



**Atlas des zones à risques du SAGE  
Nappes Profondes de Gironde  
Problématique du dénoyage de la nappe de l'Oligocène  
au sud de la région Bordelaise  
Actualisation et développement du modèle Oligocène**

Rapport final

BRGM/RP-66390-FR

Novembre 2017





**Atlas des zones à risques du SAGE  
Nappes Profondes de Gironde  
Problématique du dénoyage de la nappe de l'Oligocène  
au sud de la région Bordelaise  
Actualisation et développement du modèle Oligocène  
Rapport final**

**BRGM/RP-66390-FR**  
Novembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM AP15AQI030

**Abasq L. et Saltel M.**

**Vérificateur :**

Nom : A. Wuilleumier  
Fonction : Hydrogéologue  
Date : 03/11/2017



**Approbateur :**

Nom : N. Pédron  
Fonction : Directeur du BRGM  
Nouvelle Aquitaine  
Date : 21/11/2017



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

### **Principe de la modélisation et limites du modèle**

Le principe de la modélisation consiste à reproduire numériquement et avec les données disponibles une réalité complexe pour ensuite réaliser des simulations diverses (prévisions dans le temps...). Les modèles hydrogéologiques permettent de reproduire les écoulements souterrains à partir des équations générales qui les décrivent mathématiquement. Il s'agit de déterminer la charge hydraulique (variable inconnue) sur les éléments d'un maillage en fonction du temps et à partir de paramètres hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement), de conditions aux limites et de conditions initiales.

Les méthodes numériques consistent en une **discrétisation** du domaine d'étude :

- dans l'**espace** (maillage),
- dans le **temps** pour les régimes transitoires.

Dans chaque maille est intégrée des données **moyennées** à l'échelle de maille sur la géométrie (topographie, profondeur d'une couche géologique), les caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité et emmagasinement). Concernant les données sur cours d'eau (largeur, longueur, cote de fond de rivière, hauteur d'eau, pente...), celles-ci font l'objet de traitements spécifiques, le réseau hydrographique étant une surcouche du modèle hydrodynamique souterrain avec ses caractéristiques géométriques propres et ses paramètres étendus à tout un tronçon (un tronçon est la longueur du cours d'eau dans une maille).

A chaque stade de construction du modèle, des **approximations** doivent donc être réalisées. Pour reproduire au mieux cette réalité, des paramètres inconnus (particulièrement les paramètres hydrodynamiques) du modèle doivent être restitués par le modèle lors de la phase de calage. Les valeurs calculées par le modèle (cartographie des écoulements, chroniques de niveaux d'eau) sont comparées aux données observées sur le terrain. Une fois le calage jugé satisfaisant, le modèle peut être utilisé pour faire des simulations à partir de différents scénarios.

Les **objectifs de la modélisation** qui sont par exemple de i) restituer le comportement hydrodynamique d'un système aquifère multicouche régional, ii) prévoir l'impact hydrogéologique d'un champ captant, iii) optimiser l'implantation et les caractéristiques d'un doublet géothermique... vont **conditionner** l'extension de la zone à modéliser et donc **l'échelle spatiale** de modélisation (locale, intermédiaire, régionale) et donc aussi l'interprétation des résultats du modèle qui pourra être réalisée. En fonction de cette échelle de travail, on ne pourra pas demander la même précision des résultats, notamment sur le calage. L'écart relatif acceptable entre le calage et la réalité sera donc très différent, un très bon calage pourra être demandé sur un modèle très local mais ne pourra pas être exigé à une échelle régionale. Par ailleurs, en fonction de la complexité hydrogéologique, géologique et structurale de différents secteurs modélisés, les résultats observés seront plus ou moins bien restitués.

**Mots-clés** : Oligocène, zone à risque, dénoyage, modélisation géologique, modélisation hydrodynamique, gestion de la ressource en eau

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

**Abasq L. et Saltel M.** (2017) - Atlas des zones à risques du SAGE Nappes Profondes de Gironde - Problématique du dénoyage de la nappe de l'Oligocène au sud de la région Bordelaise - Actualisation et développement du modèle Oligocène. Rapport final. BRGM/RP-66390-FR, 54 p., 41 fig., 7 ann.

## Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le cadre du **SAGE** « Nappes profondes de Gironde » (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) approuvé en 2003 pour sa version initiale et en 2013 pour sa version révisée (SMEGREG, 2013). La nouvelle version du SAGE Nappes Profondes de Gironde stipule, dans le cadre de **la disposition 5** du **PAGD** - Tome 2 (Plan d'Aménagement et de Gestion Durable), que l'Atlas évolutif des zones à risques, élaboré entre 2003 et 2011, a identifié les risques suivants comme avérés et devant faire l'objet de mesures de gestion en pression :

- risque d'intrusion d'eau salée dans le réservoir de l'Eocène en bordure estuarienne de la Pointe de Grave d'une part et dans les environs de Pauillac d'autre part ;
- dénoyage de l'aquifère oligocène en périphérie de l'agglomération bordelaise (dénoyage effectif).

**La disposition 95** indique que le modèle oligocène élaboré pour l'Atlas des zones à risques (Saltel et al., 2010) est le modèle de référence qui sert à l'élaboration des règles de gestion de l'Oligocène. Les nouveaux prélèvements susceptibles d'avoir un impact sur les zones à risques de dénoyage (ZAR) feront l'objet d'une simulation au sein du modèle Oligocène pour vérification de la comptabilité avec les règles de gestion.

Le présent rapport s'intéresse plus spécifiquement au réservoir de l'Oligocène qui constitue une des principales ressources en eau potable du département de la Gironde. Cette nappe, d'intérêt stratégique, est fortement influencée par les prélèvements qui induisent depuis de nombreuses années un dénoyage progressif de certains secteurs susceptibles de mettre en péril la ressource tant du point de vue quantitatif que qualitatif. En conséquence, cette zone à risques a été jugée prioritaire par la **CLE** (Commission Locale de l'Eau) du SAGE Nappes profondes de Gironde pour l'établissement de règles de gestion en adéquation avec les objectifs du SAGE. Le travail réalisé dans le cadre de cette étude a abouti à la création d'un modèle hydrodynamique intégrant des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le réservoir de l'Oligocène.

L'objectif de cette étude, co-financée par le **SMEGREG** (Syndicat Mixte d'Etude pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde) est de mettre à jour le modèle géologique et hydrogéologique développé dans le cadre de la phase 2 de l'Atlas des zones à risques par le BRGM (Mod\_Oligo V1-2007). Cette actualisation a été réalisée en se basant sur les données de terrains acquises dans le cadre du projet RODEO (Saltel et al., 2012 ; Saltel et al., 2015) pour bénéficier des dernières investigations (données de forages, piézométrie, débit des cours d'eau, ...). Elle a également permis d'actualiser les données d'entrée (débits prélevés, recharge) et de sortie (chroniques piézométriques d'observations) pour prolonger la période de simulation jusqu'en 2014. La nouvelle version du modèle (Mod\_Oligo V2-2014), simule les écoulements au pas de temps trimestriel entre 1972 et 1999 et mensuel entre 2000 et 2014. Le pas de temps mensuel permet ainsi de mieux restituer les variations saisonnières de piézométries en reproduisant plus finement les variations temporelles de la recharge et les différents régimes d'exploitation de la ressource (période d'irrigation et pics d'exploitation pour l'alimentation en eau potable).

Par ailleurs, la prise en compte de la recharge a été améliorée en intégrant les données spatialisées (Pluie et évapotranspiration potentielle « ETP ») issues des grilles SAFRAN de Météo France, comprenant 42 mailles carrés de 8 km de côté sur l'extension du modèle.

A partir de ces données spatialisées le calcul des bilans hydroclimatiques a été réalisé à l'aide du schéma GARDENIA (Thiéry, 2003) intégré dans le code MARTHE permettant ainsi la partition de la pluie efficace en recharge et ruissellement. Le travail d'actualisation réalisé ici permet de bénéficier d'un outil opérationnel à jour pouvant servir pour réaliser des simulations destinées à appuyer les décideurs dans la gestion de cette ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Actualisation du modèle géologique .....</b>	<b>11</b>
2.1. OUTILS ET PRINCIPE.....	11
2.1.1.Principe général de modélisation .....	11
2.1.2.Mise à jour de la base de données .....	12
2.2. ÉLABORATION DU MODELE .....	16
2.2.1.Contrôle préalable des données .....	16
2.2.2.Construction.....	17
2.2.3.Structuration des réservoirs modélisés .....	19
<b>3. Actualisation de la modélisation hydrodynamique.....</b>	<b>25</b>
3.1. LOGICIEL - RAPPEL .....	25
3.2. GEOMETRIE DU MODELE .....	26
3.3. ACTUALISATION DES PARAMETRES DU MODELES.....	26
3.3.1.Discrétisation temporelle.....	26
3.3.2.Calcul de la recharge .....	26
3.3.3.Prélèvements.....	30
3.3.4.Réseau hydrographique.....	33
3.4. CALAGE DU MODELE APRES INTEGRATION DES NOUVEAUX DEVELOPPEMENTS.....	35
3.4.1.Points d'observation.....	35
3.4.2.Intégration des paramètres déduits des pompages d'essai.....	37
3.4.3.Calage du modèle en régime transitoire.....	38
3.4.4.Qualité du calage .....	41
<b>4. Accessibilité des données du modèle .....</b>	<b>49</b>
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>51</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>53</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Respect des contraintes d'inégalités.....	12
Figure 2 : Pile stratigraphique du modèle géologique de l'Oligocène .....	13
Figure 3 : Données géologiques utilisées pour l'élaboration du modèle Oligocène .....	14
Figure 4 : SIG "Modèle Oligocène" sous ArcGIS .....	16
Figure 5 : Schéma des horizons modélisés.....	17
Figure 6 : Contrôles de cohérence du modèle géologique à l'aide de coupes verticales .....	18
Figure 7 : Exemple de visualisation 3D du modèle géologique .....	19
Figure 8 : Épaisseur des alluvions.....	20
Figure 9 : Épaisseur des recouvrements quaternaires à miocène moyen .....	20
Figure 10 : Épaisseur du réservoir miocène.....	21
Figure 11 : Épaisseur de l'éponte au toit de l'Oligocène .....	22
Figure 12 : Épaisseur du réservoir oligocène .....	22
Figure 13 : Visualisation 3D du modèle hydrodynamique de l'Oligocène .....	25
Figure 14 : Agencement schématique des différentes couches du modèle hydrodynamique .....	26
Figure 15 : Schéma de fonctionnement de la recharge (Thiéry, Logiciel GARDENIA. version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig, 3 ann, 2003).....	27
Figure 16 : Evapo-transpiration annuelle moyenne fournie sur les mailles SAFRAN (1972-2014) .....	28
Figure 17 : Précipitations annuelles moyennes fournies sur les mailles SAFRAN (1972-2014) .....	28
Figure 18 : Carte régionale de Réserve Utile calculée à partir de la carte pédologique au 250 000 <sup>ème</sup> de l'INRA (Richer de Forges et al, 2015).....	29
Figure 19 : Zones de sols MARTHE .....	30
Figure 20 : Ventilation mensuelle des prélèvements annuels .....	31
Figure 21 : Répartition des volumes prélevés dans la nappe de l'Oligocène .....	32
Figure 22 : Cartographie des prélèvements effectués entre 1972 et 2014 .....	32
Figure 23 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (Thiéry & Amraoui, Hydrological modelling of the Saone basin sensitivity to the soil model, 2001).....	33
Figure 24 : Géométrie d'un tronçon de rivière (Thiéry & Amraoui, Hydrological modelling of the Saone basin sensitivity to the soil model, 2001) .....	33
Figure 25 : Réseau hydrographique du modèle : largeur des cours d'eau modélisés.....	34
Figure 26 : Points d'observation des niveaux piézométriques utilisés pour le calage .....	36
Figure 27 : Localisation des jaugeages utilisés pour le calage du modèle .....	37
Figure 28 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation de la dérivée des rabattements pour diagnostiquer les essais .....	38
Figure 29 : Exemple de comparaison entre valeurs observées et simulées pour 3 piézomètres.....	39
Figure 30 : Exemple de comparaison de la simulation avec les niveaux observés journaliers moyens, les niveaux mesurés dynamique (_dyn) et les niveaux mesurés statiques (figure du haut).....	40
Figure 31 : Comparaison entre débits observés et débits simulés ruisseau du Saucats.....	41
Figure 32 : Comparaison entre débits observés et débits simulés - ruisseau du Gat-Mort .....	41

Figure 33 : Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles .....	42
Figure 34 : Diagramme de dispersion général du modèle .....	43
Figure 35 : Diagramme de dispersion des points simulés dans la nappe du Plio-Quaternaire. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs simulées (barre verticale) et observées (barre horizontale) .....	44
Figure 36 : Diagramme de dispersion des points simulés dans la nappe du Miocène. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs simulées (barre verticale) et observées (barre horizontale) .....	44
Figure 37 : Diagramme de dispersion des points simulés dans la nappe de l'Oligocène. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs simulées (barre verticale) et observées (barre horizontale) .....	45
Figure 38 : Nappe du Plio-Quaternaire - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type .....	46
Figure 39 : Nappes du Miocène (Langhien-Serrvallien Aquitanien) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type .....	46
Figure 40 : Nappe de l'Oligocène - Évolution dans le temps des écarts moyens et de l'écart type .....	47
Figure 41 : Formulaire de téléchargement des données .....	49

## Liste des annexes

Annexe 1 Le logiciel GDM et son composant Multilayer .....	55
Annexe 2 Coupes dans la géométrie du modèle géologique numérique (GDM).....	61
Annexe 3 Vues 3D au travers du modèle géologique numérique.....	71
Annexe 4 Cartes des isobathes des toits et des murs des couches du modèle géologique .....	79
Annexe 5 Le logiciel Marthe .....	89
Annexe 6 Calage des piézométries et des débits .....	111
Annexe 7 Conditions générales d'utilisation pour le téléchargement de données du modèle sur le portail du SIGES.....	139



# 1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la disposition 5 du SAGE Nappes profondes de Gironde traitant de l'Atlas évolutif des zones à risques (Corbier, et al., 2005 ; Saltel, et al., 2010) et plus particulièrement aux travaux de modélisation de la nappe de l'Oligocène au sud de Bordeaux en liaison avec la problématique du dénoyage du réservoir.

Le modèle construit en 2010 (Mod\_Oligo V1-2007), intégrateur des connaissances géologiques et hydrogéologiques du secteur à cette date, avait servi dans un premier temps à évaluer l'extension de la zone dénoyée au cours du temps. Le modèle avait ensuite été utilisé pour réaliser des simulations prospectives afin de fournir des éléments techniques permettant aux différents acteurs de la CLE d'arrêter un plan de gestion pour la nappe de l'Oligocène. En effet, un dénoyage plus ou moins important peut être généré selon les stratégies mises en œuvre pour exploiter le réservoir.

A la suite de ces travaux, des recommandations ont été faites pour améliorer la connaissance et mieux suivre l'impact du futur plan de gestion de la nappe de l'Oligocène en lien avec le SAGE Nappes profondes de Gironde. Ainsi, 6 piézomètres ont été réalisés dans le cadre du projet **RODÉO** (**R**éseau d'**O**bservation et de prévention du **D**énoyage de l'**O**ligocène) sur les communes de Saucats, La Brède, Cabanac-et-Villagrains et de Saint-Morillon (Saltel, et al., 2012 ; Saltel, et al., 2015).

Ces ouvrages, outre les données complémentaires qu'ils fournissent concernant la géologie locale, ont permis de préciser l'étendue de la réduction de la zone de captivité de la nappe de l'Oligocène. A noter que ces ouvrages ont intégré le réseau de suivi des nappes de la Gironde réalisé par le département.

Par ailleurs, une étude des interactions nappes/rivières a été menée en réalisant des jaugeages différentiels (jaugeages resserrés en différents points de l'amont vers l'aval) sur les ruisseaux du Saucats et du Gât-Mort et en dressant des cartes piézométriques fines et synchrones aux mesures de débits sur la zone concernée. Ces données ont ainsi permis de mieux contraindre le modèle sur ces secteurs.

Le présent rapport présente les améliorations et mises à jour appliquées au modèle Oligocène.

La première partie du présent document concerne l'actualisation de la géométrie du modèle à partir des informations recueillies dans le cadre du projet RODEO et des travaux de modélisation géologique réalisés à l'échelle régionale dans le cadre du développement du **MONA** (**M**odèle **N**ord **A**quitain).

La deuxième partie traite des améliorations apportées concerne la prise en compte de la recharge et l'amélioration du réseau hydrographique ainsi que de l'actualisation des données d'entrées du modèle (prélèvements, recharge) jusqu'en 2014. Les données de sortie du modèle, chroniques piézométriques et débits de cours d'eau, ont été confrontées aux données observées.

Enfin, les données du modèle seront rendues accessibles et téléchargeables sur internet via le portail SIGES Aquitaine. Les modalités d'accès seront ainsi décrites dans ce rapport.



## 2. Actualisation du modèle géologique

Le modèle géologique a été élaboré dans le cadre de l'atlas des zones à risques Phase 2 (Saltel M. , Pédron, Platel, Corbier, & Bourguine, Atlas des zones à risque du SAGE Nappes Profondes de Gironde - Phase 2 - Problématique du dénoyage de l'Oligocène au Sud de l'agglomération Bordelaise. BRGM/RP-58156-FR 123 p., 64 fig., 11 tab., 7 ann, 2010). La réalisation de nouveaux piézomètres effectuée lors du projet RODÉO (Saltel et al., 2012 ; Saltel et al., 2015) a permis d'améliorer localement la connaissance des réservoirs sur le secteur de la zone dénoyée au sud de l'agglomération bordelaise. Les informations recueillies dans ce contexte ont servi à améliorer localement la géométrie du modèle Oligocène. Par ailleurs, les travaux de modélisation réalisés à l'échelle régionale dans le cadre du développement du Modèle Nord Aquitain (MONA) ont permis d'améliorer la représentation de la géométrie des réservoirs par le biais de la modélisation géologique (Saltel et al., 2011 ; Saltel et al., 2012 ; Saltel et al., 2014). Les résultats de ces travaux ont donc également été intégrés pour l'actualisation du modèle géologique de l'Oligocène.

### 2.1. OUTILS ET PRINCIPE

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 leur 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 complexes 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 comptes sont :

- les forages avec codage stratigraphique des formations traversées,
- le modèle numérique de terrain (MNT),
- la carte géologique, sous forme de polygones (chaque segment de polygone 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,

- 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 (Figure 1). 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.

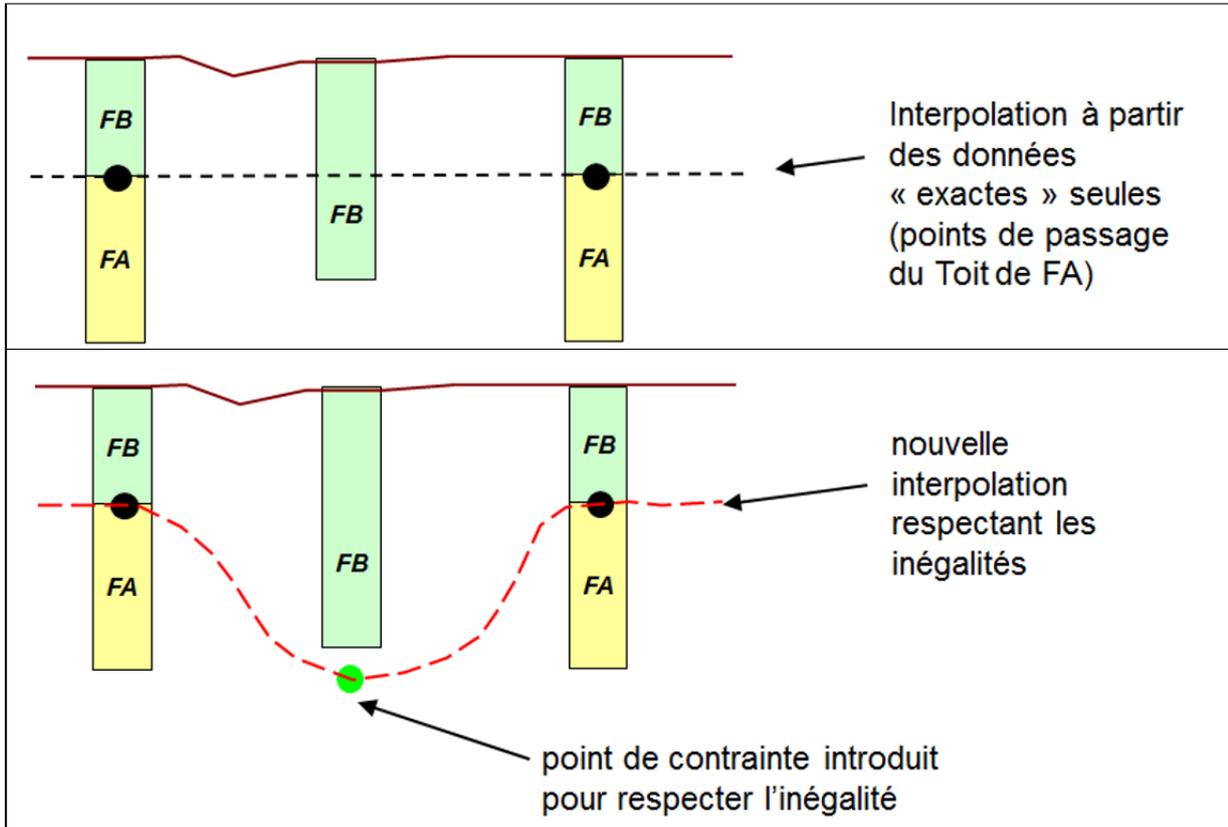


Figure 1 : Respect des contraintes d'inégalités

### 2.1.2. Mise à jour de la base de données

#### Sources des données utilisées

Les données utilisées pour l'élaboration du modèle géologique construit en 2010 (Saltel et al ; 2010) proviennent (Figure 3) :

- des sondages extraits de la BSS (Banque des données du Sous-Sol),
- des contacts géologiques des formations modélisées extraits des cartes géologiques vectorisées à l'échelle 1/50 000,
- des contours des entités hydrogéologiques extraits du Référentiel Hydrogéologique BDLISA de la région Aquitaine,
- des principales failles jouant un rôle sur la structuration du réservoir de l'Oligocène,
- du MNT de l'IGN (2005) au pas de 50 m et ré-échantillonné au pas de 100 m pour correspondre à la maille du modèle géologique réalisé et représenter la variable « TOPO » du modèle.

Dans le cadre de l'actualisation de la géométrie, seule la base de données des forages a été modifiée. En effet, la cohérence des autres données avait déjà été contrôlée en 2010, la carte géologique et le tracé des failles sont donc restés inchangés. Il en va de même pour le MNT qui avait été utilisé pour contrôler l'altitude de tous les forages et assigner la cote des contacts des formations affleurantes issues des cartes géologiques vectorisées.

En 2010, la base de données de forage comportait 637 forages décrit par près de 1 561 horizons correspondant à la pile stratigraphique. L'ajout des informations géologiques provenant des piézomètres réalisés dans le cadre du projet RODEO, ainsi que l'intégration des forages complémentaires pris en compte dans le cadre des travaux de modélisation géologique réalisés à l'échelle du Bassin aquitain dans le cadre du développement du MONA (Saltel et al., 2011 ; Saltel et al., 2012 ; Saltel et al., 2014) ont permis de porter le nombre de forages pris en compte à un total de 745. C'est maintenant 2 040 horizons qui sont décrit dans la base.

### Codage des données

Toutes les données ont fait l'objet d'un codage spécifique, d'une analyse de cohérence et ont été intégrées dans une base Access dédiée.

Le modèle géologique prend en compte 6 couches au total dont le détail est présenté dans la figure 2. L'ensemble modélisé regroupe 4 formations aquifères (ALUV, REMI, MIOC et OLNP) et 2 épontes (EPCM et EPOL).

Formation	Surf. type	Description	Surf. name	n°FORM
ALUV	EROD*	Alluvions de la Garonne	M06	F06
REMI		Recouvrement quaternaire à miocène moyen		F05
MIOC	EROD	Réservoir miocène	T03	F04
EPCM		Eponte Chattien-Miocène	T02	F03
OLNP		Réservoir oligocène	T01	F02
EPOL		Eponte au mur du réservoir oligocène		F01

\*EROD : surface érodée

Figure 2 : Pile stratigraphique du modèle géologique de l'Oligocène

Les alluvions de la Garonne (ALUV) étant directement en contact avec le réservoir oligocène, il était indispensable de modéliser cet horizon afin de rendre compte des échanges entre la Garonne et la nappe de l'Oligocène. Cette couche regroupe l'ensemble des terrasses des alluvions de la Garonne de manière à assurer la continuité hydraulique de ces formations dans le modèle hydrodynamique.

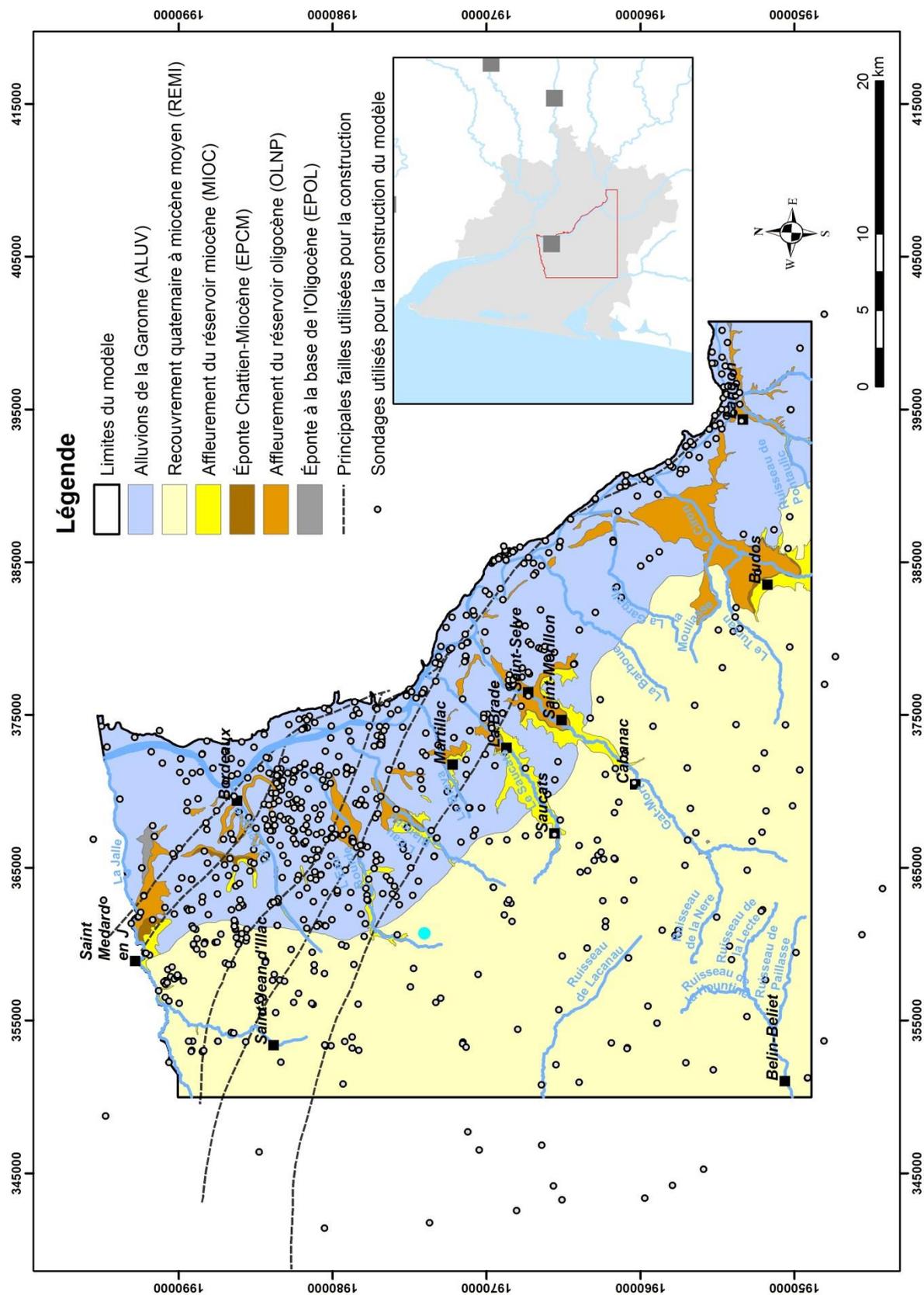


Figure 3 : Données géologiques utilisées pour l'élaboration du modèle Oligocène

Les formations quaternaires situées plus à l'ouest ont été intégrées dans un ensemble multicouche hétérogène correspondant à l'ensemble du recouvrement des terrains miocènes aquifères (REMI). A noter que les formations des alluvions de la Garonne et du recouvrement sont considérées comme érodantes vis-à-vis des formations sous-jacentes.

Le réservoir miocène ne correspondant pas à l'objet principal de cette étude, aucune distinction n'a été faite entre les formations du Langhien-Serravallien et de l'Aquitainien.

L'éponte supérieure de l'aquifère de l'Oligocène est formée par les assises très peu perméables du Chattien et de la base du Miocène (EPCM). Toutefois, ce code a également été attribué pour représenter de façon plus générale les formations très peu perméables surmontant l'aquifère de l'Oligocène. En effet, en bordure de Garonne, des argiles de décalcification présentes au toit du réservoir oligocène constituent une éponte dans des zones où les formations du Miocène et du Chattien ont été érodées.

L'aquifère de l'Oligocène (OLNP) a été considéré comme une seule et même entité bien que deux niveaux puissent être ponctuellement identifiés au sein des calcaires à Astéries. Cette simplification tient à deux raisons :

- l'objectif principal est de localiser précisément les zones dénoyées du réservoir. Pour cela, c'est le toit de l'aquifère oligocène, correspondant à la base des marnes du Chattien qu'il est nécessaire de modéliser. La subdivision des calcaires n'apparaît pas comme un élément prépondérant du fonctionnement hydraulique général de la nappe,
- les forages bien décrits géologiquement et/ou ayant fait l'objet de diagraphies ne sont pas suffisamment nombreux pour individualiser en tout lieu et de façon pertinente deux horizons au sein de l'ensemble étudié.

L'éponte à la base du réservoir (EPOL) sépare l'aquifère de l'Oligocène de celui de l'Éocène. Toutefois, ce code a également été utilisé pour identifier les formations plus anciennes, notamment celles du Secondaire dans les forages les plus profonds ou au droit des structures anticlinales (Villagrains-Landiras).

L'intégration de forages supplémentaires issus de la base de données construite pour le MONA a nécessité quelques ajustements dans la table des correspondances de la pile stratigraphique des forages. Ainsi, à titre d'exemple le MIOC regroupe l'ensemble des codes suivants : MIOC, AQUI, EPAQ et HELV.

### ***Gestion des données sous SIG***

Toutes les données nécessaires à la modélisation ont été intégrées dans un Système d'Information Géographique (Arc GIS®) 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).

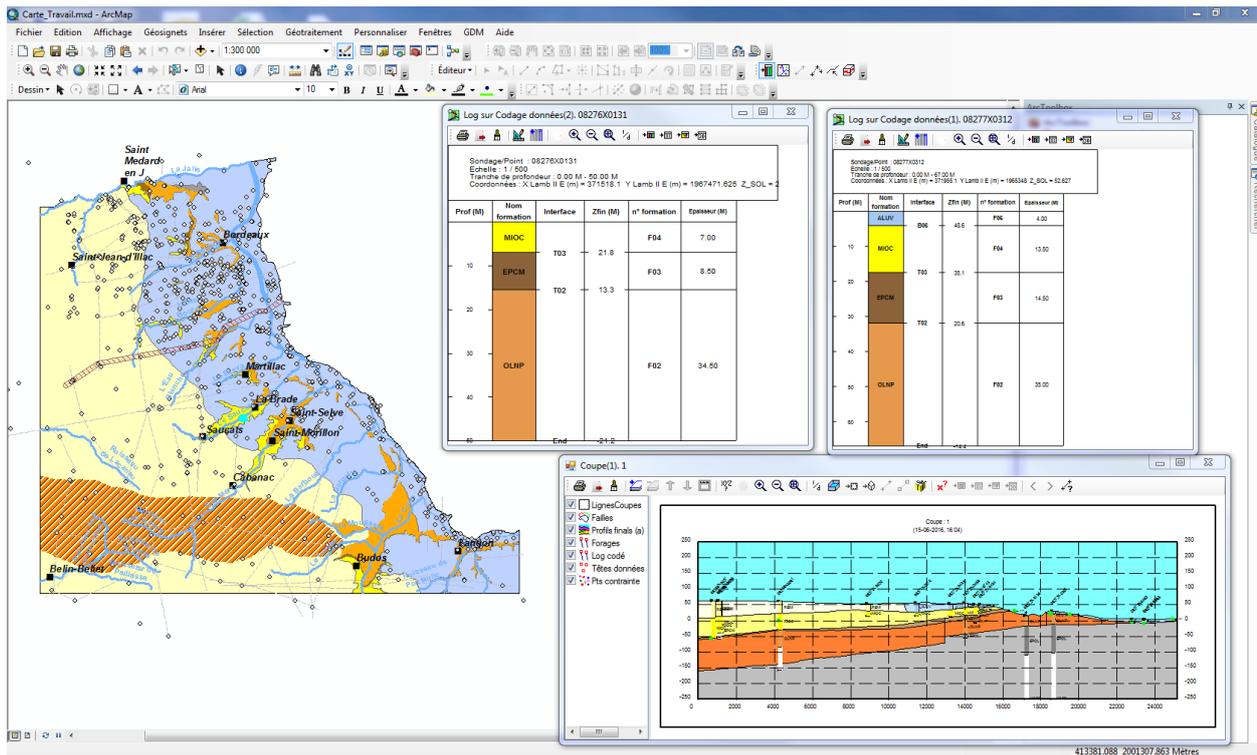


Figure 4 : SIG "Modèle Oligocène" sous ArcGIS

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

### 2.2.1. Contrôle préalable des données

Les sondages utilisés proviennent d'extractions de la BSS gérée par le BRGM. Cette base s'appuie principalement sur les déclarations qui sont faites au titre du Code Minier et accessoirement sur les recensements réalisés dans le cadre d'études ponctuelles menées par le BRGM. Une telle base, du fait du grand nombre d'informations qu'elle contient et de leur caractère déclaratif, peut parfois comporter des erreurs, c'est pourquoi il convient d'effectuer un certain nombre de vérifications.

La validation du modèle géologique est réalisée par une mise en cohérence des données de forage, du MNT et des informations de la carte géologique. C'est le MNT de l'IGN (2005) au pas de 50 m qui a été utilisé pour contrôler l'altitude de tous les forages afin de déceler d'éventuelles incohérences (erreur dans l'altitude renseignée, problème de positionnement, ...).

Multilayer permet de comparer la première formation décrite dans le log du forage à celle identifiée au même endroit sur la carte géologique, afin de relever d'éventuelles incohérences. 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.

### 2.2.2. Construction

Le mur des alluvions (M06) (Figure 5) et celui du recouvrement miocène (M05) ont été interpolés en premier lieu car ils correspondent à des surfaces d'érosion. Sachant que les couches REMI et ALUV ne se superposent pas du fait de leurs extensions, les alluvions ne viennent pas éroder les formations du recouvrement miocène.

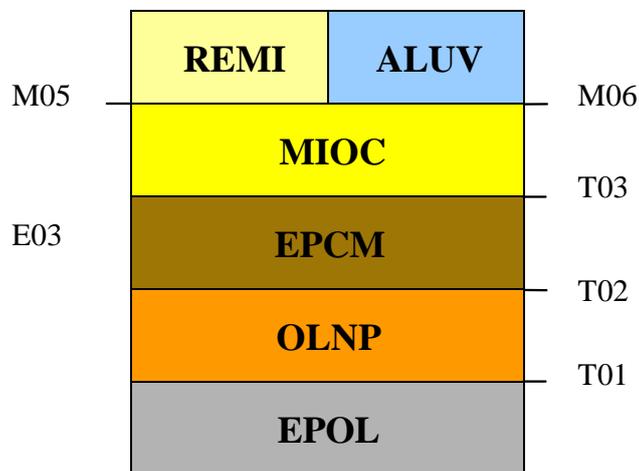


Figure 5 : Schéma des horizons modélisés

Les autres surfaces ont été interpolées depuis les formations les plus anciennes vers les formations les plus récentes. Seule l'interpolation de T01, correspondant au toit de l'éponte inférieure du réservoir oligocène (EPOL), a été contrainte par le jeu de faille.

En effet, le rejet de ces accidents tend à s'amoinrir dans les formations sus-jacentes. Le toit du réservoir oligocène (T02) montre l'existence de plusieurs lacunes : une centrée sur l'axe de la structure de Villagrains-Landiras, l'autre située en rive gauche de la Garonne.

En raison de l'épaisseur réduite de l'éponte supérieure du réservoir oligocène (E03), le toit de cette formation (T03) n'a pu être interpolé directement. C'est donc son épaisseur qui a été calculée. L'altitude de la variable (T03) est déduite maille à maille en additionnant la cote de la surface correspondant à (T02) et l'épaisseur de la couche EPCM.

Des points de contraintes ont été rajoutés afin de respecter les contraintes d'inégalités, notamment au droit de zones complexes telles que la structure de Villagrains-Landiras. Ce travail a été réalisé avec l'appui de l'expertise du géologue et des visualisations en plan et en coupe du modèle généré. L'ensemble du modèle a fait l'objet d'un contrôle par l'intermédiaire d'une série de coupes (Annexe 2) dont la position est présentée en figure 6.

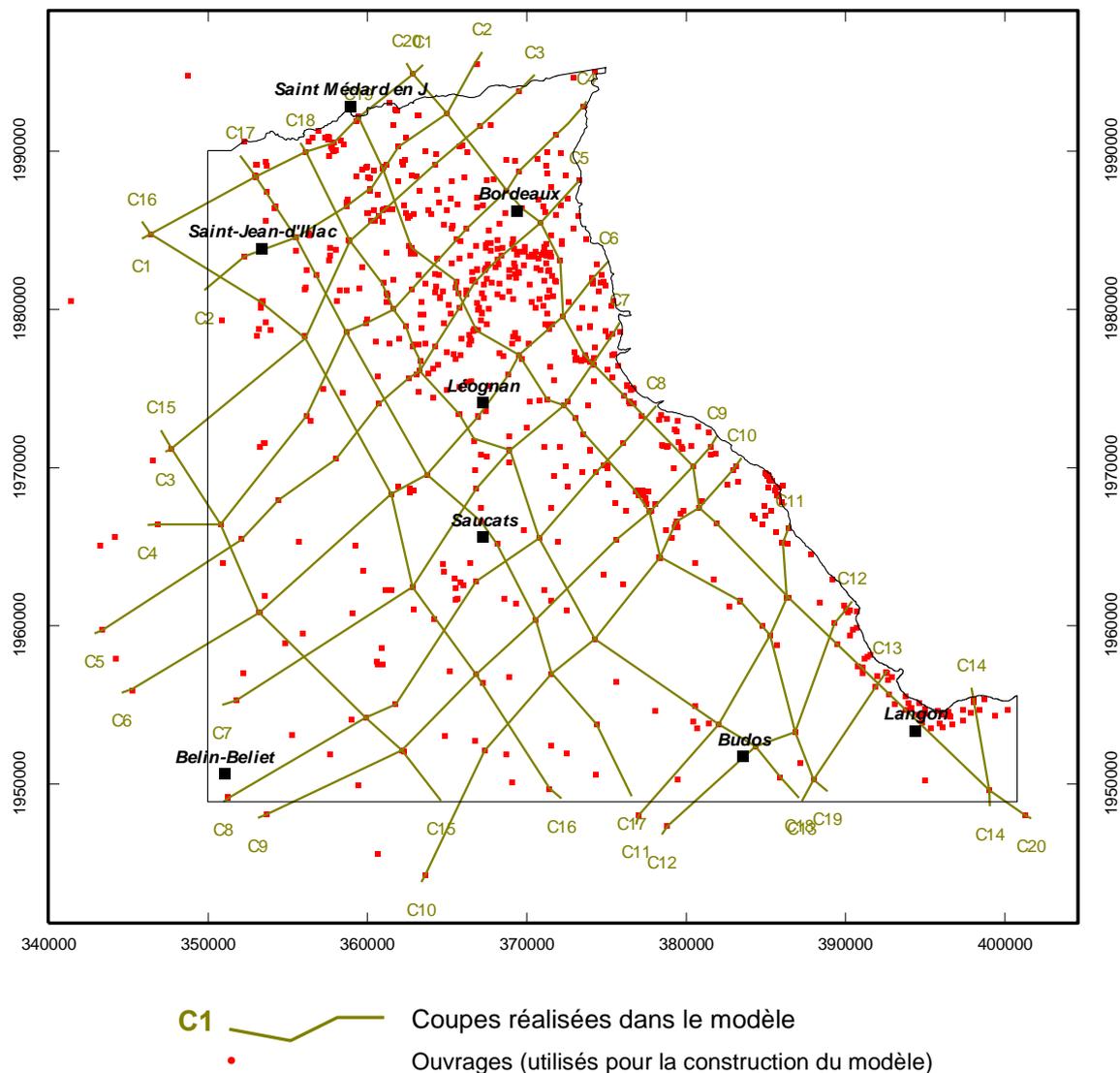


Figure 6 : Contrôles de cohérence du modèle géologique à l'aide de coupes verticales

Par ailleurs, des cartes d'isobathes et d'isopaques ont été tracées afin de mettre en évidence et corriger les éventuelles anomalies.

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 (Figure 7). Des illustrations 3D supplémentaires du modèle géologique final sont présentées en annexe 3.

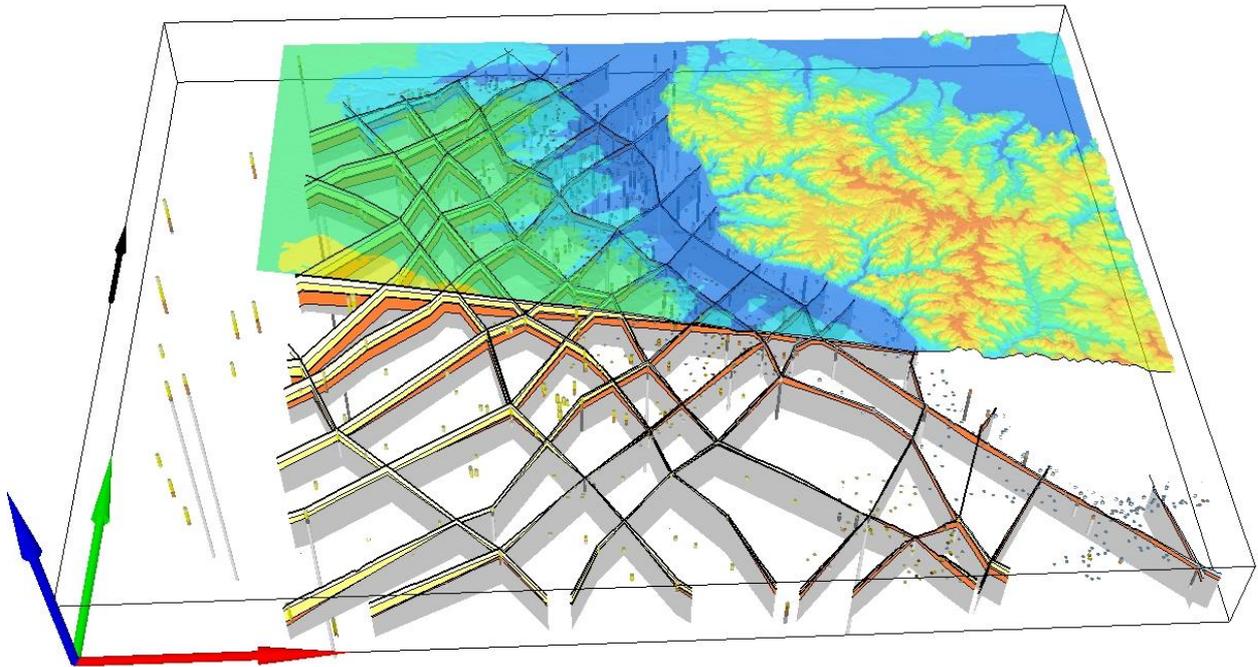


Figure 7 : Exemple de visualisation 3D du modèle géologique

### 2.2.3. Structuration des réservoirs modélisés

Les alluvions sont caractérisées par de faibles épaisseurs, les valeurs les plus fortes sur notre secteur d'étude étant constatées dans la partie la plus aval de la Garonne et au sein des interfluves entre les différents affluents de rive gauche de la Garonne (Figure 8). Les épaisseurs les plus importantes constatées atteignent près de 40 m. L'intégration de nouveaux forages dans le cadre du travail d'actualisation n'entraîne pas de modifications majeures de la géométrie des alluvions de la Garonne.

Les épaisseurs du recouvrement quaternaire à miocène moyen atteignent au maximum 70 mètres de puissance. Les valeurs les plus importantes sont observées au centre ouest du secteur d'étude. Le réseau hydrographique participant à l'érosion des formations de surface est particulièrement visible sur la carte de la figure 9. Tout comme pour les alluvions, l'ajout de données complémentaires n'a pas modifié significativement l'architecture de ce réservoir.

La puissance du réservoir miocène varie de 0 à 100 m (Figure 10). Ce dernier est très peu épais sur l'axe de la structure de Villagrains-Landiras, la formation est même absente sur la partie périclinale orientale de l'anticlinal. L'aquifère s'épaissit par ailleurs vers l'ouest et le sud-ouest.

