



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Développements du MONA et maintenance des modèles régionaux de Nouvelle-Aquitaine

## Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020 Modules 1.1 et 1.2 - Année 3

Rapport final  
**BRGM/RP-71047-FR**

3 mars 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

**Saltel M., Cabaret O., Aissat R., Buscarlet E., Quispe M. et Imloul K.**

**Vérificateur :**

Nom : Pascal AUDIGANE

Fonction : Responsable d'Unité  
DEPA/GDR

Date : 09/03/2022

Signature :

**Approbateur :**

Nom : Nicolas PEDRON

Fonction : Directeur Régional BRGM  
Nouvelle-Aquitaine

Date : 01/04/2022

Signature :

Le Directeur Régional  
du BRGM Nouvelle-Aquitaine  
  
Nicolas PEDRON

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

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

Ce rapport a été réalisé en partenariat avec :



**Mots clés :** Modélisation hydrodynamique, Bassin Nord-Aquitain, Modèle Nord-Aquitain, PEST.

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

**Saltel M., Cabaret O., Aissat R., Buscarlet E., Quispe M. et Imloul K. (2022)** - Développements du MONA et maintenance des modèles régionaux de Nouvelle-Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-71047-FR, 137 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Cette étude (AP20BDX019 et AP20BDX023) a été réalisée dans le cadre de l'année 3 de la Convention Régionale sur les Eaux Souterraines en Nouvelle-Aquitaine, signée entre l'État, la Région Nouvelle-Aquitaine et le BRGM, portant sur la période 2015-2020 et conduite avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Elle s'inscrit dans le prolongement des travaux de modélisation des aquifères de la région Nouvelle-Aquitaine, engagés par le BRGM. Ces travaux ont vocation à élaborer des outils d'aide à la décision, destinés à apporter des éléments scientifiques et techniques permettant aux gestionnaires de définir les stratégies d'exploitation des ressources en eaux souterraines de la région. Certaines nappes sont en effet très sollicitées, et parfois en situation de déséquilibre, avec des prélèvements excédant leur possibilité de renouvellement. Elles requièrent donc une gestion raisonnée, afin de préserver leur pérennité. L'objectif global de ce module est de développer le MOdèle Nord-Aquitain (MONA) pour obtenir une plus grande finesse de représentation des aquifères et être en mesure de mieux traiter les problèmes posés à une échelle plus locale, en particulier ceux soulevés par le SAGE "Nappes profondes de Gironde", mais aussi ceux qui émergent dans les départements voisins du Lot-et-Garonne et de la Dordogne.

Le travail réalisé au cours de cette année d'étude a consisté à actualiser les données d'entrée du modèle, dans sa version 3.3b (prélèvements, flux d'infiltration), et les chroniques piézométriques jusqu'en 2019, pour bénéficier ainsi d'un outil le plus à jour possible. Lors de cette actualisation, un premier inventaire des données infra-annuelles a été entamé. La base des volumes infra-annuels regroupe 468 ouvrages ; l'objectif est de l'enrichir peu à peu pour améliorer la répartition des prélèvements, dans le temps, et affiner les résultats des simulations de nos modèles.

En parallèle de la maintenance de la version 3.3b du MONA, ce module a permis de poursuivre le développement de la version 3.5 du modèle. Cette version intègre la géométrie de la version 4, dans un maillage de 2 km de côté, la prise en compte des données SAFRAN, pour le calcul de la recharge via le module GARDENIA de MARTHE, ainsi que le réseau hydrographique le plus détaillé possible, pour contrôler les débordements. Le modèle comprend 16 couches et n'intègre les épontes que par l'intermédiaire de leurs perméabilités verticales. L'objectif est de gagner en temps de calcul, pour pouvoir utiliser l'interface de couplage Python PyMARTHE qui permet de coupler les logiciels PEST (Parameter ESTimation) et MARTHE, pour effectuer un calage algorithmique (Aissat, 2021). La suite logicielle PEST est l'un des programmes les plus utilisés pour l'estimation des paramètres et la quantification des incertitudes (Doherty, 2015).

PyMARTHE, développé dans le cadre de la thèse de Ryma Aissat sous la supervision d'Alexandre Pryet, correspond à une librairie codée en Python, qui permet de piloter le code de calcul MARTHE (Aissat, 2021). Pour utiliser PyMARTHE avec la version 3.5 du MONA, un certain nombre d'adaptations a été nécessaire pour intégrer de nouvelles variables à optimiser (perméabilité de rivière, hauteur de ruissellement percolation, temps de demi-percolation, réserve disponible pour l'évapotranspiration ou RDE). Par ailleurs, bien que le nombre de couches soit similaire à la version 3.3 (seulement une de plus), l'objectif est de réaliser un calage à un pas de temps infra-annuel, pour mieux cadrer la recharge et les coefficients d'emmagasinement. Un compromis a donc dû être trouvé pour aboutir à des temps de calculs compatibles avec une approche de calage algorithmique. Ainsi, un mixte entre pas de temps annuel, au cours de la période 1972-2009, et mensuel, au cours de la période 2010-2017, a été choisi pour aboutir à des temps de calculs raisonnables tout en contraignant, de manière plus efficace, les paramètres à estimer.



## Sommaire

<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>9</b>
<b>2. ACTUALISATION DES DONNEES SPATIO-TEMPORELLES DU MONA</b> .....	<b>11</b>
2.1. PRELEVEMENTS.....	11
2.1.1. <i>La base BRGM des données de prélèvements annuels</i> .....	11
2.1.2. <i>Collecte des données de prélèvements annuels</i> .....	12
2.1.3. <i>Données infra-annuelles</i> .....	14
2.1.4. <i>Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du MOdèle Nord-Aquitain pour la période 2015-2019</i> .....	20
2.2. CALCUL DES PRECIPITATIONS EFFICACES ET ACTUALISATION DES DONNEES DE RECHARGE DES NAPPES DU MODELE NORD-AQUITAIN .....	23
2.2.1. <i>Précipitations efficaces</i> .....	23
2.2.2. <i>Recharge</i> .....	24
2.3. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU MONA V3.3.....	27
2.3.1. <i>Mise à jour des chroniques d'observations</i> .....	27
2.3.2. <i>Campagne piézométrique complémentaire</i> .....	29
2.4. RESULTATS DES SIMULATIONS D'ACTUALISATION .....	31
2.4.1. <i>Chroniques de calage</i> .....	31
2.4.2. <i>Cartes piézométriques</i> .....	32
<b>3. DEVELOPPEMENT DU MONA</b> .....	<b>35</b>
3.1. DESCRIPTION DE LA VERSION 3.5 .....	35
3.1.1. <i>Géométrie</i> .....	35
3.1.2. <i>Recharge</i> .....	35
3.1.3. <i>Discrétisation temporelle</i> .....	35
3.1.4. <i>Prélèvements</i> .....	36
3.1.5. <i>Conditions imposées</i> .....	36
3.1.6. <i>Réseau hydrographique</i> .....	36
3.1.7. <i>Données d'observation</i> .....	40
3.1.8. <i>Analyse des tendances des niveaux piézométriques, dans l'aquifère de l'Éocène moyen du nord du Bassin aquitain</i> .....	42
3.2. CALAGE DU MONA VERSION 3.5 .....	59
3.2.1. <i>Méthode déterministe basée sur les dérivées partielles (GLMA)</i> .....	60
3.2.2. <i>Premiers tests</i> .....	61
3.2.3. <i>Choix des pas temps</i> .....	66
3.2.4. <i>Collecte d'informations a priori</i> .....	67
3.2.5. <i>Définition de la « fonction objectif » et choix de la pondération</i> .....	73
3.2.6. <i>Choix de paramétrisation</i> .....	74
<b>4. CONCLUSION</b> .....	<b>77</b>
<b>5. BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>79</b>

## Liste des figures

Figure 1 - Répartition et volumes, prélevés au cours de la période 2000-2014, des ouvrages destinés à l'usage AEP et industriel (à gauche) et agricole (à droite).....	13
Figure 2 - Graphique des volumes globaux dont les prélèvements plio-quaternaires ont été estimés, pour les années antérieures à 2000.....	14
Figure 3 - Localisation des 468 points de la base de données des volumes infra-annuels et leurs fréquences respectives .....	15
Figure 4 - Extrait de la base des volumes infra-annuels, pour la période 1972-2020.....	16
Figure 5 - Origine des ouvrages disposant de données infra-annuelles, comparée la base MONA .....	17
Figure 6 - Comparaison des volumes mensuels, prélevés (2013 et 2014) dans trois villes côtières girondines, avec le volume annuel habituellement collecté et réparti mensuellement.....	18
Figure 7 - Comparaison des volumes mensuels, prélevés (2013 et 2014) dans la commune de Labenne (littoral sud-Landes), avec le volume annuel habituellement collecté et réparti mensuellement .....	19
Figure 8 - Représentation des volumes mensuels prélevés (2010 à 2013) dans Bordeaux Métropole ....	19
Figure 9 - Localisation des 3 755 ouvrages de la base de données annuelles du MONA V3 .....	22
Figure 10 - Évolution des prélèvements dans les couches du MOdèle Nord-Aquitain, de 1972 à 2019, tous départements confondus.....	23
Figure 11 - Précipitations efficaces annuelles (Peff) pour la station de Mérignac en Gironde, pendant la période 1972 - 2019, pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm .....	24
Figure 12 - Localisation des zones d'affleurement du modèle dans sa version 3.3b, pour chaque nappe, et source des données de pluies, utilisées pour le calcul de la recharge.....	26
Figure 13 - Localisation des 430 points de mesures piézométriques .....	28
Figure 14 - Localisation des 38 points d'observation de la campagne piézométrique complémentaire de 2021 .....	30
Figure 15 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés, dans le forage de Bouliac (Eocène moyen).....	32
Figure 16 - Niveaux piézométriques simulés par le MOdèle Nord-Aquitain (V3.3b-2019), dans l'aquifère de l'Éocène moyen, pour l'année 2019.....	33
Figure 17 - Total des prélèvements dans les eaux de surface et retenues d'eau, dans le secteur d'étude (SIE-AEAG).....	37
Figure 18 - Réseau hydrographique modélisé et localisation des prélèvements de surface.....	38
Figure 19 - Total des prélèvements de surface modélisé dans le MONA V3.5 .....	39
Figure 20 - Inventaire de l'ensemble des données piézométriques disponibles.....	41
Figure 21 - Nettoyage des chroniques piézométriques : exemple de l'ouvrage 09758X0014.....	41
Figure 22 - Comparaison de la densité des points d'observation en cohérence avec la taille du maillage.....	42
Figure 23 - Ensemble des points d'eau sélectionnés pour l'analyse des tendances piézométriques et les disponibilités des nombres de mesures par an .....	44
Figure 24 - Exemple de résultat d'une tendance significative, fournie par le logiciel ESTHER.....	47
Figure 25 - Distribution de pentes calculées sur les analyses de faible, moyen et haute fiabilité .....	48
Figure 26 - Résultats d'analyses des tendances de haute fiabilité .....	49
Figure 27 - Distribution spatiale des trois types de pentes (faible, moyen et forte pente) .....	50

Figure 28 - Répartition spatiale des principales années de rupture, déterminée avec le calcul des tendances de faible fiabilité.....	51
Figure 29 - Nombre de ruptures, constaté par an, sur l'analyse de rupture de pente de la période avant l'année 2001 (a) et après l'année 1989 (b).....	52
Figure 30 - Dispersion des résultats des pentes : (a) négatives, observées pour les 5 périodes définies et (b) positives pour la période de 1989 à 2001 .....	53
Figure 31 - Points d'eau représentatifs en comparaison avec la totalité d'eau prélevée de 1972 à 2001	54
Figure 32 - Chroniques piézométriques annuelles représentatives (groupe 1 : chroniques avec une tendance à la hausse au cours de la période 1989-2001) .....	55
Figure 33 - Chroniques piézométriques annuelles représentatives (groupe 2 : chroniques avec une tendance à la baisse au cours de la période 1989-2001).....	56
Figure 34 - Contours de la « fonction objectif » dans l'espace des paramètres ( $P_1$ et $P_2$ ) (Doherty, 2015) .....	61
Figure 35 - Illustration de problèmes structurels lié à la géométrie .....	62
Figure 36 - Interface de couplage Python / PyMARTHE construisant le fichier de contrôle du logiciel PEST avec les observations et les différentes options de calage, gérant l'écriture des paramètres et la lecture des sorties du modèle MARTHE .....	63
Figure 37 - Fonctionnement de l'interface de couplage entre les logiciels MARTHE et PEST .....	63
Figure 38 - Vue en plan et en coupe de la version « 4 couches » du MONA V3.5.....	64
Figure 39 - Illustration des améliorations obtenues dans les résultats préliminaires du calage de la version « 4 couches » du MONA V3.5 .....	65
Figure 40 - Illustration des calages insatisfaisants dans les résultats préliminaires du calage de la version « 4 couches » du MONA V3.5 .....	66
Figure 41 - Localisation des 618 points d'observations comportant des données sur les caractéristiques des couches aquifères MONA .....	68
Figure 42 - Distribution des paramètres hydrodynamiques mesurés pour l'aquifère de l'Oligocène.....	70
Figure 43 - Distribution des paramètres hydrodynamiques mesurés pour l'aquifère de l'Éocène.....	71

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Prélèvements ( $m^3/an$ ) dans les aquifères modélisés du MONA V3.3b, de 2015 à 2019 .....	21
Tableau 2 - Précipitations efficaces (mm) en 2016, 2017, 2018 et 2019, calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA .....	24
Tableau 3 - Nombre de chroniques piézométriques utilisées pour le calage de la version 3.3.....	27
Tableau 4 - Liste des forages à retirer de la campagne piézométrique de 2021.....	29
Tableau 5 - Liste des forages à retirer des prochaines campagnes piézométriques.....	31
Tableau 6 - Variables d'évaluation pour cinq sous-périodes .....	51
Tableau 7 - Résultats d'analyses des tendances de niveaux piézométriques du groupe 1 .....	55
Tableau 8 - Résultats d'analyses des tendances de niveaux piézométriques du groupe 2 .....	56
Tableau 9 - Récapitulatif des tests réalisés pour choisir le pas temps hydrodynamique adéquat .....	67
Tableau 10 - Nombre de données récoltées par unité MONA, pour chacun des trois paramètres hydrodynamiques.....	68

Tableau 11 - Récapitulatif des valeurs préférées pour les 15 couches aquifères des perméabilités horizontales, coefficient d’emmagasinement spécifiques et coefficients d’emmagasinement libres du MONA.....	72
Tableau 12 - Récapitulatif des bornes minimales et maximales des perméabilités horizontales, coefficient d’emmagasinement spécifiques et coefficients d’emmagasinement libre, pour les 15 couches aquifères du MONA.....	72
Tableau 13 - Récapitulatif des valeurs préférées des perméabilités verticales, des 14 épontes du MONA et leurs bornes maximales et minimales.....	73
Tableau 14 - Définition des valeurs a priori de la conductivité hydraulique des rivières et des paramètres de Gardénia, pour le calcul de la recharge.....	73
Tableau 15 - Paramétrisation choisie pour chaque paramètre du modèle.....	75

## Liste des annexes

Annexe 1 Historique du MOdèle Nord-Aquitain .....	85
Annexe 2 Actualisation des chroniques de calage période 1972 - 2019 (Mona V3.3b) .....	91
Annexe 3 Liste des points d’eau utilisés pour les analyses statistiques .....	109
Annexe 4 Disponibilités des mesures des chroniques piézométriques par an.....	117
Annexe 5 Résultats des analyses des tendances de haute, moyenne et faible fiabilité.....	121
Annexe 6 Résultat des analyses des tendances par périodes .....	133

# 1. Introduction

Les travaux présentés dans ce rapport ont été effectués dans le cadre des modules 1 et 2 de l'axe 1, de l'année 3 de la Convention Régionale sur les Eaux Souterraines en région Aquitaine (convention comprenant 9 modules, répartis en 3 axes), signée entre l'État, la Région Nouvelle-Aquitaine et le BRGM, pour la période 2015-2020, avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

Cette étude fait suite aux travaux de modélisation des aquifères de la région Nouvelle-Aquitaine, engagés par le BRGM Aquitaine, depuis près de 30 ans, pour disposer d'outils d'aide à la gestion et à la décision, et appuyer ainsi au mieux la définition des stratégies d'exploitation des ressources souterraines de la région. Certaines nappes sont en effet très sollicitées et mises en situation de déséquilibre.

Le MOdèle Nord-Aquitain (MONA), initialement construit pour apporter des réponses à la problématique de l'effondrement des niveaux de la nappe de l'Eocène en Gironde, est le fruit d'un long développement, qui a commencé il y a près de 25 ans (Amraoui et al. 1999, 1998 ; Braneyre, Lambert et Sourisseau, 1994 ; Braneyre, Seguin et Lambert, 1993 ; Braneyre et al., 1993 ; Buscarlet, Cabaret et Saltel, 2019 ; Gomez, Saltel et Pédrón, 2010 ; Pédrón et al., 2008 ; Pédrón, Platel et Bourguine, 2006 ; Pédrón, Platel et Lopez, 2005 ; Pédrón, Seguin et Capdeville, 2003 ; Saltel, Compère et Cabaret, 2017 ; Saltel, Wuilleumier et Cabaret, 2016 ; Saltel et al., 2014 ; Saltel, Faucher et B., 2012 ; Saltel et al., 2011 ; Seguin, 2002, 1999a, 1999b). Les différentes évolutions qui ont été apportées au modèle, notamment dans le cadre des différentes Conventions « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine », ont abouti à l'élaboration de plusieurs versions, décrites en annexe 1. Initialement composée de 4 couches aquifères (Oligocène, Eocène et Campanien-Maastrichtien, la couche du Plio-Quaternaire étant quant à elle à potentiel imposé) et à mailles carrées de 5 km de côté, la version opérationnelle du modèle (MONA V3.3b-2015) intègre aujourd'hui 15 couches (du Plio-Quaternaire au Jurassique moyen), à mailles carrées de 2 000 m de côté et couvre le sud de la Charente, la moitié sud-ouest de la Dordogne, le nord-ouest du Lot-et-Garonne, le nord des Landes et la totalité du département de la Gironde.

Le modèle a notamment été utilisé dans le cadre du Schéma Directeur de Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde, puis du SAGE "Nappes profondes de Gironde", pour chiffrer les économies d'eau à réaliser et proposer des réductions de prélèvements ou des ressources de substitution. Plus ponctuellement, il a permis de simuler l'impact sur la ressource de nouveaux champs captants dans le secteur de Sainte-Hélène en Gironde (Cabaret et Saltel, 2012 ; Pédrón, Abou-Akar et Gomez, 2009 ; Saltel, 2012) et a aussi servi à réaliser des simulations prospectives permettant d'évaluer les effets de différentes conditions de recharge et d'exploitation de la ressource pour les nappes du Secondaire de Dordogne et du Lot-et-Garonne (Platel et al., 2010). A une échelle plus large, le modèle a été utilisé pour apporter des éléments techniques permettant d'appuyer la définition de volumes prélevables dans toutes les nappes captives du nord du Bassin aquitain (Gomez, Pédrón et Buscarlet, 2010) et pour réaliser des simulations prospectives dans le cadre de la révision du SAGE "Nappes profondes de Gironde" (Cabaret et Saltel, 2012 ; Saltel et Pédrón, 2012). Le modèle a également été utilisé dans le cadre du projet national "Explore 2070" visant à étudier les impacts du changement climatique sur les eaux souterraines (Saltel et Cabaret, 2012).

Le présent rapport traite de la maintenance et du développement du MOdèle Nord-Aquitain, pour obtenir une plus grande finesse de représentation des aquifères et mieux traiter les problèmes posés à une échelle plus locale.

La première partie du travail réalisé concerne l'actualisation de la version actuelle du MONA (version 3.3b) : mise à jour des données d'entrée (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques piézométriques de 2016 à 2019, afin de bénéficier d'un outil le plus à jour possible.

La deuxième partie est consacrée au développement de la version 3.5, qui intègre la géométrie de la version 4 dans un maillage de 2 km de côté, la prise en compte des données SAFRAN, pour le calcul de la recharge via le module GARDENIA de MARTHE, ainsi que le réseau hydrographique le plus détaillé possible pour contrôler les débordements. Cette version a été conçue pour que les temps de calcul permettent d'utiliser l'interface de couplage Python PyMARTHE qui permet de coupler les logiciels PEST (Parameter ESTimation) et Marthe, afin d'effectuer un calage algorithmique (Aissat, 2021). Un certain nombre de modifications a été apporté à PyMARTHE pour intégrer de nouvelles variables à optimiser. Ceci a été réalisé en effectuant différents tests sur des versions à 1, puis 4, puis 16 couches, de la version 3.5 du MONA. Par ailleurs, pour cadrer au mieux la recharge et les coefficients d'emmagasinement, tout en conservant des temps de calcul raisonnables, une stratégie de calage a été élaborée, correspondant à un mixte entre pas de temps annuel, au cours de la période 1972-2009, et mensuel, pour le reste de la période. Cela permettra d'intégrer, dans les simulations, l'ensemble des comportements identifiés dans l'analyse des chroniques de la nappe de l'Éocène moyen.

## 2. Actualisation des données spatio-temporelles du MONA

L'actualisation de la version 3.3 du MONA se fait au travers de la mise à jour de données spatio-temporelles : les prélèvements (chapitre 2.1), la pluie efficace et la recharge (chapitre 2.2) et les chroniques piézométriques (chapitre 2.3). Une simulation est ensuite conduite avec le modèle actualisé, afin de s'assurer de son bon calage.

Les phases d'actualisation des données, réalisées successivement en 1999, 2001, 2005, 2010, 2011, 2012, 2014 et 2019, ont servi de périodes de validation du modèle et ont permis de contrôler sa fiabilité. La version actuelle du MOdèle Nord-Aquitain (MONA V3.3b-2015) simule les écoulements au sein de quinze entités hydrogéologiques, pour la période 1972-2015. Le recueil des données d'entrée (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques piézométriques, des années 2016 à 2019, permet de bénéficier d'un outil le plus à jour possible. Le modèle mis à jour correspond à la version MONA V3.3b-2019.

### 2.1. PRELEVEMENTS

Afin de restituer au mieux les variations piézométriques de chacune des nappes modélisées pour l'ensemble de la période considérée (1972-2019), il est nécessaire d'acquérir une connaissance la plus exhaustive possible des prélèvements dans les nappes. Un important travail de collecte des données de prélèvements est donc indispensable. Ce travail a été d'abord entrepris au travers de l'établissement d'une base interne, unique, référençant, pour chaque ouvrage, l'aquifère capté et les volumes annuels connus (chapitre 2.1.1). Cette base est, depuis quelques années, constamment alimentée pour être en cohérence avec les connaissances obtenues des services de l'Etat, lesquels collectent des données de prélèvements servant à la mise à jour de la base. Cette dernière ne pouvant être exhaustive pour l'ensemble de la période considérée (1972-2019), ni pour l'ensemble des usages, en raison de la quantité importante d'informations et des multiples difficultés liées à la mise en cohérence des différentes bases nationales, régionales et départementales existantes, des travaux réguliers sont mis en œuvre pour améliorer l'exhaustivité des prélèvements réalisés concernant les ouvrages du Sud-Ouest de la France (chapitres 2.1.1 et 2.1.2). Enfin, la demande d'avoir des modèles à des pas de temps infra-annuels nécessite de collecter des données de prélèvements à des pas de temps plus fins que ceux, annuels, qui sont collectés jusqu'ici. Aussi, un inventaire a été réalisé pour évaluer les données de prélèvements infra-annuels connus de nos services, au travers des différents projets ayant permis de collecter cette information et d'évaluer l'intérêt de cette donnée pour les modélisations futures (chapitre 2.1.3).

#### 2.1.1. La base BRGM des données de prélèvements annuels

La compilation des données de prélèvements, notamment pour les besoins de modélisation, s'effectue, depuis quelques années au BRGM Nouvelle-Aquitaine, au travers d'une base interne destinée à bancariser l'ensemble des volumes prélevés dans les différents ouvrages de la BSS. Cette base, détaillée dans le rapport de l'année 1 du projet GAIA (Wuilleumier et al., 2015), permet de garantir une certaine représentativité des prélèvements effectués dans le Bassin aquitain, au travers d'une qualification de l'information (pour chaque volume sont renseignés son type (réel, estimé, reporté, ...) et son origine et l'historisation des modifications apportées à ces volumes.

Cette base est plus largement utilisée dans le cadre de projets en appui aux politiques publiques, qui permettent de compiler ces données (par secteurs géographiques, entités hydrogéologiques ou encore périodes de temps, généralement plus restreints que ceux du MONA) et d'en faire une mise à jour régulière (AEAG, 2020 ; André et al., 2019 ; Bourbon et Assy, 2022 ; Cabaret, Arnaud et Crastes de Paulet, 2019 ; Cabaret et al., 2016 ; Wuilleumier et Abou Akar, 2020). En réponse aux derniers développements du MOdèle Nord-Aquitain et futur MONA V4 (nouvelle extension, nouvelles parties d'aquifères), il a été nécessaire de prendre en compte toutes ces nouvelles données disponibles dans la base interne et de profiter des informations présentes dans les bases de redevances de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, pour faire le point sur les volumes prélevés dans le Bassin aquitain et identifier les travaux futurs pour en garantir l'exhaustivité.

### 2.1.2. Collecte des données de prélèvements annuels

Un travail particulier a été mené sur les points suivants.

#### a) *Les compteurs pour la production d'eau potable*

Les prélèvements de l'Agence de l'Eau sont référencés en trois groupes de compteurs (agricoles, industriels et eau potable), dont les origines (eau de surface, nappe phréatique et nappe captive) sont identifiées. Il a été décidé, au cours de cette année, de garantir la présence des points de prélèvements d'eau potable, issus des nappes, dans les modèles. Un travail spécifique a été ainsi entrepris afin d'attribuer, pour l'ensemble des départements couverts par le futur MONA V4, les compteurs AEP à des ouvrages BSS, dans la continuité des travaux précédents (Buscarlet, Cabaret et Saltel, 2019 ; Saltel, Compère et Cabaret, 2017 ; Saltel, Wuilleumier et Cabaret, 2016). Les correspondances de codes (compteur AEP / BSS) disponibles dans les bases de l'Agence de l'Eau ont été récupérées. Néanmoins, 61 codes de compteur AEP n'ont pu être attribués à un ouvrage BSS, du fait du manque d'informations disponibles dans chacune des bases (il s'agit principalement d'ouvrages dont les prélèvements restent faibles : ces compteurs représentent moins de 1 000 000 m<sup>3</sup> en 2017).

L'autre difficulté de la compilation des compteurs AEP réside dans la continuité des données avant le déploiement plus systématique des compteurs en 2003. Ainsi, les prélèvements opérés avant 2003 sont difficiles à identifier. Des données de prélèvement sont répertoriées, mais le manque d'informations concernant l'origine et la nature de ces valeurs n'ont pas permis de les valider par croisement. Afin de limiter ces incertitudes, des fichiers de l'Agence de l'Eau, remontant à 1995, ont été récupérés pour valider les volumes AEP pour la période 1996-2002 et assurer un traçage de la donnée. Au regard de la quantité importante d'informations disponibles, la priorité de ce travail de mise en cohérence, entre les indices BSS et les codes des compteurs de l'Agence de l'Eau, pour cette période, a été portée sur les ouvrages AEP des départements de Gironde, de Dordogne, des Landes et du Lot.

#### b) *Les volumes plio-quatennaires*

Dans le cadre du développement du modèle plio-quatennaire (Cabaret et al., 2017), une base des prélèvements annuels avait été établie pour le Plio-Quatennaire. Celle-ci permettait de référencer les volumes prélevés au cours de la période 2000-2014, pour l'ensemble des usages. Ces données ont été récupérées pour pouvoir être intégrées au MONA, qui jusqu'ici ne prenait pas en compte les prélèvements dans le Plio-Quatennaire.

Les prélèvements effectués pour les usages AEP et industriels ont pu être reconstitués. 274 ouvrages réels et 50 ouvrages « fictifs » (ouvrages disposant de volumes issus des redevances n'ayant pu être raccordés à des ouvrages précis, mais intégrés au modèle à partir

des géolocalisations et aquifères captés référencés dans les données de l'Agence de l'Eau) sont intégrés au modèle (Figure 1).

Les volumes agricoles, importants dans le Plio-Quaternaire, ont été intégrés sous deux formes. En Gironde, les travaux historiques, menés notamment avec la Chambre d'Agriculture, permettent de disposer de volumes associés à des ouvrages réels. Dans les Landes, par contre, le travail reste en grande partie à effectuer. Dans ce département, plus de 9 000 ouvrages agricoles sont recensés dans la BSS et captent potentiellement les aquifères plio-quaternaires. Les volumes disponibles dans les bases de l'Agence de l'Eau sont pour le moment recensés au centroïde de la commune et ne sont pas affectés à des ouvrages spécifiques.

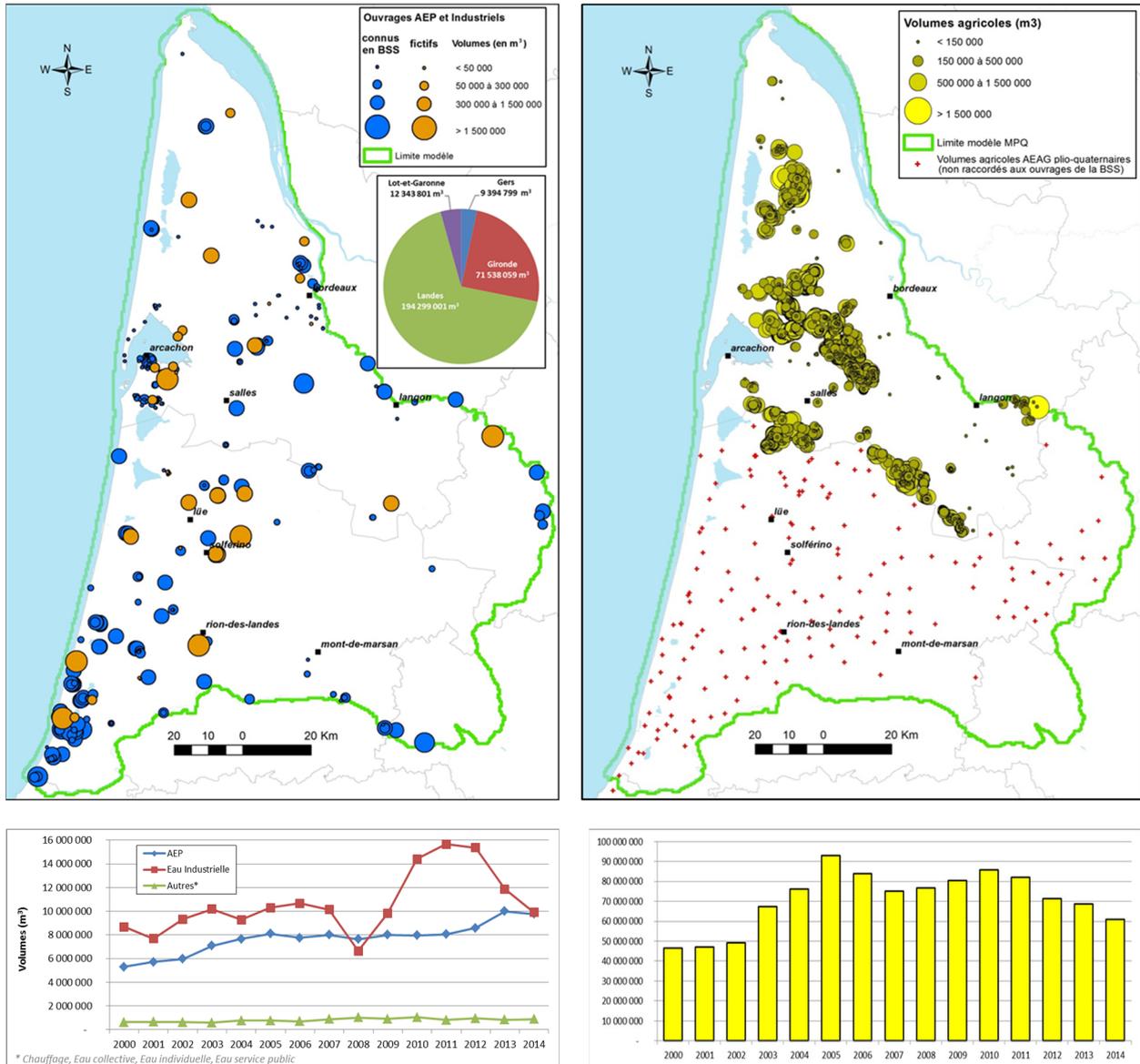


Figure 1 - Répartition et volumes, prélevés au cours de la période 2000-2014, des ouvrages destinés à l'usage AEP et industriel (à gauche) et agricole (à droite)

Afin d'assurer une homogénéité d'ensemble, une estimation des volumes, antérieurs à 2000, a dû être effectuée. Il a été décidé de reporter la moyenne des prélèvements, effectués entre 2000 et 2002, à l'ensemble des années où le forage était connu comme exploité. Ces estimations ont nécessité d'augmenter « artificiellement » de près de 10 % les volumes globaux prélevés entre 1972 et 1999 (Figure 2).

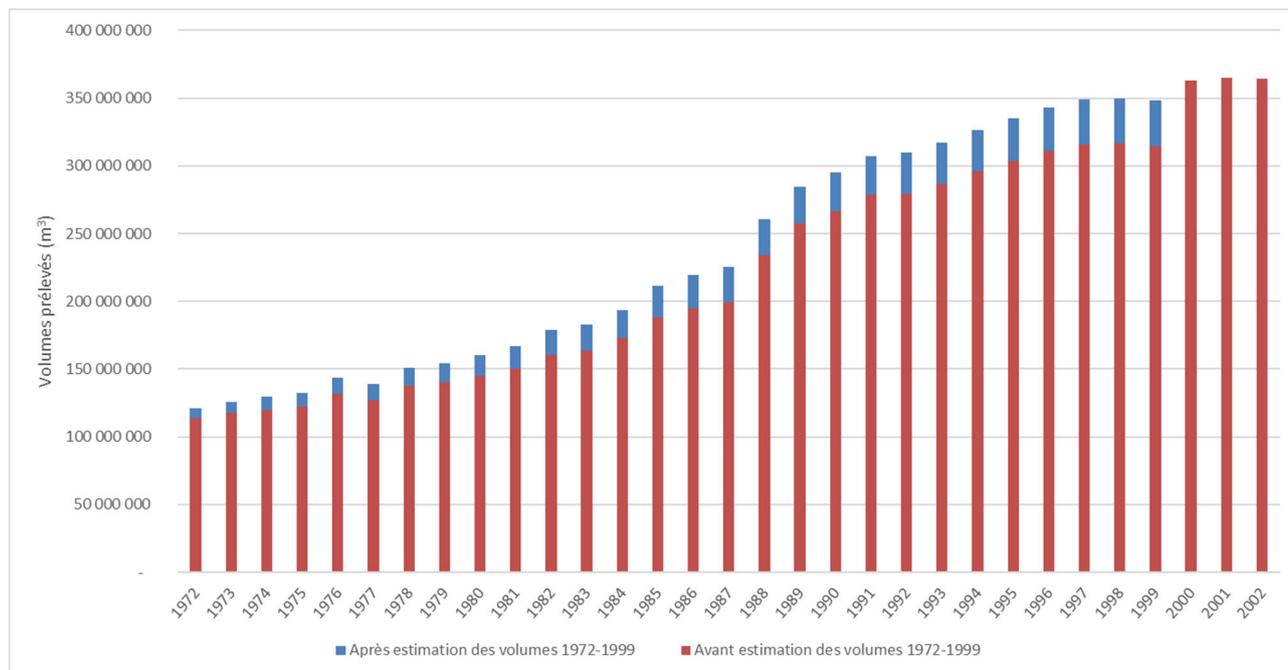


Figure 2 - Graphique des volumes globaux dont les prélèvements plio-quaternaires ont été estimés, pour les années antérieures à 2000

### c) La mise à jour des volumes, de 2016 à 2019

La dernière étape a été de réaliser la mise à jour des volumes prélevés entre 2016 et 2019, la dernière actualisation du MONA ayant été faite pour la période 1972-2015. Cette mise à jour repose en premier lieu sur les données de redevances de l'Agence de l'Eau. En Gironde, la Chambre d'Agriculture fournit des estimations pour les prélèvements agricoles, basées d'une part sur les sollicitations auprès des agriculteurs et d'autre part sur les conditions de l'année considérée.

Au terme de ce travail, la base interne recense, à ce jour, 7 954 ouvrages disposant d'au moins un volume supérieur à 0, prélevé pendant la période 1972-2019. Parmi ces ouvrages, tous ne sont pas intégrés dans le MONA V3.3, en raison de leur localisation géographique (en dehors de l'extension du modèle ou, principalement, de l'aquifère auquel ils appartiennent (plus de 4 000 ouvrages prélèvent dans le Plio-Quaternaire et les alluvions, non représentés dans le MONA V3.3).

## 2.1.3. Données infra-annuelles

### a) Collecte des volumes infra-annuels

Dans la perspective de réaliser des simulations à des pas de temps infra-annuels (mensuels ou trimestriels), il est nécessaire de ventiler les prélèvements sur l'année. Cette ventilation s'appuie soit sur des données réelles fines (pas de temps journalier à trimestriel), soit sur l'hypothèse d'un

volume prélevé constant (dans le cadre d'un ouvrage AEP ou industriel) ou concentré pendant la période d'irrigation moyenne (juin à septembre), qu'on répartit à partir d'un volume annuel connu.

