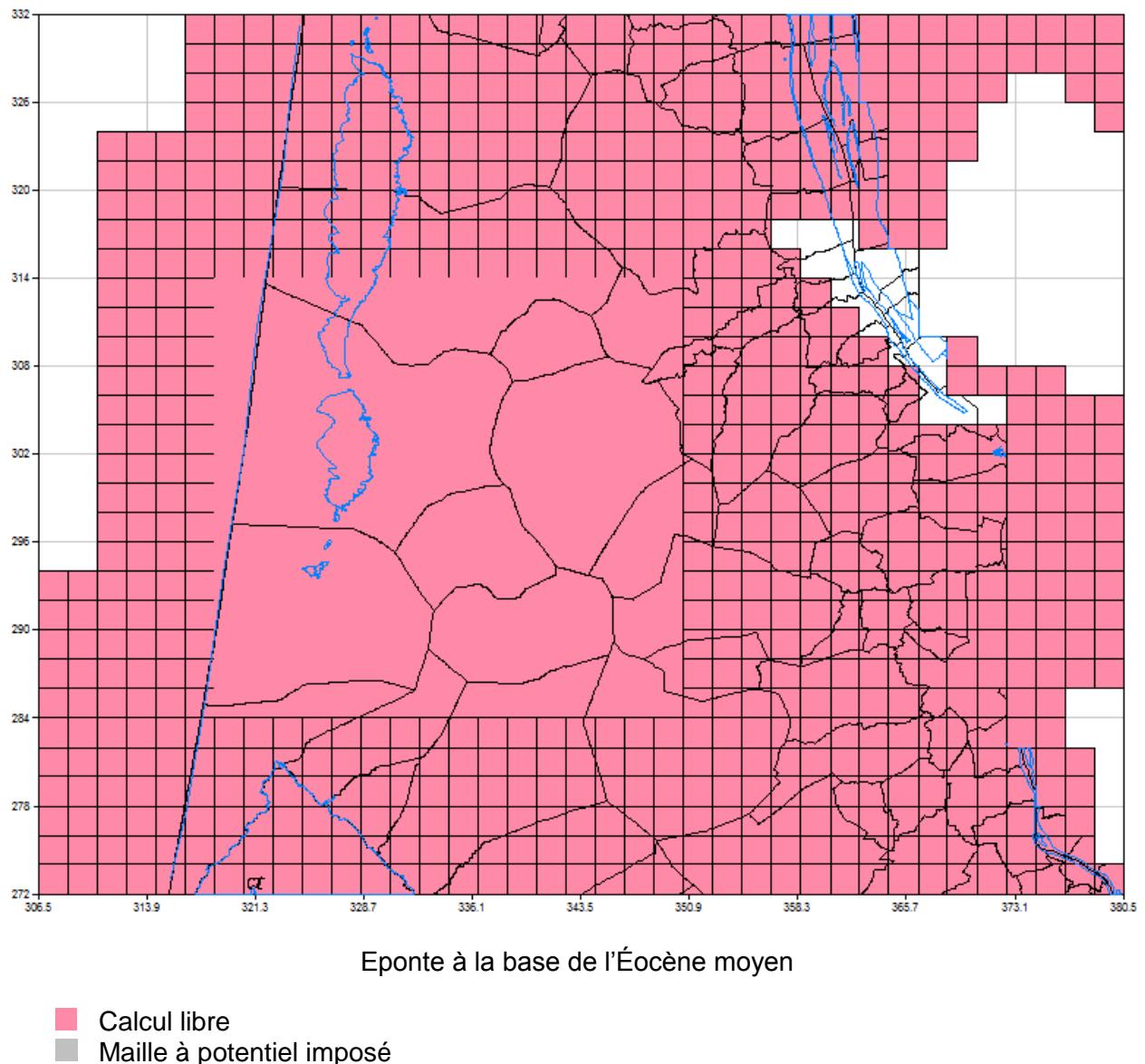


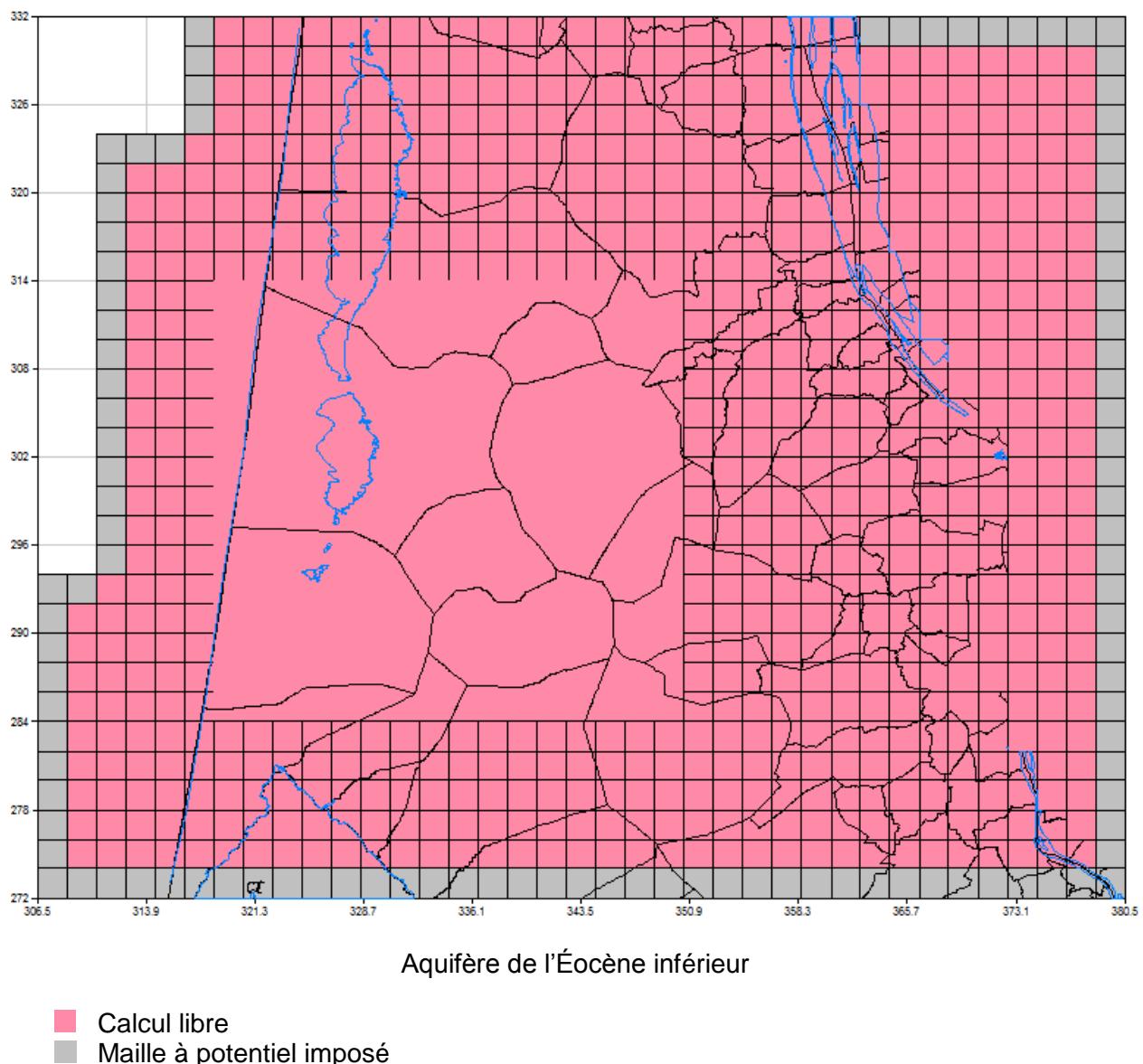


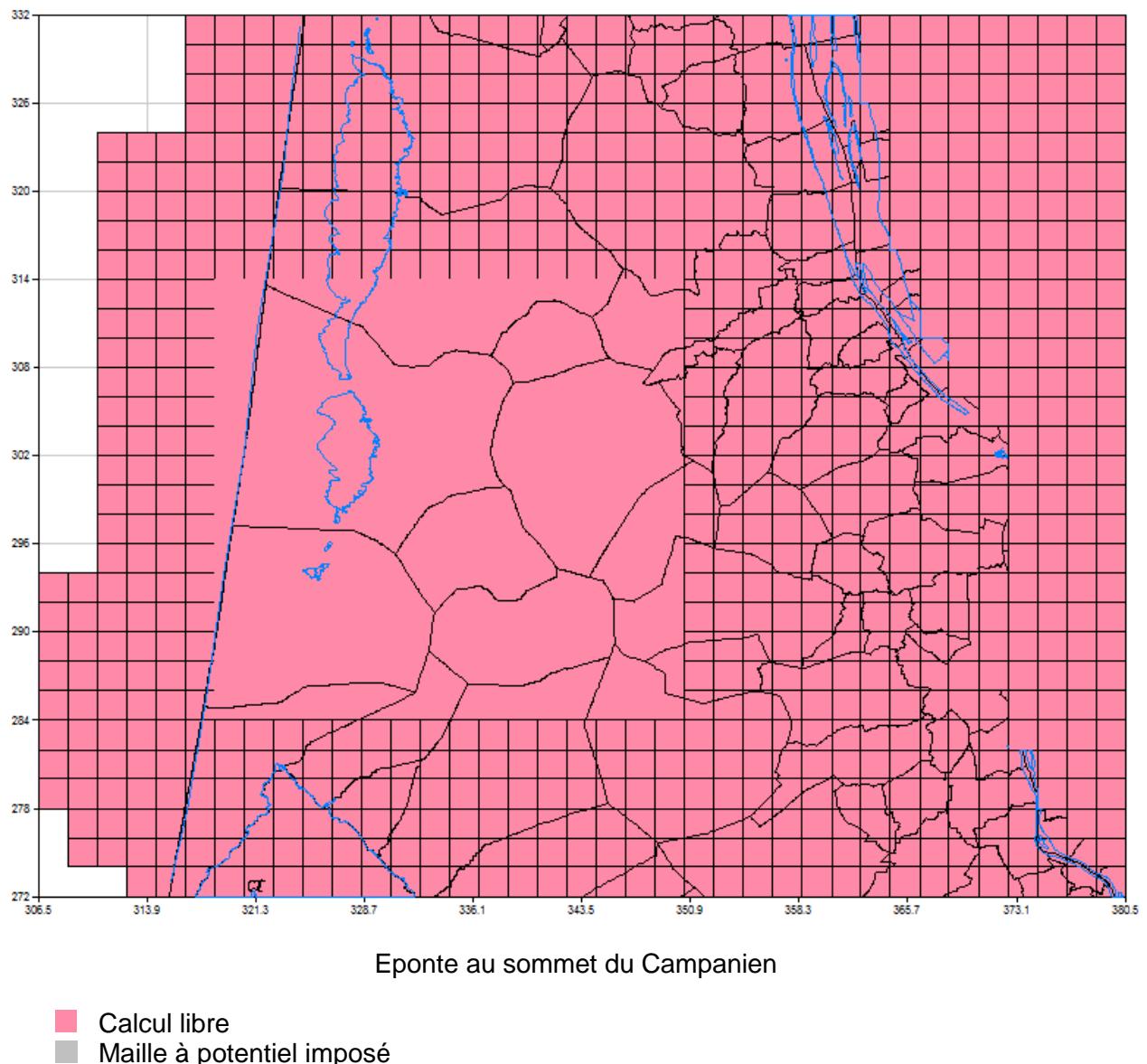


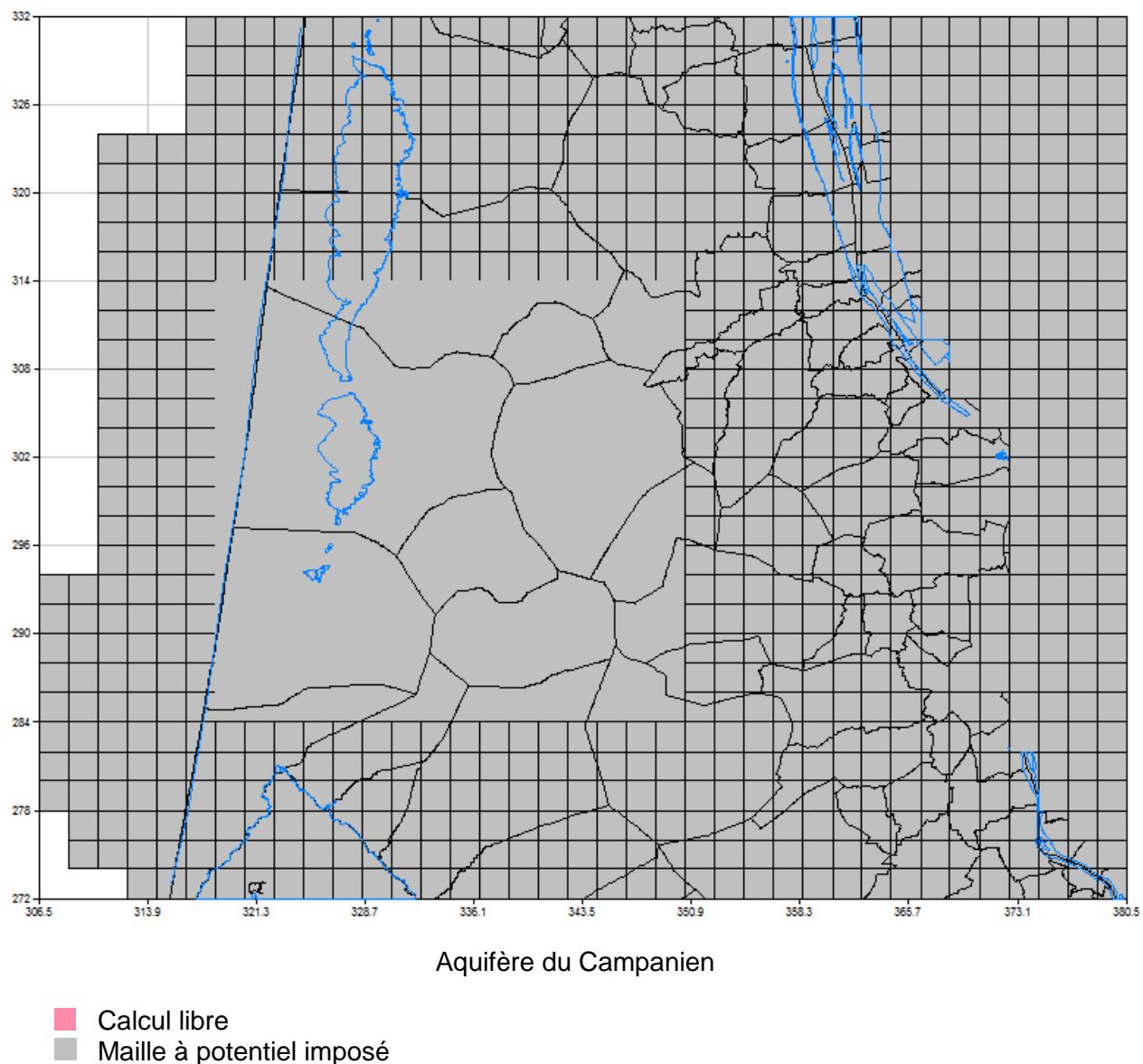






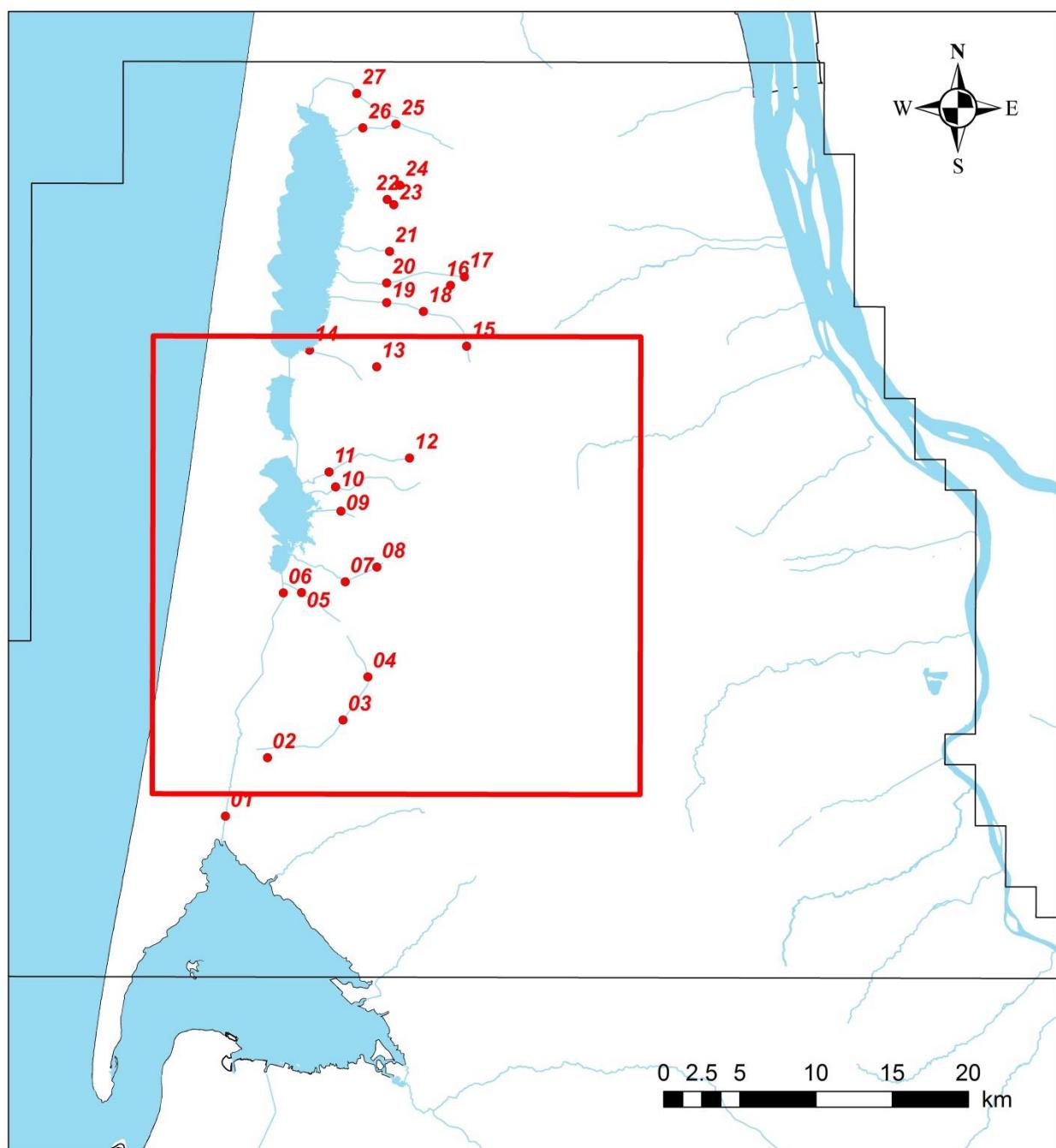






Annexe 5

Fiches de reconnaissance des caractéristiques du réseau hydrographique

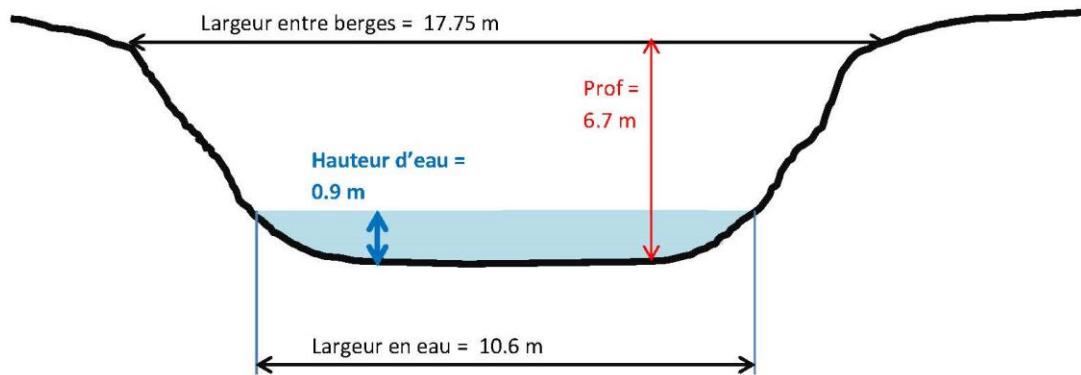


- Points de reconnaissance du réseau hydrographique

Point n° 1 - Canal des étangs (Lège)