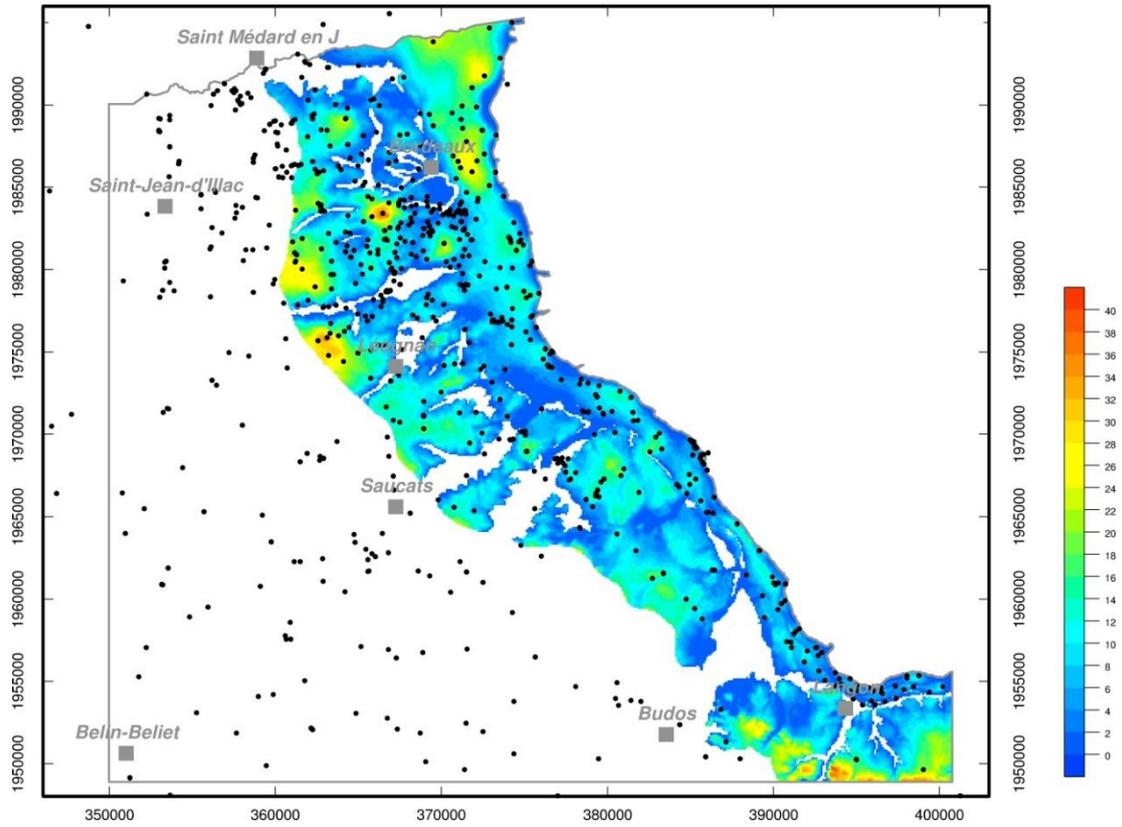


Figure 8 : Épaisseur des alluvions

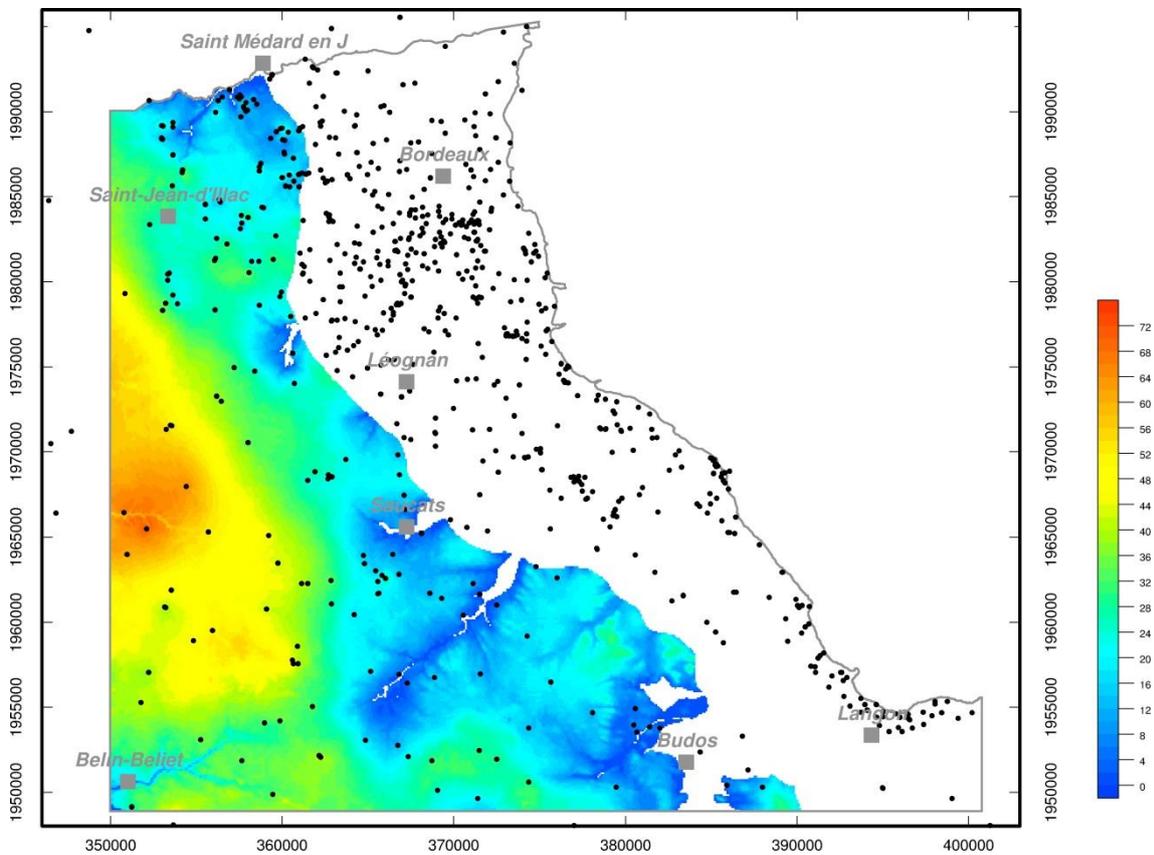


Figure 9 : Épaisseur des recouvrements quaternaires à miocène moyen

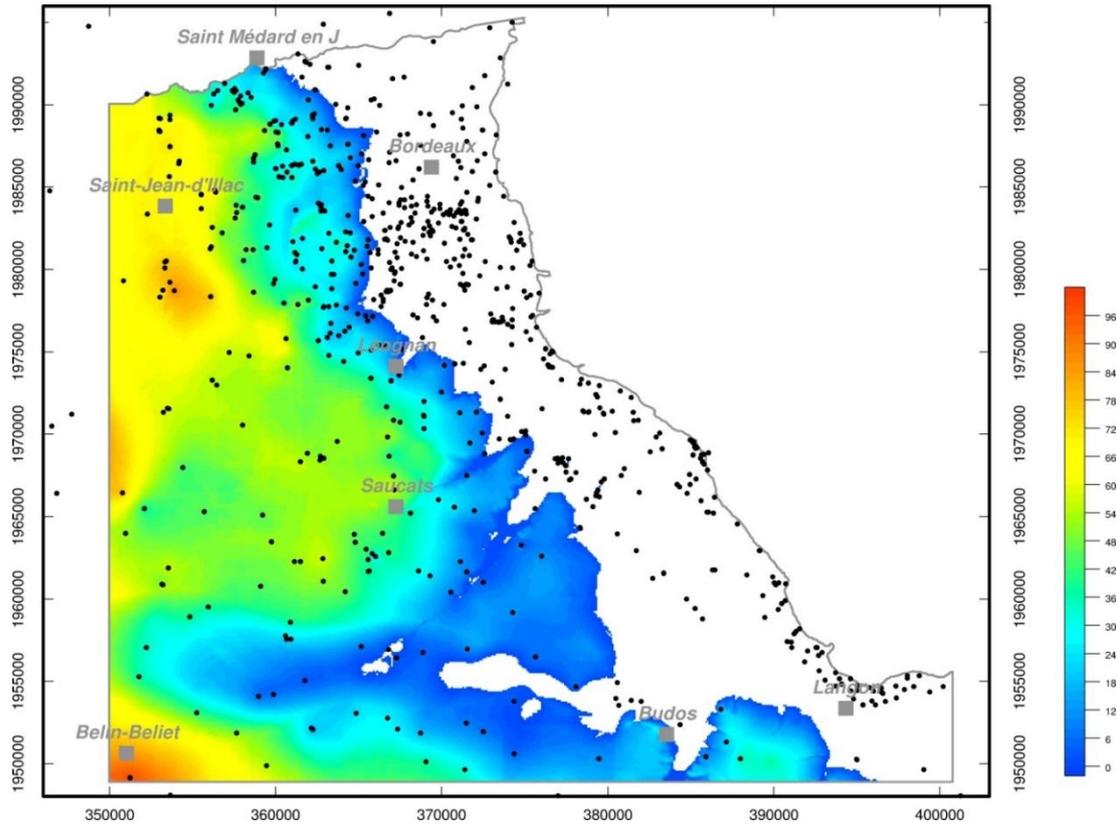


Figure 10 : Épaisseur du réservoir miocène

L'éponte supérieure de l'aquifère de l'Oligocène, est globalement de très faible épaisseur, de 2 à 18 m. Cet horizon correspond à l'ensemble des formations très faiblement perméables surmontant l'aquifère de l'Oligocène. Il comprend les assises du Chattien, la base du Miocène et les argiles de décalcification présentes au toit du réservoir en bordure de Garonne. La diversité des formations qui composent cette couche induit la présence d'ensembles isolés à l'est où les formations du Miocène et de l'Oligocène sont érodées (Figure 11). A noter également que cette éponte n'est pas présente sur l'axe de la structure de Villagrains-Landiras. Dans le cadre de l'actualisation du modèle géologique, l'allure générale de la carte des épaisseurs de l'éponte du Chattien-Miocène a été modifiée en comparaison de la carte réalisée en 2010 (Saltel M. , Pédron, Platel, Corbier, & Bourguine, Atlas des zones à risque du SAGE Nappes Profondes de Gironde - Phase 2 - Problématique du dénoyage de l'Oligocène au Sud de l'agglomération Bordelaise. BRGM/RP-58156-FR 123 p., 64 fig., 11 tab., 7 ann, 2010). En effet, la réinterprétation de certains forages a été nécessaire afin d'assurer la cohérence avec la géométrie du MONA V4 (Saltel, Cabaret, Bourguine, & Loiselet, 2014). L'éponte est donc moins épaisse qu'auparavant sur la bordure ouest du modèle au sud de Saint-Jean-d'Ilac.

L'aquifère de l'Oligocène est affecté à sa base par une série de failles qui jouent un rôle sur la structuration du réservoir oligocène. Ces accidents ont été utilisés pour l'interpolation du mur de l'aquifère. C'est la raison pour laquelle la carte des épaisseurs est ainsi structurée (Figure 12). Par ailleurs, l'aquifère est érodé sur une vaste superficie au droit de l'axe de la structure de Villagrains-Landiras par rapport aux horizons sus-jacents. Le réservoir est également absent sur une large bande localisée aux abords de la Garonne et sur un axe est-ouest à proximité de Langon. C'est autour des zones lacunaires que le réservoir est le moins épais. Les épaisseurs les plus importantes sont localisées au centre ouest du secteur d'étude où elles atteignent près de 120 m.

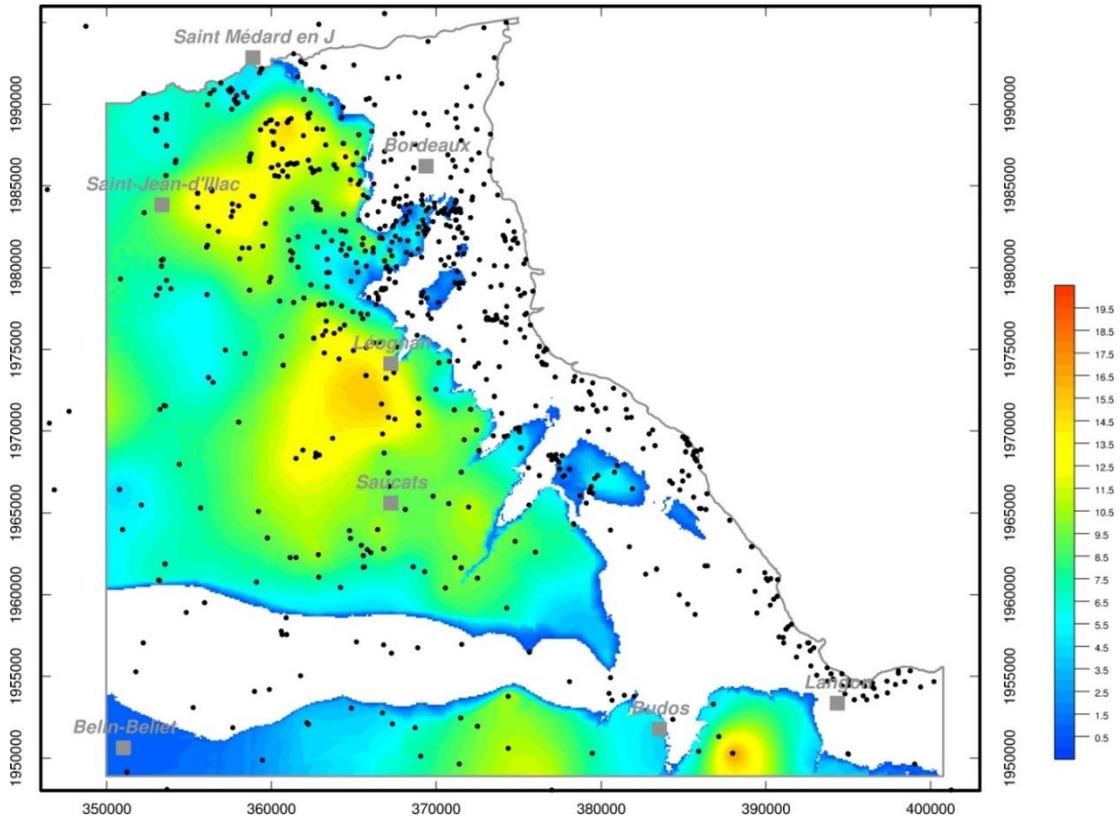


Figure 11 : Épaisseur de l'éponte au toit de l'Oligocène

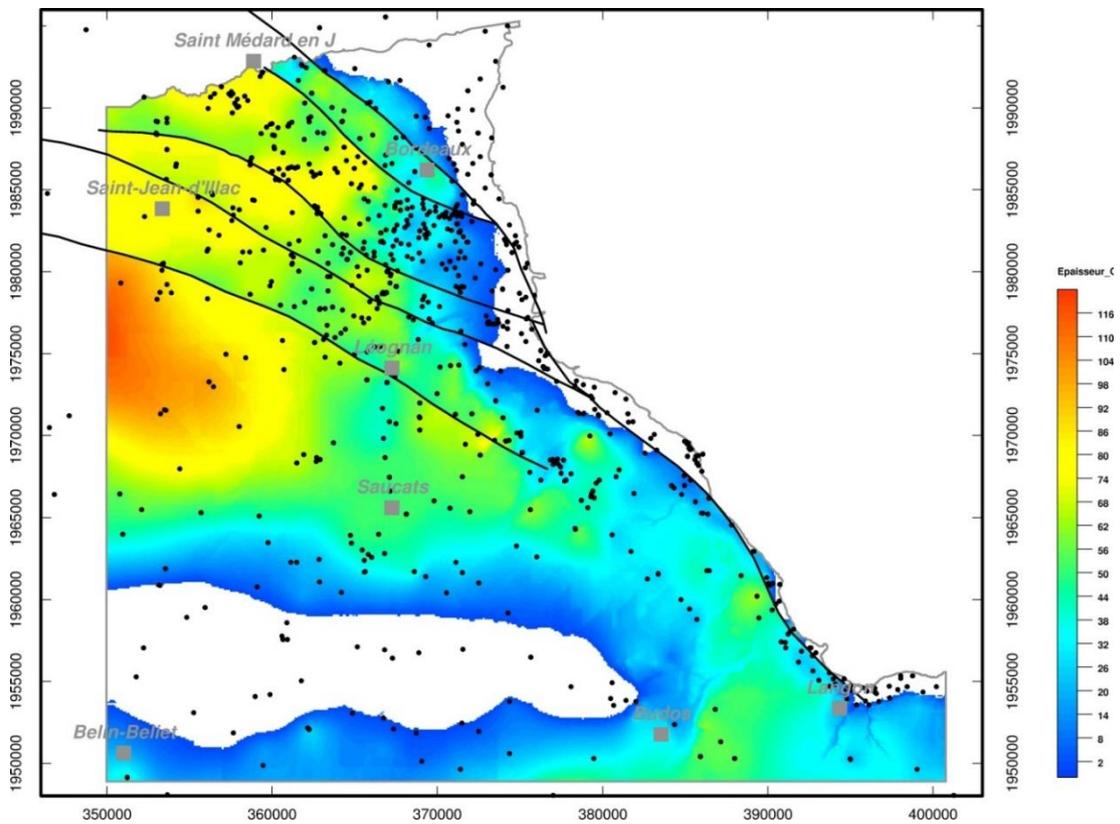


Figure 12 : Épaisseur du réservoir oligocène

Les cartes finales des toits et murs des formations aquifères modélisées par Multilayer sont reportées en annexe 4. Une sélection de coupes réalisées dans la géométrie du modèle est présentée en annexe 2.



### 3. Actualisation de la modélisation hydrodynamique

#### 3.1. LOGICIEL - RAPPEL

Le modèle construit utilise le code de calcul **MARTHE** (**M**odélisation d'**A**quifères par maillage **R**ectangulaire en régime **T**ransitoire pour le calcul **H**ydrodynamique des **E**coulements) développé par le BRGM (actuellement version 7.5) via l'interface **WinMarthe** version 4.7 (Thiéry, 1990 ; Thiéry, 2003 ; Thiéry, 2014). Le schéma de résolution utilise les volumes finis avec un maillage parallélépipédique (ou rectangulaire) irrégulier. Une description du logiciel est présentée en annexe 5.

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 tableur). La gestion des couches permet de modéliser les écoulements souterrains au sein de systèmes géologiques complexes (Figure 13).

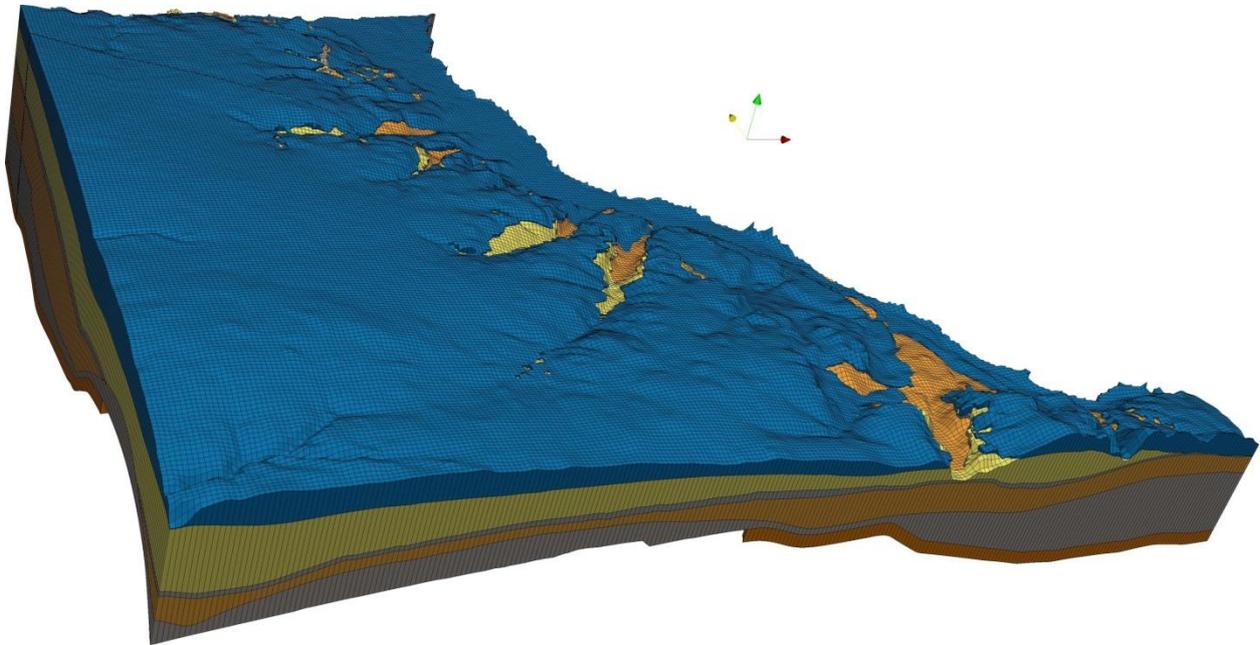


Figure 13 : Visualisation 3D du modèle hydrodynamique de l'Oligocène

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

La géométrie du modèle est issue du modèle géologique réalisé sous GDM. Toutefois, des ajustements ont été nécessaires pour s'adapter au fonctionnement de MARTHE et pour répondre au mieux aux enjeux de la simulation. Ainsi, les couches REMI et ALUV ont dû être rassemblées car Marthe ne peut gérer les échanges entre deux couches adjacentes. Par ailleurs, une couche supplémentaire correspondant au réservoir de l'Éocène a été rajoutée à la base du modèle. La géométrie de ce réservoir est issue du travail réalisé dans le cadre du MONA V4 (Saltel, Cabaret, Bourguine, & Loiselet, 2014). Les valeurs de toit et de mur ont été interpolées pour correspondre au maillage du modèle Oligocène (passage d'une maille de 500 m de côté à une maille de 100 m de côté). Les charges sont totalement imposées dans cette nappe, de manière à rendre compte des échanges entre les aquifères de l'Oligocène et de l'Éocène (les valeurs utilisées varient dans le temps et proviennent des charges simulées au pas de temps annuel pour l'aquifère de l'Éocène moyen dans MONA V3.3b-2014). Le modèle hydrodynamique est donc composé d'un total de 6 couches (Figure 14) avec un maillage au pas de 100 m. C'est un modèle multicouche 3D (toutes les formations sont des couches de calcul prises en compte de manière explicite).

<b>C1</b>	Réservoir Plio-Quaternaire (REMI + ALUV)
<b>C2</b>	Réservoir miocène (MIOC)
<b>C3</b>	Éponte Chattien miocène (EPCM)
<b>C4</b>	Réservoir oligocène (OLNP)
<b>C5</b>	Éponte à la base de l'Oligocène (EPOL)
<b>C6</b>	Réservoir éocène (épaisseur fictive, charges imposées)

Figure 14 : Agencement schématique des différentes couches du modèle hydrodynamique

### 3.3. ACTUALISATION DES PARAMETRES DU MODELES

#### 3.3.1. Discrétisation temporelle

Dans la version précédente du modèle (Mod\_Oligo V1-2007), le pas de temps en régime transitoire était annuel entre 1972 et 1997 et trimestriel entre 1998 et 2007. Les bilans climatiques et le calcul de la recharge étaient réalisés en amont de la modélisation, sous Excel, au pas de temps annuel puis trimestriel à partir des données de la station météorologique de Mérignac.

Dans la version du modèle présentée ici (Mod\_Oligo V2-2014), le pas de temps est trimestriel entre 1972 et 1999 et mensuel entre 2000 et 2014. Cela permet de mieux restituer les variations annuelles de piézométries, en particulier pour les nappes exploitées pour l'irrigation pour lesquelles les prélèvements ont lieu entre mai et septembre (en moyenne). Les variations mensuelles de prélèvements sur les puits utilisés pour l'AEP sont également mieux représentées, en particulier sur la ligne des 100 000 m<sup>3</sup>/j.

#### 3.3.2. Calcul de la recharge

La détermination des flux de recharge (et de ruissellement) est réalisée par l'intermédiaire du calcul de bilans hydroclimatiques avec le schéma GARDENIA (Thiéry, Logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig, 3 ann, 2003) et 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. Le calcul pas de

temps par pas de temps de la recharge et du ruissellement est effectué par le logiciel qui utilise les paramètres fournis en entrée par le modélisateur.

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

- 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 (valeur permettant de calculer la pluie efficace) et des paramètres qui permettent la répartition entre écoulement rapide (ruissellement) et écoulement lent (percolation vers la nappe) et de préciser la dynamique temporelle de cette dernière :
  - ✓ Temps de demi-PERColation (TPERC),
  - ✓ Niveau d'équilibre-RUIssellement-PERcolation (RUIPER).

Le module GARDENIA se base sur le principe des modèles réservoirs (Figure 15) :

- 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, non représenté sur la figure) suivant une loi exponentielle de constante de temps TPERC (ALIM aquifère = H.dt/TPERC) ; la séparation entre ruissellement et recharge se fait selon la valeur du paramètre RUIPER.

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

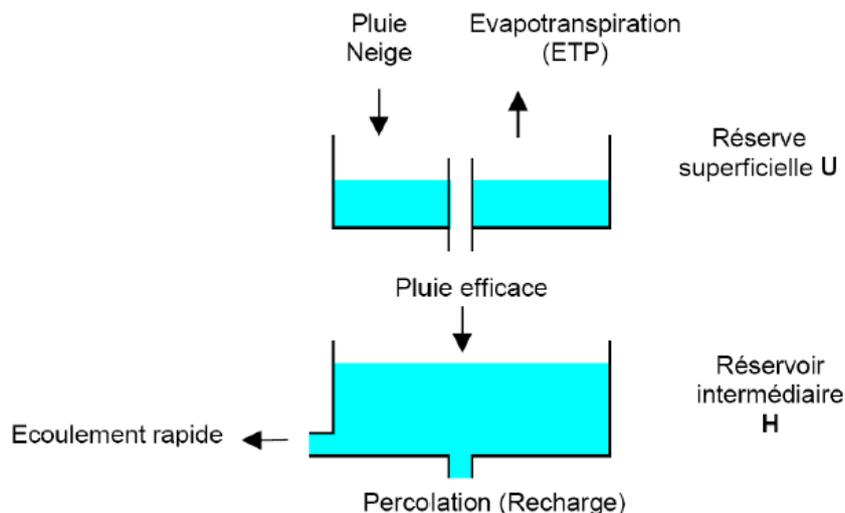


Figure 15 : Schéma de fonctionnement de la recharge (Thiéry, Logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig, 3 ann, 2003)

Le bilan hydroclimatique se fait au pas de temps journalier. Le calcul hydrodynamique se fait quant à lui au pas de temps trimestriel ou mensuel à la fin de la période considérée. Les données de Pluie et d'évapotranspiration potentielle « ETP » intégrées dans le modèle Oligocène sont issues des grilles SAFRAN de Météo France, ce qui représente 42 mailles carrés de 8 km de côté (Figure 16 et Figure 17).

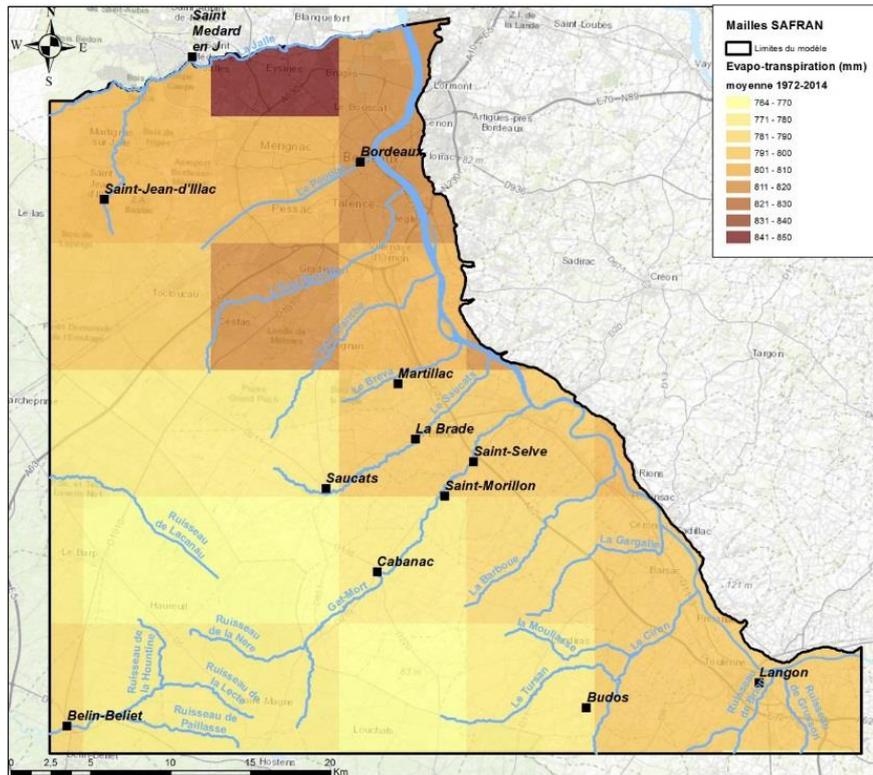


Figure 16 : Evapo-transpiration annuelle moyenne fournie sur les mailles SAFRAN (1972-2014)

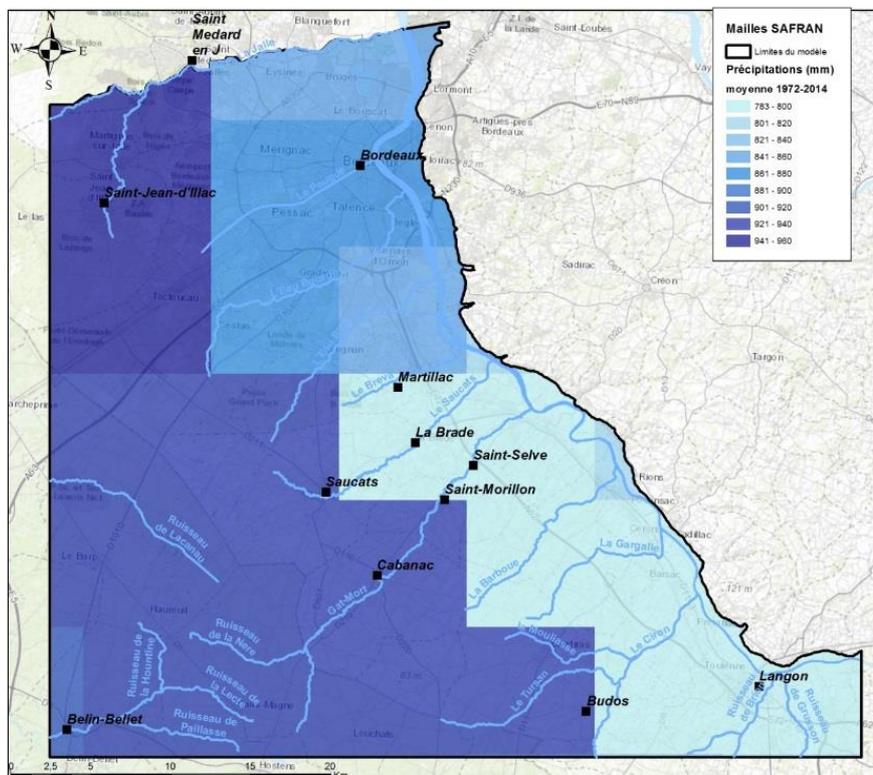


Figure 17 : Précipitations annuelles moyennes fournies sur les mailles SAFRAN (1972-2014)

Les valeurs de réserve disponible pour l'évapotranspiration (RDE) ont été estimées à partir de la carte pédologique réalisée par l'INRA au 250 000<sup>ème</sup> (Figure 18). Plus précisément, celles-ci sont calculées à partir des valeurs de Réserve Utile (RU) qui ne sont pas directement fournies dans les tables attributaires de la carte mais qui peuvent être calculées à partir des éléments fournis dans la littérature, en utilisant le type d'horizon des sols et leurs textures (Bruand et al., 2004).

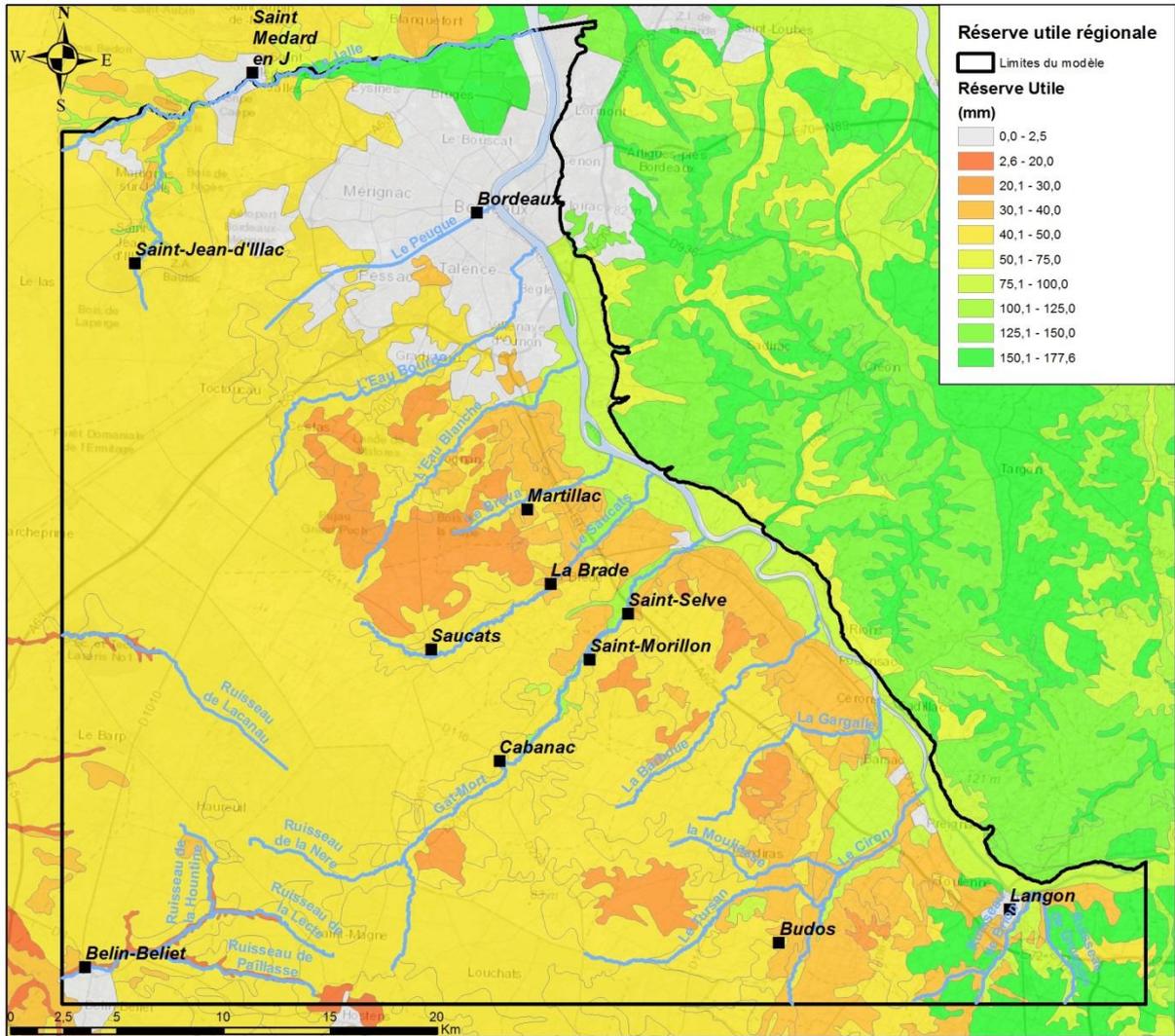


Figure 18 : Carte régionale de Réserve Utile calculée à partir de la carte pédologique au 250 000<sup>ème</sup> de l'INRA (Richer de Forges et al, 2015)

Les paramètres permettant de calculer la recharge sont définis sur 6 grandes zones distinguant 4 types de sols :

- Sables des Landes,
- Alluvions de la Garonne,
- Affleurements de l'Oligocène,
- Zones urbanisées.

Toutefois, au regard de la cartographie des réserves utiles, 2 types de sols ont été partagés pour former 2 zones supplémentaires (2 secteurs Sables des Landes et 2 zones Alluvions de la Garonne).

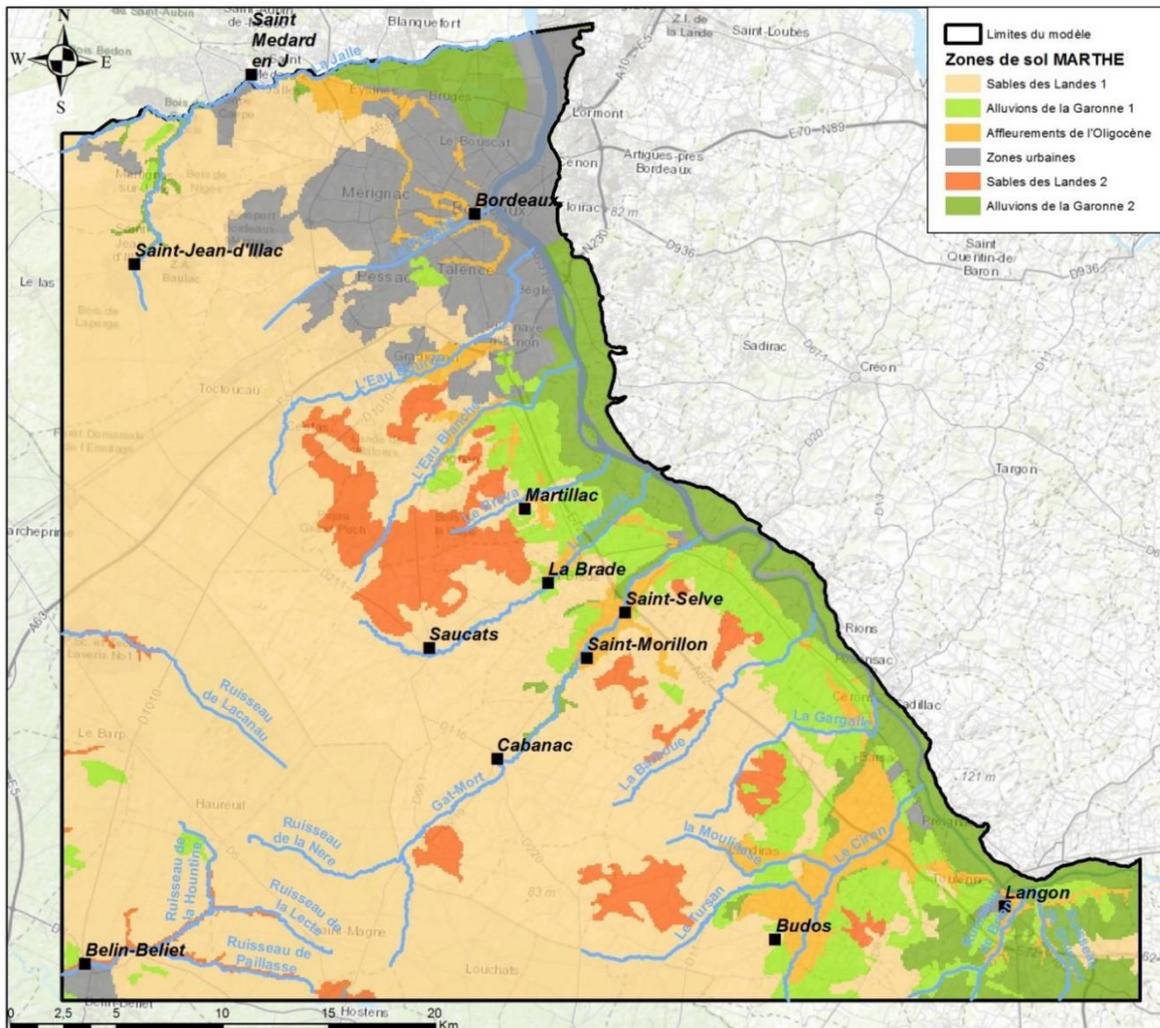


Figure 19 : Zones de sols MARTHE

Les valeurs de Réserve Utile estimées ont été assimilées à la Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (RDE), puis 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 et le temps de demi-percolation) ont fait l'objet d'un calage. Un certain degré d'incertitude reste adossé à ces paramètres car ils ne peuvent être déduits de mesures de terrain à grande échelle.

### 3.3.3. 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.

Lors de l'actualisation du modèle Oligocène, des données au pas de temps trimestriel ou mensuel ont été récupérées auprès des différents producteurs d'eau afin d'améliorer la précision des volumes prélevés intégrés dans le modèle.

Lorsque seuls les volumes annuels étaient disponibles, il a semblé pertinent d'utiliser une ventilation par usage (Figure 20), dont les principes de base sont les suivants (SMEGREG, Note sur la ventilation mensuelle des prélèvements en Gironde, 2013) :

- usage agricole : volumes prélevés sur la saison d'irrigation uniquement (profil « Agricole »), et répartis selon un profil « profond » correspondant aux nappes du Miocène et de l'Oligocène ou « peu profond » correspondant à la nappe du Plio-Quaternaire/Alluvions,
- usage AEP : la répartition est faite sur la base du profil « hors littoral » défini dans l'étude SMEGREG,
- autres usages : considérés comme uniformément répartis sur l'année (profil « Autres usages »).

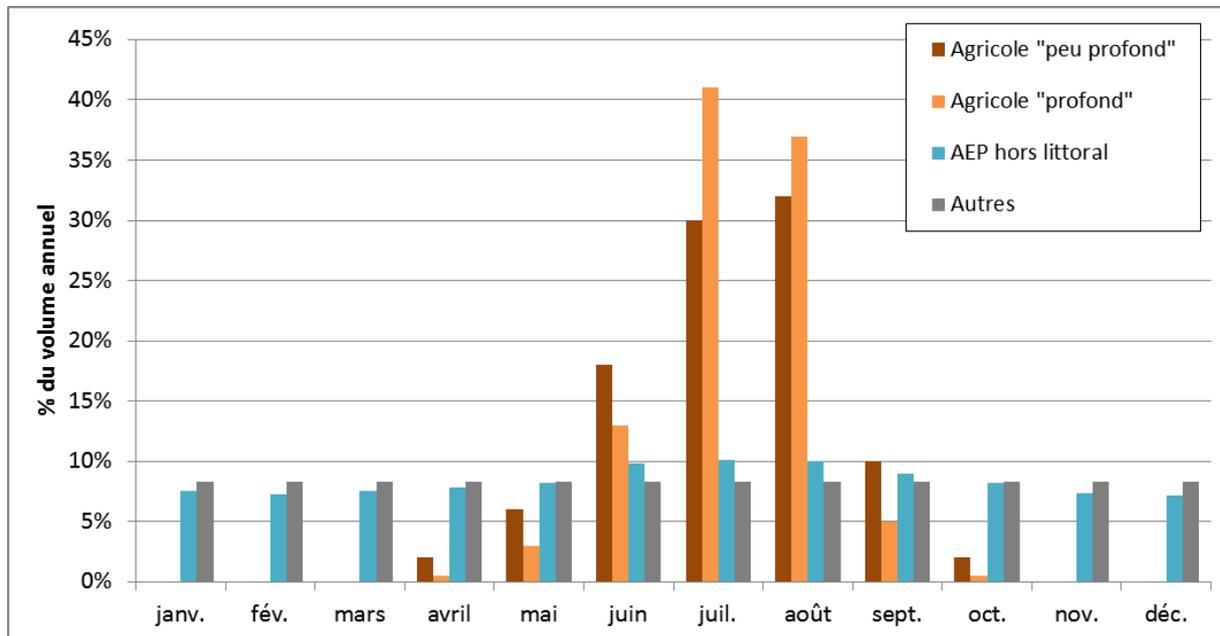


Figure 20 : Ventilation mensuelle des prélèvements annuels

Les prélèvements dans la nappe de l'Oligocène sont principalement effectués pour l'alimentation en eau potable (Figure 21).

La cartographie de la figure 22, qui présente la répartition des différents prélèvements en fonction des nappes et des volumes pompés montre :

- que la nappe de surface (Plio-quaternaire) est sollicitée en majorité à l'ouest du domaine modélisé, entre Cestas et Le Barp,
- que les pompages dans la nappe de l'Oligocène sont rassemblés autour de la métropole de Bordeaux, prélèvements qui servent majoritairement pour l'alimentation en eau potable,
- que les prélèvements au Miocène sont répartis plutôt à l'ouest du domaine modélisé, avec une concentration plus importante en amont du Saucats et du Gât-Mort.

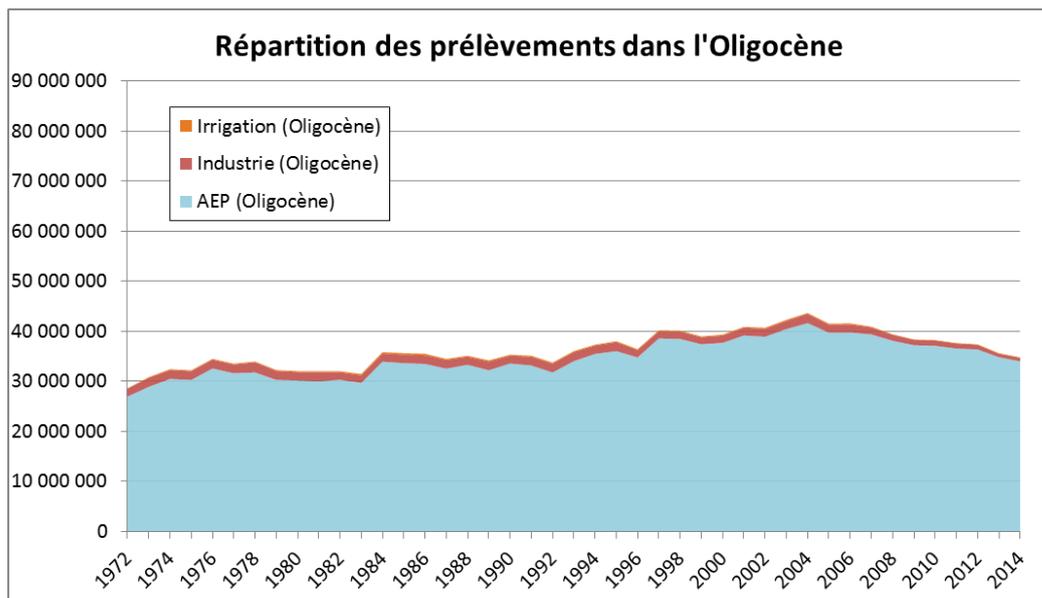


Figure 21 : Répartition des volumes prélevés dans la nappe de l'Oligocène

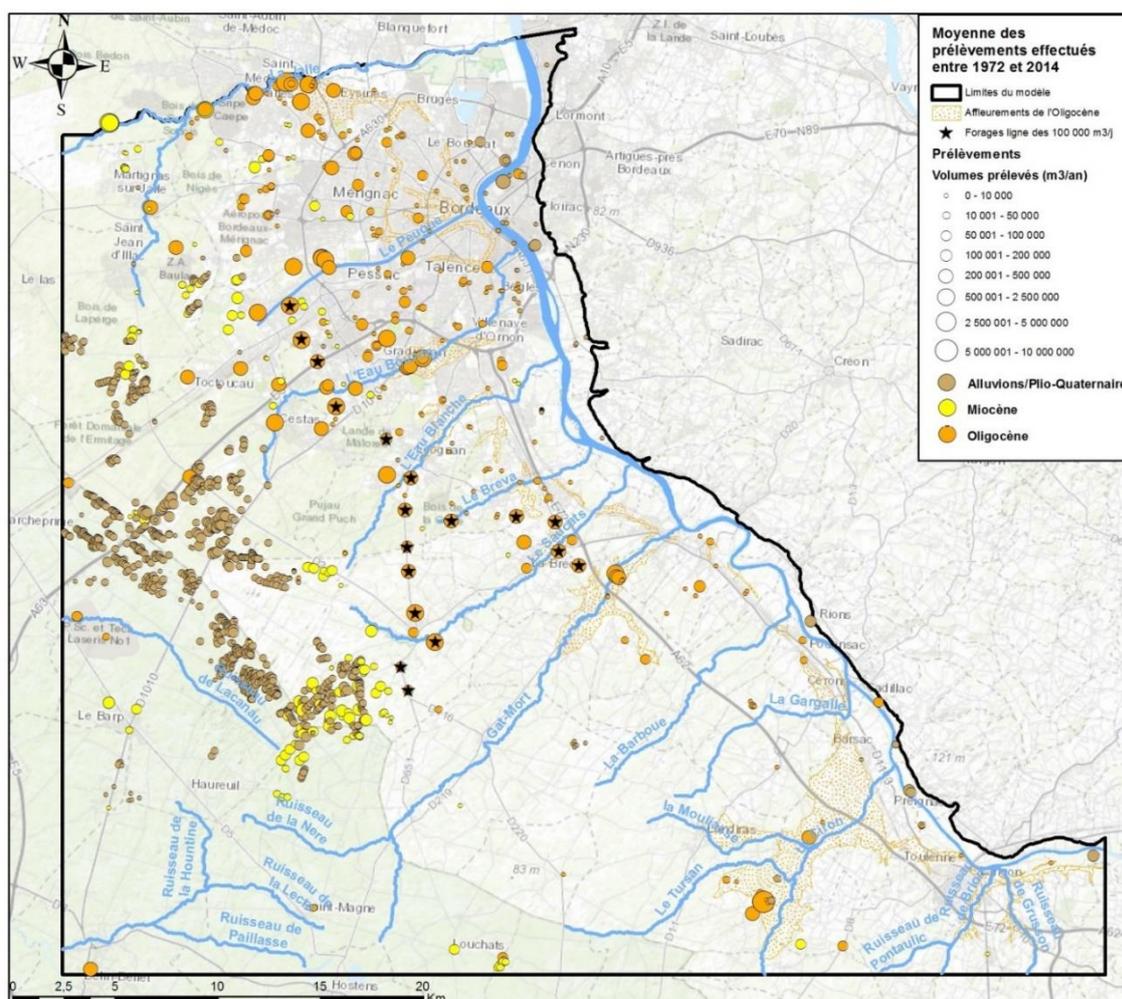


Figure 22 : Cartographie des prélèvements effectués entre 1972 et 2014

### 3.3.4. Réseau hydrographique

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 23). 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 24).

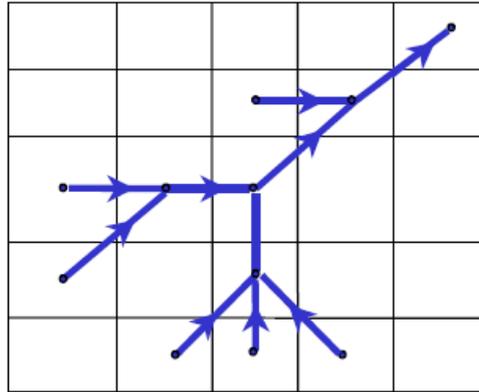


Figure 23 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (Thiéry & Amraoui, *Hydrological modelling of the Saone basin sensitivity to the soil model*, 2001)

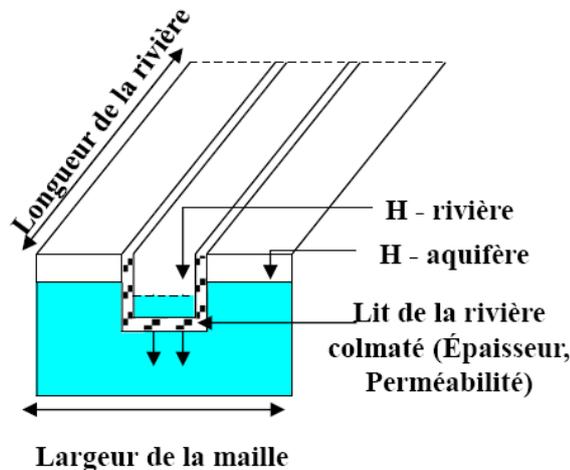


Figure 24 : Géométrie d'un tronçon de rivière (Thiéry & Amraoui, *Hydrological modelling of the Saone basin sensitivity to the soil model*, 2001)

#### **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 «  $\Delta t$  » 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  $H_{RL}$ .

### Définition du réseau hydrographique dans le modèle

La restitution du réseau hydrographique a fait l'objet d'une attention particulière. Les principaux cours d'eau du secteur d'étude sont intégrés dans le modèle (Figure 25).

Les paramètres de géométrie des cours d'eau ont été redéfinis par rapport à la version précédente du modèle, à partir de différentes sources. Ces paramètres ont été harmonisés le plus possible avec les autres modèles développés par le BRGM sur le même secteur (MONA V4). Les paramètres ont été définis à l'aide de données de terrain (Saltel & B.and, Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du DÉnoyage de l'Oligocène) Phase 2 \& 3. Rapport final. BRGM/RP-65339-FR, 93 p., 62 ill., 10 tabl., 8 ann, 2015), de documents fournis par la fédération de pêche de la Gironde (largeur et profondeur de cours d'eau) (FDAAPPMA33, 2010), tables fournies par le SIAELVEG (Syndicat Intercommunal d'Aménagement des Eaux du Bassin Versant des Etangs du Littoral Girondin), données SYRAH (Système Relationnel d'Audit de l'Hydro-morphologie) et BD Carthage.

La Figure 25 illustre les largeurs de cours d'eau entrées dans le modèle.