Il a donc été nécessaire, dans un premier temps, de faire l'inventaire des données de prélèvements infra-annuels actuellement connus au BRGM. Ces données ont été collectées initialement pour d'autres projets (André et al., 2019 ; Cabaret, 2015, 2011 ; Cabaret et al., 2022). Ces volumes proviennent principalement des entreprises privées, gestionnaires des réseaux AEP, qui disposent de données en quantités importantes, sur une grande partie du territoire. Selon les cas, ces données proviennent également directement des exploitants agricoles, exploitants industriels, Régie des eaux, Syndicats...etc...

Le département de la Gironde regroupe la majorité des volumes collectés, mais des volumes infra-annuels ont été transmis pour les départements de la Dordogne et des Landes (Figure 3).

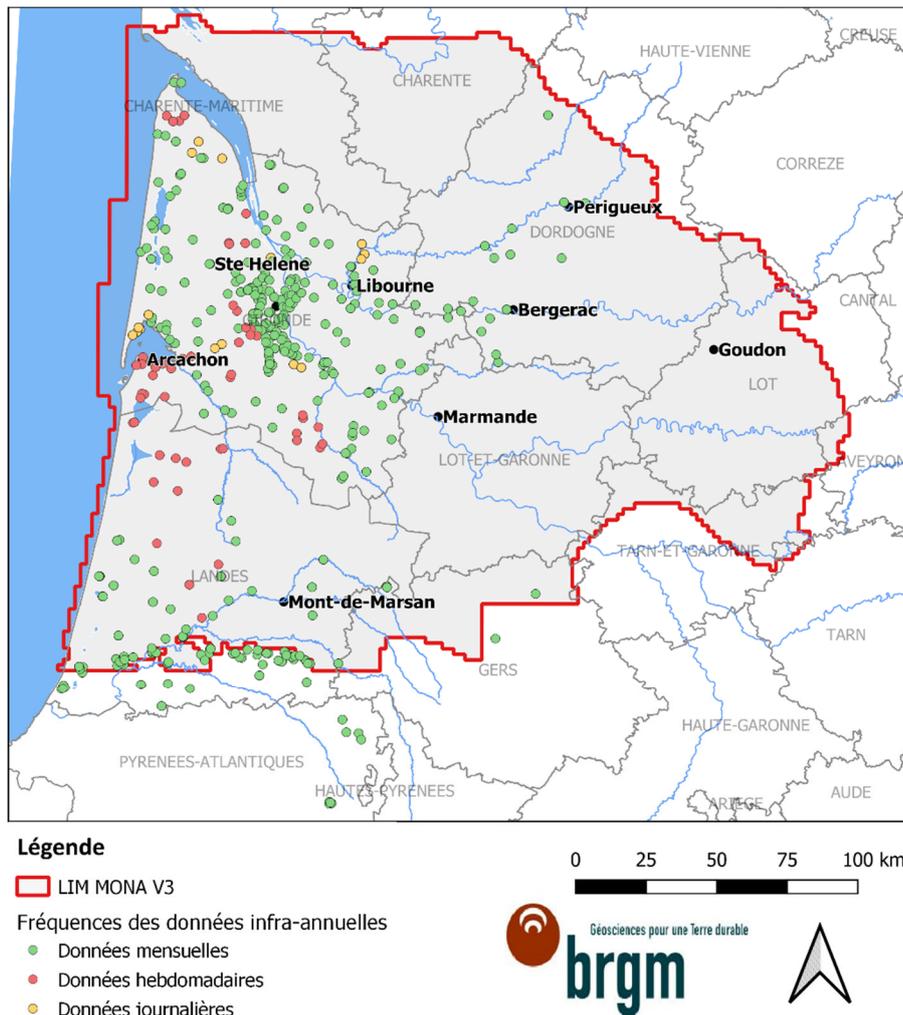


Figure 3 - Localisation des 468 points de la base de données des volumes infra-annuels et leurs fréquences respectives

La base des volumes infra-annuels regroupe 468 ouvrages ; les données allant de 1991 à 2020 (Figure 4). Elle permet d'identifier les fréquences des volumes collectés, la (ou les) couche(s) géologique(s) captée(s), l'exploitant de l'ouvrage et le contact permettant la sollicitation des volumes.



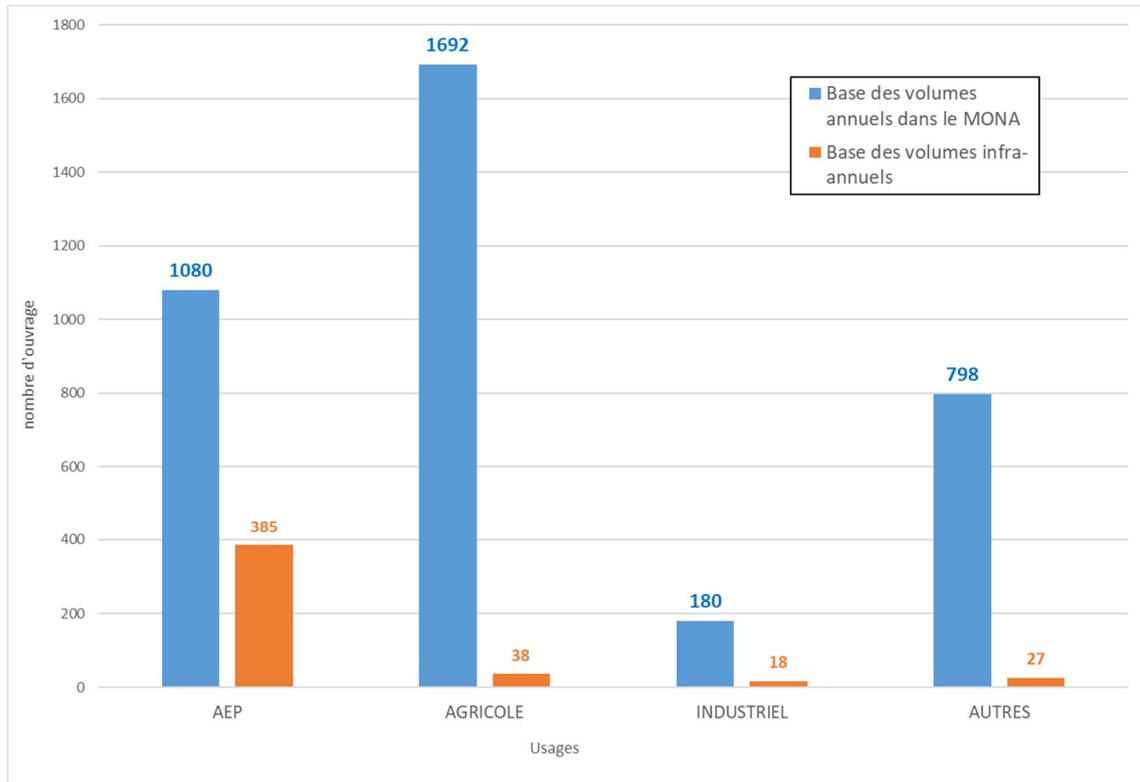


Figure 5 - Origine des ouvrages disposant de données infra-annuelles, comparée la base MONA

L'impact du caractère touristique d'une ville sur l'alimentation en eau potable se traduit par des pics de consommation durant l'été. Tenant compte des spécificités de consommation, liées au caractère touristique de plusieurs villes de la région d'étude, une comparaison pour les années 2013 et 2014, entre les volumes prélevés utilisés dans le modèle (lissés sur un an) et les prélèvements mensuels transmis par les exploitants, a été réalisée pour les villes côtières de Lacanau, Andernos-les-Bains et Lège-Cap-Ferret (Figure 6). Les volumes réels de prélèvement, transmis par l'exploitant, montrent que les volumes sont visiblement plus importants lors de la période estivale, allant de juin jusqu'à fin septembre, correspondant pour ces communes à la saison touristique. Les écarts à la moyenne sont importants au cours de cette période, car ils peuvent atteindre de 15 à 181 %.

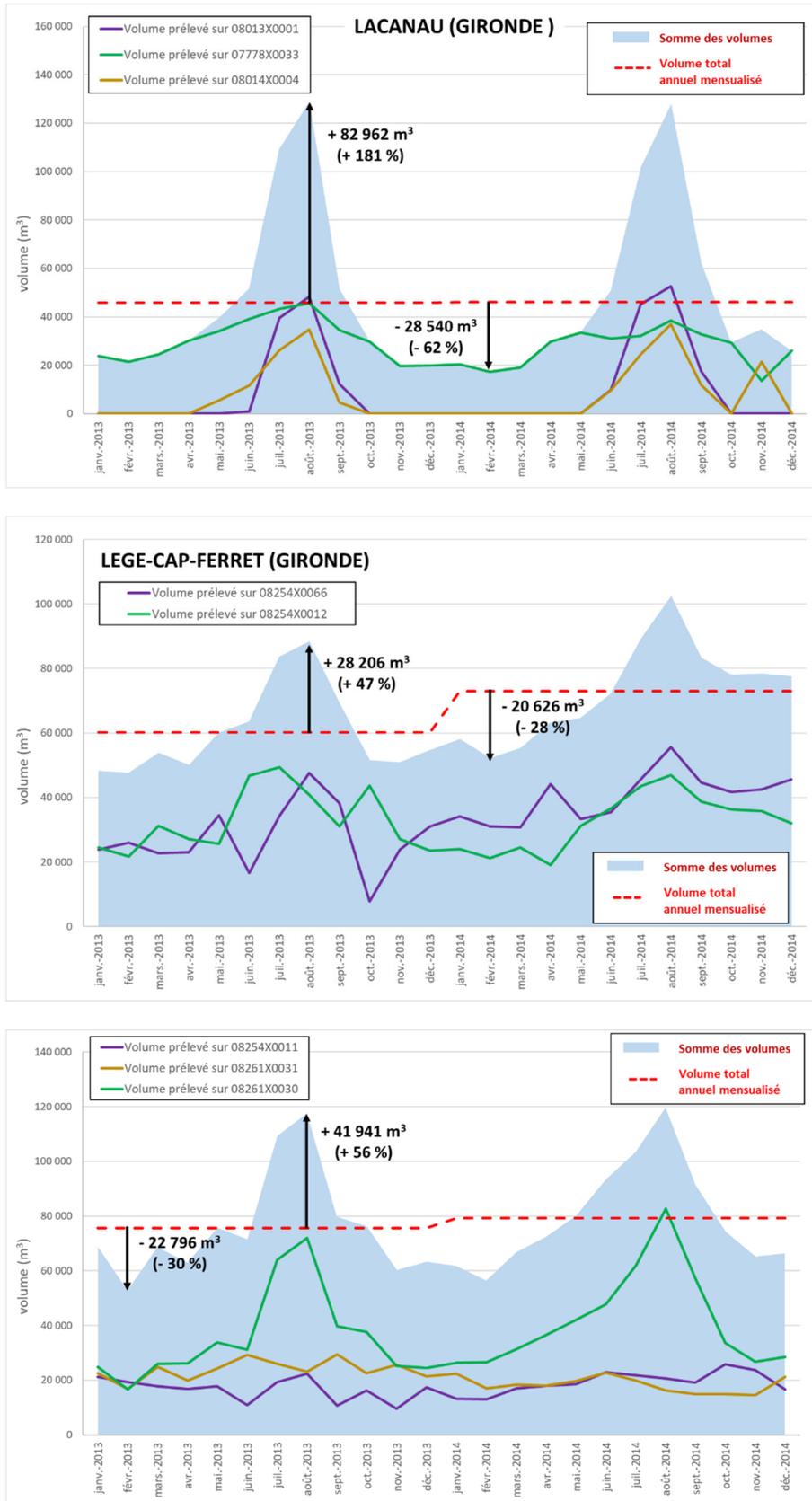


Figure 6 - Comparaison des volumes mensuels, prélevés (2013 et 2014) dans trois villes côtières girondines, avec le volume annuel habituellement collecté et réparti mensuellement

Les modalités de prélèvement sont légèrement différentes pour les forages situés dans la commune de Labenne, au sud du littoral landais, où on remarque la présence de plusieurs pics par an, les pics de prélèvement liés aux périodes de flux touristiques sont moins importants. Il s'agit d'un champ captant où il y a aussi d'autres forages. La présence de salinité amène à piloter l'exploitation ce qui peut expliquer les pics à des périodes où on ne les attendrait pas. Ces pics de consommation sont les mêmes pour les deux années d'observation. Les écarts à la moyenne peuvent atteindre 80 % (Figure 7).

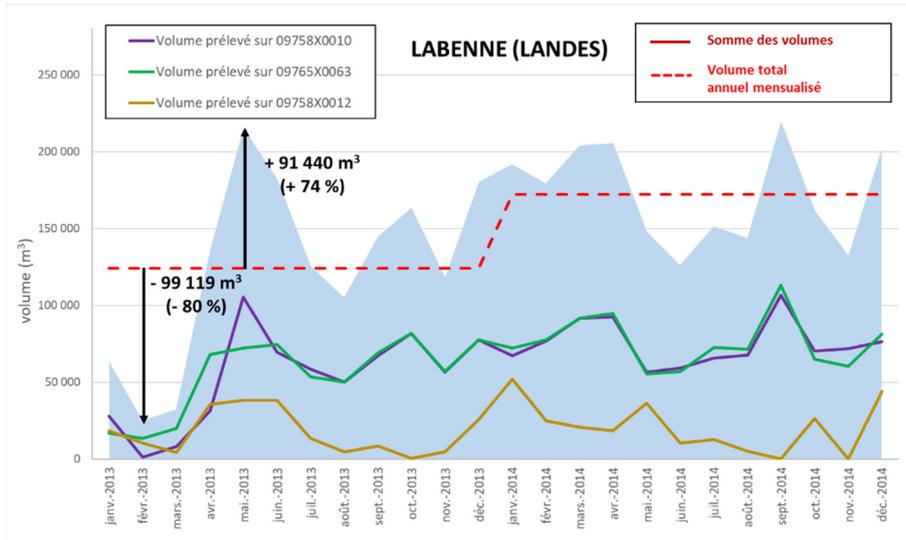


Figure 7 - Comparaison des volumes mensuels, prélevés (2013 et 2014) dans la commune de Labenne (littoral sud-Landes), avec le volume annuel habituellement collecté et réparti mensuellement

Pour Bordeaux Métropole, en dehors de ces zones touristiques, un travail similaire peut être fait en représentant la somme des volumes prélevés dans 98 ouvrages d'alimentation d'eau, pour la période de 2010 à 2013 (Figure 8). Même si des pics de prélèvement sont atteints en période estivale, en lien probable avec des températures plus élevées, les variations au cours du temps sont moins marquées (les écarts à la moyenne sont visiblement moins importants, mais compris entre -16 % et +15 %).

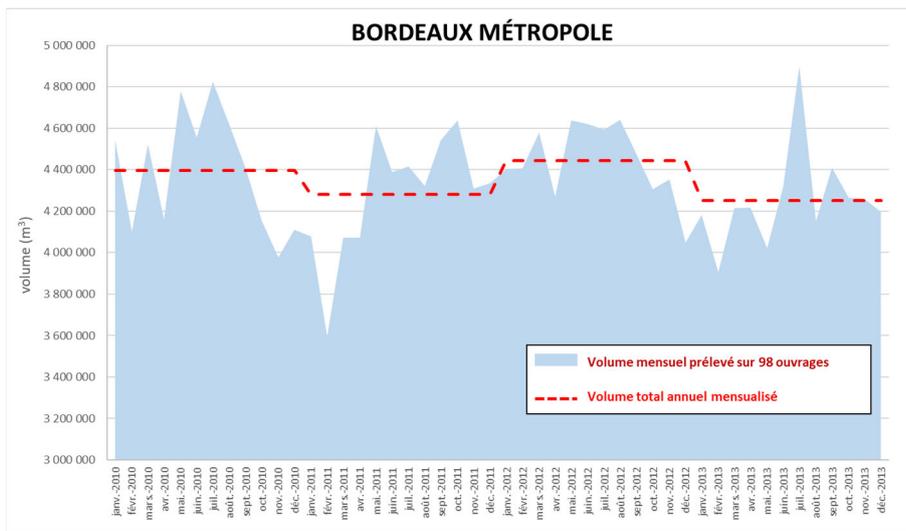


Figure 8 - Représentation des volumes mensuels prélevés (2010 à 2013) dans Bordeaux Métropole

### c) Perspectives

Il ressort de ce travail, tout d'abord, l'intérêt de bénéficier de volumes prélevés fins, pour pouvoir rendre compte à terme de fonctionnements hydrogéologiques sur plusieurs cycles hydrologiques. Pour la modélisation, cela implique d'avoir des données à minima mensuelles. Cette donnée implique des efforts importants de collecte qui seront différents selon les usages :

- Les prélèvements mensuels à journaliers, voire infra-journaliers, sont disponibles auprès des acteurs de l'eau potable et, dans une moindre mesure, des acteurs industriels. L'avantage est de pouvoir obtenir ces données pour beaucoup d'ouvrages, en ne sollicitant que peu d'interlocuteurs, notamment quand on s'adresse à des groupes privés (Suez, Véolia, ...). Ces données sont également mises en forme et disponibles au format numérique. De plus, pour l'eau potable, l'hypothèse d'un volume moyen mensuel, obtenu d'un volume annuel, a ses limites, notamment dans les secteurs touristiques : l'enjeu étant alors d'identifier ces secteurs touristiques.
  - ⇒ Au regard du temps à investir, il apparaît dès lors plus pertinent de collecter les volumes AEP réels, plutôt que trouver les hypothèses de prélèvement selon les secteurs touristiques.
- Pour l'usage industriel, on augmente de manière substantielle le nombre d'interlocuteurs à solliciter. De plus, les volumes industriels sont bien moindres que ceux de l'AEP et agricoles.
  - ⇒ La collecte des volumes industriels apparaît moins prioritaire.
- La donnée infra-annuelle n'est que rarement disponible auprès des acteurs agricoles, qui relèvent le compteur une fois par an, au titre de la redevance, mais n'ont pas nécessité de procéder à un suivi fin. Cette donnée n'a été obtenue que dans le cadre des travaux GAIA, pour lesquels 16 contacts ont été pris, nécessitant beaucoup d'investissement pour faire de la pédagogie, mais aussi relancer les irrigants pour collecter l'information. Il s'est avéré plus pertinent de faire passer un technicien sur place pour relever les compteurs.
  - ⇒ L'intérêt de la collecte des volumes infra-annuels agricoles s'avère en réalité moindre, même si ces volumes sont importants et probablement, en raison du caractère plus superficiel de la nappe qu'ils exploitent, plus impactant. Une priorité est d'abord d'assurer une connaissance annuelle des prélèvements (en assurant un rapprochement des bases de données BSS et de l'Agence de l'Eau), puis de travailler avec les Chambres d'Agriculture ou associations d'agriculteurs, pour savoir comment ventiler ces volumes annuels sur la période d'irrigation (en fonction du climat, de la nature du sol, du type de culture...).

#### 2.1.4. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du MOdèle Nord-Aquitain pour la période 2015-2019

Les prélèvements totaux, par an et par nappe, données alimentant le MOdèle Nord-Aquitain, pour les années 2015 à 2019, sont indiqués ci-après (Tableau 1). Lorsqu'un ouvrage capte plusieurs aquifères à la fois, le volume prélevé est soit réparti par aquifère, en fonction des informations fournies par les diagraphies de flux, soit divisé en parts égales entre chaque aquifère, faute de renseignement.

<b>Aquifères</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Langhien-Serravallien	27 436 942	27 248 490	26 526 827	26 330 335	26 636 805
Aquitanien	39 602 212	41 957 912	39 883 424	40 166 913	40 813 279
Oligocène	64 385 253	67 139 436	61 045 908	64 611 744	65 036 060
Eocène supérieur	3 357 668	3 195 709	3 085 814	3 147 665	2 927 828
Eocène moyen	53 279 553	49 239 915	55 523 644	52 101 075	52 001 949
Eocène inférieur	16 593 869	16 503 286	16 709 369	17 225 844	16 647 350
Campanien	14 165 055	14 332 058	13 424 954	13 078 892	13 064 615
Coniacien-Santonien	22 051 429	21 454 241	21 169 937	21 961 141	22 021 743
Turonien	30 155 543	30 511 606	29 334 579	29 298 068	29 043 708
Cénomanién	14 255 008	13 719 790	13 072 586	13 633 626	13 105 561
Tithonien	1 483 820	1 440 039	1 510 438	1 306 271	1 380 056
Kimméridgien	5 612 228	5 504 529	5 242 034	4 709 017	5 339 752
Bathonien-Calovo-Oxfordien	14 952 529	15 020 087	14 725 056	14 898 896	14 824 837
Bajocien	3 970 421	4 600 803	4 726 332	4 671 161	4 841 902
<b>TOTAL</b>	<b>311 301 530</b>	<b>311 867 902</b>	<b>305 980 903</b>	<b>307 140 648</b>	<b>307 685 446</b>

Tableau 1 - Prélèvements (m<sup>3</sup>/an) dans les aquifères modélisés du MONA V3.3b, de 2015 à 2019

En termes de nature des prélèvements, parmi les 3 755 forages disposant d'au moins un prélèvement, pour une année, dans les aquifères représentés dans le MONA V3.3b, on retrouve 1 620 ouvrages à usage agricole, 1 125 ouvrages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP), 189 forages liés à une activité industrielle, 637 points de prélèvements connaissant des usages variés (thermalisme, embouteillage, chauffage, eau individuelle, etc.) et enfin 199 ouvrages n'ayant pas d'usage connu.

La répartition géographique des points de prélèvements est la suivante :

- Gironde : 1 603 ouvrages,
- Charente-Maritime : 882 ouvrages,
- Landes : 552 ouvrages,
- Dordogne : 397 ouvrages,
- Charente : 155 ouvrages,
- Lot-et-Garonne : 92 ouvrages,
- Lot : 62 ouvrages,
- Gers : 12 ouvrages.

Sur les 3 755 points de prélèvement intégrés dans le modèle, 101 se trouvent hors de l'extension du MONA V3, à moins de 2 km de la limite, mais ont tout de même été intégrés dans le modèle, dans la maille la plus proche (Figure 9). Le maillage de la version 3.3b du modèle (2 km x 2 km) ne permet pas de retranscrire au mieux les limites de réservoirs, cette opération a donc été menée pour augmenter la représentativité.

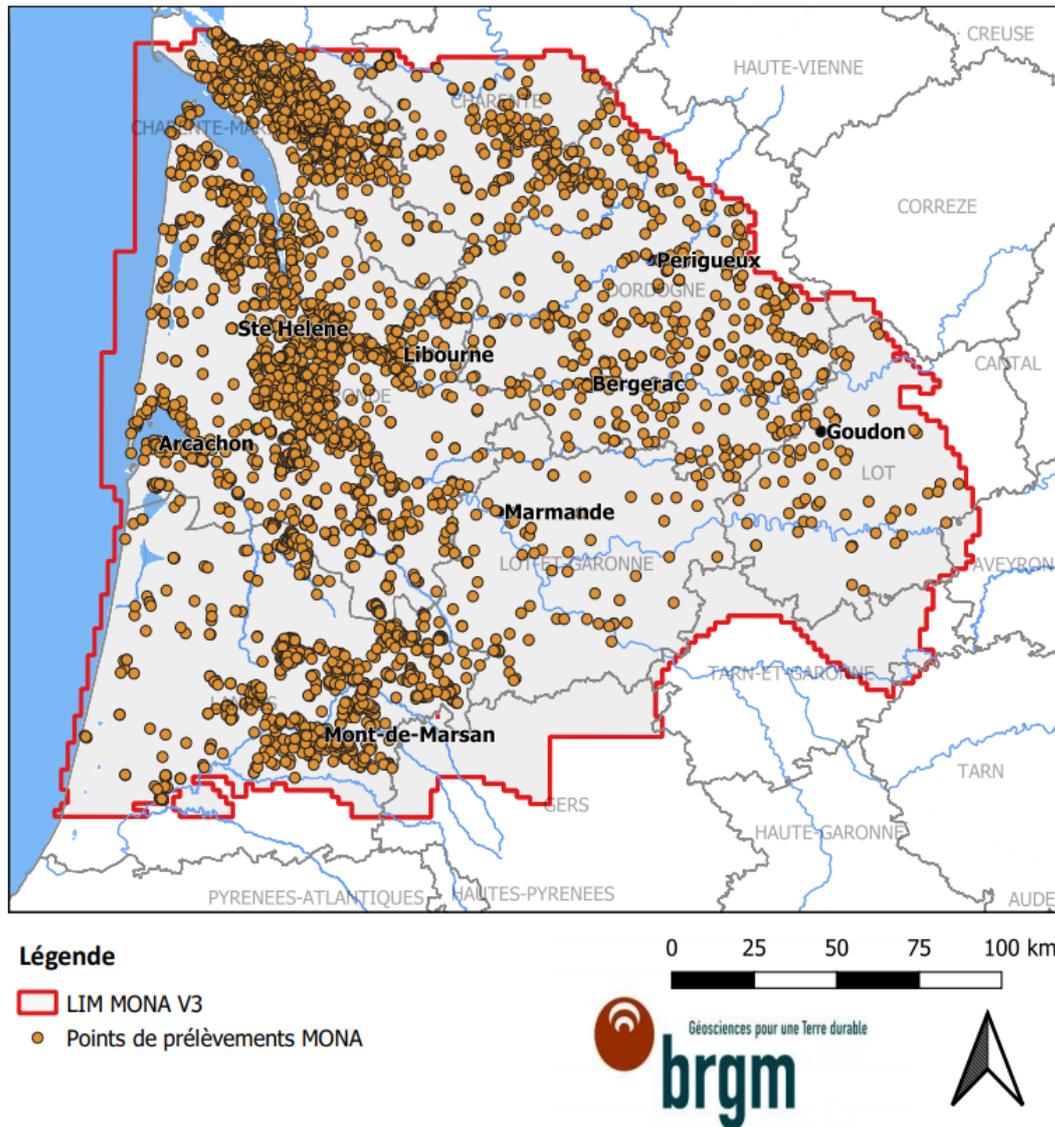


Figure 9 - Localisation des 3 755 ouvrages de la base de données annuelles du MONA V3

Le graphique des prélèvements annuels, réalisé à l'échelle du MONA (Figure 10), montre que les aquifères de l'Oligocène et de l'Eocène moyen sont les plus sollicités. En effet, les volumes prélevés dans ces réservoirs s'élèvent à près de 20 % du volume total, pour chacun d'eux. Il apparaît que l'Oligocène est l'aquifère le plus exploité depuis les années 1990. La tendance est relativement stable depuis les années 2000, hors variations annuelles liées au contexte climatique. Après une baisse des volumes de prélèvement dans l'Oligocène, pour les années 2016 et 2017, on observe une augmentation des prélèvements pour les années 2018 et 2019. Cette hausse peut être due à l'ajout de 83 nouveaux points.

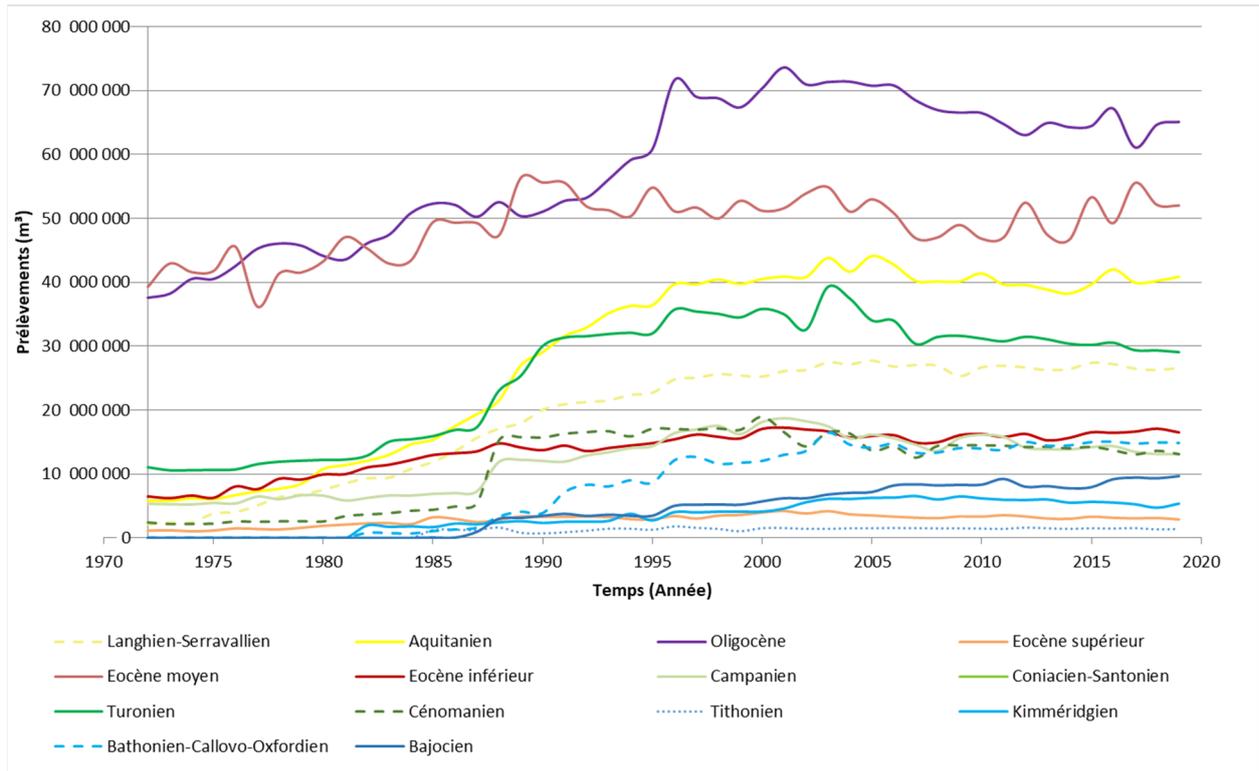


Figure 10 - Évolution des prélèvements dans les couches du MOdèle Nord-Aquitain, de 1972 à 2019, tous départements confondus

## 2.2. CALCUL DES PRECIPITATIONS EFFICACES ET ACTUALISATION DES DONNEES DE RECHARGE DES NAPPES DU MODELE NORD-AQUITAIN

### 2.2.1. Précipitations efficaces

Les données de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pour les stations de Mérignac en Gironde, de Cognac (Château-Bernard) en Charente, de Bergerac en Dordogne, de Gourdon dans le Lot et de Mont-de-Marsan dans les Landes, ont été acquises depuis les sites internet de Météo-France (*Climathèque* et *Publithèque*). Les données de ces stations sont utilisées dans le modèle pour le calcul de la recharge des nappes, par zones météorologiques (ZMTO).

Les précipitations efficaces ont été calculées au pas de temps décadaire à partir :

- des précipitations (P),
- de l'évapotranspiration potentielle (ETP),
- de la capacité maximale en eau du sol (la réserve utile - RU), fixée à deux valeurs : 100 mm et 150 mm. L'utilisation de deux valeurs distinctes est liée à la règle adoptée pour le calcul de la recharge lors de la phase de calage (cf. 2.2.2).

L'évolution des précipitations efficaces annuelles, calculées depuis 1972 (pour une RU de 150 mm), avec les données pluviométriques de la station de mesure de Mérignac en Gironde (Figure 11), présente une valeur relativement faible pour 2017, correspondant au cinquième de

la moyenne interannuelle pour la période 1972-2019. La situation est similaire pour les autres stations météorologiques prises en compte dans le modèle (Tableau 2). La pluie efficace est remarquablement faible pour la station de Cognac en Charente, avec seulement 14,7 mm en 2017. Les autres valeurs, pour les années 2016, 2018 et 2019, sont plus importantes et correspondent plus aux valeurs communément calculées.

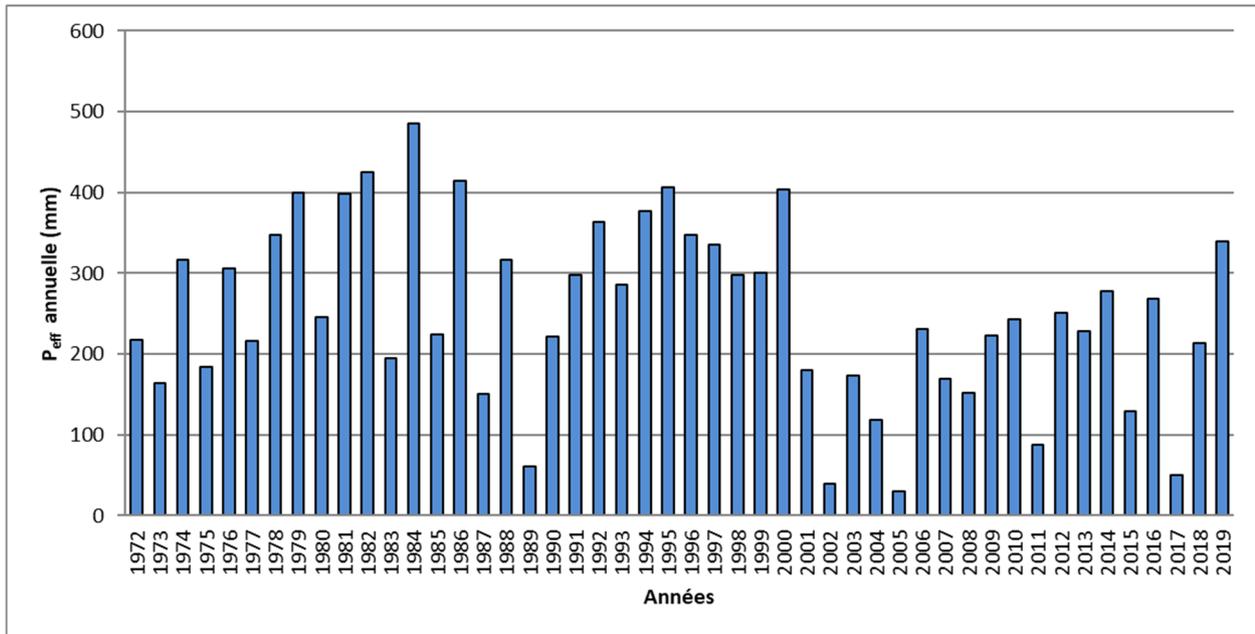


Figure 11 - Précipitations efficaces annuelles (Peff) pour la station de Mérignac en Gironde, pendant la période 1972 - 2019, pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm

Années	Précipitations efficaces Peff (mm) selon les stations					
	Mérignac RU 150 (33)	Mérignac RU 100 (33)	Cognac (16)	Gourdon (46)	Bergerac (24)	Mont-de- Marsan (40)
<b>2016</b>	268.8	318.8	156.4	186.7	115.4	256.2
<b>2017</b>	50.6	138.5	14.7	18.4	38.3	170.2
<b>2018</b>	213.5	263.5	188.8	160.3	161.9	258.5
<b>2019</b>	339.6	389.6	268.9	172.2	211.1	513.5
<b>Moyenne 1972-2015</b>	252.0	283.0	163.0	163.0	148.0	292.0

Tableau 2 - Précipitations efficaces (mm) en 2016, 2017, 2018 et 2019, calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA

### 2.2.2. Recharge

Le mode de calcul de la recharge, pour la période d'actualisation, est le même que celui utilisé lors des phases de calage des différentes versions du modèle, qui se sont succédées depuis 1998. Le calcul est détaillé dans le rapport BRGM/RP-53659-FR (Pédron et al., 2005). Dans cette phase, la recharge, année par année, a été évaluée suivant les secteurs en prenant comme référence la pluie efficace annuelle moyenne de la station météorologique considérée, calculée

pour la période 1972-2000 (avec une RU maximale de 150 mm). A partir des valeurs de recharge du régime permanent, les valeurs, année par année, pour chaque zone d'infiltration définie lors de la phase de calage, sont obtenues par :

$$R_{z,k} = \frac{P_{eff}(k)}{\overline{P_{eff}}} \overline{R_z}$$

$R_{z,k}$  est la valeur de recharge de l'année k affectée à la zone z ;

$\overline{R_z}$  est la valeur de recharge du régime permanent pour la zone z ;

$P_{eff}(k)$  est la pluie efficace de l'année k ;

$\overline{P_{eff}}$  est la pluie efficace annuelle moyenne calculée sur la période 1971-2010.

La localisation des zones de recharge de chaque couche du modèle, ainsi que les stations météorologiques qui s'y rattachent, sont présentées en figure 12. Les 5 stations météorologiques considérées (Mérignac, Bergerac, Gourdon, Cognac et Mont-de-Marsan) sont utilisées pour le calcul de la recharge dans les mailles d'affleurement. Elles ont été choisies pour leur représentativité. Elles sont bien réparties sur le territoire modélisé et présentent des chroniques de pluies et d'ETP, depuis plus de 40 ans, qui peuvent donc être utilisées, pour le calcul de la recharge du modèle, pour chaque pas de temps depuis l'état initial (1972).

Le Plio-Quaternaire constitue l'aquifère le plus superficiel du Modèle Nord-Aquitain et affleure dans toute la partie ouest de la zone d'étude. L'attribution des flux d'infiltration s'y fait donc par grandes plages. Par contre, les zones d'affleurement des aquifères plus profonds sont peu nombreuses et souvent localisées. Il peut y avoir des écarts importants entre la superficie réelle des affleurements et la superficie des mailles correspondantes (4 km<sup>2</sup> par maille), ce qui impose de distribuer le flux d'infiltration dans les mailles en fonction de la superficie réelle des affleurements. Les superficies des affleurements, dans les mailles de la grille du modèle de 2 km de côté, ont été entièrement recalculées et regroupées en classes (0 à 10 %, 10 à 20 %, ...). Chaque maille de recharge directe a ensuite été rattachée (en utilisant les polygones de Thiessen) à une station météorologique, en fonction de sa localisation géographique (Figure 12), de façon à moduler la recharge calculée en fonction de la variabilité spatiale des pluies efficaces.