Date : 06/11/2014

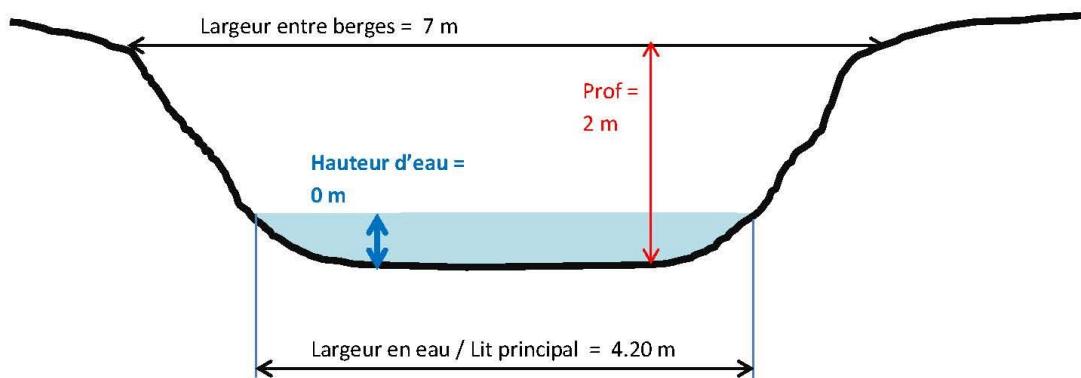
Observations : lit sableux – Berges très étagées (voir document papier)



Point n° 2 - Craste de la Goubillayre Amont

Date : 06/11/2014

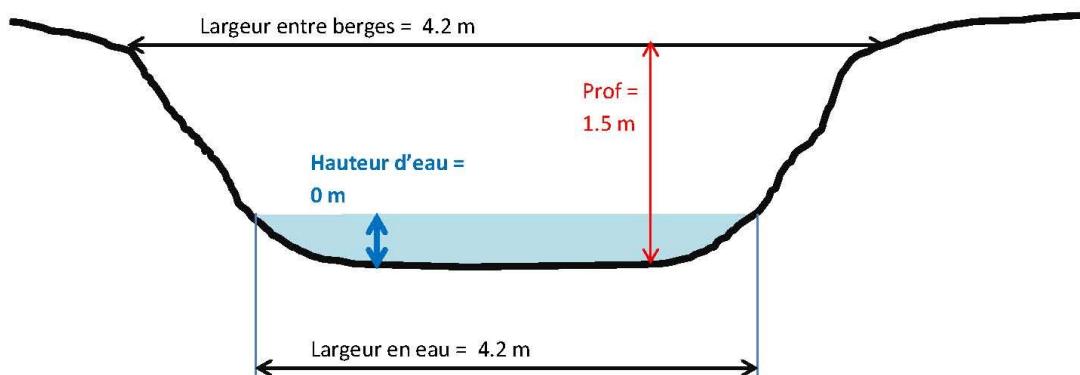
Observations : Alios et sable – A sec



Point n° 3 - Craste de la Goublleyre Amont

Date : 06/11/2014

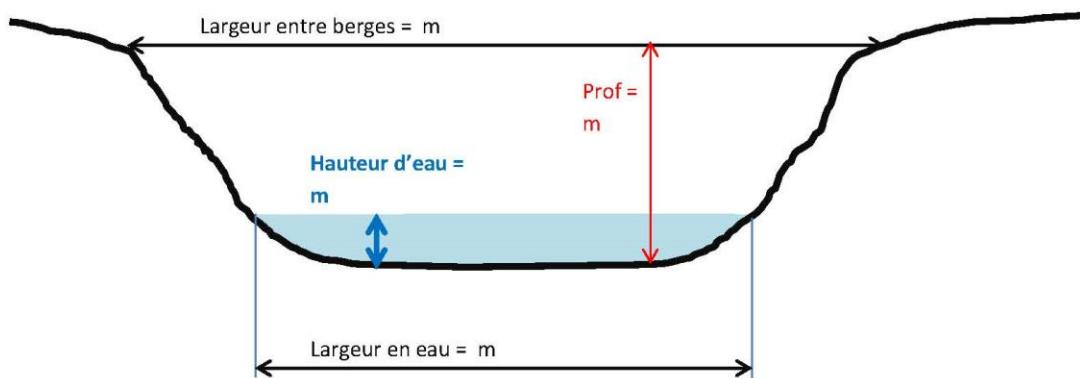
Observations : [A sec](#)



Point n° 4 - Craste de la Goubillayre Aval

Date : 06/11/2014

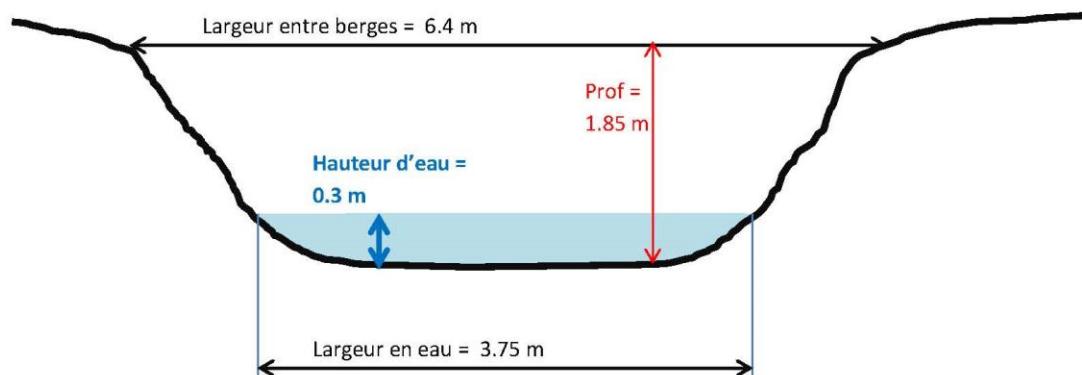
Observations : En eau - Sableux



Point n° 5 - Craste Dreyt

Date : 06/11/2014

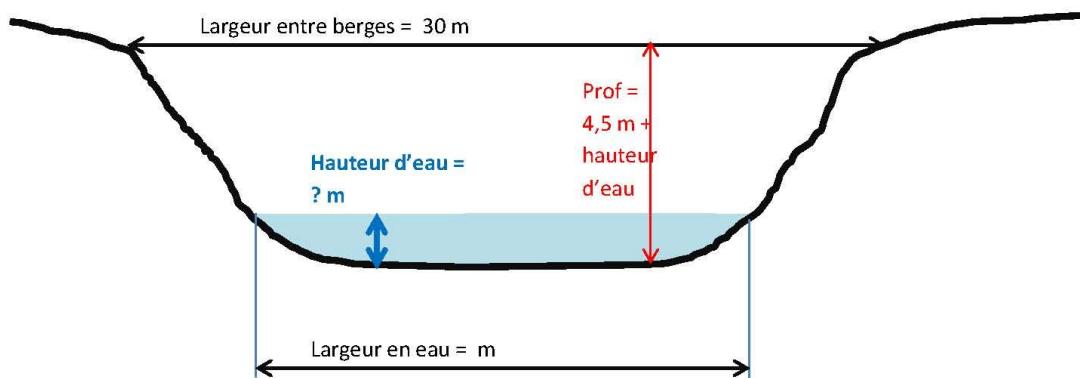
Observations :



Point n° 6 –Canal des étangs (Porge)

Date : 06/11/2014

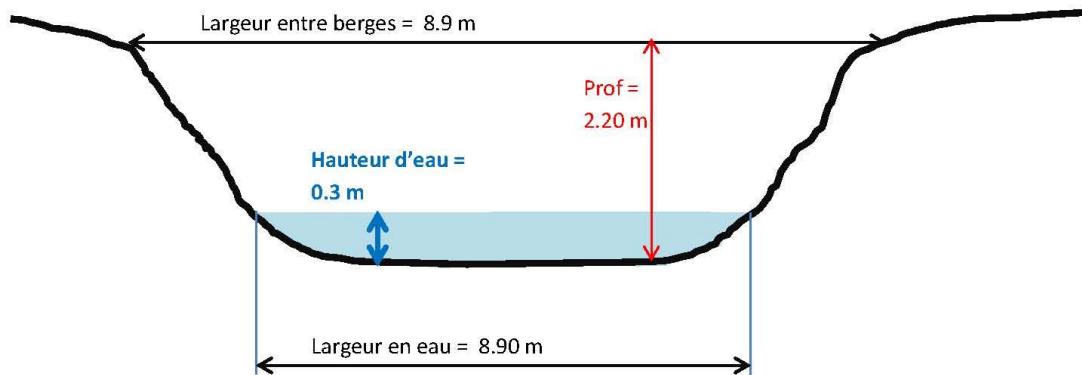
Observations : Pas de photos – Pas de mesure de la hauteur d'eau



Point n° 7 - Craste de Caupos Aval

Date : 06/11/2014

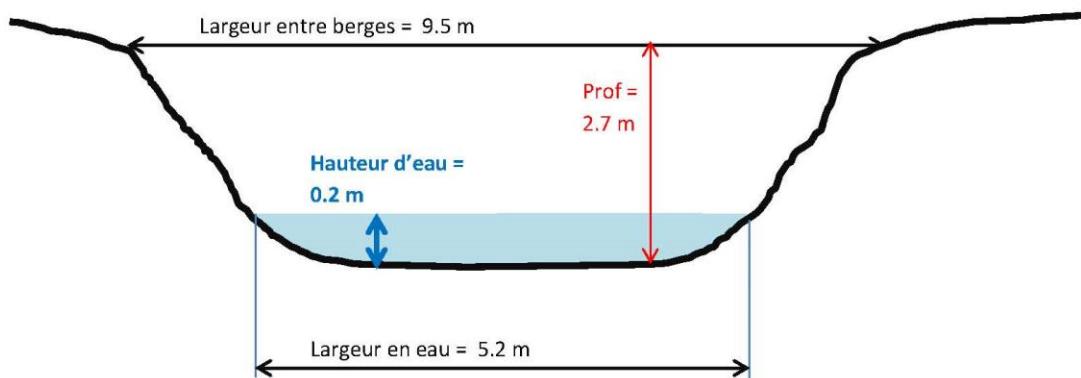
Observations : Substratum sableux – **Plus en aval du pont, largeur d'≈4,5 m et encaissement de plus de 4 m**



Point n° 8 – Craste de Caupos Amont

Date : 06/11/2014

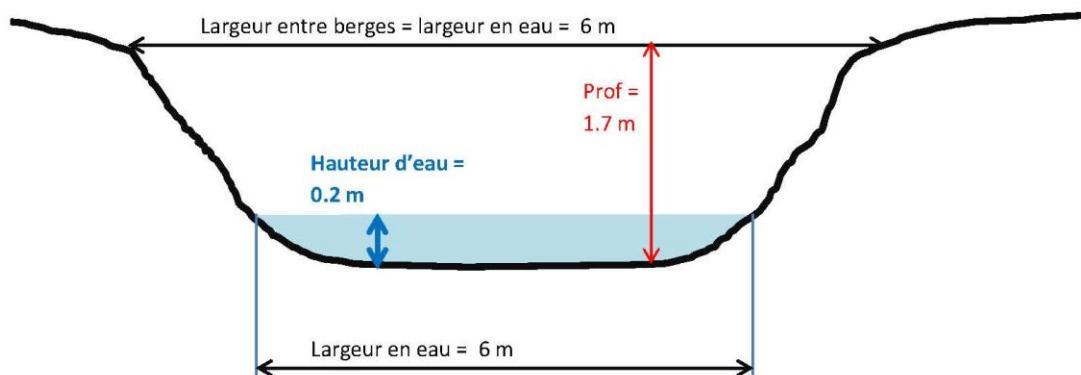
Observations : Sableux



Point n° 9 – Canal de la Berle

Date : 06/11/2014

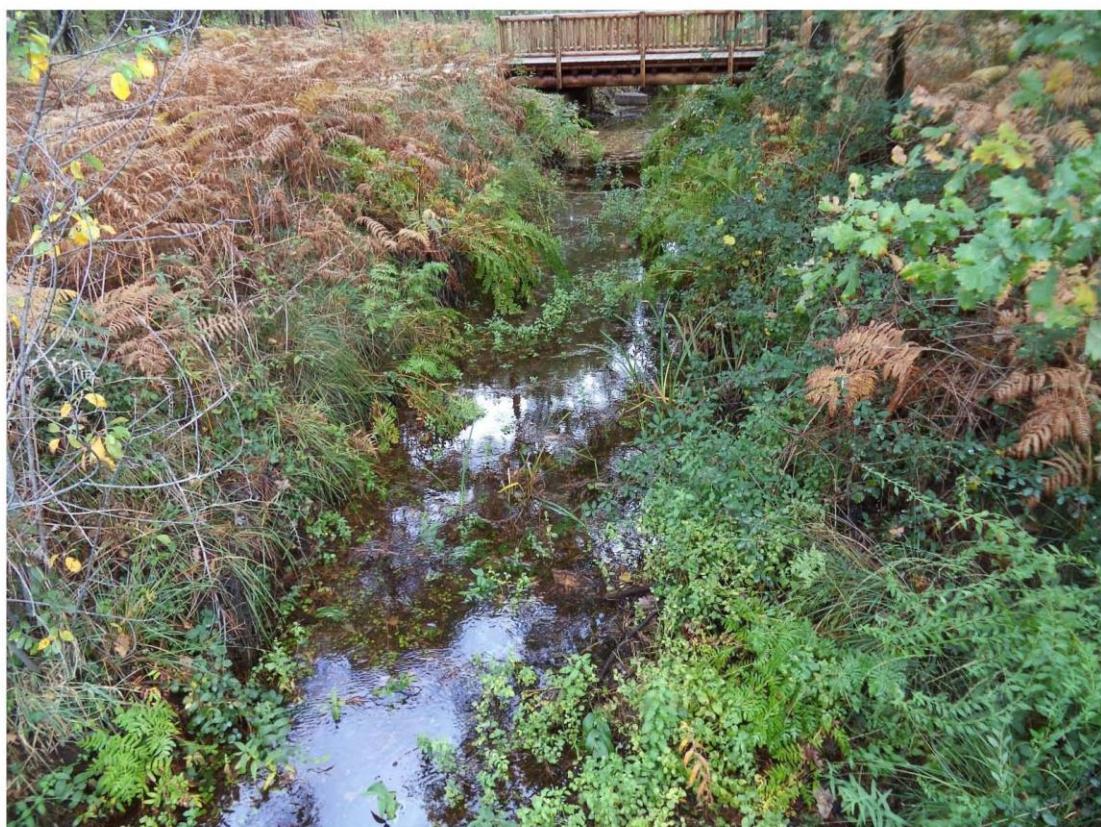
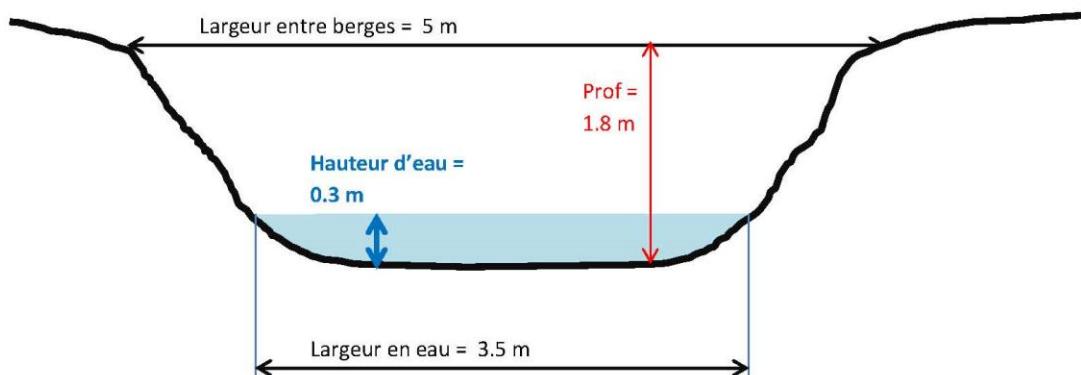
Observations :