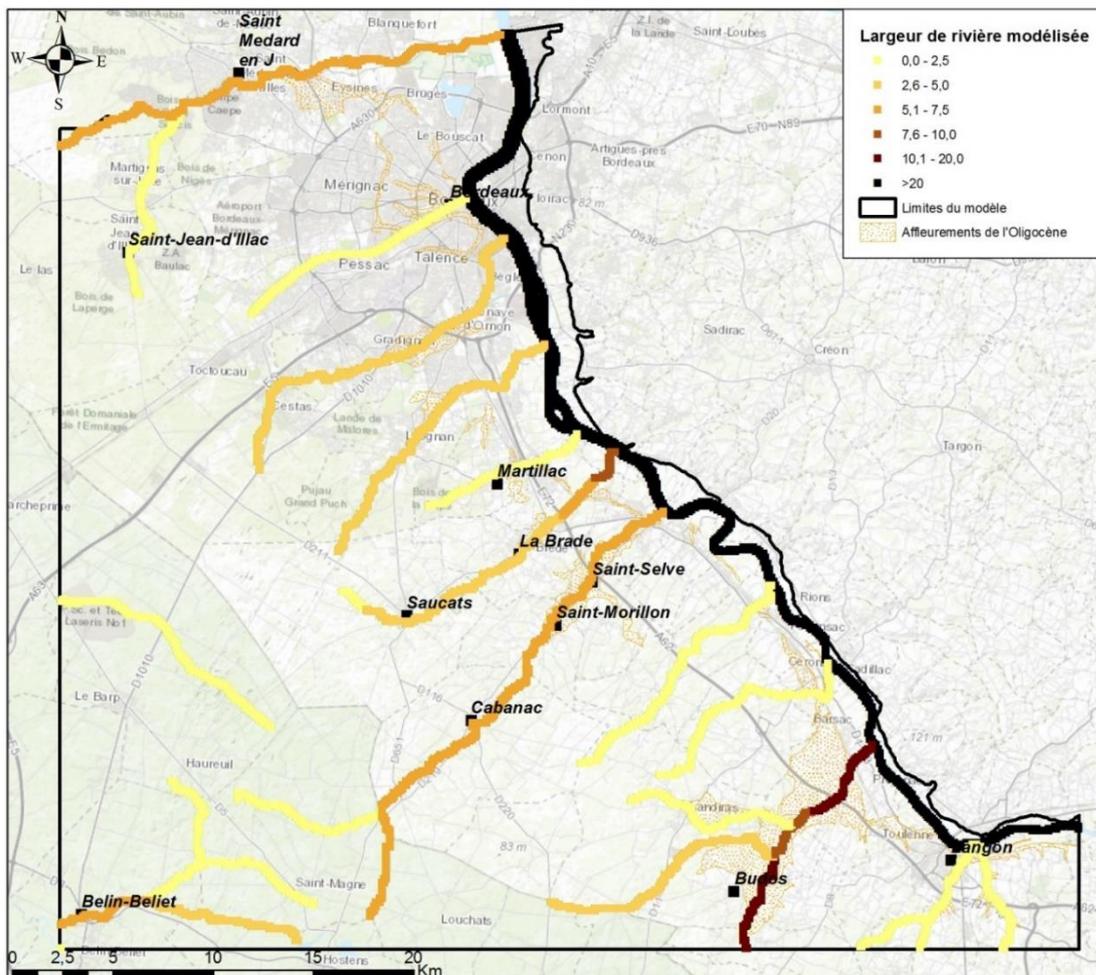


Figure 25 : Réseau hydrographique du modèle : largeur des cours d'eau modélisés

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 (10 cm pour les petits cours d'eau et 1 m pour la Garonne) et que les perméabilités du lit de la rivière ont fait l'objet d'un calage pour retranscrire au mieux les échanges nappes rivières à partir des données à notre disposition.

### **3.4. CALAGE DU MODELE APRES INTEGRATION DES NOUVEAUX DEVELOPPEMENTS**

Les modifications évoquées aux chapitres précédents impliquent un recalage du modèle du modèle Oligocène (paramètres hydrodynamiques, paramètres des échanges nappes rivières) par rapport à la précédente version. En effet, les nouveaux développements proposés vont influencer sur l'hydrodynamisme global et ce à diverses échelles :

- ✓ la géométrie va influencer le comportement des réservoirs (épaisseurs des réservoirs et des épontes modifiées dans certains secteurs),
- ✓ l'intégration de nouvelles données de prélèvements, plus complètes mieux ventilées au cours de l'année peuvent modifier légèrement la piézométrie de certains secteurs,
- ✓ la prise en compte plus précise des cours d'eau peut également modifier les échanges nappe-rivière et les débits des cours d'eau ou les piézométries à leur voisinage,
- ✓ la modification de la recharge amène une plus grande variabilité spatiale des entrées météorologiques et modifie les conditions d'alimentation des nappes et le ruissellement.

Toutes ces modifications nécessitent donc un nouveau calage afin de restituer au mieux les débits et les piézométries observés à partir des nouvelles données d'entrée du modèle.

#### **3.4.1. Points d'observation**

Les points d'observation utilisés pour le calage du modèle - au travers de la comparaison des données observées aux données simulées - sont de deux types :

- les piézomètres, au droit desquels des mesures de niveau piézométrique sont effectuées ;
- les stations hydrométriques ou, à défaut, des sites de jaugeage, au niveau desquels des mesures de débit de cours d'eau sont effectuées.

Un recensement exhaustif des piézomètres utilisés pour le suivi du niveau des nappes du Plio-Quaternaire à l'Oligocène a été réalisé.

Un total de 235 points d'observation des eaux souterraines est utilisé pour le calage du modèle :

- 13 points d'observation de la nappe des alluvions/Plio-quaternaire,
- 24 points d'observation de la nappe du Miocène,
- 198 points d'observation de la nappe de l'Oligocène.

La figure 26 montre la localisation de ces points d'observations. Cette carte permet d'indiquer :

- la nappe captée,
- si les chroniques sont plus ou moins récentes (moins de 10 ans ou plus),
- si elles présentent un grand nombre d'observations ou non (fréquence des mesures).

Les points d'observation de la piézométrie présentent principalement des chroniques sur plus de 10 années, excepté autour du Saucats et du Gât-Mort qui ont fait l'objet de campagnes de terrain de mesures de piézométrie synchrones (Saltel & B.and, Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du DÉnoyage de l'Oligocène) Phase 2 \& 3. Rapport final. BRGM/RP-65339-FR, 93 p., 62 ill., 10 tabl., 8 ann, 2015).

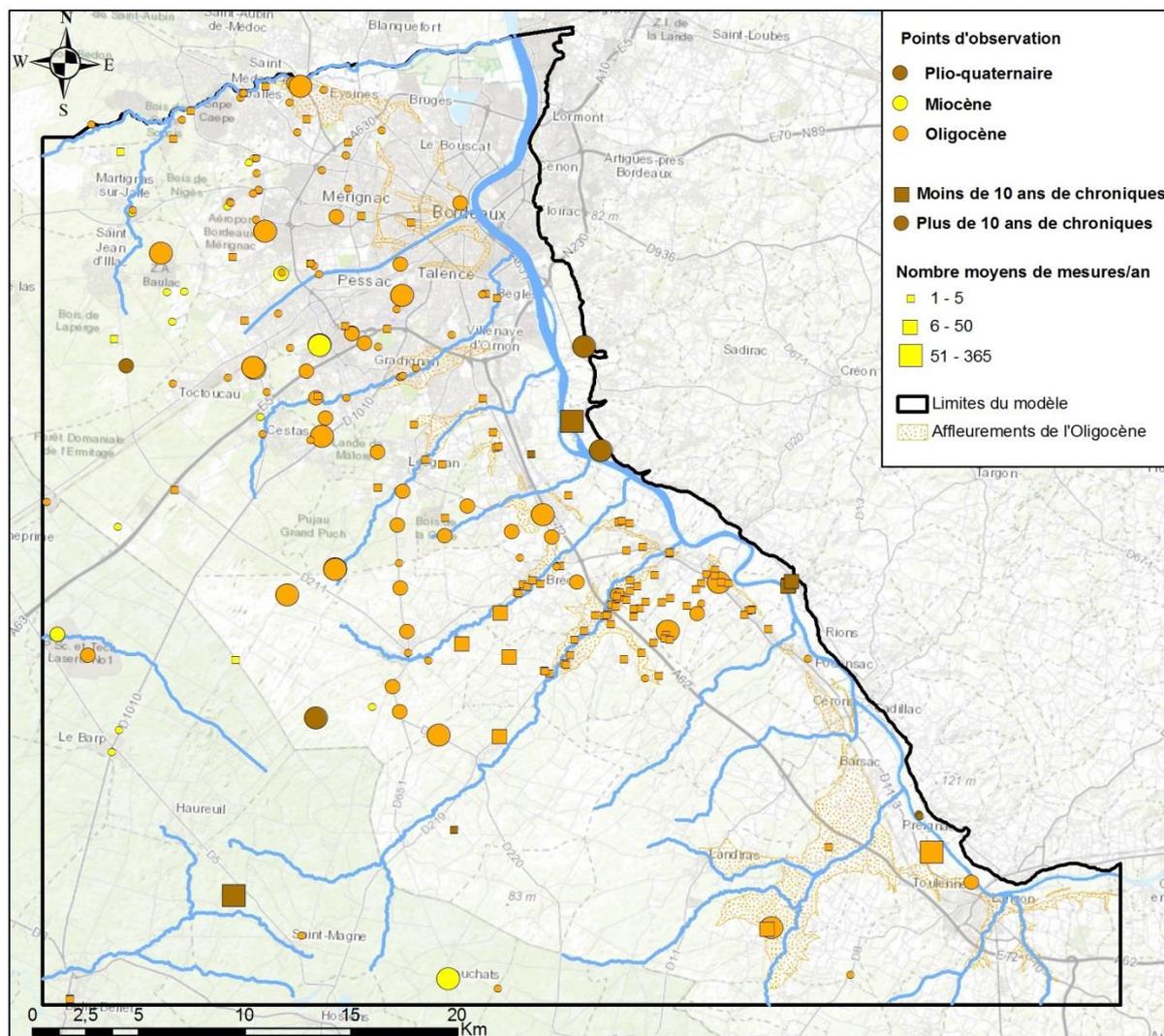


Figure 26 : Points d'observation des niveaux piézométriques utilisés pour le calage

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. Les autres mesures servent de référence pour le calcul des écarts entre les mesures observées et les valeurs restituées par le modèle.

Par ailleurs, 21 points d'observations ont été intégrés pour contrôler les débits de 4 cours d'eau simulés par le modèle (Figure 27). Ces points ne disposent que de mesures de jaugeages ponctuelles qui permettent uniquement de contrôler l'ordre de grandeur des débits. Deux campagnes ont été conduites en 2008/2009 sur l'Eau Bourde, l'Eau Blanche, le Saucats et le Gât-Mort (DIREN, 2009). Quatre campagnes de jaugeage supplémentaires ont été réalisées sur

le Saucats et le Gât-Mort dans le cadre du projet RODEO (Saltel & B.and, Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du DÉnoyage de l'Oligocène) Phase 2 \& 3. Rapport final. BRGM/RP-65339-FR, 93 p., 62 ill., 10 tabl., 8 ann, 2015).

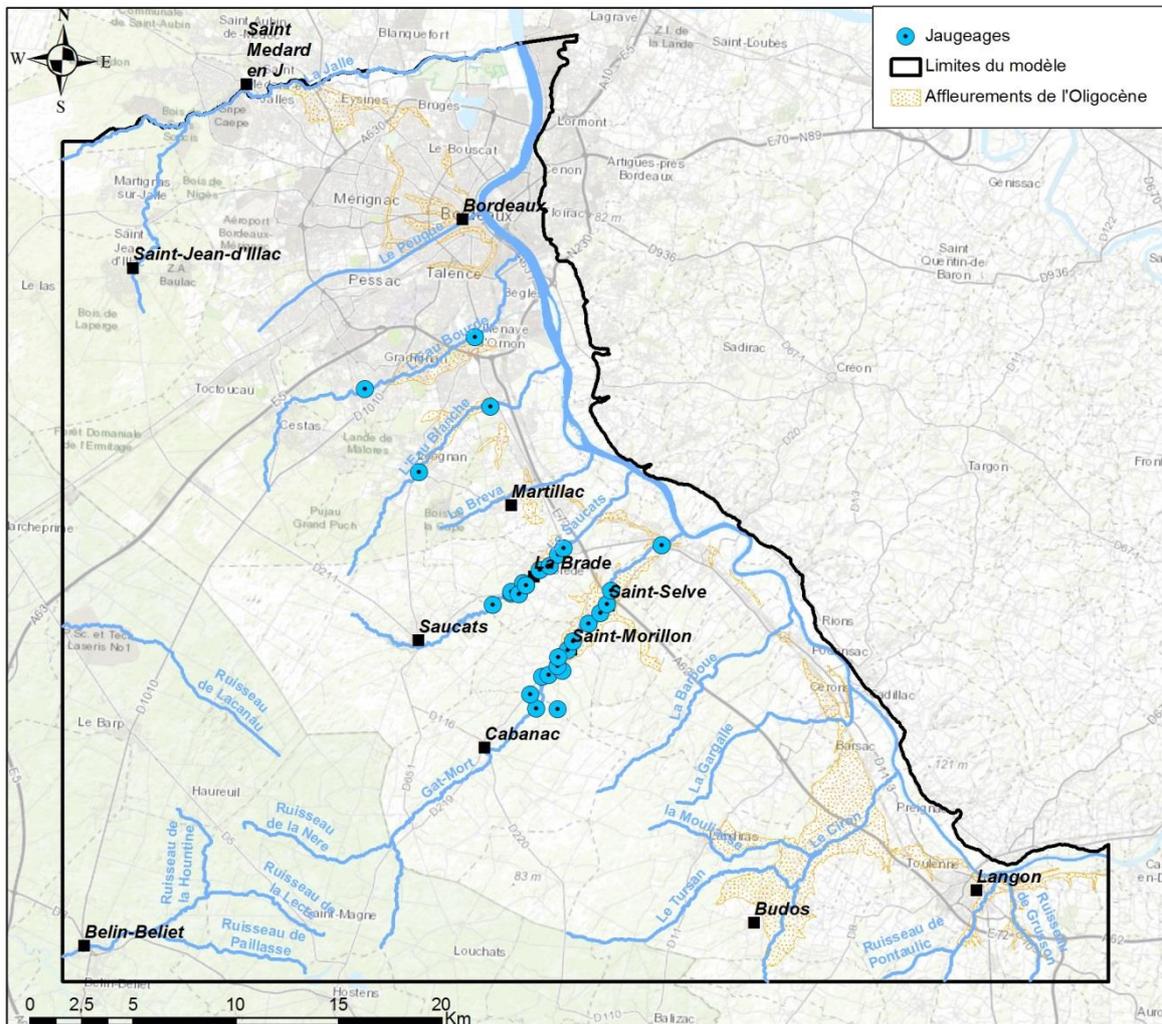


Figure 27 : Localisation des jaugeages utilisés pour le calage du modèle

### 3.4.2. Intégration des paramètres déduits des pompages d'essai

Un travail important de réinterprétation des données de pompages d'essais a été réalisé sur le secteur d'étude dans le cadre des projets RODEO (BRGM/RP-65339-FR) et AGORA (BRGM/RP-67254-FR). L'objectif était d'utiliser les méthodes d'interprétation des pompages d'essai les plus avancées pour déterminer, avec le plus de précision possible, les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de l'Oligocène étudié. En effet, les techniques mises en œuvre ici (méthode héritée de l'industrie pétrolière) sont beaucoup plus poussées que les méthodes classiquement utilisées en hydrogéologie et permettent une estimation beaucoup plus fiable des paramètres hydrodynamiques des aquifères, mais aussi de mettre en évidence des effets liés à leurs géométries (Renard, Glenz, & Mejias, 2009).

La méthode mise en œuvre est décrite dans le schéma suivant (Figure 26) :

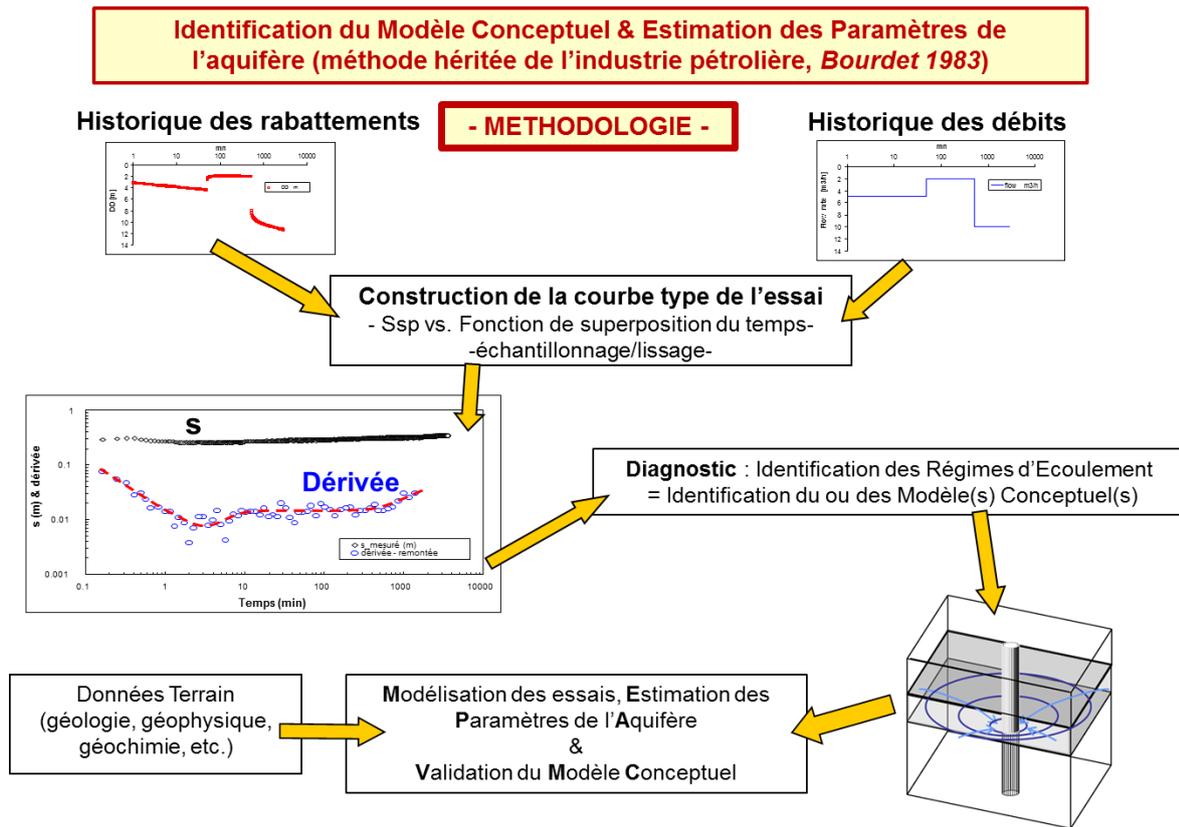


Figure 28 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation de la dérivée des rabattements pour diagnostiquer les essais

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.

### 3.4.3. Calage du modèle en régime transitoire

Le calage des paramètres hydrodynamiques des couches aquifères considérées (Plio-Quaternaire, Miocène, Oligocène) a été effectué en privilégiant la comparaison par points de mesures plutôt que la comparaison par cartes.

L'exemple présenté en figure 29 illustre le format de restitution des données avec en bleu les mesures brutes observées et en vert les charges calculées par le modèle. A noter que la comparaison est réalisée à partir de données calculées par le modèle et observées sur des pas de temps différents (trimestriel et mensuel pour le modèle / trimestriel, mensuel ou journalier pour les données observées).

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 niveau, en phase, en pente et en amplitude de variations (Annexe 6).

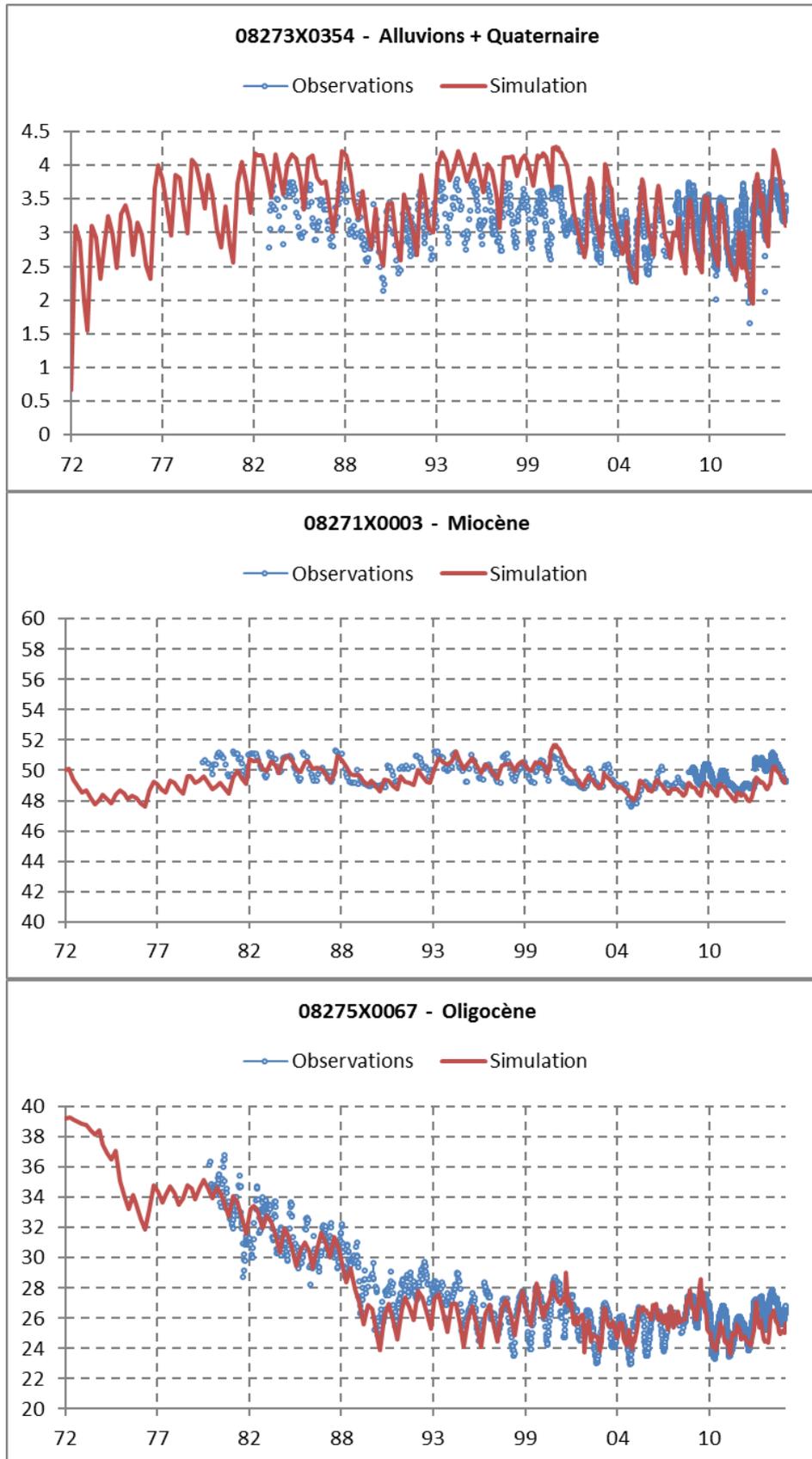


Figure 29 : Exemple de comparaison entre valeurs observées et simulées pour 3 piézomètres

Pour 37 points de prélèvements de la Lyonnaise des Eaux, des chroniques de piézométrie statique et dynamique ont été mises à disposition entre 2007 et 2013. Les piézométries dynamiques traduisent le niveau de la nappe pendant le pompage, tandis que les piézométries statiques traduisent celui de la nappe entre les périodes de pompage. Le modèle a été calé sur la base des données max journalières correspondant à la valeur la plus proche du niveau statique. Sur ces points, on remarque généralement que le calage s'approche ainsi plus des niveaux statiques relevés entre les périodes de pompage dans ces puits (Figure 30).

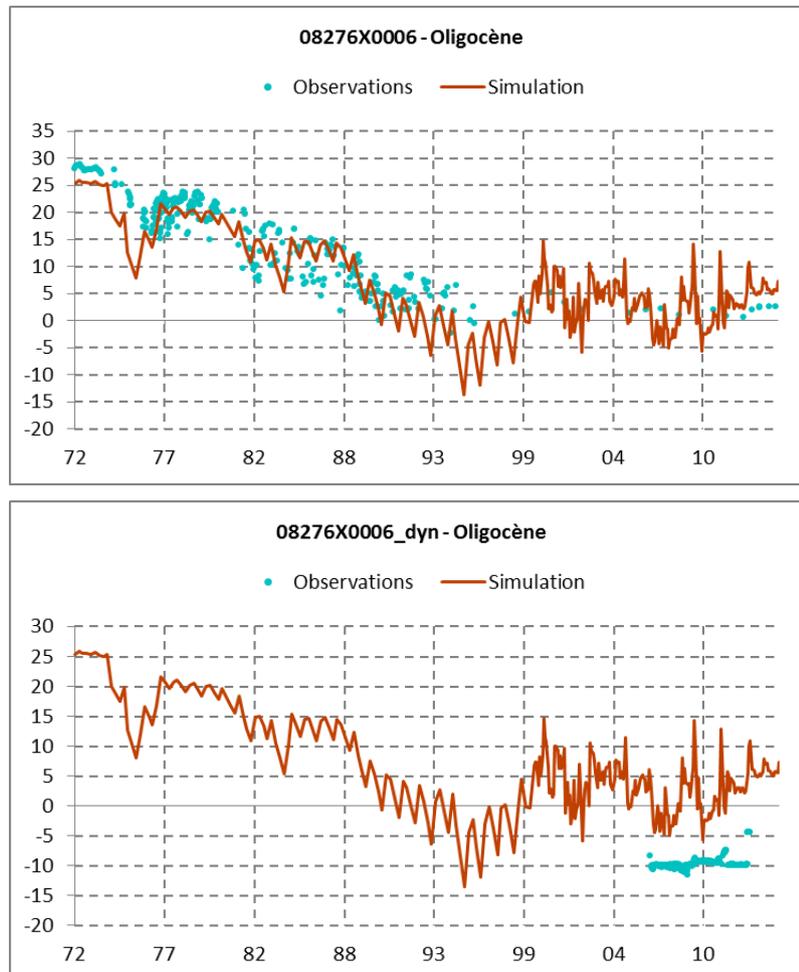


Figure 30 : Exemple de comparaison de la simulation avec les niveaux observés journaliers moyens, les niveaux mesurés dynamique (\_dyn) et les niveaux mesurés statiques (figure du haut)

La validité du modèle a également été vérifiée en comparant les débits des cours d'eau simulés aux mesures ponctuelles provenant de jaugeages ponctuels (DIREN, 2009 ; Saltel et al., 2015). En effet et malheureusement, aucune chronique n'est pour l'instant disponible sur le secteur. Une station de jaugeage a été installée sur le Gât-Mort à Saint-Morillon, au pont de la D 219 le 2 décembre 2015 mais ne peut être utilisé dans le cadre de la présente actualisation (actualisation jusqu'en 2014).

Les mesures ponctuelles (mesures en hautes eaux et basses eaux) servent seulement à vérifier que les débits simulés sont compris dans des gammes réalistes mais elles ne permettent pas de réaliser un calage fin sur la restitution des débits. A noter que comme pour la piézométrie, les données de débits restituées par le modèle sont lissées au pas de temps trimestriel ou mensuel et sont comparées ici à une donnée « instantanée ». Une attention particulière a été portée sur

les ruisseaux du Saucats et du Gât-Mort suite au travail réalisé sur les forages de RODEO. Il ressort que les débits sur le Saucats sont plutôt bien représentés (Figure 31) alors que les débits du Gât-Mort sont surestimés (Figure 32). Un travail spécifique devra être mené pour améliorer la restitution des débits sur ce cours d'eau. L'intégration des données provenant de la station de jaugeage de Saint-Selve permettra d'affiner les résultats sur ce secteur. L'ensemble des points de contrôle du débit en rivière est présenté en annexe 6.

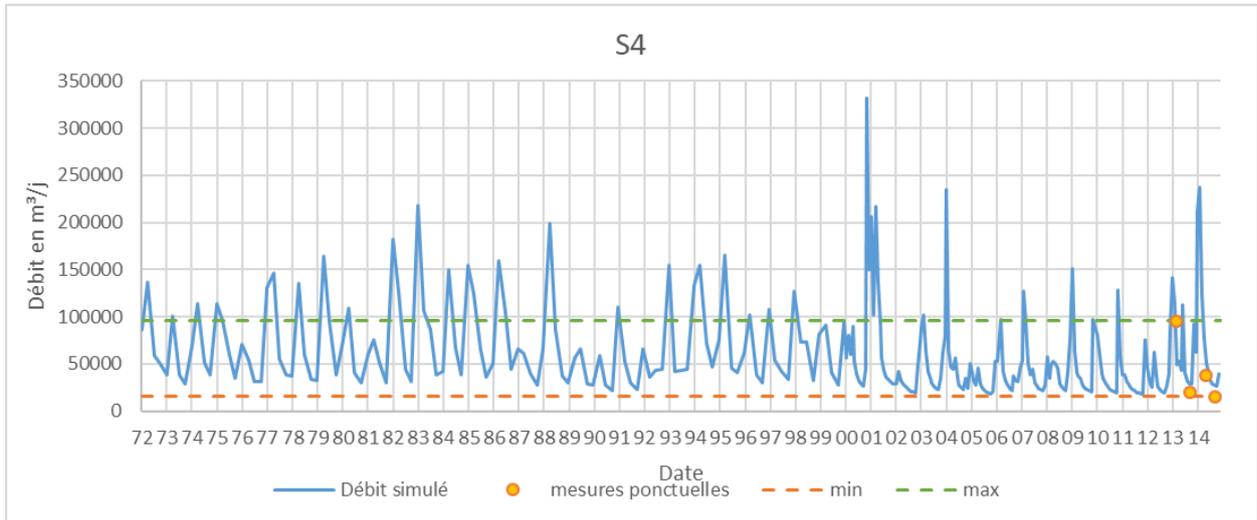


Figure 31 : Comparaison entre débits observés et débits simulés ruisseau du Saucats

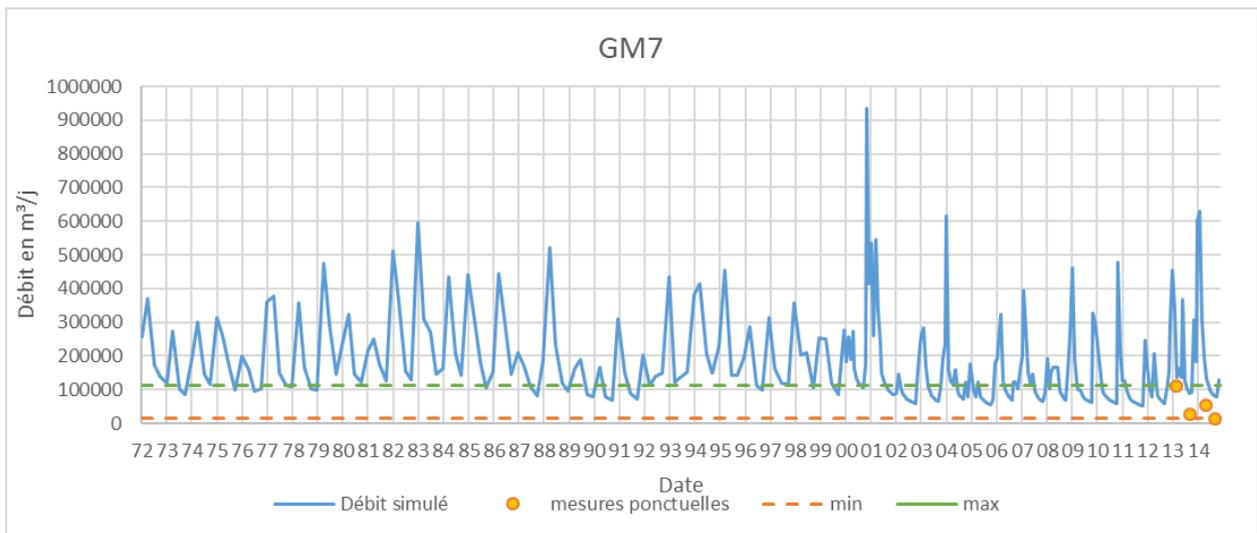


Figure 32 : Comparaison entre débits observés et débits simulés - ruisseau du Gat-Mort

### 3.4.4. Qualité du calage

#### 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 et de l'Oligocène, sur toute la période de modélisation. Le nombre de pas de temps pris en compte est de 292. 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.

- **Écarts individuels Hobs-Hsim**

Au total, l'analyse concerne un total de 234 piézomètres soit 9 098 mesures. Les paramètres statistiques de base sur la période considérée sont donnés dans la Figure 33. Ces paramètres statistiques n'ont pu être calculés que sur 172 points.

	Ensemble	Plio-Quaternaire	Miocène	Oligocène
<b>Nombre de valeurs</b>	9098	1004	996	7098
<b>Moyenne m (en m)</b>	0.10	-0.23	-0.09	0.20
<b>Ecart type <math>\sigma</math> (en m)</b>	2.50	1.44	1.43	2.72
<b>Moyenne abs (en m)</b>	1.71	0.91	1.03	1.92
<b>RMSE</b>	2.84	0.73	1.36	3.01
<b>Médiane</b>	-0.09	0.20	-0.22	0.12
<b>Minimum (en m)</b>	-10.40	-5.13	-5.04	-10.40
<b>Maximum (en m)</b>	11.52	2.67	6.03	11.52

Figure 33 : Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles

La moyenne des écarts entre piézométrie observée et simulée est très proche de zéro pour les nappes considérées. Elle est de 0,10 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 1,71 m sur l'ensemble des valeurs. Cette valeur peut être considérée comme un résultat tout à fait acceptable.

D'autres indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer le calage tel que le RMSE (Root Mean Square Error) ou le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) :

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

Le RMSE est généralement plus grand que la moyenne des écarts absolus sauf pour la nappe du Plio-Quaternaire.

Les diagrammes de dispersions présentés de la figure 34 à la figure 37, montrent que les valeurs moyennes simulées présentent une corrélation satisfaisante avec les valeurs moyennes

observées. Les piézométries des nappes du Plio-Quaternaire et du Miocène sont particulièrement bien restituée par le modèle. En effet, les valeurs moyennes issues des points de contrôle pour ces nappes sont bien alignées sur la droite d'écart zéro entre valeurs simulées et valeurs observées. Les corrélations dans la nappe de l'Oligocène et de l'Éocène restent dans une gamme tout à fait acceptable.

A noter que certaines chroniques, très éloignées des zones d'intérêt, 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 Saint-Magne-Louchats, au sud du domaine modélisé. Les résultats de calage obtenus peuvent donc être considérés comme satisfaisants, malgré l'éloignement.

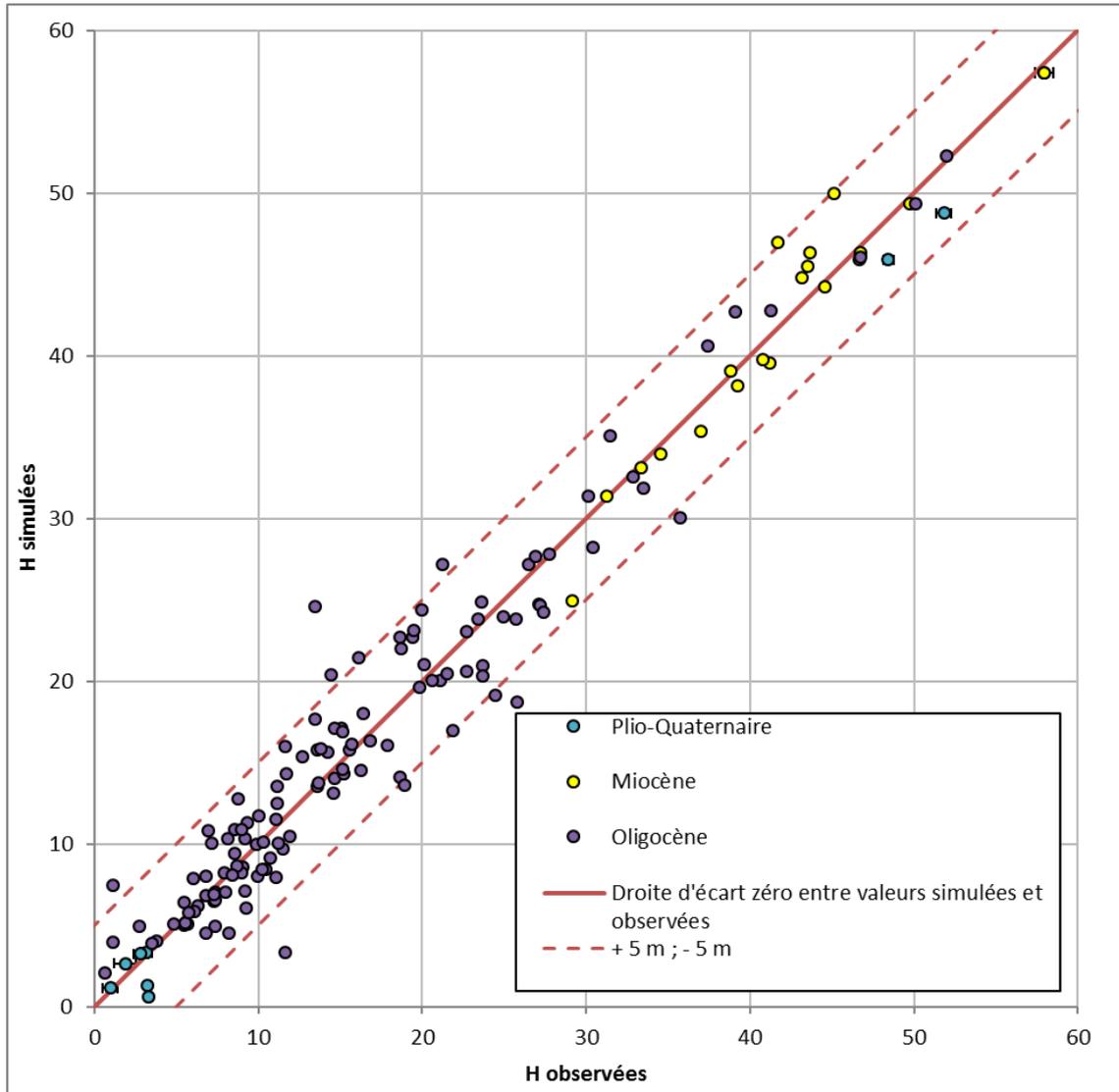


Figure 34 : Diagramme de dispersion général du modèle

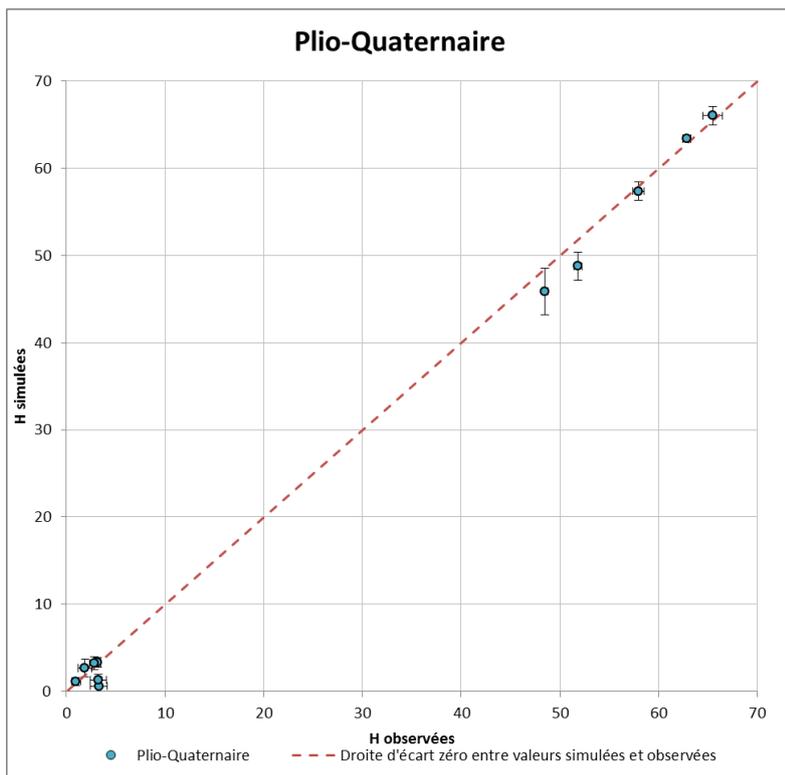


Figure 35 : Diagramme de dispersion des points simulés dans la nappe du Plio-Quaternaire. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs simulées (barre verticale) et observées (barre horizontale)

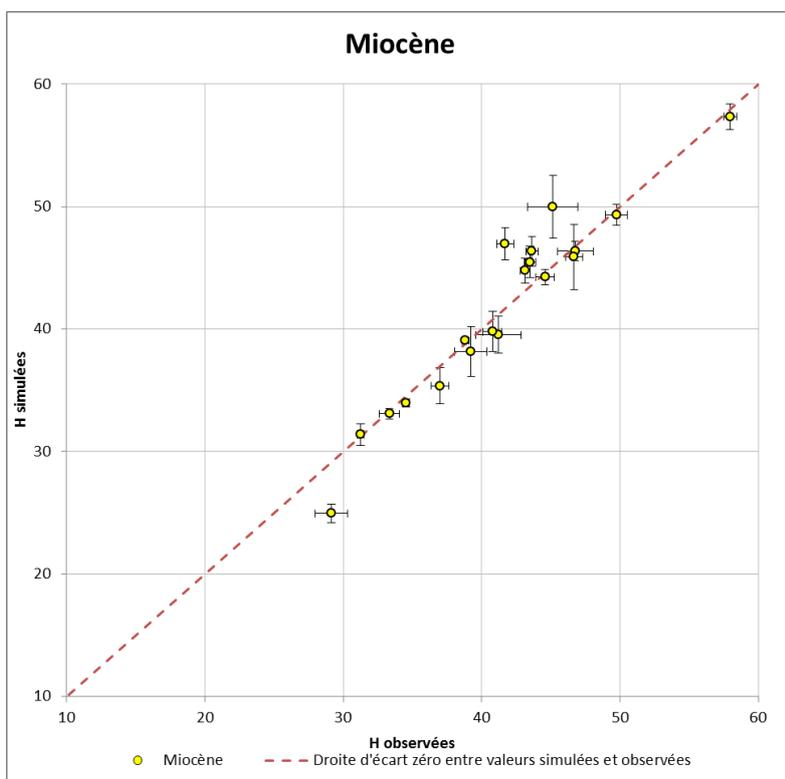


Figure 36 : Diagramme de dispersion des points simulés dans la nappe du Miocène. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs simulées (barre verticale) et observées (barre horizontale)

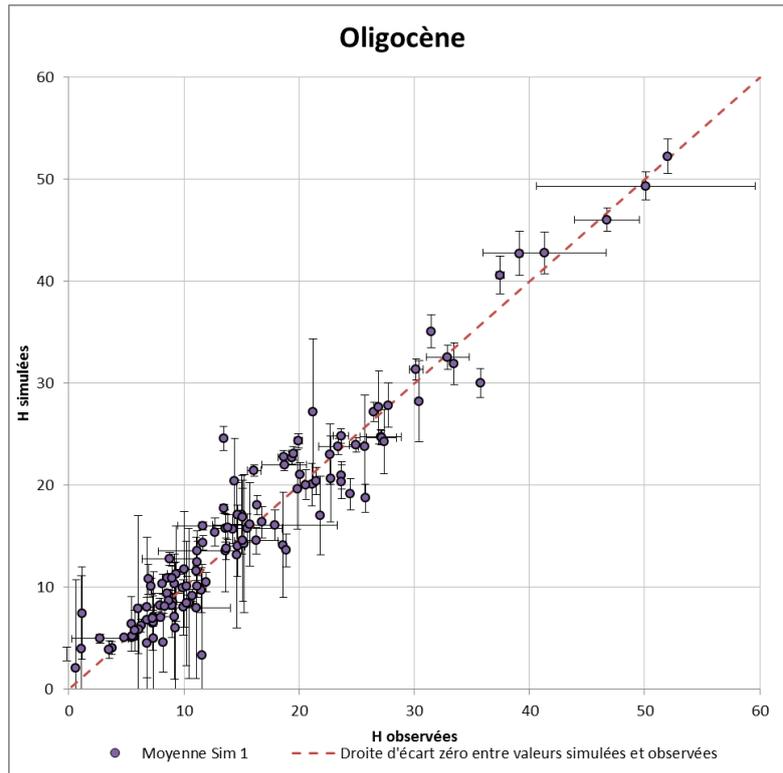


Figure 37 : Diagramme de dispersion des points simulés dans la nappe de l'Oligocène. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs simulées (barre verticale) et observées (barre horizontale)

- **Evolution des écarts moyens**

L'évolution de ces écarts est présentée pour la nappe du Plio-Quaternaire (Figure 38). L'analyse du graphique d'évolution des écarts moyens montre deux tendances au cours du temps. Jusqu'en 2005, les charges simulées sont très proches des charges observées ; puis les écarts entre observations et simulation se creusent. Cette deuxième partie s'explique par deux points observés avec une grande fréquence de mesures entre 2005 et 2014 et dont les piézométries simulées sont sous-estimées par le modèle. Avant 2005, les écarts-type stables montrent une précision stable également.

La nappe du Miocène (Figure 39) présente une moyenne des écarts quasi nulle malgré des fluctuations au cours du temps. Les écarts type des écarts restent faibles.

Pour la nappe de l'Oligocène (Figure 40), la courbe de tendance de la moyenne des écarts augmente au cours du temps. Cependant, sur la période 1998-2014, la moyenne des écarts est stable et proche de 1 mètre, traduisant une légère surestimation des charges simulées. L'écart type des écarts reste stable. Sur la fin de la période (2013-2014), l'augmentation de l'écart type traduit la prise en compte de mesures ponctuelles de piézométrie.

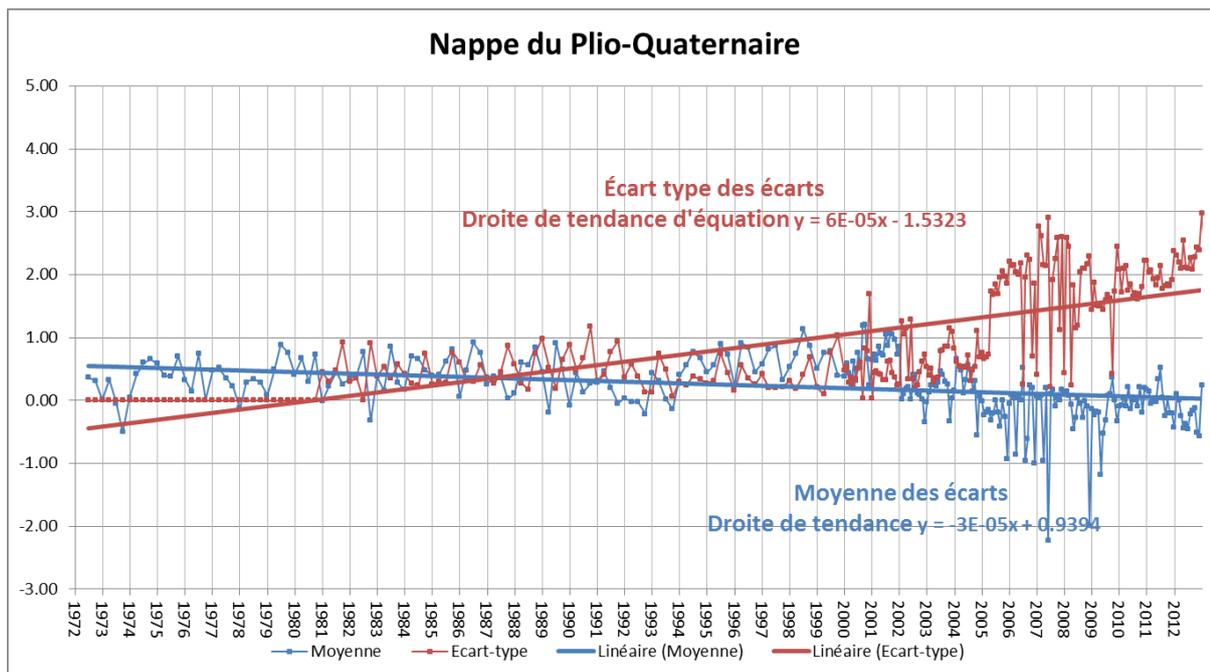


Figure 38 : Nappe du Plio-Quaternaire - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type

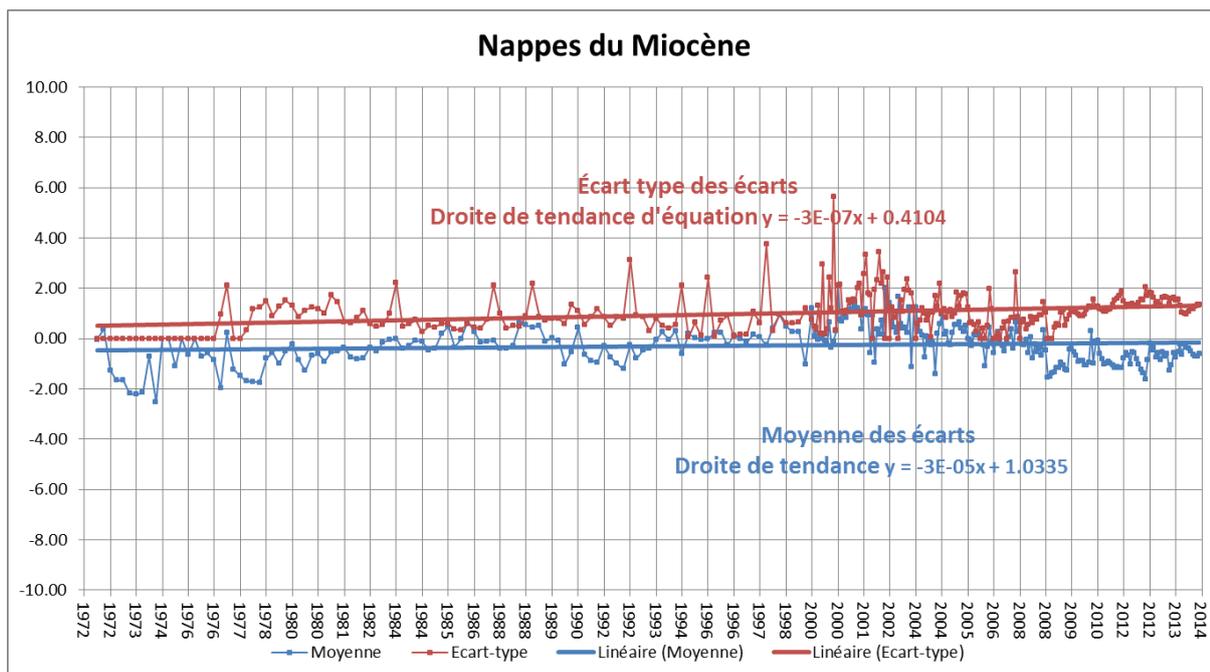


Figure 39 : Nappes du Miocène (Langhien-Serrvallien Aquitainien) - Évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type

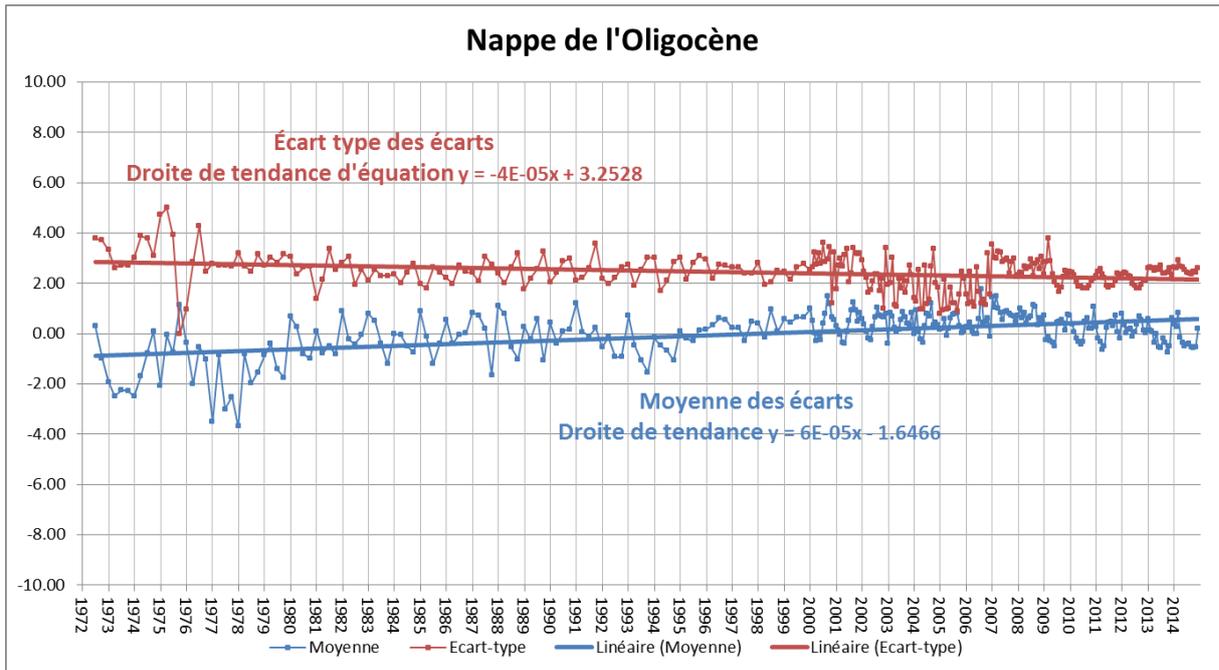


Figure 40 : Nappe de l'Oligocène - Évolution dans le temps des écarts moyens et de l'écart type

De manière générale, il est possible de distinguer un comportement avant 2000 et un autre après 2000 en lien avec le changement du pas de temps trimestriel au pas de temps mensuel.