Chaque maille d'affleurement du modèle est affectée d'un numéro de zone de recharge (ou météorologique [ZMTO] dans le logiciel MARTHE) qui dépend de la couche considérée, de la station météorologique à laquelle elle est rattachée et de la classe correspondant au rapport de la superficie réelle de l'affleurement sur la superficie totale de la maille (4 km<sup>2</sup>). La nomenclature de codification des mailles est décrite ci-dessous :

**14 1 9**

**14**

numéro de la couche du modèle, en l'occurrence le Bathonien-Callovo-Oxfordien ;

**1**

numéro de la station météorologique ;

**9**

superficie réelle de l'affleurement dans la maille, comprise ici entre 90 et 100 % (classe 9).

Cette numérotation permet d'ajouter des couches ou de prendre en compte des stations météorologiques supplémentaires, sans modifier l'existant. Les données de pluies efficaces, calculées à la station de Mérignac, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour l'Eocène (sup., moy. et inf.), le Campano-Maastrichtien et le Turonien-Coniacien-Santonien. Les données de

Bergerac, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour les nappes de l'Eocène inférieur et de l'Eocène moyen.

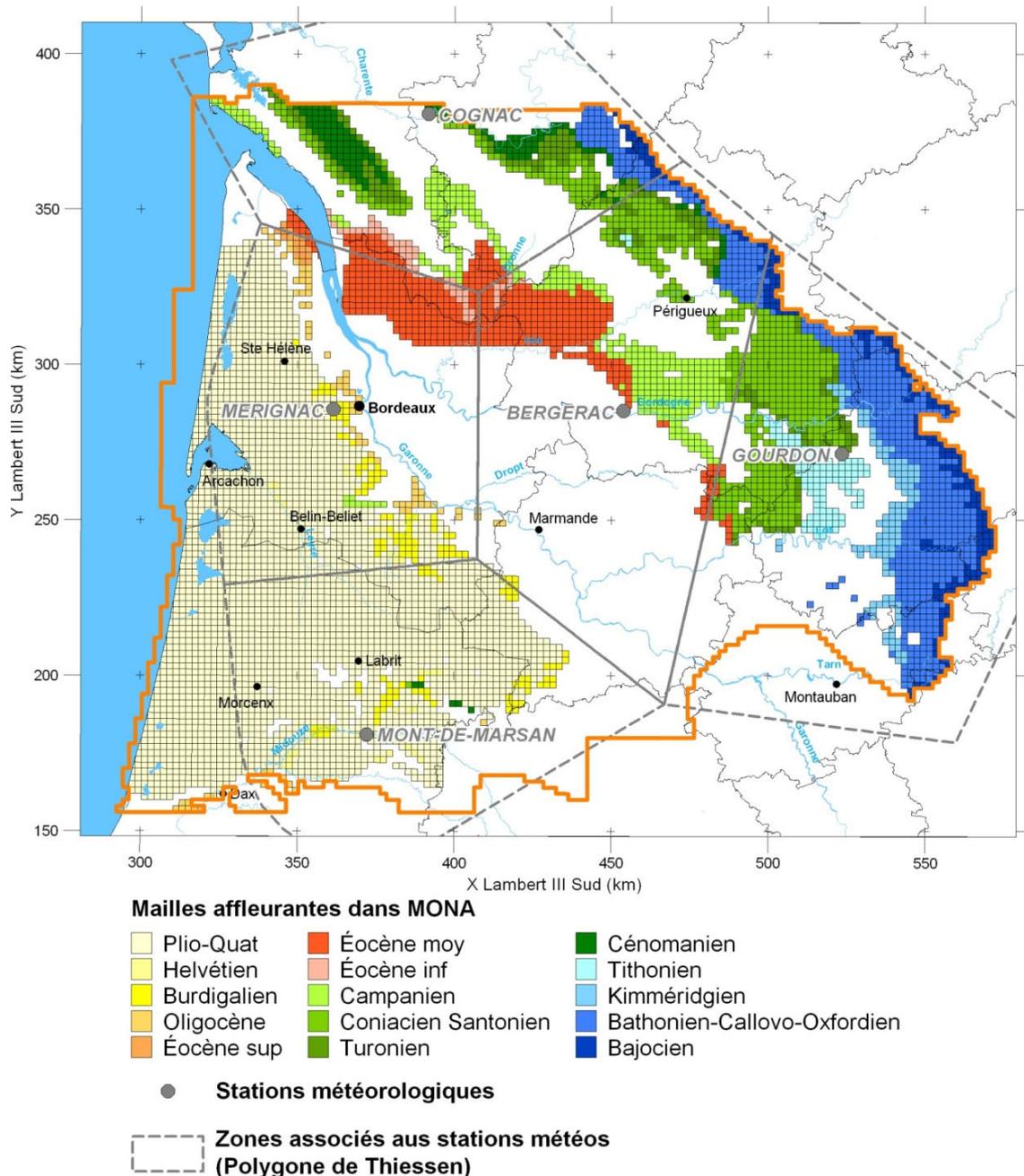


Figure 12 - Localisation des zones d'affleurement du modèle dans sa version 3.3b, pour chaque nappe, et source des données de pluies, utilisées pour le calcul de la recharge

Les données de la station de Mérignac, pour une RU de 100 mm, sont utilisées pour le calcul de la recharge des nappes plio-quaternaire, miocènes (Aquitanién-Burdigalien et Langhien - Serravallien) et oligocène. Les données des stations de Cognac et de Gourdon, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour le Turonien-Coniacien-Santonien et le Campano-Maastrichtien. Les données de Mont-de-Marsan, pour une RU de 100 mm, sont utilisées pour le Plio-Quaternaire. Les pluies efficaces trimestrielles, supérieures ou égales à 250 mm, sont réduites de 30 %. Cet écrêtage simule la diminution de l'infiltration (augmentation de la part du ruissellement) dans les écoulements durant les périodes fortement pluvieuses.

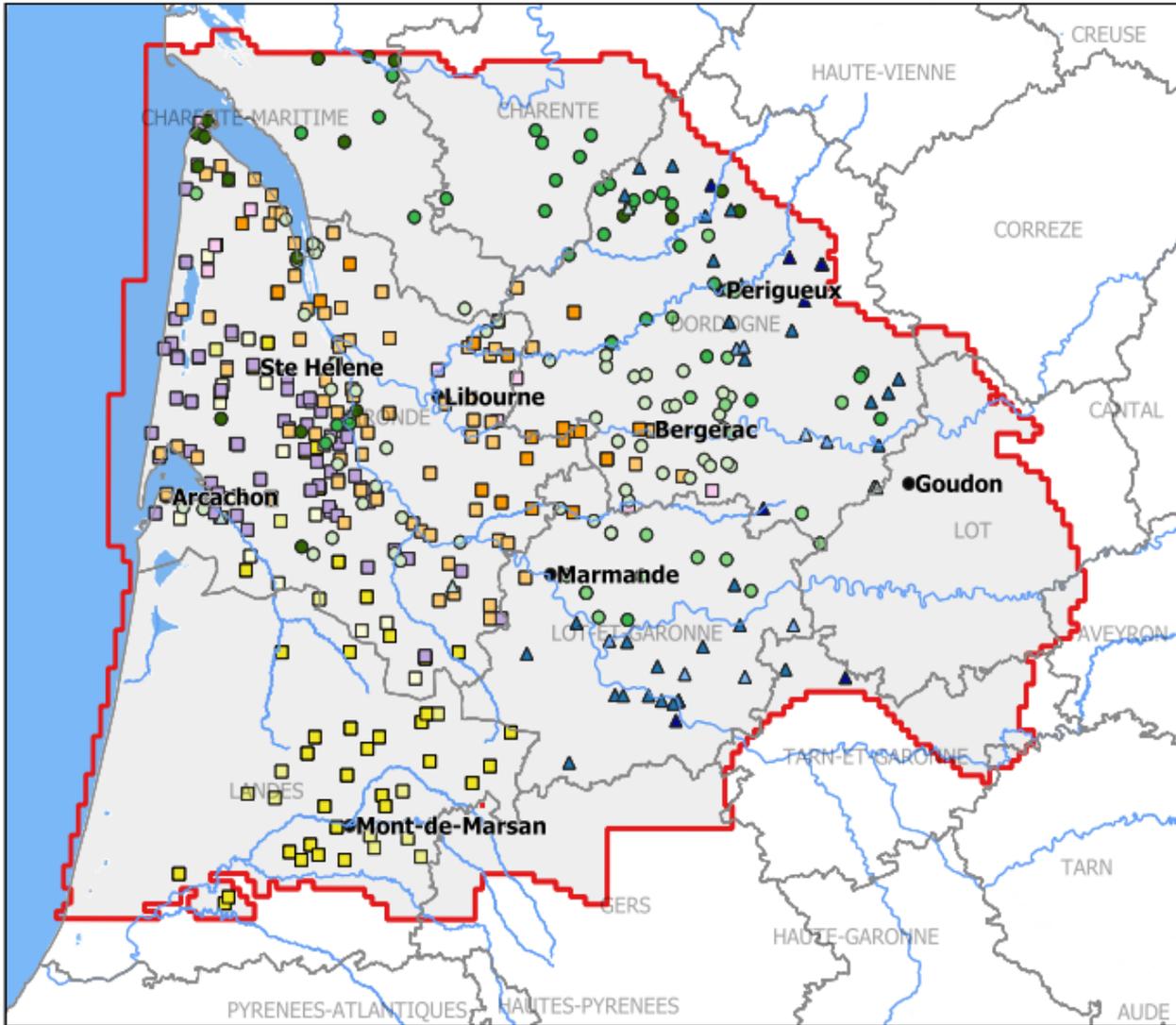
## 2.3. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU MONA V3.3

### 2.3.1. Mise à jour des chroniques d'observations

Le calage et la validation du modèle s'appuient sur des chroniques de référence que le modèle doit restituer au mieux en respectant à la fois les niveaux observés, la pente, la phase et l'amplitude des variations. Pour qu'une chronique piézométrique soit exploitable, elle doit être suffisamment étoffée et longue. L'aquifère capté doit être connu avec certitude et être unique (sauf lorsque deux réservoirs sont sollicités, mais pas individualisés par une épente). Le pas d'acquisition des mesures est variable d'un point à un autre (journalier, hebdomadaire, ..., annuel). L'attribution du réservoir capté pour chacun des points d'observation a fait l'objet d'une validation par le géologue régional du BRGM. Ce sont au total 430 chroniques qui sont utilisées pour le calage et la validation du modèle (Tableau 3). Parce que certains ouvrages captent plusieurs aquifères, ce sont au total 446 points de contrôle qui permettent de valider le calage du modèle. L'ensemble des chroniques piézométriques utilisées pour le calage du Modèle Nord-Aquitain a été actualisé jusqu'en 2019. Ces données ont été principalement extraites de la Banque de données sur les eaux souterraines (BDES), gérée par le BRGM, et la banque nationale d'Accès aux données sur les eaux souterraines (ADES). La localisation des points de mesures est présentée en figure 13.

Aquifère	Couche du modèle	Nombre de chroniques utilisées pour le calage
Plio-Quaternaire	1	24
Langhien-Serravallien	2	13
Aquitainien	3	44
Oligocène	4	60
Éocène sup	5	10
Éocène moy	6	76
Éocène inf	7	24
Campanien	8	58
Coniacien-Santonien	9	21
Turonien	10	38
Cénomanién	11	21
Tithonien	12	7
Kimmeridgien	13	7
Bathonien-Callové-Oxfordien	14	32
Bajocien	15	11
	<b>TOTAL</b>	446

Tableau 3 - Nombre de chroniques piézométriques utilisées pour le calage de la version 3.3



**Légende**

LIM MONA V3

**Points d'observation et aquifère correspondant**

- Plio-Quaternaire
- Langhien-Serravallien
- Aquitaniens
- Oligocène
- Éocène sup
- Éocène moy
- Éocène inf

- Campanien
- Coniacien-Santonien
- Turonien
- Cénomaniens
- Tithonien
- Kimméridgien
- Bathonien-Callovo-Oxfordien
- Bajocien

0 25 50 75 100 km



Figure 13 - Localisation des 430 points de mesures piézométriques

### 2.3.2. Campagne piézométrique complémentaire

Sur les 430 points d'observation du modèle, certains ne sont plus suivis depuis de nombreuses années. Pour s'assurer de la fiabilité des simulations réalisées, des campagnes de mesures ponctuelles sont réalisées, à intervalles réguliers. La première campagne de ce type a été réalisée en 2012, puis d'autres ont suivi en 2014 et 2017. L'objectif est de vérifier que les tendances d'évolutions de la piézométrie, calculées par le modèle, sont bien en concordance avec les observations. Les ouvrages intégrés dans ces campagnes se situent dans les départements de la Dordogne, de la Gironde et du Lot-et-Garonne. Une campagne piézométrique complémentaire a été réalisée en 2019 et une autre en 2021.

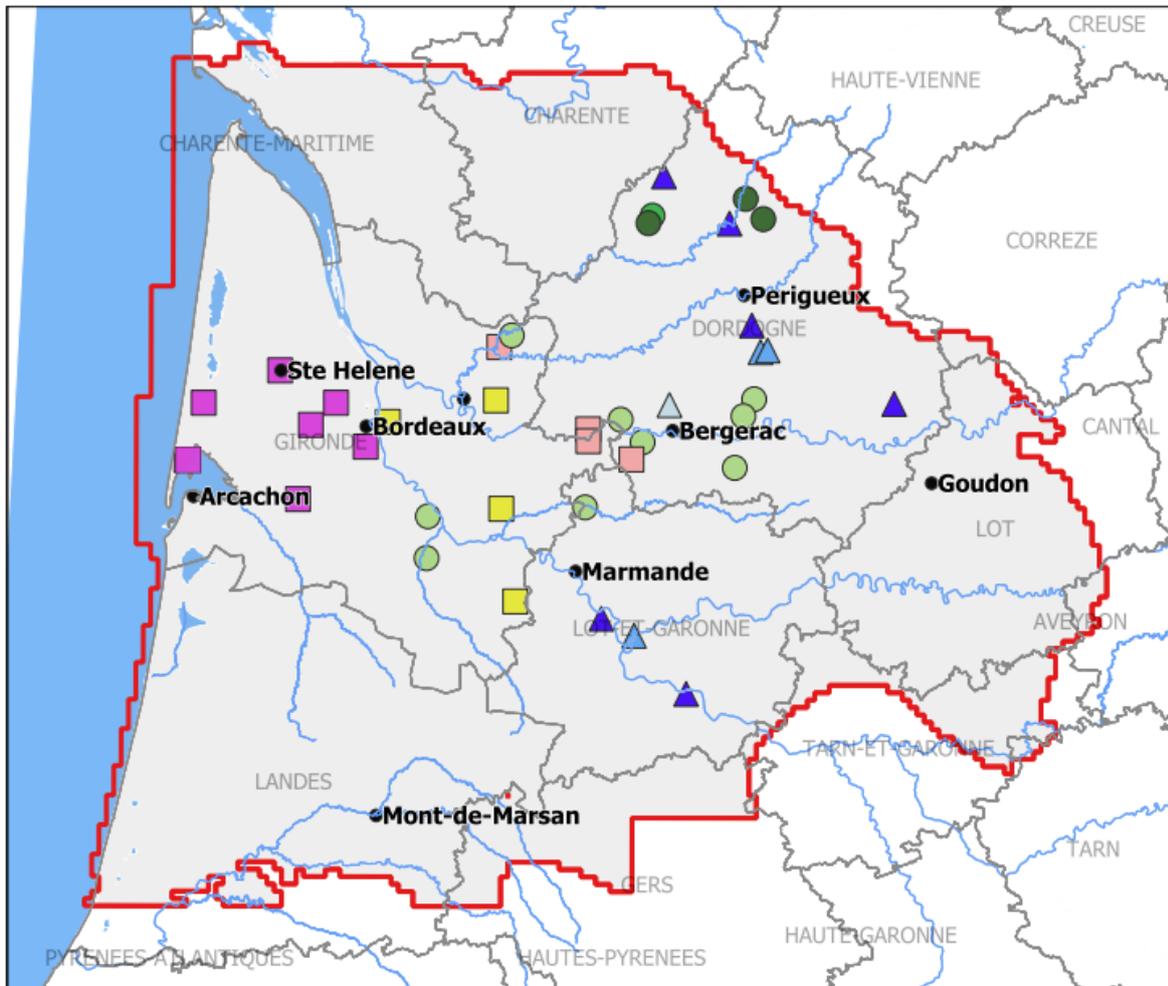
La campagne de 2019 s'est intéressée à 45 ouvrages d'observation utilisés pour le calage de la version 3.3 du MONA :

- 30 ouvrages ont été mesurés, dont 3 forages à retirer des campagnes suivantes, car ils sont équipés d'enregistreur,
- les données de 8 ouvrages ont été récupérées auprès de l'exploitant de l'ouvrage,
- la mesure n'a pas pu être faite dans 5 ouvrages, dont 2 à retirer des prochaines campagnes piézométriques, parce que sans tube guide-sonde,
- 7 ouvrages sont à retirer des campagnes suivantes (Tableau 4).

Indice BSS	Commune	Lieu-Dit	Raison du retrait des campagnes de mesures
07298X0015	GRAYAN-ET-L'HOPITAL	VIDEAU	Le forage est artésien ; il n'est pas équipé pour ce type de mesures.
07818X0030	SAINT-MEDARD-DE-MUSSIDAN	DOMAINE DE BASSY	Situé à proximité d'un forage suivi par le BRGM ; mutualisation vérifiée avec l'ouvrage 07818X0038 ; les deux ouvrages captent la même nappe.
08018X0002	LE PORGE	COMMUNAL	Forage rebouché en 2006.
08082X0010	SAINT-GENIES	LE PONT DE BEUNE	Difficultés liées à la localisation de l'ouvrage, et l'attribution du code BSS. La position du forage a fait l'objet d'une géolocalisation DGPS en 2022, sans toutefois correspondre au document papier de la BSS. Une vérification est à faire sur le terrain pour valider que le forage présent à l'endroit indiqué sur le papier est bien réel et ne correspond pas à un prélèvement dans la retenue.
08327X0204	SAINT-MARTIAL-DE-NABIRAT	LE REPAIRE (A9)	L'ouvrage 08327X0205 (juste à côté) est équipé avec un enregistreur automatique, et capte la même nappe.
09023X0017	AGEN	AGEN-ROUQUET 2	Forage localisé à côté de l'ouvrage 09023X0016, équipé avec un enregistreur automatique.
09023X0019	LE PASSAGE	ROSETTE (LE PASSAGE 2)	Ouvrage rebouché.

Tableau 4 - Liste des forages à retirer de la campagne piézométrique de 2021

La campagne de 2021 a concerné 38 points d'observation utilisés pour le calage de la version 3.3 du MONA (Figure 14). Par rapport à 2019, 1 ouvrage a été rajouté. Ces points sont localisés dans les départements de la Dordogne, de la Gironde et du Lot-et-Garonne. De plus, des mesures au DPGS ont été réalisées, afin de préciser les coordonnées géographiques et d'obtenir l'altitude exacte des points mesurés.



**Légende**

- |                  |                             |
|------------------|-----------------------------|
| LIM MONA V3      | Cénomanien                  |
| Oligocène        | Tithonien                   |
| Eocène Inférieur | Bathonien-Callovo-Oxfordien |
| Eocène Moyen     | Kimméridgien                |
| Campanien        | Turonien                    |

0 25 50 75 100 km



Figure 14 - Localisation des 38 points d'observation de la campagne piézométrique complémentaire de 2021

Le bilan sur ces 38 points est le suivant :

- 35 points ont été mesurés directement sur le terrain ;
- 1 point a fait l'objet d'une récupération des données fournies par l'exploitant. La plupart des ouvrages d'alimentation en eau potable dispose d'enregistrements automatiques du niveau d'eau (en mètres de colonne d'eau). Les mesures récupérées auprès de l'exploitant ont fait l'objet d'un recalage à partir des informations transmises par l'exploitant ou par vérification directe sur le terrain, afin de retranscrire les données obtenues en mesure piézométrique calée en valeur absolue (m NGF). Cette collecte a également permis d'avoir accès à des chroniques continues sur plusieurs années, qui seront utilisées pour la modélisation ;
- 2 mesures n'ont pu être effectuées en raison de problème d'accessibilité à l'ouvrage. Ils seront retirés des futures campagnes piézométriques. Les raisons de ce retrait sont indiquées dans le Tableau 5.

Indice BSS	Commune	Lieu-Dit	Raison du retrait de la campagne de mesures de 2021
08785X0002	CLAIRAC	BROC	Forage non mesurable : l'ouvrage n'est pas muni de tube guide-sonde, d'où le risque de coincer la sonde piézométrique.
08304X0019	NAUSSANNES	BOULEYGUE	Difficulté de faire la mesure liée à l'état des boulons qui sont rouillés.

Tableau 5 - Liste des forages à retirer des prochaines campagnes piézométriques

## 2.4. RESULTATS DES SIMULATIONS D'ACTUALISATION

### 2.4.1. Chroniques de calage

Les graphiques de comparaison entre les courbes d'évolution, tracées à partir des mesures, et les charges hydrauliques, calculées par le modèle pour les différentes nappes, sont présentés en annexe 2. L'exemple de restitution de la Figure 15 montre, en points bleus, les mesures brutes observées et, en rouge, les niveaux, calculés par le MONA V3.3b de 2019, au droit du piézomètre considéré. Sur cette chronique, le modèle retranscrit bien les variations de charges. Néanmoins, comme le modèle calcule les charges au pas de temps annuel, il n'est pas possible de retranscrire les variations saisonnières, comme l'illustrent les variations de la chronique mesurée à partir de 2008.

L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant pour la grande majorité des chroniques de calage, pour les nappes considérées (Annexe 2). La plupart des points sont bien reproduits en niveaux, en phase et en pente. Ces résultats confirment la fiabilité du modèle. En effet, pour la période 2016-2019, le modèle retranscrit très convenablement les variations de charge avec les nouvelles données d'entrée, sans qu'aucune modification des paramètres hydrodynamiques n'ait été nécessaire.

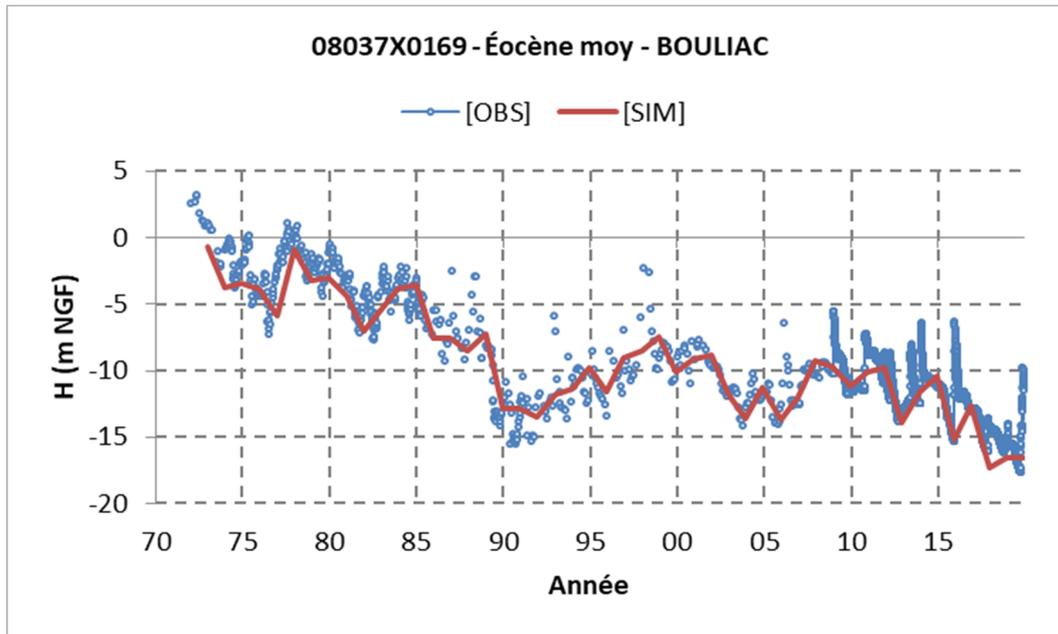


Figure 15 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés, dans le forage de Bouliac (Éocène moyen)

#### 2.4.2. Cartes piézométriques

Le modèle actualisé dans sa version MONA V3.3b-2019 permet de restituer les cartes piézométriques simulées des nappes, pour chaque année. La carte piézométrique de l'aquifère de l'Éocène moyen, pour l'année 2019, est présentée en figure 16. Ce réservoir présente un enjeu important dans le nord du Bassin aquitain, notamment en Gironde, où il est sollicité pour l'alimentation en eau potable de l'agglomération bordelaise. La nappe étant captive, les variations de la piézométrie sont dues, sur le court terme, aux variations des volumes prélevés. Il y a corrélation entre les volumes prélevés et les niveaux piézométriques.

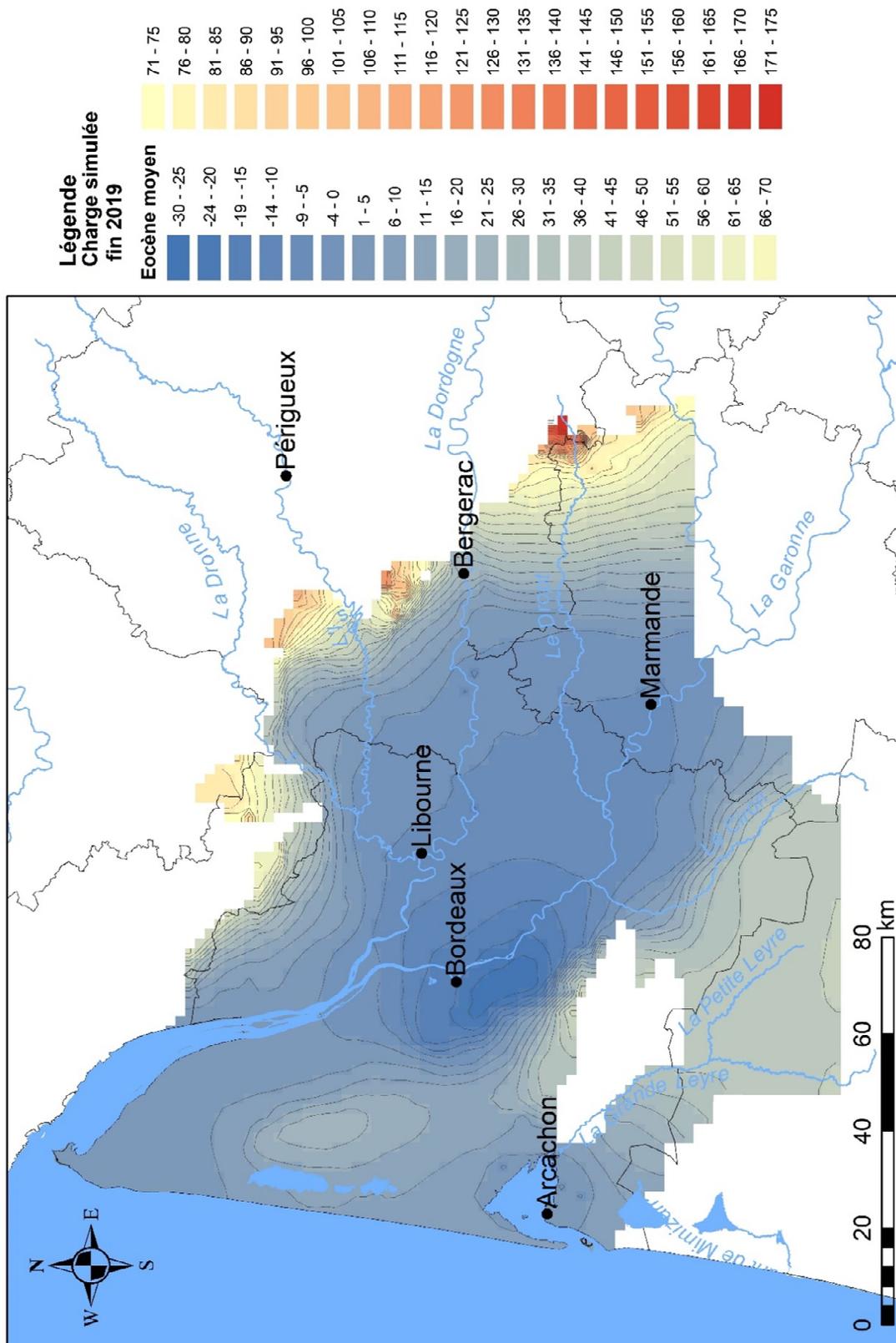


Figure 16 - Niveaux piézométriques simulés par le MOdèle Nord-Aquitain (V3.3b-2019), dans l'aquifère de l'Écène moyen, pour l'année 2019



## 3. Développement du MONA

### 3.1. DESCRIPTION DE LA VERSION 3.5

La version 4 du MONA, avec un maillage plus fin (500 m x 500 m), a été construite pour améliorer la représentativité des zones d'affleurements et donc des zones d'infiltration et de débordement du modèle, pour aboutir à un calcul plus fin des bilans hydrauliques. Elle prend en compte plus spécifiquement les épontes en considérant l'emmagasinement de ces couches, ce qui porte le nombre de couches avec calcul de charges à 30 contre 15, dans la version 3.3. Le nombre total de mailles actives est de 2 382 835. Le temps de calcul des premières simulations en transitoire, au pas de temps trimestriel, pour une période allant de 1996 à 2014 (soit 77 pas de temps), est de l'ordre de 9h30, contre seulement 6 min avec la version 3.3 du MONA qui permettait le calcul sur une période de temps plus longue (de 1972 à 2015).

En raison du très grand nombre de mailles de la version 4 et des longs temps de calcul associés, la création d'une version intermédiaire a été décidée (MONA 3.5). L'objectif est d'obtenir des temps de calcul plus raisonnables, permettant d'aboutir à une version opérationnelle du MONA, intégrant les améliorations concernant la géométrie et la recharge, provenant des travaux réalisés dans le cadre de la Convention régionale.

#### 3.1.1. Géométrie

La version 3.5 intègre la géométrie de la version 4, dans un maillage de 2 km de côté, de la même manière que la version 3.3. Le modèle comprend donc 16 couches et n'intègre les épontes que par l'intermédiaire de leurs perméabilités verticales. L'objectif est de gagner en temps de calcul, pour pouvoir utiliser l'interface de couplage Python PyMARTHE, qui permet de coupler les logiciels PEST (Parameter ESTimation) et Marthe, pour effectuer un calage algorithmique (Aissat, 2021). La suite logicielle PEST est l'un des programmes des plus utilisés pour l'estimation des paramètres et la quantification des incertitudes (Doherty, 2015).

Ainsi le nombre de mailles est ramené à 74 497, dans la version 3.5, ce qui correspond à une augmentation du nombre de mailles de seulement près de 7 500 mailles, en comparaison avec la version 3.3 (66 973 mailles). Avec 2 382 835 mailles dans la version 4, le nombre de mailles était multiplié par 35,6.

#### 3.1.2. Recharge

La détermination des flux de recharge est réalisée par l'intermédiaire du calcul de bilans hydroclimatiques, avec le schéma GARDENIA. Ce bilan est effectué en utilisant les données météorologiques (pluies et ETP), issues des ré-analyses SAFRAN. La prise en compte des données SAFRAN apparaît essentielle, car elle permet de spatialiser les données climatiques dans l'ensemble modélisé. Cette approche facilitera l'utilisation du modèle dans le cadre de simulations prospectives, intégrant des scénarios du GIEC. Le fait d'utiliser la géométrie, déduite du modèle géologique construit sous GDM, permet également de calculer les bilans hydroclimatiques pour l'ensemble du domaine (y compris les zones où les épontes affleurent).

#### 3.1.3. Discrétisation temporelle

Le bilan hydroclimatique est effectué au pas de temps journalier, tandis que le calcul hydrodynamique se fait au pas de temps mensuel ou annuel, et devra être ajusté pour optimiser

les temps de calcul. La période de simulation s'étend de 1972 à 2019, à partir de la date du 31 juillet, base des cycles hydrologiques et non années calendaires.

#### 3.1.4. Prélèvements

Les prélèvements sont issus de la base de données, décrite au chapitre 2.1. Ils n'ont pas fait l'objet à ce stade d'une ventilation particulière en fonction des usages.

#### 3.1.5. Conditions imposées

Elles correspondent à toutes conditions hydrodynamiques, de flux ou de potentiels, permanentes ou variables, imposées aux limites ou à l'intérieur d'une couche du modèle. Elles sont matérialisées par des mailles à charge imposée, à flux nul.

##### a) *Potentiel imposé*

Des charges ont été imposées à la limite ouest de la couche du Plio-Quaternaire, de manière à retranscrire les niveaux de l'océan Atlantique et leurs influences sur les couches aquifères.

##### b) *Flux nuls*

Cette condition est appliquée à toutes les limites du domaine, qui ne sont pas régies par les conditions de potentiels ou de flux imposés. Ces limites correspondent :

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

#### 3.1.6. Réseau hydrographique

L'intégration du réseau hydrographique pour valider les débordements et donc cadrer la recharge est primordiale. A noter que 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. La définition du réseau hydrographique pour l'ensemble du secteur d'étude a été précédemment décrite durant le développement du MONA V4 (Saltel, Compère et Cabaret, 2017). Le couplage du réseau hydrographique avec le système aquifère offre la possibilité de modéliser les échanges "nappe-rivière" et d'estimer le débit des cours d'eau. On peut alors comparer ces débits simulés avec les débits mesurés en station (et disponibles dans Hydroportail, <https://hydro.eaufrance.fr/>), pour améliorer le calage du modèle et ajuster les paramètres liés à la recharge. Les données de prélèvements dans les eaux continentales ont été obtenues auprès du Système d'information sur l'eau du bassin Adour-Garonne (SIE-AEAG). Ces données recensent, au pas de temps annuel, 7 934 points de prélèvements dans les eaux de surface et en retenues d'eau, à partir de l'année 2003 (Figure 17). Ce recensement inclut également les prises d'eau, qui sont par la suite restituées au réseau hydrographique, en particulier les centrales nucléaires EDF du Blayais (> 5 Mdm<sup>3</sup> en 2016) et de Golfech (> 198 Mm<sup>3</sup> en 2016), ainsi que la zone industrielle du bec d'Ambès (>130 Mm<sup>3</sup>/an en 2016). Ceux-ci ne sont pas considérés dans la suite de l'étude.

En dehors de ces utilisateurs, les prélèvements de surface et en retenues d'eau sont compris entre 250 et 400 Mm<sup>3</sup>/an, au cours de la période 2013-2016. Ils sont essentiellement destinés à l'irrigation (~70 %), puis l'industrie (environ 20 %) et l'AEP (10 %).

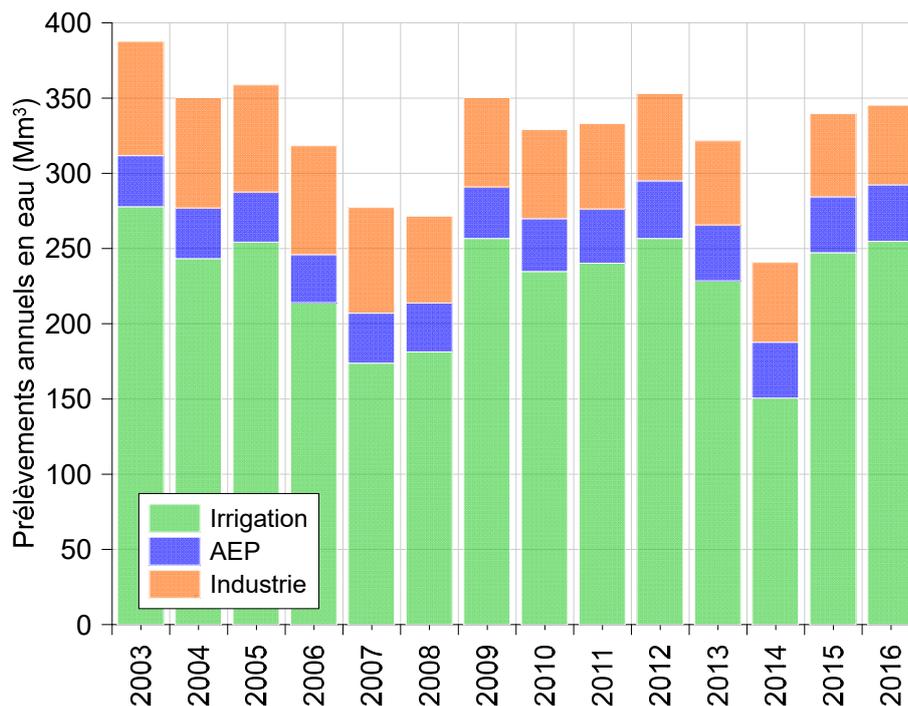


Figure 17 - Total des prélèvements dans les eaux de surface et retenues d'eau, dans le secteur d'étude (SIE-AEAG)

Ces prélèvements ont été affectés au réseau hydrographique modélisé, aux mailles correspondantes. A noter que ces débits n'ont pas fait l'objet, à ce stade, d'une ventilation en fonction des usages (ex. : en fonction des périodes d'irrigation), au pas de temps mensuel. Le réseau hydrographique considéré dans le modèle correspond au réseau hydrologique principal sur lequel des données de débits des cours d'eau sont disponibles (Figure 18). Les prélèvements en rivière localisés dans des cours d'eau non modélisés n'ont pas été inclus car ils n'auraient pas été affectés au bon cours d'eau. En effet, à cette échelle, il est nécessaire de faire des choix de simplification. Toutefois, les prélèvements situés à moins de 2 km du réseau hydrographique modélisé ont été intégrés au modèle (taille de la maille). Enfin, les prélèvements correspondant aux retenues d'eau ont été écartés dans la mesure où les périodes de remplissage des retenues ne sont pas connues.