Point n° 10 – Craste de Planquehaute

Date : 06/11/2014

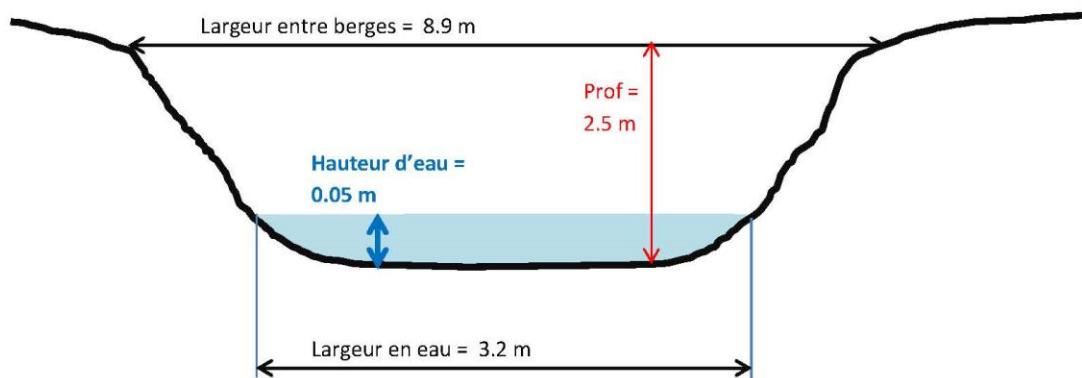
Observations :



Point n° 11 - Craste du Pont des Tables Aval

Date : 06/11/2014

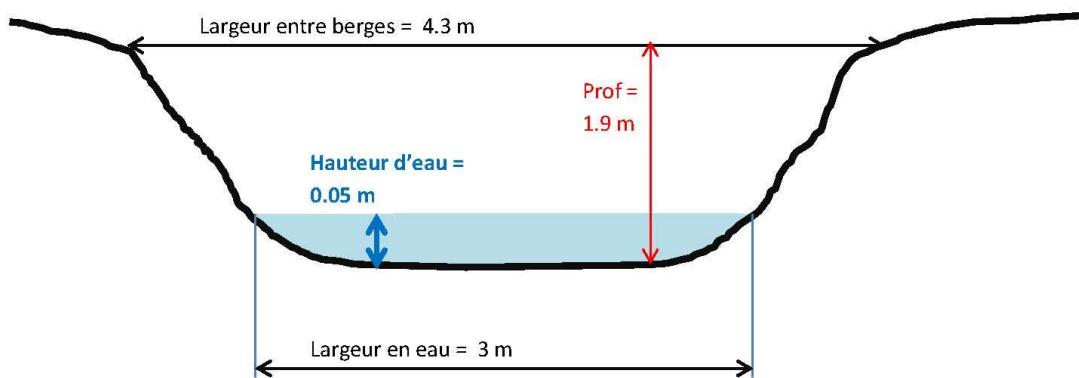
Observations :



Point n° 12 - Craste du Pont des Tables Amont

Date : 06/11/2014

Observations : Sable

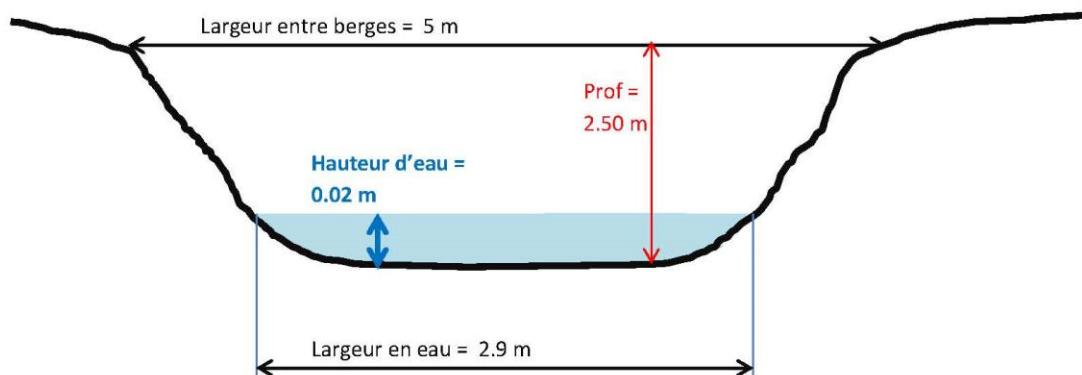


Pas de photos

Point n° 13 - Ruisseau Le Grand Lambrusse Amont

Date : 06/11/2014

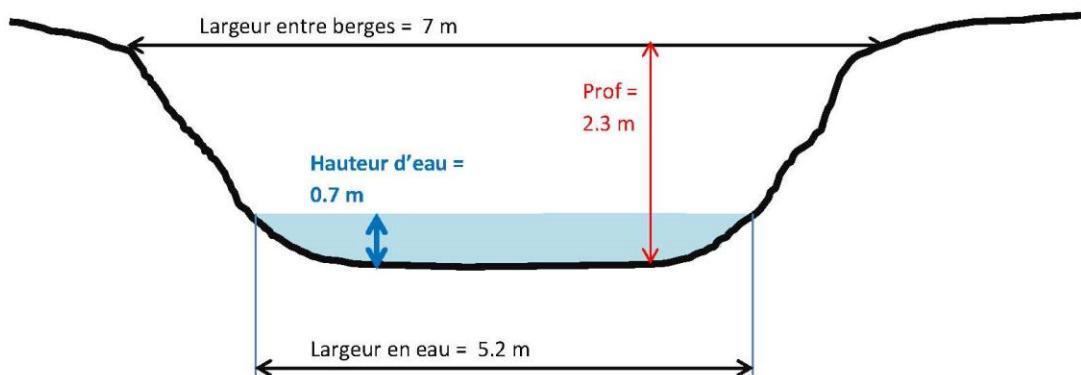
Observations :



Point n° 14 - Ruisseau Le Grand Lambrusse Aval

Date : 06/11/2014

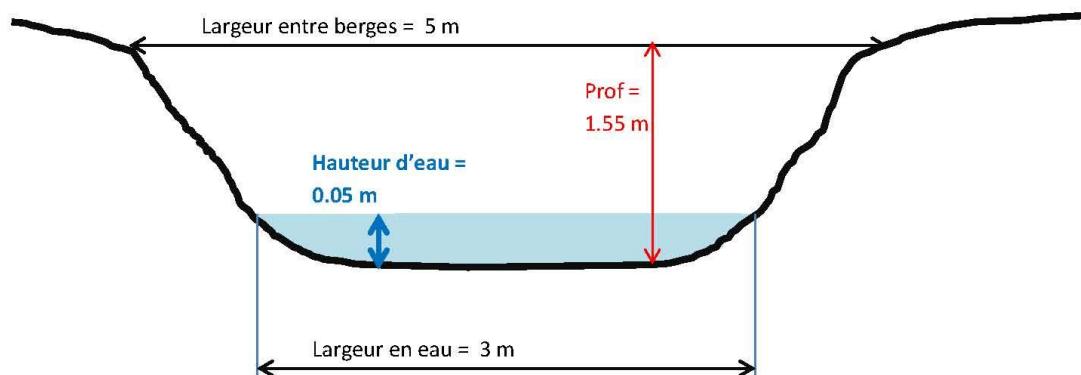
Observations :



Point n° 15 - Craste de la Queytié Amont

Date : 06/11/2014

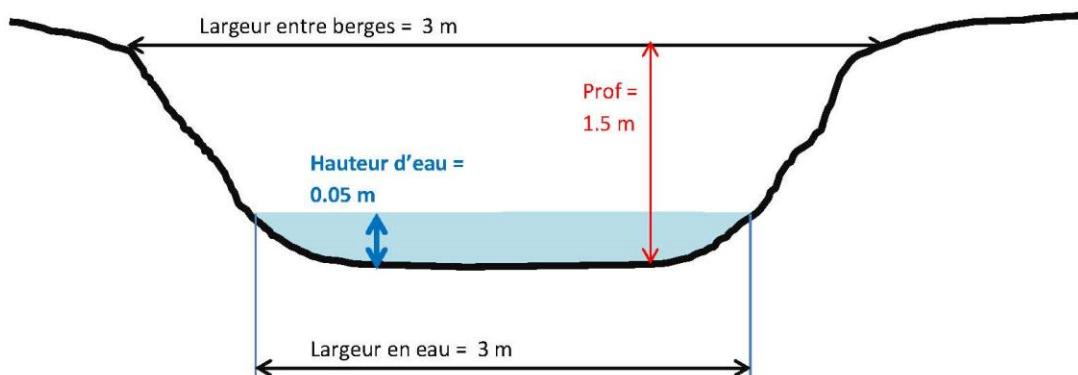
Observations : un peu en eau



Point n° 16 – Craste de Pipeyrous Amont 1

Date : 06/11/2014

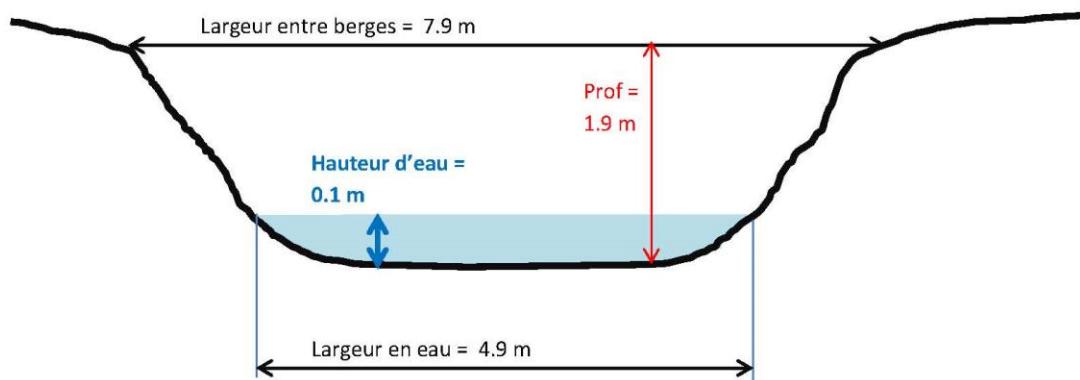
Observations :



Point n° 19 - Craste de la Queytié Aval

Date : 06/11/2014

Observations :

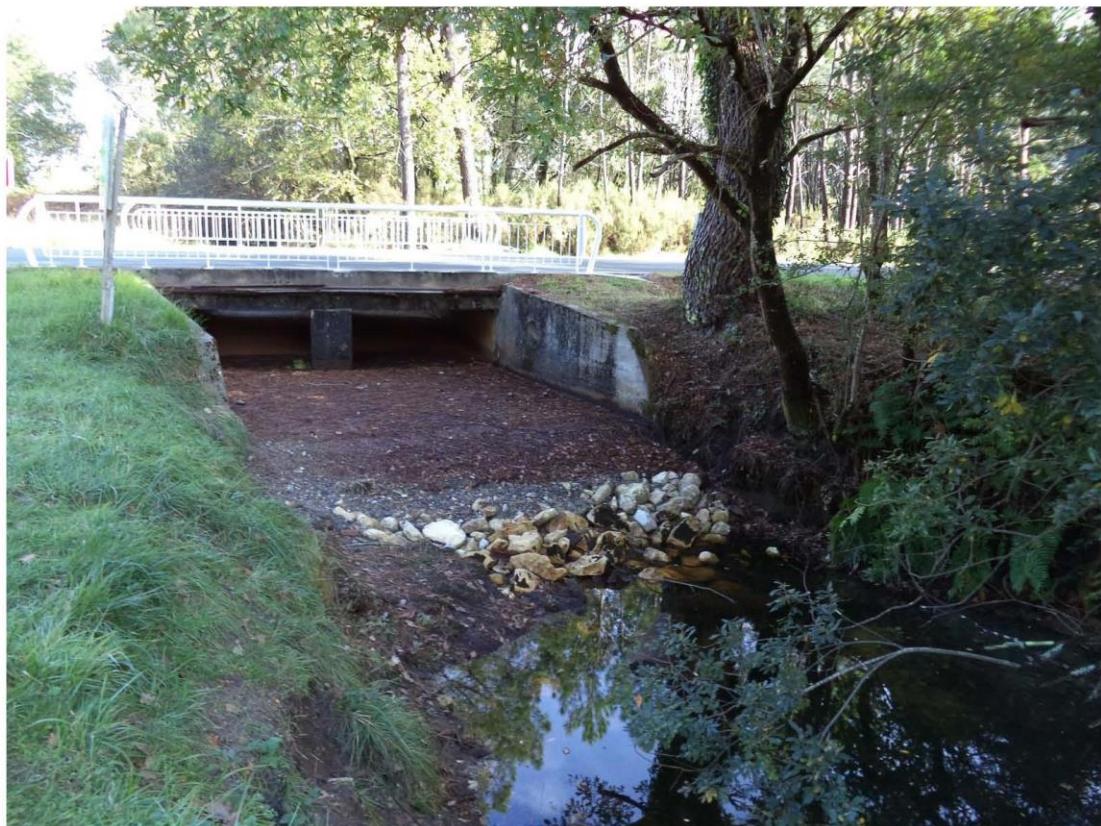
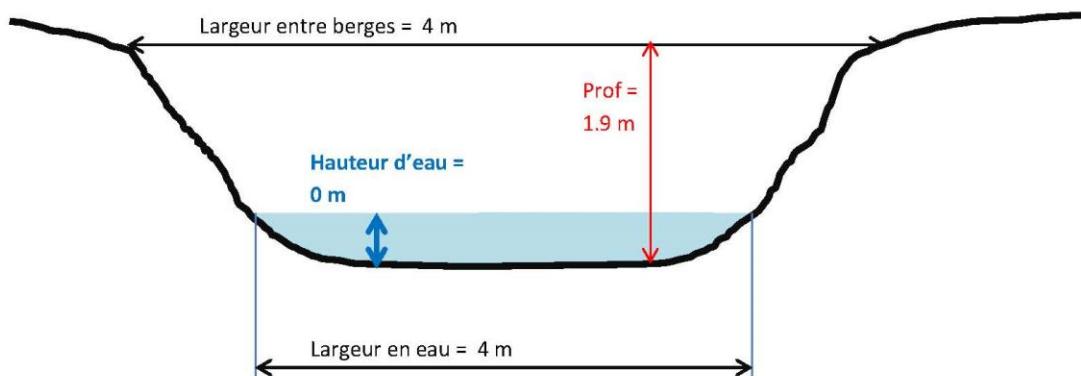


Point n° 20 – Craste de Pipeyrous Aval

Date : 06/11/2014

Observations : Le pont est à sec

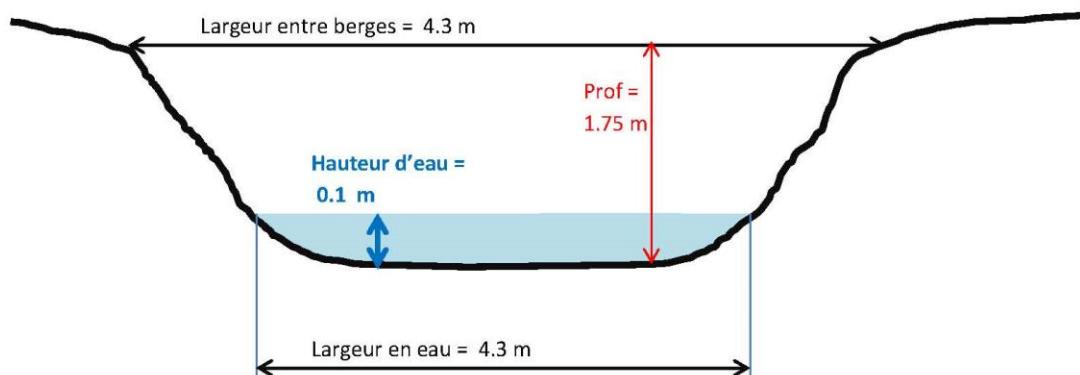
Pas de débit, l'eau en aval du pont est stagnante (niveau de la nappe) – la mesure ci-dessous est prise en aval du pont (ce qui explique la présence d'une hauteur mouillée)