## 4. Accessibilité des données du modèle

L'ensemble de la géométrie du modèle est accessible et sera téléchargeable sur le site du SIGES Aquitaine.

L'extraction des perméabilités issues du modèle Oligocène devra faire l'objet d'une demande argumentée et renseignée via le formulaire accessible en ligne sur le site Internet du SIGES Aquitaine (Figure 41).

Vous êtes ici : Accueil > Gestion de l'eau > Outils techniques > Modèle oligocène > Téléchargement des données

**Modèle oligocène**

**Téléchargement des données**

Qu'est ce que le modèle Oligocène ?

**Téléchargement des données**

Cible : Expert

**Nom (obligatoire)**

**Mail (obligatoire)**

**Téléphone**

**Usage des données (obligatoire)**

Merci de décrire dans quel cadre votre demande s'inscrit et l'usage qui sera faite des données

**Emprise souhaitée**

Coordonnées de l'emprise en Lambert 93

**X min (obligatoire)**

**X max (obligatoire)**

**Y min (obligatoire)**

**Y max (obligatoire)**

**Paramètres souhaités (obligatoire)**

Géométrie

Perméabilité

**CGU (obligatoire)**

Je certifie avoir lu et accepté les conditions générales d'utilisation (en bas de page)

**Valider**

**Documents à télécharger**

[CGU Modèle Oligocène \(PDF, 82.2 ko\)](#)

Figure 41 : Formulaire de téléchargement des données

Ce dernier permettra de spécifier le nom du demandeur, ses coordonnées (adresse mail et téléphone), l'usage ultérieur des données, les paramètres souhaités, et l'emprise géographique de la demande. La demande ne sera enregistrée qu'après validation des conditions générales d'utilisation (CGU). Les CGU détaillent le contenu des données mises à disposition, leurs limites d'utilisation, les obligations du demandeur et les conditions d'utilisation et de diffusion (Annexe 7). Une fois la demande validée, elle pourra être traitée par le BRGM et les données seront transmises par retour de mail.

Il n'existe pas d'obligation légale quant à la rédaction de conditions générales d'utilisation (CGU). Toutefois, il est fortement recommandé de les inclure au site internet. En effet, le contrat de CGU encadre juridiquement les rapports et les conflits pouvant naître entre l'éditeur du site et le visiteur.

En revanche et conformément à la loi pour la confiance dans l'économie numérique en date du 21 juin 2004, les mentions légales doivent obligatoirement figurer sur le site internet. Les CGU peuvent les reproduire ou indiquer un lien direct permettant d'y accéder.

## 5. Conclusion

Le présent rapport a permis d'actualiser la géométrie du modèle géologique de l'Oligocène et d'améliorer le modèle hydrodynamique tout en prolongeant la période de simulation jusqu'en 2014.

Le modèle géologique a été enrichie des données provenant des travaux récents sur la zone d'étude dans le cadre du projet RODÉO (Saltel, et al., 2012 ; Saltel, et al., 2015) et des travaux de modélisations géologiques réalisés à plus grande échelle (Saltel et al., 2011 ; Saltel et al., 2012 ; Saltel et al., 2014). Alors que la base de données de forage comportait en 2010 un total de 637 ouvrages décrits par près de 1 561 horizons, l'ajout de nouvelles données a permis de porter le nombre de forages pris en compte à un total de 745 pour 2 040 horizons qui sont décrits dans la base. La carte géologique et le tracé des failles sont restés identiques par rapports aux travaux de 2010, ces données ayant déjà fait l'objet d'un travail de validation et de mise en cohérence.

L'intégration de nouveaux forages dans le cadre du travail d'actualisation de la géométrie n'a pas entraîné de modifications majeures de la géométrie hormis pour l'éponte du Chattien-Miocène qui présente quelques variations en comparaison de la carte réalisée en 2010 (Saltel, et al., 2010). En effet, la réinterprétation de certains forages a été nécessaire afin d'assurer la cohérence avec la géométrie du MONA V4 (Saltel, et al., 2014). L'éponte est donc moins épaisse qu'auparavant sur la bordure ouest du modèle au sud de Saint-Jean-d'Illac.

Le modèle hydrodynamique qui simulait dans sa version précédente les écoulements (Mod\_Oligo V1-2007) au pas de temps annuel entre 1972 et 1997 et trimestriel entre 1998 et 2007 a vu sa discrétisation temporelle raffinée pour mieux prendre en compte les variations climatiques et la saisonnalité de l'exploitation des réservoirs (périodes d'irrigation, pics de consommation pour l'alimentation en eau potable). Ainsi, dans la nouvelle version du modèle (Mod\_Oligo V2-2014), le pas de temps est trimestriel entre 1972 et 1999 et mensuel entre 2000 et 2014.

La prise en compte de la recharge a également été améliorée en intégrant les données spatialisées (Pluie et évapotranspiration potentielle « ETP ») issues des grilles SAFRAN de Météo France (42 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 GARDENIA de Marthe au pas de temps journalier. Pour mémoire, dans la version précédente du modèle, les bilans climatiques et le calcul de la recharge étaient réalisés en amont de la modélisation sous Excel au pas de temps annuel puis trimestriel à partir des données de la station météorologique de Mérignac.

Lors de l'actualisation des données de prélèvements du modèle, des données au pas de temps trimestriel ou mensuel ont été récupérées auprès des différents producteurs d'eau afin d'améliorer la précision des volumes prélevés dans le modèle et d'être toujours au plus proche des données réelles. Lorsque seuls les volumes annuels étaient disponibles, une ventilation en fonction des usages a été appliquée, en se basant sur les profils constatés sur le secteur d'étude.

Aux vues des modifications apportées (remaniement de la géométrie, modification de la prise en compte de la recharge, ...), un recalage du modèle a été nécessaire. Les ajustements de perméabilités ont été réalisés en gardant comme référence les données issues des travaux de réinterprétation des données de pompages d'essais effectués sur le secteur d'étude dans le cadre des projets RODEO (Saltel et al., 2015) et AGORA (Saltel et al., à paraître).

L'appréciation du calage est effectuée à partir des 235 points d'observation des eaux souterraines répartis sur la zone d'étude dont une majorité (198 forages) concerne la nappe de l'Oligocène.

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 traduisant une bonne restitution de l'évolution des charges dans le modèle.

Le modèle Oligocène élaboré, comme le stipule la disposition 95 du PAGD, est le modèle de référence qui sert à l'élaboration des règles de gestion de l'Oligocène. Les nouveaux prélèvements susceptibles d'avoir un impact sur les zones à risque de dénoyage (ZAR) ou les zones à enjeux aval (ZAEA) feront l'objet d'une simulation au sein du modèle oligocène pour vérification de la compatibilité avec les règles de gestion. A noter que le modèle a déjà été utilisé dans sa version précédente pour l'évaluation l'impact de l'arrêt du forage d'alimentation en eau potable de la commune de Saucats (08276X0001/F) et la mise en production d'un nouveau pompage (Saltel, Impact sur la nappe de l'Oligocène de la création d'un nouveau forage destiné à la production d'eau potable – Commune de Saucats. Rapport BRGM/RP-63299-FR, 21 p., 13 fig, 2014). Il va être utilisé dans sa nouvelle version dans le projet AGORA (Approche de Gestion Optimisée des Réservoirs Aquifères) pour travailler à l'optimisation de la production de la ligne des « 100 000 m<sup>3</sup>/jour » et du site de Bellefond. L'objectif étant de déterminer la meilleure façon d'exploiter cet ensemble de forages tout en limitant au maximum l'extension de la zone dénoyée.

## 6. 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.

**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.

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

**DIREN** (2009) - Campagnes de jaugeages isolées menées en 2009 en Gironde et Landes en relation avec les affleurements du Plio-Quaternaire et de l'Oligocène - (GI 815).

**FDAAPPMA33** (2010) - Plan départemental pour la protection des milieux aquatiques et la gestion de la ressource piscicole de la Gironde - Extrait territoire Centre Gironde.

**Richer de Forges 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.

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

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

**Saltel M., Pédron N., P. Platel J., Bourguine 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 - Rapport final BRGM/RP-59959-FR, 63 pages, 38 figures, 6 annexes.

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

**Saltel M., Cabaret O., Bourguine 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.** (2014) - Impact sur la nappe de l'Oligocène de la création d'un nouveau forage destiné à la production d'eau potable – Commune de Saucats. Rapport BRGM/RP-63299-FR, 21 p., 13 fig.

**Saltel M., Dewandel, B. et Bodinniet, J.** (2015) - Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du Dénoyage de l'Oligocène) Phase 2 & 3. Rapport final. BRGM/RP-65339-FR, 93 p., 62 ill., 10 tabl., 8 ann.

**Saltel M., Dewandel, B. et Vergnes, J.P.** (à paraître) - Approche de Gestion Optimisée des Réservoirs Aquifères - Projet AGORA -Optimisation de la ligne des 100 000 m<sup>3</sup>/j et des sources de Bellefond. Rapport final. BRGM/RP-67254-FR.

**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.

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

**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.** (2014) - Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.4. Exploration des principales fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes. Rapport BRGM/RP-62798-FR. 229 p., 131 fig.

## **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,
- multicolonne : 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

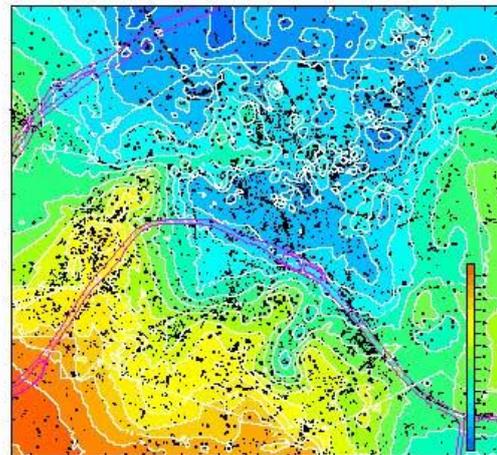
- Exploration et exploitation de ressources minérales.
- Gestion des ressources en eau,
- Conception de tunnels, barrages, sites de stockage souterrains,
- Aménagement du territoire,
- Diagnostics de pollution du sous-sol,

#### > Conditions / Tarification

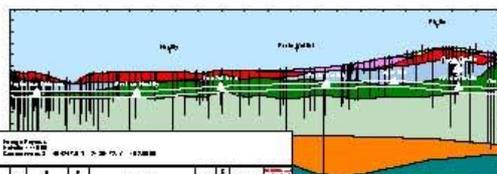
- Application Windows GDM 2014 Standard Edition (v 7.1) :  
Licence mono-utilisateur : 5 000 € HT  
Tarif dégressif pour les licences suivantes.  
Licences université : nous consulter
- Composants pour intégrer les fonctions de GDM dans un SIG ou dans une application Internet : nous consulter

#### > Contact

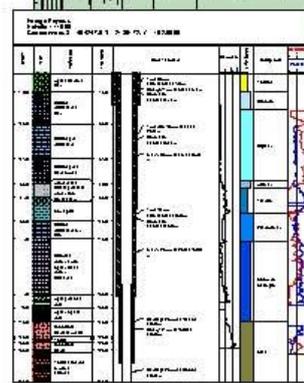
**brgm**  
Direction des Systèmes d'Information  
Tél. : 02 38 64 30 14  
Fax : 02 38 64 39 70  
Mél : [adm@brgm.fr](mailto:adm@brgm.fr)  
Web : <http://adm.brgm.fr>



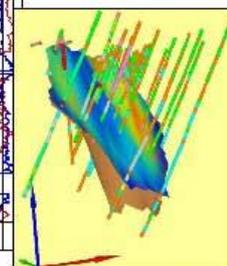
PARIS - Altitude du toit des Sables de Beauchamp



PARIS  
Profil Défense - Étoile  
(modèle 3D multicouches)



Log de forage pour recherche d'eau



Filon minéralisé et sondages



# 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 groupement 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 sériées

- 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, diagraphies, 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  
Mél : [gdm@brgm.fr](mailto:gdm@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.

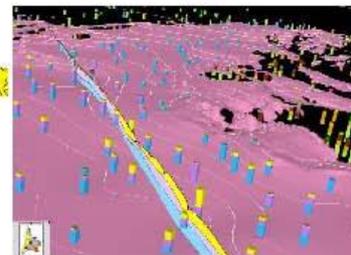
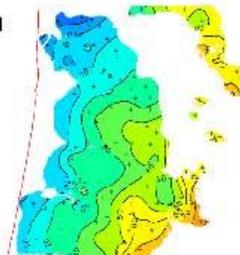
Le modèle peut être exploité facilement par la production automatique de cartes, coupes, vues 3D et export vers différents formats.



Arbre MultiLayer visualisant la pile stratigraphique modélisée

### > Domaines d'application

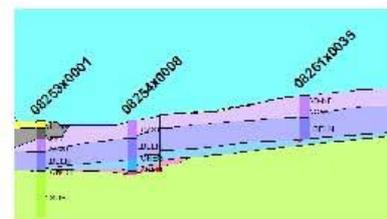
- Exploration et exploitation de ressources minérales,
- Gestion des ressources en eau,
- Géotechnique et génie civil,
- Conception de tunnels, barrages, sites de stockage souterrains,
- Aménagement du territoire,
- Géothermie.



Bassin Aquitain. Carte isotype 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  
Mél : [adm@brgm.fr](mailto:adm@brgm.fr)  
Web : <http://adm.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, dBase, 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 ESRII Ascii Grid, au format texte CSV, au format Texte avec colonnes de largeur fixe).

#### DONNÉES GÉOLOGIQUES PRISES EN COMPTE

Différents 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,
- Épaisseur 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 isopaques
- 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

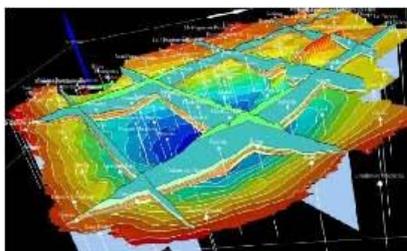
Nombreux outils de contrôle de cohérence des données :

- 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 (ESRII Ascii Grid, CSV, Texte) avec gestion du nombre de décimales
- Calcul de volumes
- Calcul de sondages prévisionnels



**brgm**

Direction des Systèmes d'Information  
Tél. : 02 38 64 30 14 - Fax : 02 38 64 39 70  
Mél : [adm@brgm.fr](mailto:adm@brgm.fr)  
Web : <http://adm.brgm.fr>

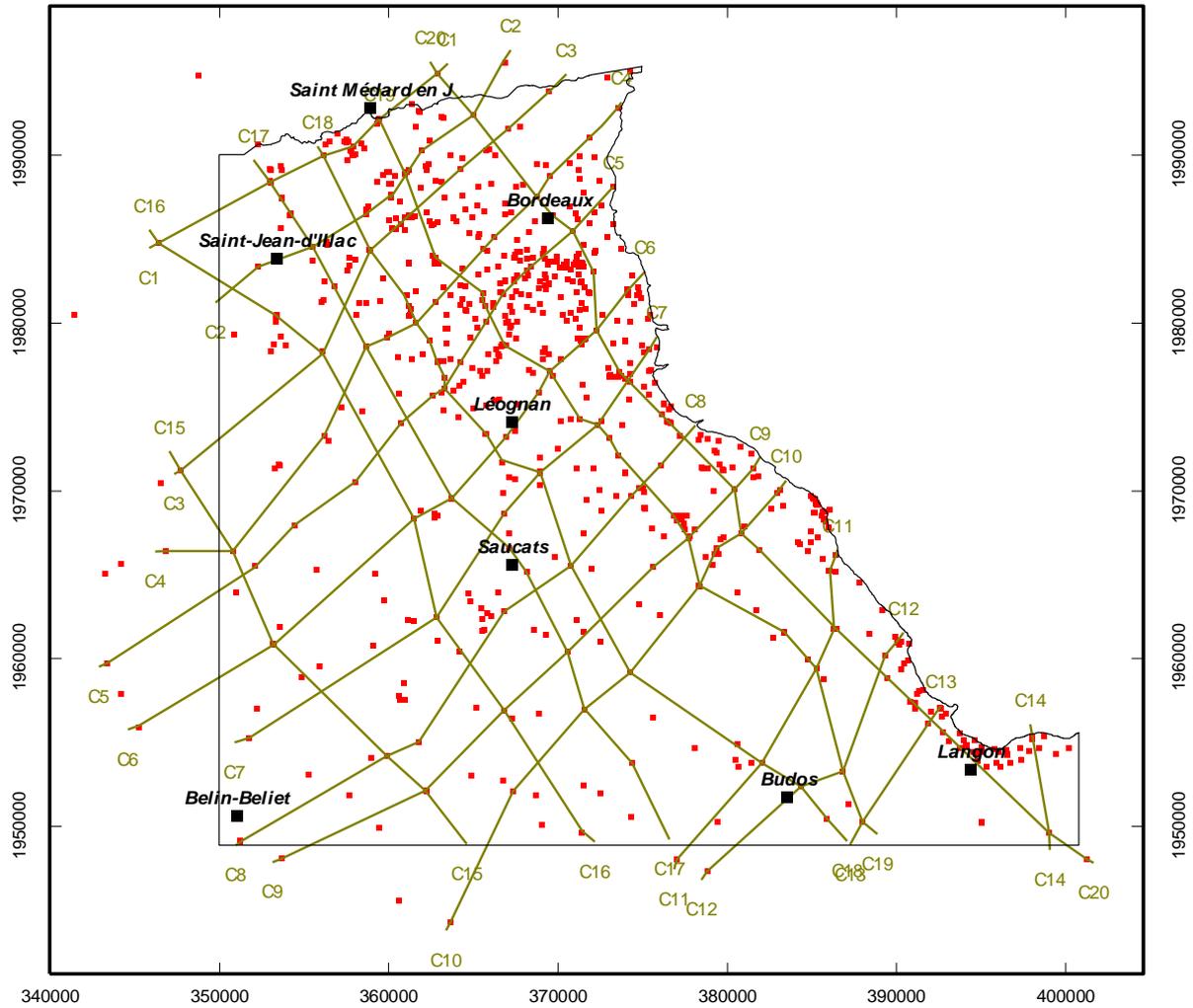
- Disponible pour Windows 7 ou 8 en version monoposte ou réseau
- Interface avec menus contextuels et barres d'outils, sur une structure de projet
- Interface Documents Multiples (MDI)
- Technologie .Net, 32/64 bits

© BRGM 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

## **Annexe 2**

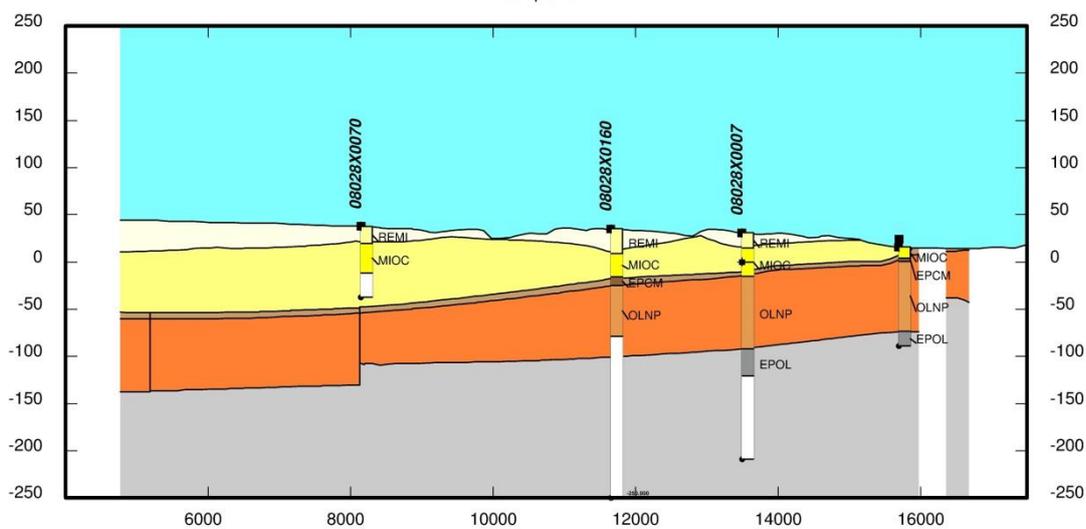
# **Coupes dans la géométrie du modèle géologique numérique (GDM)**



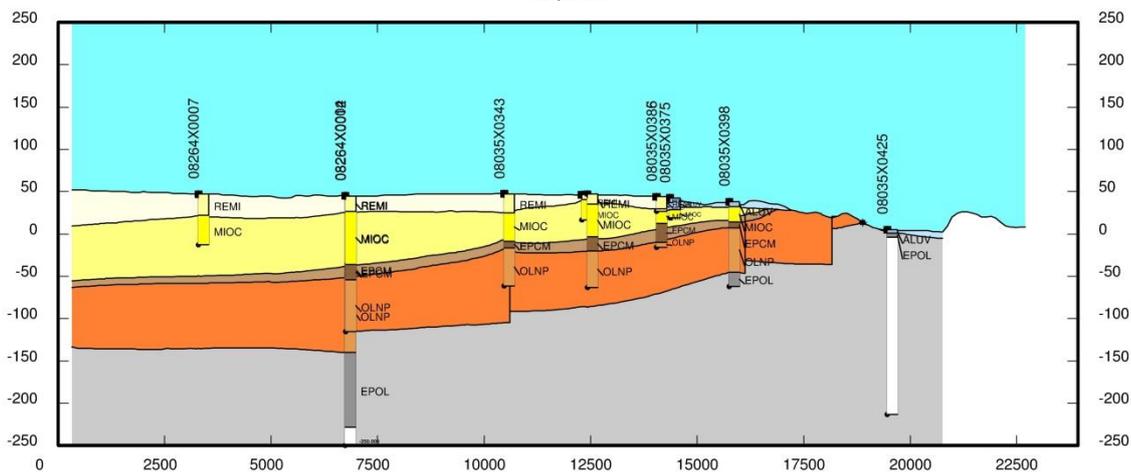


**C1** ——— Coupes réalisées dans le modèle  
• Ouvrages (utilisés pour la construction du modèle)

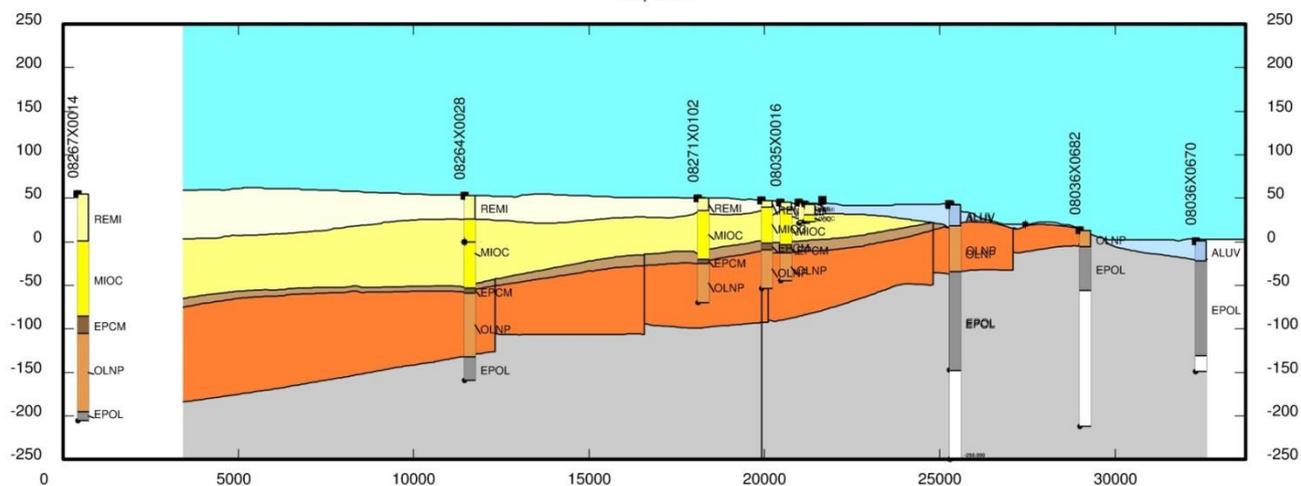
Coupe : C1

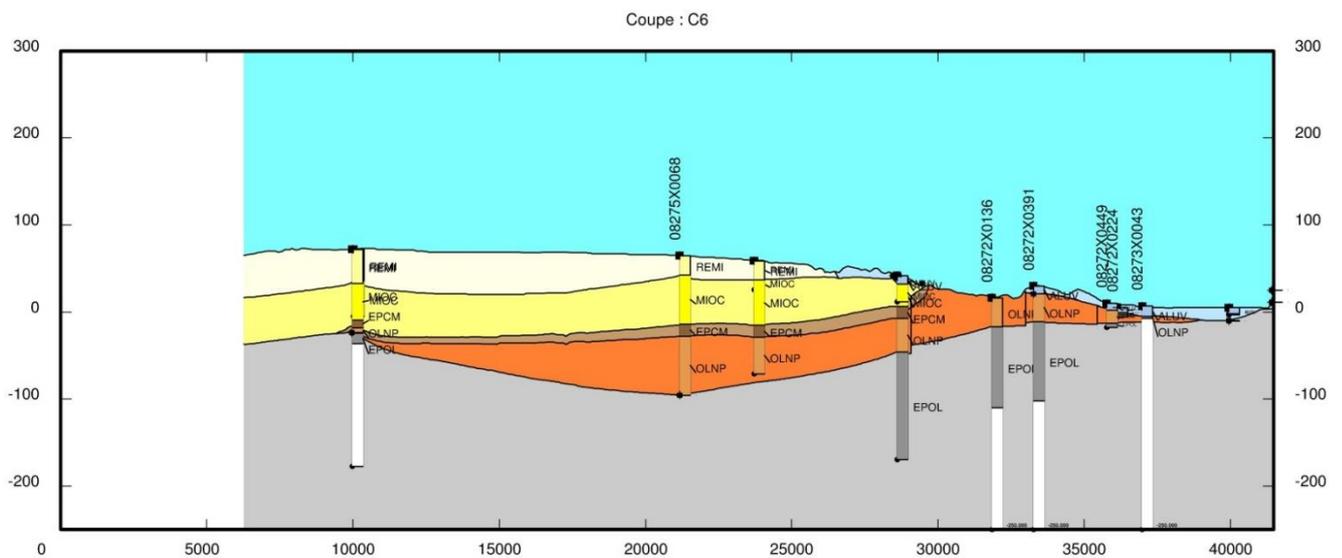
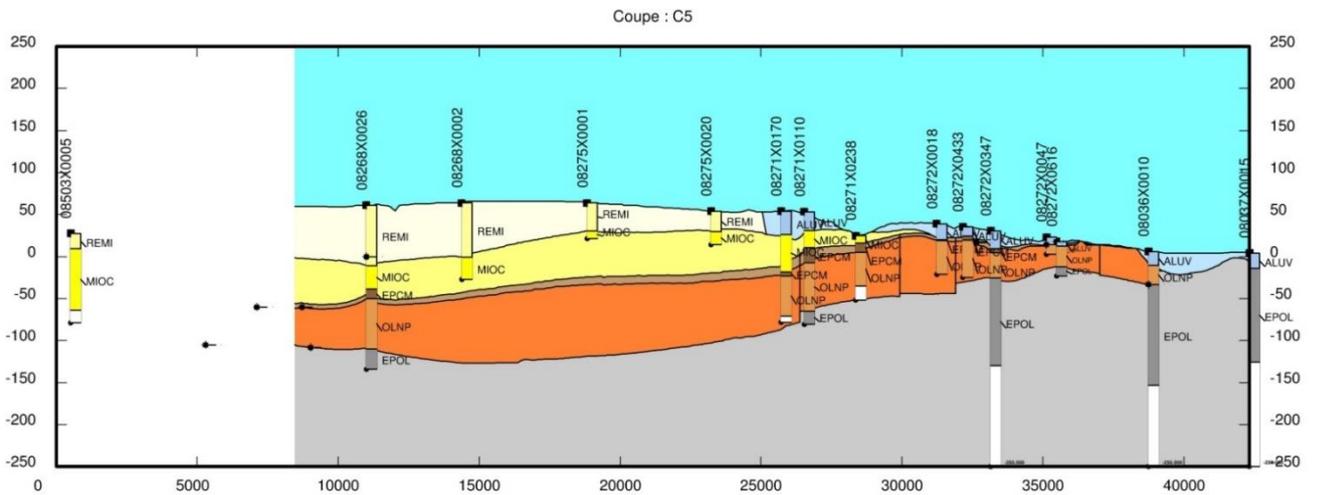
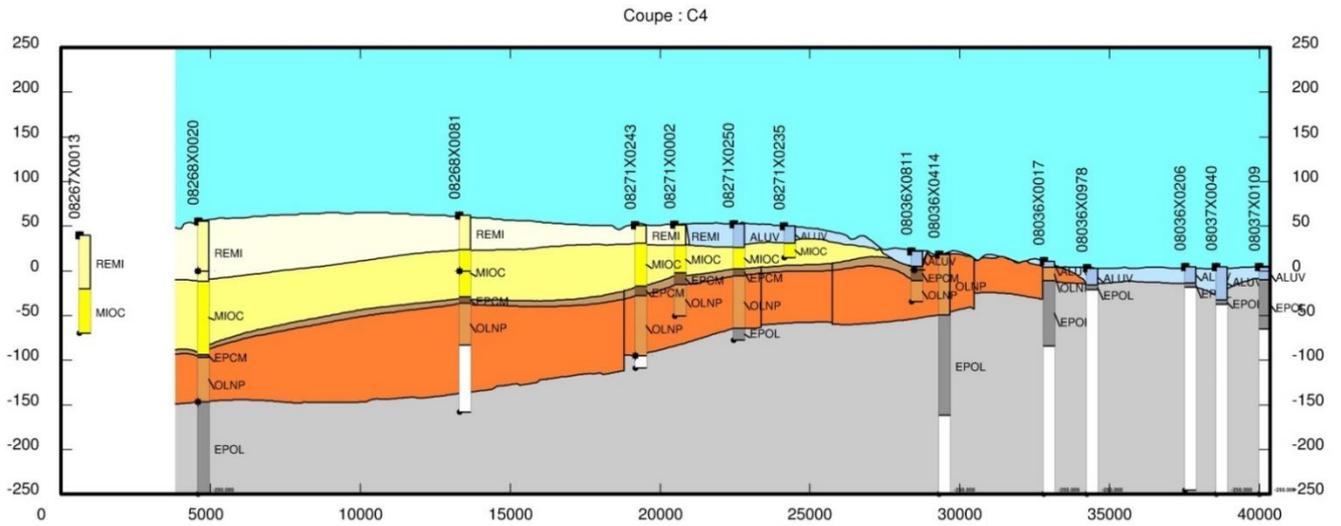


Coupe : C2

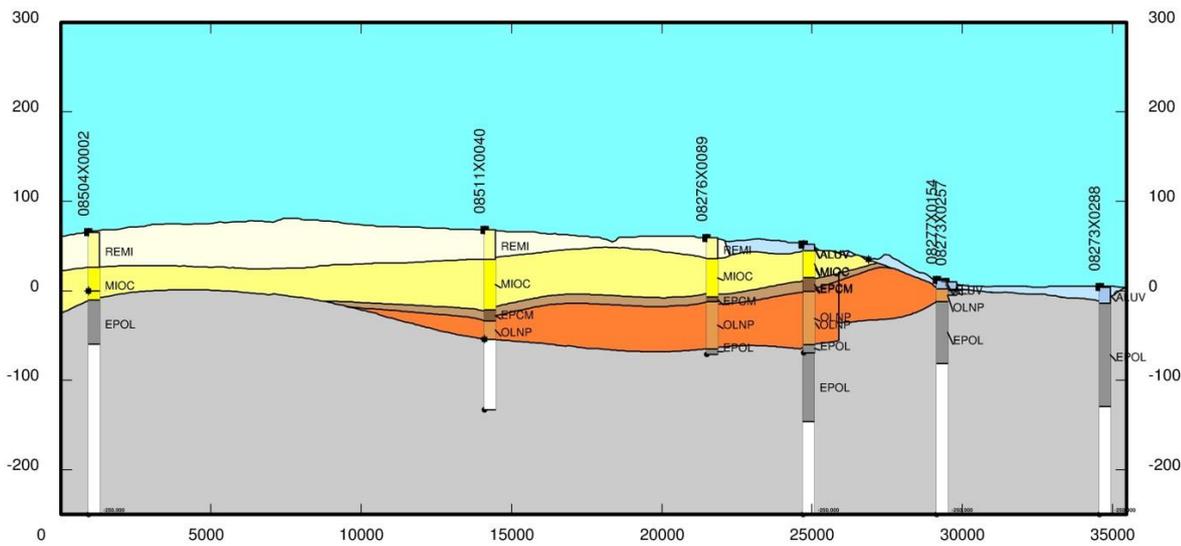


Coupe : C3

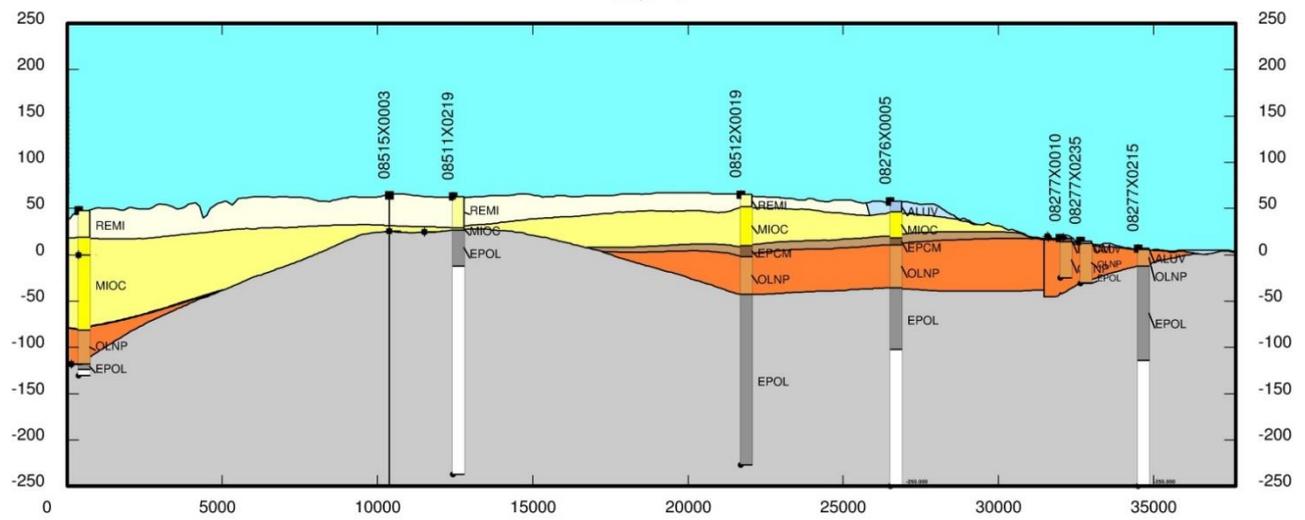




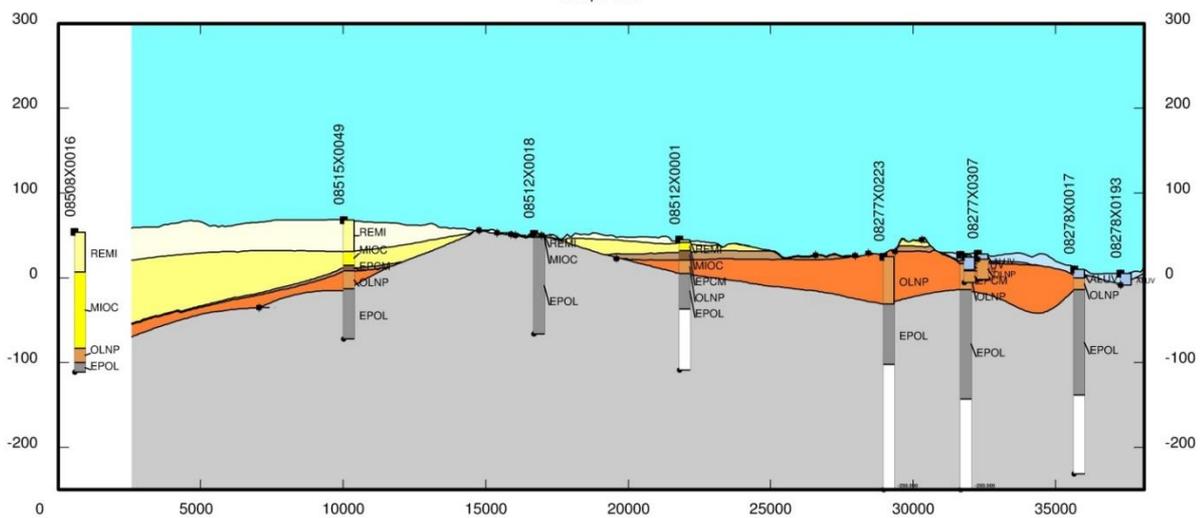
Coupe : C7

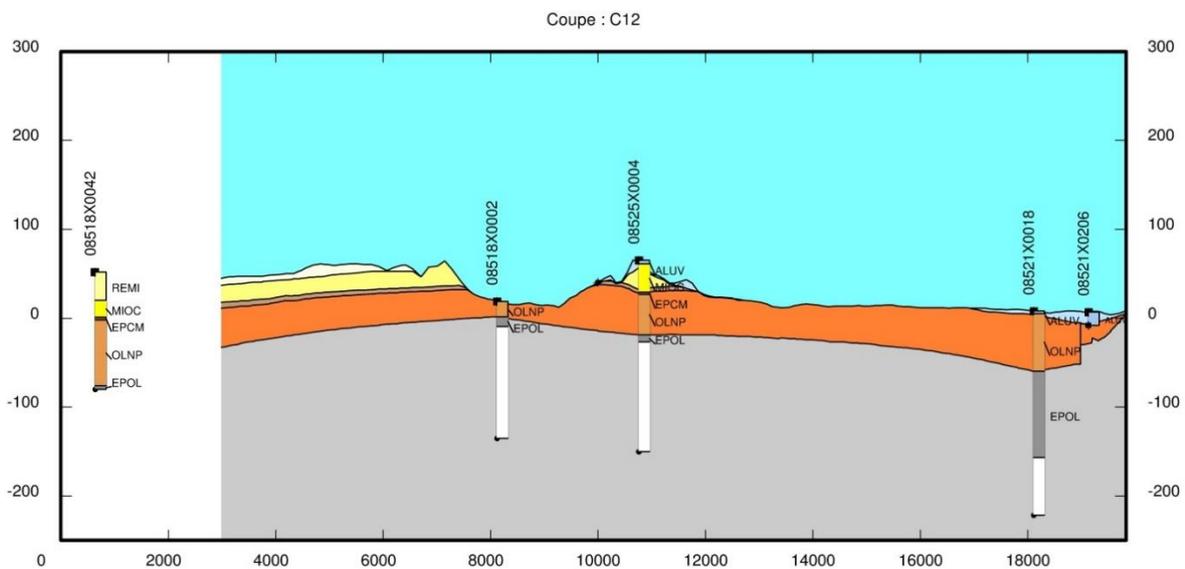
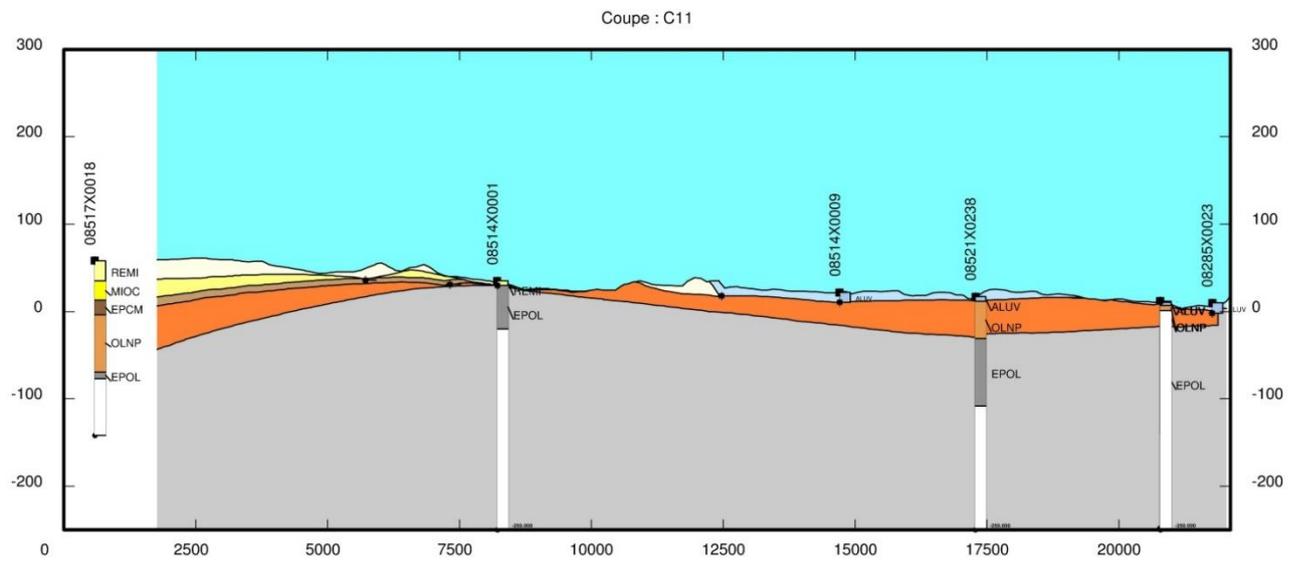
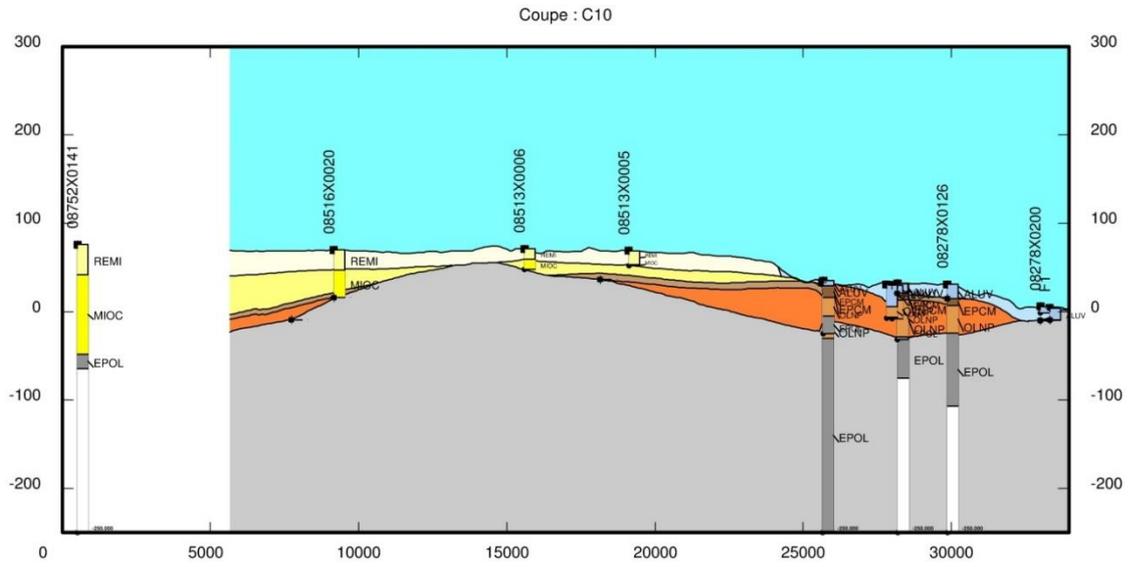


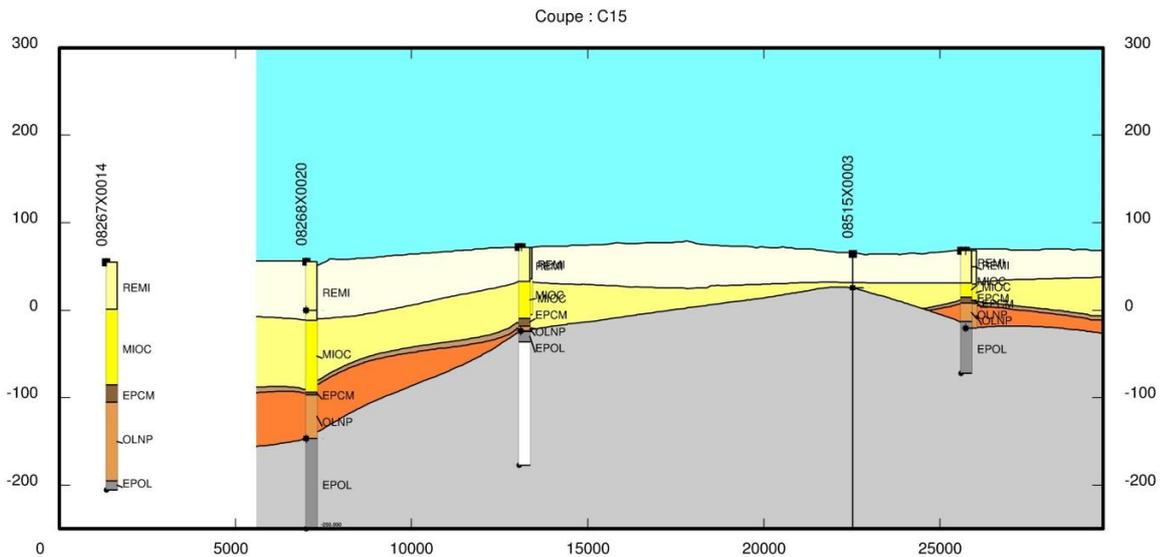
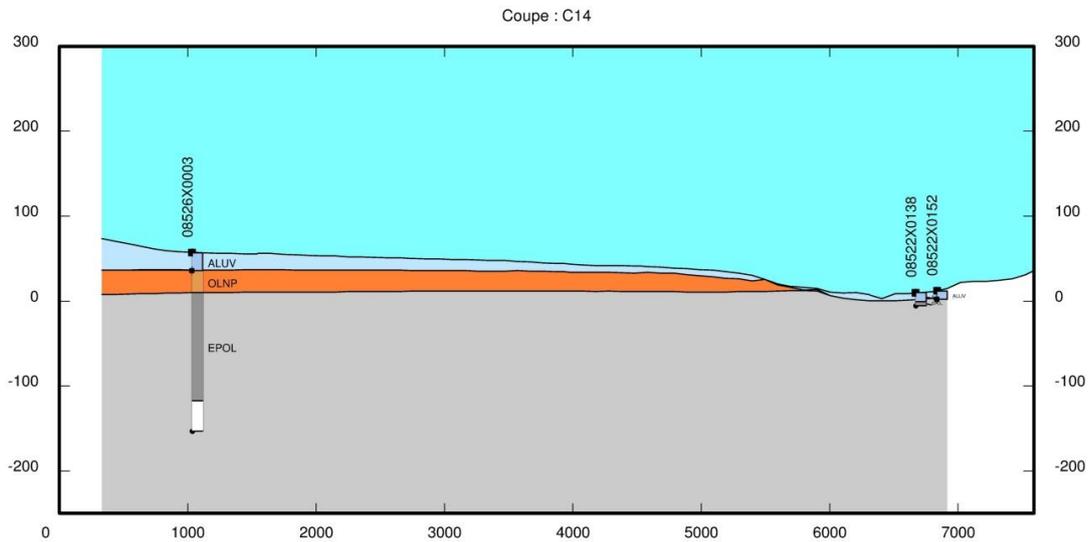
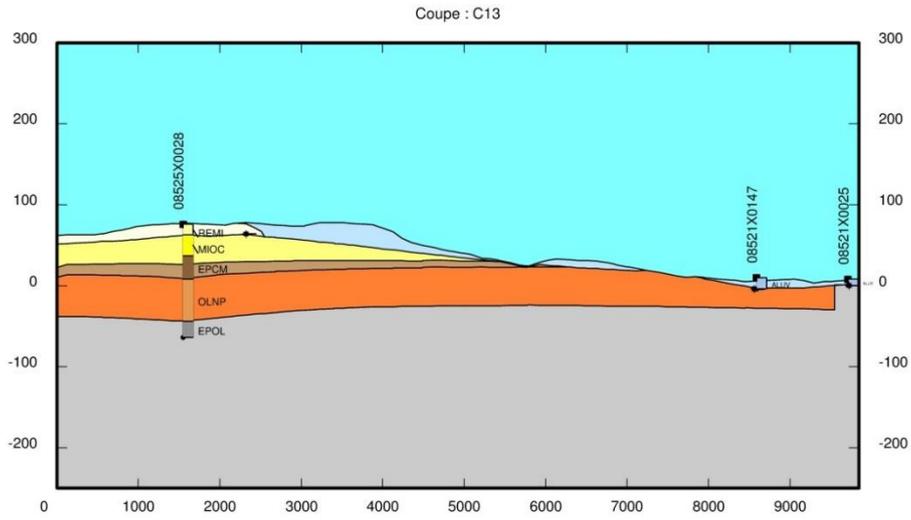
Coupe : C8