Suivant cette méthodologie, ce sont 3 335 prélèvements de surface qui ont finalement été retenus dans le modèle (Figure 19), représentant 60 à 70 % des prélèvements recensés dans le secteur d'étude.

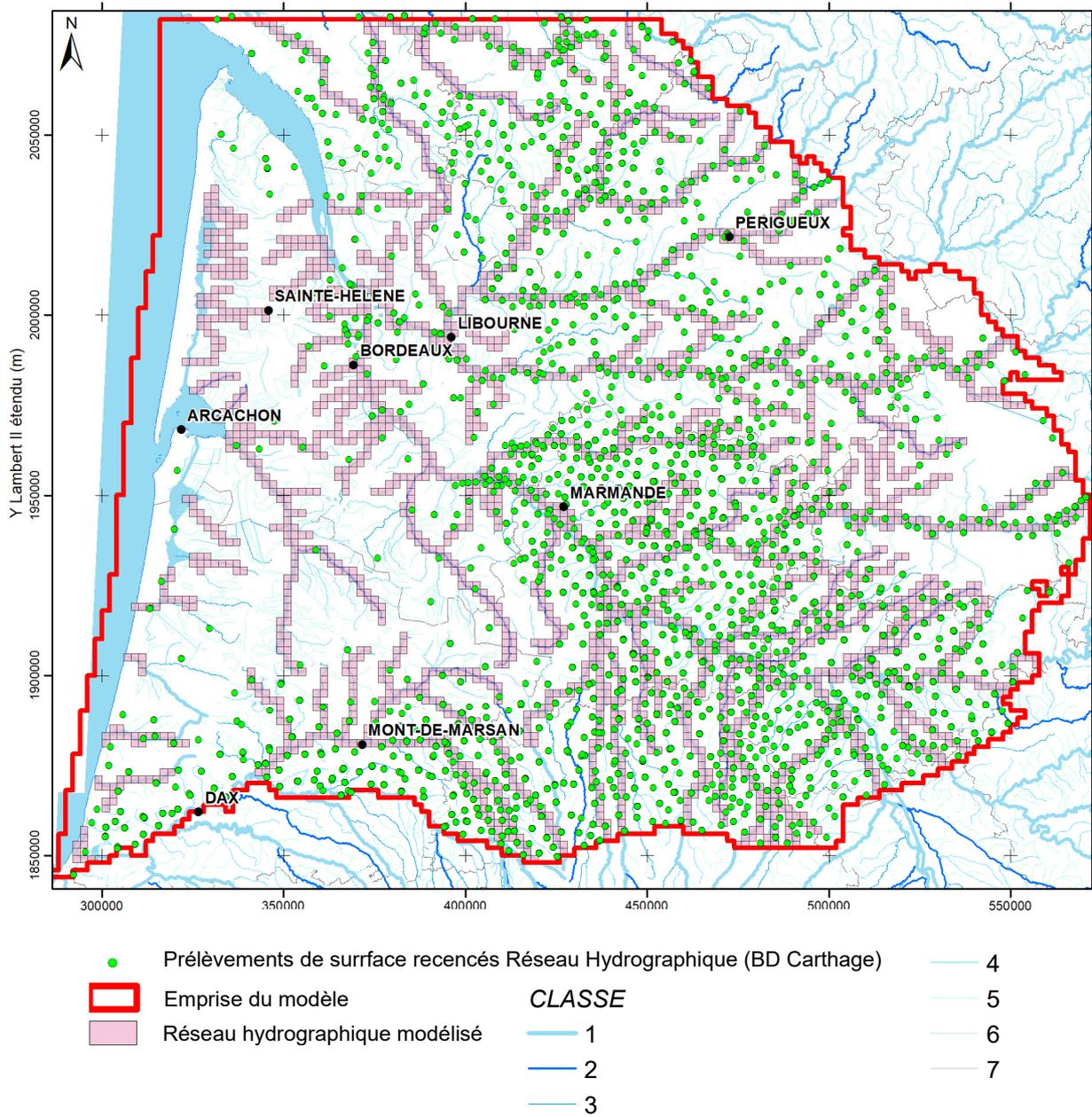


Figure 18 - Réseau hydrographique modélisé et localisation des prélèvements de surface

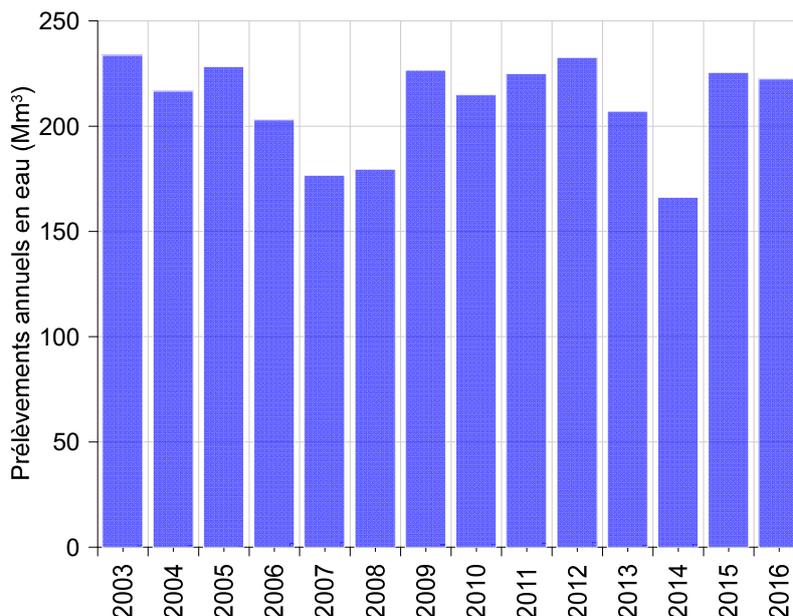


Figure 19 - Total des prélèvements de surface modélisé dans le MONA V3.5

Plusieurs cours d'eau intégrés dans le modèle prennent naissance en dehors des limites de représentation du modèle : que ce soit dans le Massif Central à l'est ou dans les Pyrénées au sud. Afin de simuler au mieux le réseau hydrographique, il est nécessaire d'intégrer, en limite de modèle, les débits entrant dans le cours d'eau.

Trois cas ont été rencontrés :

- 1/ Aucune donnée n'est disponible à proximité de la première maille où le cours d'eau est présent. En première intention, aucune donnée n'a été intégrée au modèle. A noter qu'une évaluation du débit pourra être réalisée ultérieurement selon une approche théorique, pour approcher les modules annuels des débits.
- 2/ Une station hydrométrique existe à proximité de la première maille du cours d'eau ; les données de débits existantes sont intégrées en amont. Lorsque les chroniques ne sont pas complètes, pour la période de simulation du modèle, des valeurs moyennes calculées en concordance avec les pas de temps hydroclimatique sont incorporées.
- 3/ Une station hydrométrique existe à distance de la première maille du cours d'eau, alors les données de la station sont incorporées, en pondérant les valeurs en fonction du ratio entre la superficie du bassin versant calculée depuis la limite du modèle et celle calculée à partir de la position de la station de mesure. Deux configurations sont possibles :
  - soit les ratios sont inférieurs à 1, quand la station de référence est à l'intérieur de l'emprise du MONA,
  - soit les ratios sont supérieurs à 1, quand la station de référence est à l'extérieur de l'emprise du MONA.

### 3.1.7. Données d'observation

L'estimation des paramètres nécessite la collecte de mesures historiques représentatives du système souterrain. Il s'agit de niveaux d'eau (charges hydrauliques) mesurés à travers un important réseau de forages et de puits, et des débits de cours d'eau issus de la banque HYDRO.

Dans le cadre du développement des versions 4 et 3.5 du MONA, une réflexion générale a porté sur la pertinence des points d'observation utilisés pour le calage et la validation du modèle ; celui-ci devant restituer au mieux les niveaux observés, la phase, la pente et l'amplitude des variations.

Pour qu'une chronique piézométrique soit exploitable, elle doit présenter un nombre suffisant de mesures et retranscrire les variations piézométriques sur une période la plus longue possible. Ainsi les mesures ponctuelles liées à des campagnes ponctuelles n'ont pas été incluses dans un premier temps (Abasq, Platel, et Cabaret 2020) L'aquifère capté doit être connu avec certitude et idéalement ne capter qu'un réservoir. Afin de poser les bases d'une modélisation future, une première collecte, avec caractérisation et validation des points d'observation, a été effectuée.

La première étape a donc été de réaliser un inventaire de l'ensemble des ouvrages disposant d'au moins une mesure piézométrique dans l'emprise de l'extension du modèle et pour la période 1972-2019, à partir de bases de données nationales (ADES, BSS-Eau, BSS) et de bases de données réalisées dans le cadre de projet d'études (rapports d'études, thèses, ...). Ces dernières, à l'inverse des bases nationales, disposent de données qui sont généralement importantes tant en nombre d'ouvrages qu'en fréquence de mesures, mais elles concernent des périodes de suivi courtes et/ou des secteurs restreints.

En vue d'avoir une base de données de points piézométriques pour le calage la plus pertinente possible, il a été décidé de reprendre la validation des aquifères captés par les ouvrages, de manière à être en cohérence avec la géométrie revisitée dans le cadre du MONA V4 (Saltel, Wulleumier et Cabaret, 2016). La priorité a été donnée aux ouvrages issus des bases ADES et BSS-Eau, tout en s'assurant que les 428 points déjà utilisés pour le MONA V3 seraient inclus dans la démarche. L'inventaire montre qu'il existe près de 1 662 points utilisables pour le calage du MONA, dont près de 1 464 captant un aquifère unique ; certains forages pouvant capter jusqu'à 3 aquifères (Figure 20).

A noter que le nombre de points considéré a quasiment quadruplé (x 3,7). C'est surtout la nappe du Plio-Quaternaire qui voit son nombre augmenter considérablement. Cependant, un tri s'avère nécessaire car une « masse » de données aussi importante est difficile à gérer. Pour intégrer pleinement les points d'observation de la version 3.5, seuls les points avec un minimum de 10 mesures ont été retenus de manière à retranscrire les variations piézométriques et s'assurer d'une certaine cohérence dans les mesures.

	Nombre de points V3.3	Nombre de points V3.5	Ouvrages avec mesures			Ouvrages sans mesure	
			Uniques	Doublons	Triples		
Plio-Quat	24	633	632	1		0	x26.4
Langhien-Serravalien	13	86	84	2		0	x6.6
Aquitanien	44	96	94	2		1	x2.2
Oligocène	60	159	154	5		0	x2.7
Eocène sup	10	13	8	5		0	x1.3
Eocène moy	76	273	267	6		1	x3.6
Eocène inf	24	60	44	16		0	x2.5
Campanien	58	67	52	15		3	x1.2
Coniacien Santonien	21	67	36	29	2	0	x3.2
Turonien	38	65	20	43	2	0	x1.7
Cénomanién	21	34	18	14	2	1	x1.6
Tithonien	7	7	7			0	x1
Kimméridgien	7	22	7	15		0	x3.1
Bathonien-Calovo-Oxfordien	32	55	26	29		0	x1.7
Bajocien	11	25	15	10		0	x2.3
<b>TOTAL</b>	<b>446</b>	<b>1662</b>	<b>1464</b>	<b>96</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>x3.7</b>

Figure 20 - Inventaire de l'ensemble des données piézométriques disponibles

Certaines chroniques montrent des valeurs aberrantes (mesures de niveau dynamique, problèmes de dénoyage du capteur, ...). Dans l'optique d'une approche algorithmique, ces chroniques ont été nettoyées afin d'éviter, au cours du calage, d'essayer de réduire des écarts entre simulations et observations pour des mesures non fiables (Figure 21). Ce « nettoyage » a été effectué pour les nappes allant du Plio-Quaternaire au Campanien.

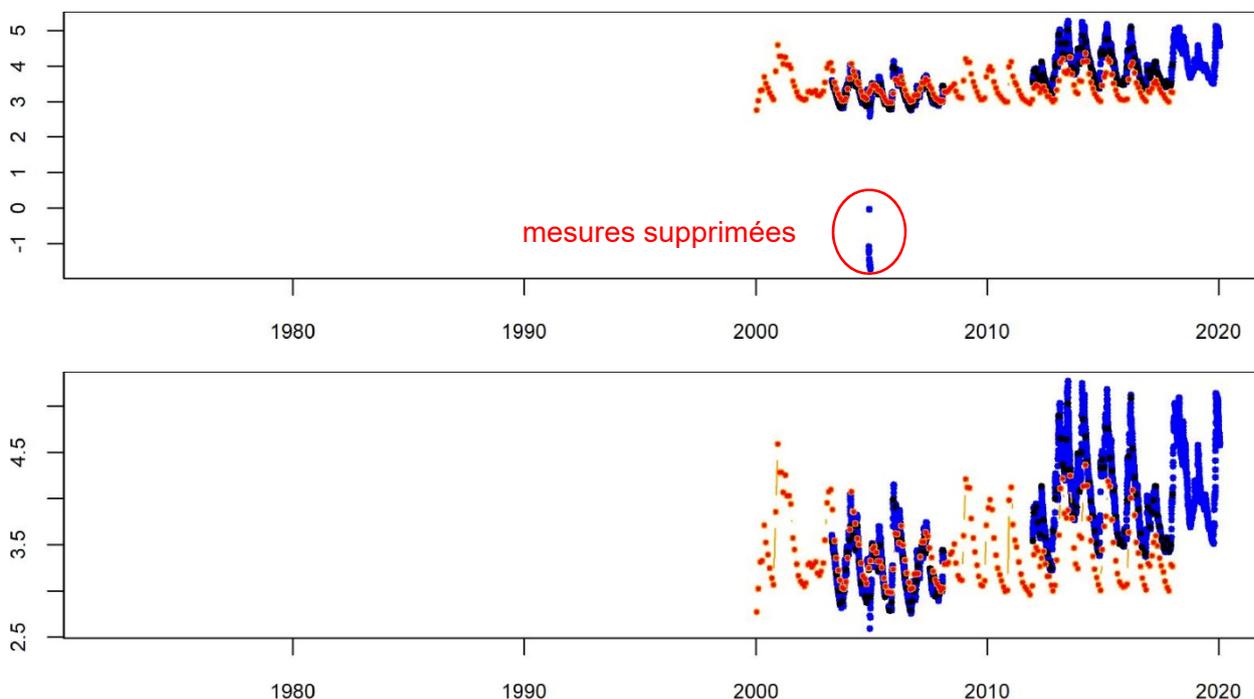


Figure 21 - Nettoyage des chroniques piézométriques : exemple de l'ouvrage 09758X0014

A la maille de 2 km x 2 km, il s'avère que certaines couches peuvent présenter plusieurs chroniques par maille (Figure 22). Dans un souci de rationalisation du réseau d'observation et pour étudier, au sein d'un aquifère, si de grandes tendances sont observables, une analyse des niveaux piézométriques dans l'aquifère de l'Éocène moyen du nord du Bassin aquitain a été entreprise. Elle est détaillée au chapitre 3.1.8.

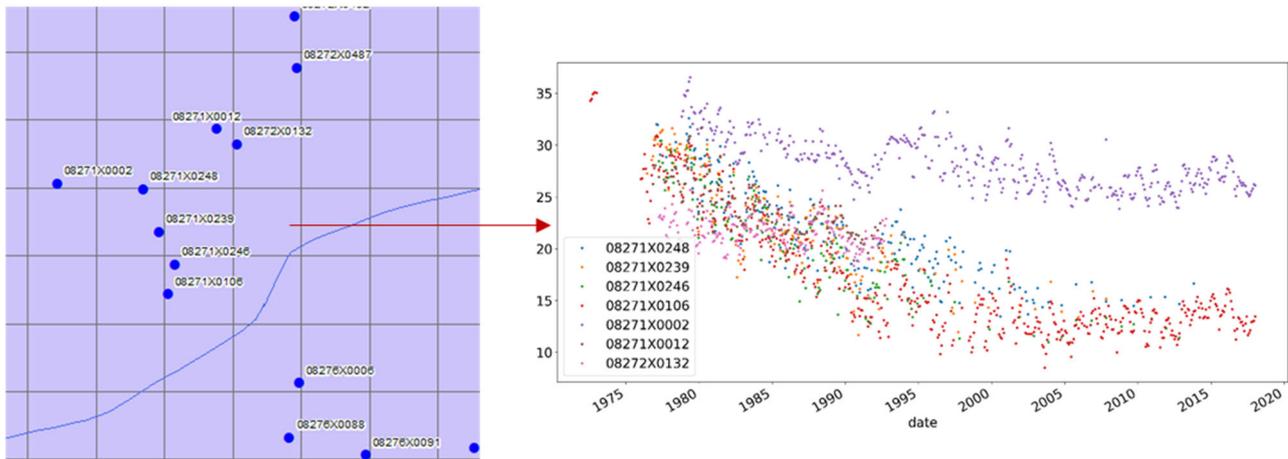


Figure 22 - Comparaison de la densité des points d'observation en cohérence avec la taille du maillage

### 3.1.8. Analyse des tendances des niveaux piézométriques, dans l'aquifère de l'Éocène moyen du nord du Bassin aquitain

#### a) Données disponibles

Les analyses de tendances de niveaux piézométriques ont été faites pour l'aquifère de l'Éocène moyen : 109 points (Annexe 3) sont sélectionnés, dont 70 sont inclus actuellement dans le calage du MONA. Pour la sélection de ces 109 points d'intérêt (forages, piézomètres, etc.), les conditions suivantes ont été exigées :

- l'aquifère capté a dû être vérifié à partir des coupes géologiques et coupes techniques du forage ; et avec l'aide du modèle géologique régional, développé par le BRGM ;
- l'aquifère capté doit être uniquement de l'Éocène moyen ;
- un minimum de 10 années de données (continues ou non continues).

Les données de niveaux piézométriques ont été principalement extraites de la BSS-Eau, base de données sur les eaux souterraines, gérée par les directions régionales du BRGM et la banque nationale d'Accès aux données sur les eaux souterraines (ADES).

#### Nettoyage des chroniques piézométriques

Les chroniques piézométriques extraites peuvent présenter des valeurs incohérentes ou aberrantes. Ces anomalies ont des origines diverses : erreur de lecture de niveau, mauvais fonctionnement des enregistreurs, problème lors de la bancarisation, etc... Différentes techniques ont été utilisées pour détecter ces anomalies, pour chaque des chroniques piézométriques. Une première approche a été faite à partir des « boîtes à moustache » des données mensuelles interannuelles. Cet outil permet de résumer graphiquement la distribution des données et de

visualiser les maximum et minimum d'un groupe de données. Cela permet également d'identifier des anomalies dans les données, qui sont inférieures ou supérieures aux valeurs extrêmes estimées. Il faut mentionner ici que les incohérences identifiées ne représentent pas forcément des données anormales (elles peuvent être par exemple le résultat de mesures en dynamique), et une analyse visuelle additionnelle a été faite pour vérifier l'anomalie. De plus, une vérification a été faite par la comparaison de la valeur en question avec les valeurs dans des ouvrages situés à proximité, lorsque ceux-ci sont disponibles. Par rapport aux chroniques avec des niveaux dynamiques renseignés, ces rabattements ont été éliminés seulement s'ils sont bien différenciés du niveau naturel.

### **Fiabilité et période d'étude**

À noter que les périodes de mesure des niveaux piézométriques sont très variables d'un forage à l'autre. L'utilisation de chroniques longues est privilégiée pour maximiser la période de l'analyse des tendances. Un minimum de dix années mesurées est requis. Pour cet exercice, les chroniques sont analysées jusqu'en décembre 2018. Une première caractérisation de disponibilité des données est présentée dans l'annexe 4.

Le nombre de chroniques utilisables pour l'analyse des tendances va dépendre du nombre de mesures que l'on s'autorise pour calculer les moyennes annuelles de niveau d'eau. Seulement 43 chroniques ont un minimum de 12 mesures par an (données mensuelles), ce qui correspond à un ensemble de chroniques de haute fiabilité. Pour augmenter le nombre de chroniques disponibles pour l'analyse des tendances, il faut alors envisager de diminuer le seuil à 4 mesures par an (groupe de moyenne fiabilité). Cette décision est justifiée dans un contexte de nappe captive où les variations observées ne sont pas liées aux aléas climatiques. L'utilisation des suivis trimestriels des niveaux piézométriques permet ainsi de doubler le nombre des chroniques utilisables. Cependant, les chroniques avec des données anciennes restent non considérées, ce qui empêche d'intégrer l'état initial de la nappe. Pour réussir à utiliser le maximum des données, des analyses de tendances seront faites en considérant l'ensemble des chroniques disponibles, soit 109 chroniques (groupe de faible fiabilité). Cependant, ces résultats devront être considérés avec précaution, et peuvent éventuellement être interprétés en les confrontant avec les résultats des groupes de moyenne et haute fiabilité.

En résumé, le travail suivant a porté sur l'analyse de 109 chroniques, réparties en 3 niveaux de fiabilité (Figure 23) :

- 43 chroniques, avec au moins 10 années (consécutives ou non), avec un minimum de 12 mesures par an (forte fiabilité),
- 86 chroniques, avec au moins 10 années (consécutives ou non), avec un minimum de 4 mesures par an (moyenne fiabilité),
- 109 chroniques, avec au moins 10 années (consécutives ou non), avec un minimum d'1 mesure par an (faible fiabilité).

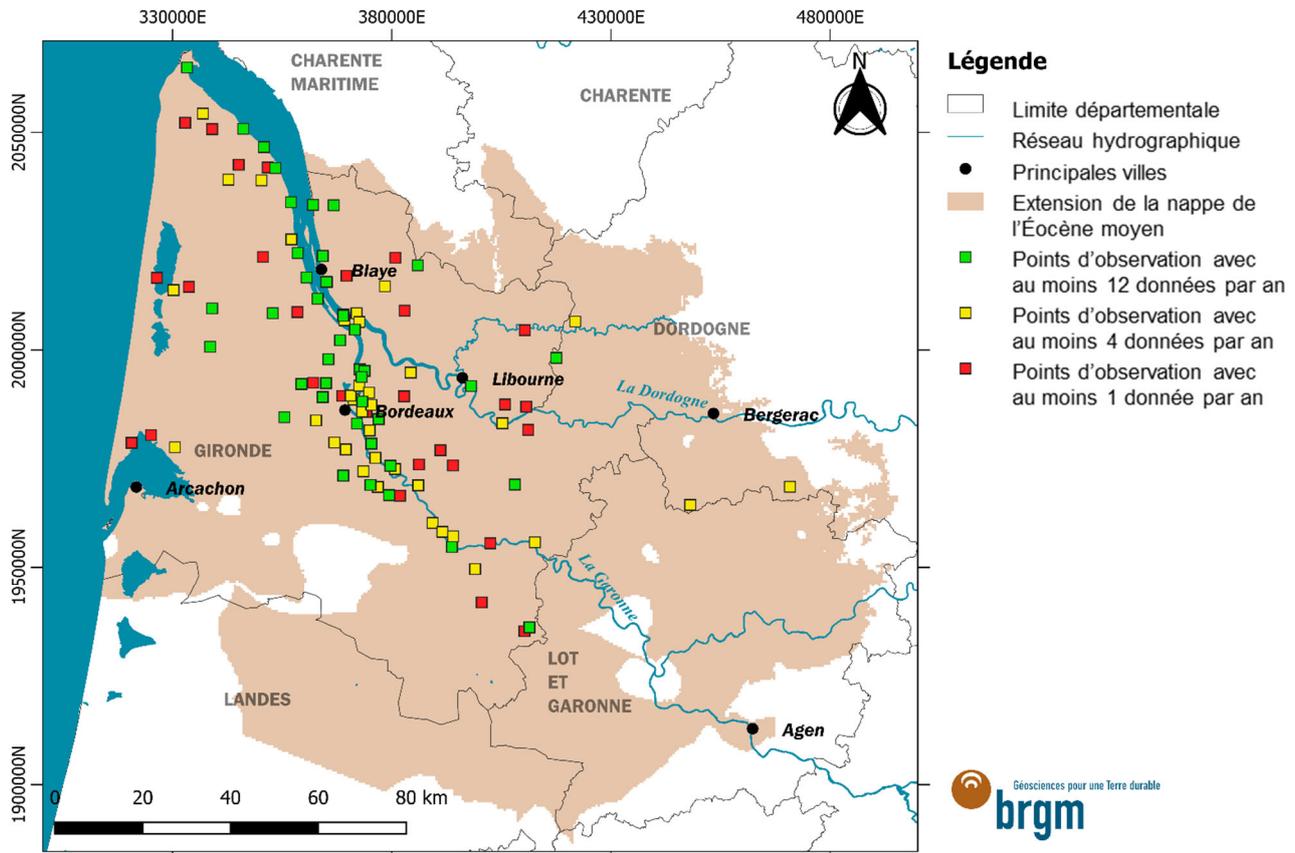


Figure 23 - Ensemble des points d'eau sélectionnés pour l'analyse des tendances piézométriques et les disponibilités des nombres de mesures par an

### b) Méthodologie

#### Analyse des tendances : test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall (M-K) est un test non paramétrique, qui permet de savoir si une droite de tendance, mise en évidence dans une série temporelle, est significative ou non. Cette tendance désigne un changement graduel, observable sur une période de temps suffisamment longue, de la valeur d'une variable, par exemple une moyenne annuelle. Il constitue un test très approprié en climatologie et en hydrologie, vu qu'une distribution normale des données n'est pas exigée. C'est le cas des séries temporelles des niveaux piézométriques (Hamed, 2008).

En considérant  $X_1, X_2, \dots, X_n$  comme une série temporelle, l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) pour le test de M-K est la stationnarité, où les variables sont indépendantes et identiquement distribuées. L'hypothèse alternative sera la tendance à la baisse ou à la hausse. Le test de Mann-Kendall est calculé par l'équation 1, où  $S$  correspond à la statistique de Mann-Kendall,  $n$  est le nombre de données,  $X_j$  et  $X_k$  sont deux valeurs successives de la série ( $j > k$ ), et  $\text{sgn}$  correspond à la fonction signe (équation 2).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

Équation 1

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

Équation 2

Chaque point  $X_k$  est utilisé comme référence, qui est comparée avec le reste des points  $X_j$ , par la fonction signe. On dénombre donc tous les couples  $(X_j, X_k)$ , le nombre de cas où la deuxième valeur est supérieure à la première, le nombre de cas où c'est l'inverse et la différence entre ces résultats. Si la série est stationnaire,  $S$  doit être proche de 0. La variance est calculée par l'équation 3, où  $q$  est le nombre d'échantillons avec la même valeur, et  $E_p$  désigne le nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant  $p$  valeurs. Si le nombre  $n$  de valeurs de la série est supérieur à 10, la mise en œuvre du test fait parvenir la variable aléatoire  $Z$  (équation 4). Dans ce cas, une valeur positive de  $Z$  indique une tendance croissante.

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q E_p(E_p-1)(2E_p+5) \right]$$

Équation 3

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S > 0$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S < 0$$

$$Z = 0 \text{ si } S = 0$$

Équation 4

La variable  $Z$  suit approximativement une loi normale centrée, réduite, donc une  $p$ -value sera calculée sur une fonction de répartition de loi normale, qui sera comparée au seuil de signification de 5 %.

D'autre part, la condition première d'application du test M-K est l'indépendance des valeurs de la série, qui ne doivent pas être autocorrélées. Cependant, pour les nappes captives, le niveau d'un mois donné est souvent lié aux niveaux des mois précédents. La portée temporelle de cette dépendance est d'autant plus grande, dépassant parfois l'année, que « l'inertie » de la nappe est importante. L'inertie d'une nappe peut se traduire par un « effet mémoire », qui peut être mis en évidence par un corrélogramme. Une variante du test de M-K est utilisée pour les données autocorrélées (Hamed et Ramachandra Rao, 1998), qui sera utilisée dans le cas d'autocorrélation supérieure à 0,6. La méthode corrigée consiste à calculer un nombre  $n^*$  d'observations supposées indépendantes, ce qui revient à substituer la série initiale de  $n$  valeurs autocorrélées avec l'équation 5, où  $\rho_k$  est l'autocorrélation d'ordre  $k$ , calculée sur le rang des valeurs de la série (les valeurs sont ordonnées), et non plus sur les valeurs elles-mêmes.

Une tendance sera considérée comme significative d'un point de vue statistique lorsque la  $p$ -value du test est inférieure à 5 %.

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)\rho_k$$

Équation 5

Si la tendance est significative, le calcul de la pente est réalisé avec la méthode de Sen (Sen, 1968). Dans cette méthode, la pente est la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de points.

$$a_{\text{Sen}} = \text{Médiane} \left[ \frac{(x_j - x_i)}{(j-i)} \right] \quad \forall j < i \quad \text{Équation 6}$$

$x_j$  et  $x_i$  sont respectivement la  $j^{\text{ième}}$  et la  $i^{\text{ième}}$  observation de la série.

### Détection de rupture de pente : test de Pettitt

La détection d'un changement de pente significatif, dans la série étudiée, est réalisée avec le test de Pettitt (Pettitt, 1979). Il s'agit, comme le test M-K, d'un test non paramétrique. Ce test, appliqué sur les chroniques non stationnaires, permet d'identifier une rupture de pente, pendant une période définie, et d'identifier les périodes de comportements différents de la nappe. La mise en œuvre du test repose sur la variable aléatoire présentée dans l'équation 7, et la fonction  $\text{sgn}$  est définie dans l'équation 2, comme dans le test de Mann-Kendall.

$$U(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad \text{Équation 7}$$

La variable  $U$  est similaire à la variable  $S$  du test Mann-Kendall, mais dans ce cas les couples de valeur ( $X_j$  et  $X_i$ ) sont formés par sélection d'une valeur de part et d'autre d'un point de rupture, supposé de rang  $k$  dans la série. En faisant varier  $k$  de 1 à  $n-1$ , on obtient donc une variable  $U$  fonction de  $k$ . La statistique de test est alors présentée dans l'équation 8.

$$Z = \max |U(k)| \quad k=1, \dots, n-1 \quad \text{Équation 8}$$

Lorsque les années de rupture significatives (5 %) sont identifiées, les pentes pré- et post-rupture sont recalculées.

### Utilisation du logiciel ESTHER pour les tests

Les tests réalisés dans cette étude ont été faits en utilisant ESTHER (Etude des Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R). Cet outil de calcul, développé par le BRGM en langage R, permet de faire des analyses des séries temporelles de niveaux d'eau, débits et pluies. Les tests de M-K et de Pettitt ont été appliqués aux chroniques piézométriques annuelles (moyenne annuelles) disposant d'un minimum de 10 valeurs, donc 10 années, qui sont consécutives ou non. Malgré le faible nombre de mesures pour l'ensemble des chroniques, les tendances ont quand même été calculées avec les chroniques, qui ne sont pas régulièrement suivies (groupe de faible fiabilité). Il faut considérer que, dans ces cas, les calculs des moyennes sont biaisés. Les résultats (pente et caractère significatif) doivent être considérés avec prudence et ne peuvent être qu'indicatifs. La figure 24 montre les résultats d'une tendance significative calculée avec le logiciel ESTHER. Le point 08273X0288 présente une autocorrélation d'ordre 1, supérieure à 0,6 ; alors le  $p$ -value à considérer est celui corrigé (Hamed, Rao).

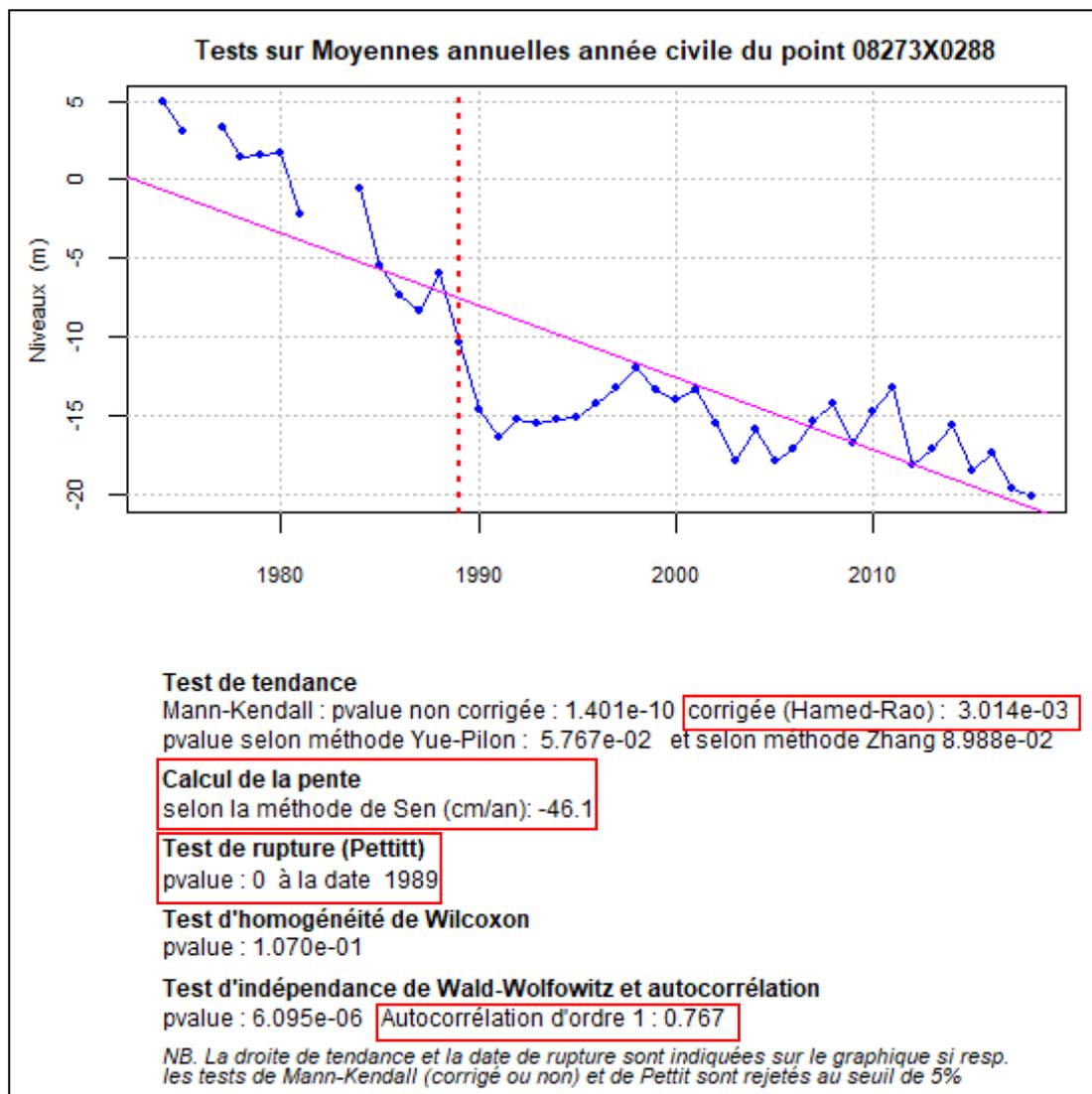


Figure 24 - Exemple de résultat d'une tendance significative, fournie par le logiciel ESTHER

### c) Résultats

#### Tendance de haute, moyenne et faible fiabilité

Afin de maximiser l'utilisation des chroniques disponibles concernant l'Éocène moyen, trois types d'analyse des tendances ont été faits. L'analyse de haute fiabilité (minimum de 12 mesures par an) représente une évaluation plus fiable des tendances des niveaux piézométriques. Exiger un minimum de 12 mesures par an permet de diminuer l'incertitude sur les résultats puisque les moyennes annuelles ne sont pas biaisées. Sur un total de 43 points étudiés, une tendance significative à la baisse est mise en évidence pour 21 chroniques piézométriques. Pour les analyses de moyenne fiabilité (minimum de 4 mesures par an), une tendance significative à la baisse est constatée pour 41 points d'un total de 80. La proportion des tendances significatives par rapport au total de points analysés est similaire à celle de haute fiabilité. Enfin, la troisième analyse présente des tendances significatives à la baisse pour 72 chroniques d'un total de 109, ce qui représente environ 66 % du total. La dispersion des pentes est assez similaire pour les trois analyses (Figure 25), ce qui montre aussi que les maximum et minimum des valeurs de pentes sont bien identifiés dans les trois analyses.

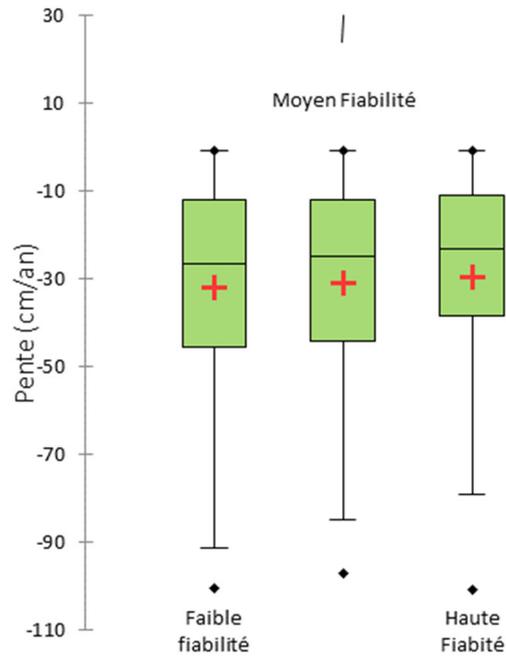


Figure 25 - Distribution de pentes calculées sur les analyses de faible, moyen et haute fiabilité

La figure 26 montre la répartition spatiale des résultats de haute fiabilité. On constate le faible nombre de points d'eau analysés par rapport aux 109 points sélectionnés. Ainsi, augmenter le nombre de chroniques considérées nous permet d'explorer les zones où le niveau piézométrique n'est pas suivi régulièrement : c'est le cas de la rive gauche de l'estuaire de la Gironde, le sud-est de la Garonne et le Bassin d'Arcachon. Les résultats complets sont présentés dans l'annexe 5.