Point n° 21 – Berle de la Garroueyre

Date : 06/11/2014

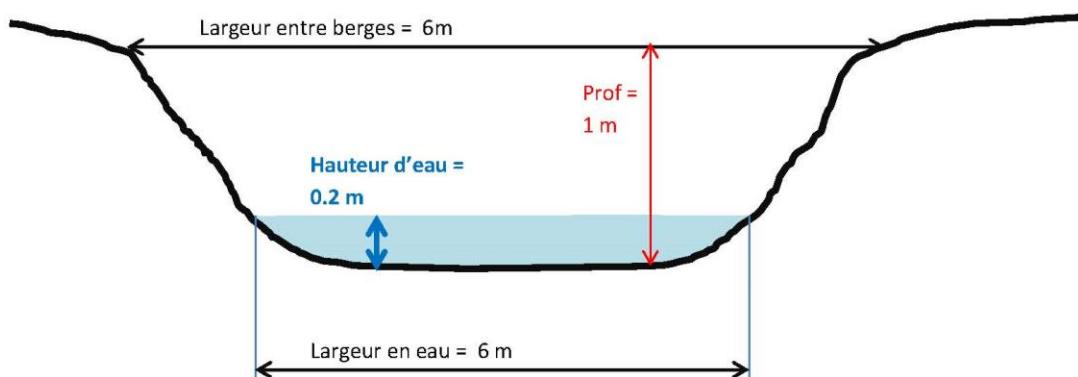
Observations : Présence d'une mire



Point n° 22 - Berle du Caillava Aval

Date : 06/11/2014

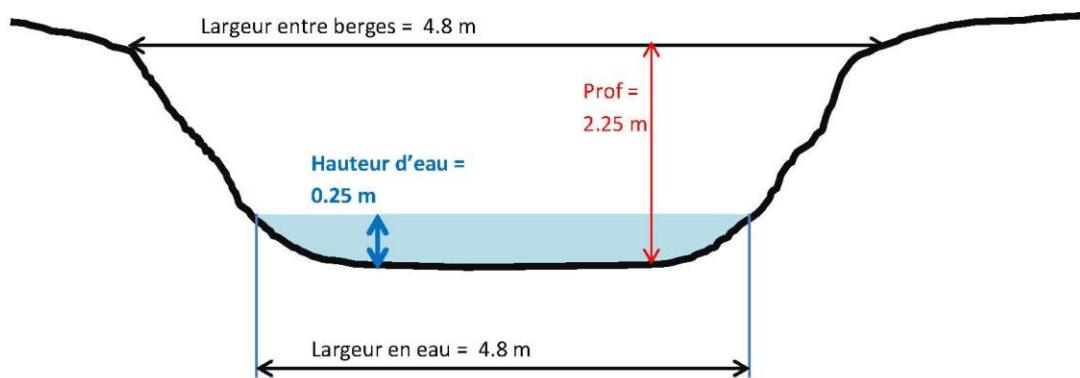
Observations : Faible encaissement – en amont du pont, il y a embranchement de 2 canaux (mesurés en points 23 et 24)



Point n° 24 - Berle du Caillava Amont 2

Date : 06/11/2014

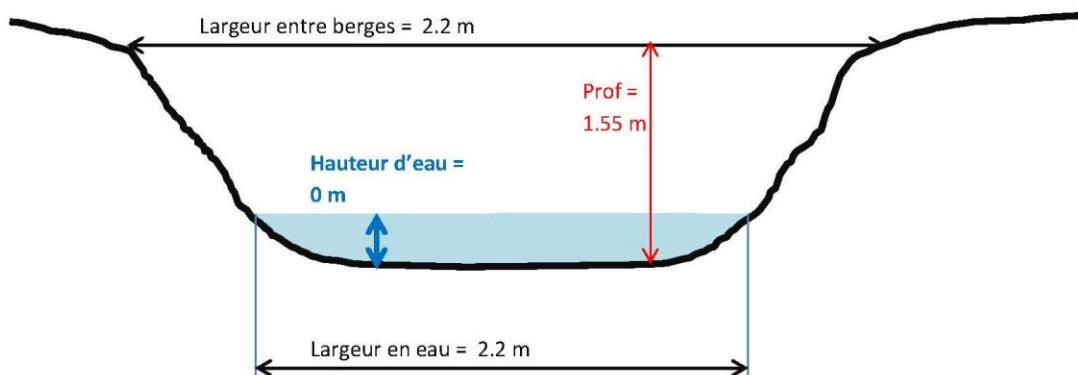
Observations :



-1.5Point n° 25 - Craste de la Matouse Amont

Date : 06/11/2014

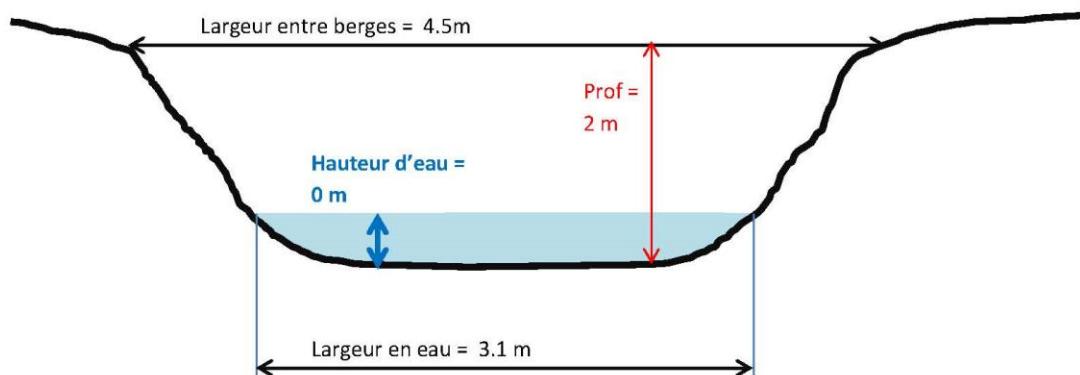
Observations : A sec – sol terreux



Point n° 26 – Craste de la Matouse Aval

Date : 06/11/2014

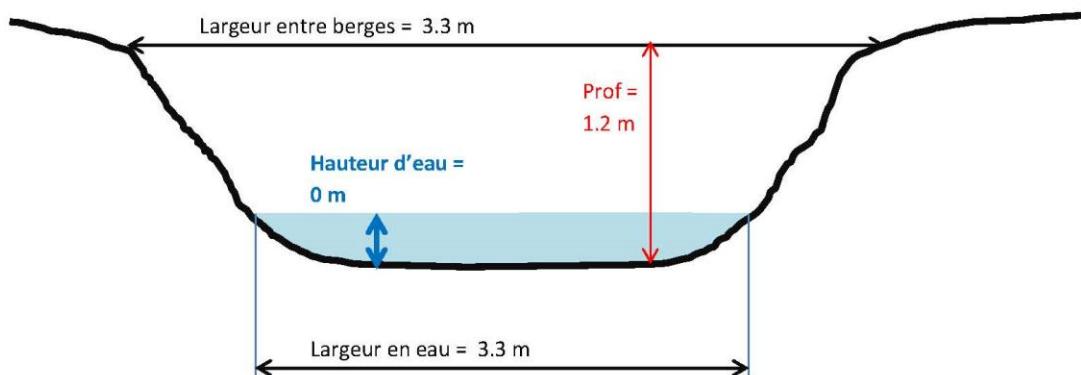
Observations : A sec – Station DREAL



Point n° 27 – Craste de Louley

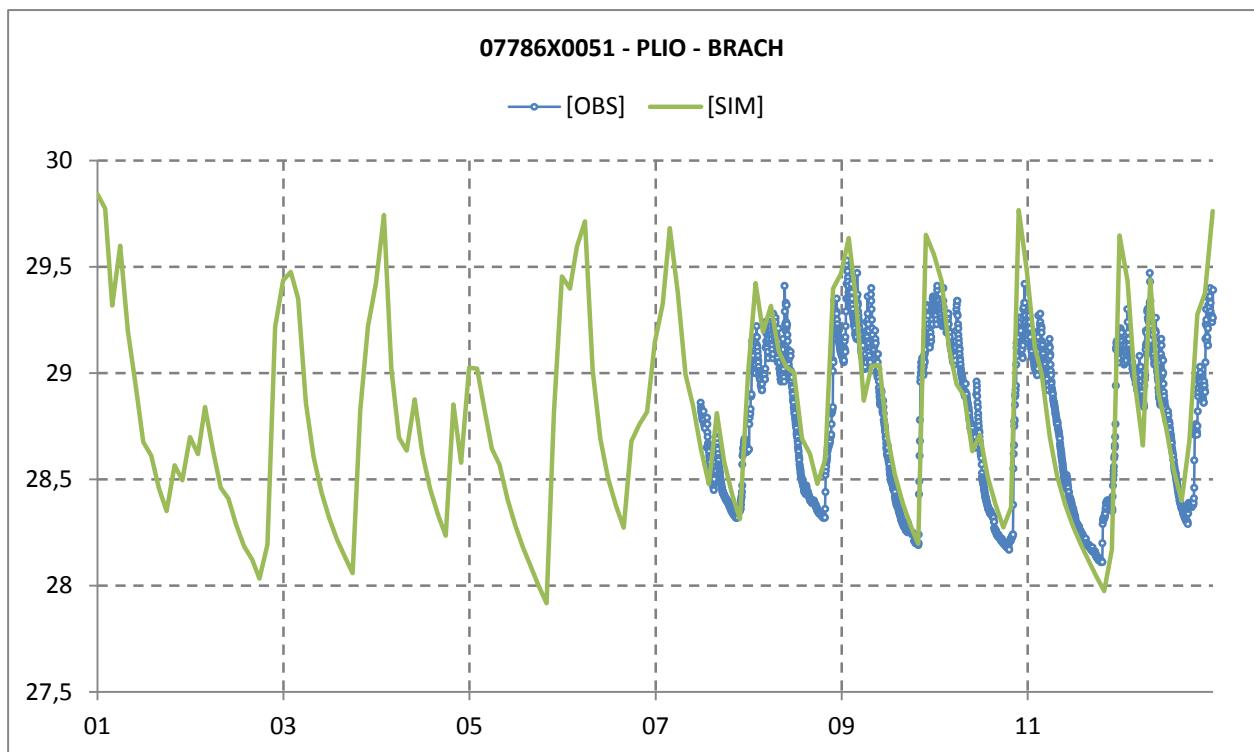
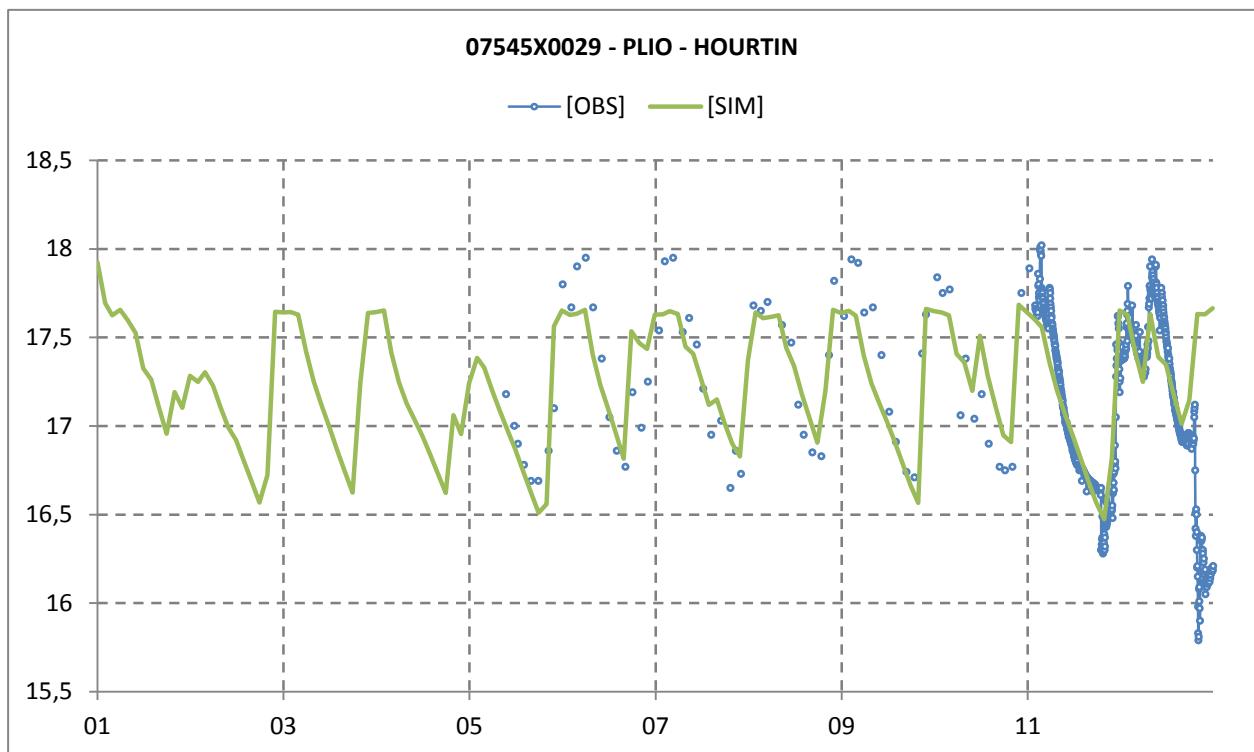
Date : 06/11/2014