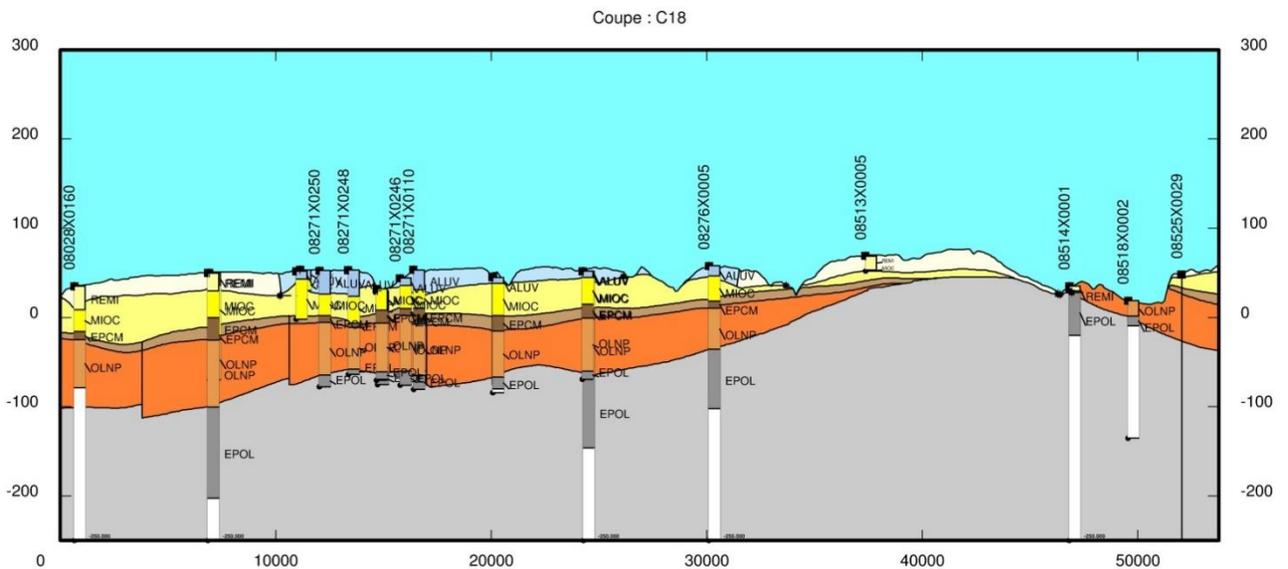
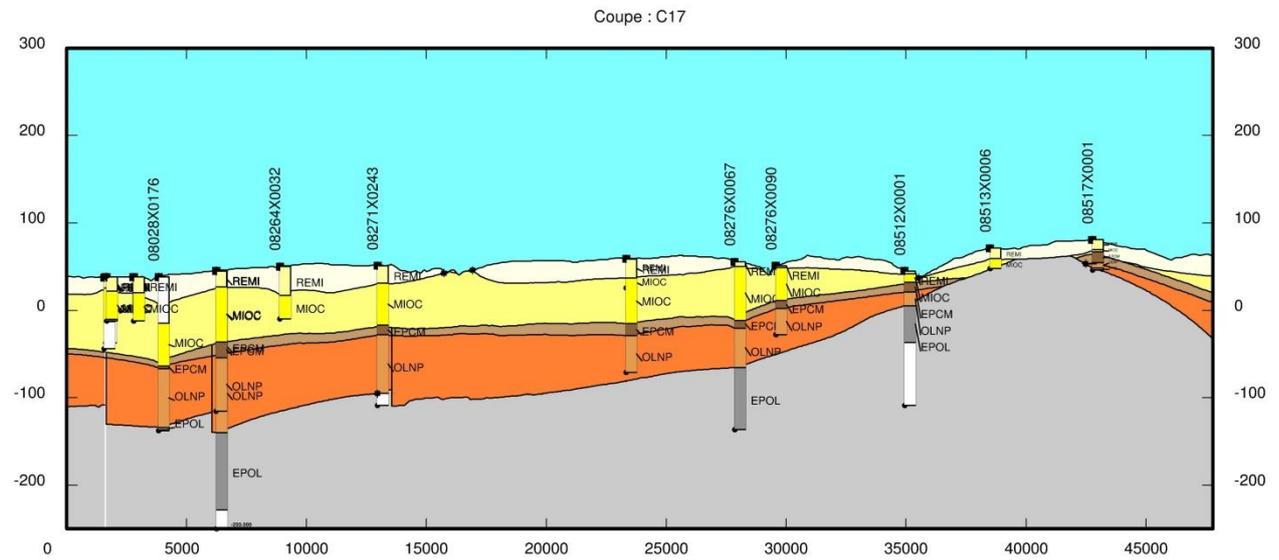
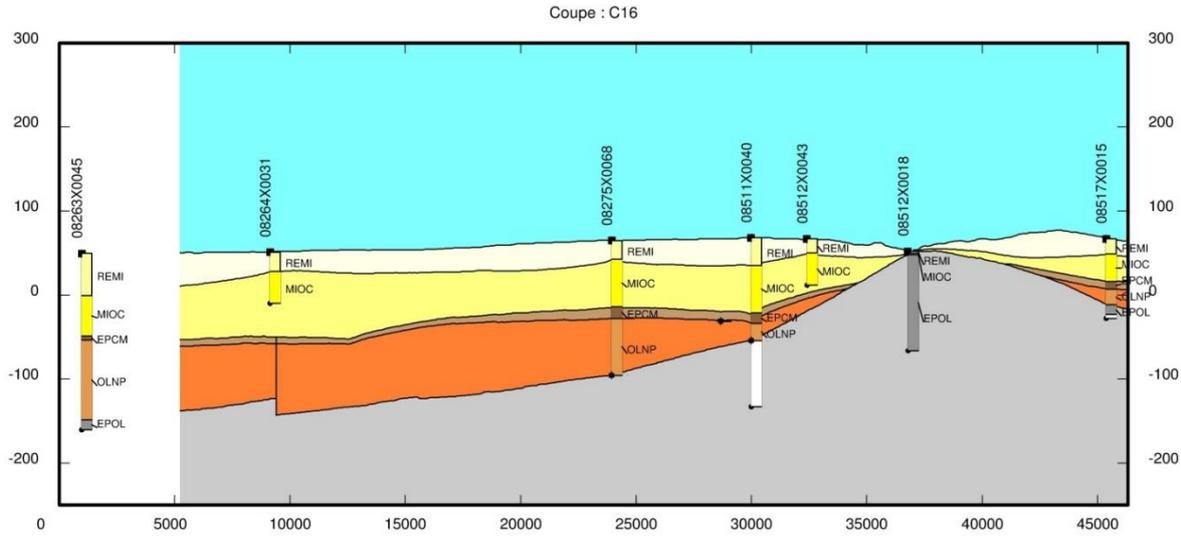


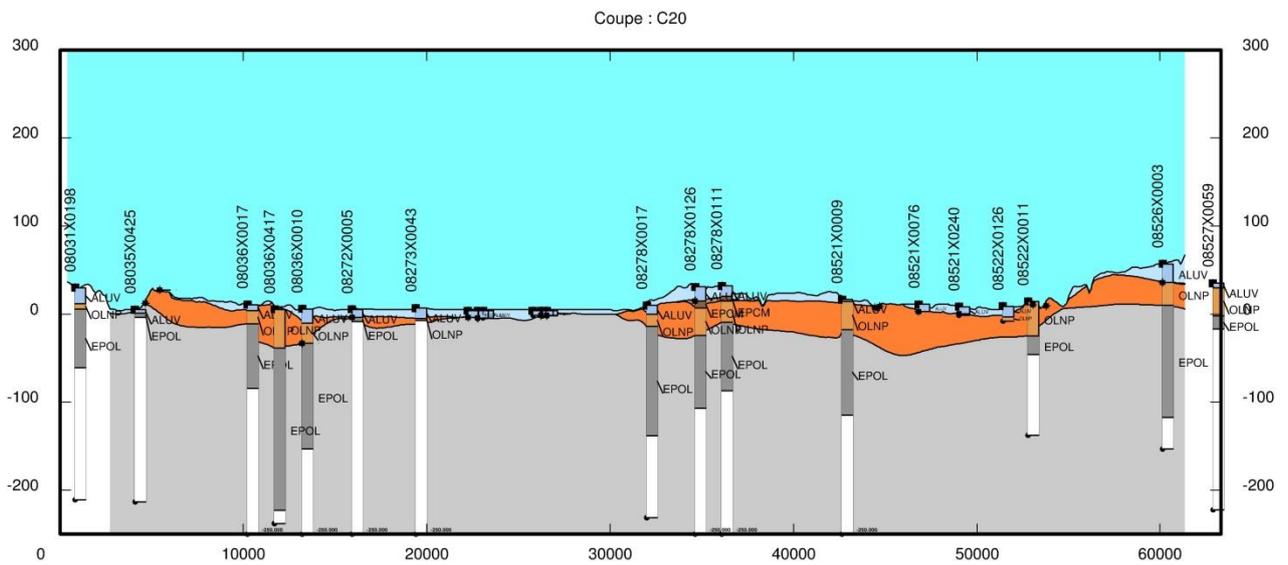
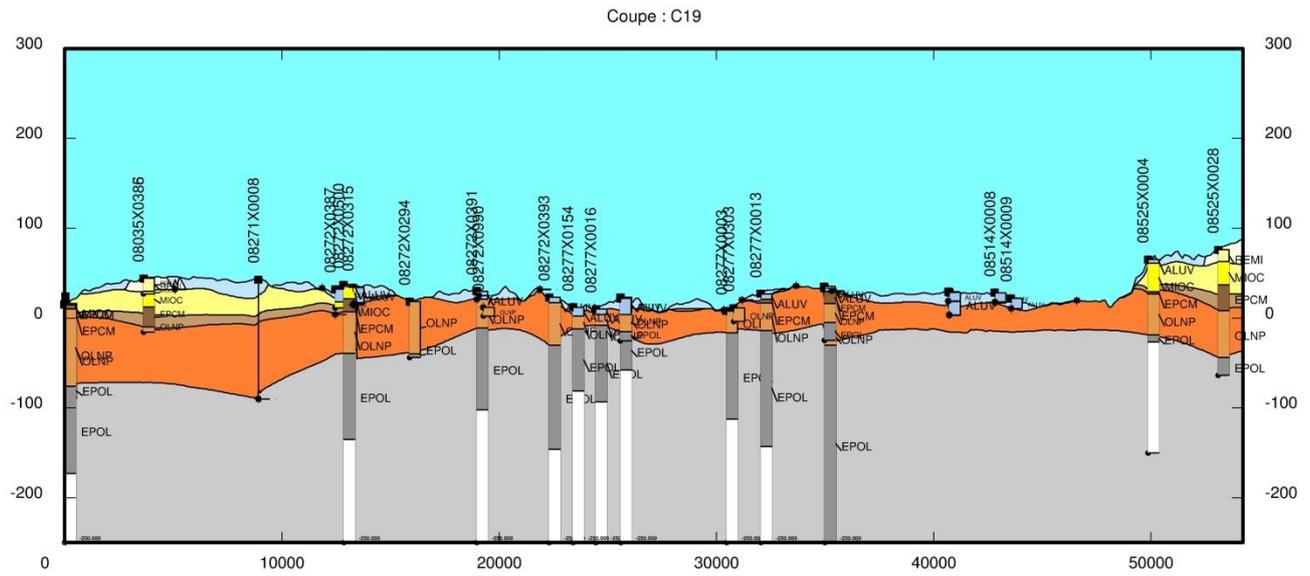
Coupe : C9







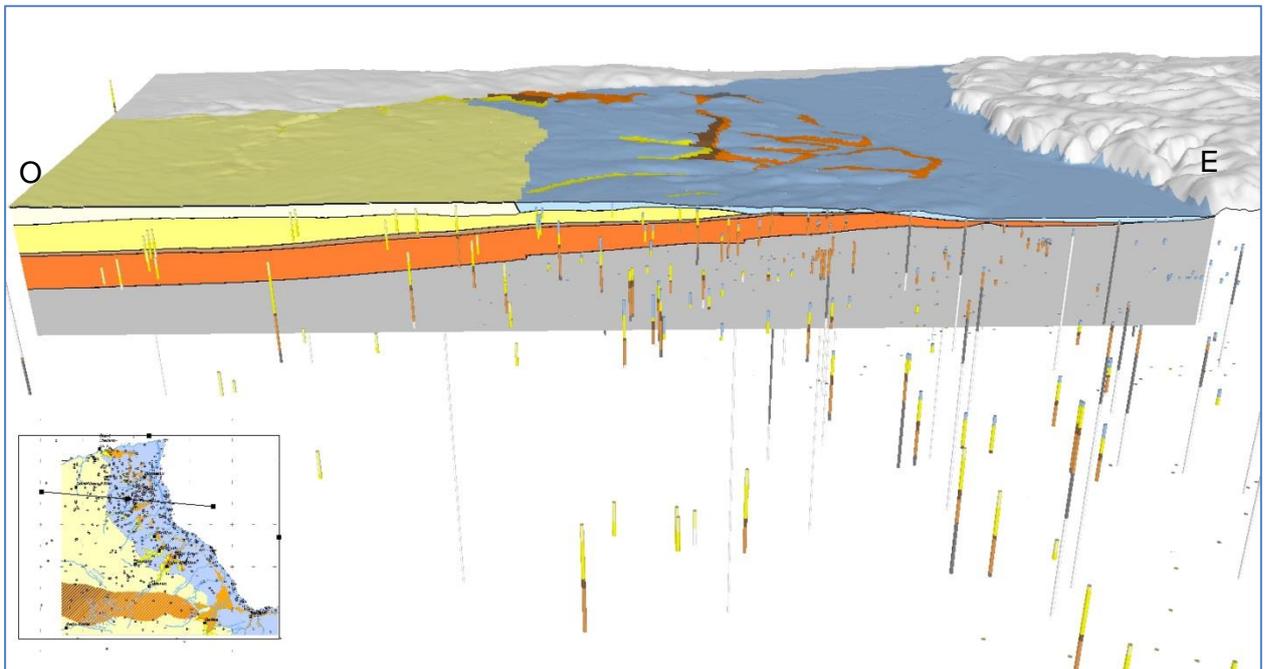
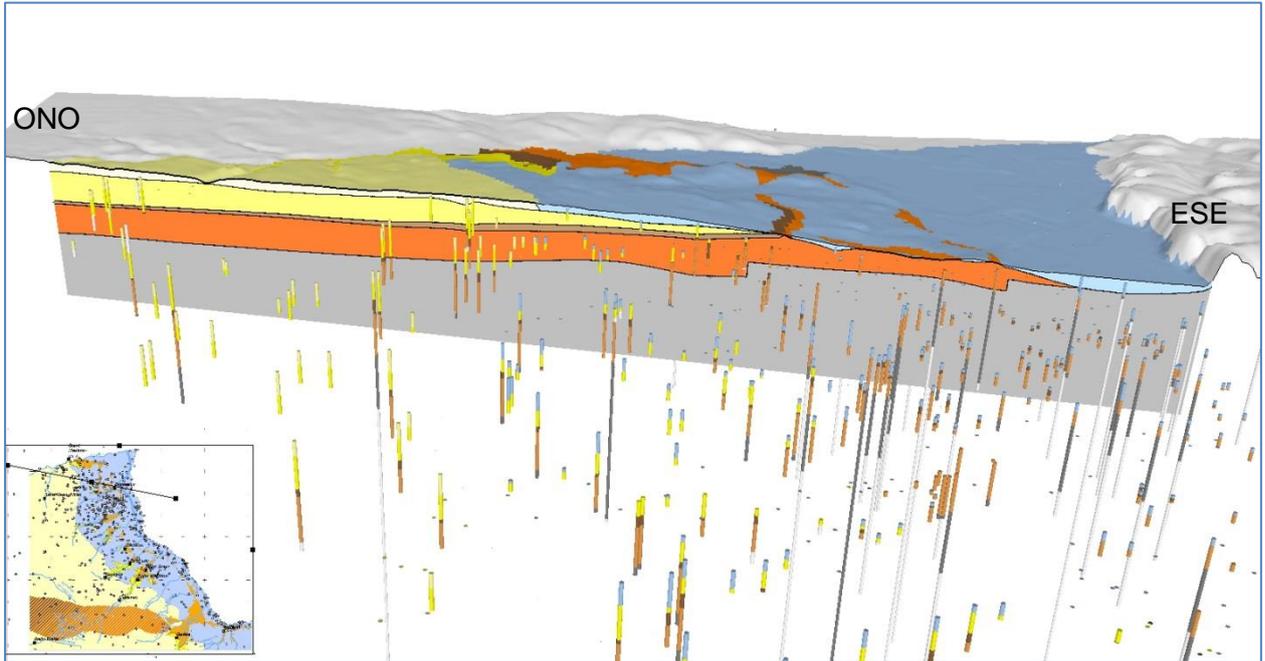


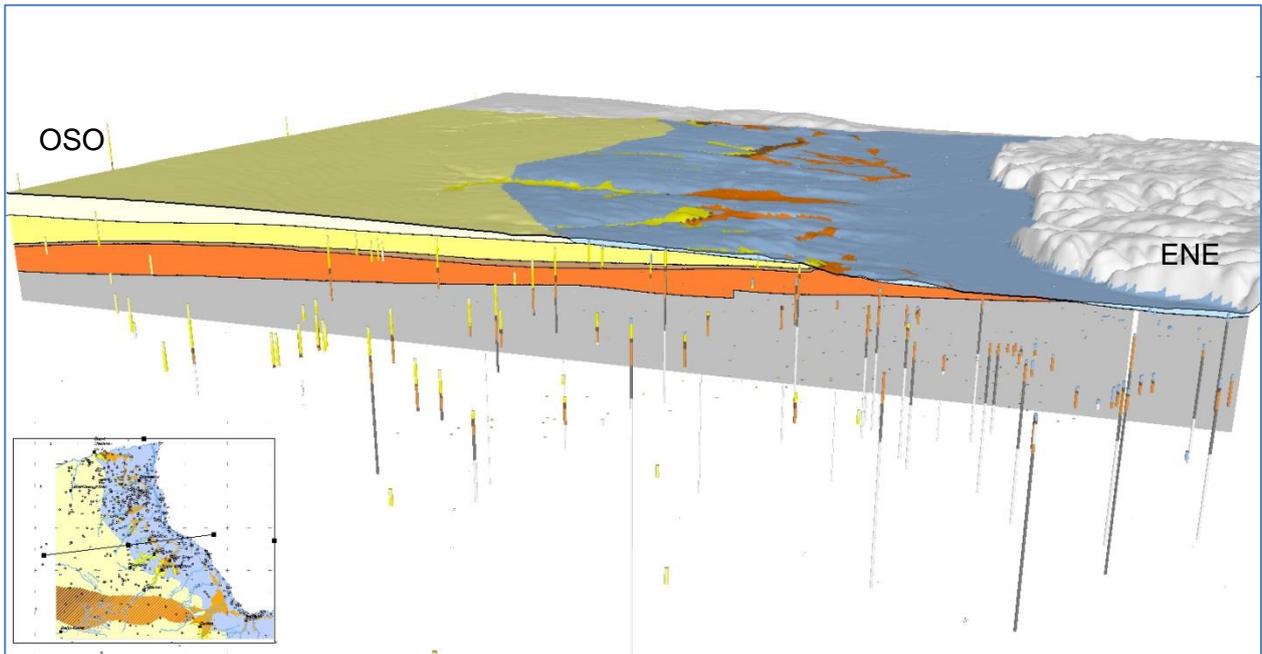
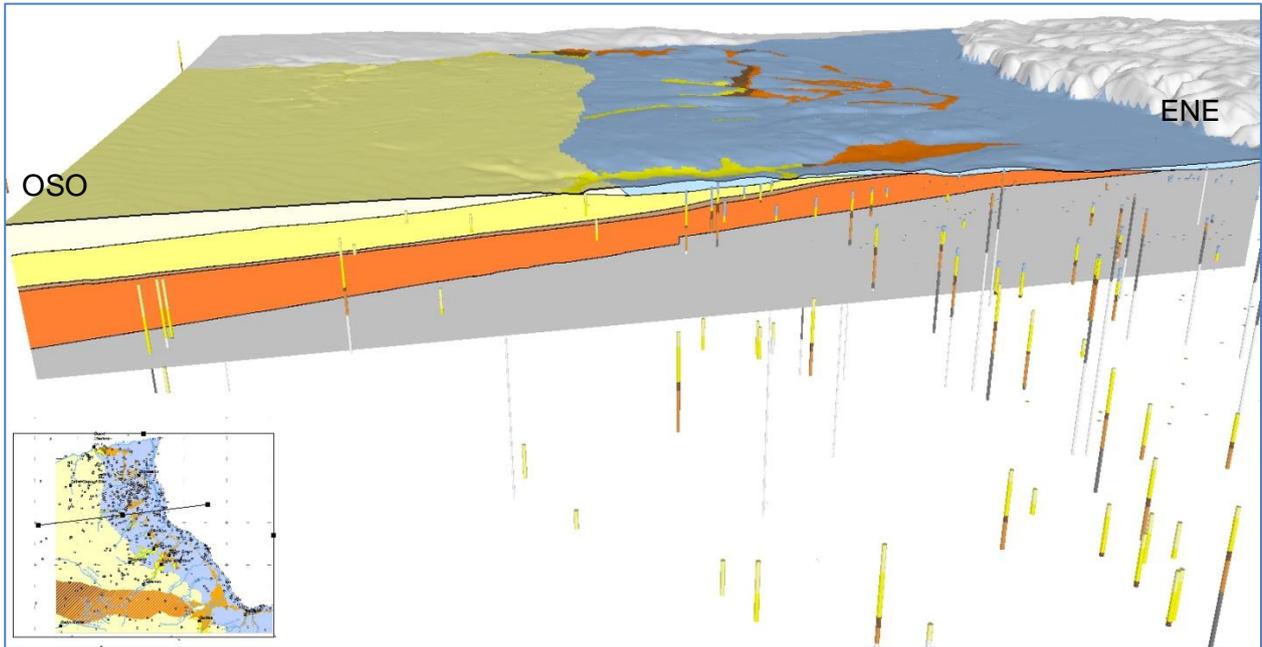


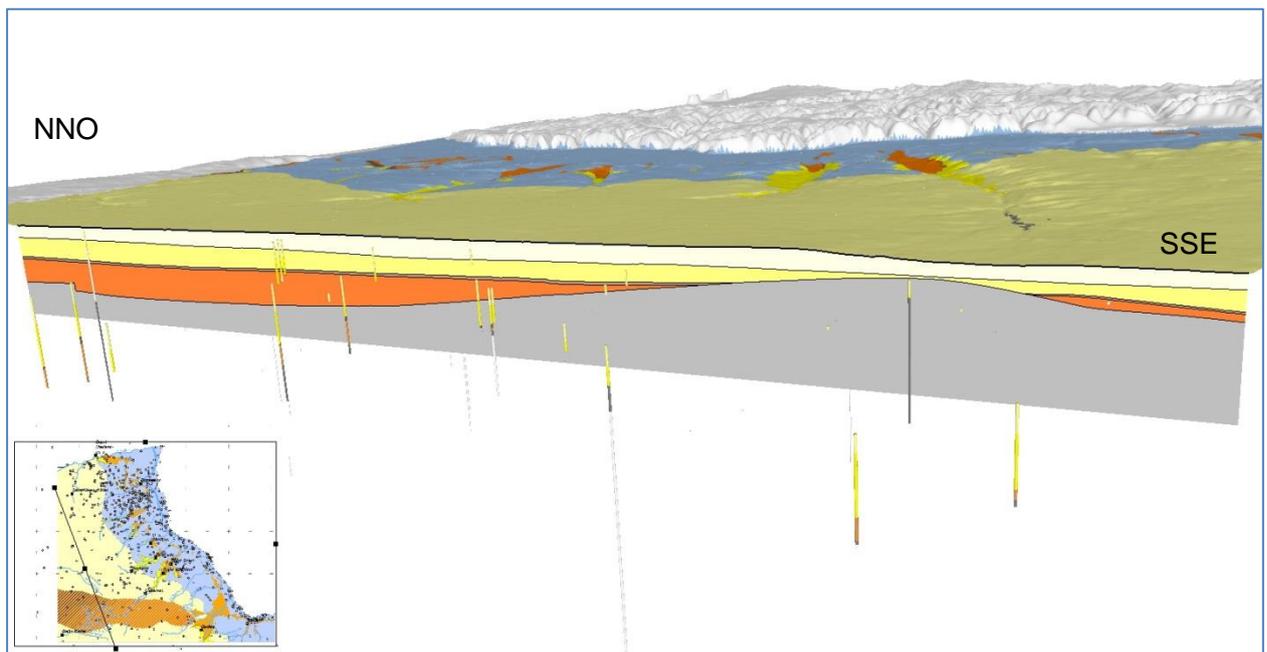
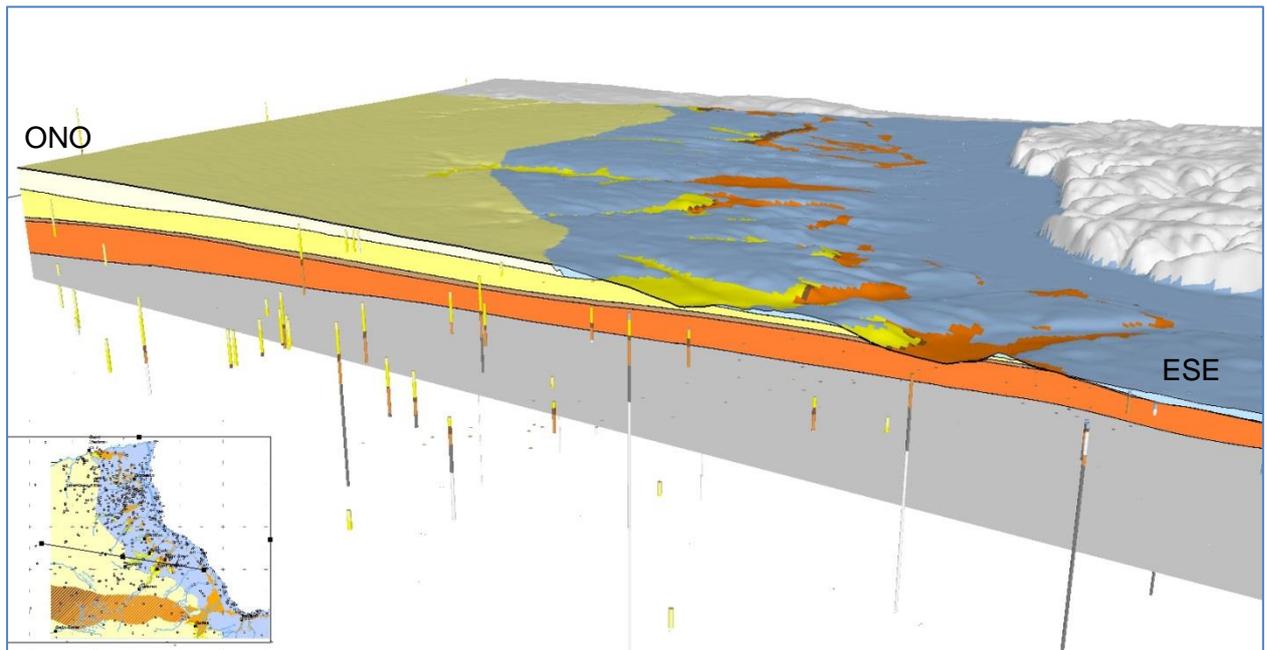
## **Annexe 3**

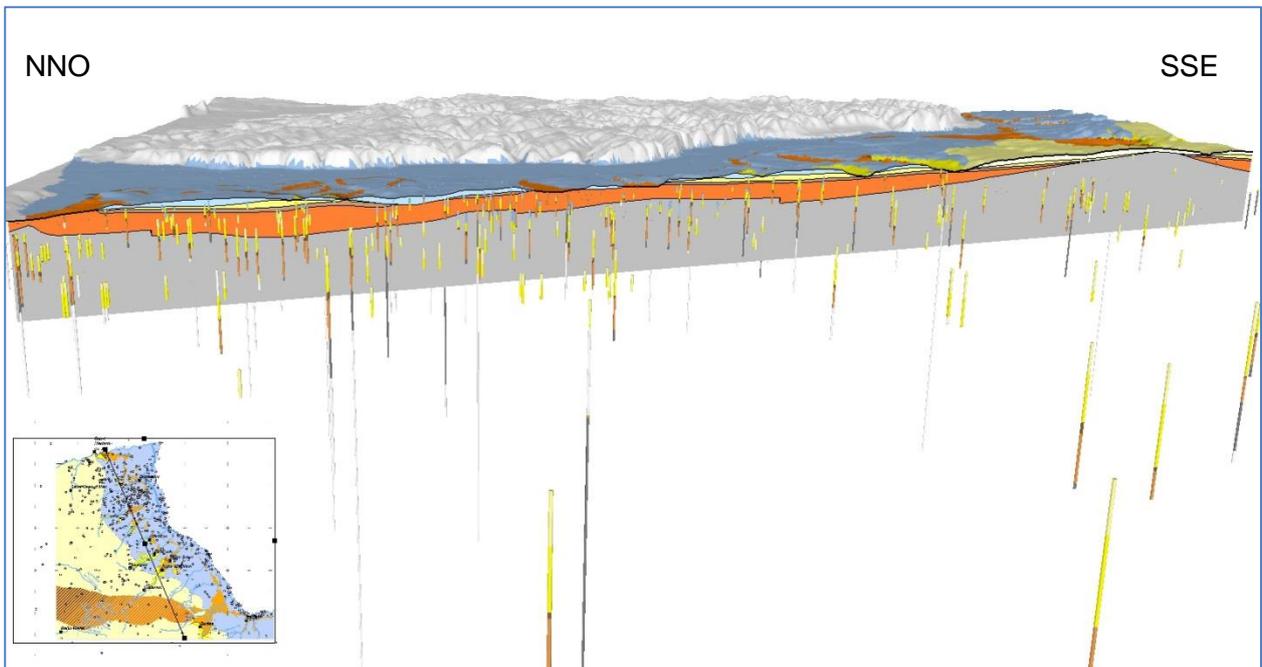
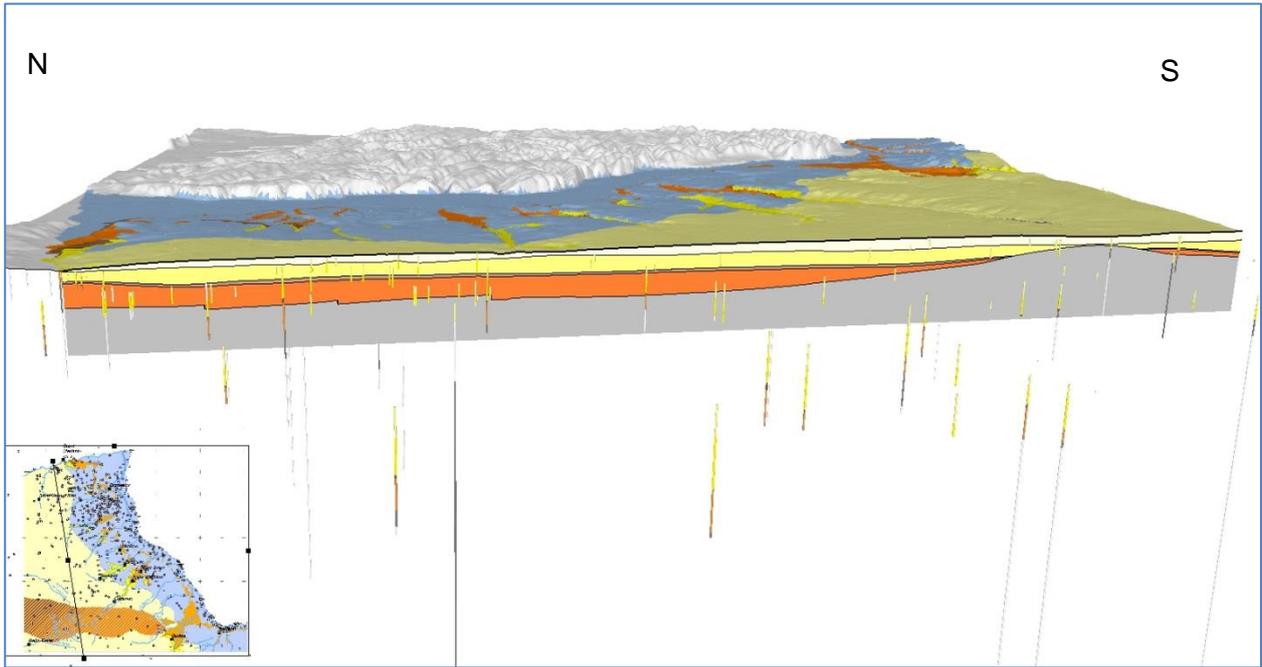
### **Vues 3D au travers du modèle géologique numérique**

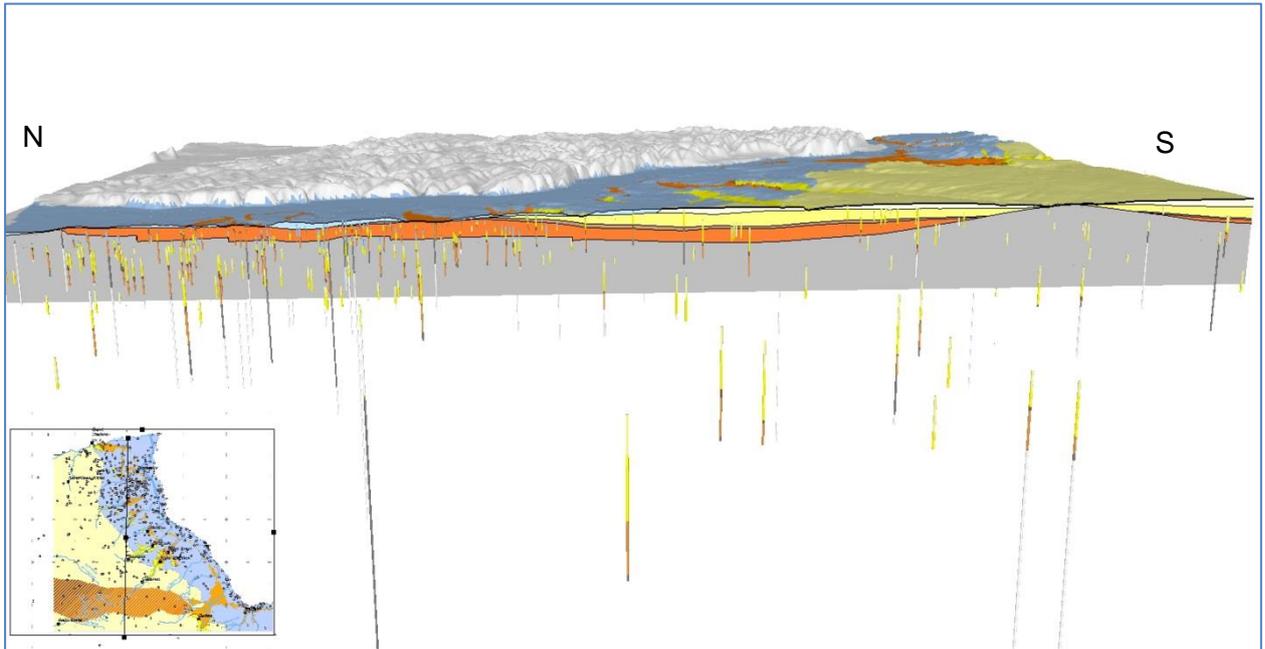










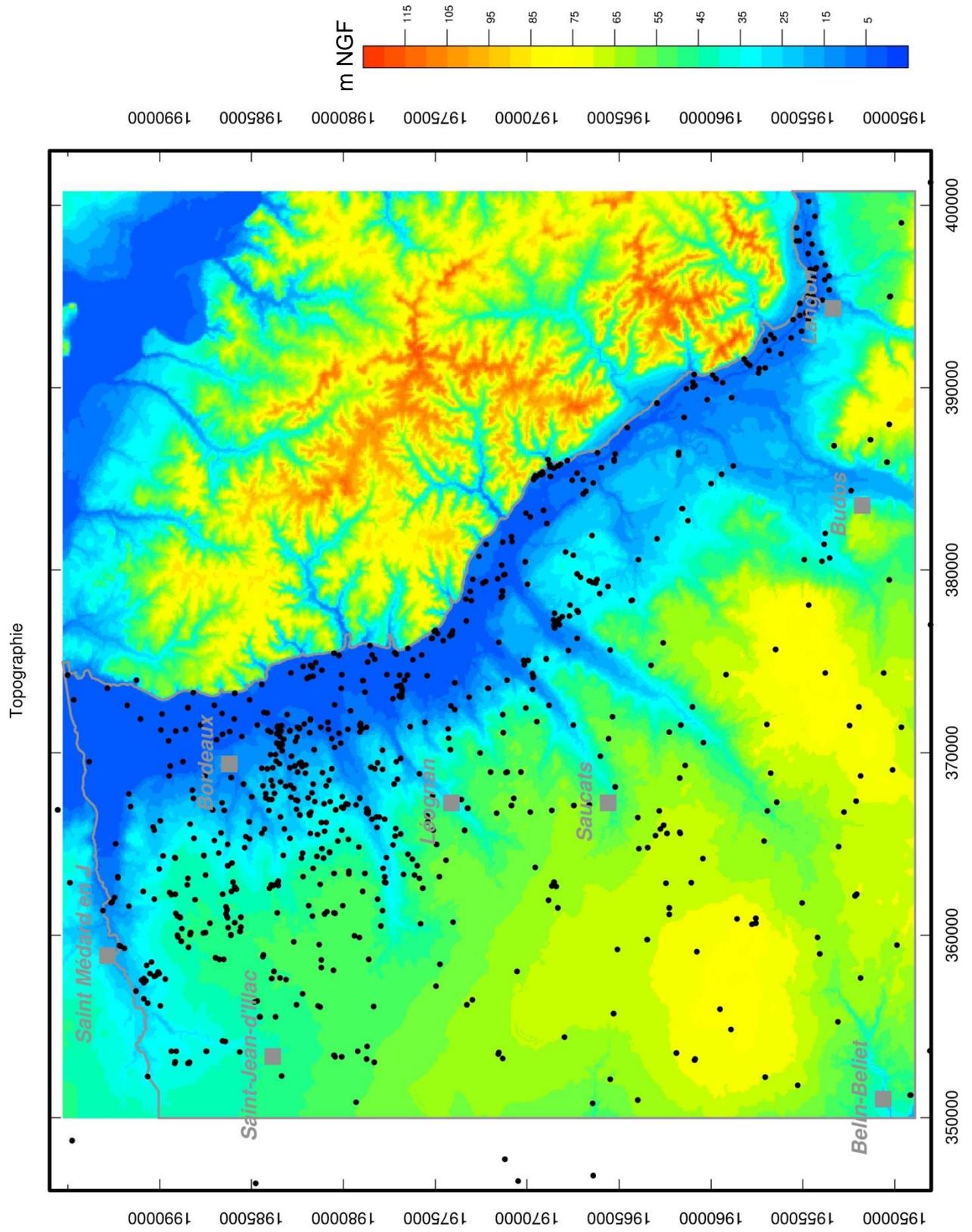


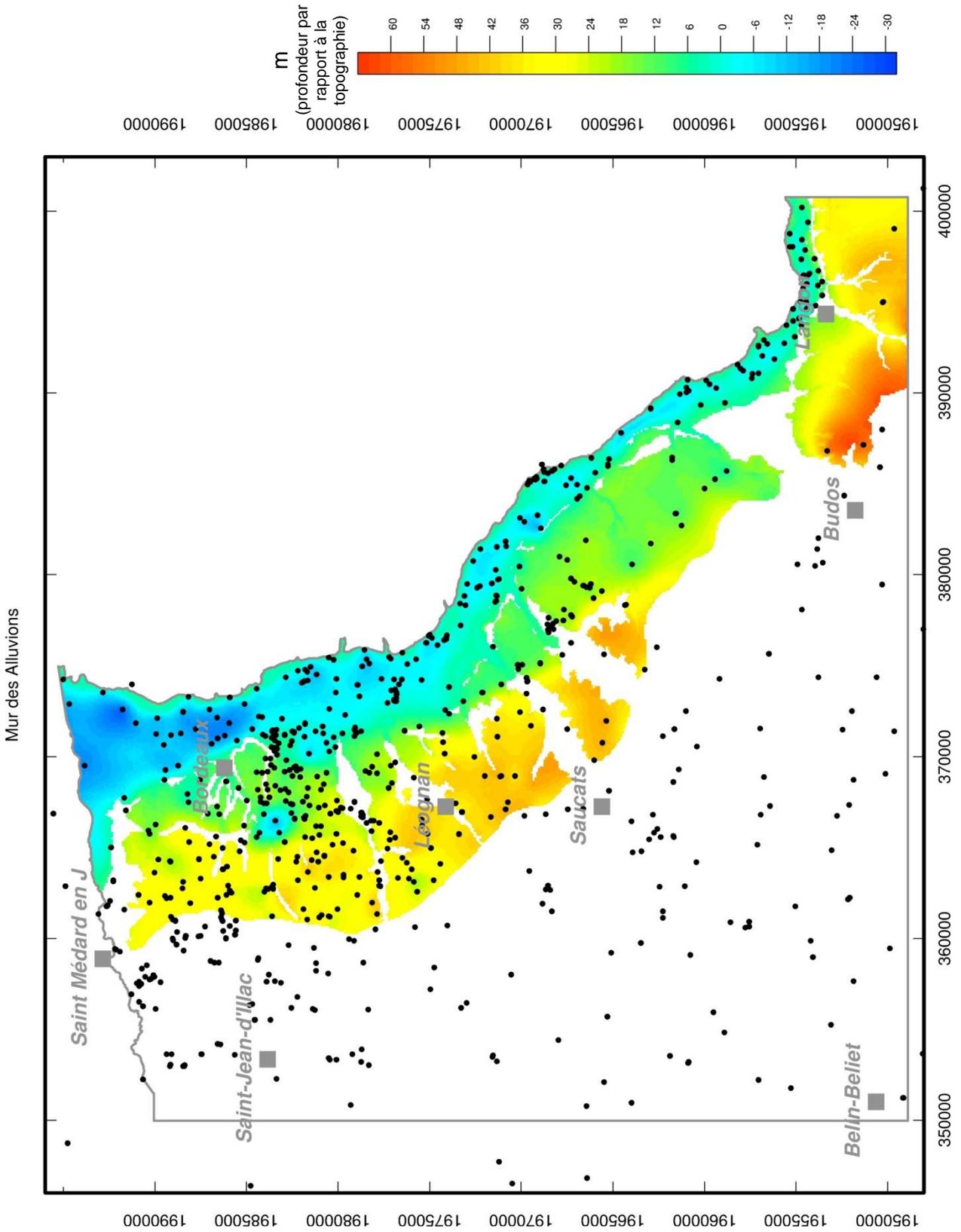


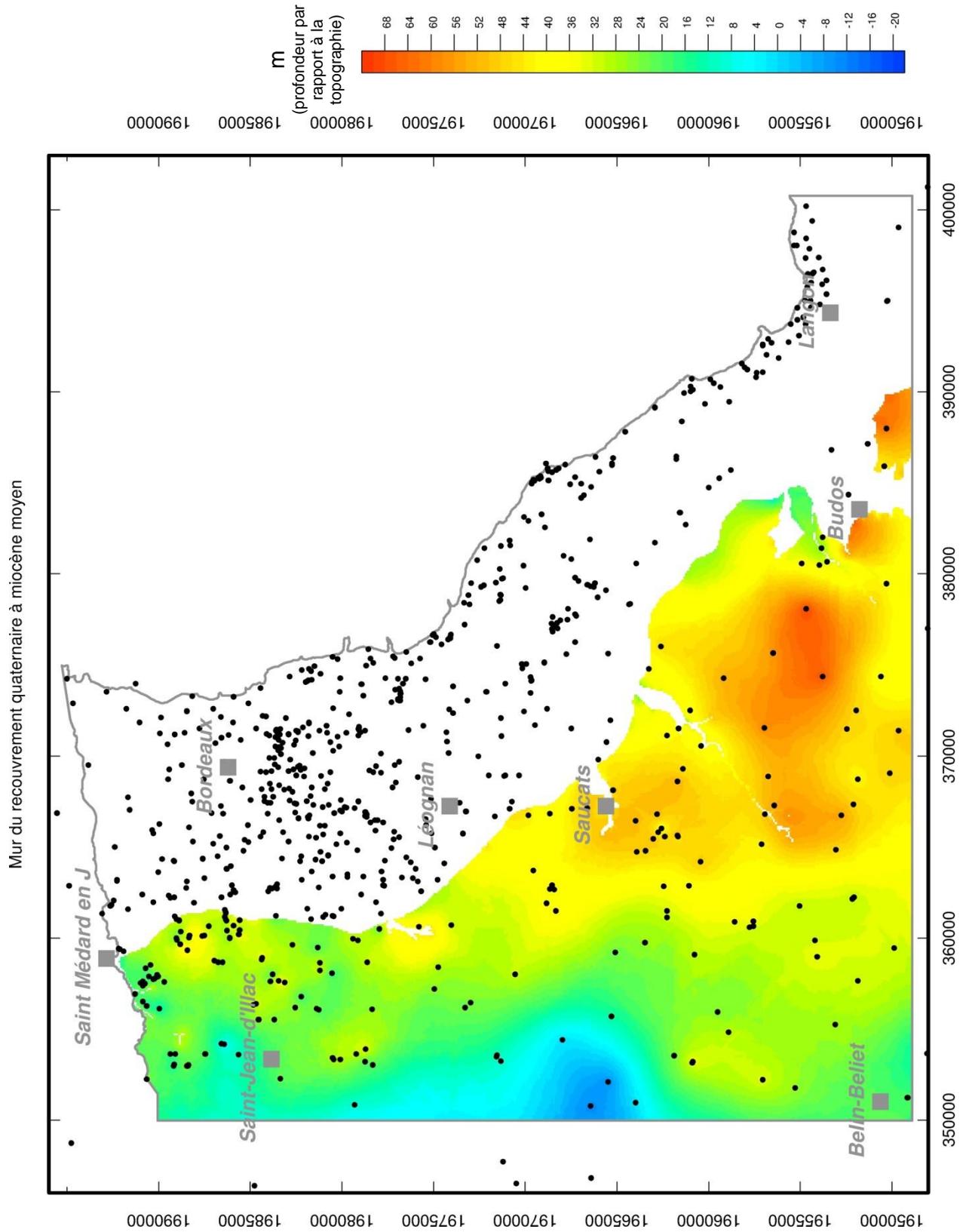
## **Annexe 4**

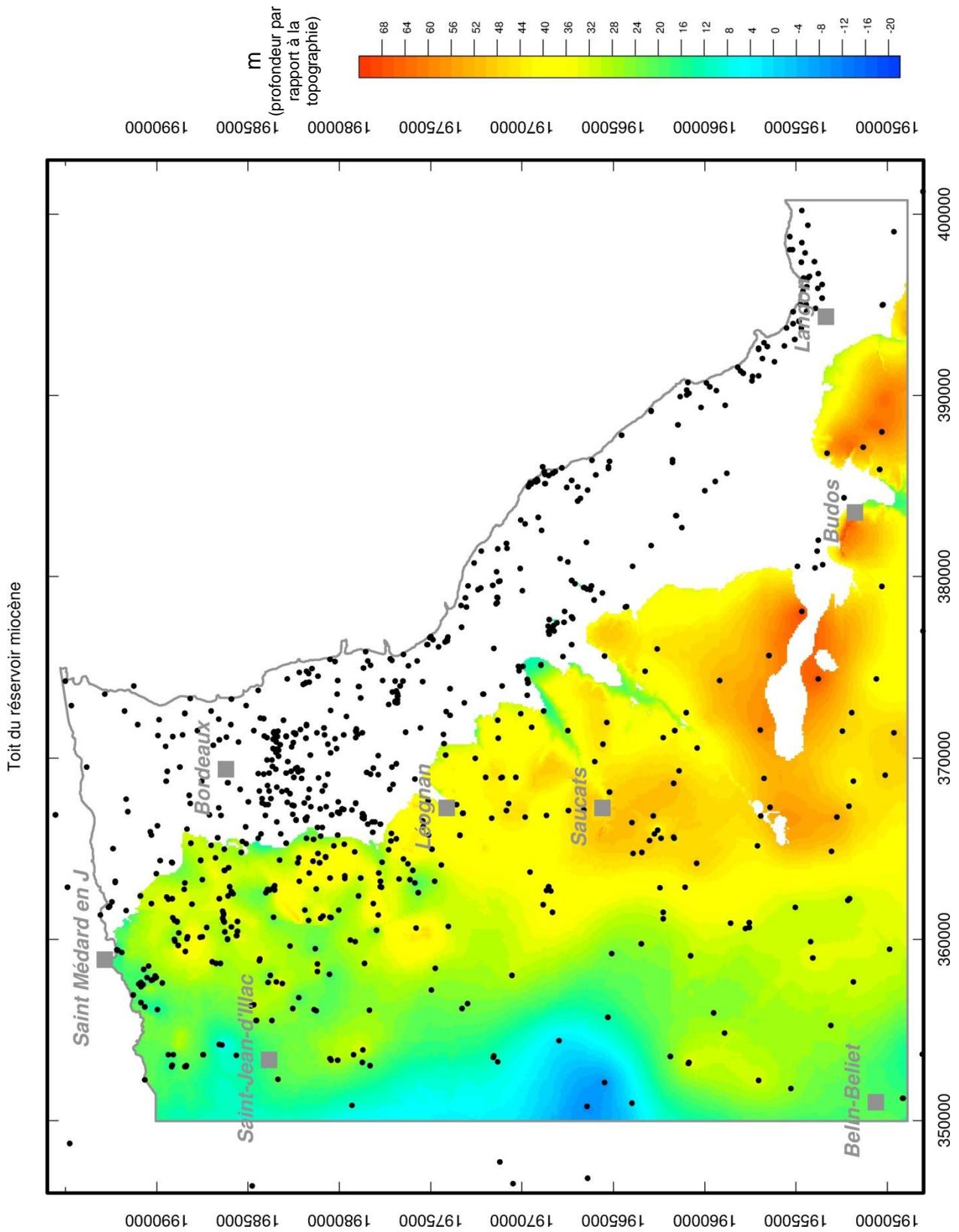
### **Cartes des isobathes des toits et des murs des couches du modèle géologique**