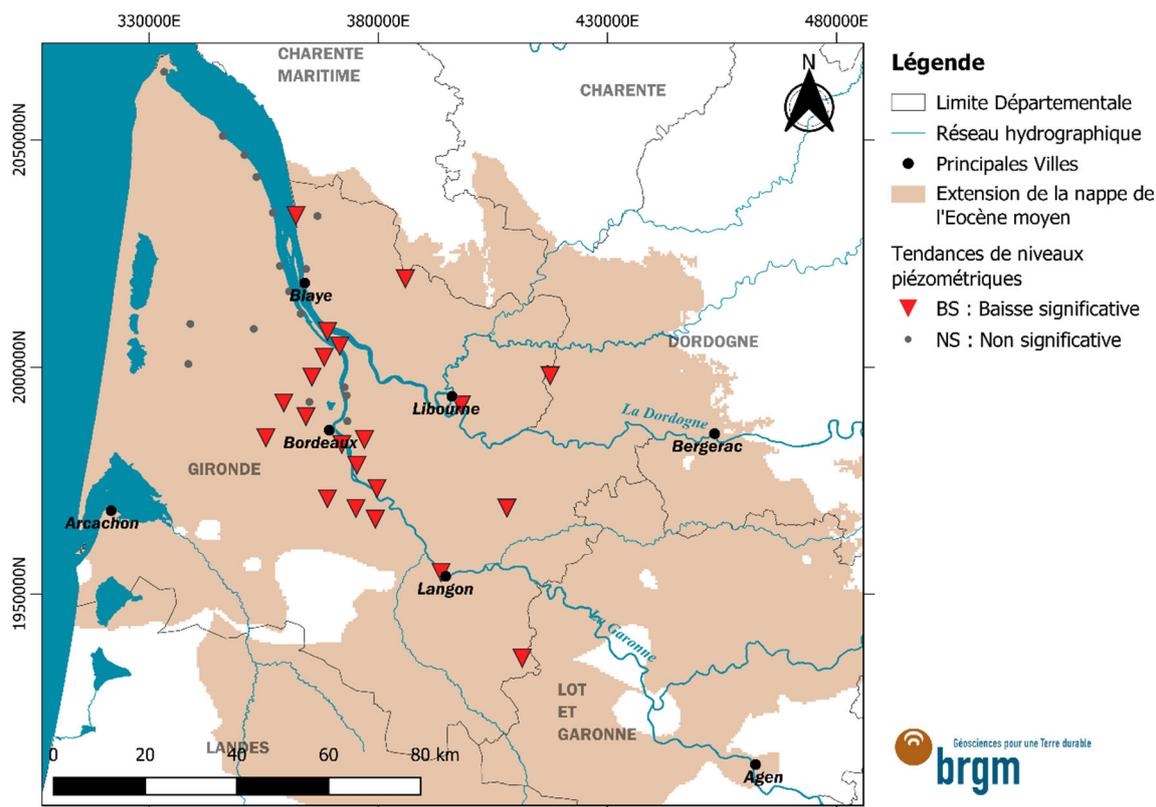


Figure 26 - Résultats d'analyses des tendances de haute fiabilité

### Variation spatiale de la pente des analyses des tendances

Des faibles pentes sont observées principalement dans le nord-ouest de l'aquifère de l'Éocène moyen, dans la zone autour de l'estuaire de la Gironde et du Bassin d'Arcachon (Figure 27). Ces faibles pentes peuvent être expliquées par des prélèvements moins importants que ceux autour de l'agglomération bordelaise. De plus, la proximité de l'océan, et surtout de l'estuaire, pourrait jouer un rôle important dans l'atténuation des baisses piézométriques.

On constate également que les valeurs de pentes augmentent vers le sud-est de l'aquifère, surtout autour de l'axe de la Garonne. Plus spécifiquement, les pentes les plus importantes sont observées autour de l'agglomération bordelaise et, de manière moindre, autour de la ville de Libourne. Cependant, les pentes les plus élevées sont localisées dans le sud-est du département de la Gironde : zone où le cône de dépression s'étend. Ce résultat est intéressant : même si les prélèvements d'eau ne sont pas de la même intensité qu'autour de la région bordelaise, une baisse importante vers le sud de département de la Gironde est identifiée.

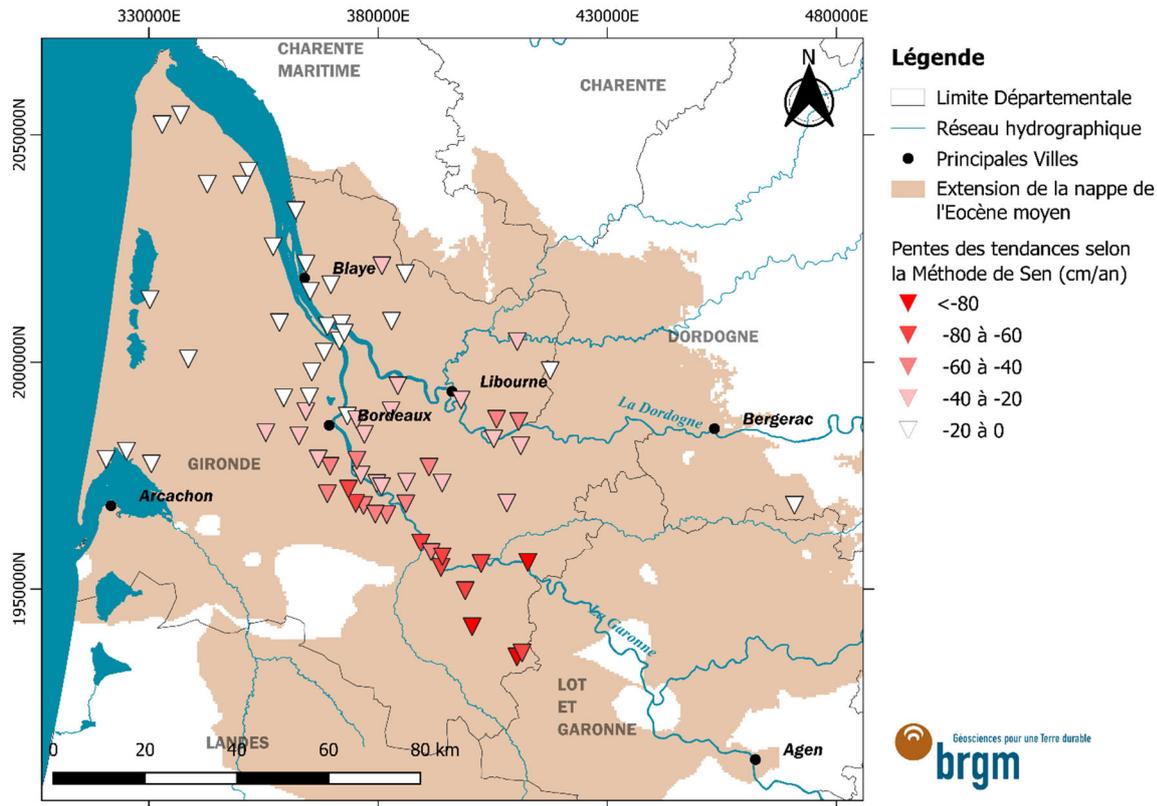


Figure 27 - Distribution spatiale des trois types de pentes (faible, moyen et forte pente)

### Détection des ruptures

Etant donné que les résultats issus des chroniques « haute fiabilité » n'explorent pas les valeurs de piézométrie les plus anciennes, un test de rupture de pente est fait à partir des tests de faible fiabilité. Sur les 109 chroniques analysées, des ruptures de pentes significatives sont trouvées pour 73 chroniques, dont 65 avec une tendance significative à la baisse. Des ruptures de pente sont constatées principalement entre les années 1988 et 1989 et entre les années 2000 et 2001. Donc, a priori, deux changements significatifs sur la tendance de l'ensemble des chroniques sont identifiés. Ces ruptures ne sont pas constatées dans le test réalisé à partir des chroniques « haute fiabilité », en raison notamment de la plus faible période d'analyse et du nombre inférieur de chroniques analysées.

La figure 28 montre une distribution spatiale des années de rupture. Il apparaît nettement une zone autour de l'agglomération bordelaise, où 22 chroniques ont montré une rupture de pente en 1988-1989. Une autre zone, plutôt au sud-est de l'estuaire de la Gironde, est identifiée, où 14 chroniques montrent une rupture de pente autour de 2000-2001.

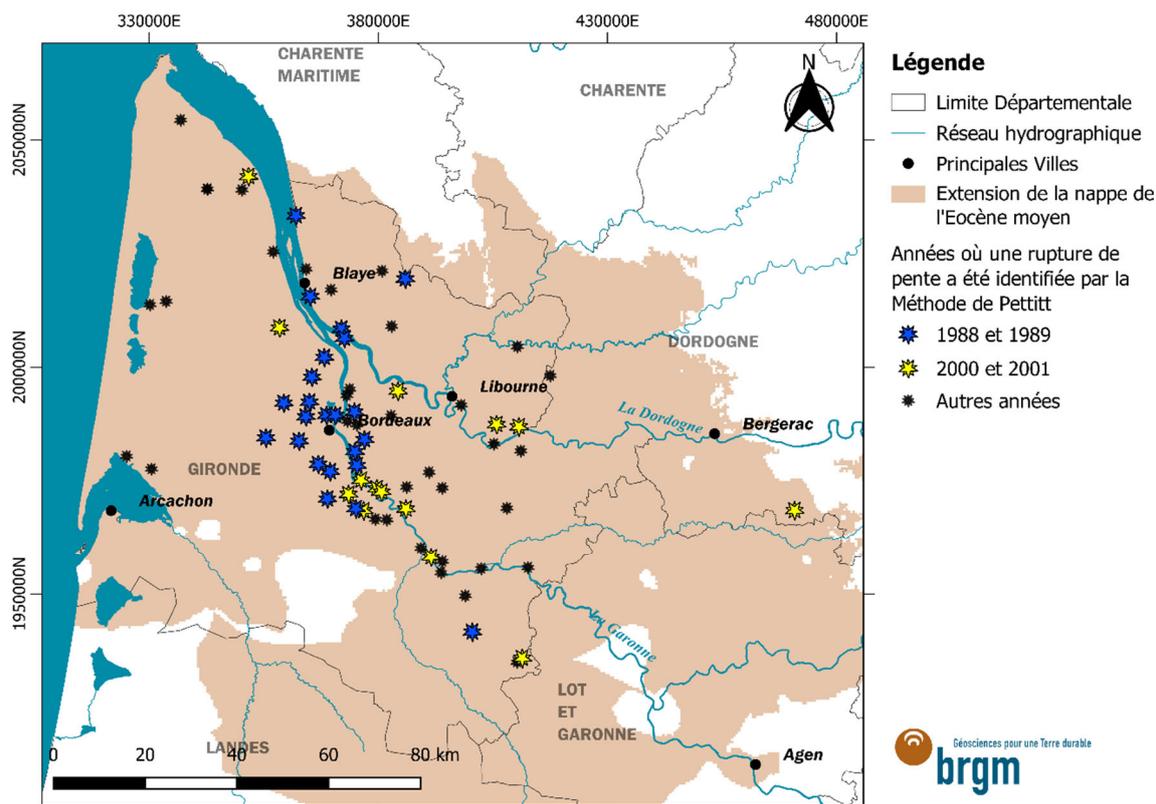


Figure 28 - Répartition spatiale des principales années de rupture, déterminée avec le calcul des tendances de faible fiabilité

### Caractérisation de périodes de variabilité temporelle du niveau piézométrique

Pour mieux caractériser la variabilité temporelle des niveaux d'eau, des analyses de tendances sont faites pour différentes sous-périodes, définies à partir des dates de ruptures les plus représentatives : 1988-1989 et 2001-2002. On cherche à déterminer les valeurs des pentes, pour les différentes sous-périodes, et à vérifier s'il n'existe pas d'autres ruptures significatives au sein de ces périodes. Le tableau 6 résume la période et les variables analysées. Les résultats complets sont présentés dans l'annexe 6.

Evaluation	1	2	3	4	5
Période *	avant 1989	avant 2001	1989 - 2001	après 1989	après 2001
Variable	pente	rupture et pente	pente	rupture et pente	pente

\*La période de chaque évaluation est indépendante à chaque chronique

Tableau 6 - Variables d'évaluation pour cinq sous-périodes

Pour la période d'analyse avant 2001, l'année 1989 se maintient comme principale année de rupture pour l'ensemble des chroniques piézométriques. Cependant, une deuxième date de rupture, assez importante, est identifiée en 1987, avec 10 valeurs (Figure 29.a). D'autre part, pour le cas de la période après 1989, la rupture en 2001 est confirmée avec un nombre de 11 ruptures

(Figure 29.b). Dans cette période, les ruptures sont plus distribuées entre les années 2002 et 2003. En conséquence, ces résultats ne permettent pas d'affirmer que les ruptures globales se sont produites en 1988-1989 et 2000-2001, mais que les périodes de changement sont plutôt distribuées entre 1986-1989 et 2001-2003.

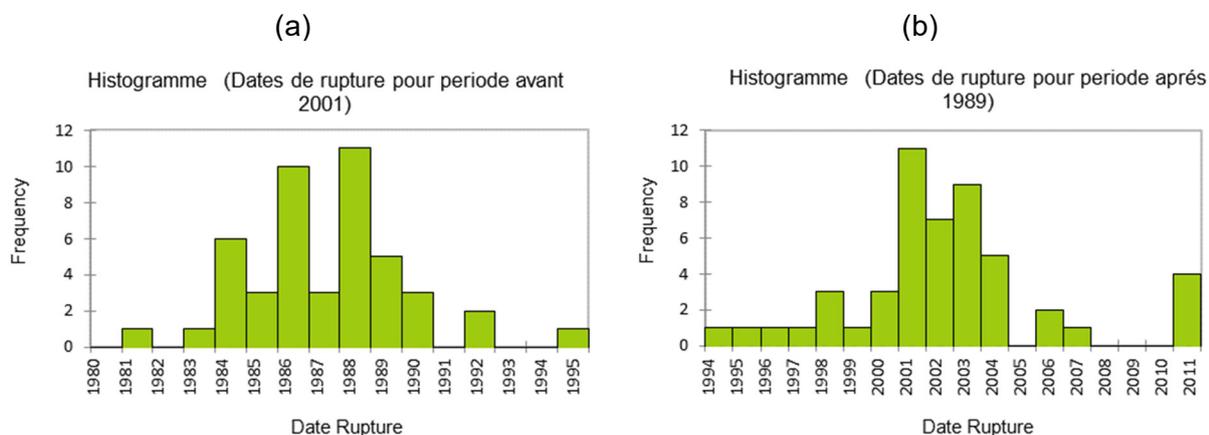


Figure 29 - Nombre de ruptures, constaté par an, sur l'analyse de rupture de pente de la période avant l'année 2001 (a) et après l'année 1989 (b)

Des tendances à la baisse significative ont été constatées au cours des cinq sous-périodes analysées (Figure 30.a). Par rapport aux tendances à la baisse, on remarque des pentes assez importantes, principalement pendant la période avant 1989, qui varient de -7 cm/an jusqu'à -125 cm/an, avec une pente moyenne de -67 cm/an. Ces résultats représentent 39 % du total des chroniques analysées (72 chroniques). Le pourcentage est relativement faible du fait qu'environ 50 % des chroniques ne comptent pas assez de données pour cette période. C'est au cours de la période plus récente, après 2001, que les valeurs de pente diminuent, avec une moyenne de -28 cm/an, et que les écart-types sont moins importants. Il faut remarquer que les périodes sont indépendantes à chaque chronique, et seule l'analyse de quelques chroniques est faite jusqu'à l'année 2018. Ainsi, on constate que la valeur de la pente diminue pour les périodes plus actuelles (après 1989 et après 2001). Ce changement de comportement peut être le résultat d'une diminution des prélèvements d'eau ponctuelle, ou d'une meilleure répartition des volumes prélevés dans la zone d'étude. Ces explications restent à être étudiées et vérifiées.

C'est pour la période 1989-2001 que des résultats significatifs des tendances à la baisse et à la hausse ont été observés (Figure 30.b). Ainsi, deux groupes de chroniques sont identifiés : groupe 1, qui synthétise les chroniques avec une tendance à la hausse pour la période 1989-2001 et groupe 2, qui regroupe celles avec une tendance à la baisse pour la même période (Figure 31).

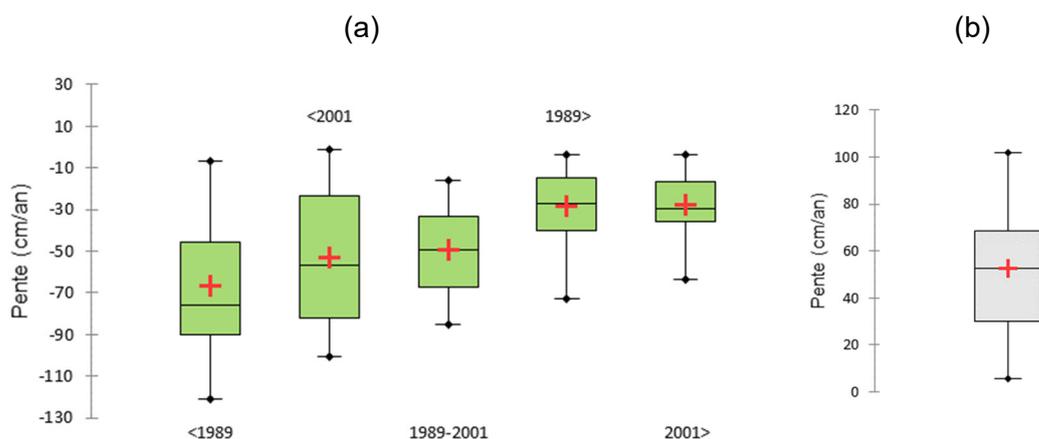


Figure 30 - Dispersion des résultats des pentes : (a) négatives, observées pour les 5 périodes définies et (b) positives pour la période de 1989 à 2001

Des chroniques représentatives sont présentées dans la figure 32 et dans le tableau 7 pour le groupe 1 ; et dans la figure 33 et le Tableau 8 pour le groupe 2.

Le groupe 1 est caractérisé par un comportement similaire des niveaux piézométriques, sur l'ensemble des points renseignés. Ces points sont localisés autour de l'agglomération bordelaise et aussi en rive droite de la Dordogne, là où historiquement se concentrent les prélèvements les plus importants. Les niveaux historiques des années 1970 nous permettent de constater un état initial des côtes piézométriques (entre 5 et 10 m NGF). La rupture de 1988-1989 est bien observée visuellement, tandis que la rupture entre 2000 et 2001 est moins marquée. On remarquera également que, avec ces exemples de chroniques, une rupture au cours de l'année 2011 est observable visuellement, par contre n'a pas été identifiée significativement par le test de rupture (Figure 29.b).

Par rapport aux périodes analysées, les pentes, au cours de la période avant 1989, sont assez distinctes et des extrêmes sont remarqués. Le point 07796X0069 montre la pente la plus faible : de l'ordre de -7 cm/an (niveau de significativité de 10 %) ; alors que les points 08037X0169, 08273X0288 et 08276X0085 montrent des pentes bien plus élevées, pouvant atteindre 1 m de baisse par an. Ces résultats sont attendus en raison de la proximité de ces points avec l'agglomération bordelaise et ses forts prélèvements : le point 08276X0085 est d'ailleurs situé dans le centre du cône de dépression de 2015. En revanche, la tendance à la hausse, identifiée pour la période 1989-2001, présente des valeurs de pente entre 20,7 cm/an et 42,2 cm/an. Ces pentes positives représentent une remontée de la piézométrie de la nappe possiblement en lien avec une légère stabilisation des prélèvements d'eau.

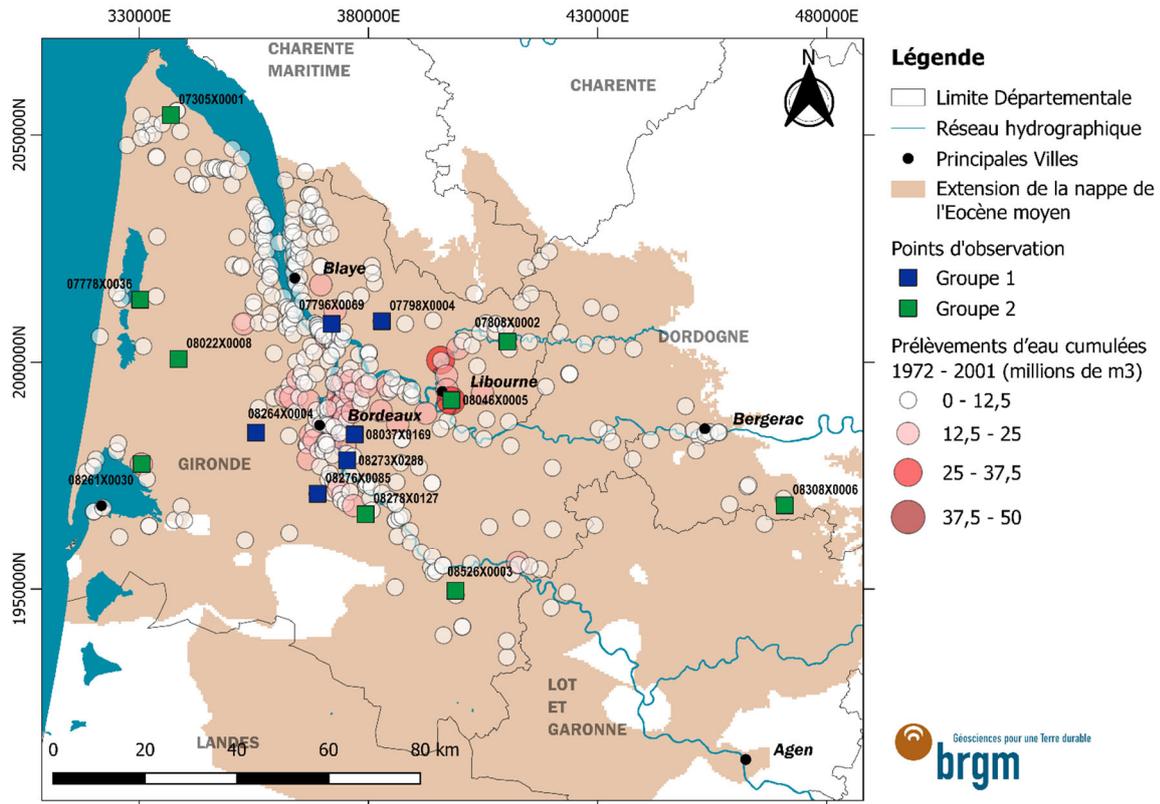


Figure 31 - Points d'eau représentatifs en comparaison avec la totalité d'eau prélevée de 1972 à 2001

Point d'eau (Code BSS°)	Avant 1989		Avant 2001		1989-2001		Après 1989		Après 2001		Ensemble de la période de la chronique					
	Pente (cm/an)	P- Value	Date Rupture	P- Value	Pente (cm/an)	P- Value	Date Rupture	P- Value	Pente (cm/an)	P- Value	Pente (cm/an)	P-Value	Date Rupture	P- Value	Debut	Fin
07796X0069	-6.8	0.099	1988	<b>0.000</b>	30.0	<b>0.013*</b>	2002	0.103	-8.2	<b>0.034</b>	-11.5	<b>0.000*</b>	1988	<b>0.000</b>	1970	2018
07798X0004	-	-	1989	0.078	-	-	1997	<b>0.007</b>	-	-	-17.9	<b>0.001*</b>	1997	<b>0.003</b>	1986	2013
08037X0169	-76.0	<b>0.000*</b>	1984	<b>0.000</b>	42.2	<b>0.000*</b>	2011	0.264	-13.5	0.112	-33.9	<b>0.001*</b>	1988	<b>0.000</b>	1963	2018
08264X0004	-46.4	<b>0.002*</b>	1985	<b>0.000</b>	21.6	<b>0.038</b>	2011	<b>0.008</b>	-29.0	<b>0.014*</b>	-24.7	<b>0.000*</b>	1989	<b>0.000</b>	1965	2018
08273X0288	-99.7	<b>0.000*</b>	1988	0.000	20.7	0.161	2001	<b>0.006</b>	-21.5	<b>0.041</b>	-46.1	<b>0.003*</b>	1989	<b>0.000</b>	1974	2018
08276X0085	-90.0	<b>0.000</b>	1986	<b>0.000</b>	37.6	0.077	2011	<b>0.008</b>	-56.1	<b>0.001*</b>	-57.4	<b>0.000*</b>	1989	<b>0.000</b>	1970	2018

GROUPE 1

\*P-value corrigé (autocorrélation > 0.6)  
- Données insuffisantes

Tableau 7 - Résultats d'analyses des tendances de niveaux piézométriques du groupe 1

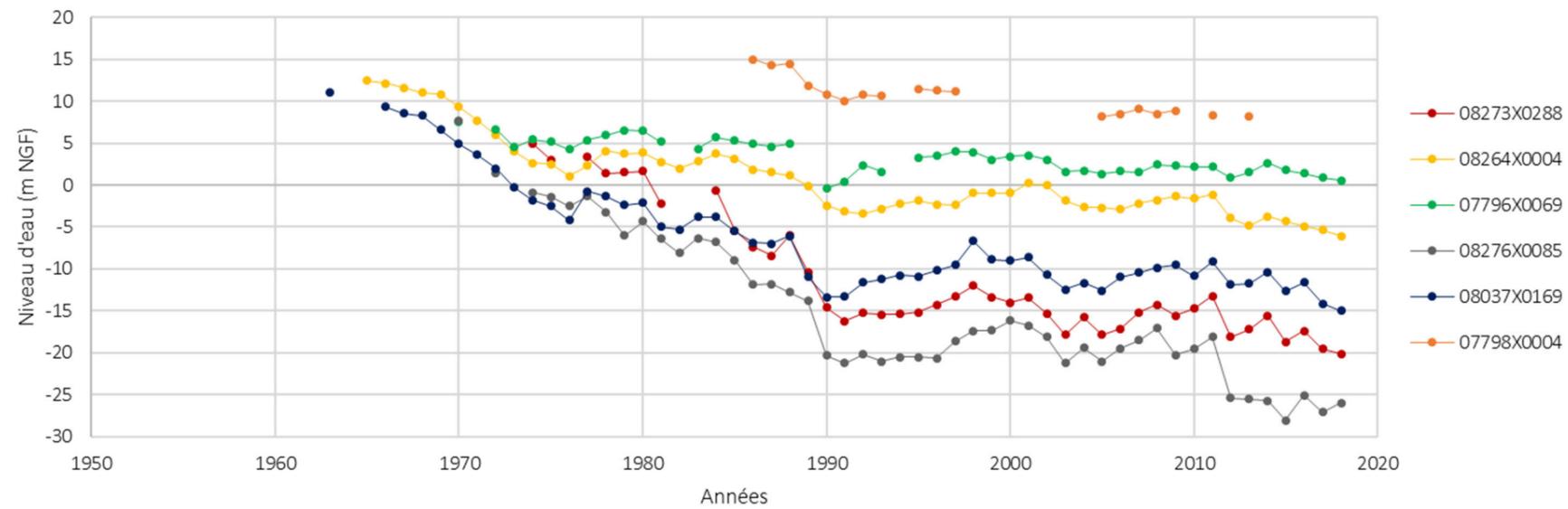


Figure 32 - Chroniques piézométriques annuelles représentatives (groupe 1 : chroniques avec une tendance à la hausse au cours de la période 1989-2001)

Point d'eau (Code BSS)	< 1989		< 2001		1989-2001		1989 >		2001 >		Ensemble de la période de la chronique					
	Pente (cm/an)	P- Value	Date Rupture	P- Value	Pente (cm/an)	P- Value	Date Rupture	P-Value	Pente (cm/an)	P- Value	Pente (cm/an)	P-Value	Date Rupture	P-Value	Debut	Fin
07305X0001	-7	<b>0.004</b>	1981	0.082	-7.3	0.211	2002	0.106	-16.1	0.901	-3.8	<b>0.000</b>	1997	<b>0.002</b>	1960	2018
07778X0036	-	-	-	-	-	-	2006	<b>0.002</b>	-8	<b>0.000</b>	-8.7	<b>0.000*</b>	2006	<b>0.002</b>	1997	2018
07808X0002	-12.9	<b>0.000</b>	1981	<b>0.001</b>	-32.5	<b>0.000</b>	1999	<b>0.003</b>	-13.9	0.211	-22.4	<b>0.000*</b>	1995	<b>0.000</b>	1951	2011
08022X0008	-	-	-	-	-	-	-	-	-3.1	0.104*	-3.1	<b>0.104*</b>	2014	0.106	2004	2018
08046X0005	-	-	1990	<b>0.001</b>	-24.8	<b>0.000*</b>	2003	<b>0.000</b>	-20.1	<b>0.001*</b>	-35.3	<b>0.000*</b>	1999	<b>0.000</b>	1981	2018
08261X0030	-29.7	<b>0.000*</b>	1986	<b>0.001</b>	-17.4	0.071	2002	<b>0.000</b>	-7.3	0.115	-19.7	<b>0.000*</b>	1997	<b>0.000</b>	1971	2016
08278X0127	-98.3	<b>0.000</b>	1988	<b>0</b>	-15.9	<b>0.003</b>	2002	<b>0.000</b>	-31.1	<b>0.000*</b>	-47	<b>0.000*</b>	1998	<b>0.000</b>	1970	2018
08308X0006	-	-	-	-	-7.7	0.108	2001	<b>0.003</b>	-5	<b>0.033</b>	-6.4	<b>0.000*</b>	2001	<b>0.003</b>	1994	2013
08526X0003	-76	<b>0.000*</b>	1984	<b>0</b>	-74.8	<b>0.000*</b>	2003	<b>0.000</b>	-37.7	<b>0.000*</b>	-73	<b>0.000*</b>	1993	<b>0.000</b>	1959	2018

\*P-value corrigé (autocorrélation > 0.6)  
 - Données insuffisantes

Tableau 8 - Résultats d'analyses des tendances de niveaux piézométriques du groupe 2

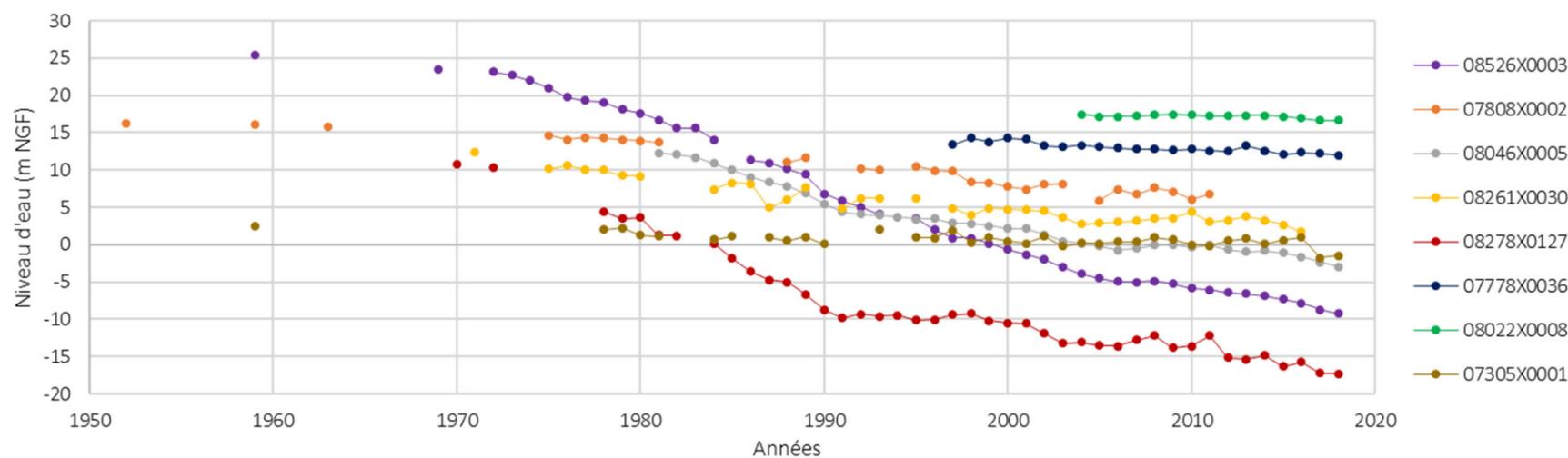


Figure 33 - Chroniques piézométriques annuelles représentatives (groupe 2 : chroniques avec une tendance à la baisse au cours de la période 1989-2001)

D'autre part, le groupe 2 est constitué de points situés dans des zones éloignées de l'agglomération bordelaise. Pour l'ensemble de ces points, la rupture de 1988-1989 n'est pas identifiée, et une rupture entre les années 2001 et 2003 n'est pas non plus évidente.

Le comportement de la nappe dans le Médoc (région au nord-ouest de Bordeaux, comprise au nord d'une ligne Arcachon-Bordeaux, et s'étendant de la façade atlantique jusqu'en rive gauche de la Garonne puis de l'estuaire) est représenté par le forage 07305X0001, qui montre une tendance à la baisse non significative pendant la période 1989-2001, et une tendance significative de -3,8 cm/an pour l'ensemble de la période 1960-2018 (Tableau 8). Afin de mieux représenter le comportement de cette nappe dans le Médoc, les points 07778X0036 et 08022X0008 ont été ajoutés, même si les périodes d'analyse sont courtes et l'analyse pour la période 1989-2001 est impossible en raison d'un nombre de données insuffisant. Ces points présentent également des pentes très faibles et des tendances non significatives, négligeables par rapport aux autres points d'observation. Ainsi, cette zone peut être considérée comme actuellement stable, non impactée par les ruptures de 1988-1989 et 2001-2003, et peu influencée par les volumes d'eau prélevés dans l'ensemble de l'aquifère éocène. On constate également que le point 08261X0030, représentatif du secteur du Bassin d'Arcachon, présente le même comportement, mais avec une tendance significative à la baisse plus prononcée d'environ -20 cm/an.

Dans la zone du Libournais, donc autour de la commune de Libourne, deux chroniques peuvent être considérées comme représentatives : 07808X0002 et 08046X0005. En général, elles ne suivent pas un comportement similaire, mais elles présentent des tendances significatives pour la période 1989-2001, avec des pentes négatives importantes (-25 à -32 cm/an).

Les points 08278X0127 et 08526X0003 sont caractéristiques de la zone sud du département de la Gironde. Le premier présente des ruptures assez marquées en 1988 et 2002, et une pente négative pour la période 1989-2001 (-15,9 cm/an), qui correspond aux mêmes caractéristiques que celles du groupe 1. Par contre, le second est suffisamment éloigné de la zone fortement prélevée, pour qu'une stabilisation des prélèvements, comme celle de 1989, n'entraîne pas un changement de tendance.

Finalement, les résultats du point 08308X0006 symbolisent les signaux piézométriques de la bordure de l'aquifère. Ce point présente une tendance significative très faible à la baisse, ce qui est logique en raison des faibles volumes prélevés autour de ce point.

#### *d) Conclusion et perspectives de l'analyse des tendances*

L'analyse statistique de 109 séries piézométriques, disponibles pour l'aquifère de l'Éocène moyen du Bassin nord-aquitain, couvrant une période allant des années 1950 à 2018, permet d'initier un travail de caractérisation des tendances globales, en calculant une pente significative, en détectant des ruptures et en identifiant des sous-périodes de variabilité homogène de la piézométrie de cet aquifère.

Les analyses des tendances ont été réalisées avec le test non-paramétrique de Mann-Kendall et son alternative corrigée, dans le cas des données autocorrélées (cas fréquent des niveaux piézométriques de nappes captives). La principale contrainte identifiée pour l'utilisation de cette méthode est le minimum des données exigées par an, par point d'observation. En effet, pour assurer une bonne représentativité des moyennes annuelles et des résultats non biaisés, un suivi régulier sur toute l'année est nécessaire (une fréquence mensuelle est souhaitable). Cependant, le suivi journalier des niveaux d'eau n'est disponible que pour très peu de points d'observation, disposant d'enregistreurs automatiques, et au cours de périodes relativement récentes (depuis

environ 15 années et le déploiement plus systématique dans le cadre des réseaux de suivi des nappes).

En première approche, deux partis pris ont été décidés pour faire l'analyse : (1) utiliser un minimum de 12, 4 et 1 donnée(s) par an, pour la réalisation de trois types d'analyses des tendances et (2) réaliser une analyse pour l'ensemble de la période disponible (un minimum de 10 années, consécutives ou non, disposant de niveaux piézométriques est cependant retenu), même si des données sont manquantes pour la moyenne annuelle. La problématique d'utilisation du test de Mann-Kendall avec des données manquantes a été abordée (Ramos et Cordeiro, 2013). Les auteurs ont montré que 15 % de données manquantes dans une série temporelle permettent toujours d'identifier une tendance similaire à la tendance calculée avec les données complètes. Cependant, il faut garder à l'esprit que cette considération peut conduire à une surestimation ou une sous-estimation de la pente réelle de la chronique analysée. Ainsi, les résultats, présentés dans ce travail préliminaire, doivent être utilisés de manière indicative et devront être précisés par la suite. Ils permettent cependant d'avoir une tendance générale.

Ces premiers résultats globaux montrent une prédominance des tendances à la baisse pour l'aquifère de l'Éocène moyen (seuil de significativité de 5 %). Ces tendances illustrent principalement l'exploitation historique et intensive de l'aquifère de l'Éocène moyen, démarrée principalement dans les années 1950 et qui n'a cessé d'augmenter jusqu'à la fin des années 1990, pour se stabiliser ensuite. Ces résultats sont donc cohérents avec l'évolution de la dépression piézométrique qui a commencé à se former dans les années 1950 (Bellegarde, 1969).