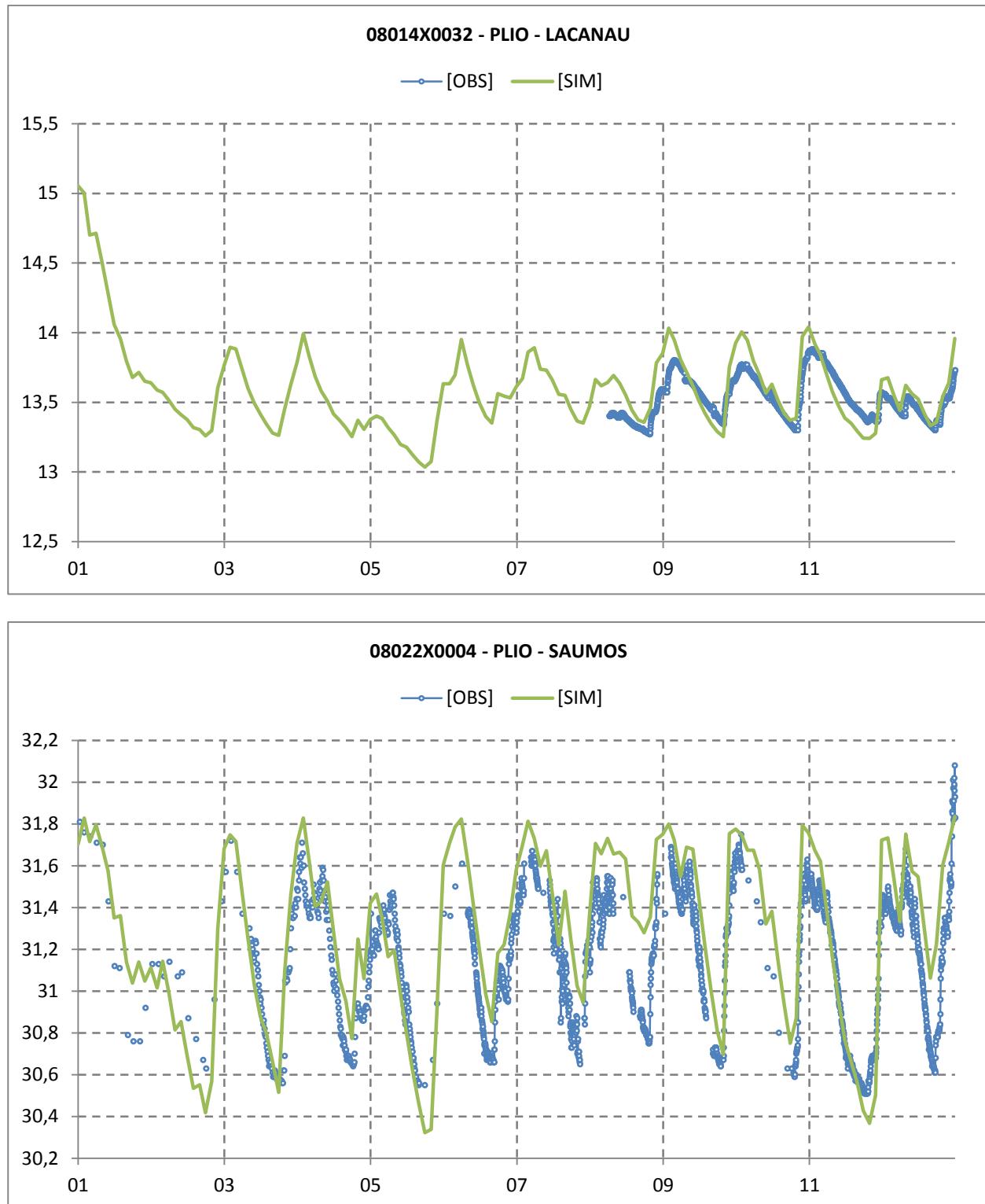
Observations : A sec

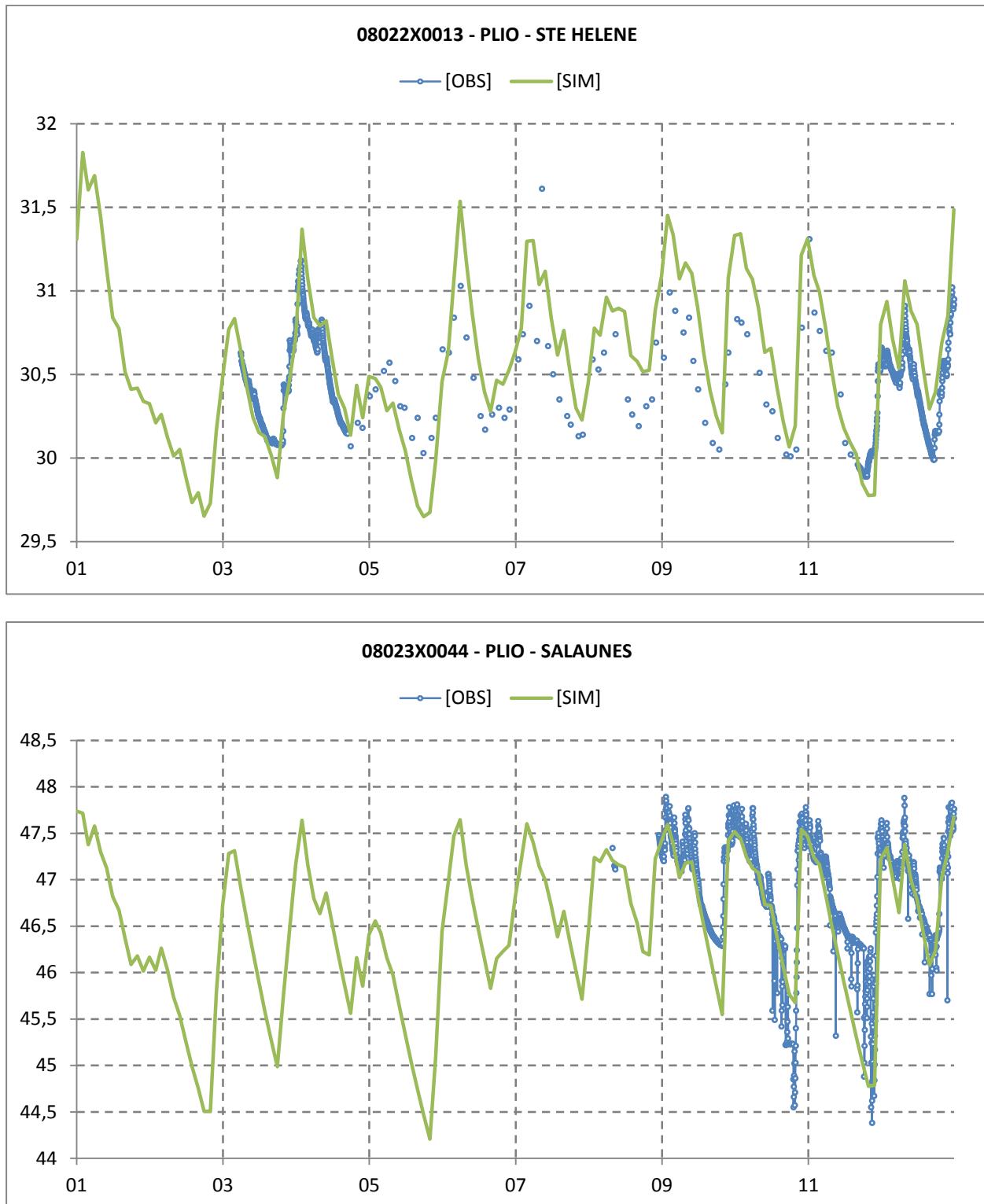


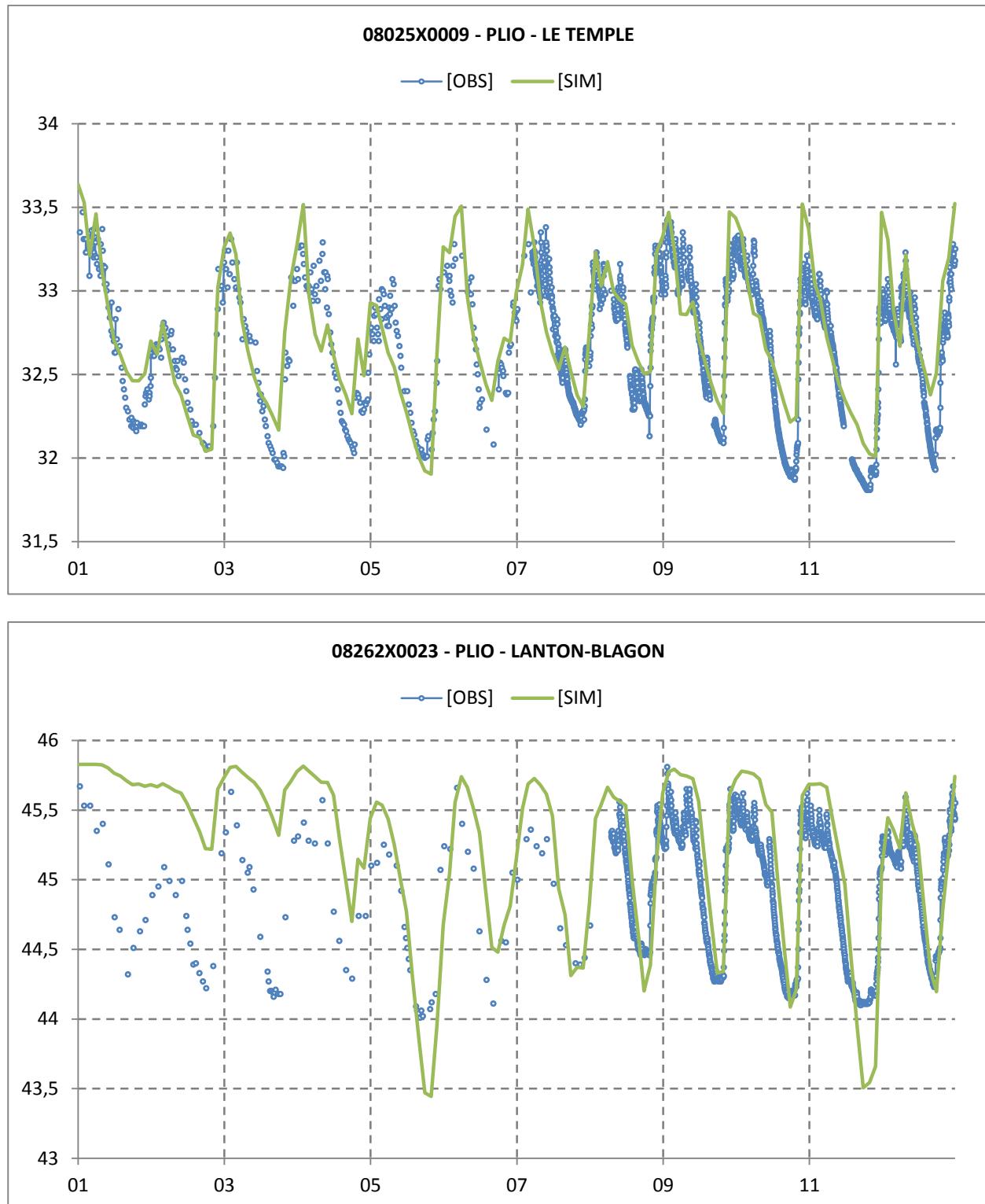
Annexe 6

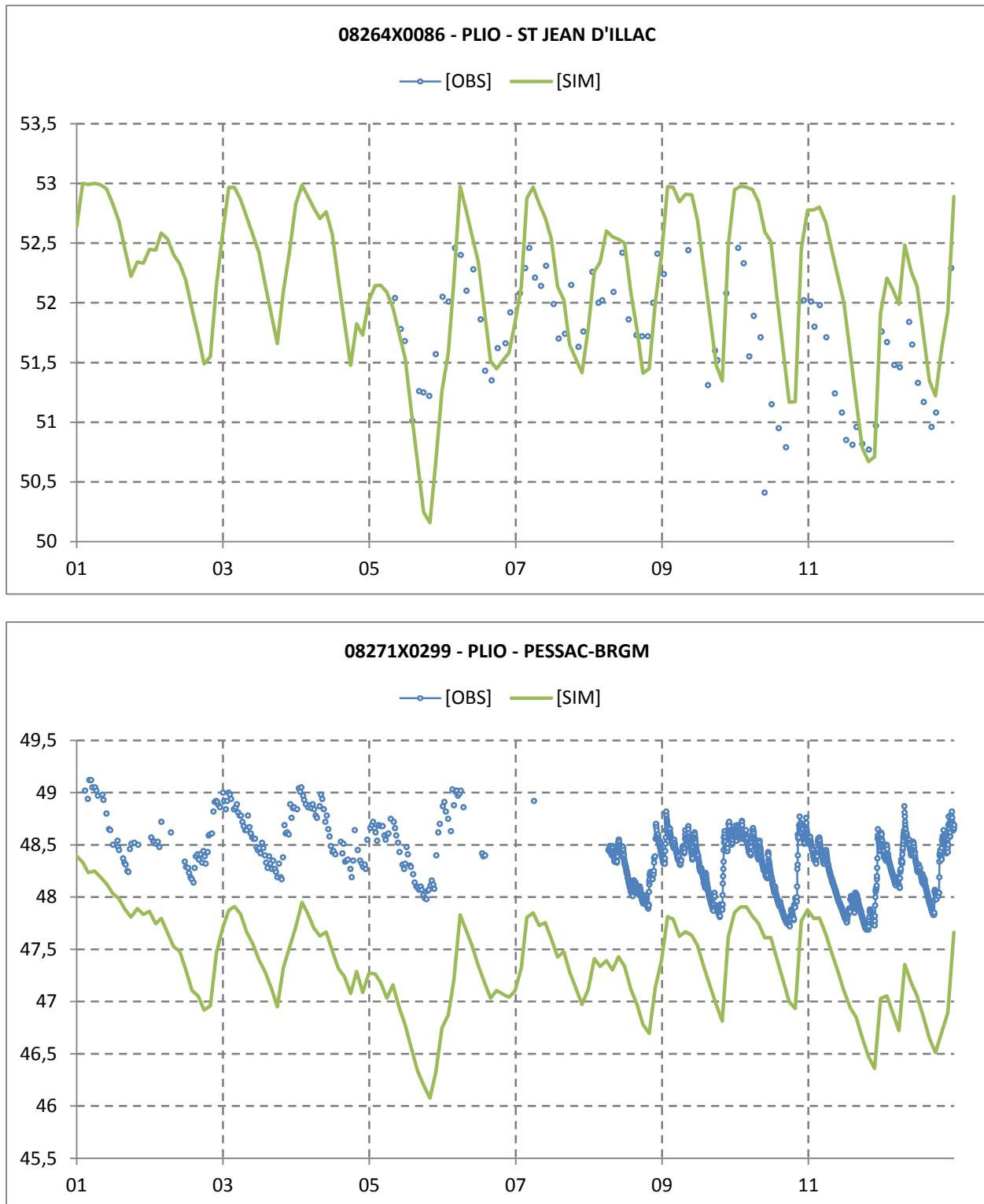
Chroniques de calage

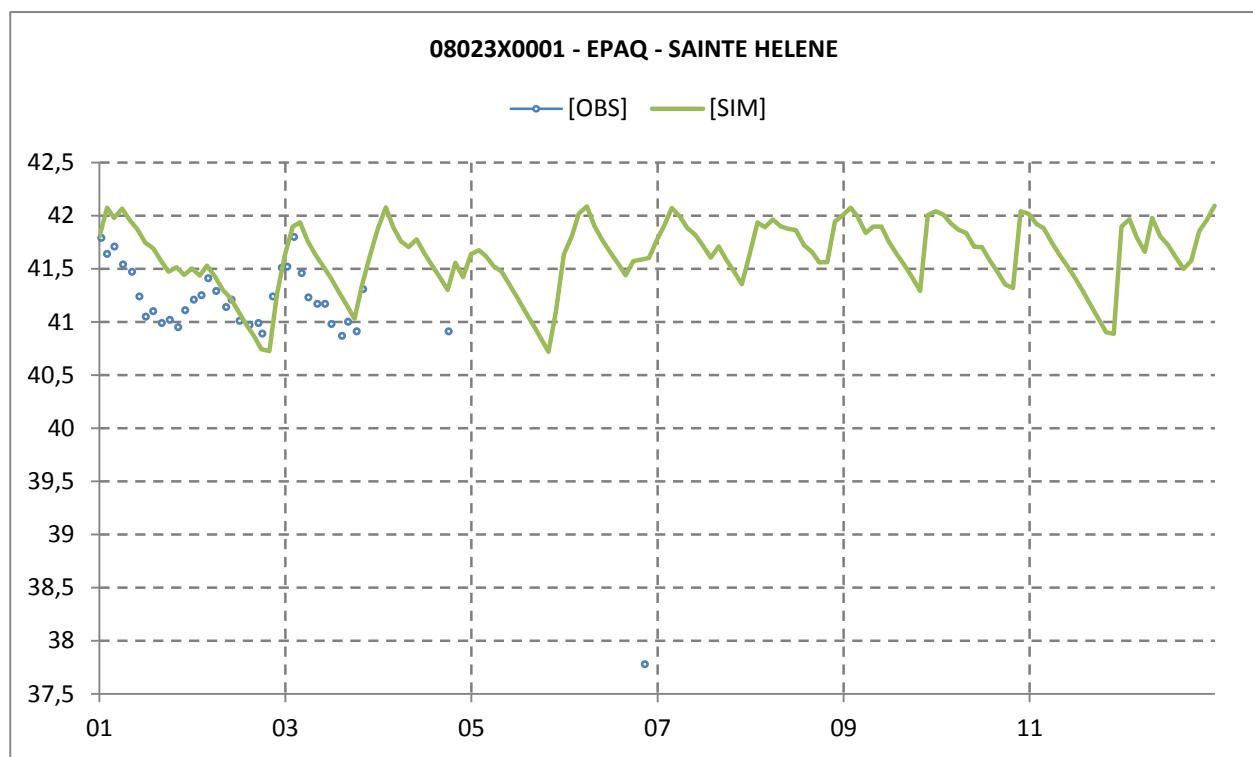
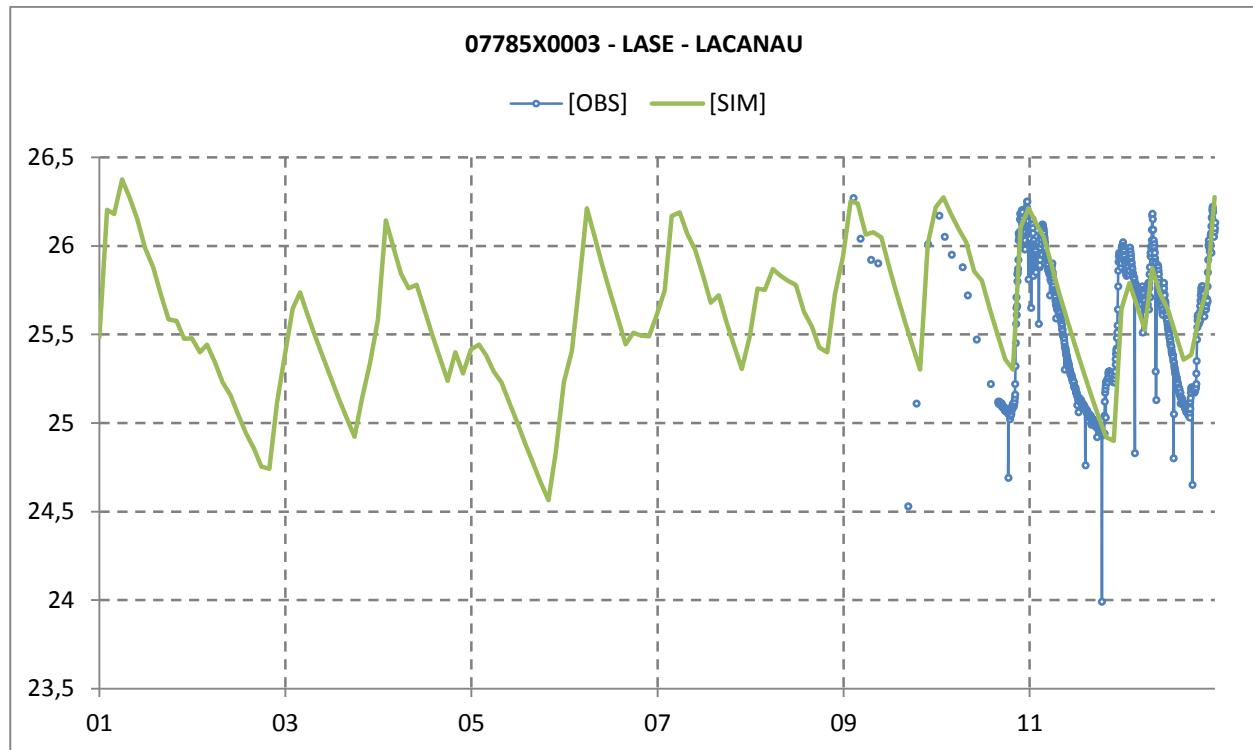