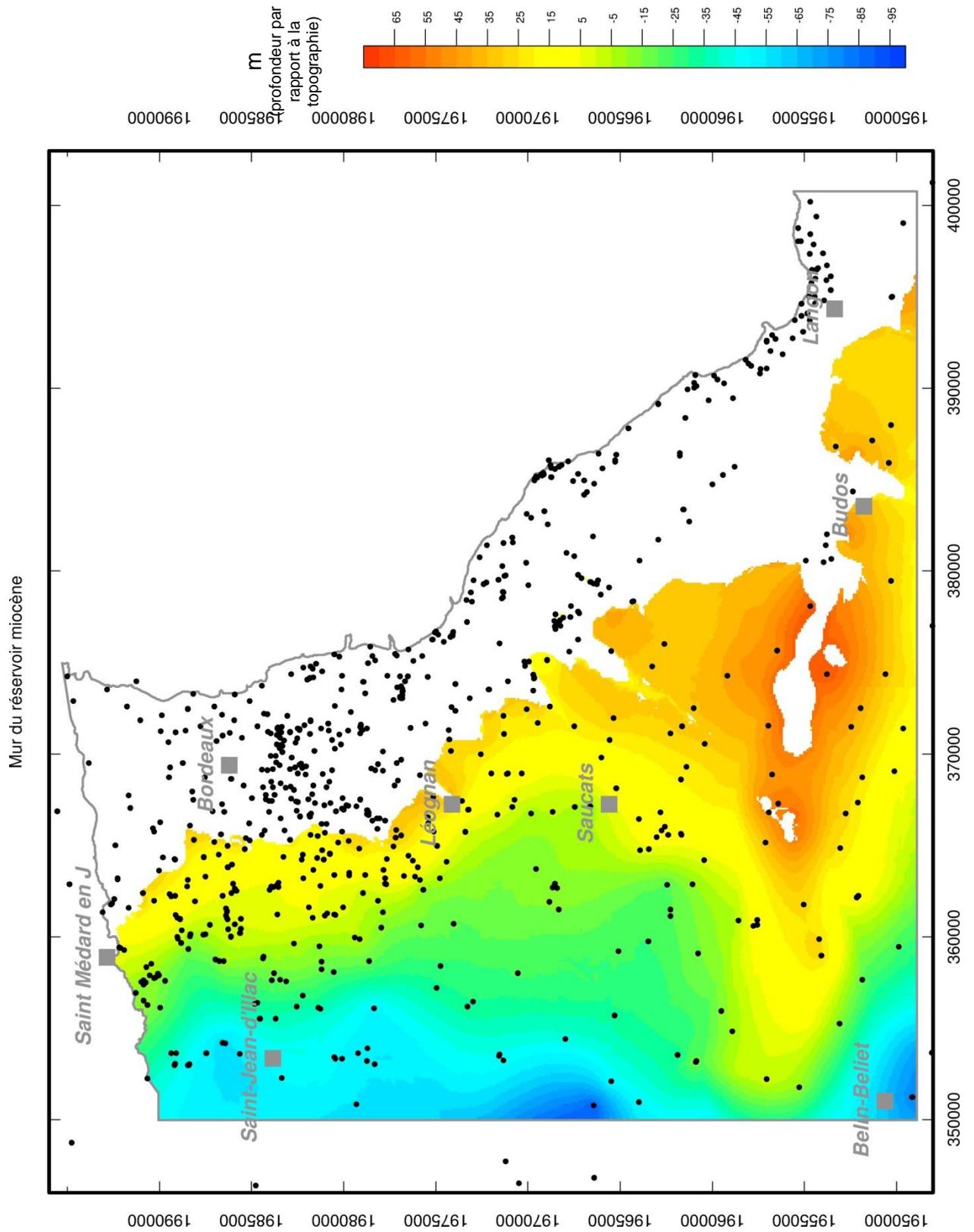


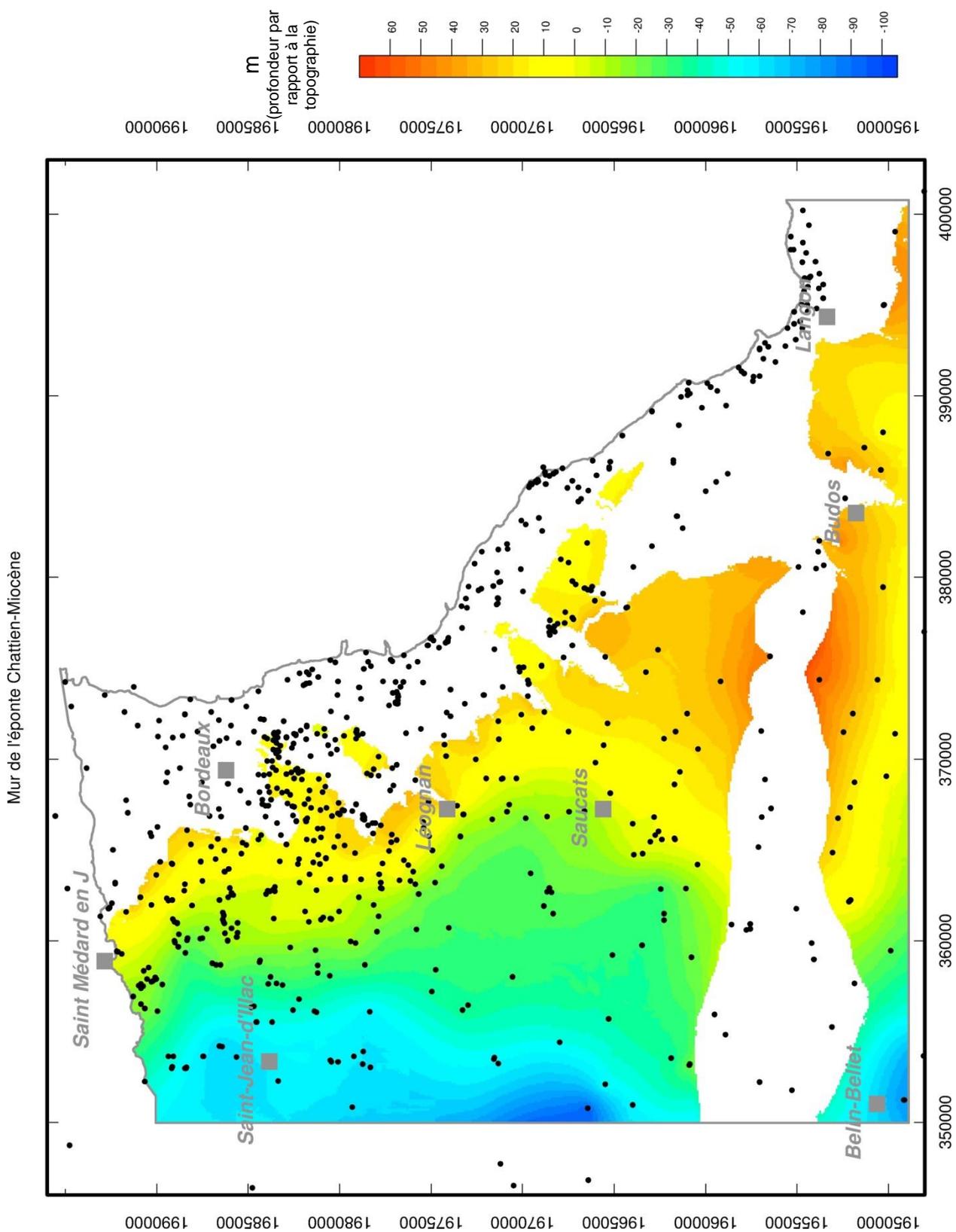


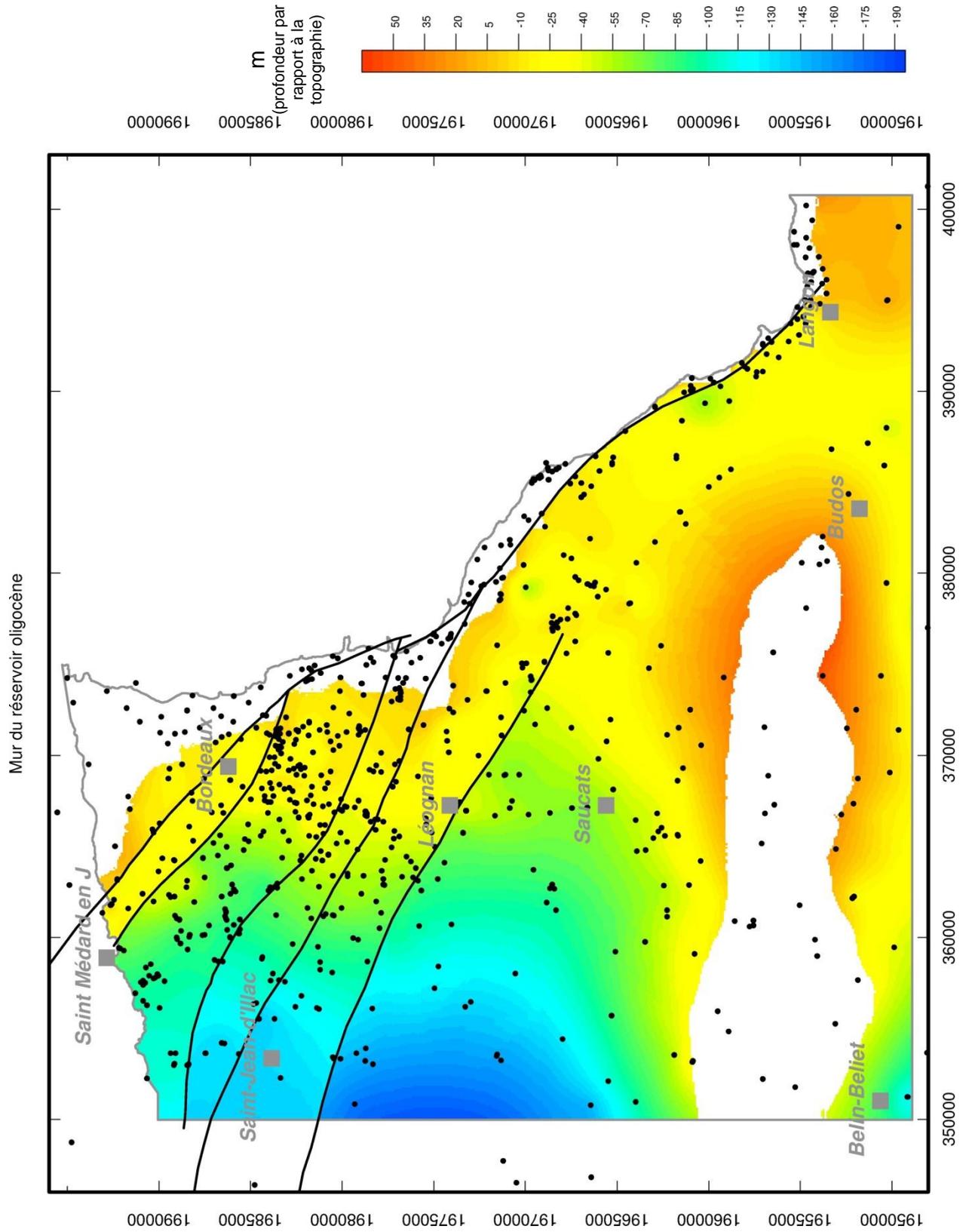














## **Annexe 5**

### **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.

<p style="text-align: center;"><b>Manuels d'utilisation :</b></p> <p>Rapports BRGM : R 32210, R 37762, R 38018, R 38085, R 38149</p>	<p style="text-align: center;"><b>Ordinateurs :</b></p> <p>Micro-ordinateurs PC sous Windows (Également environnement LINUX)</p>
<p style="text-align: center;"><b>Langage de programmation :</b></p> <p style="text-align: center;">Fortran 95 Pré-post processeurs : C++</p>	<p style="text-align: center;"><b>Langues :</b></p> <p style="text-align: center;">Français, Anglais</p>

# 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 discrétisé 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) simultanés 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 (dénoisement de mailles), et re-saturation ultérieure sans aucun problème.	N*		
Limitation des débits de pompages par rapport aux dénoisements 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 couplés 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 discrétisation 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, ...)

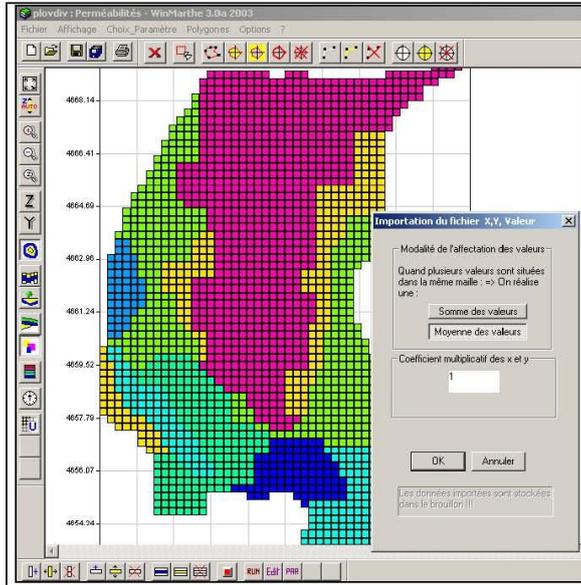
## CONTACTS

Dominique THIERY : BRGM Service EAU

[marthe@brgm.fr](mailto:marthe@brgm.fr)

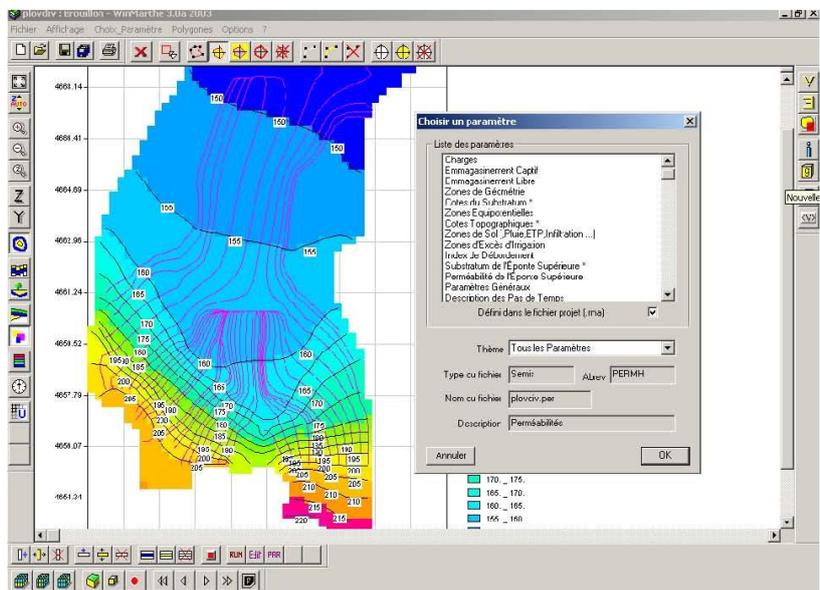
# M A R T H E

## Préparation et visualisation des données avec le préprocesseur WinMarthe



Le préprocesseur WinMarthe permet :

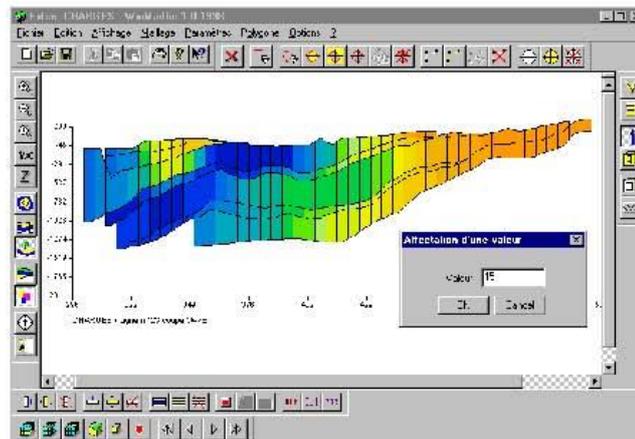
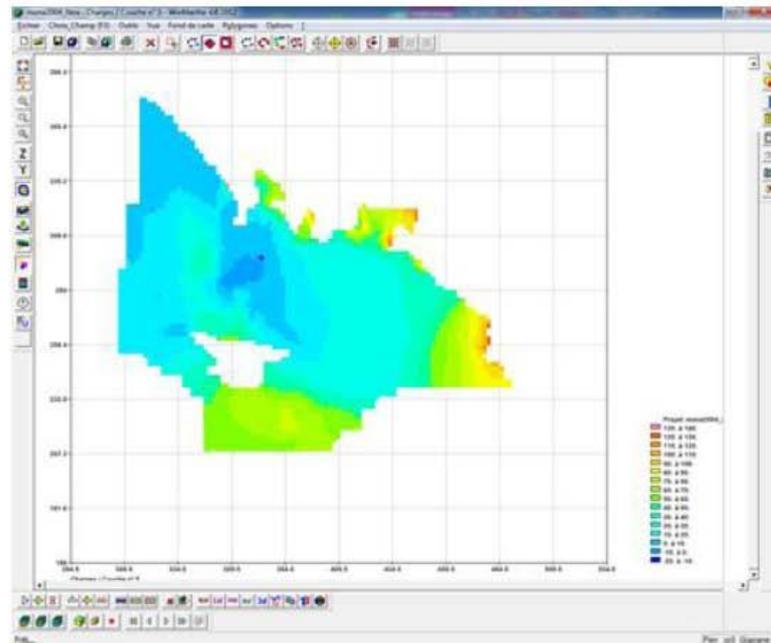
- l'entrée des données
- les calculs (éventuels) sur les données
- l'introduction des paramètres généraux de la modélisation
- l'exploitation des résultats (interpolateur intégré) :  
isovaleurs de charges, de concentrations...  
champs de vitesses, trajectoires  
comparaisons calculs/observations



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



Vue en coupe verticale

# 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

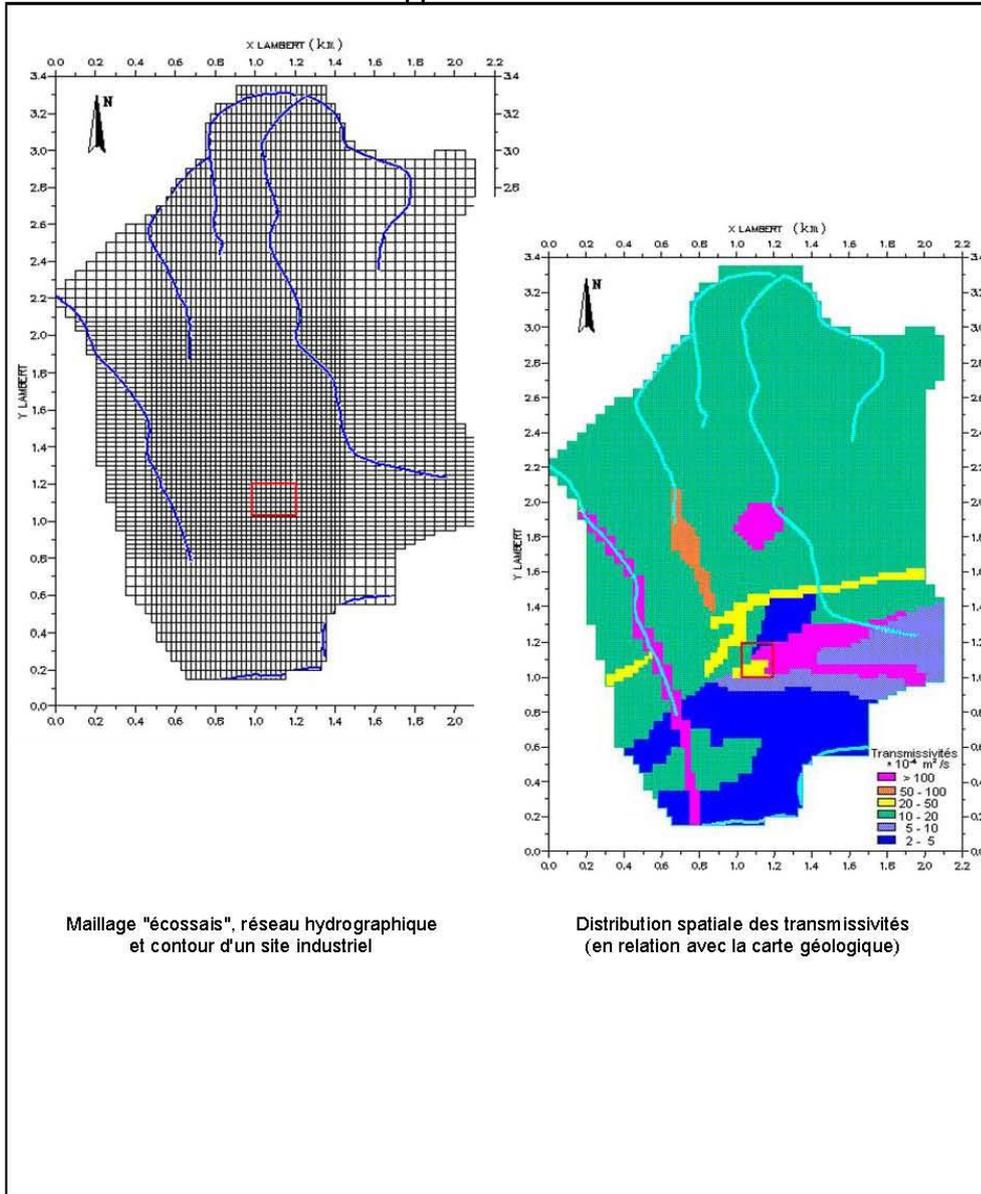
**Le scénario "économies et substitutions", définit un état piézométrique considéré comme objectif de gestion devant être atteint en 2015**

← Résorption de la dépression

Eocène: état piézométrique objectif de gestion

# M A R T H E

## Modélisation d'une nappe alluviale sous un site industriel

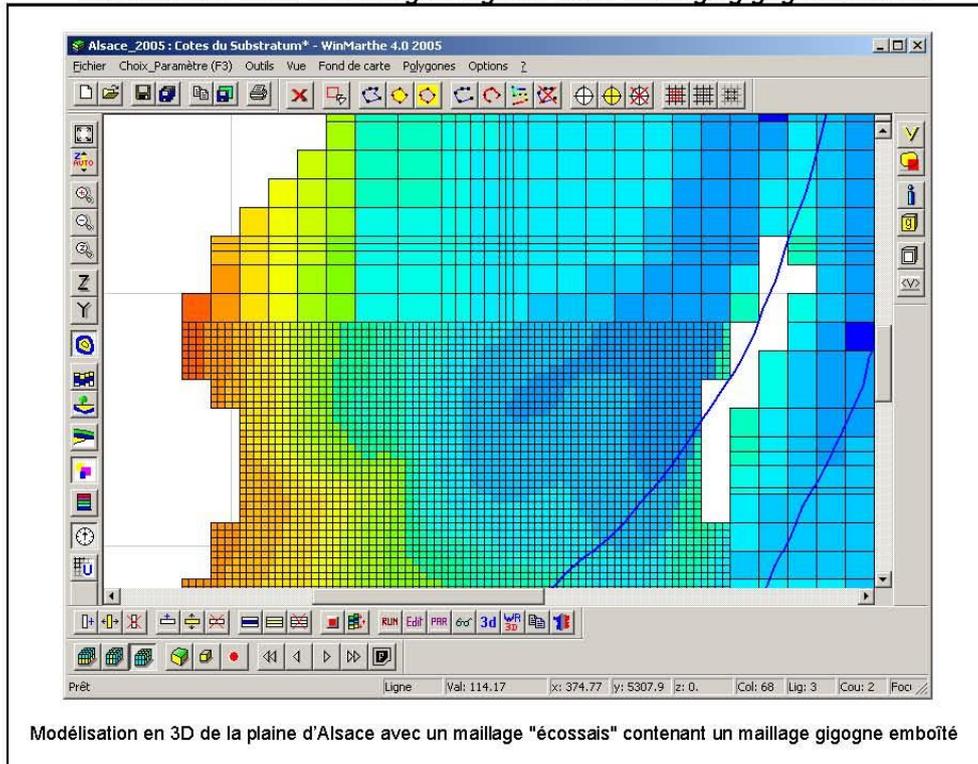


Maillage "écossais", réseau hydrographique et contour d'un site industriel

Distribution spatiale des transmissivités (en relation avec la carte géologique)

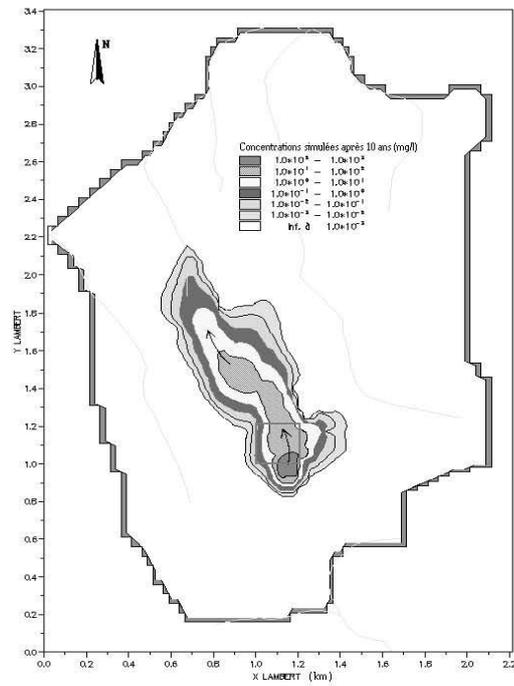
# M A R T H E

Modélisation avec un maillage irrégulier et un maillage gigogne emboîté

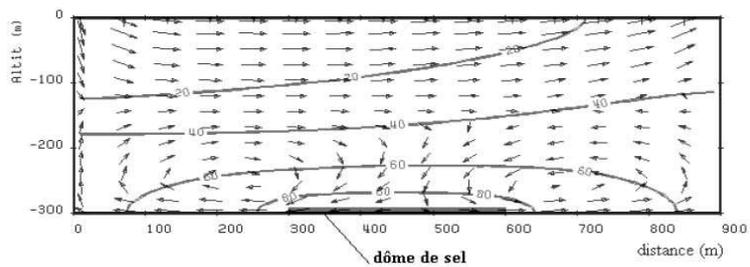


# MARTHE

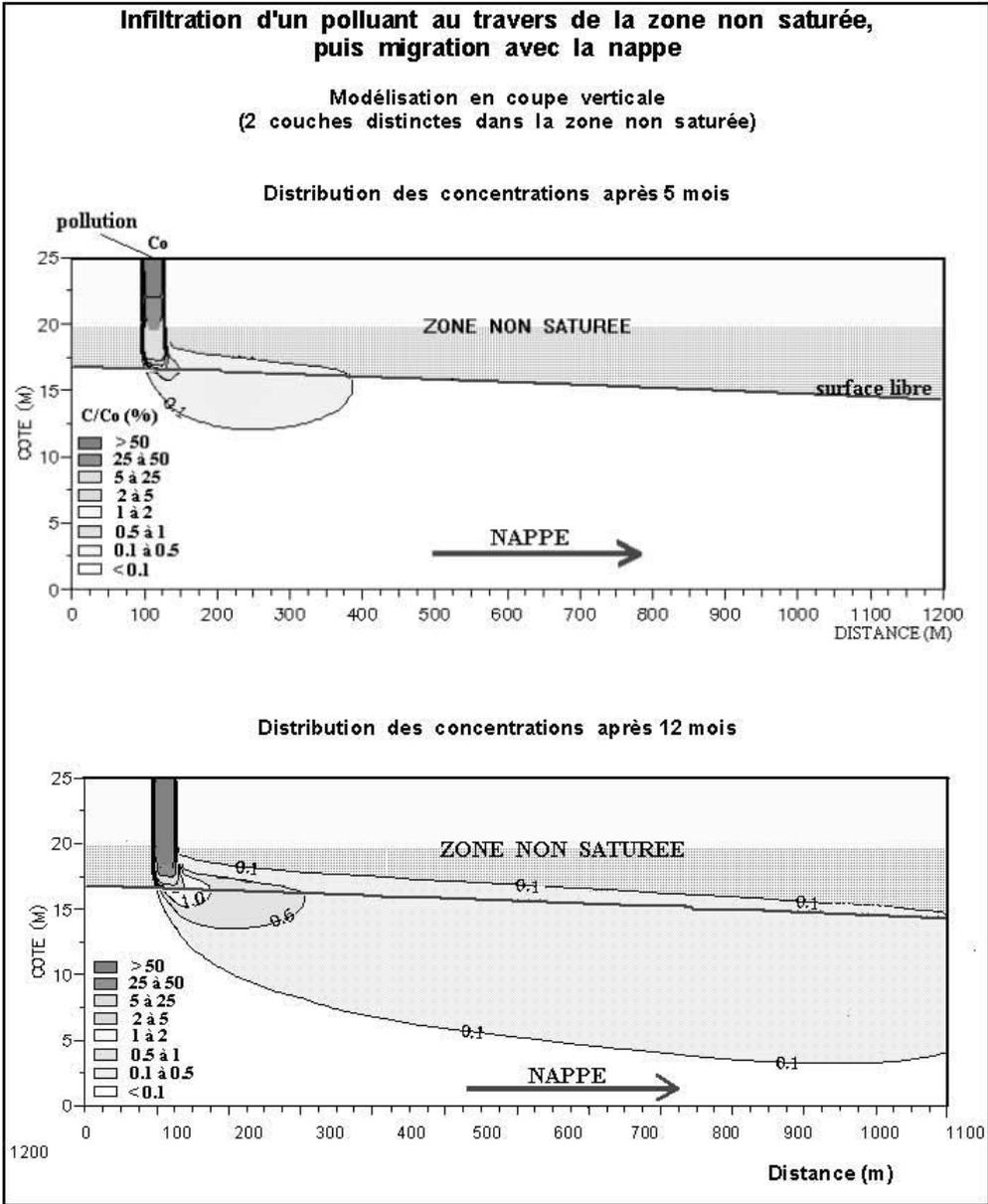
Simulation de la migration d'un panache de pollution



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

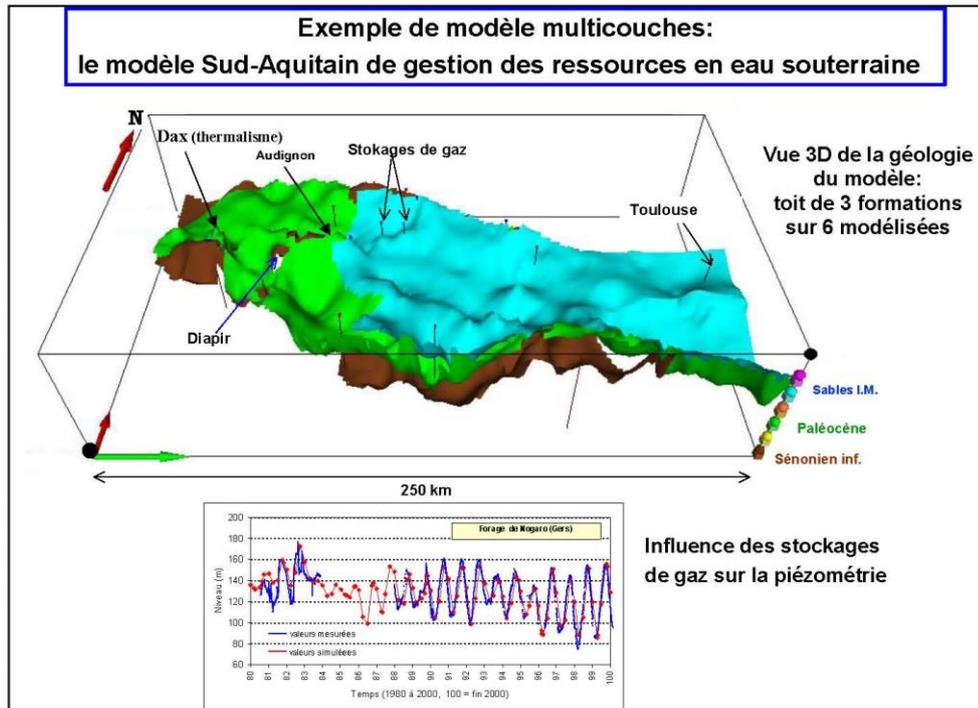


# M A R T H E



# M A R T H E

Configurations hydrogéologiques complexes

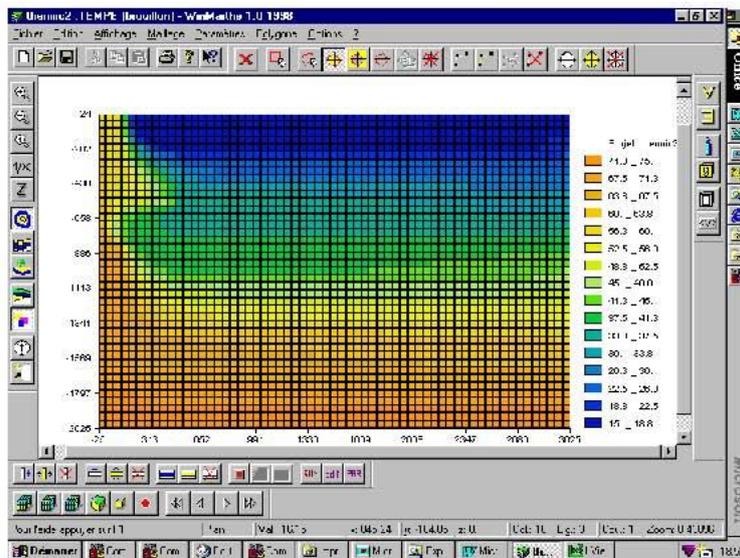
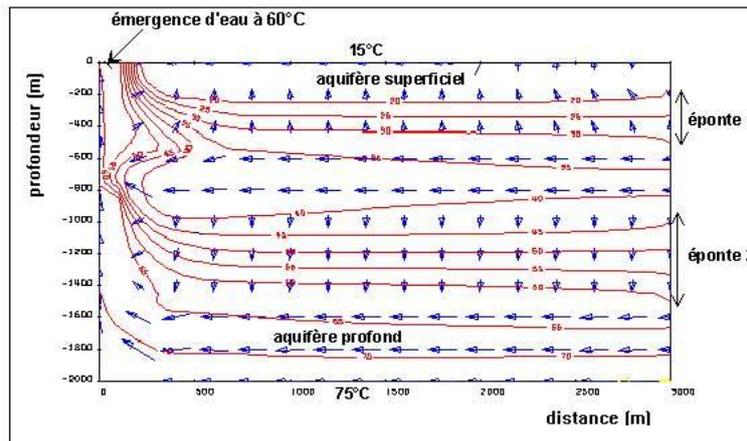


Le logiciel permet de traiter des configurations hydrogéologiques complexes comme des systèmes multicouches d'extension régionale.

# M A R T H E

## Effets densitaires - simulation couplée hydraulique et thermique

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

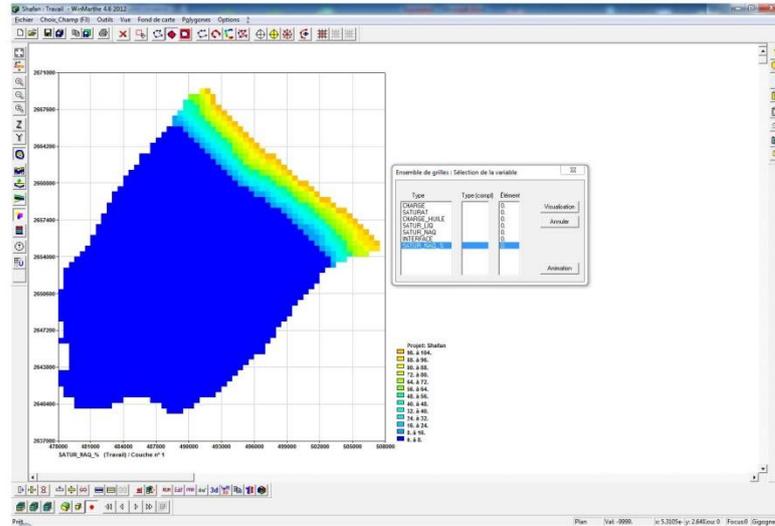


Températures calculées : (préprocesseur WinMarthe)

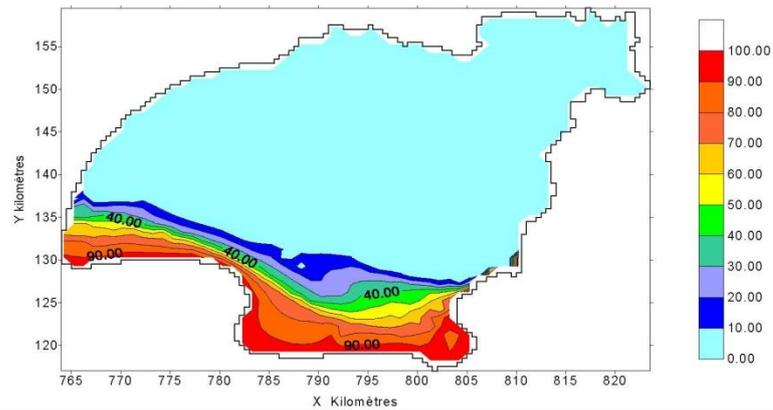
# M A R T H E

Simulations diphasique de l'intrusion saline  
(Les couleurs représentent le pourcentage d'eau salé)

Nappe côtière en Oman : carte des saturations en eau salée  
(visualisation WinMarthe)

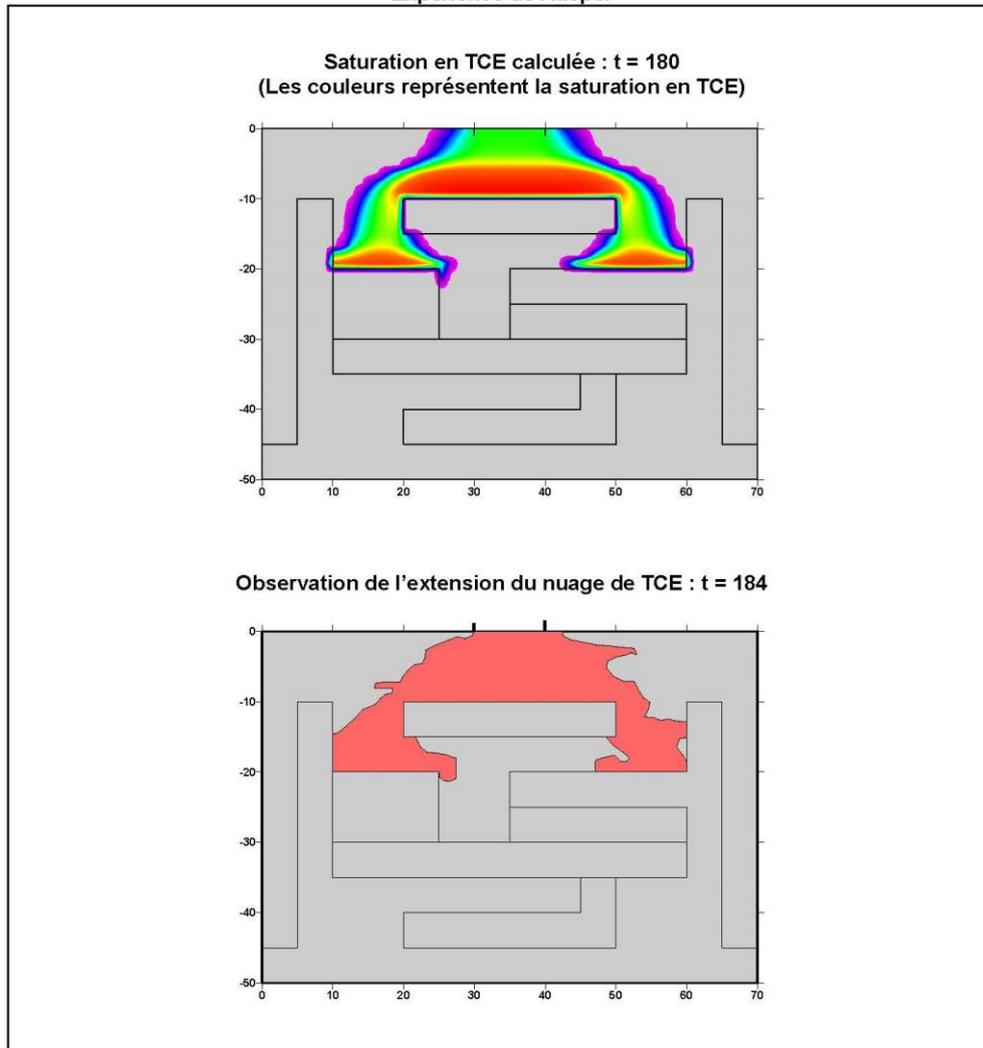


Nappe de la Crau en France : carte des saturations en eau salée  
(visualisation Surfer ©)



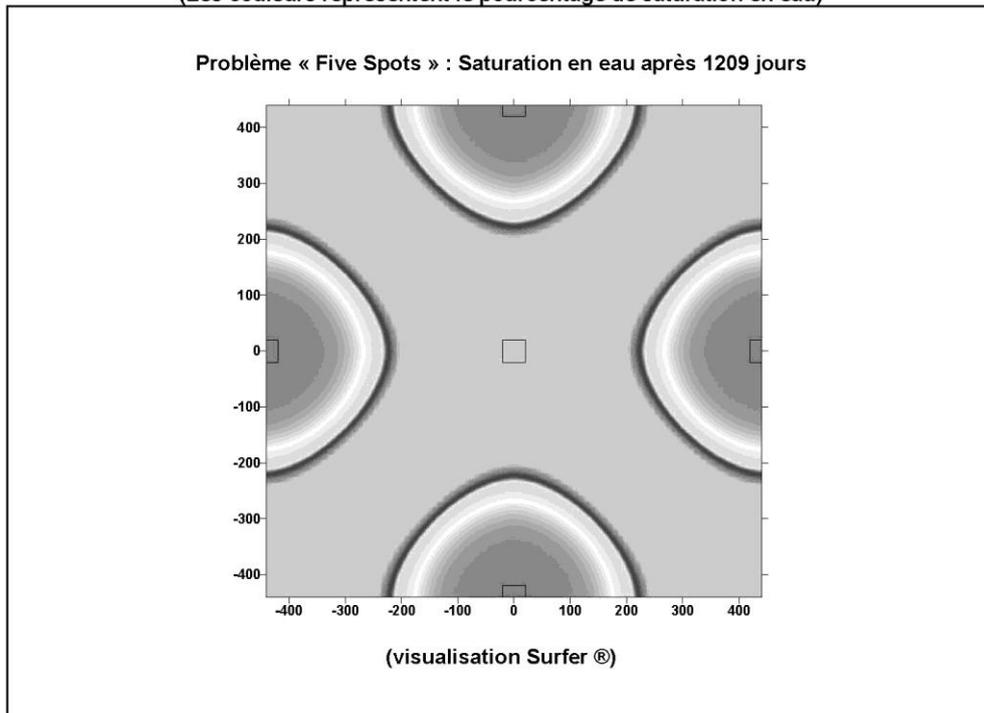
# M A R T H E

**Infiltration de TCE (Tétra-Chloro-Éthylène) non miscible dans des sables hétérogènes initialement saturés en eau**  
Expérience de Kueper



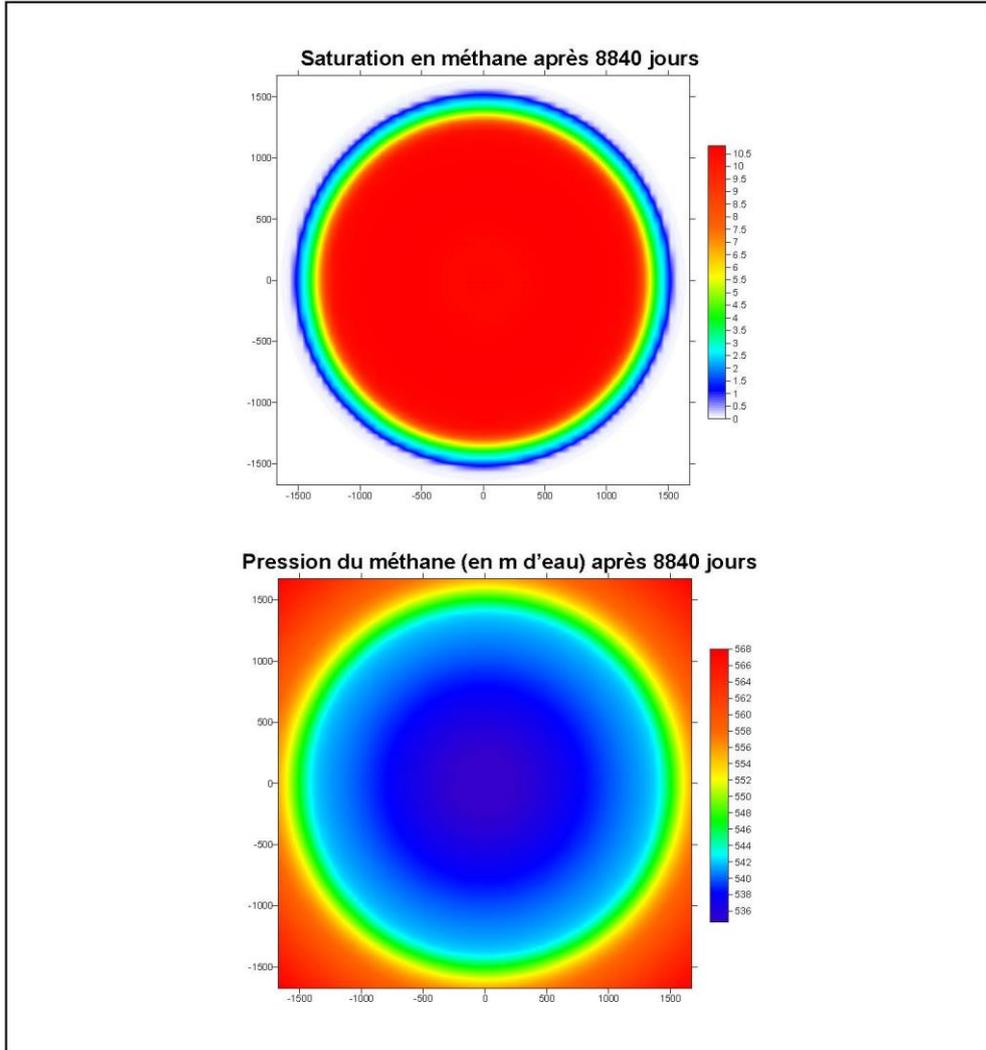
# M A R T H E

**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)



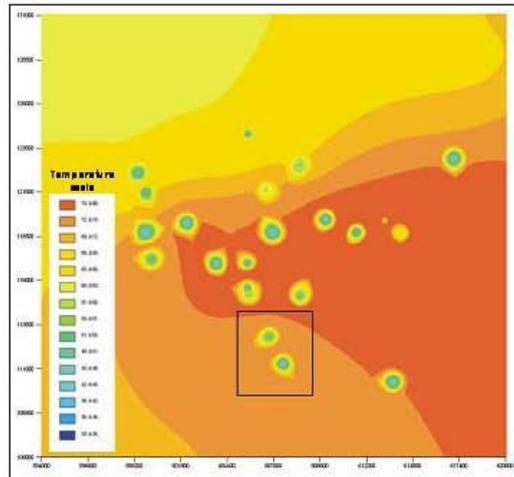
# M A R T H E

## Simulation diphasique d'un stockage de méthane dans un aquifère

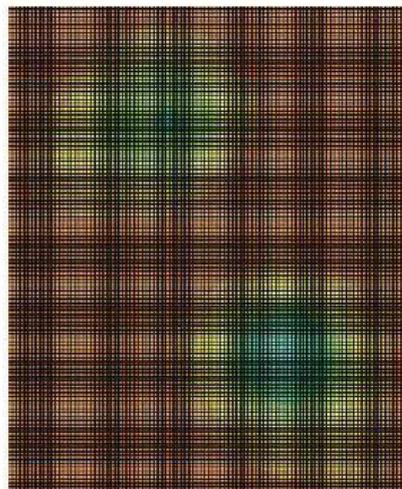


# M A R T H E

## Simulation de doublets géothermiques dans le Dogger



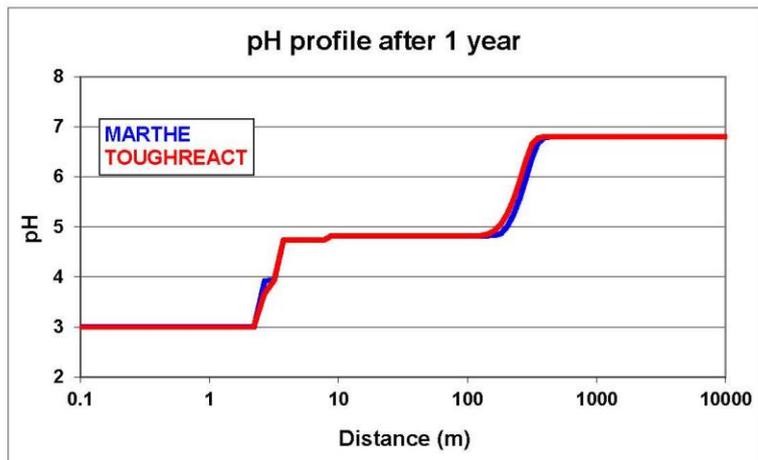
Doublets géothermiques dans le Dogger : vue en plan