Trois intervalles de comportement de la nappe ont été distingués par le test de rupture de Pettitt :

1. Le premier correspond à une période, avant les années 1987-1989, coïncidant avec l'augmentation continue des prélèvements dans la nappe de l'Éocène moyen durant cette même période.
2. Le deuxième correspond à la période 1989-2001, qui est identifiée sur les points d'observations, situés en dehors du centre du cône de dépression piézométrique, formé au droit de l'agglomération de Bordeaux, depuis les premières exploitations de cette nappe. Ces points montrent des tendances significatives à la hausse. Pour les points situés au droit de la dépression, les tendances se poursuivent à la baisse, mais avec des intensités (ou pentes) plus faibles. Cela s'explique par une stabilisation des prélèvements, qui réduit le creux piézométrique et permet une légère remontée de la nappe dans les secteurs situés autour de Bordeaux.
3. Enfin, l'intervalle 2001-2018 montre des tendances significatives à la baisse, pour la majorité des points. Ces tendances ne semblent pas corrélées avec des prélèvements plus importants.

Les résultats détaillés, obtenus des tests de rupture, confirment ces changements de tendances, qui sont occasionnés entre 1986 et 1989, puis entre 2001 et 2003.

Ces différents comportements devront, dans la suite du travail, être mis en perspective avec les données de prélèvements (données globales et par secteur), voire des données climatiques, afin de comprendre les intervalles observés, notamment le dernier (2001-2018) qui, en première approche, n'est pas corrélé à la chronique des prélèvements annuels totaux dans l'Éocène moyen.

La plupart des points de pentes « faibles » (entre 0 et -20 cm/an) sont situés dans le Médoc et le Blayais, où également environ 65 % des tendances non significatives apparaissent. Le point 07305X0001, situé dans la zone nord du Médoc, présente une chronique piézométrique assez

suivie pour la période de 1978-2018, avec une tendance significative à la baisse, mais de faible importance (-3,8 cm/an). Ces premières observations permettent d'identifier deux zones de la nappe (le Médoc et le Blayais) apparemment stables, plus faiblement impactées par les prélèvements. Il faut garder à l'esprit que les tendances non significatives dans cette zone peuvent être dues aux courtes périodes d'analyse (périodes récentes) et au faible nombre de données. Il s'agira de confirmer, par la suite, ce comportement et de le comprendre. Des éléments de compréhension seront probablement apportés par l'analyse des cartes piézométriques qui mettent en lumière deux crêtes piézométriques, situées dans le Médoc et le Blayais, et pouvant être en partie responsables de l'atténuation des baisses de niveaux dans l'Éocène moyen. La première crête, située dans le Médoc, divise les écoulements d'eau souterraine vers l'océan atlantique et vers l'estuaire de la Gironde et la Garonne. La deuxième crête piézométrique est plus accentuée à cause de l'exploitation intensive historique dans la zone bordelaise. Elle sépare les écoulements d'eau vers la zone fortement exploitée (au sud de Bordeaux) et vers l'estuaire de la Gironde. D'autres éléments de réponse pourront être recherchés du côté des quantités de prélèvements et de la proximité avec les zones de recharge (notamment pour le secteur du Blayais).

D'autre part, au niveau du cône de dépression, les tendances significatives à la hausse, pendant la période 1989-2001, ont entraîné une atténuation de la pente globale des points autour et dans le cône de dépression. Les pentes les plus fortes montrant une baisse ( $< -60$  cm/an) sont alors observées à proximité de la bordure du cône de dépression, au sud-est de Bordeaux vers Langon, comme par exemple le point 08526X0003. Autour de ces points, les prélèvements historiques sont largement inférieurs au reste des volumes prélevés dans l'Éocène moyen, ce qui nous amène à penser que la baisse de niveau piézométrique est due au fait que la nappe n'est pas encore à l'équilibre. La nappe, dans cette zone, continue à voir les niveaux piézométriques diminuer, même si les prélèvements se sont stabilisés ; alors cette baisse est potentiellement influencée par les prélèvements, réalisés dans le secteur bordelais. De plus, dans cette zone éloignée des zones de recharge, une atténuation, entraînée par la recharge, n'est pas possible. Dans la zone autour de la ville de Libourne, à l'instar de la zone sud de la Gironde, les ruptures ne sont pas si évidentes, et des tendances significatives à la baisse sont constatées.

Au final, ces premiers résultats ont permis de faire une première caractérisation spatiale et temporelle des chroniques piézométriques. Ils permettent de constater la réactivité de la nappe par zone (estuaire, agglomération bordelaise, zone sans recharge hors agglomération et zone avec recharge hors agglomération), en lien avec les prélèvements effectués dans la nappe. Cependant, pour réussir à faire une liaison plus détaillée et significative entre les volumes prélevés et les tendances observées sur les niveaux piézométriques, une caractérisation et une quantification des évolutions temporelles locales des volumes prélevés sont nécessaires. Ceci sera envisagé dans la suite de cette étude. De la même manière, une analyse de la variable climatologique actuelle devra être considérée pour déterminer si la recharge a un rôle d'atténuation, pour les points situés à proximité des affleurements à court terme.

### **3.2. CALAGE DU MONA VERSION 3.5**

La détermination des paramètres du modèle est une étape incontournable du processus de modélisation. Cette estimation est obtenue en inversant le problème direct, par « calage d'historique ». Les observations sont assimilées de sorte à contraindre les paramètres. Les techniques d'estimation des paramètres, par approche inverse, ont connu, ces dernières années, d'importantes avancées, allant du calage manuel par essai-erreur formalisé (Flipo et al., 2012) au calage algorithmique (Carrera, 1986 ; Zhou et al., 2014). Le principe de base consiste en l'ajustement de variables simulées (niveaux piézométriques, débits de rivières) par le modèle aux variables observées. Cette procédure est appelée « calage d'historique ».

Jusque-là, toutes les versions du MODèle Nord-Aquitain ont été calibrées de façon manuelle par essais-erreurs. Cette méthode manuelle, en plus d'être très fastidieuse et chronophage, ne permet d'aboutir qu'à une solution unique. En effet, à cause d'une forte corrélation entre un très grand nombre de paramètres, il est possible que différentes combinaisons de valeurs conduisent à un ajustement équivalent entre simulations et observations.

La méthode manuelle ne permet donc pas de s'assurer d'atteindre l'optimum, ni de quantifier l'incertitude liée à cette estimation. L'utilisation des méthodes algorithmiques permet d'automatiser le processus de calibration du modèle, de sorte à déterminer les paramètres qui produisent le meilleur ajustement, en minimisant un critère d'ajustement, que l'on appelle « fonction objectif ». Il faut bien garder cependant à l'esprit que les méthodes algorithmiques ne sont pas automatiques et qu'elles nécessitent l'implication d'un hydrogéologue tout au long du processus. Elles nécessitent également une phase d'essai-erreur, mais permettent cependant d'explorer un bien plus grand nombre de possibilités.

Ici, nous nous basons sur les travaux de Aissat (2021) pour estimer les paramètres du MONA 3.5 avec une approche algorithmique dite déterministe, adaptée aux modèles hydrogéologiques régionaux avec de nombreux paramètres, tel que le MONA. Pour cela, la méthode de Gauss-Newton, modifiée par Levenberg-Marquardt (GLMA), implémentée dans les logiciels PEST (Doherty, 2015) et PEST++ (Welter, White et Doherty, 2015) a été utilisée.

On dénombre 8 types de paramètres à estimer : les paramètres hydrodynamiques distribués (perméabilités horizontales des aquifères, perméabilités verticales des épontes, coefficients d'emmagasinements captifs et libres), les perméabilités des fonds de rivières et les paramètres hydrologiques de Gardénia, permettant de contraindre la recharge (la capacité de rétention du sol (mm), ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » (RDE), le RUIPER (mm) correspondant à la hauteur d'eau dans le réservoir représentant la Zone Non Saturée pour laquelle il y a égale répartition entre écoulement rapide ou ruissellement et la percolation, et le temps de demi-percolation (mois).

### 3.2.1. Méthode déterministe basée sur les dérivées partielles (GLMA)

Le GLMA permet de converger, par procédé itératif, vers une solution considérée comme optimale au regard du critère d'ajustement (Figure 34). Ce dernier, couramment appelé « fonction objectif » -  $\phi$  (Équation 9), correspond à la somme du carré des résidus ( $r$ ) entre valeurs observées et simulées, pondérés par l'incertitude de la mesure ( $w$ ).

$$\phi = \sum (wr)^2 \quad \text{Équation 9}$$

À chaque itération, une version linéarisée du modèle est recalculée avec les paramètres mis à jour, à travers le calcul d'une matrice *jacobienne* qui contient les sensibilités de chaque paramètre, à chacune des observations. Pour ce faire, l'algorithme doit réaliser au minimum  $n+1$  appels de modèles, où  $n$  est le nombre de paramètres ajustables du modèle. Au terme de chaque itération, le vecteur de mise à jour des paramètres est déterminé en croisant la direction de plus grande pente de la « fonction objectif » -  $\phi$  et la résolution du système matriciel linéarisé (approche de Marquardt). L'estimation des paramètres converge lorsque le vecteur de mise à jour des paramètres ne conduit plus à une baisse notable de la « fonction objectif ».

Afin de tendre vers une solution unique, l'algorithme peut intégrer deux méthodes de régularisation :

- premièrement, la régularisation de *Tikhonov* (Tikhonov et Arsenin, 1977), qui considère les valeurs « préférées » des paramètres au regard des informations a priori (essais de nappe).

Elle permet d'assurer qu'outre l'ajustement aux valeurs observées, les valeurs estimées des paramètres restent cohérentes d'un point de vue hydrogéologique

- deuxièmement, la régularisation mathématique par décomposition en valeurs propres (SVD), qui permet de réduire l'espace des solutions sur la base d'un seuil de troncature, en ignorant l'espace nul, pour obtenir un problème inverse « bien posé » d'un point de vue mathématique.

Pour utiliser le logiciel d'estimation des paramètres PEST avec MARTHE (code de calcul qu'utilise le MONA), nous nous sommes servis de l'interface de couplage PyMARTHE, développé dans le cadre de la thèse de Ryma Aissat (Aissat, 2021) sous la supervision d'Alexandre Pryet.

Avec un nombre important de paramètres impliqués (> 1 000), de nombreux appels au modèle doivent être réalisés (> 10 000). Pour que la procédure d'estimation des paramètres ne dépasse pas quelques jours, il est nécessaire de réaliser les exécutions du modèle en parallèle. La gestion des appels du modèle est réalisée par PEST, sur le cluster de calcul Leto du BRGM, permettant de mutualiser plusieurs processeurs mis en réseau.

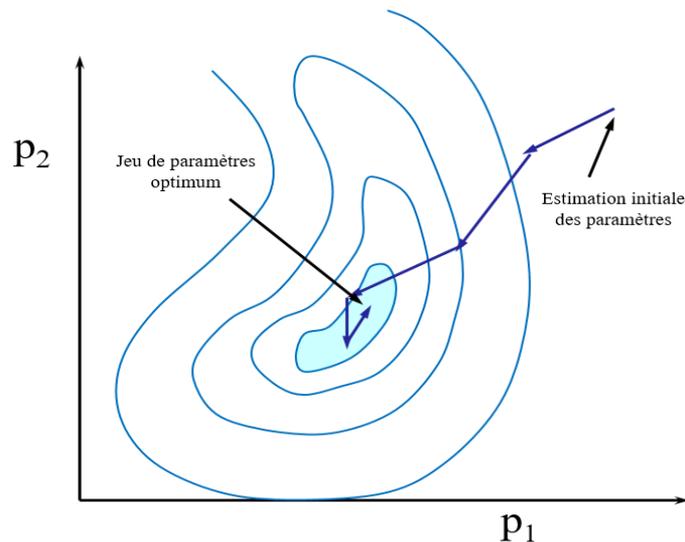


Figure 34 - Contours de la « fonction objectif » dans l'espace des paramètres ( $P_1$  et  $P_2$ ) (Doherty, 2015)

### 3.2.2. Premiers tests

Des premiers tests ont été réalisés en utilisant PEST et Marthe, sans utiliser l'interface de couplage PyMARTHE, en utilisant une version du modèle MONA n'intégrant que la couche du Plio-Quaternaire. Il ressort de ces premiers tests que le passage du MONA V4 au MONA V3.5 a dégradé, de fait, la précision de la géométrie. La topographie a été moyennée à la maille de 2 km et les premiers résultats d'optimisation se sont heurtés à des problèmes structureux :

- topographie en inadéquation avec celle du point d'observation,
- incohérence avec le réseau hydrographique,
- charge initiale non adaptée.

La chronique présentée en figure 35 montre le premier calage, en rouge, avec une topographie non adaptée et le calage, en orange, après correction de la topographie. Malgré les nombreux avantages de PEST, aucun algorithme ne peut réduire des problèmes structurels. Il reste donc

nécessaire de faire de l'hydrogéologie. Cet exemple illustre le fait que cette approche n'est pas du calage automatique, mais bien une approche algorithmique.

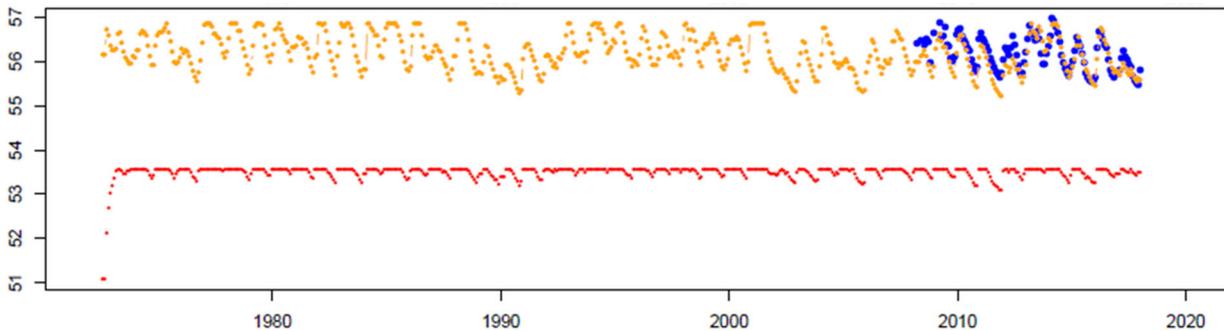


Figure 35 - Illustration de problèmes structurels liés à la géométrie

Pour aboutir à un calage correct de la nappe du Plio-Quaternaire, des corrections ont donc été apportées à la topographie moyennée à la maille de 2 km, aux paramètres définissant le réseau hydrographique (notamment l'altitude du fond de la rivière, le niveau absolu de l'eau dans la rivière) et aux charges initiales.

Après avoir réalisé des tests sur une version monocouche, des tests d'optimisation ont été entrepris sur une version multicouche. L'intégration de plusieurs couches rend la génération des fichiers nécessaires à PEST bien plus compliquée à faire « manuellement ». En effet, PEST nécessite la préparation d'un certain nombre de fichiers de configuration, pour lui indiquer comment écrire les fichiers d'entrée du modèle, lire les fichiers de simulations, ainsi que d'autres informations dont le renseignement peut devenir complexe et limitant lorsqu'on travaille sur des modèles complexes. Il était donc indispensable d'utiliser PyMARTHE pour la suite des travaux sur le MONA V3.5.

PyMARTHE a été développé sous forme d'une librairie, codée en Python, qui permet de piloter le code de calcul MARTHE (Aissat, 2021). L'utilisateur doit renseigner toutes les informations relatives au calage dans un seul script. Il s'agit de choisir les paramètres du modèle à estimer, le type de paramétrisation (points pilotes, zonation), de choisir les observations à utiliser pour contraindre le calage et les options spécifiques à l'algorithme. À chaque itération, l'algorithme d'optimisation (GLMA) ajuste les valeurs des paramètres du modèle, de façon à réduire la valeur de la « fonction objectif » (voir chapitre 3.2.5). Les valeurs du nouveau jeu de paramètres sont réécrites dans les fichiers d'entrées du modèle. Le code de calcul MARTHE est alors exécuté et génère un fichier de sortie. Les variables simulées sont alors comparées aux observations et les paramètres mis à jour. L'opération est répétée à chaque itération, jusqu'à atteindre le critère d'arrêt spécifié (Figure 36).

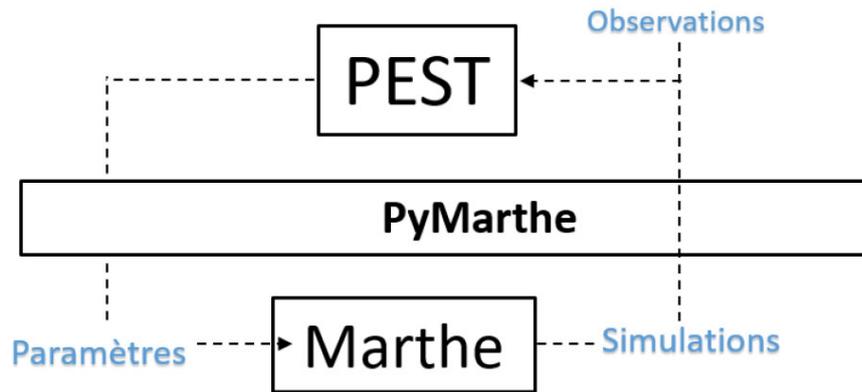


Figure 36 - Interface de couplage Python / PyMARTHE construisant le fichier de contrôle du logiciel PEST avec les observations et les différentes options de calage, gérant l'écriture des paramètres et la lecture des sorties du modèle MARTHE

Pour pouvoir utiliser cette interface, la compréhension de la structure des fichiers demandés par PEST est essentielle. On en distingue principalement 4 types (Figure 37) :

- les fichiers d'instructions (\*.ins), qui permettent de définir les instructions nécessaires à la lecture des fichiers de sortie du modèle (ex. : les charges simulées au niveau des points d'observation),
- les fichiers template (\*.tpl), qui correspondent à une copie des fichiers des paramètres à calibrer (par point pilotes ou par zone),
- le fichier de contrôle de PEST (\*.pst), qui correspond au fichier contenant les informations centrales nécessaires à l'utilisation et à l'exécution de PEST (« mode » utilisé, liste des paramètres à estimer, le nom, la valeur, et le poids de chacune des observations, ...),
- un fichier de commandes batch (\*.bat).

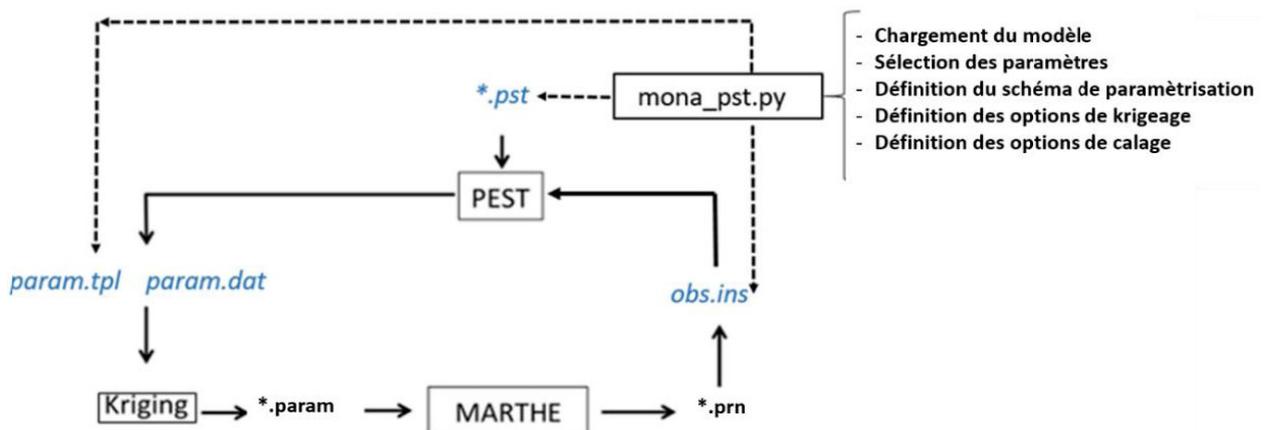


Figure 37 - Fonctionnement de l'interface de couplage entre les logiciels MARTHE et PEST

La version multicouche simplifiée du MONA V3.5 comporte 4 couches, comprenant le Plio-Quaternaire, le Langhien-Serravallien, l'Aquitainien et l'Oligocène (Figure 38).

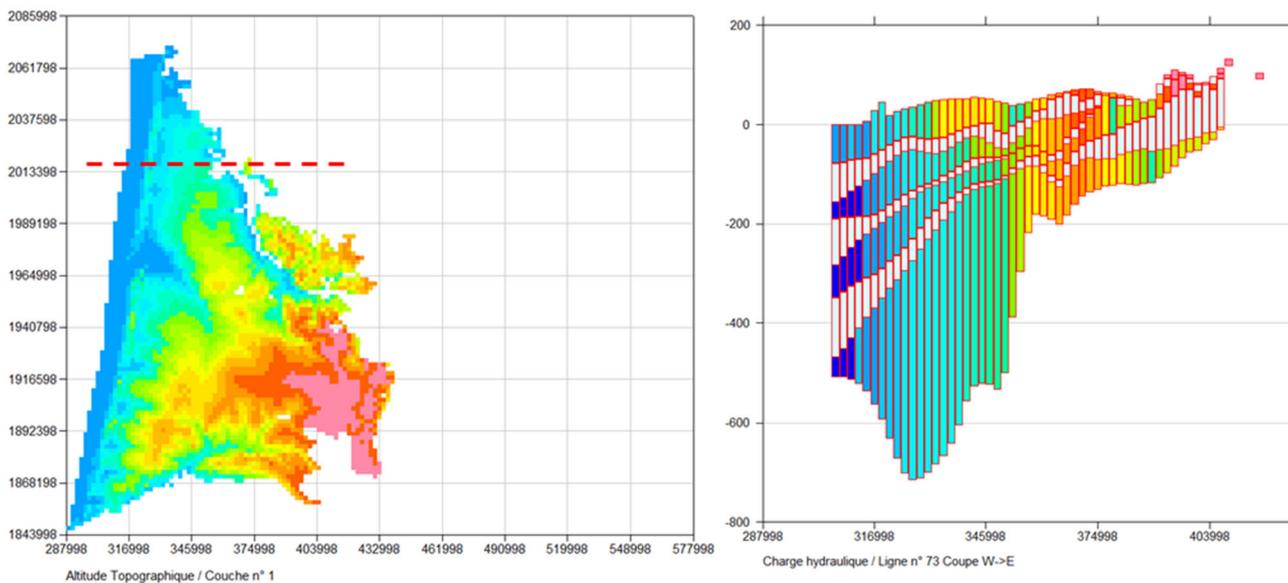


Figure 38 - Vue en plan et en coupe de la version « 4 couches » du MONA V3.5

Cet ensemble a été choisi pour avoir une cohérence hydrogéologique. En effet, dans la partie nord, les zones d’affleurement de ces nappes correspondent à des exutoires en lien avec les cours d’eau affluents de la Garonne. Les extensions de ces différents réservoirs sont comparables et ces aquifères forment un ensemble cohérent dont les limites peuvent être facilement définies.

Pour utiliser PyMARTHE, un certain nombre d’adaptations a été nécessaire pour intégrer de nouvelles variables à optimiser. La liste des paramètres optimisés dans le cadre de ce test est la suivante :

- perméabilité (points pilotes) - 4 couches
- emmagasinement libre (points pilotes) - 4 couches
- emmagasinement captif (points pilotes) - 3 couches
- perméabilité épontes (points pilotes) - 3 couches
- perméabilité rivière (zones)
- hauteur ruissellement percolation (zones)
- temps de demi-percolation (zones)
- réserve disponible pour l’évapotranspiration ou RDE (zones).

Ces tests ont nécessité l’utilisation d’un serveur de calcul, basé en région Centre, nommé CaSciModOT. C’est une structure d’échanges pour l’ensemble des acteurs utilisant les outils numériques au sens large (simulations, modélisation, algorithmiques, traitement et visualisation de données massives). Il a ainsi été possible d’utiliser un maximum de 7 calculateurs de 128 CPU<sup>1</sup> chacun, soit un total de 896 CPU. Cela multiplie par 18 nos capacités de calcul, en comparaison avec les précédents serveurs de calcul, qui ne possédaient que 48 CPU. Il est ainsi possible de lancer environ 888 modèles en simultanément.

<sup>1</sup> Le CPU, pour Central Processing Unit, désigne la plupart du temps le processeur d’un ordinateur

A noter que les tests réalisés, avec ce modèle, avaient principalement un but méthodologique : ajuster la stratégie de calage de la version complète du MONA V3.5. Cependant, quelques résultats intermédiaires sont présentés ici. Ils sont encourageants pour certains (Figure 39).

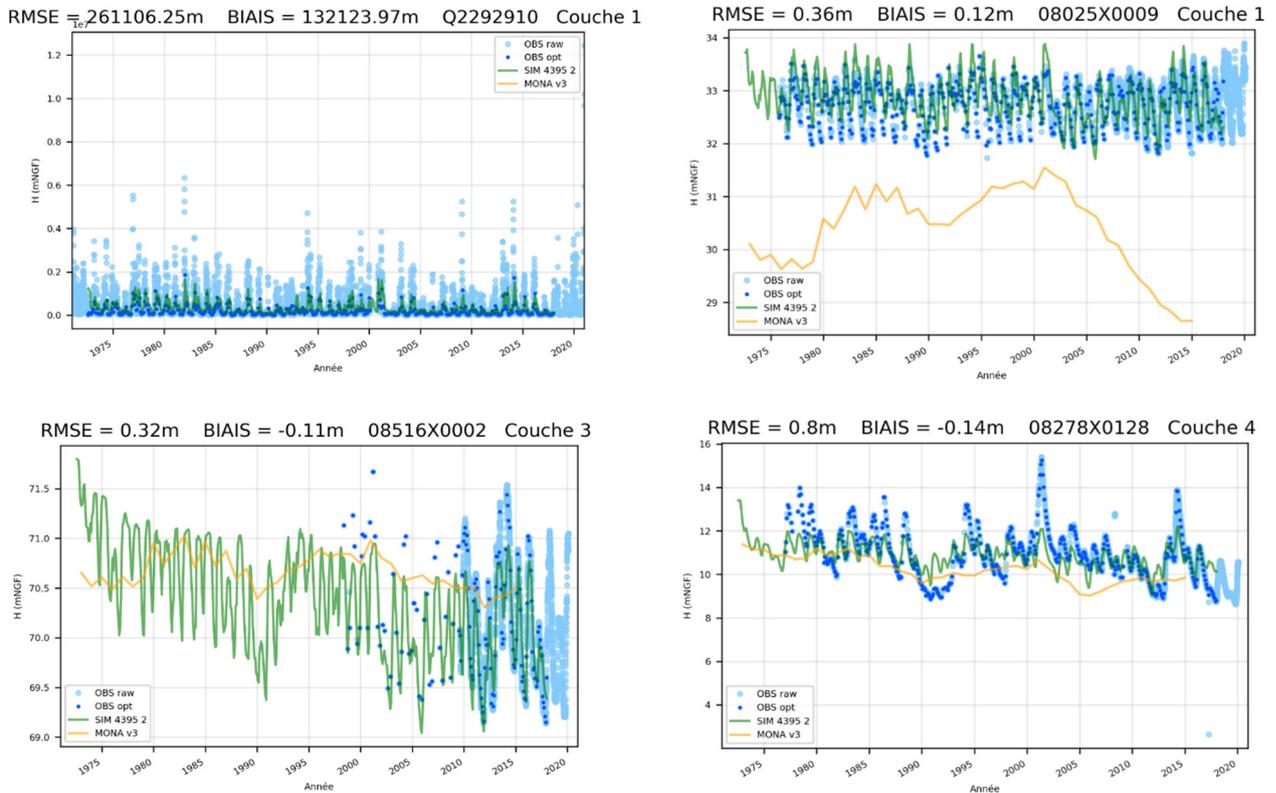


Figure 39 - Illustration des améliorations obtenues dans les résultats préliminaires du calage de la version « 4 couches » du MONA V3.5

En effet les niveaux simulés au pas de temps mensuels (en vert) constituent des restitutions correctes des niveaux observés (en bleu) et de leurs variations saisonnières. Il y a ici clairement un gain qualitatif sur la V3.3, au pas de temps annuel (en orange). Cependant d'autres points montrent des restitutions insatisfaisantes, qui illustrent des problèmes structurels qu'il reste à régler (Figure 40), comme cela avait été le cas dans la version monocouche. Il reste donc un travail de vérification pour déceler, au cas par cas, l'origine des problèmes observés.

Cependant, ces erreurs seront traitées dans la version complète du MONA V3.5, cette version « 4 couches » n'ayant servi que d'intermédiaire pour intégrer les nouveaux paramètres à calibrer dans PyMARTHE, afin de compléter ce qui avait été fait dans le cadre des travaux de thèse à propos de la V3.3 (Aissat, 2021).

La V3.5, avec ces 16 couches et 8 types de paramètres à estimer (perméabilités horizontales des aquifères, perméabilités verticales des épontes, coefficients d'emmagasinement captifs, coefficients d'emmagasinement libres, perméabilités des fonds de rivières, « réserve disponible pour l'évapotranspiration » (RDE), RUIPER et temps de demi-percolation), va nécessiter des temps de calculs plus longs, d'autant plus qu'un calage à un pas de temps plus fin que l'annuel est recherché, afin de mieux cadrer la recharge et les coefficients d'emmagasinement. Une réflexion spécifique a été menée en ce sens (chapitre 3.2.3).

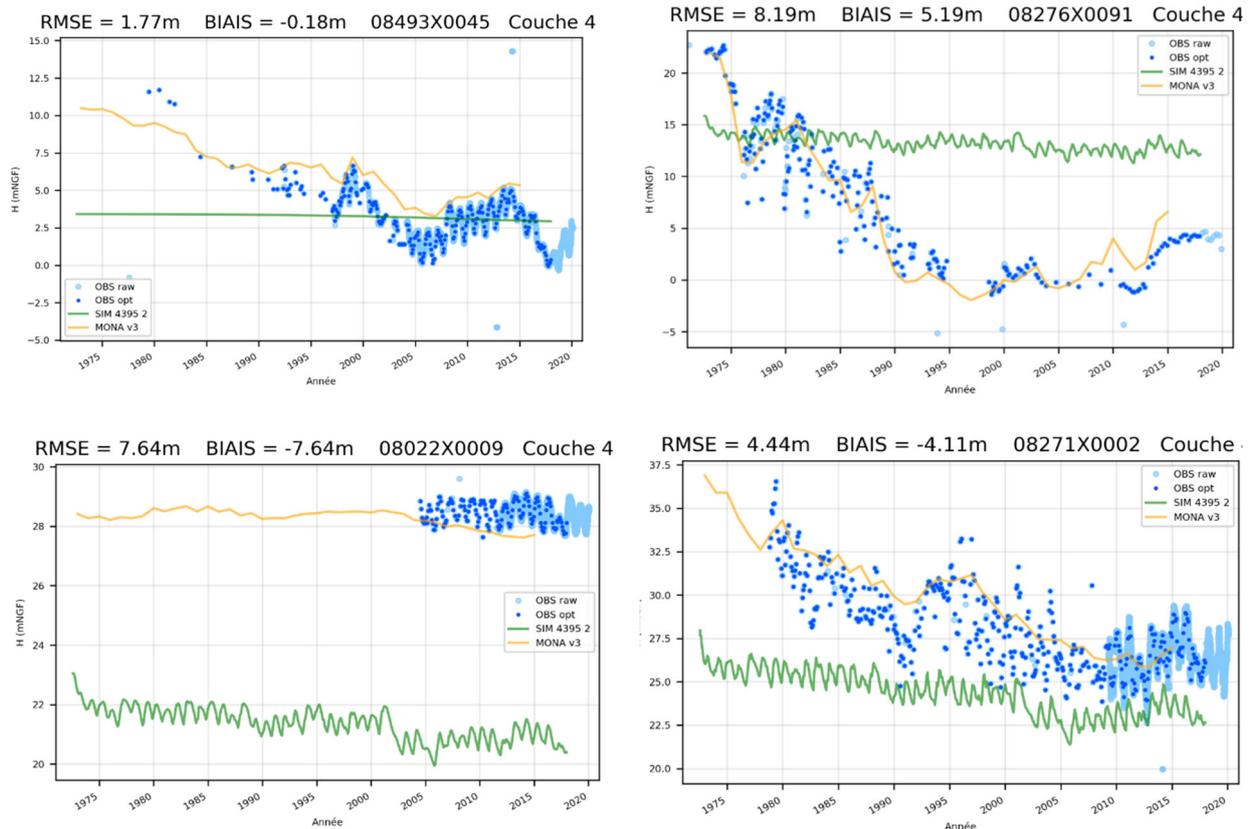


Figure 40 - Illustration des calages insatisfaisants dans les résultats préliminaires du calage de la version « 4 couches » du MONA V3.5

### 3.2.3. Choix des pas temps

Afin de mener, de manière optimum, le calage du modèle avec cette approche algorithmique qui est conditionné par les temps de calculs du modèle, il a été nécessaire de choisir des pas de temps de calage qui puissent permettre des temps de simulations raisonnables. Pour cela, des tests de différents pas de temps ont été réalisés (Tableau 9). Les simulations, pendant l'intégralité de la période d'observations disponibles des données de charges hydrauliques et de débits (1972-2017), avec un pas de temps mensuel et trimestriel, ont conduit à des temps de calculs très importants (> 45 min). Une simulation pour une période de 7 ans (2010-2017), au pas de temps mensuel, permet certes de diminuer les temps de calculs, mais ne permet pas d'assimiler l'information encapsulée, par exemple pendant la période 1972-2000, où le cône de rabattement observé sous Bordeaux, dans l'Eocène moyen, permet de mieux contraindre les coefficients d'emmagasinement. Ainsi un mixte, entre pas de temps annuel pour la période 1972-2009 et mensuel pour la période 2010-2017, est le compromis le plus adapté à la fois pour aboutir à des temps de calculs raisonnables, mais aussi pour en contraindre de manière plus efficace les paramètres à estimer.

Pas de temps	Période de simulation	Temps de calcul
Mensuel	1972-2017	1 h
Trimestriel	1972-2017	45 min
Mensuel	2010-2017	12 min
Annuel + mensuel	1972-2009, 2010-2017	24 min

Tableau 9 - Récapitulatif des tests réalisés pour choisir le pas temps hydrodynamique adéquat

### 3.2.4. Collecte d'informations *a priori*

Une étape importante du calage algorithmique consiste en la collecte d'informations sur la distribution *a priori* des paramètres. Cette connaissance *a priori* permet de définir les valeurs « préférées » qui serviront de point de départ pour l'algorithme et seront utilisées dans la régularisation de *Tikhonov*. Des bornes minimales et maximales sont également définies, afin de réduire l'espace dans lequel les paramètres peuvent varier et de ne conserver que des valeurs cohérentes d'un point de vue hydrogéologique.

Pour les paramètres distribués (transmissivités, coefficients d'emmagasinement captif et libre, et perméabilité verticale des épontes), la collecte s'est principalement basée sur les données de la Banque du sous-sol (BSS), et celles présentes dans des rapports et autres thèses (Hosteins, 1982 ; Larroque, 2004 ; Moussié, 1972), issues des interprétations des données de pompages d'essai. Cependant, malgré un nombre important de données recueillies en traitant une base de données de plus de 600 points d'observations (Figure 41), ces dernières ne sont pas réparties également sur les 15 couches du MONA (Tableau 10) et le nombre de données, pour certaines couches, est insuffisant pour caractériser la variabilité réelle des paramètres. Pour ces cas, nous nous sommes basés sur des valeurs issues de la littérature indiquant les valeurs vraisemblables selon le type de formation (Domenico et Schwartz, 1990).