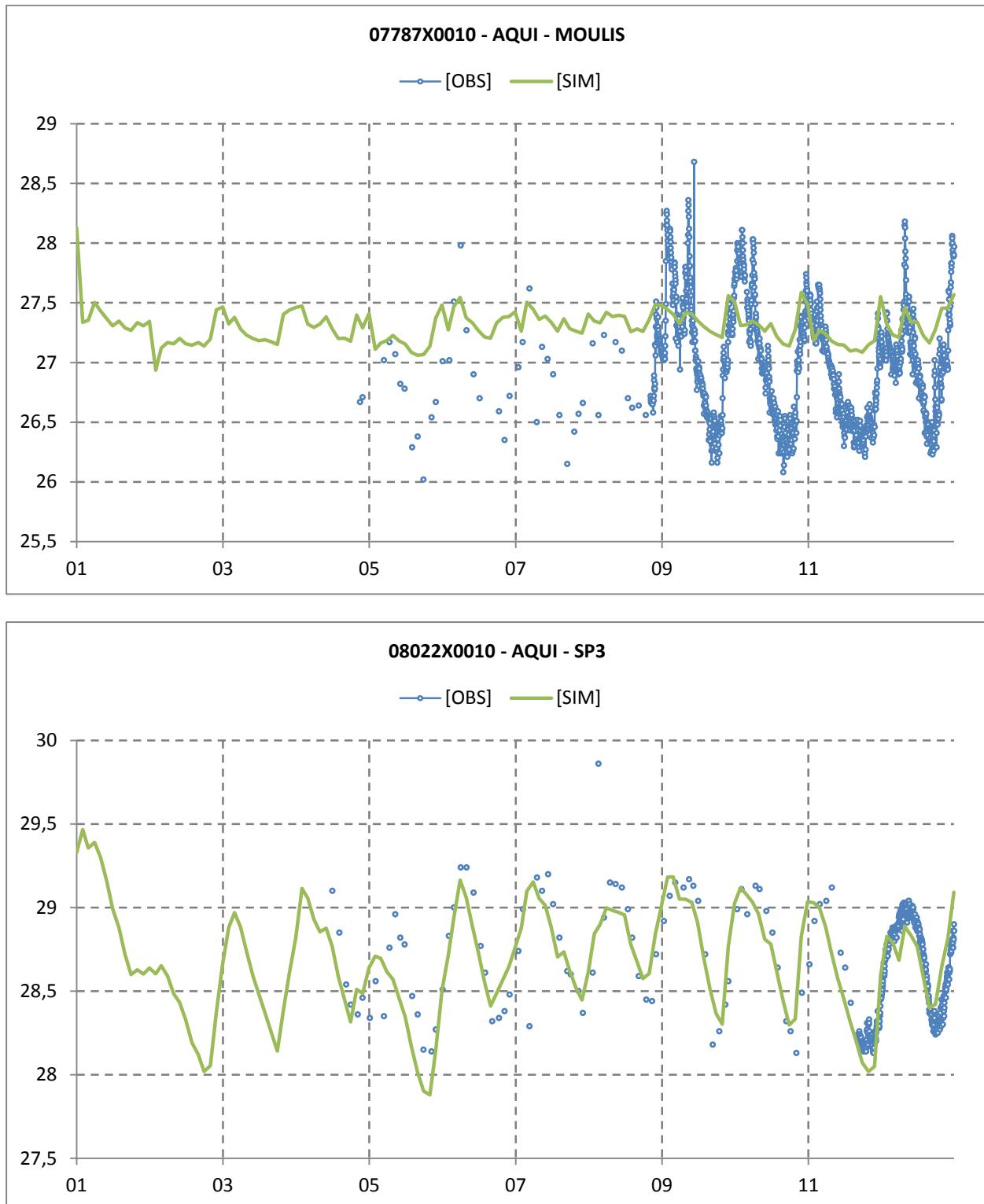


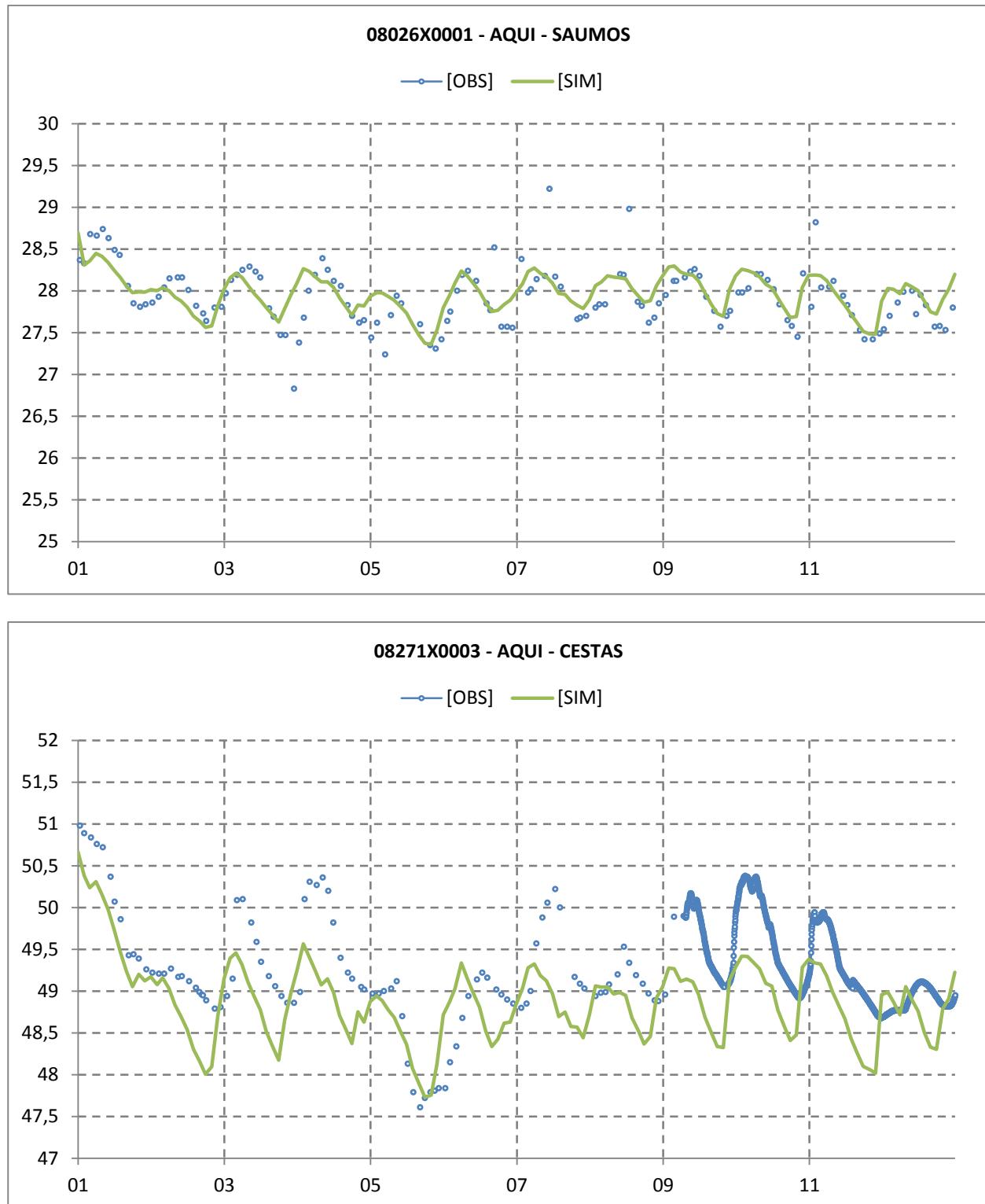


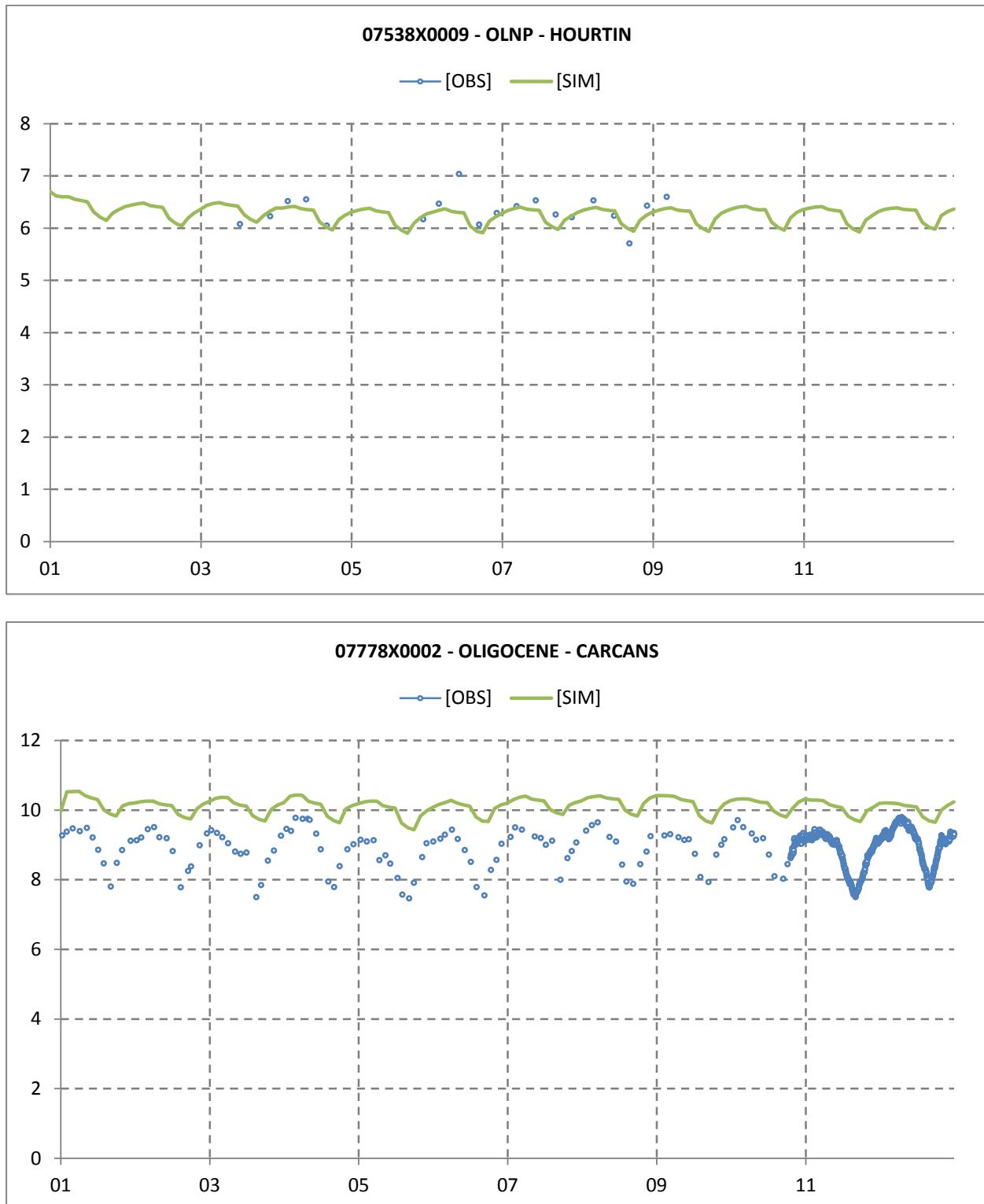


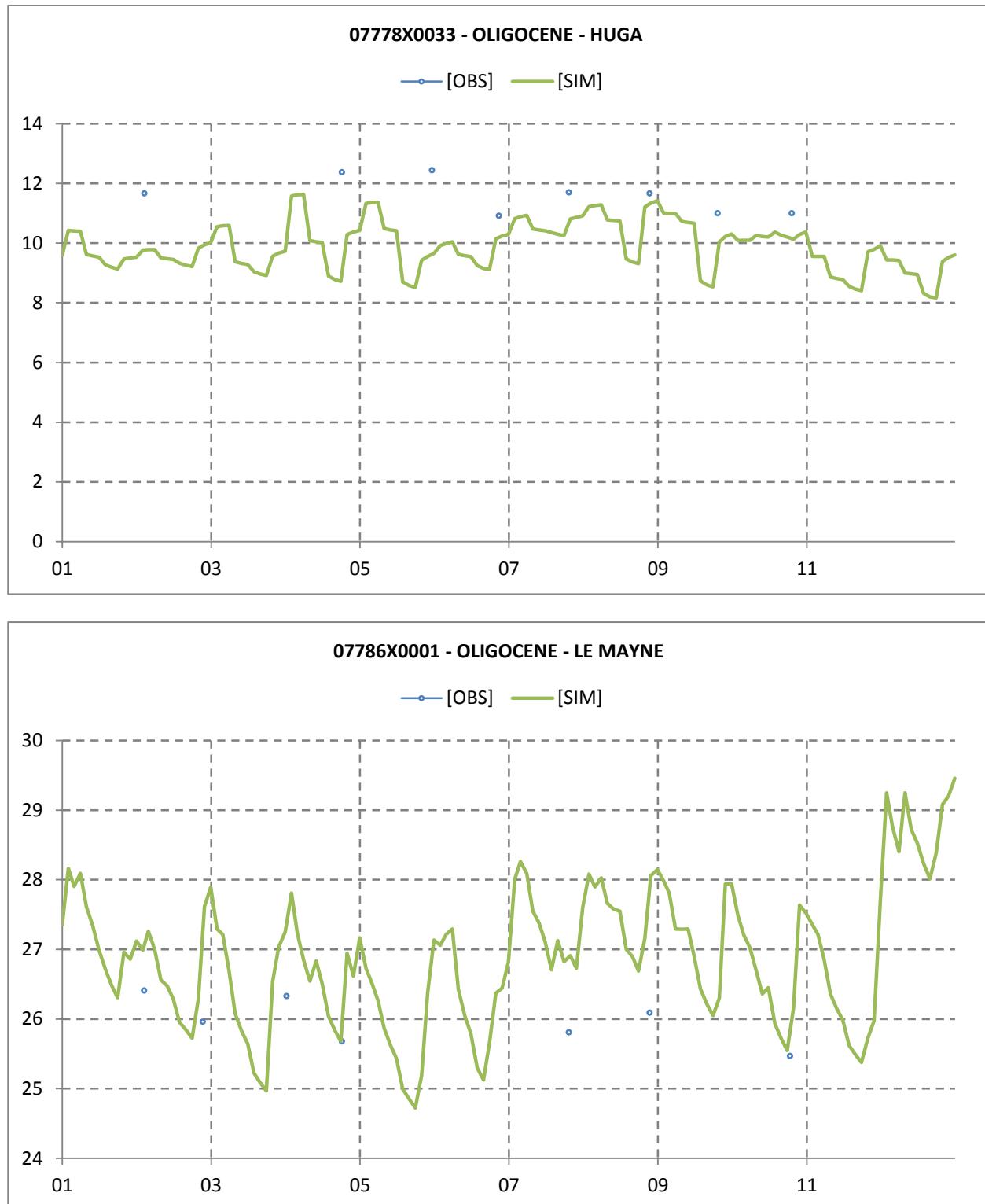