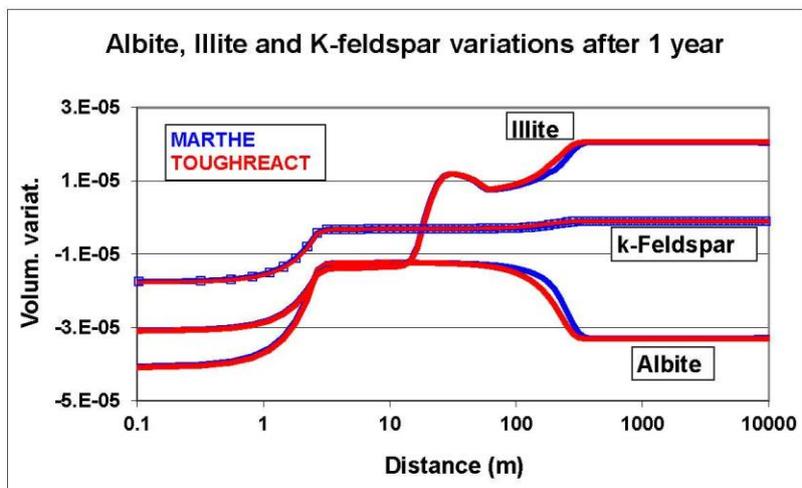
Détail de la zone centrale montrant le maillage utilisé

# M A R T H E

Injection d'une eau saturée en CO<sub>2</sub> 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

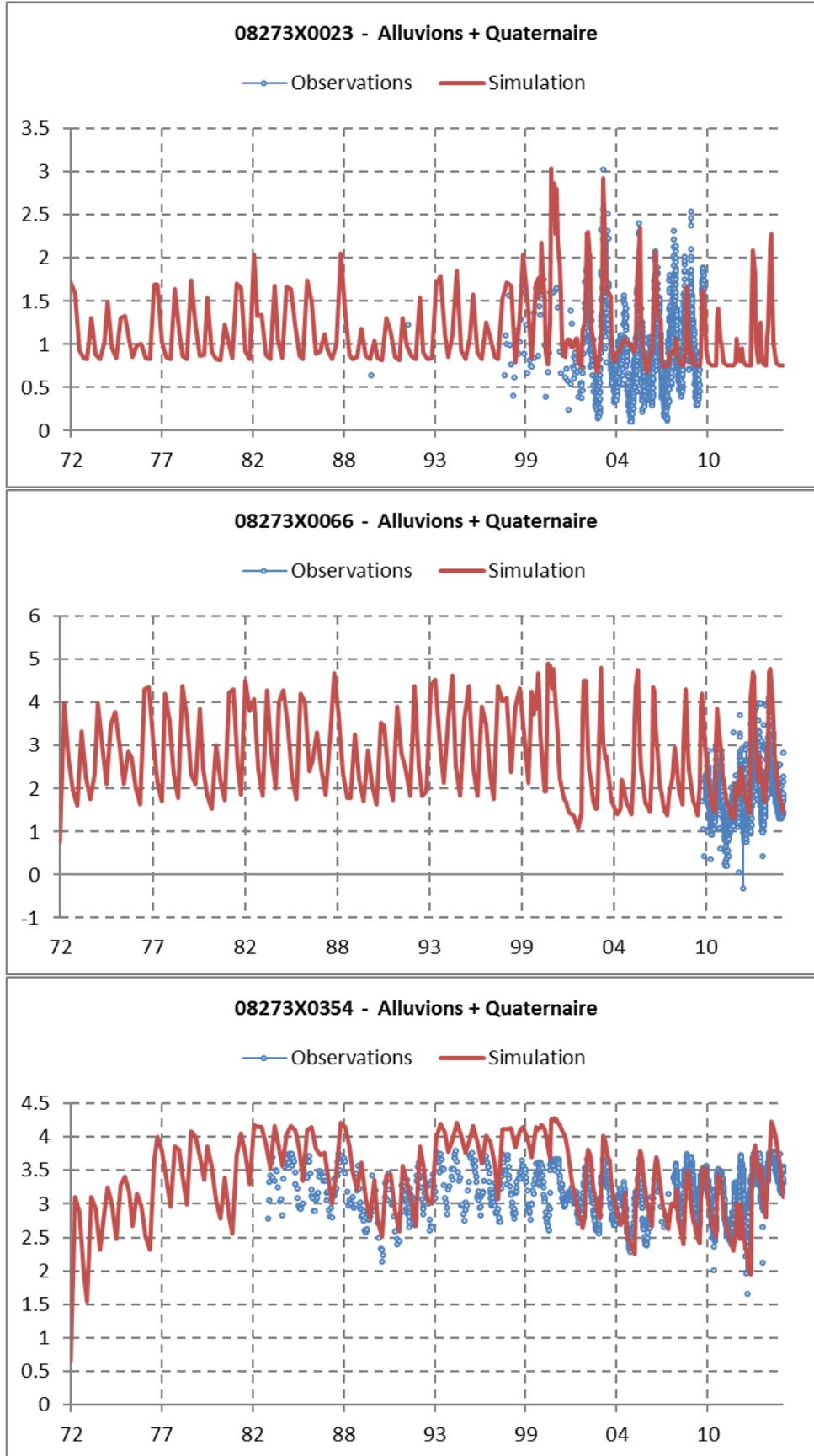


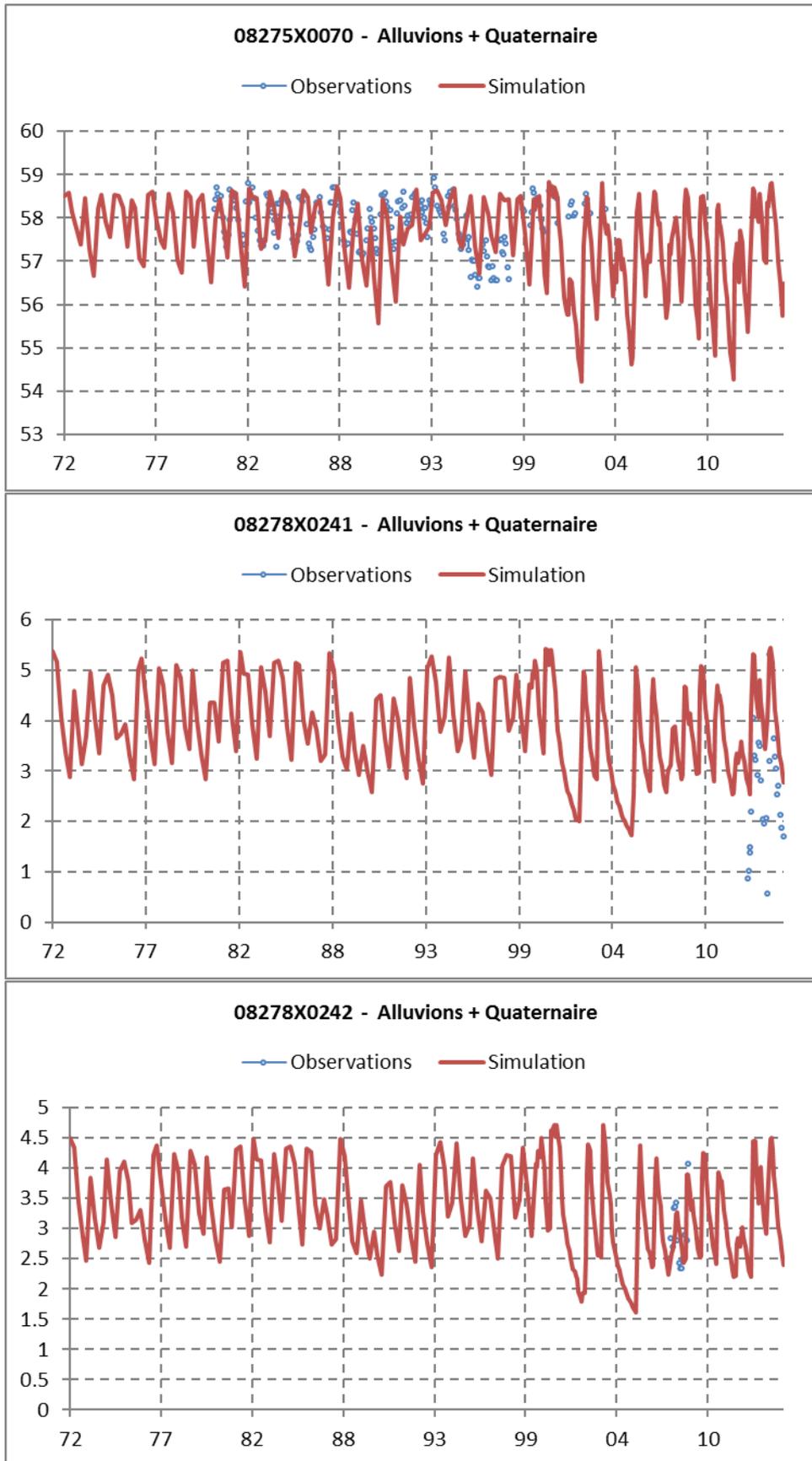
Variation des volumes de certains minéraux de la matrice

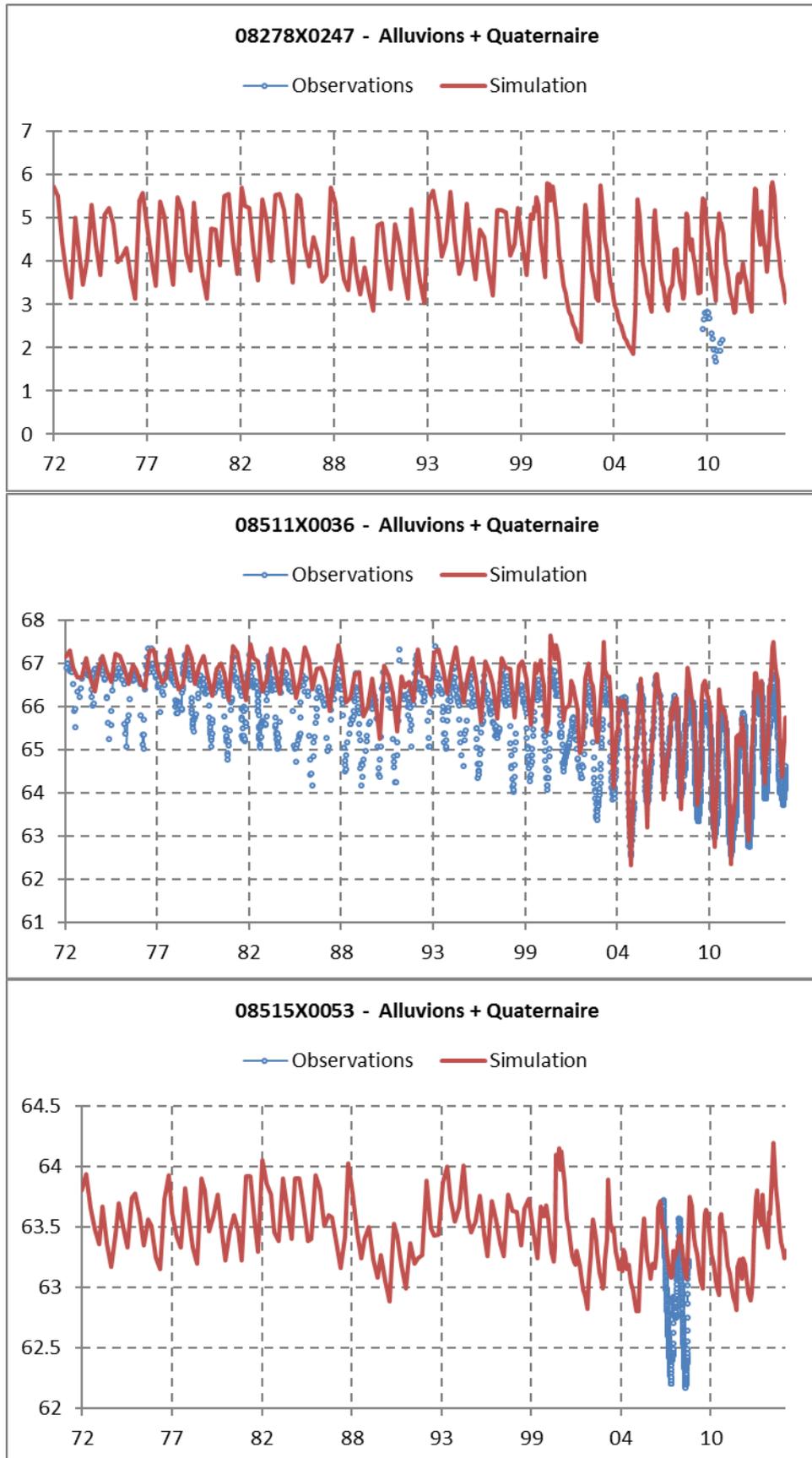
## **Annexe 6**

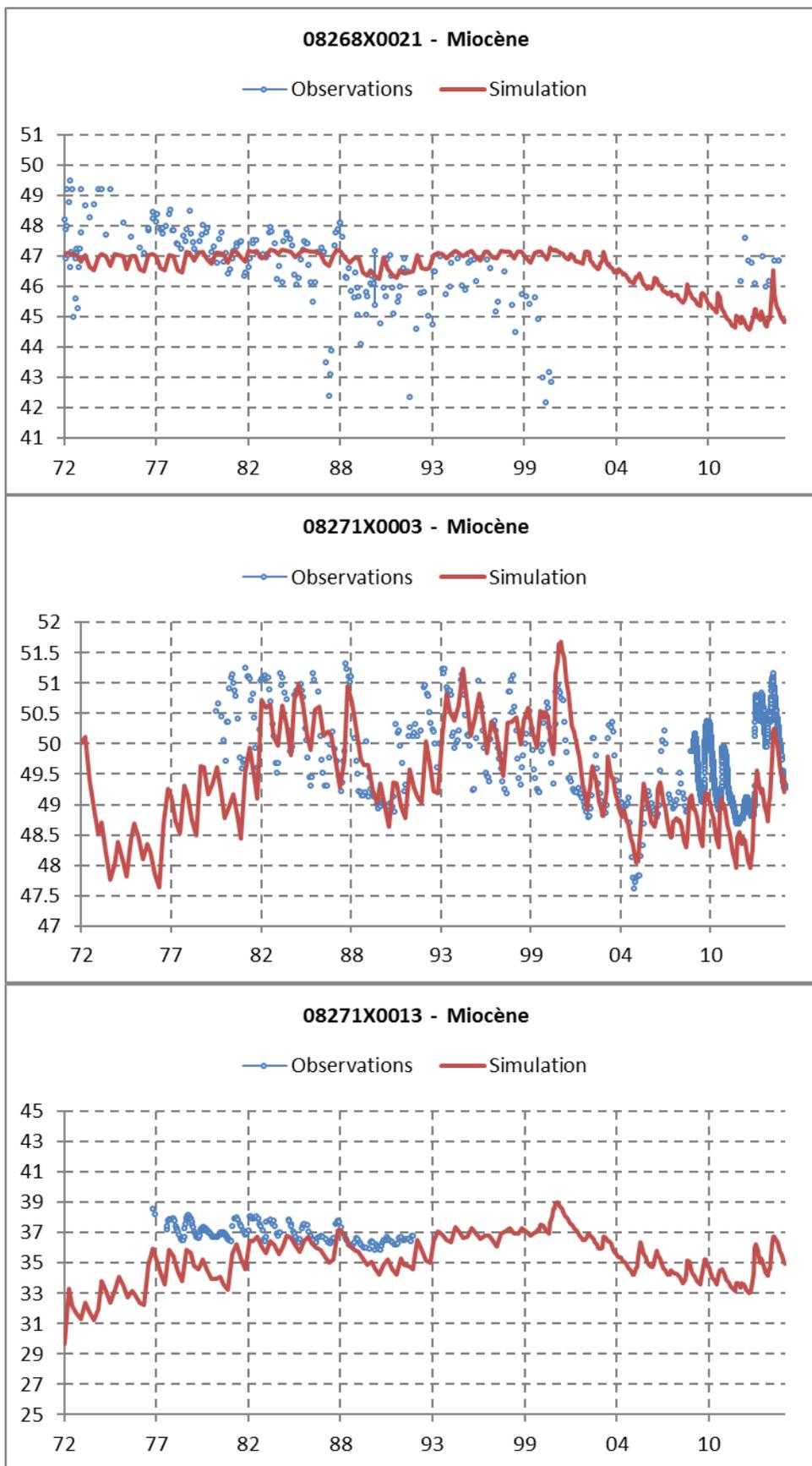
### **Calage des piézométries et des débits**