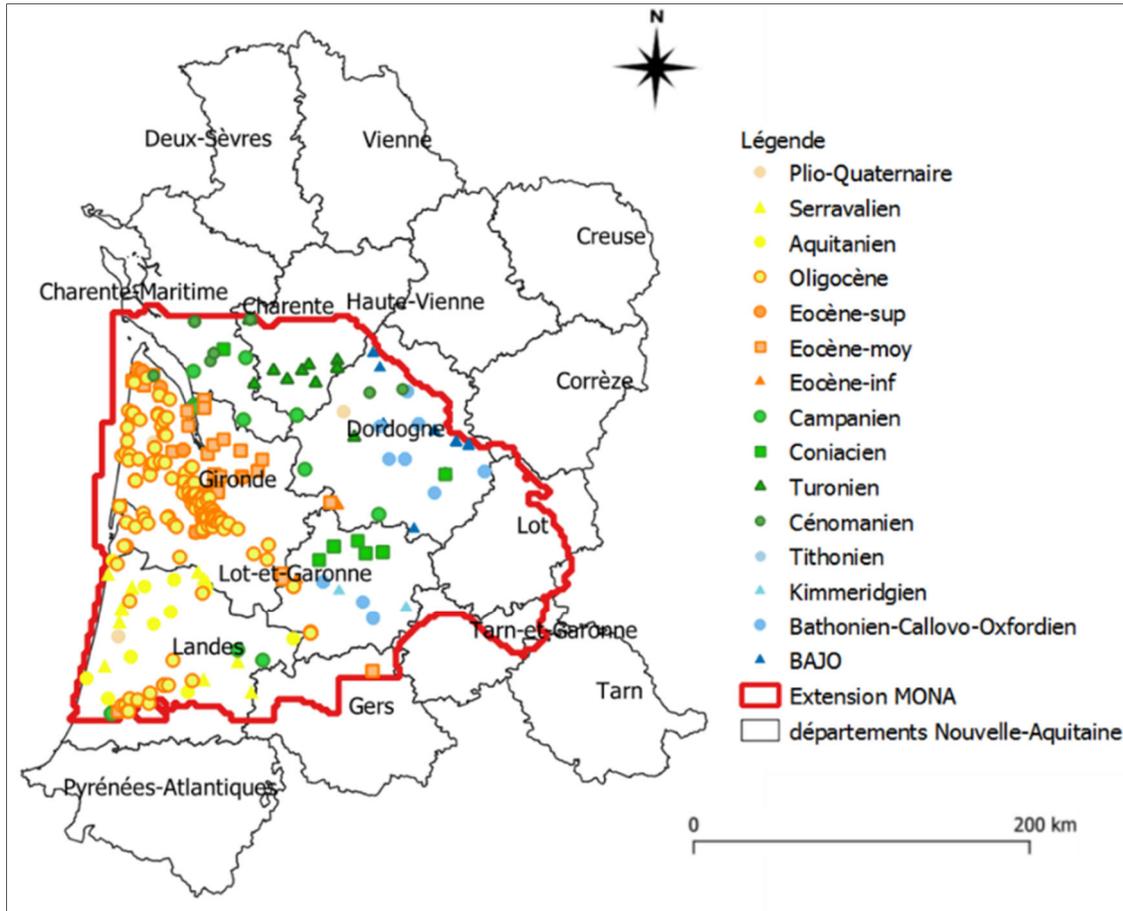


Figure 41 - Localisation des 618 points d'observations comportant des données sur les caractéristiques des couches aquifères MONA

Unité MONA V3	w	S	T ( $m^2 s^{-1}$ )
Plio-Quaternaire	2	0	4
Serravallien (Miocène)	0	2	4
Aquitaniens (Miocène)	0	1	8
Oligocène	18	33	175
Éponte à la base de l'Oligocène	0	1	5
Eocène supérieur	0	0	12
Eocène moyen	18	12	80
Eocène inférieur	2	3	10
Campanien	2	1	12
Coniacien-Santonien	0	0	12
Turonien	1	8	20
Cénomaniens	2	3	18
Tithonien	0	0	2
Kimmeridgien	0	0	0
Bathonien-Calovo-Oxfordien	0	0	2
Bajocien	0	0	2

Tableau 10 - Nombre de données récoltées par unité MONA, pour chacun des trois paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de transmissivité et de coefficient d'emménagement en nappes captives sont log-transformés (base 10), afin de les mettre à une même échelle, car ils présentent des ordres de grandeurs très différents. Les distributions des trois paramètres  $T$ ,  $S$  et  $w$ , respectivement pour les couches oligocène et éocène moyen, sont illustrées en Figure 42 et Figure 43.

Pour la couche oligocène, les valeurs de transmissivités s'échelonnent entre  $3,0 \times 10^{-6}$  et  $0,12 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , avec une valeur moyenne de  $2,64 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Alors que pour la couche de l'Éocène moyen, la gamme de variation est entre  $2,3 \times 10^{-6}$  et  $6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , avec une transmissivité moyenne de  $3,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Le coefficient d'emménagement captif est compris entre  $2,0 \times 10^{-5}$  et  $2,6 \times 10^{-2}$  pour l'aquifère oligocène, et entre  $10^{-5}$  et  $4 \times 10^{-4}$  pour l'Éocène moyen. Les parties libres de ces deux aquifères enregistrent une valeur moyenne de porosité de drainage de l'ordre de  $10^{-2}$ .

Les informations issues de la collecte de données *a priori* déduites à partir d'essais de nappes ont été croisées avec les valeurs issues de la littérature, indiquant les valeurs possibles selon le type de formation (Domenico et Schwartz, 1990), (Batu, 1998) et (Morris et Johnson, 1967).

Pour l'estimation des paramètres du MONA, nous avons choisi de mettre des bornes larges, afin de permettre à l'algorithme d'estimation des paramètres de compenser d'éventuelles erreurs structurelles du modèle, mais tout en restant cohérents d'un point de vue hydrogéologique. Néanmoins, les valeurs des bornes obtenues lors de ce travail de collecte serviront de validation aux valeurs estimées par PEST. Les valeurs préférées sont résumées dans le Tableau 11 : elles serviront de point de départ pour l'algorithme et seront utilisées dans la régularisation de *Tikhonov*.

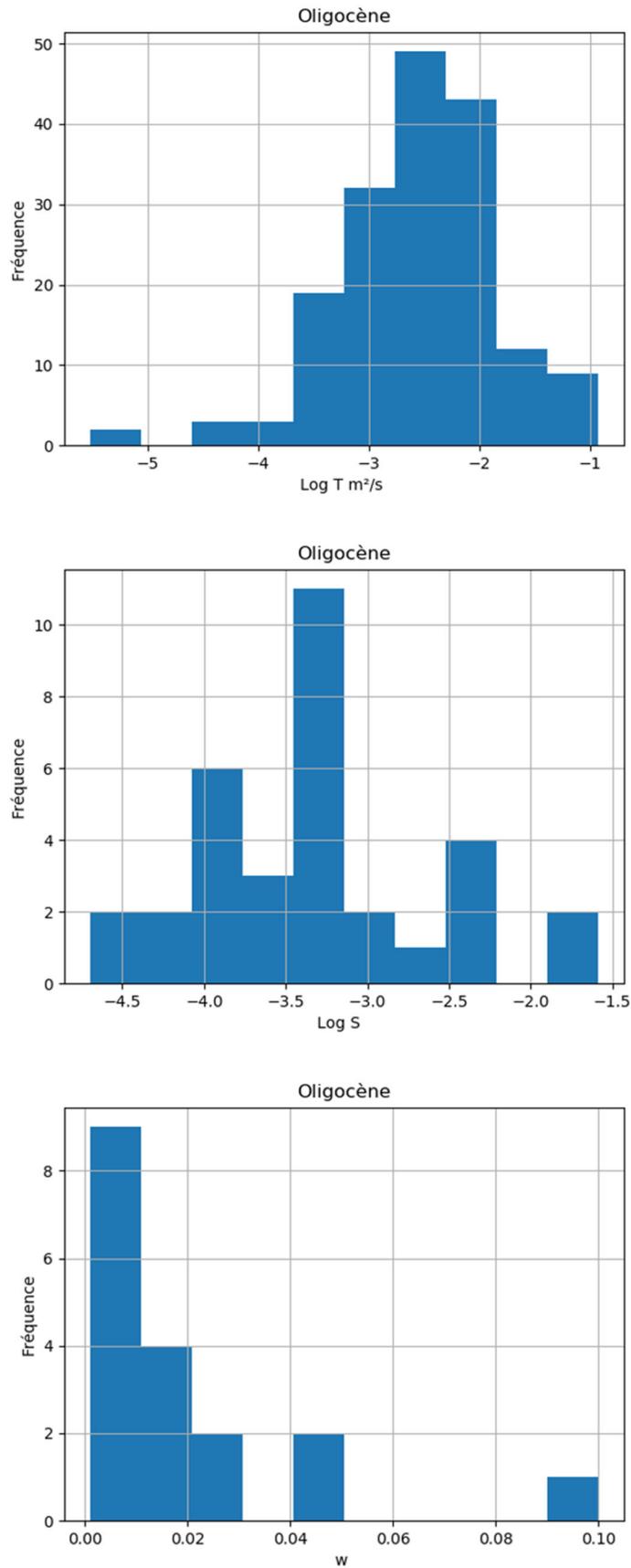


Figure 42 - Distribution des paramètres hydrodynamiques mesurés pour l'aquifère de l'Oligocène

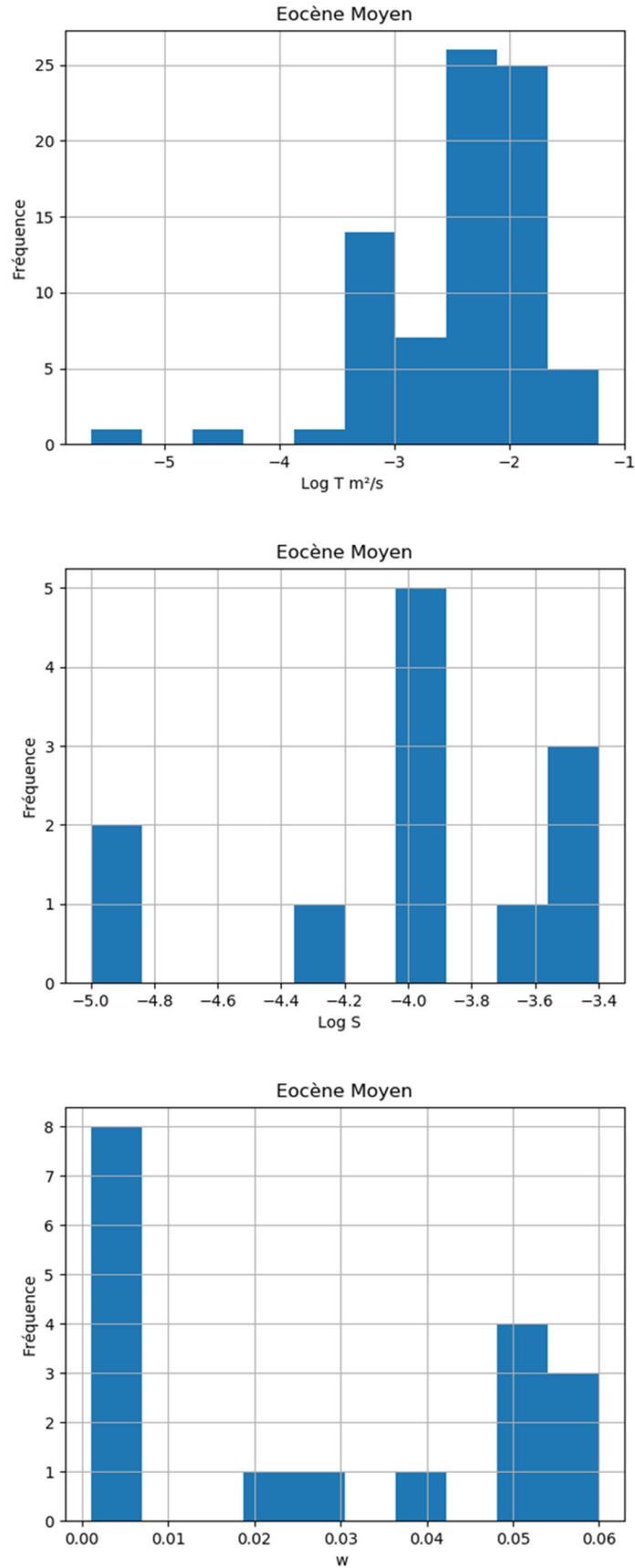


Figure 43 - Distribution des paramètres hydrodynamiques mesurés pour l'aquifère de l'Éocène

Unité MONA	K (m/s)	S <sub>s</sub> (m <sup>-1</sup> )	W (%)
Recouvrement	10 <sup>-3</sup>	-	25.00
Plio-Quaternaire	1.87×10 <sup>-4</sup>	7.86×10 <sup>-2</sup>	25.14
Langhien-Serravallien (Miocène moyen)	3.35×10 <sup>-5</sup>	9.00×10 <sup>-4</sup>	22.00
Aquitanien (Miocène inférieur)	3.09×10 <sup>-5</sup>	3.00×10 <sup>-4</sup>	22.00
Oligocène	1.27×10 <sup>-4</sup>	2.05×10 <sup>-3</sup>	01.94
Éocène supérieur	8.05×10 <sup>-5</sup>	1.40×10 <sup>-3</sup>	15.00
Éocène moyen	7.08×10 <sup>-5</sup>	1.57×10 <sup>-4</sup>	02.74
Éocène inférieur	1.25×10 <sup>-4</sup>	2.27×10 <sup>-4</sup>	0.500
Campanien (Crétacé supérieur)	8.70×10 <sup>-5</sup>	5.00×10 <sup>-4</sup>	01.00
Coniacien-Santonien	7.55×10 <sup>-6</sup>	9.40×10 <sup>-6</sup>	21.00
Turonien	4.84×10 <sup>-4</sup>	6.69×10 <sup>-5</sup>	20.00
Cénomaniens	2.31×10 <sup>-4</sup>	9.10×10 <sup>-3</sup>	01.75
Tithonien (Jurassique supérieur)	5.36×10 <sup>-5</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>	02.00
Kimméridgien (Jurassique supérieur)	1.00×10 <sup>-4</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>	02.00
Bathonien-Calovo-Oxfordien	1.00×10 <sup>-4</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>	02.00
Bajocien (Jurassique moyen)	1.75×10 <sup>-4</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>	02.00

Tableau 11 - Récapitulatif des valeurs préférées pour les 15 couches aquifères des perméabilités horizontales, coefficient d'emmagasinement spécifiques et coefficients d'emmagasinement libres du MONA

Unité MONA	K <sub>min</sub> (m/s)	K <sub>max</sub> (m/s)	S <sub>min</sub> (m <sup>-1</sup> )	S <sub>smax</sub> (m <sup>-1</sup> )	W <sub>min</sub> (%)	W <sub>max</sub> (%)
Recouvrement	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	-	1	35
Plio-Quaternaire	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	-	1	35
Langhien-Serravallien (Miocène moyen)	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Aquitanien (Miocène inférieur)	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Oligocène	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Éocène supérieur	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Éocène moyen	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Éocène inférieur	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Campanien (Crétacé supérieur)	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Coniacien-Santonien	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Turonien	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Cénomaniens	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Tithonien (Jurassique supérieur)	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Kimméridgien (Jurassique supérieur)	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Bathonien-Calovo-Oxfordien	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35
Bajocien (Jurassique moyen)	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	35

Tableau 12 - Récapitulatif des bornes minimales et maximales des perméabilités horizontales, coefficient d'emmagasinement spécifiques et coefficients d'emmagasinement libre, pour les 15 couches aquifères du MONA

Unité MONA	$K_{\min}$ (m/s)	$K_{\max}$ (m/s)	$K_{\text{préférée}}$ (m/s)
Éponte du sommet du Langhien-Serravallien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte du sommet de l'Aquitainien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte Chattien-Miocène	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte à la base de l'Oligocène	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte à la base de l'Eocène supérieur	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte à la base de l'Eocène moyen	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte au sommet du Campanien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte au sommet du Coniacien-Santonien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte au sommet du Turonien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte au sommet du Cénomanién	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte au sommet du Tithonien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte au sommet du Kimméridgien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Éponte au sommet du Bathonien-Calovo-Oxfordien	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$
Bajocien (Jurassique moyen)	$10^{-12}$	$10^{-6}$	$5 \times 10^{-9}$

Tableau 13 - Récapitulatif des valeurs préférées des perméabilités verticales, des 14 épontes du MONA et leurs bornes maximales et minimales

Le tableau 14 récapitule les valeurs préférées pour les paramètres de Gardénia. Une valeur similaire de départ est donnée pour tous les bassins versants, où la recharge sera calculée. Il en est de même pour les valeurs de perméabilité de rivières.

Paramètre	Valeur préférée	Valeur max	Valeur min
Perméabilités des rivières (m/s)	$10^{-5}$	$10^{-1}$	$10^{-10}$
Temps de demi percolation (mois)	50	1 000	1
Capacité de rétention du sol (mm)	200	700	100
RUIPER (mm)	100	1 000	1

Tableau 14 - Définition des valeurs a priori de la conductivité hydraulique des rivières et des paramètres de Gardénia, pour le calcul de la recharge

### 3.2.5. Définition de la « fonction objectif » et choix de la pondération

Lors du procédé itératif, le GLMA met à jour le jeu de paramètres, en minimisant une « fonction objectif » (Équation 9), qui réduit l'écart entre observation mesurée et simulation. Les observations suivantes sont utilisées :

- les charges hydrauliques (exprimées en m), mesurées de 1972 à 2017, à travers un important réseau de forages (§ 3.1.7) ;
- les fluctuations de charges par rapport à la moyenne, pour reproduire les fluctuations interannuelles et mieux contraindre les coefficients d'emmagasinement ;
- 97 chroniques de débits de rivières (exprimées en m/s), de 1972 à 2011.

Néanmoins, ces données d'observations sont entachées d'incertitudes. Cette incertitude est prise en compte dans la « fonction objectif » à travers la définition d'un facteur de pondération. Plus

l'observation est sûre (faible incertitude), plus le poids qui lui sera accordé dans la « fonction objectif » sera fort. Au contraire, plus l'observation est incertaine, plus le poids sera petit. En effet, le poids ( $w$ ) est inversement proportionnel à l'incertitude ( $\sigma$ ), comme l'indique l'équation 10.

Le facteur de pondération  $w$  peut être introduit pour de nombreuses raisons, dont :

- assurer la cohérence des unités, si plusieurs variables sont utilisées,
- garantir la visibilité de chaque résidu dans la « fonction objectif », lorsque les magnitudes des grandeurs sont contrastées,
- adapter la visibilité des résidus en fonction de l'écart attendu entre les valeurs observées et leurs équivalents simulées (erreur de mesure, erreur structurelle),
- compenser des hétérogénéités d'échantillonnage (selon les couches aquifères ou d'une année à l'autre).

Ici, le facteur de pondération, attribué à une observation  $k$ , d'une station de mesure  $j$ , de la famille de donnée  $i$ , s'exprime par l'Équation 10. Il a été choisi pour assurer une visibilité proportionnelle au niveau de confiance des mesures ainsi que compenser les écarts de nombre de stations de mesure par famille d'observations et le nombre de mesures disponibles par chronique.

$$\omega_{i,j,k} = \sqrt{\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^L \lambda_i \times M_i \times N_{i,j} \times \sigma_{i,j,k}^2}} \quad \text{Équation 10}$$

avec  $\lambda_i$  comme facteur d'ajustement de la famille d'observation (charges hydrauliques, débits),  $M_i$ , comme nombre de stations de mesures par famille d'observation,  $N_{i,j}$  comme nombre de données d'observations de la chronique pour une station donnée et  $\sigma_i$ , comme erreur relative sur la mesure.

Le facteur d'ajustement  $\lambda_i$  permet de pallier le problème de représentativité des différentes familles de données dans la « fonction objectif » et d'éviter qu'une famille de données ne soit mieux représentée qu'une autre. Le  $\lambda_i$ , attribué à chaque famille, est déterminé par essai-erreur.

Les incertitudes sur les charges hydrauliques sont exprimées avec une valeur unique de  $\pm 3$  m à 68 %, résultant du cumul de toutes les erreurs qui seraient commises au cours des mesures (erreurs dues au dispositif de mesure, erreurs liées au nivellement du puits pour le rattachement au nivellement NGF ou encore erreurs dues à l'exploitation des forages, qui influence certaines mesures observées). Quant à l'incertitude sur les mesures de débits de rivière, une valeur de  $\pm 10$  m<sup>3</sup>/h est prise en compte.

### 3.2.6. Choix de paramétrisation

Deux types de paramétrisation ont été utilisés : zones homogènes - ZPC (une valeur uniforme par couche) et points pilotes. L'approche par points pilotes consiste à estimer la valeur des paramètres au niveau de points fixes, distribués sur le domaine modélisé, puis d'interpoler les valeurs aux mailles de calcul par krigeage (de Marsily, 1984). D'après Doherty (2003), cette technique permet une meilleure description de l'hétérogénéité en comparaison à d'autres schémas de paramétrisation, comme la zonation (Neuman, 1973). Cependant, la mise en place de cette méthode reste en pratique difficile. Plusieurs questions peuvent être soulevées : « Quel est le nombre optimal de points pilotes à utiliser ? Quel est leur emplacement optimal ? » En effet, l'utilisation d'un petit nombre de points pilotes permet une bonne identification des paramètres au droit de ces points, tout en économisant les temps de calcul, mais détériore la description de

l'hétérogénéité (RamaRao et al., 1995). Un grand nombre de points pilotes augmente les temps de calcul et peut conduire à des défauts de convergence de l'algorithme d'estimation des paramètres. Un compromis est donc recherché pour définir la paramétrisation optimale, compte tenu du niveau d'hétérogénéité spatiale à caractériser, des observations existantes, du temps d'exécution du modèle et des ressources de calcul à disposition.

Le tableau 15 récapitule le schéma de paramétrisation choisi pour tous les paramètres à caler du modèle. Une paramétrisation par points pilotes, pour les paramètres hydrodynamiques distribués (perméabilités et coefficients d'emménagement) et une paramétrisation par zones homogènes, pour les paramètres globaux de Gardénia (une valeur uniforme est attribuée à chaque zone de sol). Et une valeur uniforme est également accordée pour chaque affluent de rivière.

Les points pilotes ont d'abord été semés selon une grille régulière, avec un espacement initial grossier. Ensuite, les points, contraints par au minimum deux piézomètres à proximité, ont été repartis plus finement selon une grille régulière, emboîtée en subdivisant successivement les cellules de la grille de base dans chaque direction horizontale.

L'espacement initial optimal a été choisi en se basant sur plusieurs tests consistant à connaître la dimension de l'espace des solutions (espace des paramètres réellement sensibles aux observations), en fonction du nombre de paramètres résultants de chaque espacement.

<b>Paramètre</b>	<b>Type de paramétrisation</b>
Perméabilités horizontales des aquifères	Points pilotes
Perméabilités verticales des épontes	Points pilotes
Coefficients d'emménagement captifs	Points pilotes - ZPC
Coefficients d'emménagement libres	Points pilotes - ZPC
Perméabilités des rivières	ZPC
Paramètres bilan hydroclimatique	ZPC

*Tableau 15 - Paramétrisation choisie pour chaque paramètre du modèle*



## 4. Conclusion

Ce module de l'année 3 de la Convention Régionale des Eaux Souterraines, pour la période 2015-2020, porte principalement sur l'évolution du MOdèle Nord-Aquitain avec l'objectif de concevoir une nouvelle version du modèle, actualisée, affinée et destinée à permettre aux gestionnaires de définir au mieux les stratégies d'exploitation des ressources en eau souterraine de la région. Le programme de cette année 3 est scindé en deux parties :

- une première partie, qui s'est focalisée sur la version actuelle du MONA (V3.3b) avec l'objectif d'actualiser les données d'entrées (prélèvements, flux d'infiltration) et les chroniques d'observation jusqu'en 2019, afin de bénéficier d'un outil le plus à jour possible ;
- une seconde partie, qui a porté sur la poursuite du développement d'une nouvelle version du modèle. Le travail réalisé en cette année 3 de la Convention constitue un travail préparatoire du calage algorithmique de la version 3.5 à l'aide de PEST et de PyMARTHE.

En parallèle à la maintenance de la version 3.3b du MONA, ce module a permis de poursuivre le travail sur le calage de la version 3.5 du modèle. Un travail important d'inventaire a été réalisé sur les chroniques piézométriques augmentant considérablement le nombre de points d'observation disponibles pour le calage. Une validation de l'aquifère capté a été nécessaire. Par ailleurs, certaines chroniques montraient des valeurs aberrantes (mesures de niveau dynamiques, problèmes de dénoyage du capteur, ...), il a donc été nécessaire de les « nettoyer » afin d'éviter, au cours du calage, d'essayer de réduire des écarts entre simulations et observations sur des mesures non fiables. Dans un souci de rationalisation du réseau d'observation et pour étudier, au sein d'un aquifère, si des grandes tendances étaient observables, une analyse des tendances des niveaux piézométriques pour l'aquifère de l'Éocène moyen du nord du Bassin aquitain a été entreprise.

L'interface de couplage Python PyMARTHE, développé dans le cadre de la thèse de Ryma Aissat (2021), sous la supervision d'Alexandre Pryet, qui permet de coupler le logiciel PEST (Parameter ESTimation) et Marthe, sera utilisée pour le calage de la version 3.5 du MONA. Pour utiliser cette interface, un certain nombre d'adaptations a été nécessaire pour intégrer de nouvelles variables à optimiser (perméabilité rivière, hauteur ruissellement percolation, temps de demi-percolation, réserve disponible pour l'évapotranspiration ou RDE). Différents tests ont été réalisés avec des versions à 1 et 4 couches, avant de passer au modèle à 16 couches. Par ailleurs, bien que le nombre de couches soit comparable à la version 3.3 (seulement une de plus), l'objectif est de réaliser un calage à un pas de temps infra-annuel, pour mieux cadrer la recharge et les coefficients d'emménagement. Un compromis a donc dû être trouvé pour aboutir à des temps de calculs compatibles avec une approche de calage algorithmique. Ainsi, un mixte entre pas de temps annuel, pour la période 1972-2009, et mensuel, pour la période suivante, a été choisi afin d'aboutir à des temps de calculs raisonnables, tout en contraignant de manière plus efficace les paramètres à estimer.

L'objectif de l'année 1 de la prochaine Convention est de mener, en amont du calage, une analyse de sensibilité qui permet de dresser une liste de paramètres « importants », qui ont une influence effective sur les sorties du modèle. L'identification de ces paramètres permet de simplifier le modèle, en éliminant les paramètres peu sensibles, de fixer leurs valeurs et de ne garder que les paramètres pertinents à caler. La sensibilité d'une valeur simulée à un paramètre traduit la capacité d'une observation à contraindre un paramètre. Si les valeurs simulées ne changent que très peu, malgré un changement significatif dans la valeur du paramètre, cela indique que les observations exerceront une contrainte faible dans l'estimation des paramètres.

L'incertitude sur les observations sera prise en compte dans le processus de calage à travers la définition de poids dans la « fonction objectif ». Il sera donc nécessaire de trouver le poids adéquat à chaque observation, tout en garantissant la visibilité de chaque famille d'observations (charges, débits), qui n'ont pas forcément le même ordre de grandeur. La qualité du calage et de son évolution seront ici appréciées de manière à réduire la « fonction objectif » calculée en utilisant la comparaison des chroniques de charges et de débits simulés et mesurés. Cette phase d'analyse des résultats sera complétée par l'analyse de critères statistiques pour juger de la robustesse du modèle avec l'évaluation des écarts entre valeurs simulées et observées, sous la forme de diagrammes de dispersion (niveaux mesurés moyens vs niveaux mesurés observés), de moyenne des écarts individuels sur l'ensemble des points d'observation retenus, ainsi que d'indicateurs adéquats (RMSE, biais, ...).

L'obtention d'une version 4 opérationnelle du MONA, du fait de sa complexité, reste l'objectif à moyen terme du projet. La version 3.5 servira de version intermédiaire opérationnelle.

## 5. Bibliographie

**Abasq, L., Platel J.P., Cabaret O.** (2020) - Actualisation 2000-2018 du modèle hydrogéologique des aquifères du Crétacé du sud des Charentes. Rapport final. BRGM/RP-70193-FR, 248 p., 129 ill., 6 ann.

**AEAG, COMITE DE BASSIN ADOUR GARONNE, OFFICE FRANCAIS DE LA BIODIVERSITE OFB.** (2020) Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Adour-Garonne 2022-2027 - État des lieux.

**Aissat, R.** (2021) Mise en œuvre d'algorithmes d'optimisation pour l'estimation des paramètres distribués des modèles hydrogéologiques régionaux - Application au Modèle Nord-Aquitain (MONA). Université Bordeaux Montaigne.

**Amraoui, N., Bichot, F. Platel, J.P. et Seguin J.J.** (1998) Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 2 - Evaluation des ressources. Ajout des couches du Santonien-Turonien, du Cénomaniens et du Jurassique moyen et supérieur au modèle nord aquitain. BRGM/RR-40110-FR, 59 p. 24 fig., 13 tab., 6 ann.

**Amraoui, N., Bichot F. , Seguin J.J. , Platel J.P. , et Sourisseau B.** (1999) Restructuration du modèle nord aquitain de gestion des nappes. Réalisation de 6 simulations pour le Schéma de Gestion des Eaux du département de la Gironde. BRGM/RR-40224-FR, 17 p.

**André, L., Cabaret O., Douez O., Saplaïroles M., et Wuilleumier A.** (2019) Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique. Rapport d'étape. BRGM/RP-69126-FR, 121 p., 82 ill., 12 ann.

**Batu, V.** (1998) Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis, John Wiley & Sons, New York, 727p.

**Bellegarde, R.** (1969) Historique de la piézométrie de la nappe des sables éocènes en Gironde - 69 SGN 144 AQI, 23 p., 18 ann.

**Bourbon, P., et Assy, Y.** (2022) Fusion des modèles de Poitou-Charentes : mise à jour du modèle Jurassique sous GDM/Multilayer. Rapport final V1. BRGM/RP-71516-FR, 61 p.

**Braneyre, M., Chigot D., Lambert M., Moreau C.F., Sourisseau B., Platel J.P. , Dubreuilh J.P., et Gaaloul N.** (1993) Modélisation mathématique multicouche de trois aquifères exploités du sédimentaire nord-aquitain (Oligocène - Eocène - Crétacé). R-37361, 26 p., 7 fig., 2 ann.

**Braneyre, M., Lambert M., et Sourisseau B.** (1994) Rapport de synthèse du modèle régional multicouche du Bassin Nord-Aquitain : Calage en régime transitoire et simulations. Rapport BRGM R38006 SGN SP 94, 42 p, 29 fig, 9 ann.

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

**Buscarlet, E., Cabaret O., et Saltel M.** (2019) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1.1 – Année 2. Rapport final BRGM/RP-68863-FR, 55 p., 33 ill., 7 tabl., 2 ann.

- Cabaret, O.** (2011) Caractérisation physique et approche numérique du rôle des aquitards dans les systèmes aquifères multicouches - Application au complexe tertiaire nord-aquitain. Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3.
- Cabaret, O.** (2015) Projet AZENA - Atlas des Zones à ENjeux Aval du SAGE Nappes profondes de Gironde - Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-64318-FR, 79 p., 39 ill., 5 ann.
- Cabaret, O., Abasq L., Douez O., et Wuilleumier A.** (2016) Projet AZENA - Atlas des Zones à ENjeux Aval du SAGE Nappes profondes de Gironde - Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-66335-FR, 81 p., 6 ann.
- Cabaret, O., Arnaud L., et Crastes de Paulet F.** (2019) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développement du Modèle Mio-Plio-Quaternaire - Module 1.3 - Année 2. Rapport final. BRGM/RP-68674-FR, 43 p., 29 ill.
- Cabaret, O., et Saltel M.** (2012) Simulations d'impacts d'un champ captant d'une capacité de 10 et 12 millions de m<sup>3</sup> dans l'Oligocène à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) – Sainte-Hélène (33) – Rapport BRGM/RP-61290-FR, 81 p., 62 fig., 3 ann.
- Cabaret, O., Wuilleumier A., Barriere J., Bourbon P., et Ayache B.** (2022) Projet MOHYS – Interprétation des investigations de terrain, construction et calage du Modèle Hydrogéologique du Bassin d'Arcachon.
- Carrera, J.** (1986) Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 1. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information. 1986. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR022i002p00199>.
- Doherty, J.** (2003) Ground water model calibration using pilot points and regularization. *Groundwater* 41 (2): 170-77.
- Doherty, J.** (2015) Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. PEST/ complete theory and what it means for modelling the real world, Brisbane, Australia : Watermark Numerical Computing.
- Domenico, P.A, et Schwartz F.W.** (1990) Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Flipo, N., Monteil C., Poulin M., de Fouquet C., et Krimissa M.** (2012) Hybrid fitting of a hydrosystem model: Long-term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 48, W05509, doi:10.1029/2011WR011092.
- Gomez, E., Pédrón N., et Buscarlet E.** (2010) Utilisation du Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du Nord du Bassin aquitain - BRGM/RP-57878-FR, 61 p., 30 fig. 13 ann.
- Gomez, E., Saltel M., et Pédrón N.** (2010) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain - Module 4 - Année 1 - Convention 2008-2013. BRGM/RP-57810-FR, 38 p., 15 ill., 8 ann.
- Hamed, Khaled H.** (2008) Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology* 349 (3): 350-63. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>.

**Hamed, Khaled H., et Ramachandra Rao A.** (1998) A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204 (1): 182-96. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).

**Hosteins, L.** (1982) Étude hydrogéologique du réservoir oligocène en Aquitaine occidentale - Gestion et conservation de la ressource de cette nappe dans la région de Bordeaux. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 164 p.

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

**Marsily, Gh. de.** (1984) Spatial Variability of Properties in Porous Media: A Stochastic Approach. In *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, édité par Jacob Bear et M. Yavuz Corapcioglu, 719-69. Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6175-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6175-3_15).

**Morris, D.A, et Johnson A.I.** (1967) Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1839-D, 42p.

**Moussié, B.** 1972. Le système aquifère de l'Éocène moyen et supérieur du bassin nord aquitain - Influence du cadre géologique sur les modalités de circulation. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 73 p.

**Neuman, Shlomo P.** (1973) Calibration of Distributed Parameter Groundwater Flow Models Viewed as a Multiple-Objective Decision Process under Uncertainty. *Water Resources Research* 9 (4): 1006-21. <https://doi.org/10.1029/WR009i004p01006>.

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

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

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

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

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

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

- Pettitt, A. N.** (1979) A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28 (2): 126-35. <https://doi.org/10.2307/2346729>.
- Platel, J.P., Pédrón N., Gomez E., et Saltel M.** 2010. Perspectives de gestion des nappes du Secondaire en Agenais-Périgord. Synthèse géologique et hydrogéologique, modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-59330-FR, 217p., 101 fig., 12 tab., 19 ann.
- RamaRao, B. S., LaVenue, A. M., De Marsily, G., and Marietta, M. G.** (1995) Pilot Point Methodology for Automated Calibration of an Ensemble of Conditionally Simulated Transmissivity Fields: 2. Application. *Water Resources Research* 31 (3): 495-516. <https://doi.org/10.1029/94WR02259>.
- Ramos, M.R. et Cordeiro C.** (2013) Trend tests in time series with missing values: A case study with imputation. *AIP Conference Proceedings* 1558 (1): 1909-12. <https://doi.org/10.1063/1.4825905>.
- Saltel, M.** (2012) Simulation d'impact d'un champ captant d'une capacité de 10 millions de m<sup>3</sup> par an dans l'aquifère oligocène sur le secteur de Sainte-Hélène (33) à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) - Rapport BRGM/RP-60822-FR, 40 p., 18 fig., 3 ann.
- Saltel, M., et Cabaret O.** (2012) Explore 2070 - Hydrologie souterraine - Bassin Aquitain - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie - Armines - BRGM.
- Saltel, M., Cabaret O., Bourguine B. et 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., Compère F., et Cabaret O.** (2017) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1.1 – Année 1 – Convention 2015 – 2020. BRGM/RP-66832-FR, 43 p., 19 ill., 4 tabl., 2 ann.
- Saltel, M., Faucher A., et Bourguine B.** (2012) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 3 – BRGM/RP-61614-FR, 45 pages, 24 figures, 3 annexes.
- Saltel, M., et Pédrón N.** (2012) Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain dans le cadre du module « Tendances et Scénarios » -Rapport final, BRGM/RP-60416-FR 56 p., 24 fig., 5 ann.
- Saltel, M., Pédrón N., Platel J.P. , Bourguine B., et Gutierrez T.** (2011) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 2 – BRGM/RP-59 959-FR, 63 p., 38 fig., 6 ann.
- Saltel, M., Wuilleumier A., et Cabaret O.** (2016) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 5. BRGM/RP-65039-FR, 82 p., 39 ill., 21 tab, 10 ann.
- Saltel, M.** (2008) Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds - Fonctionnement hydrogéologique des antifformes du sud de Bordeaux. PhD Thesis, These de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 268p.

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

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

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

**Sen, P.K.** (1968) Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63 (324): 1379-89. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.

**Tikhonov A. et Arsenin V.** (1977) Solutions of ill-posed problems . New York 1 (30): 487.

**Welter, D.E., White J.T., et Doherty J.E.** (2015) PEST++ version 3, a parameter estimation and uncertainty analysis software suite optimized for large environmental models. In: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Report, 7–C12, pp. 54.

**Wuilleumier, A, A. Abou Akar, et Douez, O.** (2020) Réseau départemental de suivi des nappes de Gironde - Bilan de l'état des nappes en 2019. Rapport final BRGM/RP-70519-FR, 102 p., 47°ill., 22 tabl., 6 ann.

**Wuilleumier, A., André L., Cabaret O., Abou Akar A., Bardeau M., Mazurier C., et Sasseville P.L.** (2015) Projet GAIA – année 1. Collecte des données hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Rapport final. BRGM/RP-64850-FR, 137 p., 98 ill., 9 tab., 19 ann.

**Zhou, H., Gómez-Hernández, J.J., Li, L.** (2014) Inverse Methods in Hydrogeology: Evolution and Recent Trends. *Advances in Water Resources* 63 (janvier): 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.10.014>.



## **Annexe 1 Historique du MOdèle Nord-Aquitain**



### MONA V1

Elaboration d'un 1<sup>er</sup> modèle régional à mailles carrées de 5 km de côté au début des années 1990 (Braneyre, Lambert et Sourisseau, 1994 ; Braneyre et al., 1993 ; Braneyre, Seguin et Lambert, 1993) fonctionnant en régime transitoire, pour la période 1972-1992, et simulant les écoulements au sein de 4 couches aquifères : Mio-Plio-Quaternaire (à potentiels imposés), Oligocène, Éocène et Campano-Maastrichtien.

En 1996, L'Agence de l'Eau Adour-Garonne, la Communauté Urbaine de Bordeaux et le Conseil Général de la Gironde ont décidé la mise en place d'un schéma directeur de gestion des ressources en eau de la Gironde, proposant des solutions alternatives permettant de limiter les prélèvements dans l'Éocène. Les partenaires ci-dessus ont demandé au BRGM d'utiliser le **MONA V1** pour tester les différentes solutions proposées par les cabinets d'étude du schéma. En 1998, une expertise du modèle réalisée à la demande de l'Agence de l'Eau a montré qu'il devait être amélioré pour arriver à un niveau de représentativité du milieu souterrain suffisant pour fonder des décisions d'investissements lourds, nécessaires pour mettre en œuvre les solutions du schéma. La prise en compte des différentes recommandations de l'expertise a permis de faire évoluer le modèle et d'aboutir à la version 2 décrite ci-dessous.