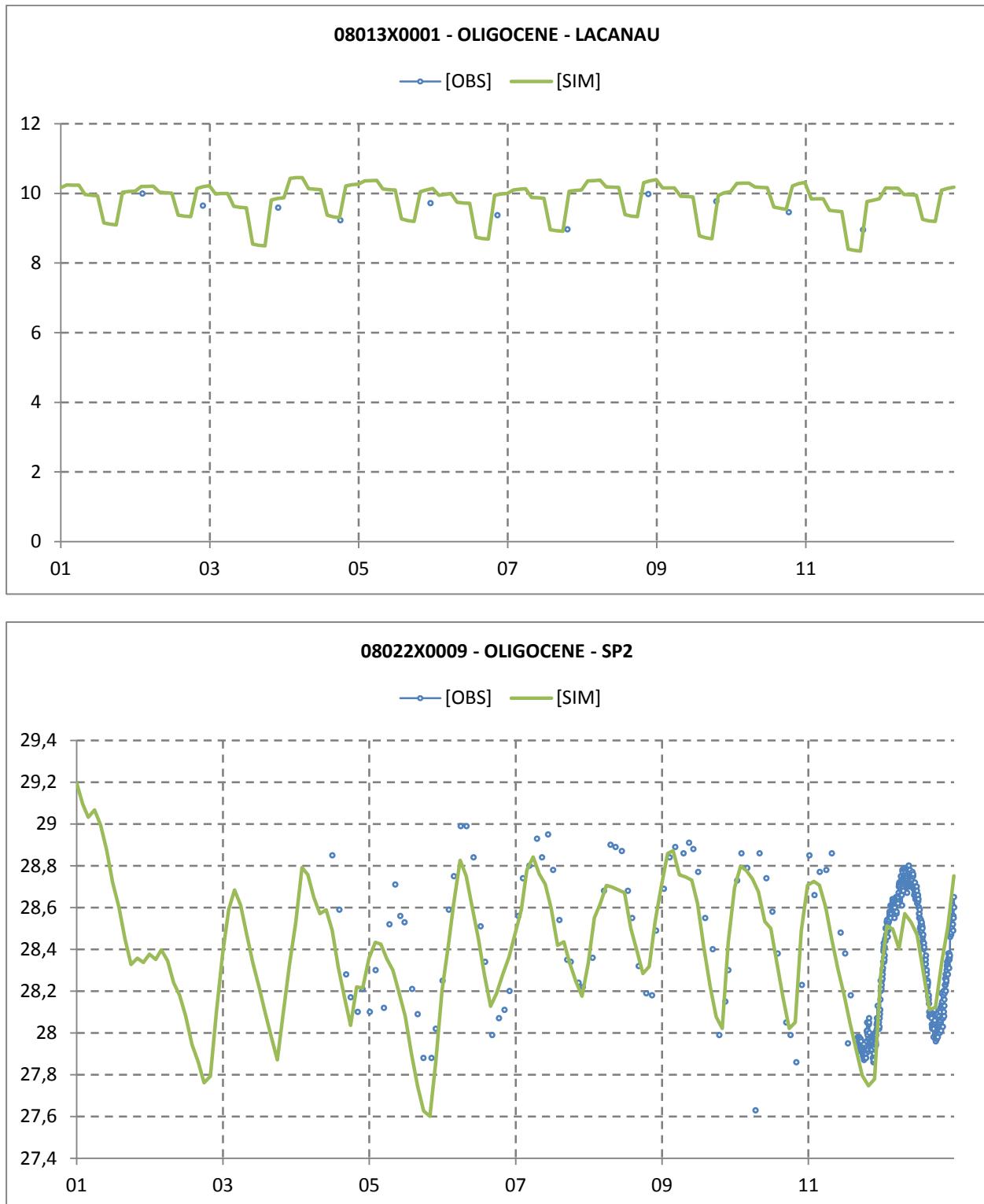


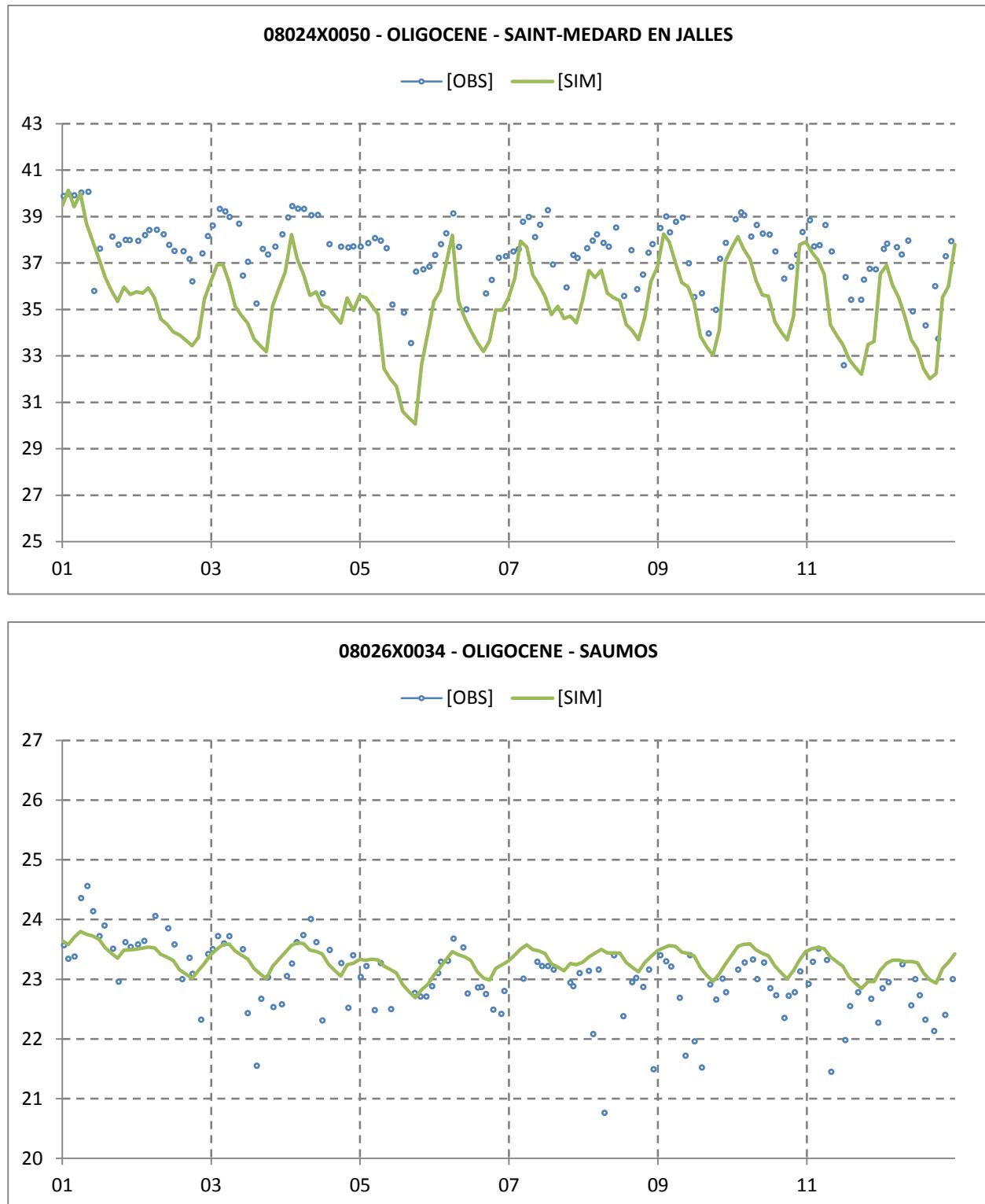


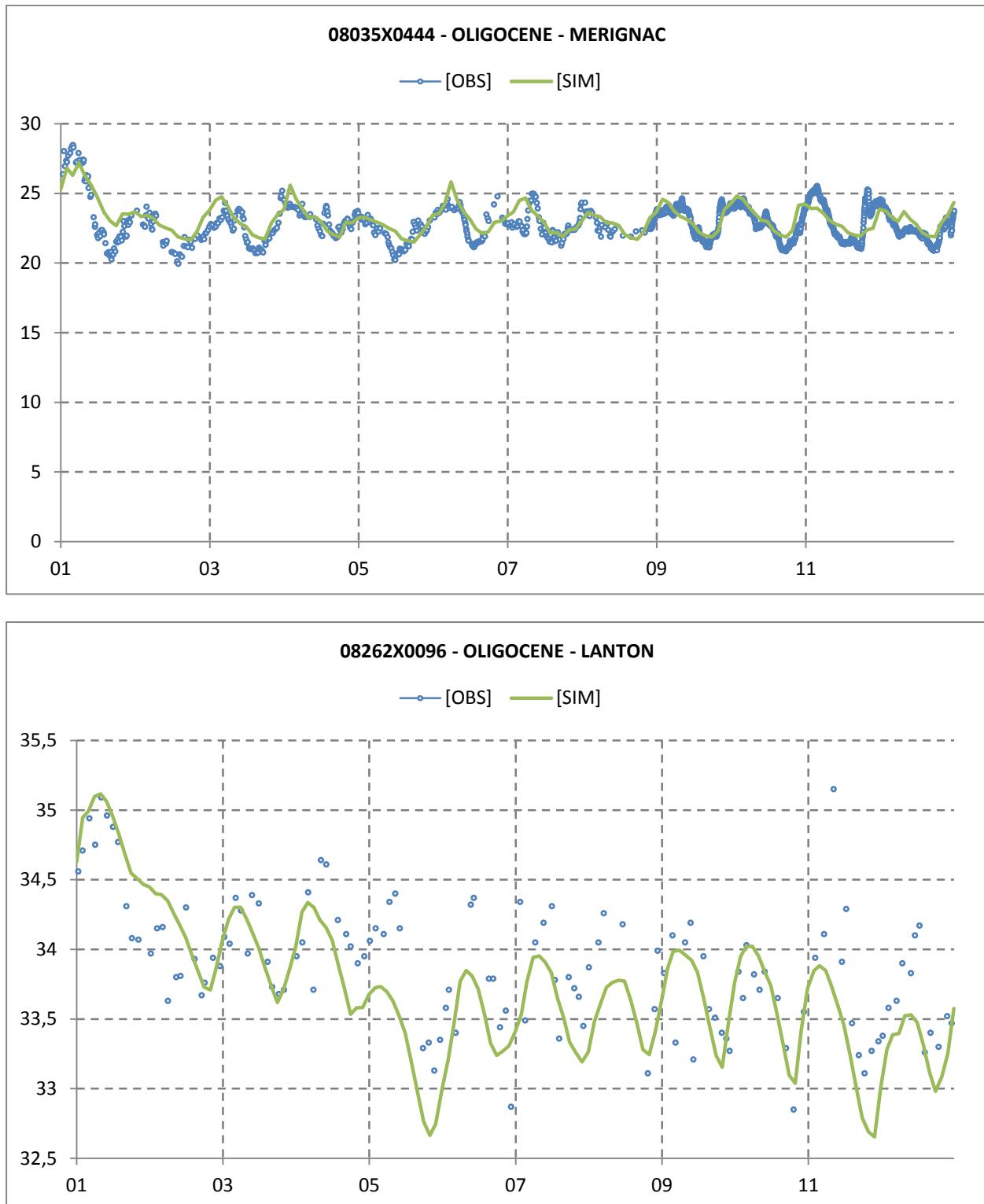


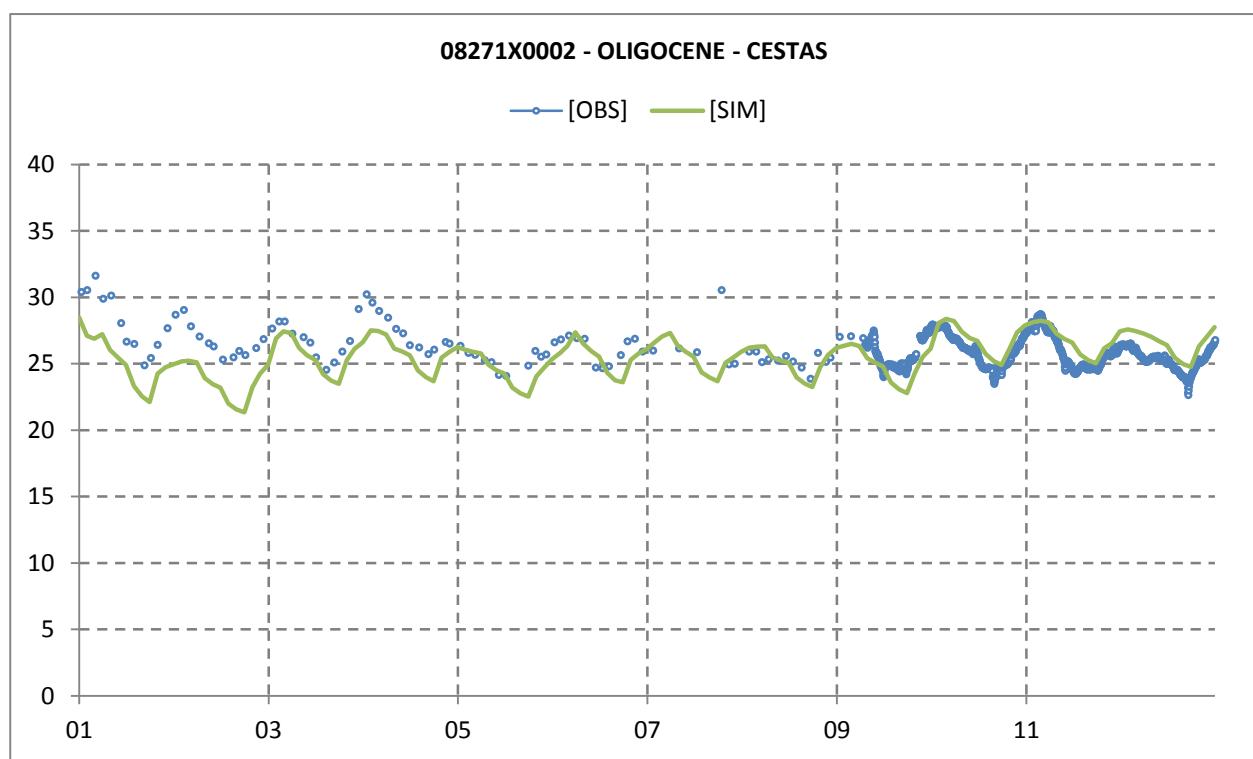
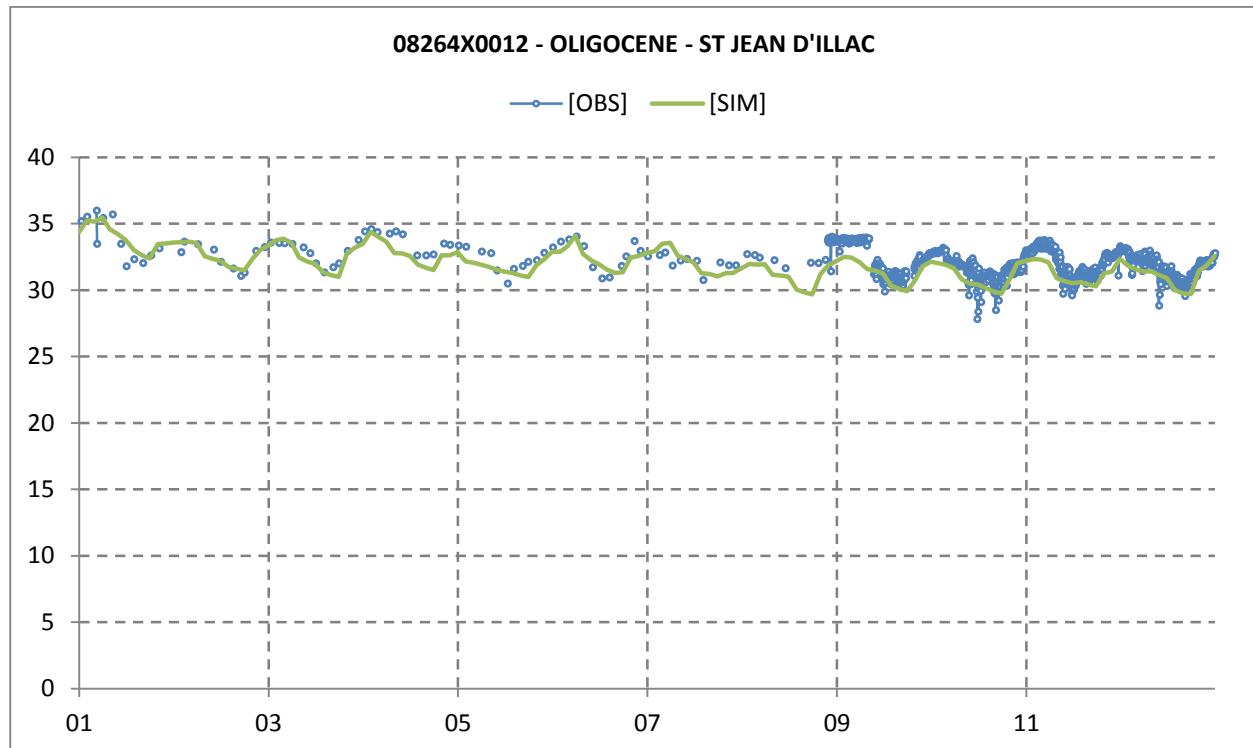