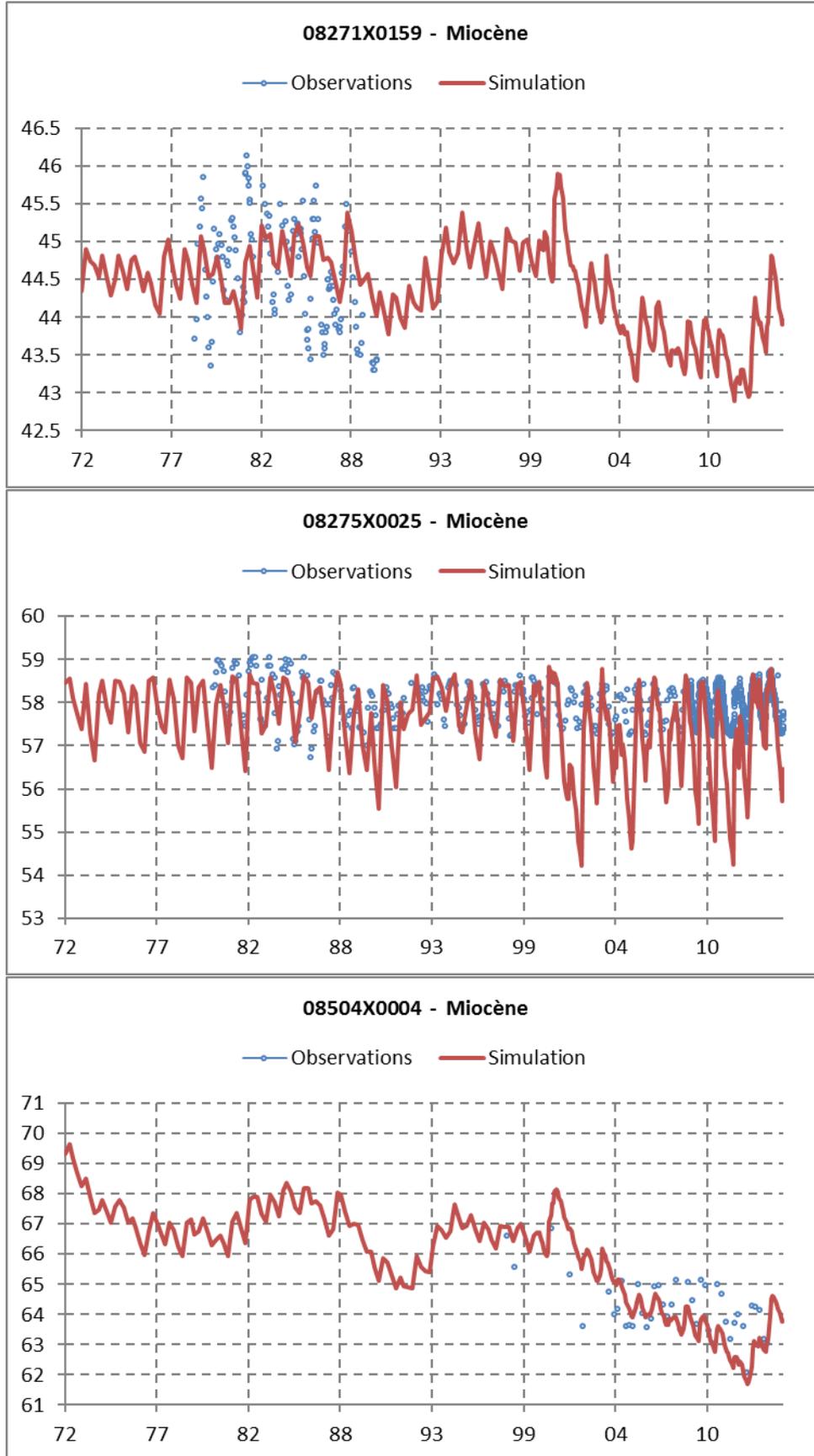


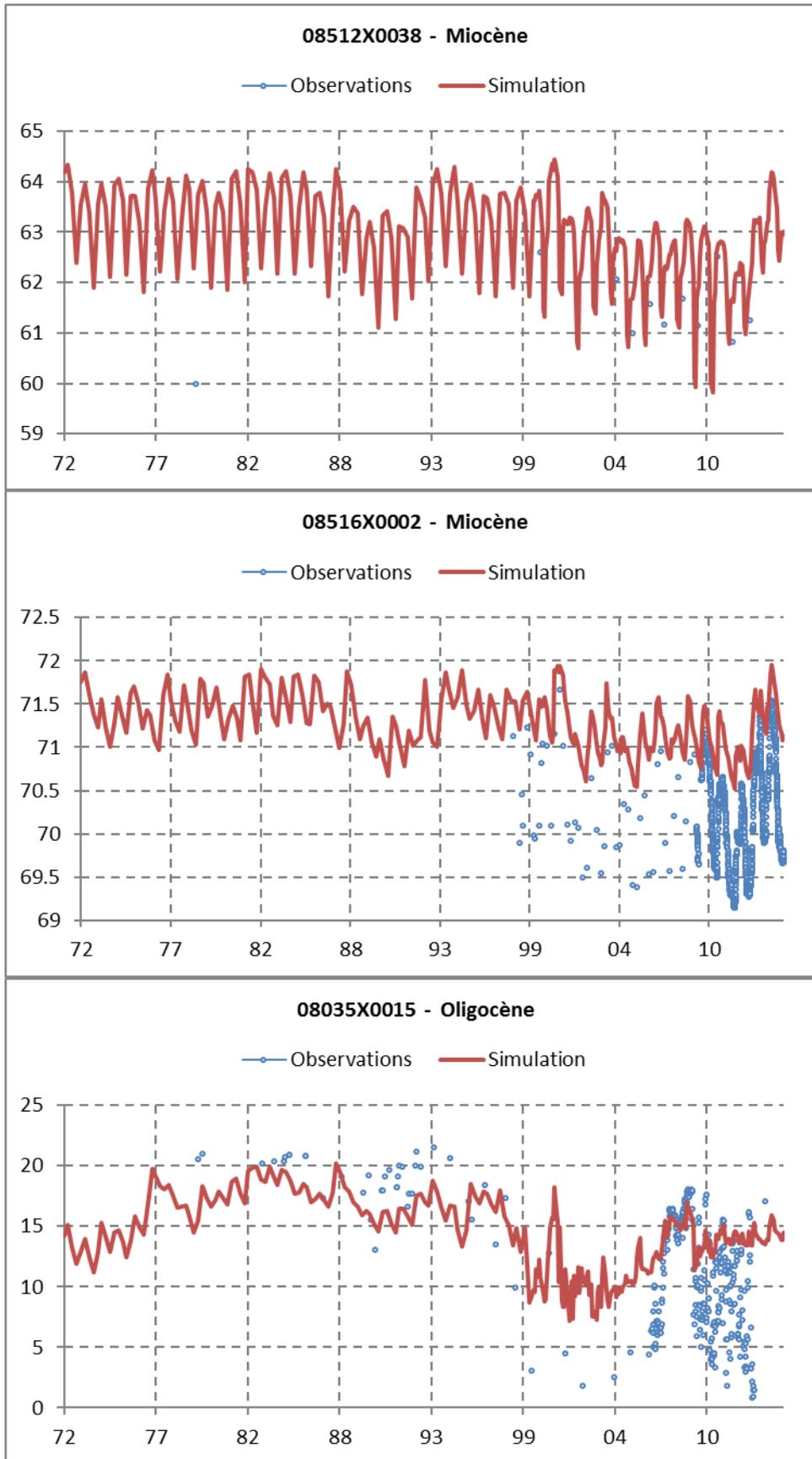


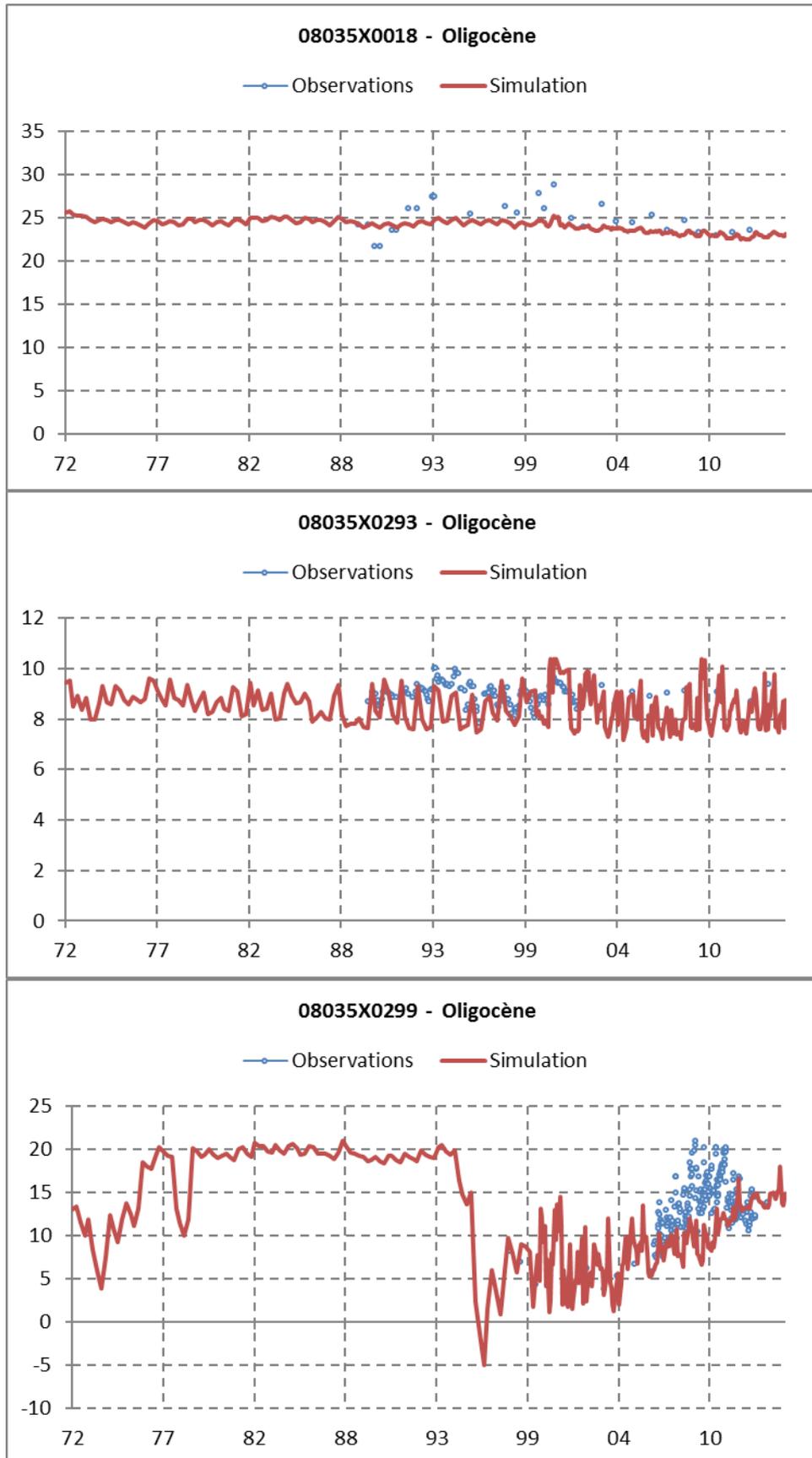


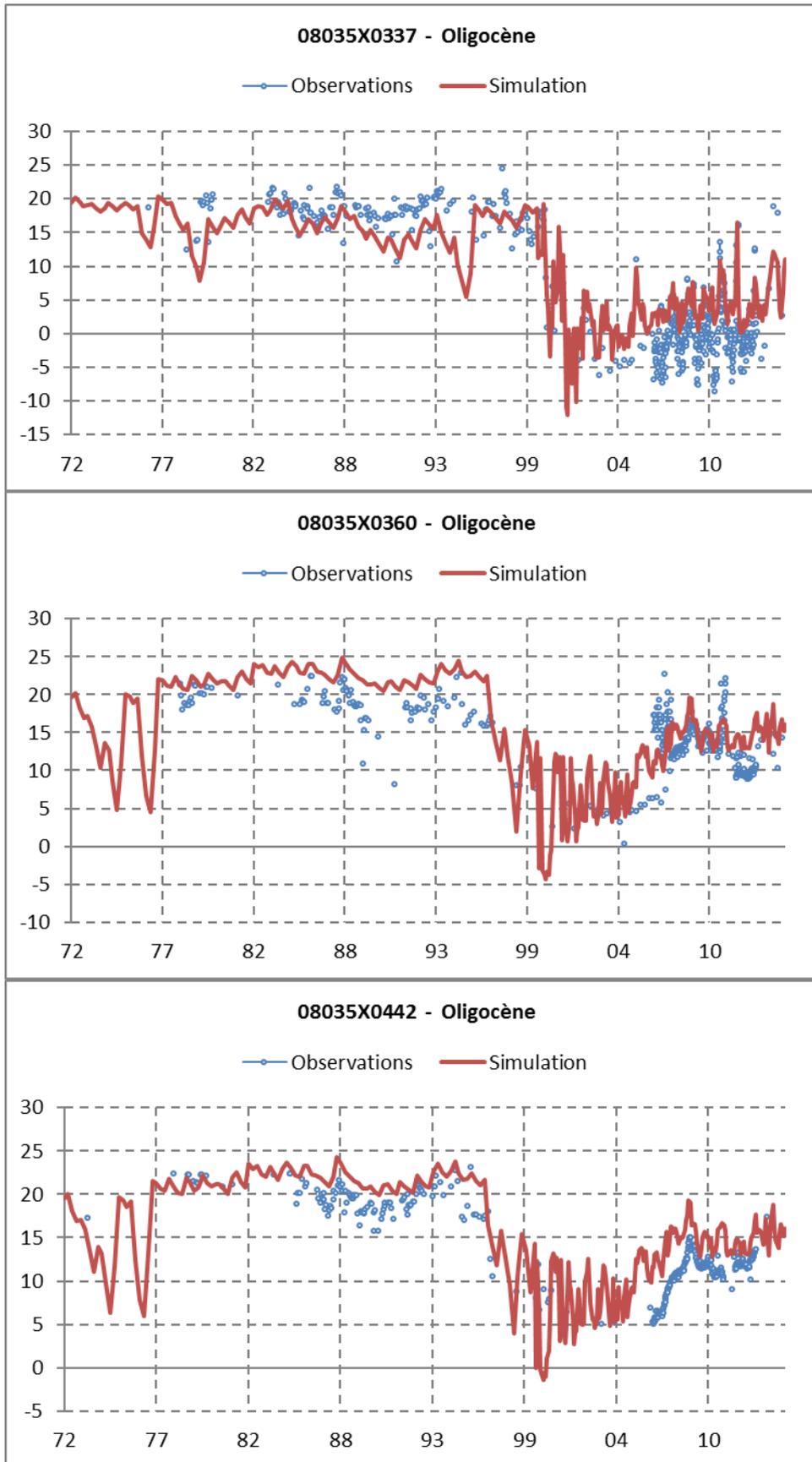


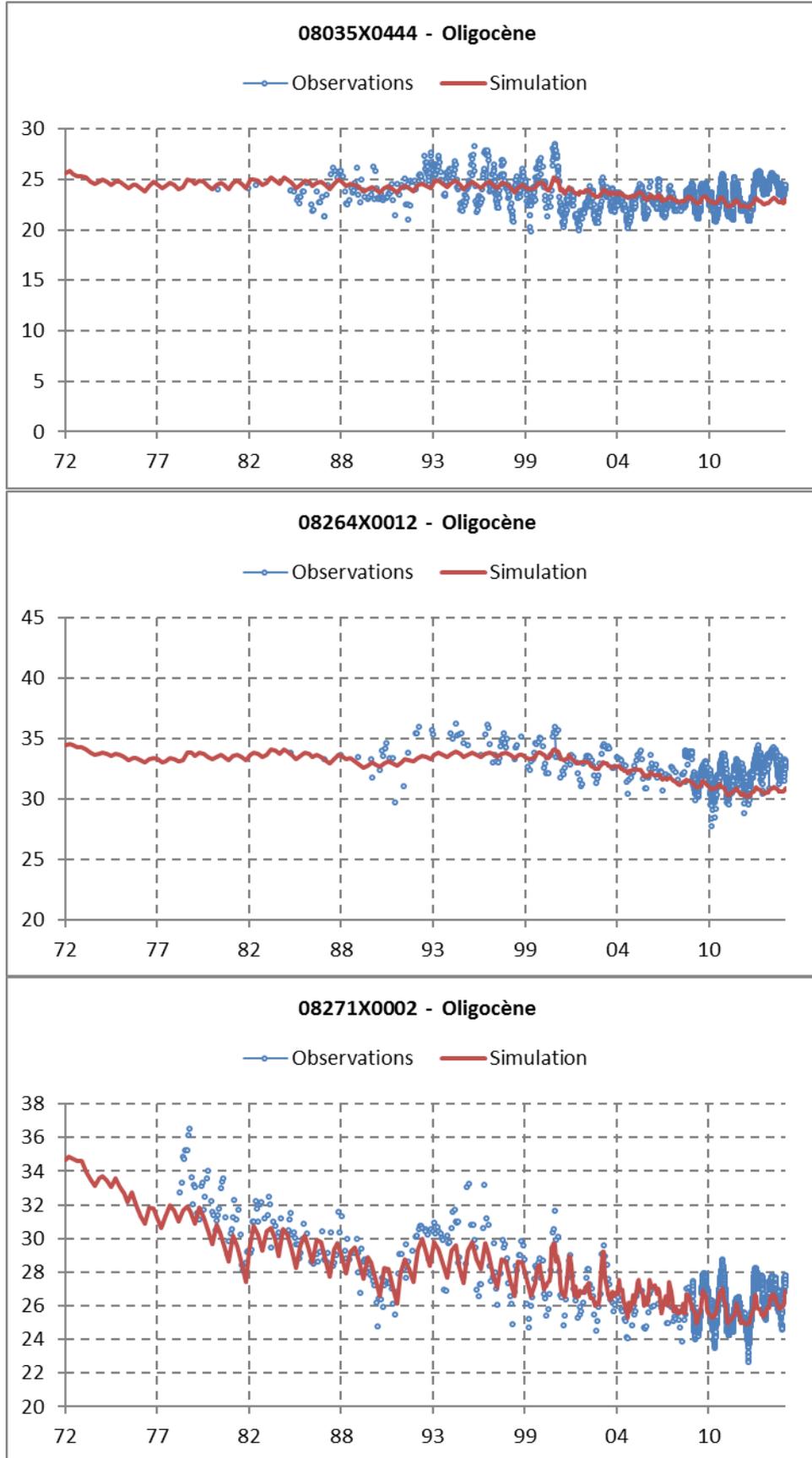


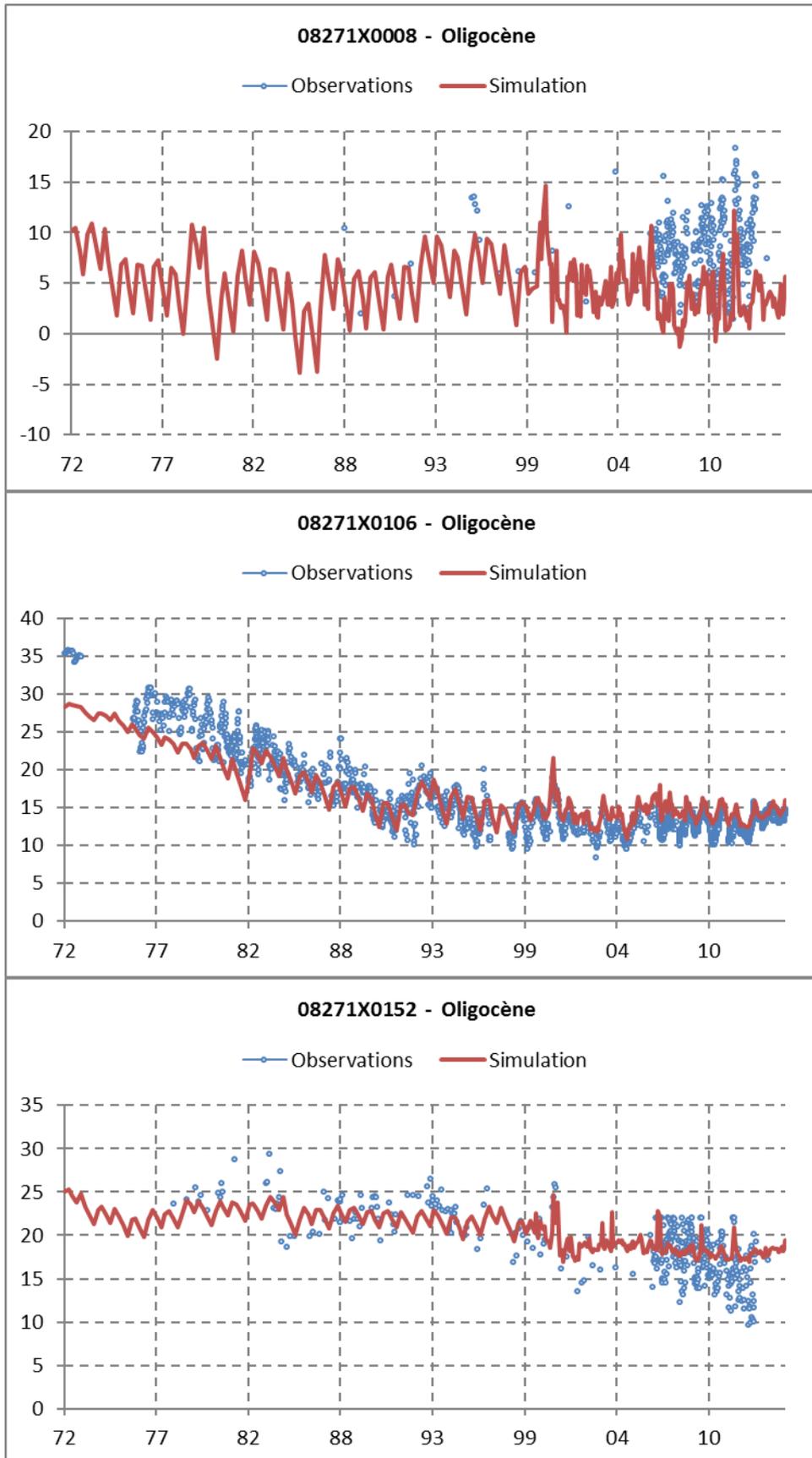


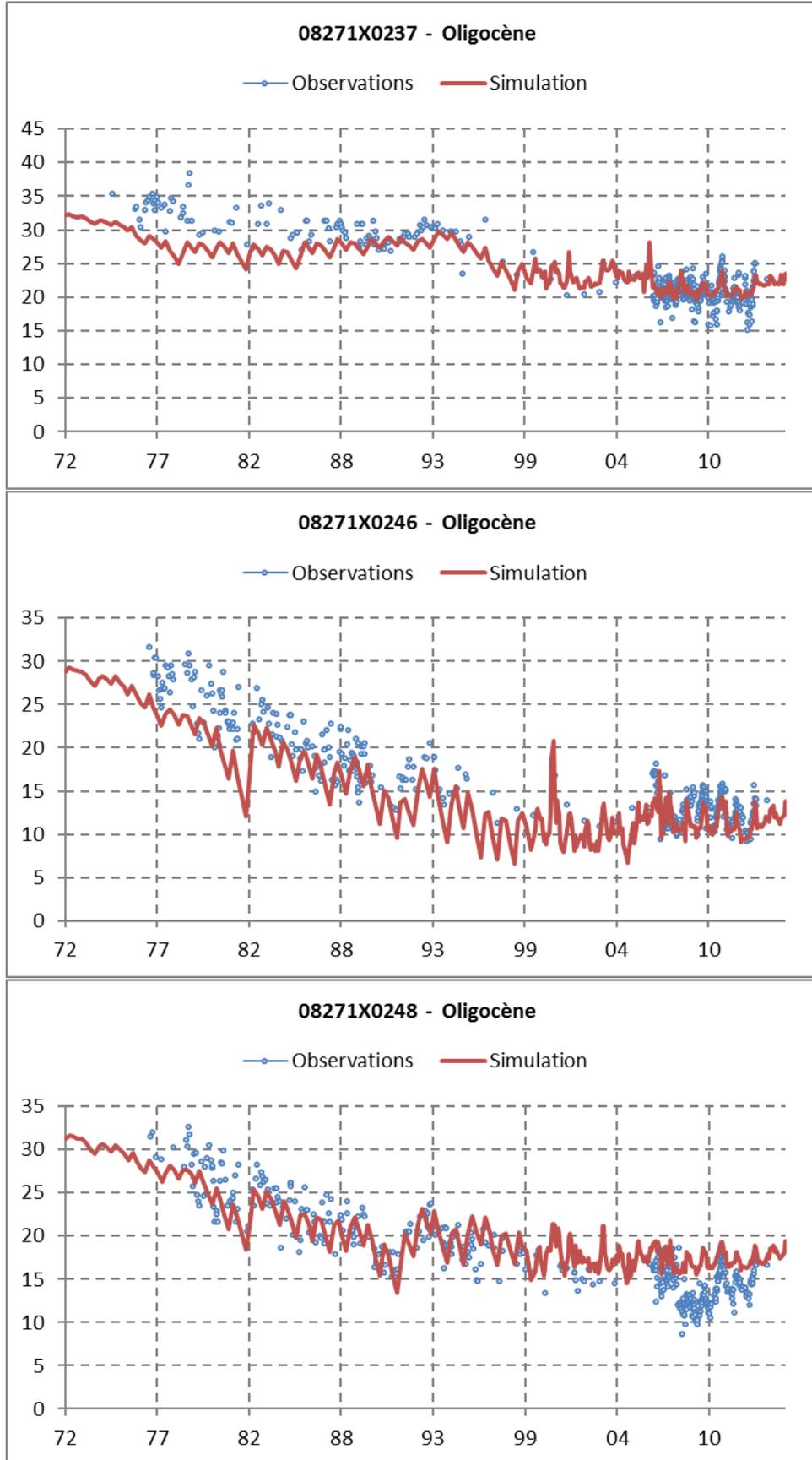


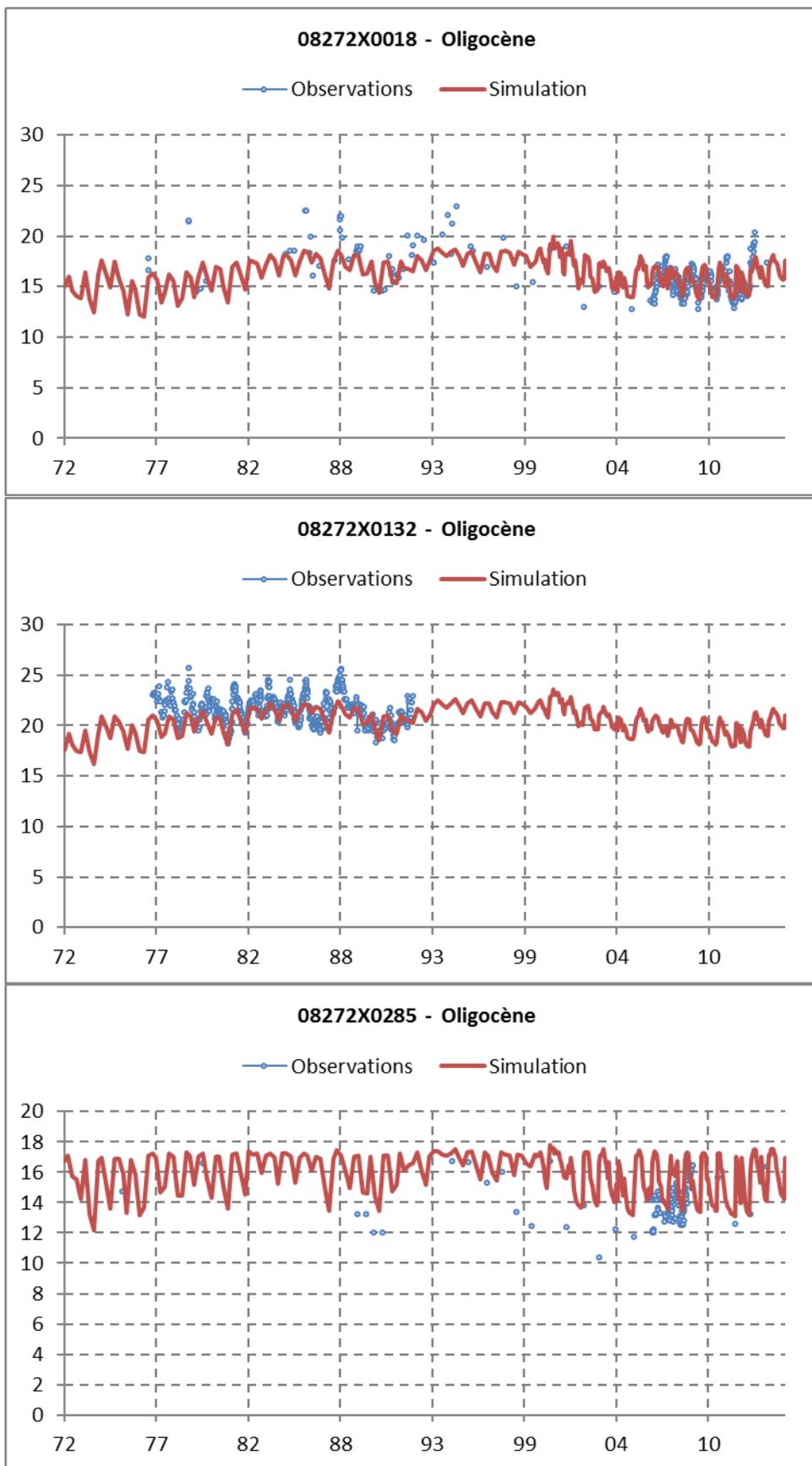


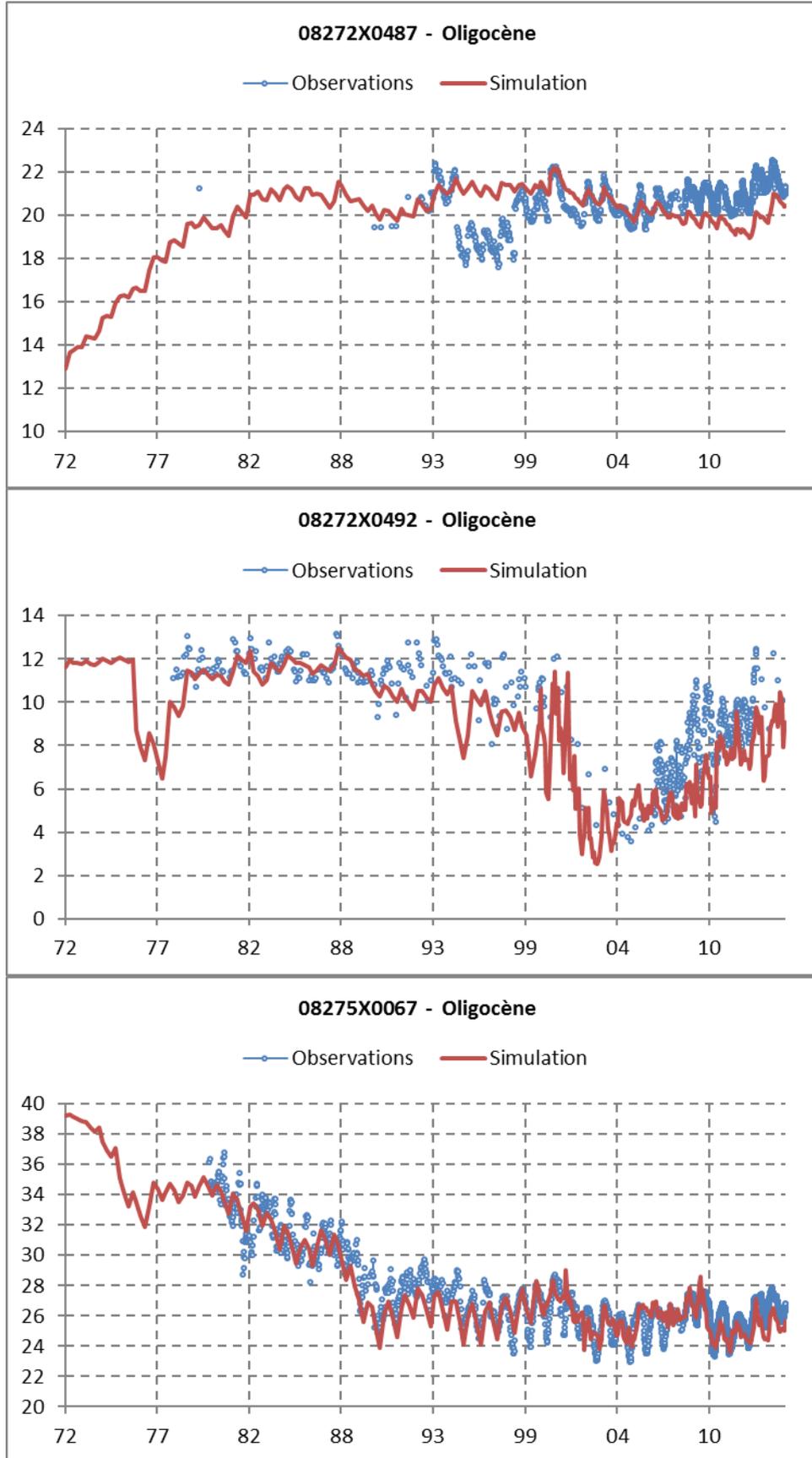


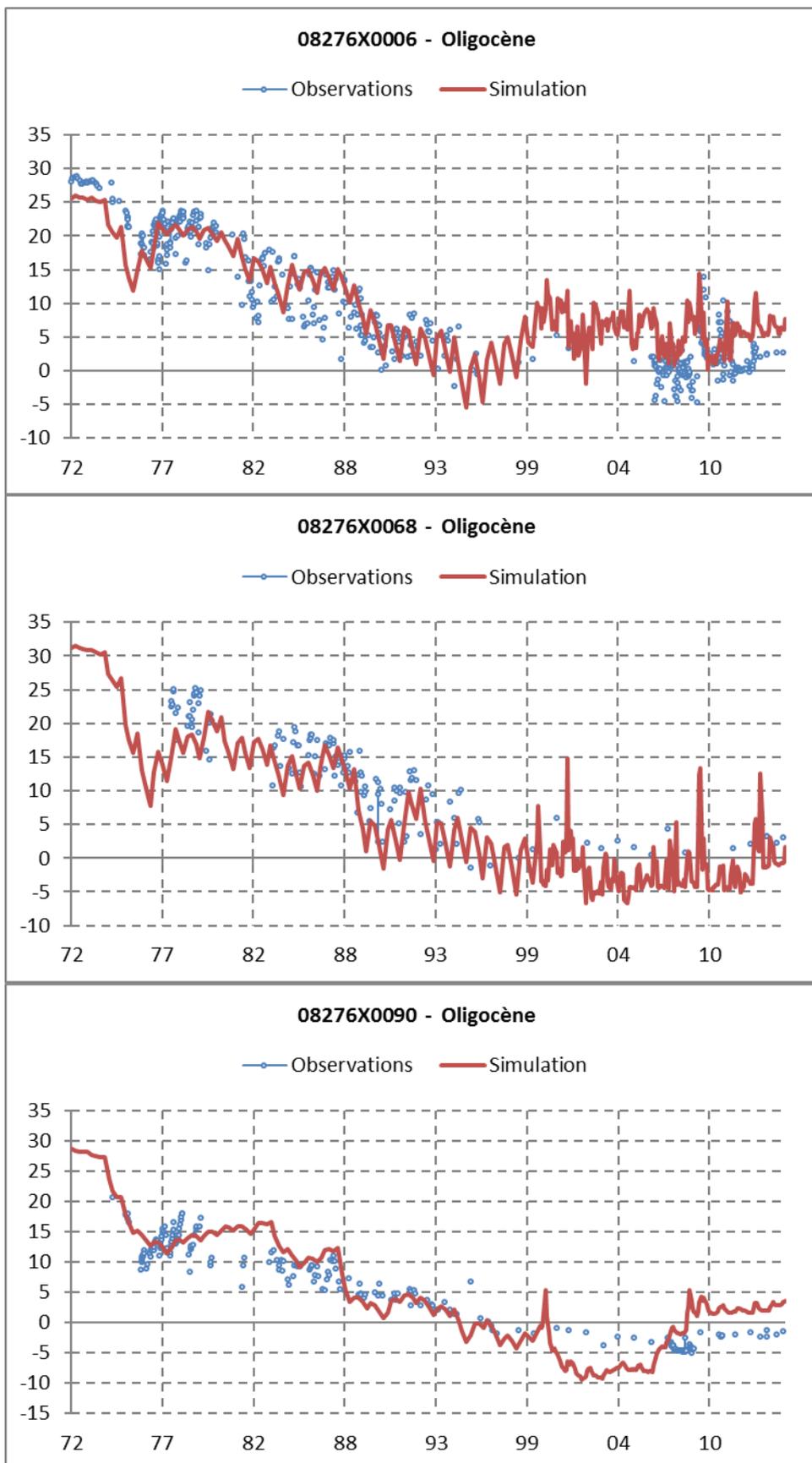


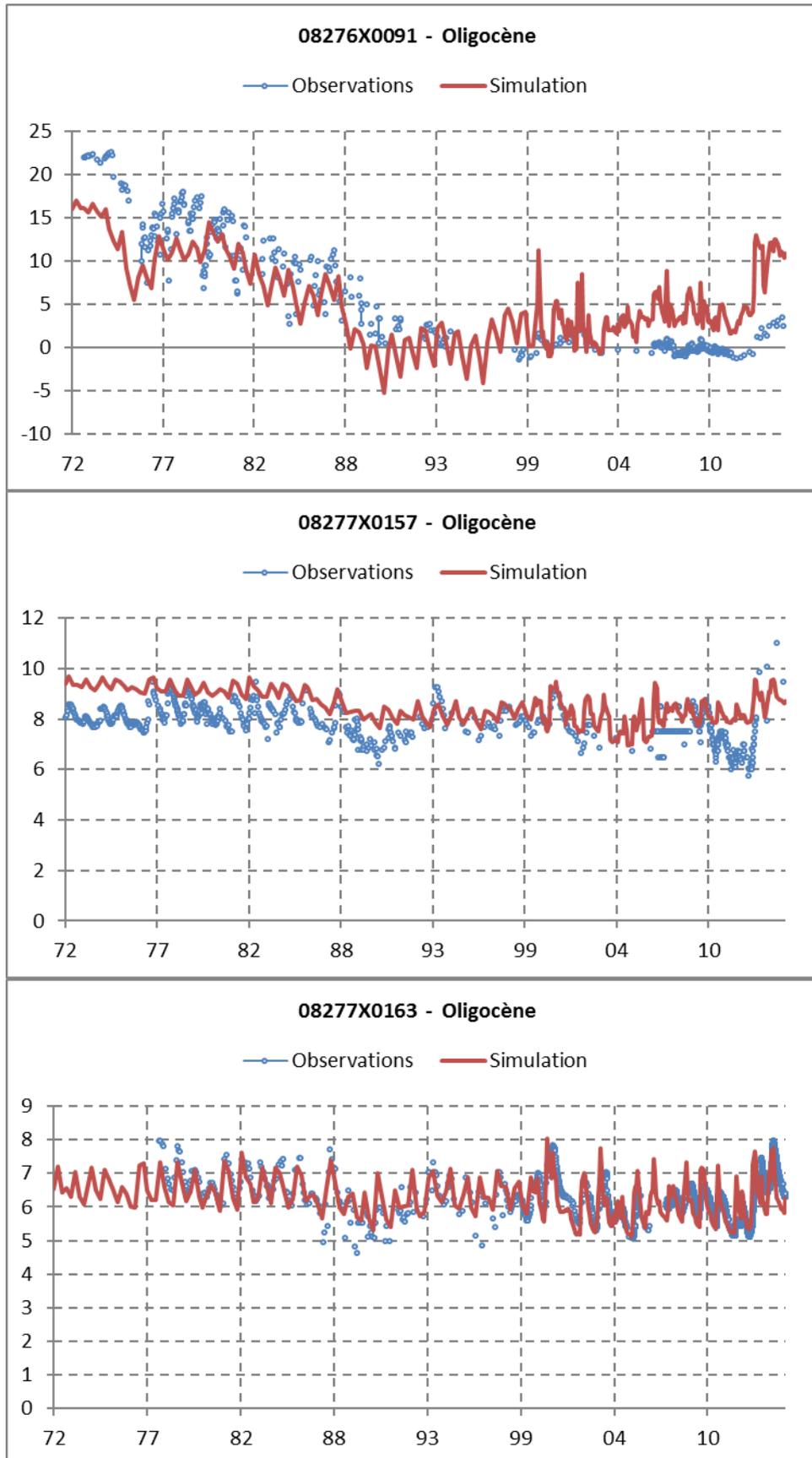


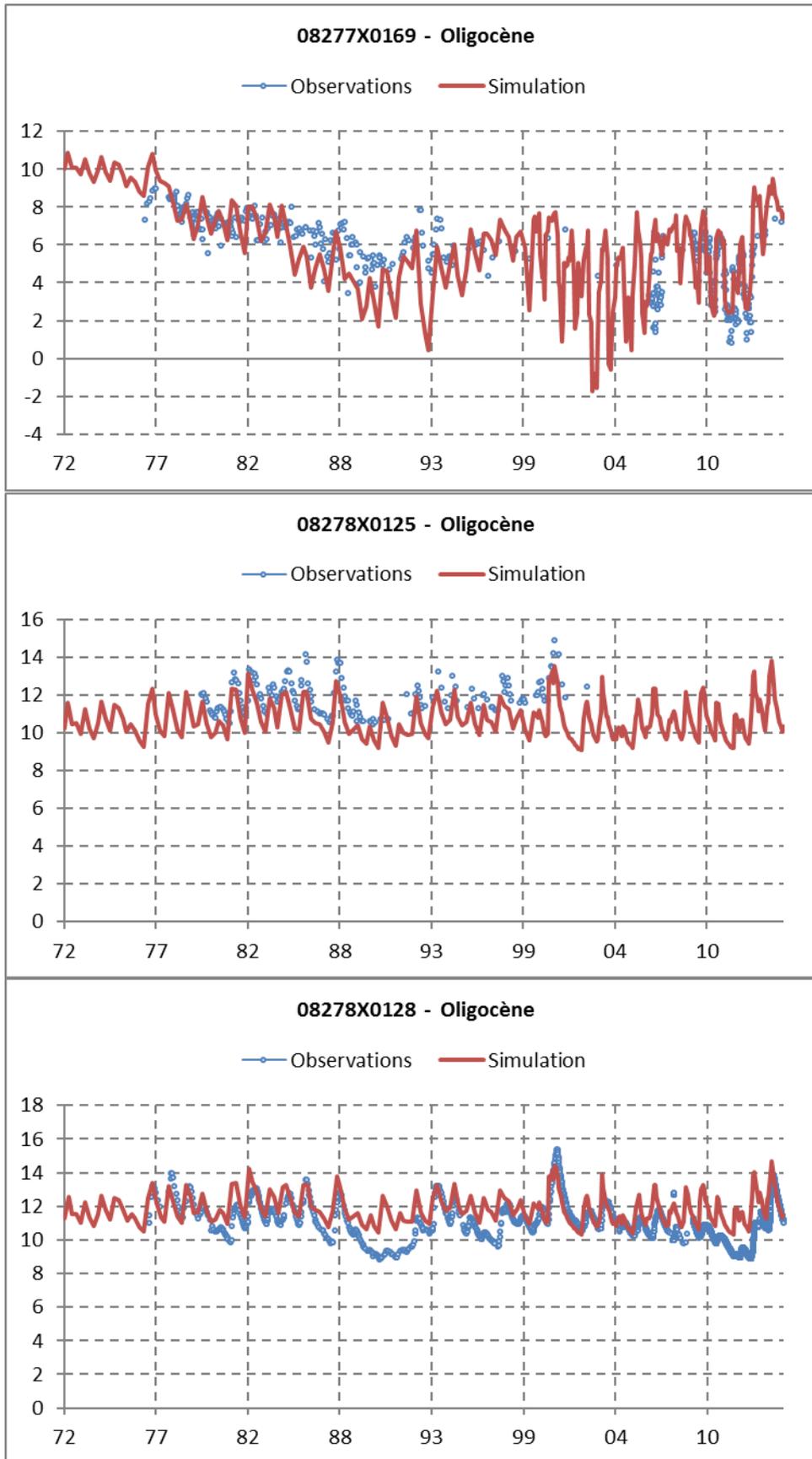


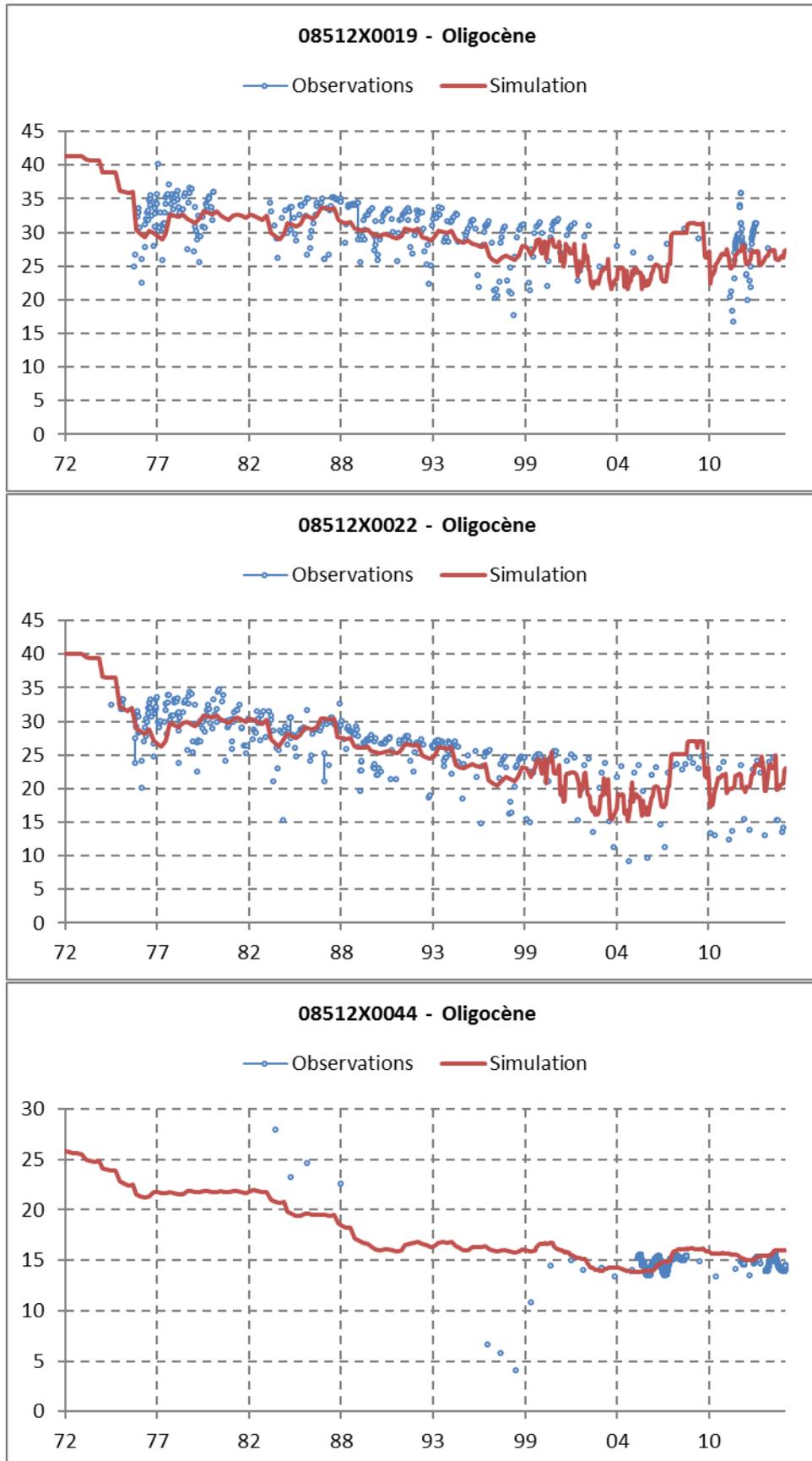


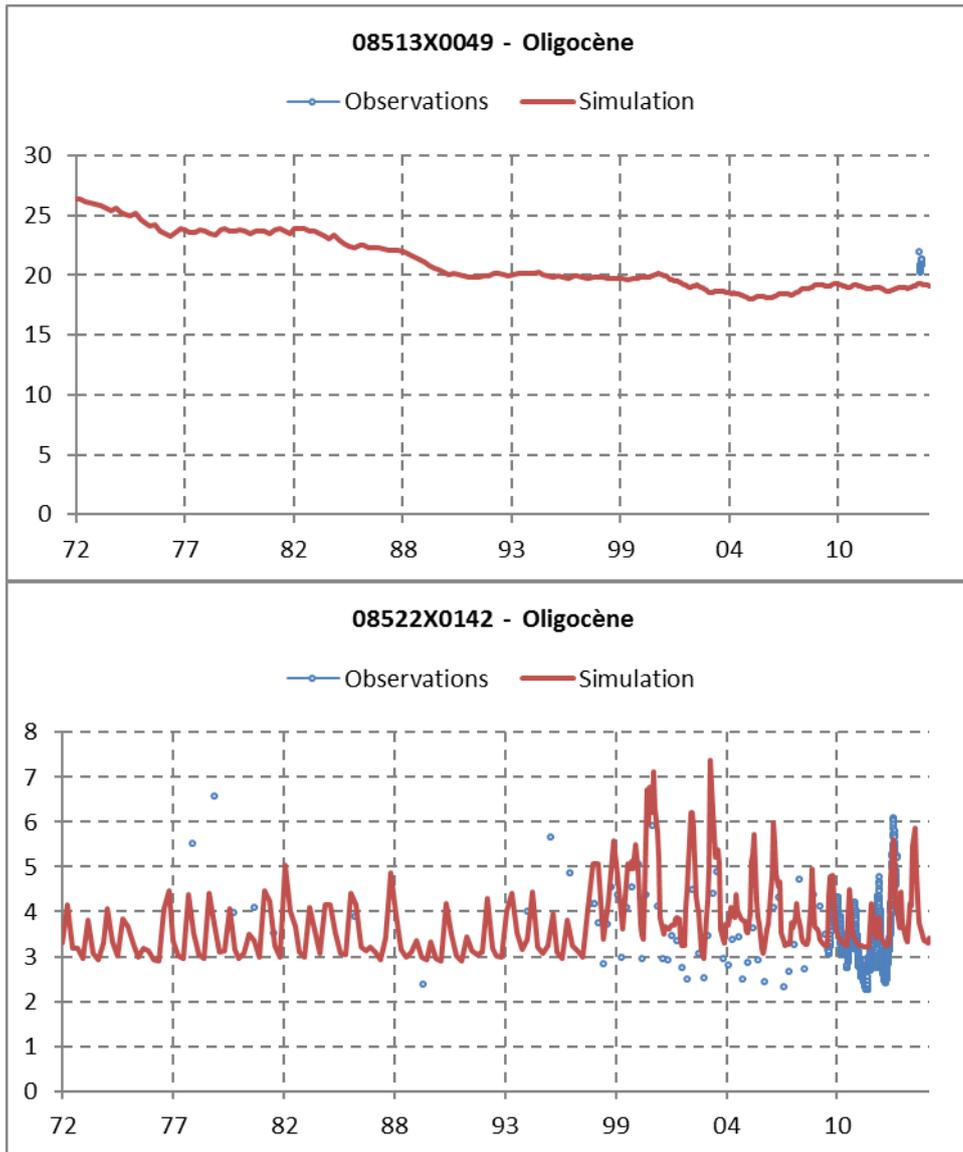


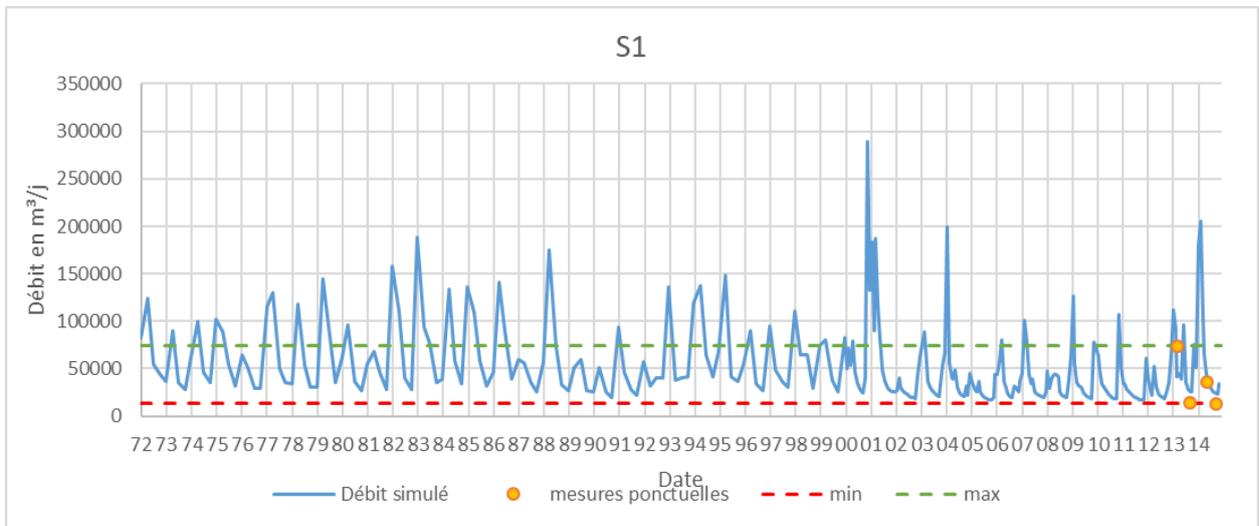
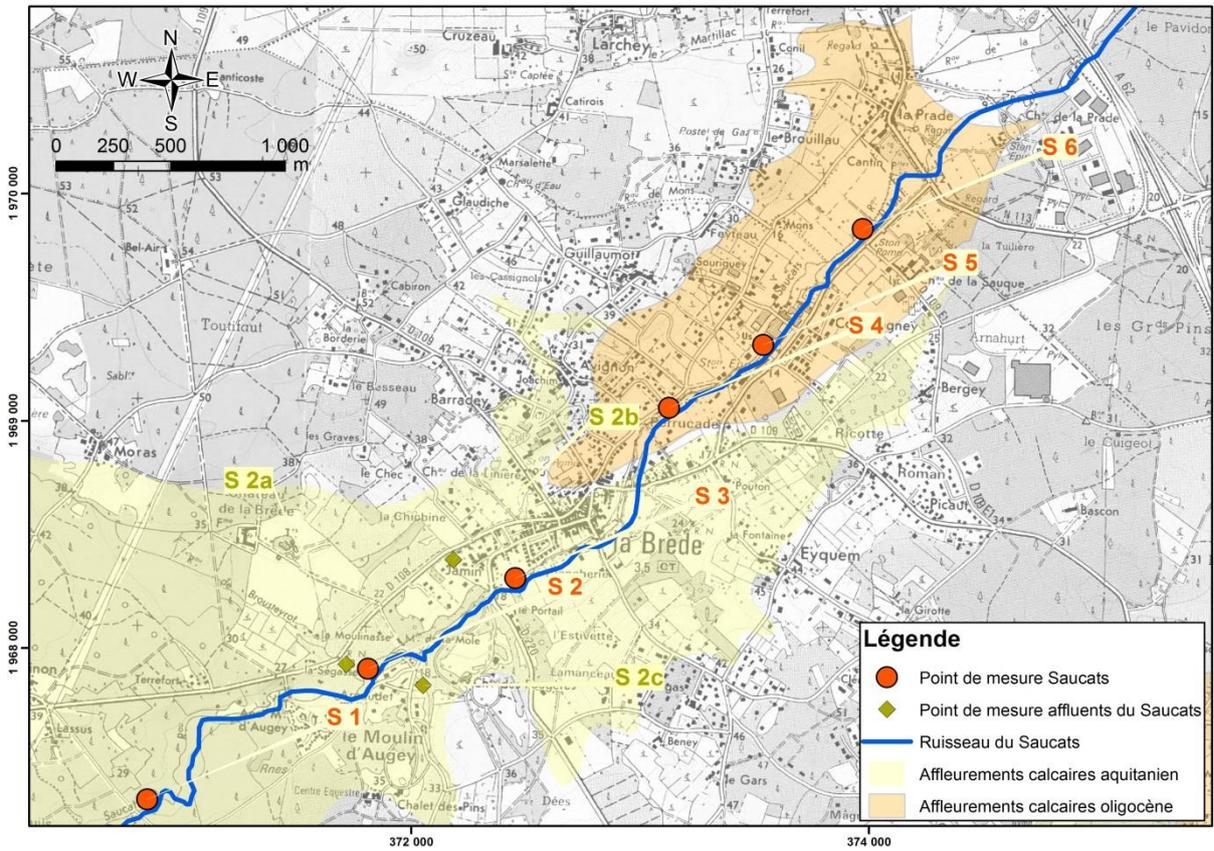


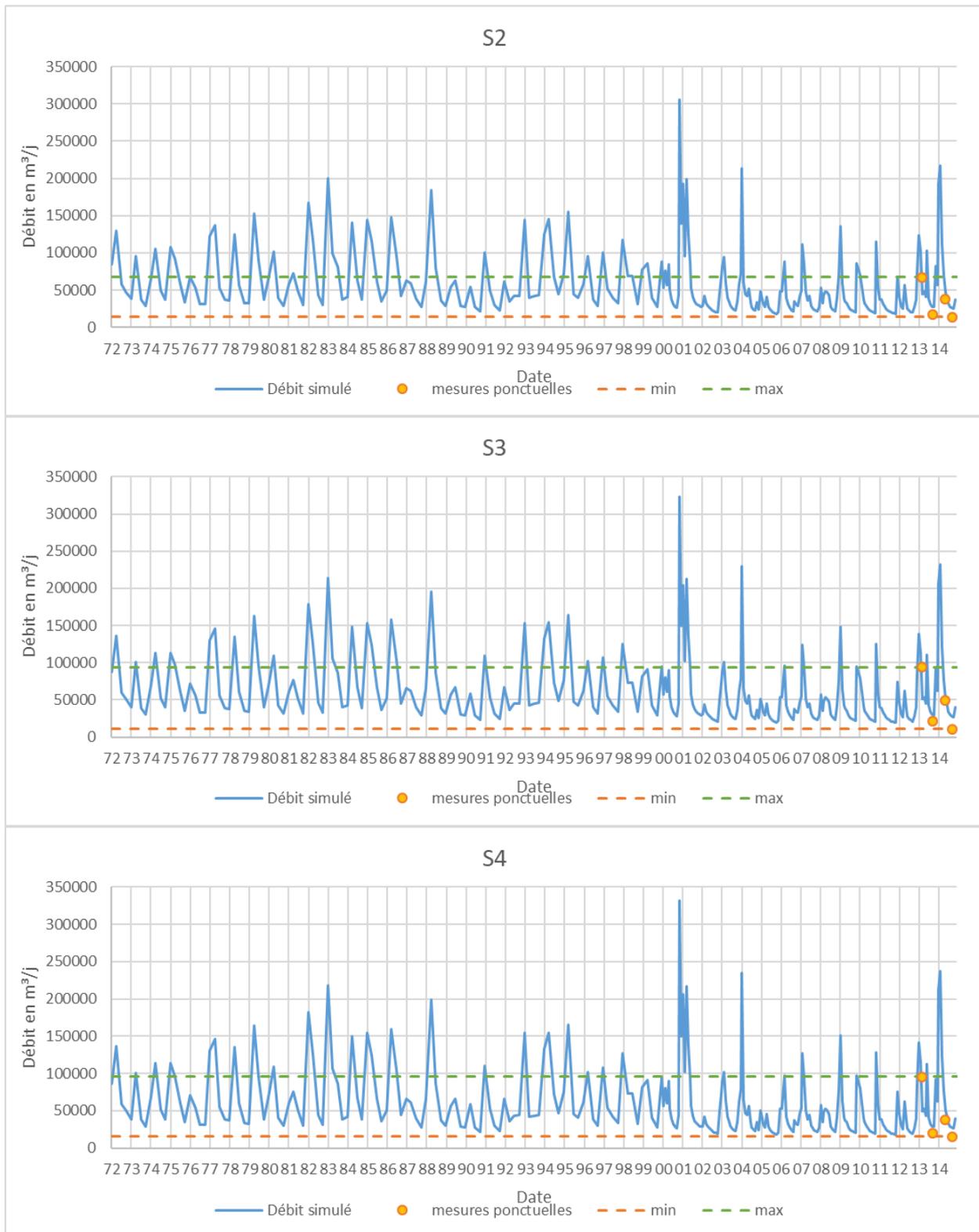


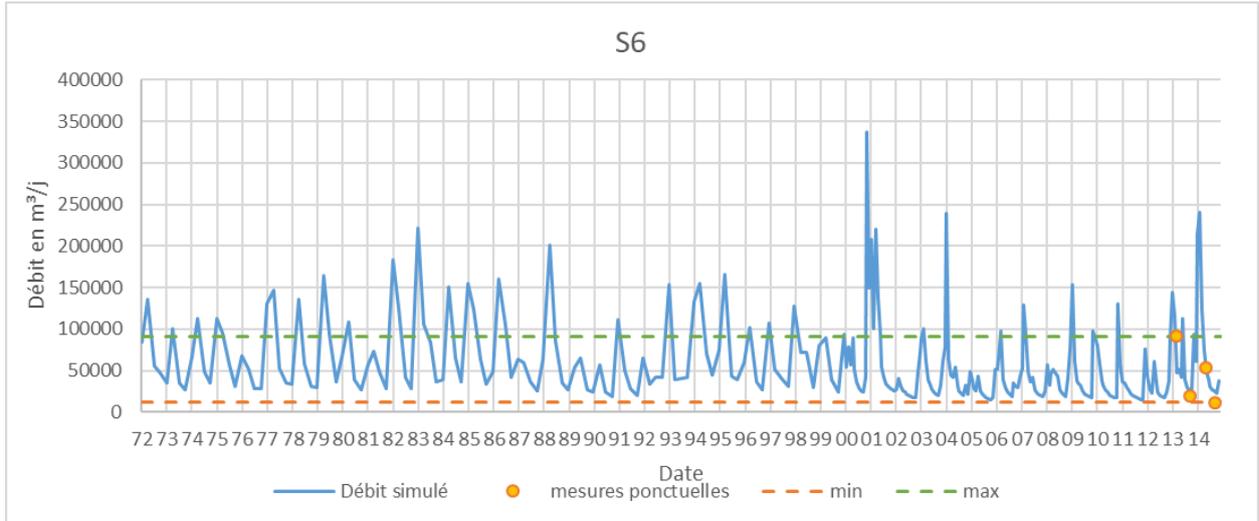


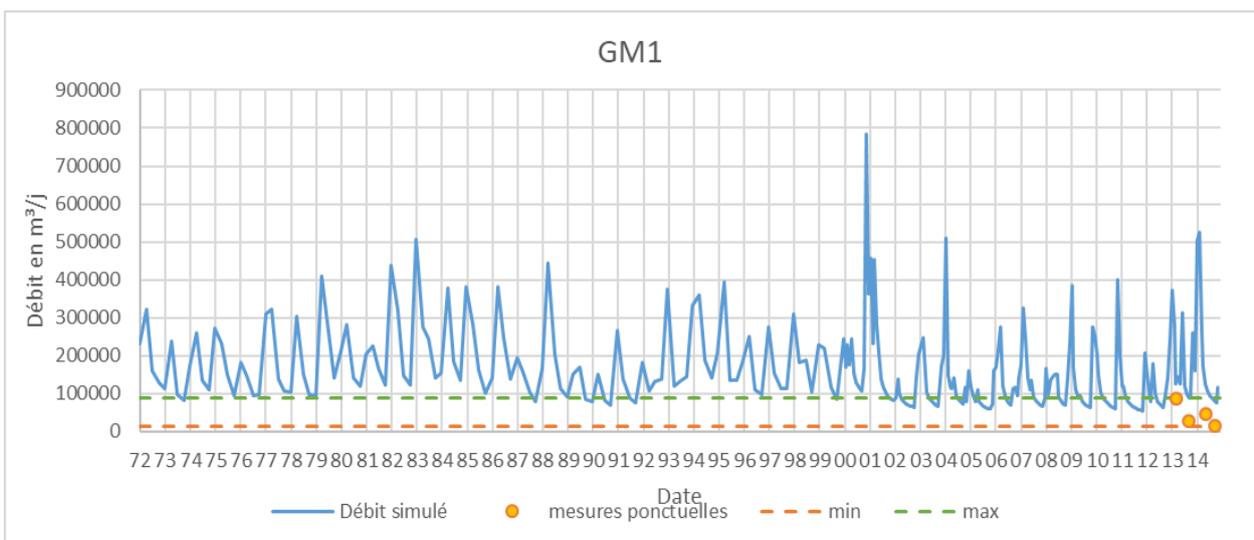
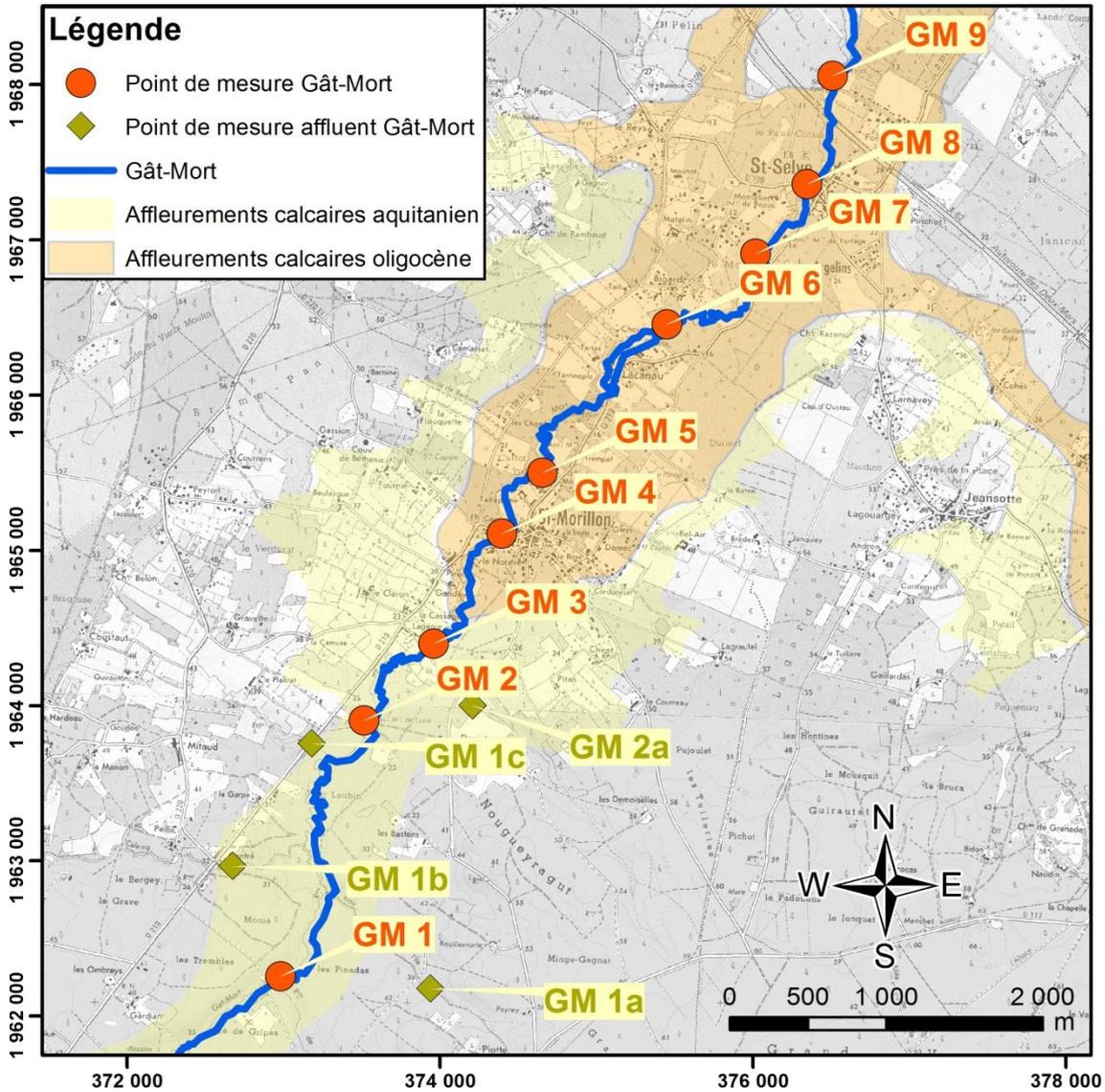


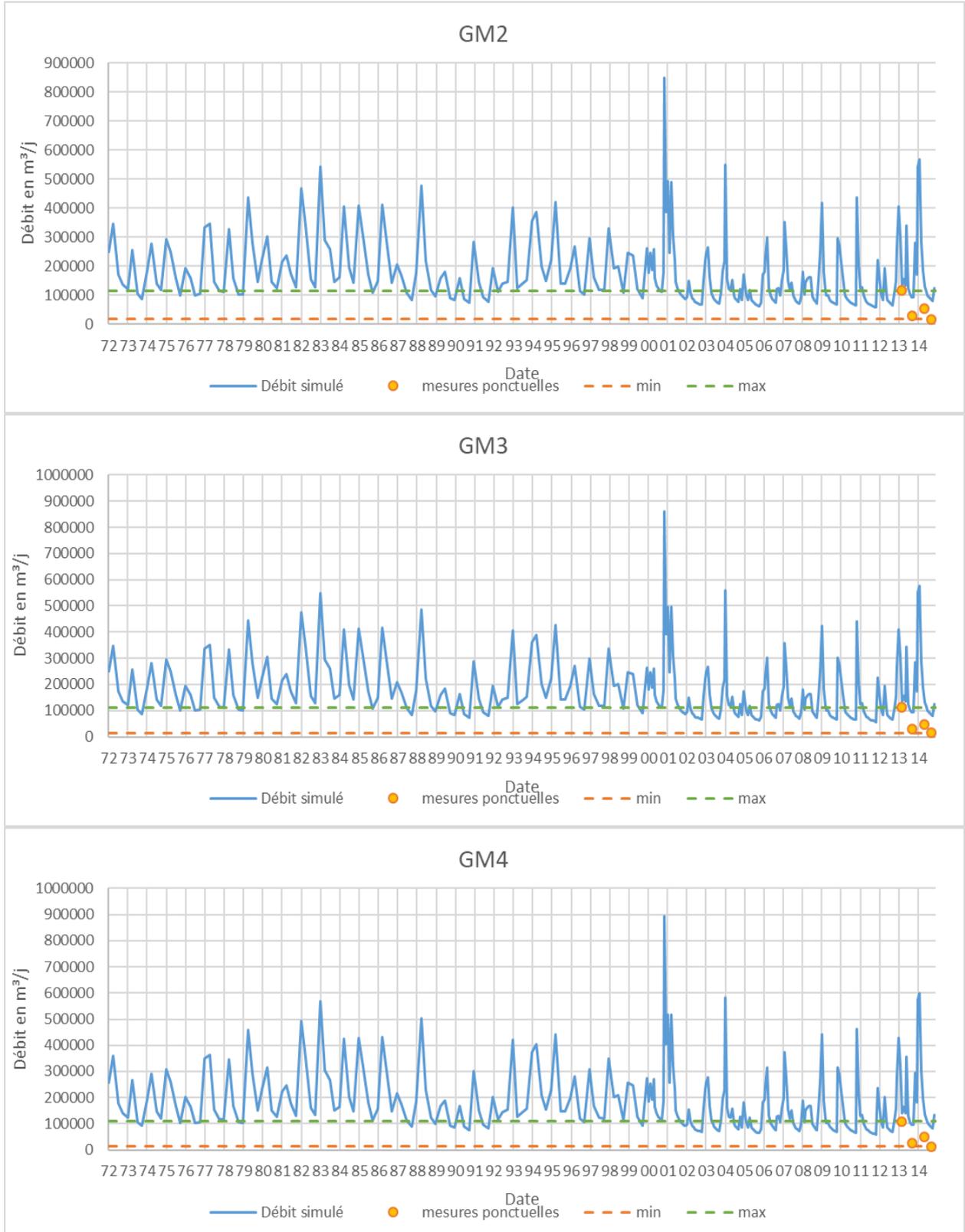


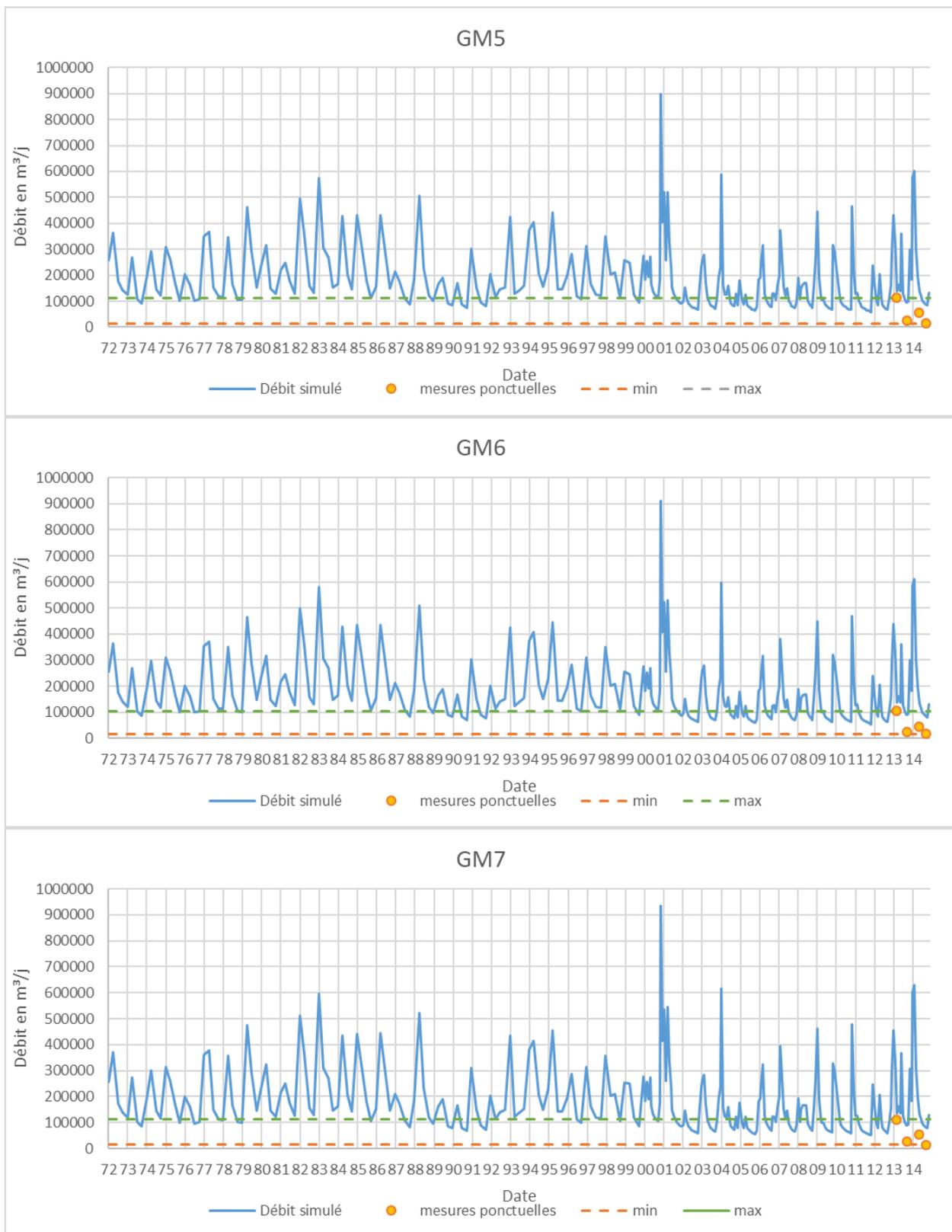


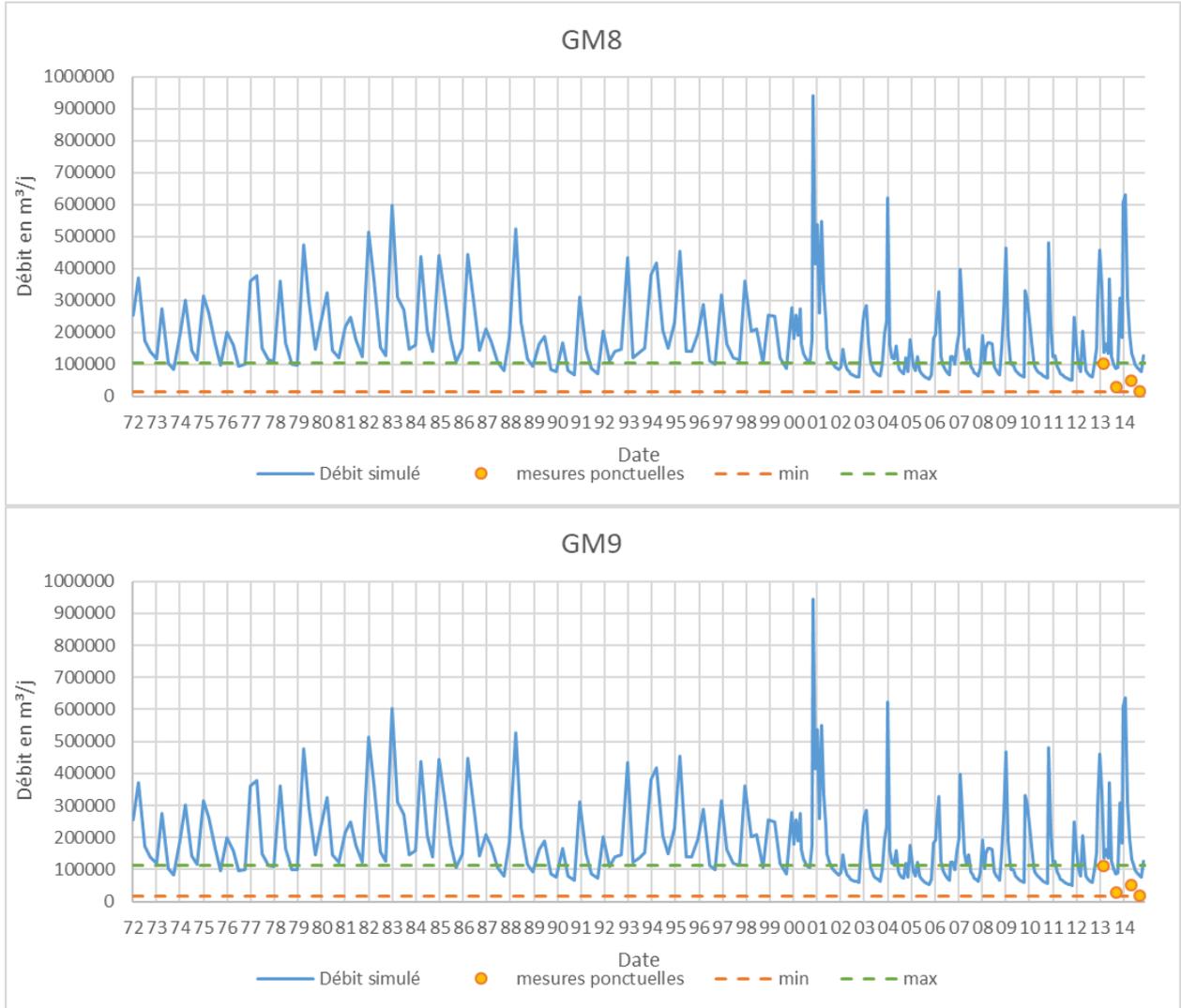














## **Annexe 7**

# **Conditions générales d'utilisation pour le téléchargement de données du modèle sur le portail du SIGES**



## CONDITIONS GÉNÉRALES D'UTILISATION DES DONNÉES

### Description des données

La disposition 95 du SAGE Nappes profondes de Gironde stipule :

- que le modèle Oligocène est le modèle de référence qui sert à l'élaboration des règles de gestion de l'Oligocène,
- que les données numériques de base du modèle (géométrie notamment) sont publiques. Ces données sont mises à disposition de tout demandeur par le BRGM qui élabore un protocole ad hoc.

Les données issues du modèle (géométrie et perméabilités) Oligocène correspondent à un état des connaissances à un temps  $t$  modifiable par des mises à jour. Les données fournies n'ont pas de valeur contractuelle, et sont fondées sur l'avis d'experts du BRGM.

### Description de la licence

La base de données du modèle Oligocène est une œuvre collective protégée par le Code de la propriété intellectuelle et les traités internationaux, dont l'auteur est le BRGM.

Les données contenues dans le modèle oligocène, ci-après « les Données », peuvent être des œuvres protégées par le Code de la propriété intellectuelle et les traités internationaux.

L'utilisation du modèle Oligocène et des Données nécessite la concession préalable, par le BRGM pour le modèle Oligocène et par leurs auteurs pour les Données, de la présente licence et vaut acceptation des présentes conditions.

Les présentes conditions définissent les droits et obligations concédés aux utilisateurs au titre de la présente licence. Le BRGM et leurs auteurs garantissent aux utilisateurs le droit personnel, non exclusif et gratuit, d'utilisation des Données soumises à la présente licence, dans le monde entier et pour une durée illimitée, dans les libertés et les conditions exprimées ci-dessous. La présente licence est régie par le droit français. Les utilisateurs sont libres de :

- Reproduire, copier, publier et transmettre les Données ;
- Diffuser et redistribuer les Données ;
- Adapter, modifier, extraire et transformer à partir des Données, notamment pour créer des données dérivées ;
- Exploiter les Données à titre commercial, par exemple en les combinant avec d'autres données, ou en l'incluant dans leur propre produit ou application.

Cette utilisation se fait sous réserve de mentionner la paternité des Données : sa source (à minima le nom du BRGM) et la date de sa dernière mise à jour. L'utilisateur peut notamment s'acquitter de cette condition en indiquant un ou des liens hypertextes (URL) renvoyant vers les Données et assurant une mention effective de sa paternité. Cette mention de paternité ne doit ni conférer un caractère officiel à l'utilisation des Données, ni suggérer une quelconque

reconnaissance ou caution par le BRGM, leurs auteurs ou par toute autre entité publique, de l'utilisateur ou de son utilisation.

### **Droits de propriété intellectuelle**

Sous réserve des droits des tiers, les éventuels droits de propriété intellectuelle détenus par le BRGM ou leurs auteurs sur des documents contenant les Données ne font pas obstacle à leur libre utilisation. Lorsque le BRGM détient des droits de propriété intellectuelle sur des documents qui contiennent les Données, il les cède de façon non exclusive, à titre gracieux, pour le monde entier et pour toute la durée des droits de propriété intellectuelle, à l'utilisateur qui peut en faire tout usage conformément aux libertés et aux conditions définies par la présente licence.

### **Limites de responsabilités**

Les Données sont mises à disposition telles que produites ou reçues par le BRGM, sans autre garantie expresse ou tacite qui n'est pas prévue par la présente licence. Le BRGM garantit qu'il met à disposition gratuitement les Données dans les libertés et les conditions définies par la présente licence. Il ne peut garantir l'absence de défauts ou d'irrégularités éventuellement contenues dans les Données. Le BRGM décline toute responsabilité quant à la pertinence des Données fournies au regard des besoins particuliers des utilisateurs. Ces derniers sont pleinement responsables des interrogations qu'ils formulent ainsi que de l'interprétation et de l'utilisation qu'ils font des Données. Le BRGM ne garantit pas la fourniture continue des Données. Il ne peut être tenu pour responsable de toute perte, préjudice ou dommage de quelque sorte causé à des tiers du fait de l'utilisation des Données et, plus généralement, de l'exécution de la présente licence. L'utilisation ne doit pas induire en erreur des tiers quant au contenu des Données, leur source et leur date de mise à jour.

Les utilisateurs renoncent à tout recours contre le BRGM sur la base de tout dommage qu'il pourrait subir du fait ou à l'occasion de l'utilisation des Données qu'ils feraient et tiendront indemnes le BRGM de tout recours de tiers qui pourrait être fait à ce titre.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Nouvelle-Aquitaine**

Parc Technologique Europarc  
24, avenue Léonard de Vinci

33600 – Pessac – France

Tél. : 05 57 26 52 70