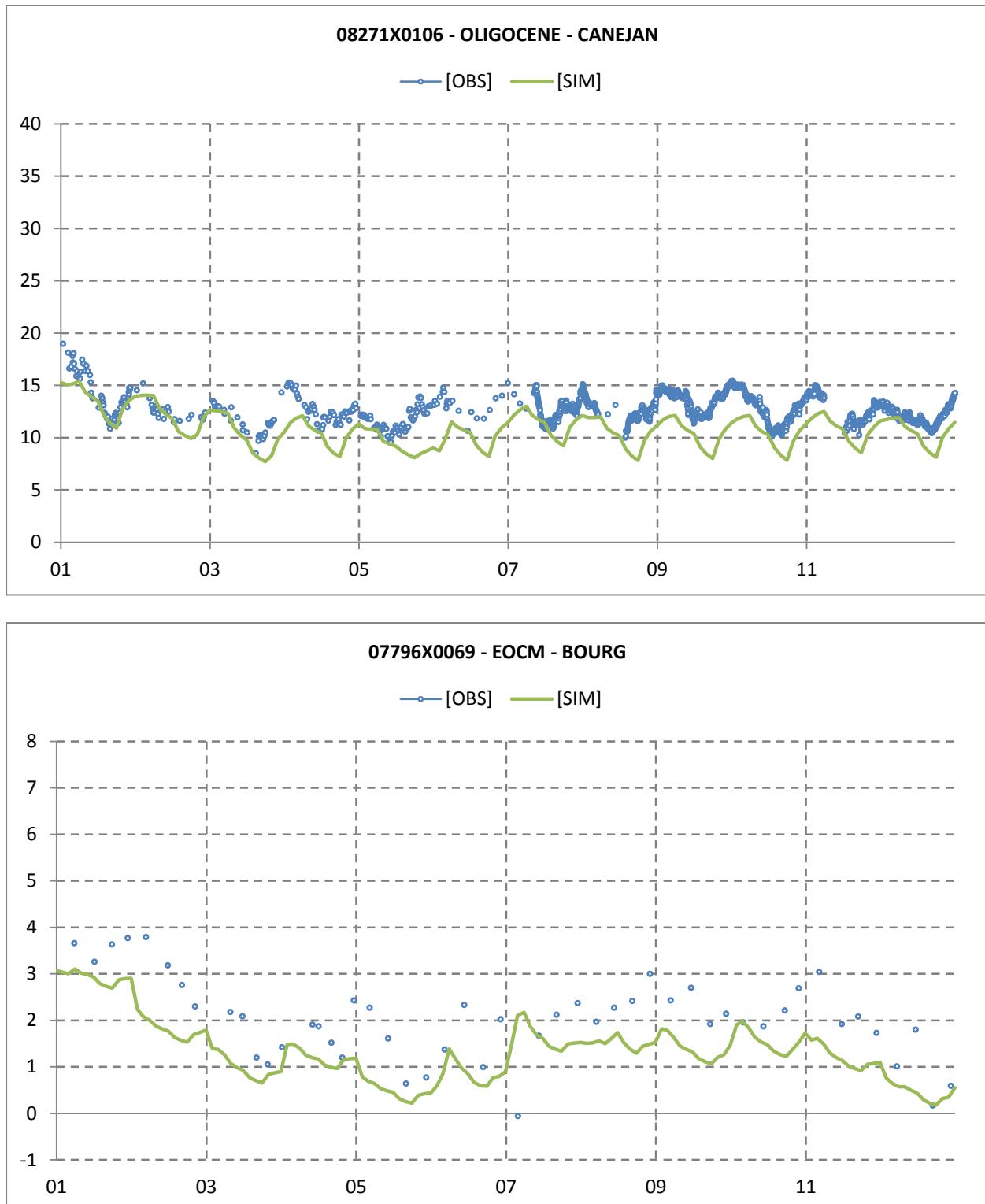


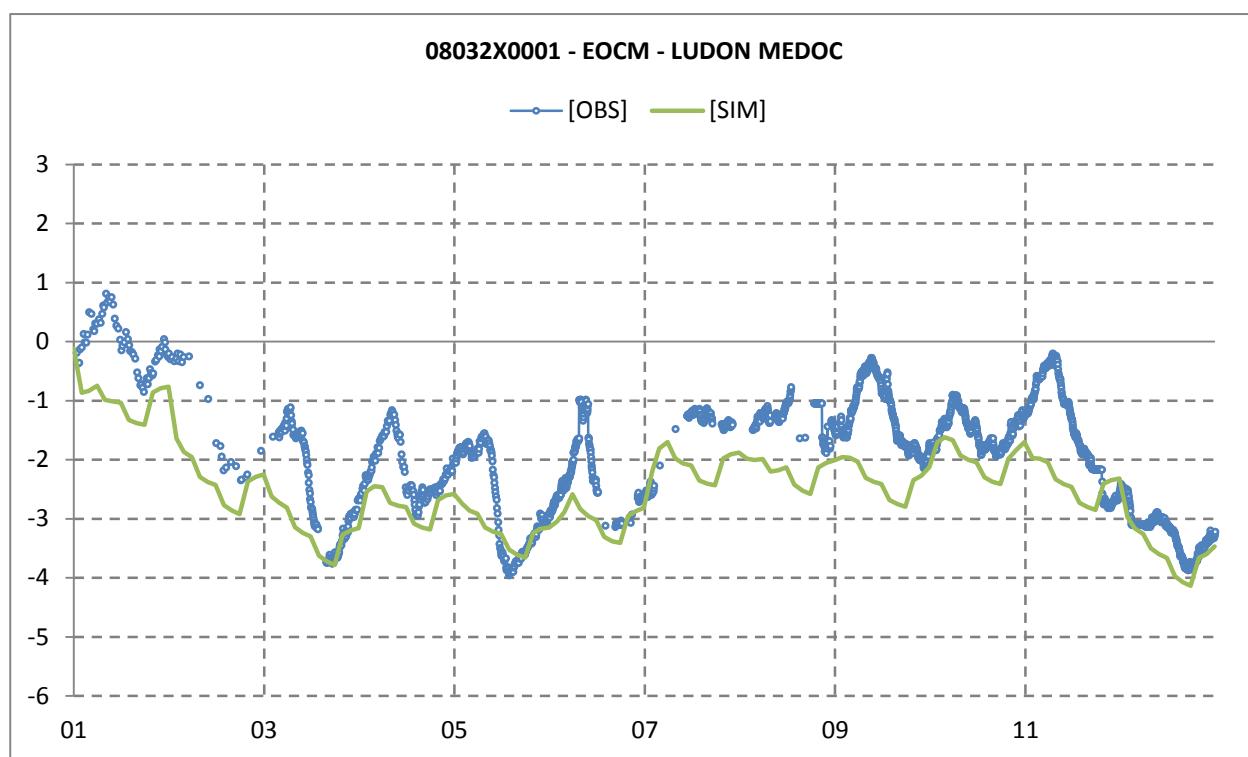
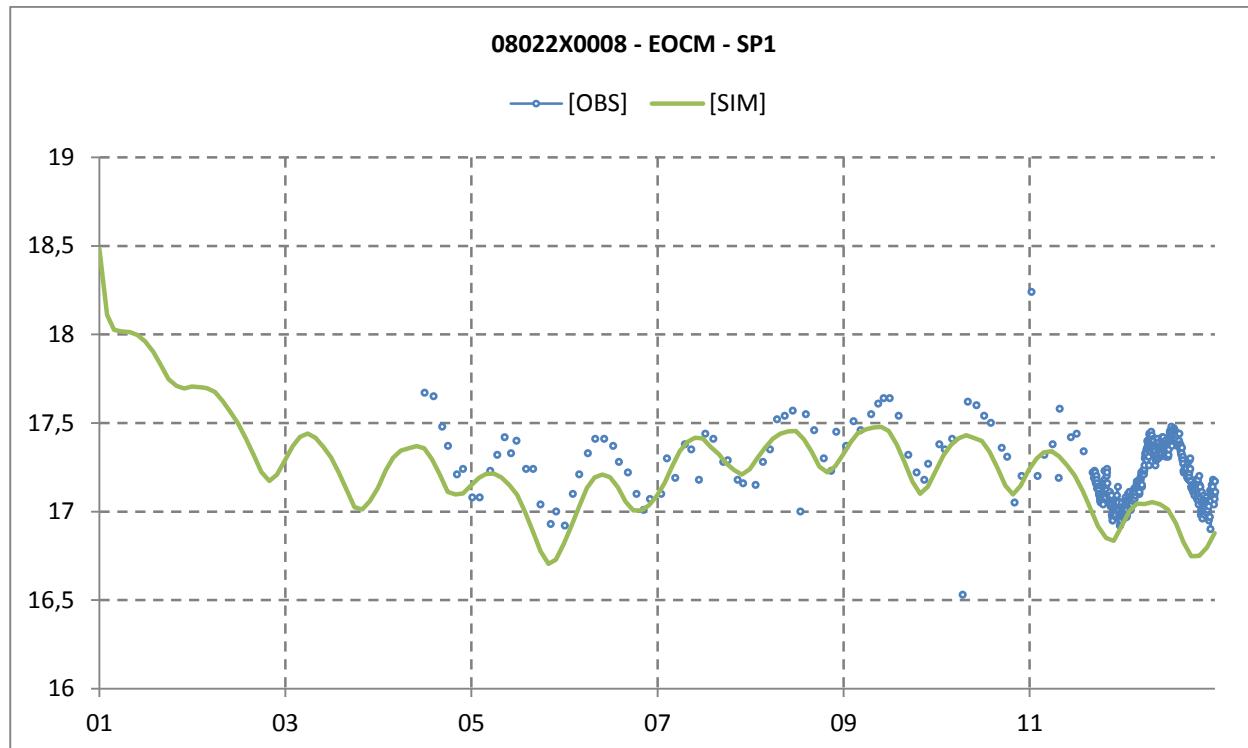


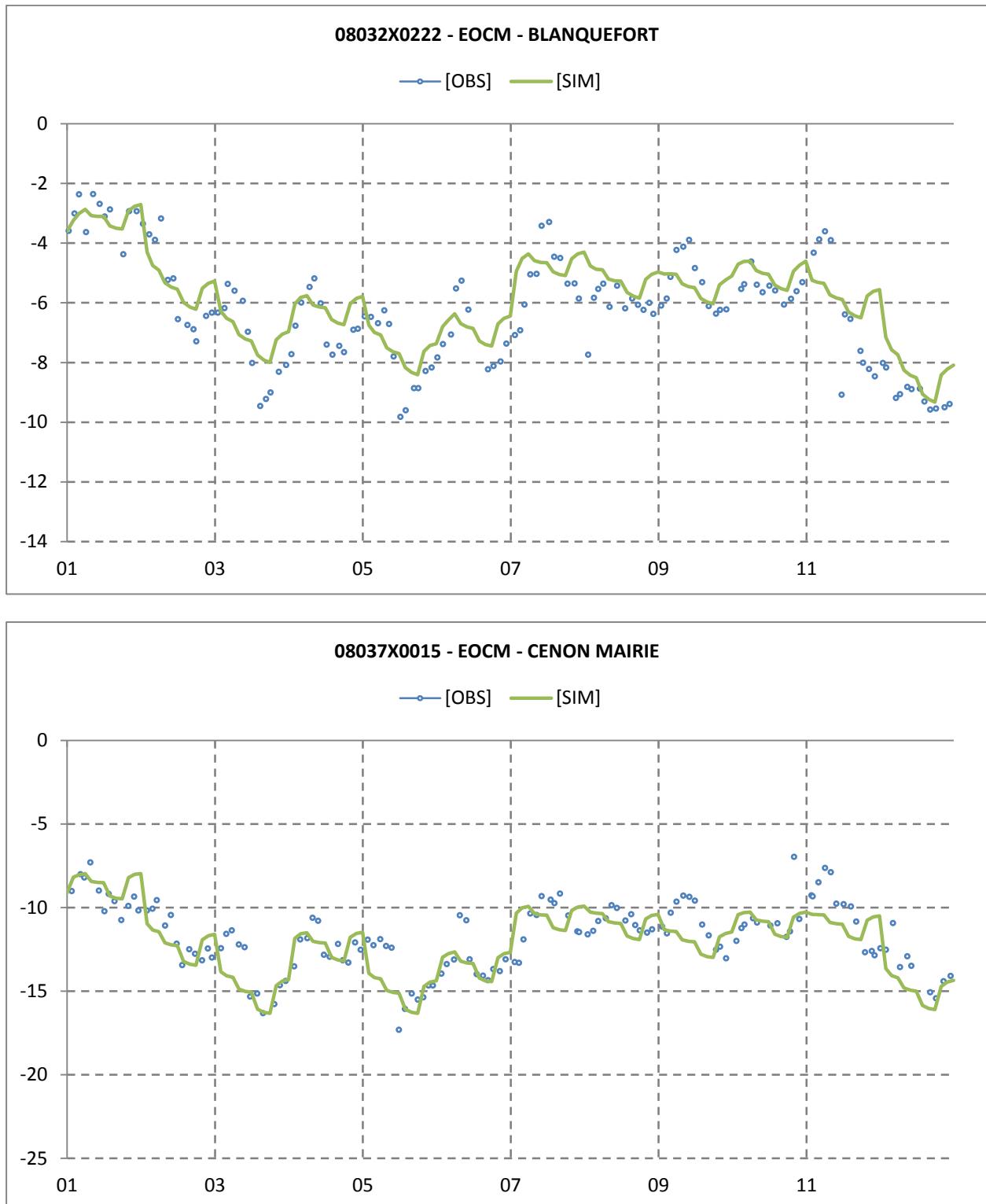


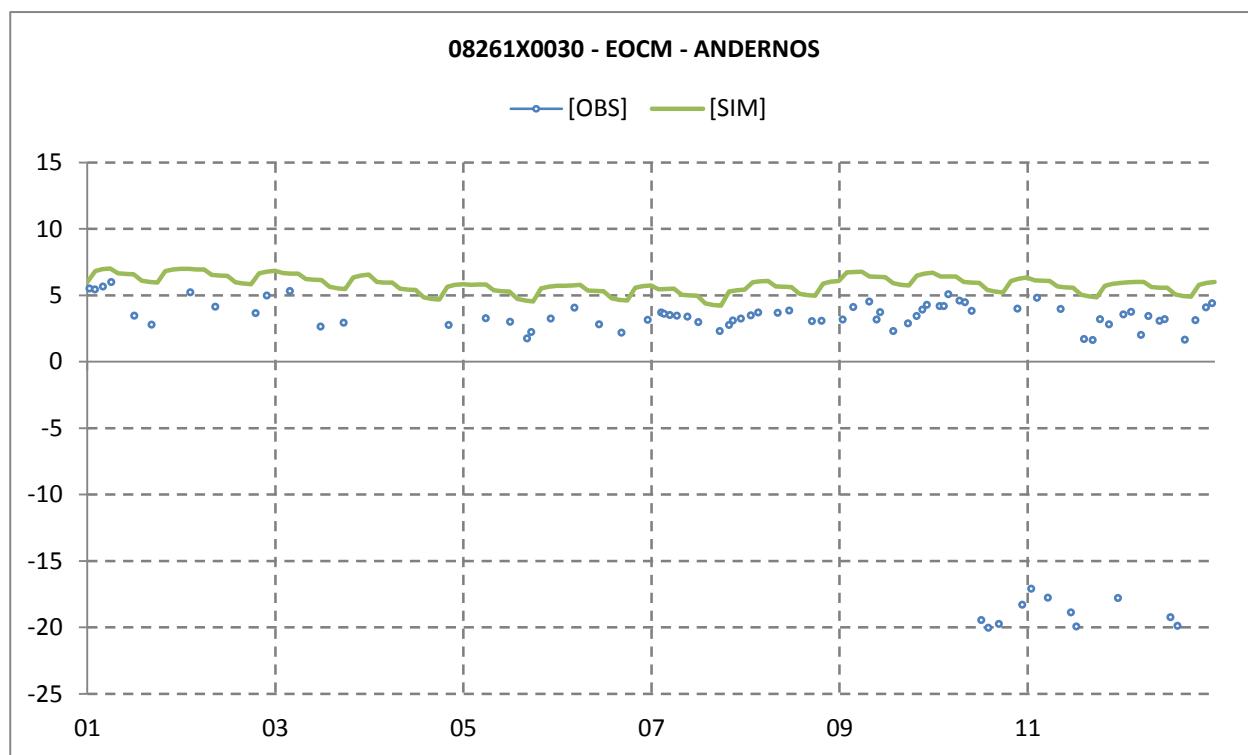
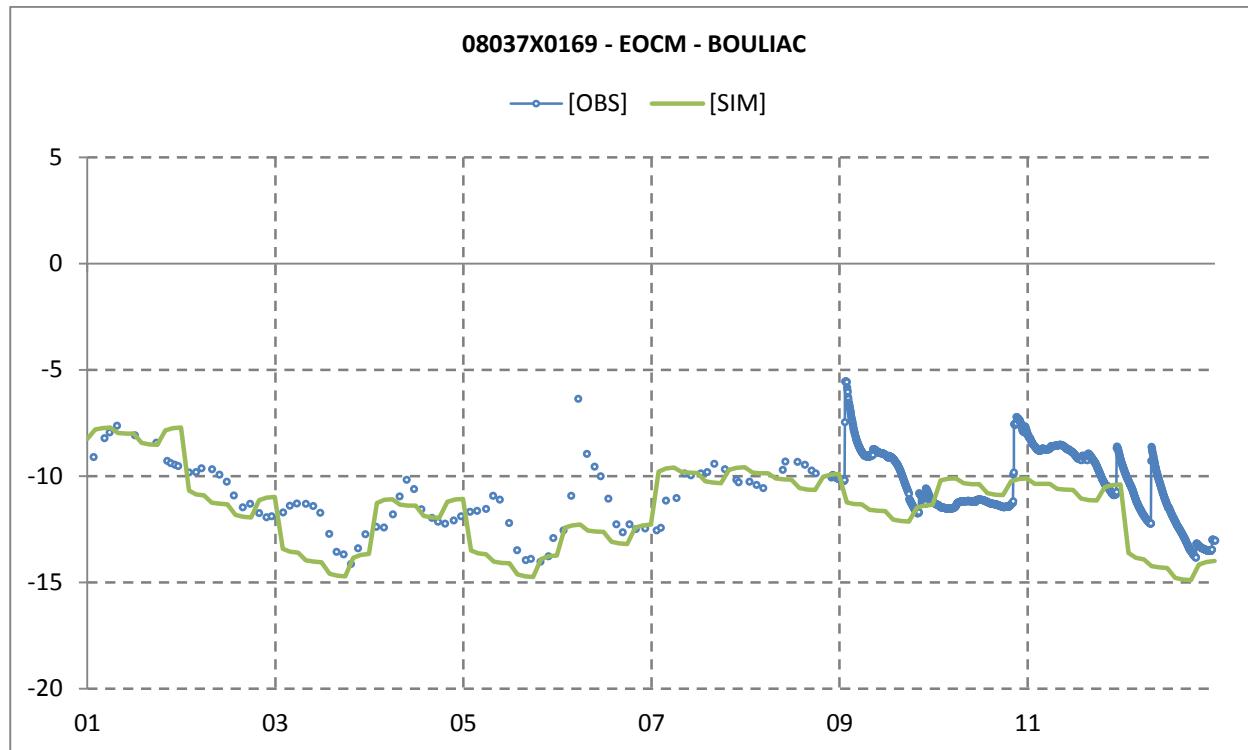


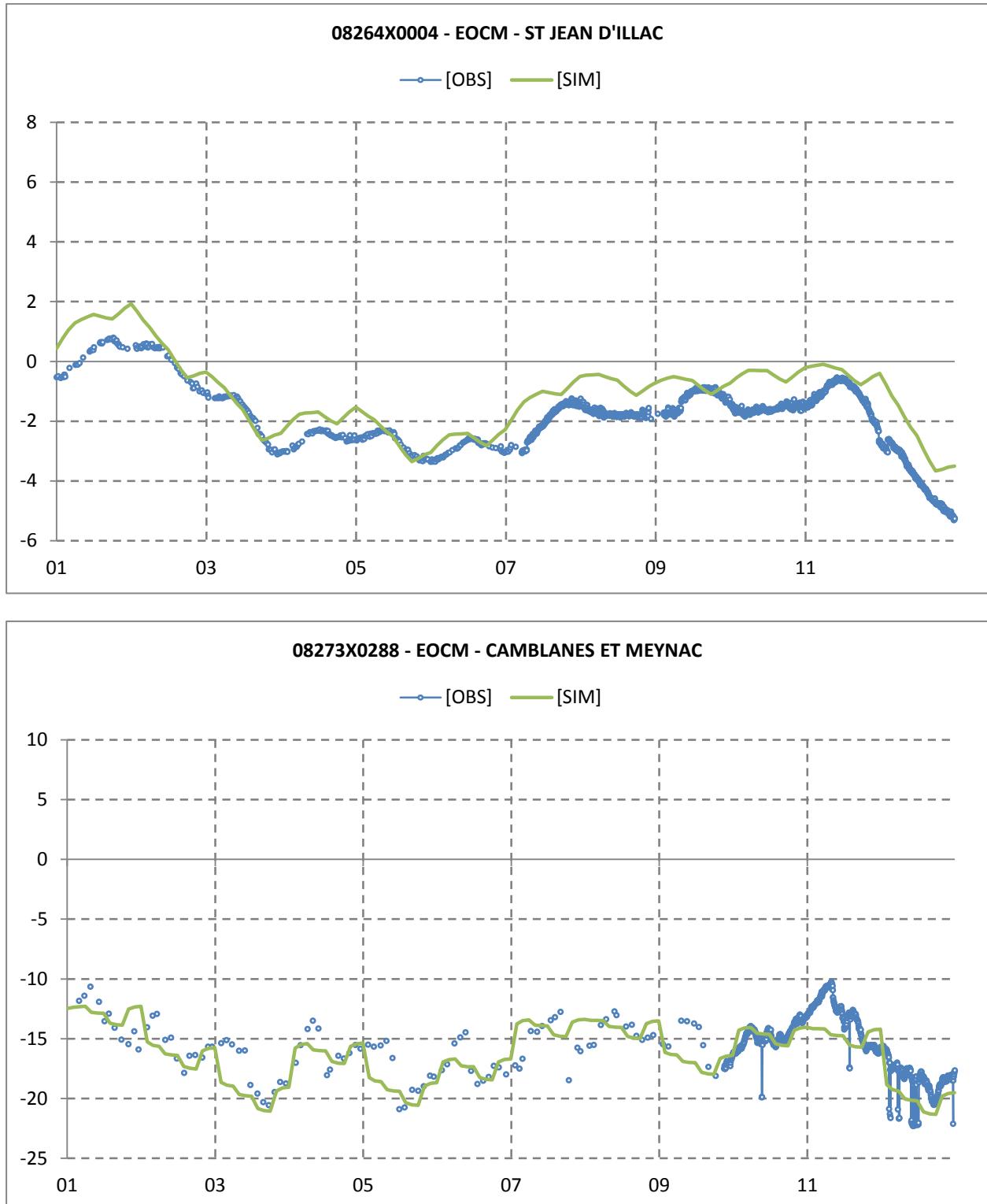














Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45 060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

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