### MONA V2

Version du modèle au pas de 5 km fonctionnant en régime transitoire sur la période 1972-1996 (**MONA V2-1996**) et simulant les écoulements au sein de 5 couches aquifères : Mio-Plio-Quaternaire (à potentiels imposés), Oligocène, Éocène, Campano-Maastrichtien, Turonien-Coniacien-Santonien (Amraoui et al., 1999).

Cette version du modèle a été par la suite actualisée à deux reprises :

- en 1999 (Seguin 1999a) avec les données 1997 et 1998 (**MONA V2-1998**). Cette version du modèle a permis de reprendre les simulations du Schéma Directeur de Gestion des Ressources en Eau de la Gironde pour tester différents scénarios d'exploitation des nappes et de réduction des prélèvements dans l'Éocène.
- en 2001 (Seguin 2002) avec les données 1999 et 2000 (**MONA V2-2000**). Le modèle ainsi actualisé a été utilisé dans le cadre du SAGE "Nappes profondes de Gironde" pour simuler différents scénarios d'économie d'eau, aider à la définition des VMPO (Volumes Maximum Prélévable Objectifs) pour chacune des nappes visées par le SAGE, et proposer des indicateurs de l'état de la ressource.

Parallèlement, à la demande de la MISE de Gironde, des simulations ponctuelles ont été réalisées pour fonder les autorisations d'implantation et de prélèvements d'une dizaine d'ouvrages devant solliciter des nappes visées par le SAGE « Nappes Profondes ».

**MONA V2B** : Il existe une version du modèle 5 km fonctionnant en régime permanent avec 7 couches (+Cénomaniens et Jurassique) développé au cours de l'année 2 de la convention « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine 1996-2001 ».

### MONA V3

Développements réalisés dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » 2002-2006. Au cours de l'année 1 (Pédron, Seguin, et Capdeville 2003), les améliorations suivantes ont été apportées :

- Passage du modèle à mailles carrées de 5 km de côté (MONA V2-2000) à une version 2 km avec adjonction de l'Aquitainien-Burdigalien, du Langhien-Serravallien (Helvétien) et du Plio-Quaternaire en remplacement de l'ancienne couche Mio-Plio-Quaternaire à potentiels imposés (MONA V3-2000).
- Subdivision de l'Éocène en 3 couches distinctes et réajustement de la géométrie de l'Oligocène (MONA V3.1-2000).

Au cours de l'année 2, la finalisation de la géométrie de l'Oligocène a été réalisée et le calage des trois couches de l'Éocène et celle de l'Oligocène effectuées.

La version **MONA V3.1** du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes intègre donc 9 couches : Plio-Quaternaire, Langhien-Serravallien (Helvétien), Aquitainien-Burdigalien, Oligocène, Éocène supérieur, Éocène moyen, Éocène inférieur, Campano-Maastrichtien, et l'ensemble Turonien-Coniacien-Santonien.

Cette version du modèle a été actualisée en 2005 (Pédron, et al., 2006) avec les données de la période 2001-2003 (**MONA V3.1-2003**), puis partiellement en 2007 (uniquement les 3 couches de l'Éocène et du Campano-Maastrichtien) sur la période 2004-2006 (**MONA V3.1-2006p**) pour les besoins de l'étude sur l'évaluation des ressources dans le Bergeracois (Pédron, Abou-Akar, et Platel 2008).

Au cours de l'année 3 (Pédron, Platel, et Bourguin 2006), les travaux réalisés ont permis la subdivision de la couche du Turonien-Coniacien-Santonien en deux couches distinctes (Turonien et Coniacien-Santonien) et l'actualisation de la géométrie du Campano-Maastrichtien (**MONA V3.2**).

L'année 4 (Pédron et al. 2008) a été consacrée à la réalisation d'un modèle géologique régional des couches du Cénomaniens et du Jurassique (Bajocien, Bathonien-Callovio-Oxfordien, Kimméridgien et Tithonien) et à l'intégration de ces couches dans le modèle hydrodynamique pour aboutir à une version **MONA V3.3**.

La version V3.3b correspond principalement à des ajustements de la loi de recharge de la nappe du Plio-Quaternaire et à une meilleure prise en compte du comportement des réservoirs autour de la structure de Villagrains-Landiras suite aux études récentes réalisées dans le secteur (Marc Saltel 2008).

## **MONA V4**

Développements réalisés dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » 2008 - 2013.

L'année 2 de la convention 2008-2013 (M. Saltel et al. 2011) a permis d'initier l'élaboration d'une nouvelle version du modèle par la construction d'une base de données géologiques cohérente et la plus complète possible à partir des données disponibles (forages, diagraphies, cartes géologiques, failles, MNT,...). Cette dernière comporte au final près de 3480 forages pour lesquels plus de 15 000 passes (horizons correspondants soit à un aquifère soit à une éponte) sont décrites, les données diagraphiques disponibles de plus de 250 forages soit 343 mesures, les affleurements cartographiés des couches aquifères issus du Référentiel Hydrogéologique BD LISA sur l'équivalent de 100 cartes géologiques, les données sismiques disponibles (secteur de Villagrains-Landiras) et le tracé des failles.

La construction du modèle géologique a été initiée en année 3 (M. Saltel, Faucher, et B. 2012). Du fait de la limitation du logiciel en termes de nombre de couches, 3 modèles ont été nécessaires pour modéliser l'ensemble du système : un modèle pour les formations du Tertiaire, un autre pour le Crétacé et un dernier pour le Jurassique. Au final, le modèle géologique global comporte 30 couches dont 15 aquifères, 14 épontes et une couche de recouvrement quaternaire, soit 31 surfaces.

Un travail important de validation et de mise en cohérence des données a été réalisé. Il a notamment porté sur la correspondance des données de sondage et des cartes géologiques. Etant donné l'importance de la surface modélisée, ce sont près de 100 cartes géologiques qu'il a fallu revisiter pour faire coïncider au mieux les observations en forages avec celles des affleurements de la carte. Les limites d'extension des aquifères ont également été revues dans le cadre de la modélisation géologique.

In fine, l'amélioration de la géométrie du modèle finalisé en année 4 (M. Saltel et al. 2014) a permis de représenter à une échelle plus fine la complexité des réservoirs du Nord du Bassin aquitain. Les toits et les murs des 30 couches du modèle géologique ont été implémentés dans le modèle hydrodynamique via l'interface graphique Win Marthe du logiciel de modélisation MARTHE. Les premières simulations en régime permanent ont été réalisées à partir des données provenant de la version 3.3 du MONA sans toutefois entamer le processus de calage.

### **MONA V3.5**

En raison du très grand nombre de mailles de la version 4 et des longs temps de calcul associés, la création d'une version intermédiaire a été décidée : le MONA 3.5 (Buscarlet, Cabaret, et Saltel 2019). L'objectif est d'obtenir des temps de calcul plus raisonnables permettant d'aboutir à une version opérationnelle du MONA intégrant les améliorations sur la géométrie et la recharge provenant des travaux réalisés dans le cadre de la convention régionale.

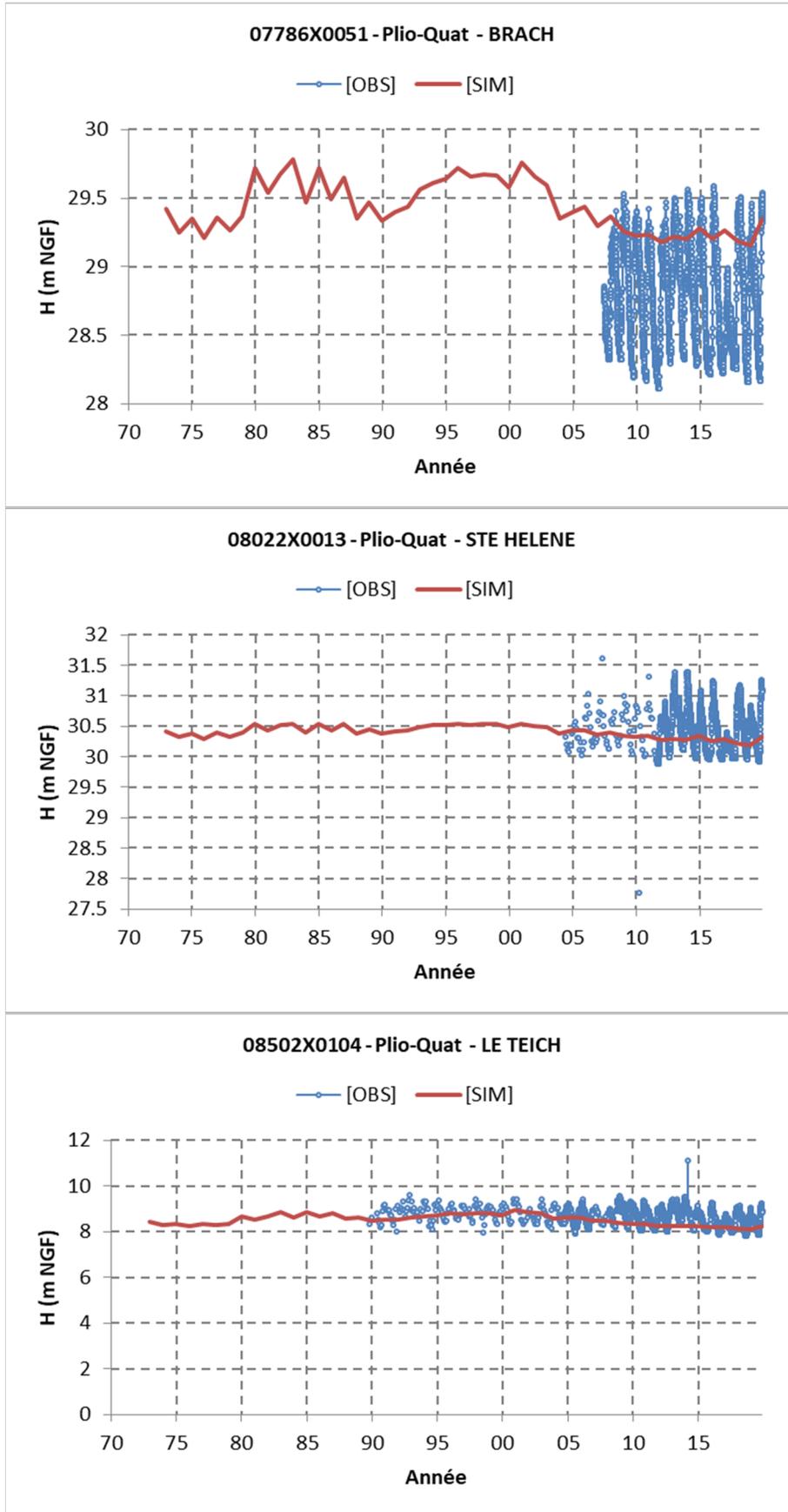
La version 3.5 intègre la géométrie de la version 4 dans un maillage de 2 km de côté de la même manière que la version 3.3. Le modèle comprend donc 16 couches et n'intègre les épontes que par l'intermédiaire de leurs perméabilités verticales.

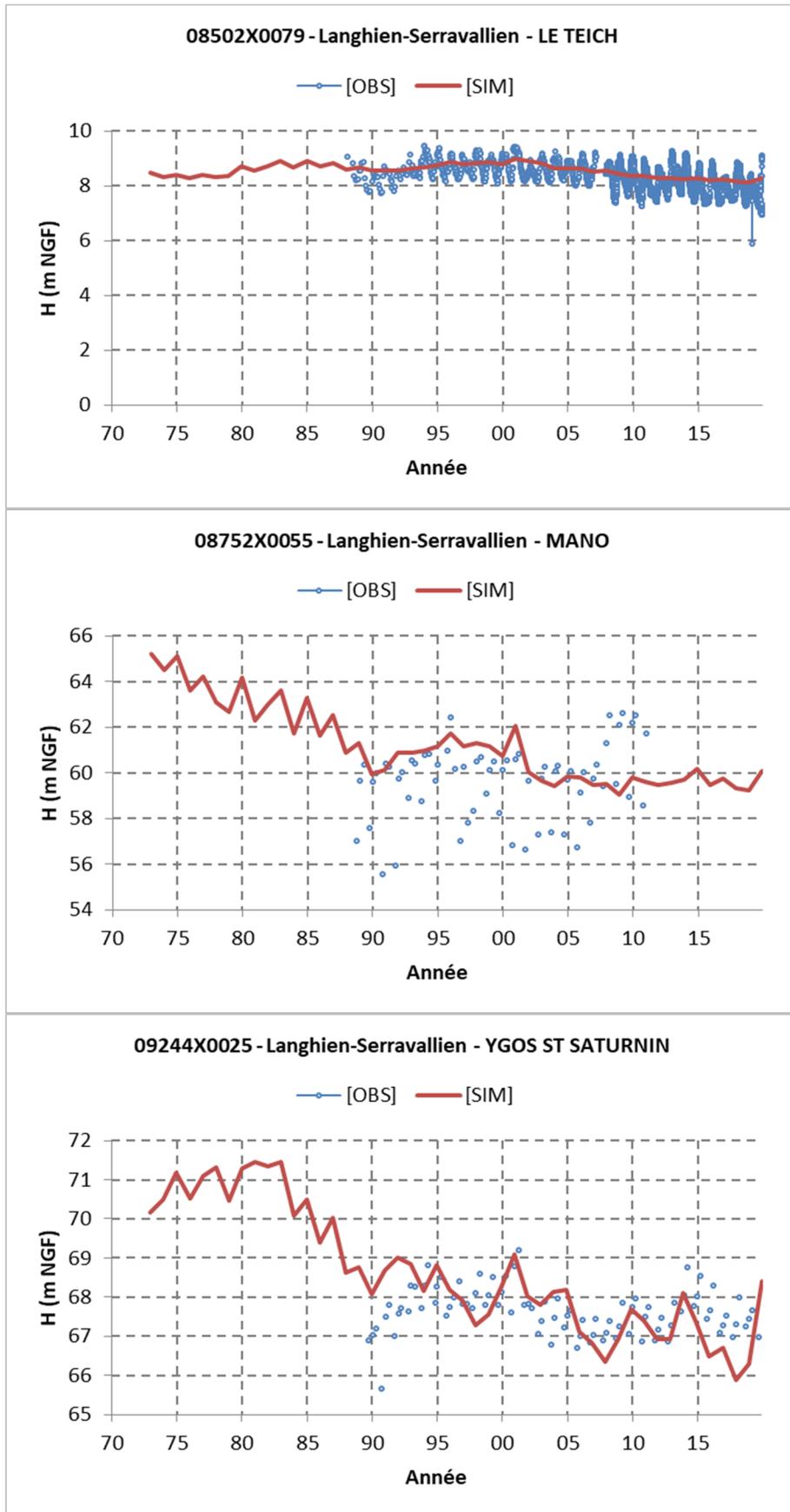
La détermination des flux de recharge est réalisée par l'intermédiaire du calcul de bilans hydroclimatiques avec le schéma GARDENIA. Ce bilan est effectué en utilisant les données météorologiques (pluies et ETP) issues des réanalyses SAFRAN. La prise en compte des données SAFRAN apparaît essentiel car elle permet de spatialiser les données climatiques sur l'ensemble modélisé

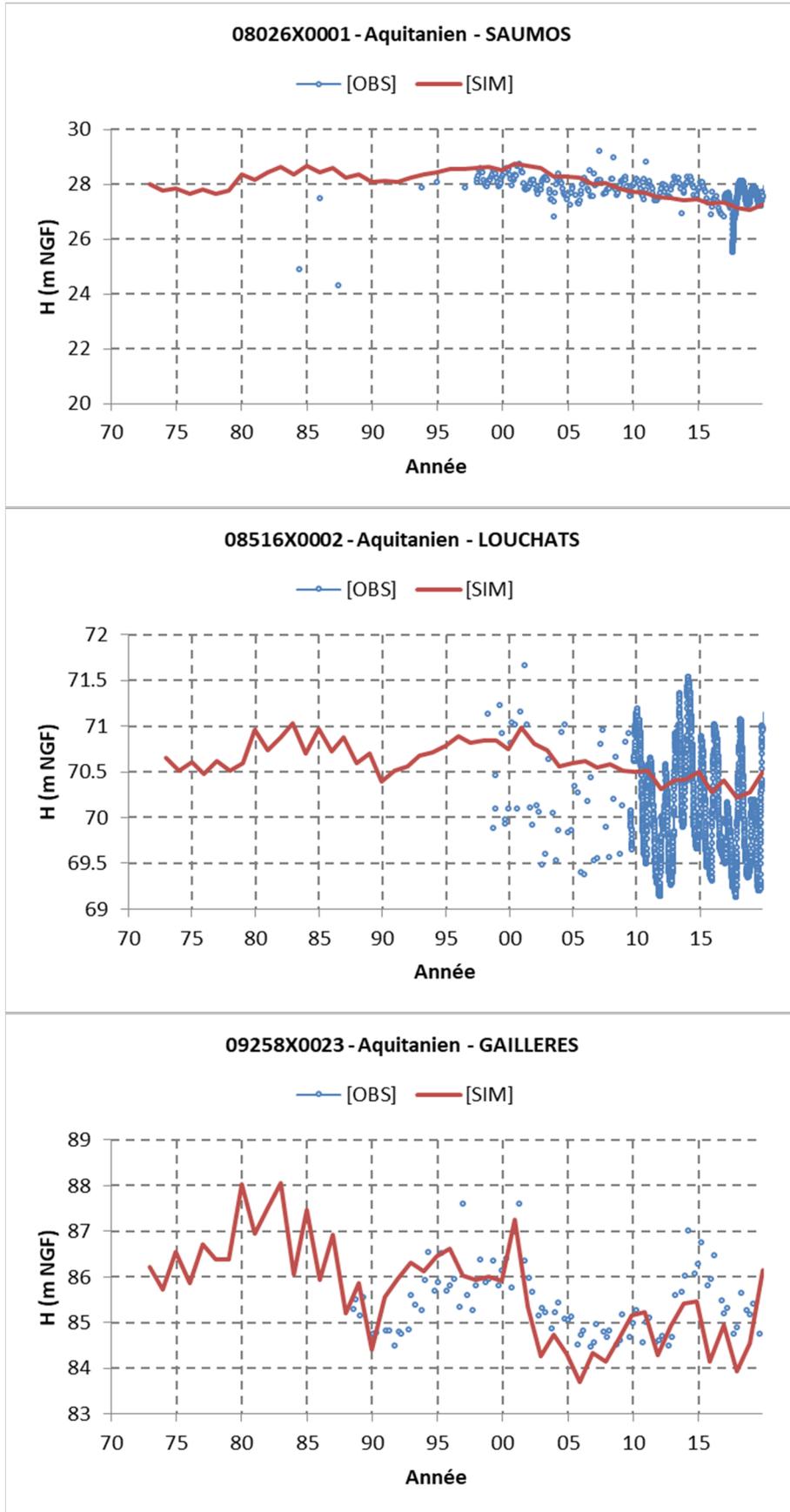


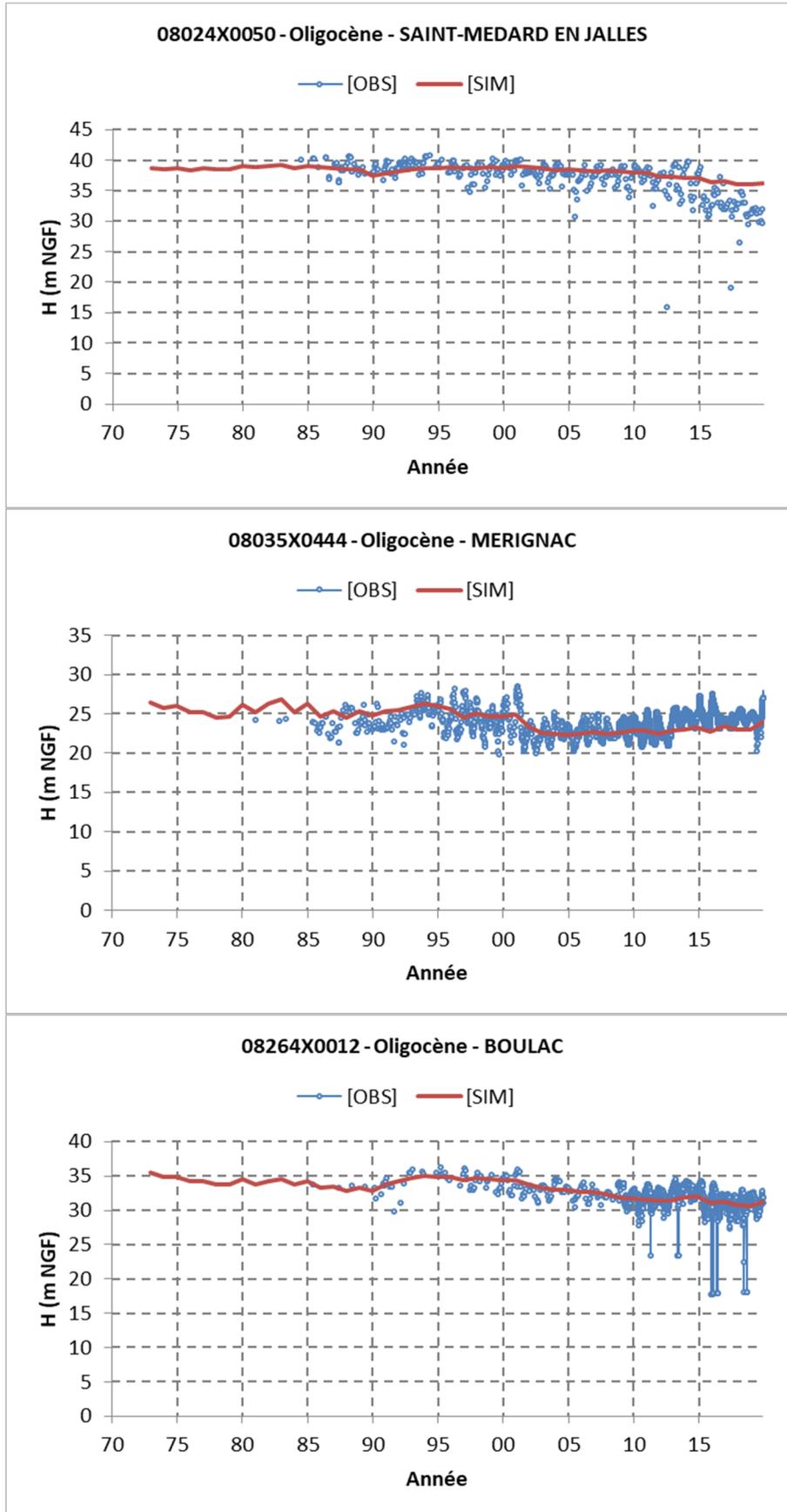
## **Annexe 2 Actualisation des chroniques de calage période 1972 - 2019 (MONA V3.3b)**

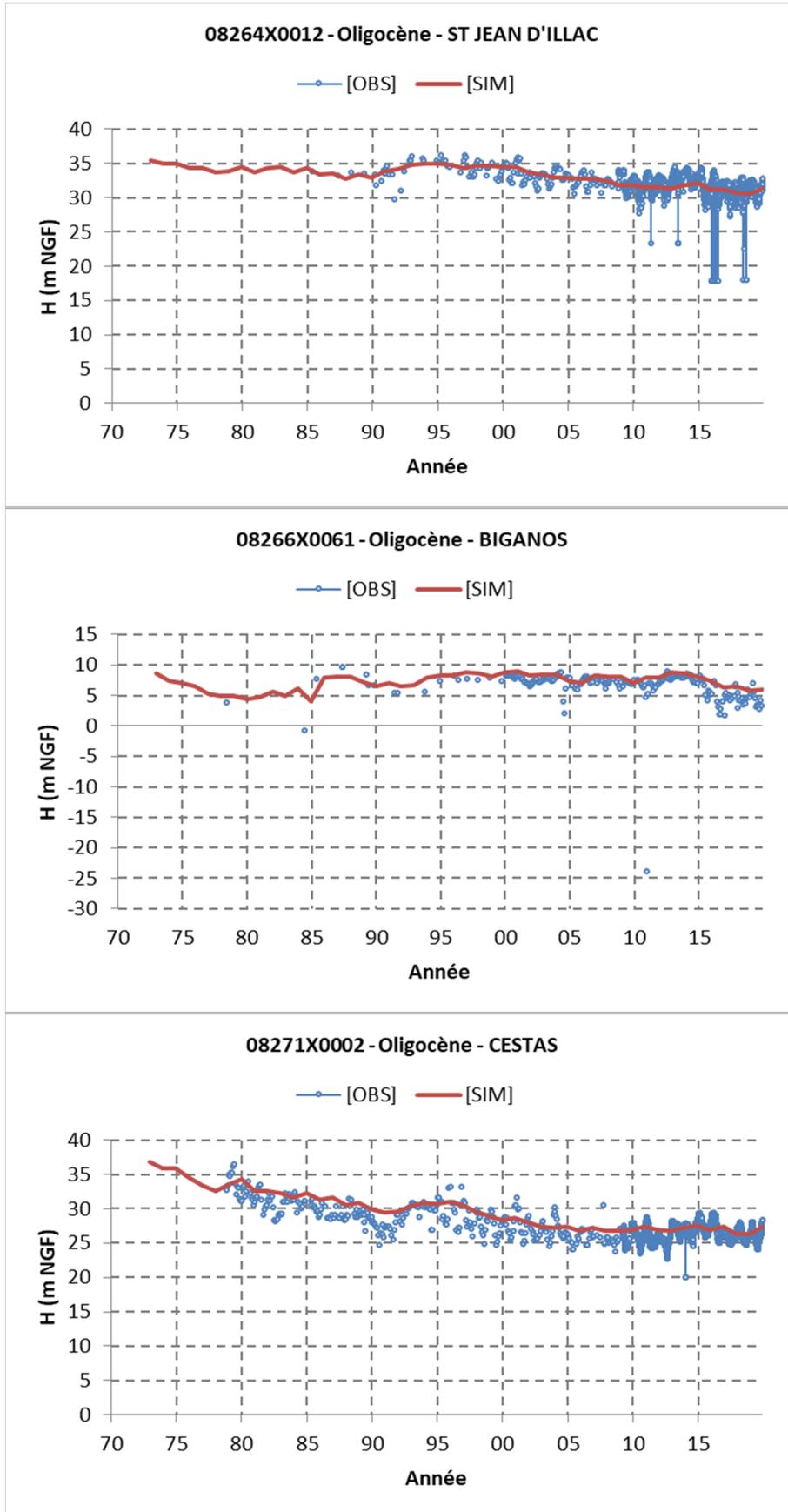


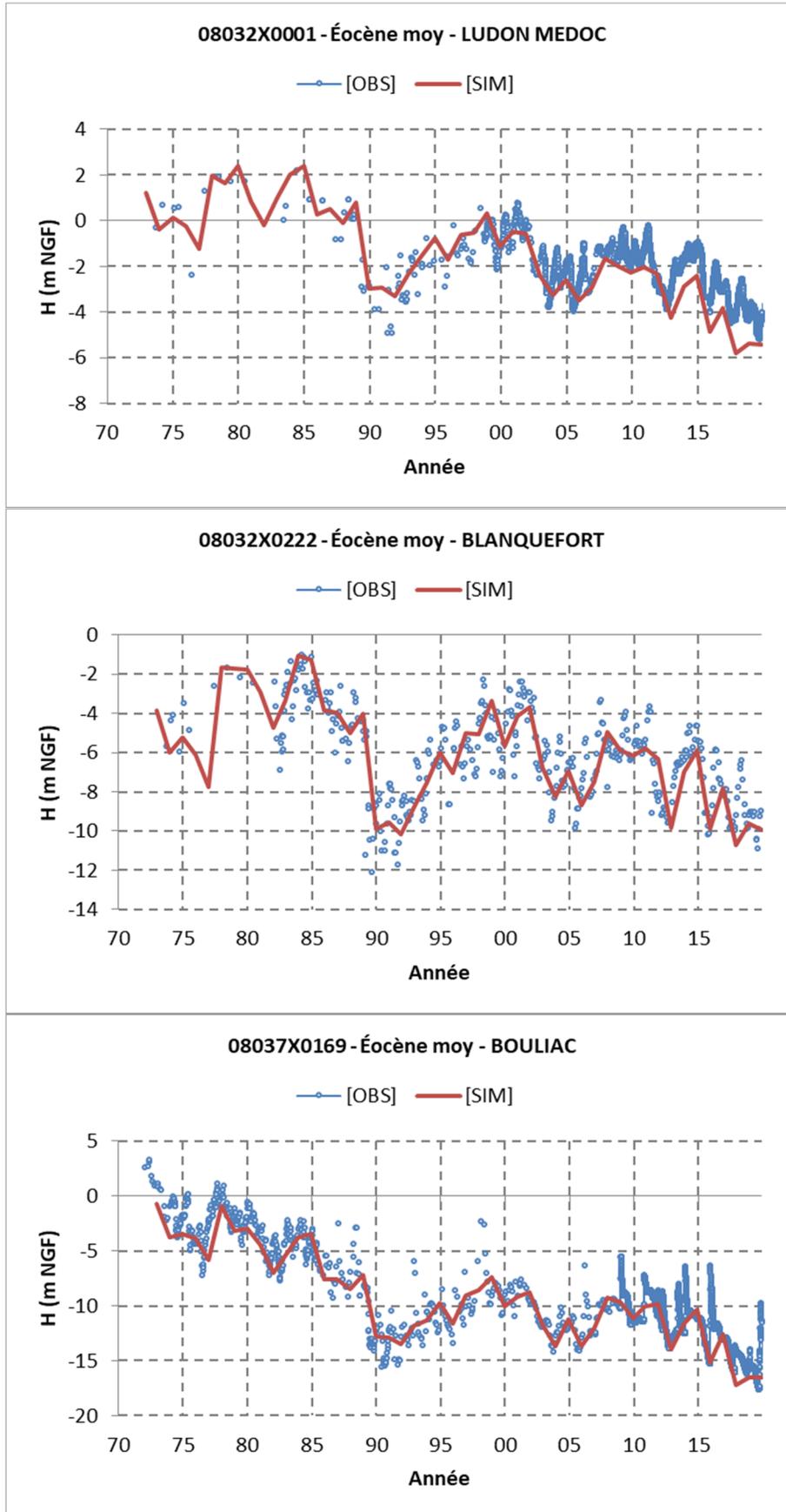


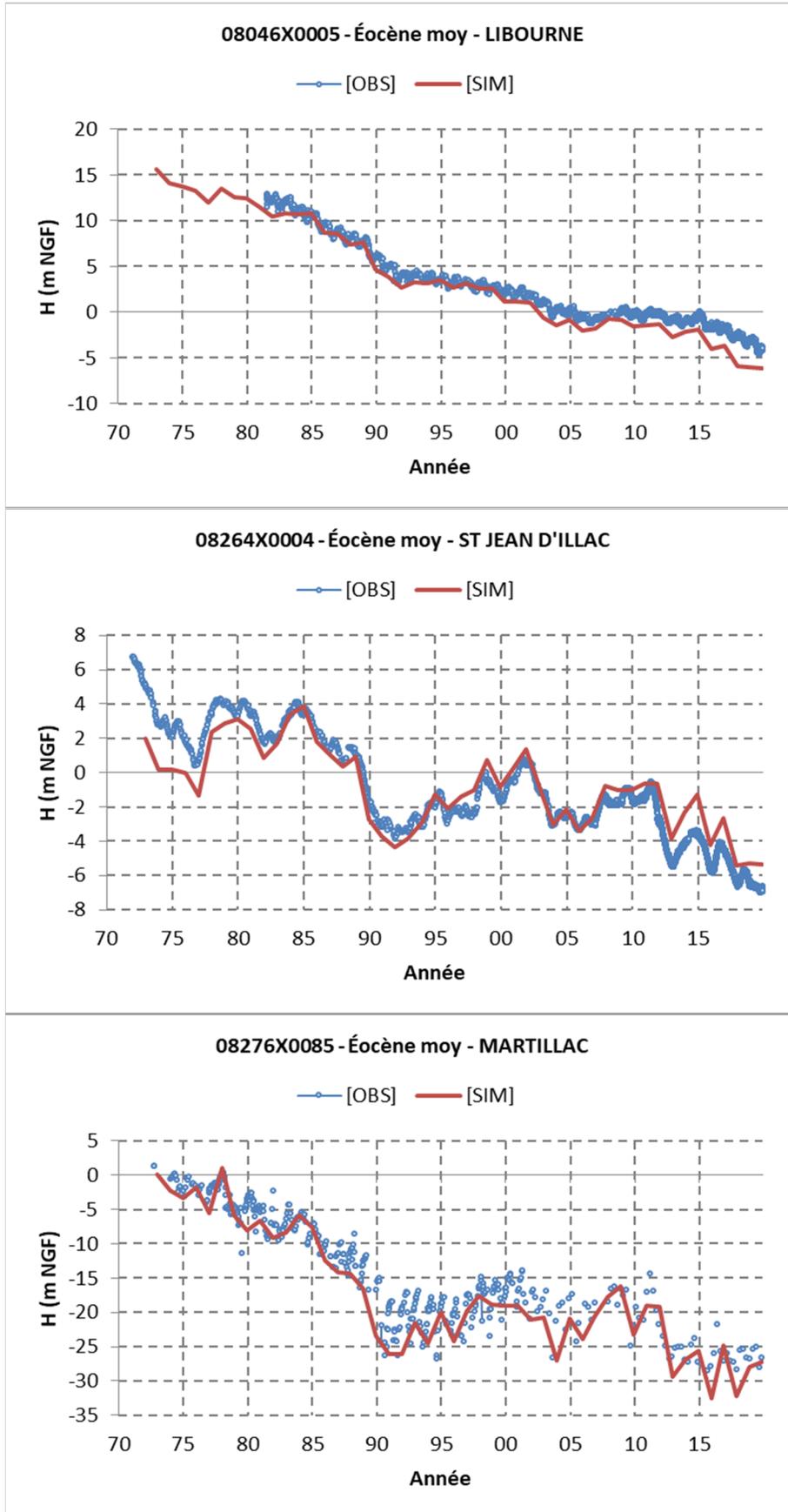


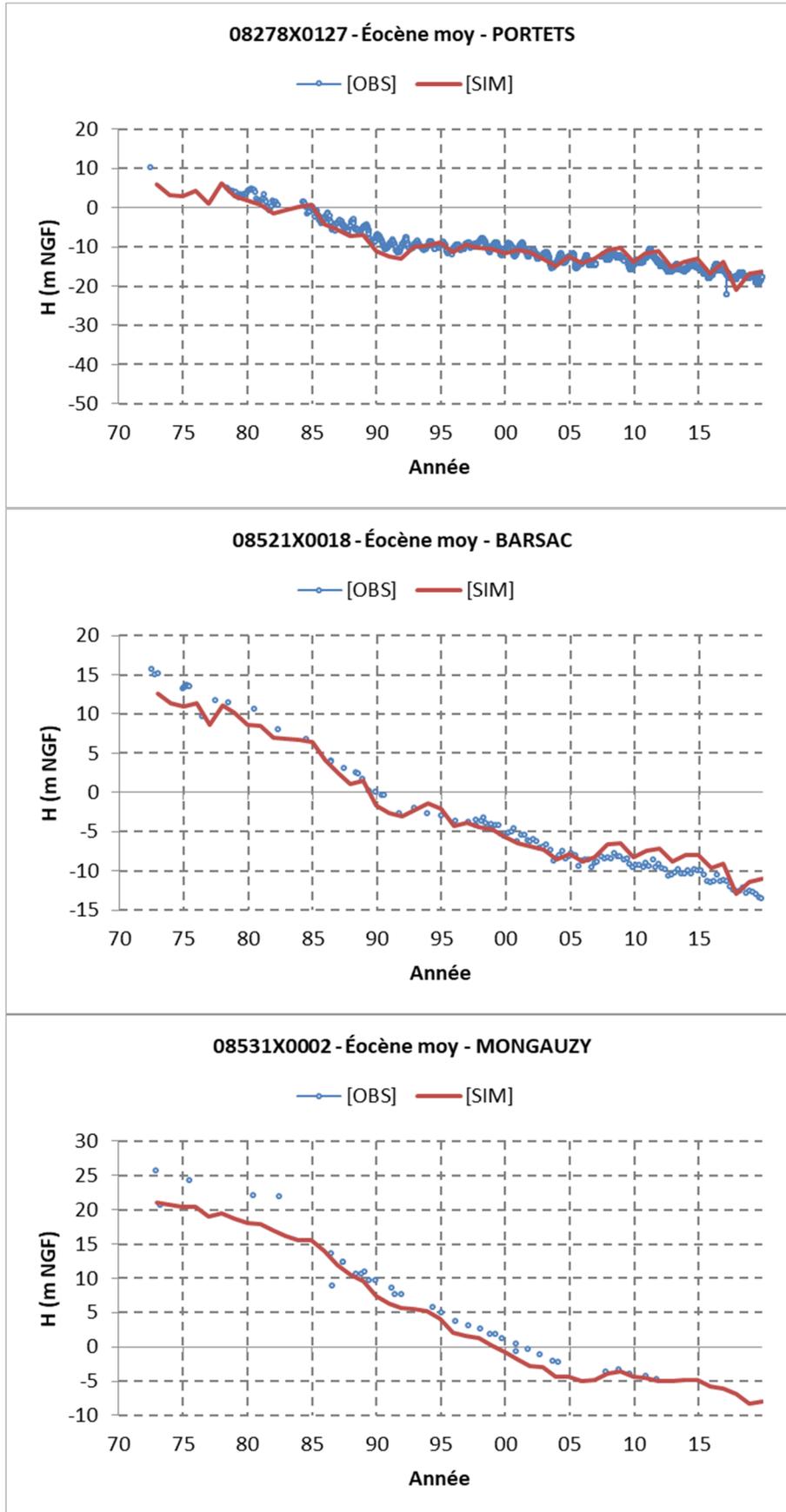


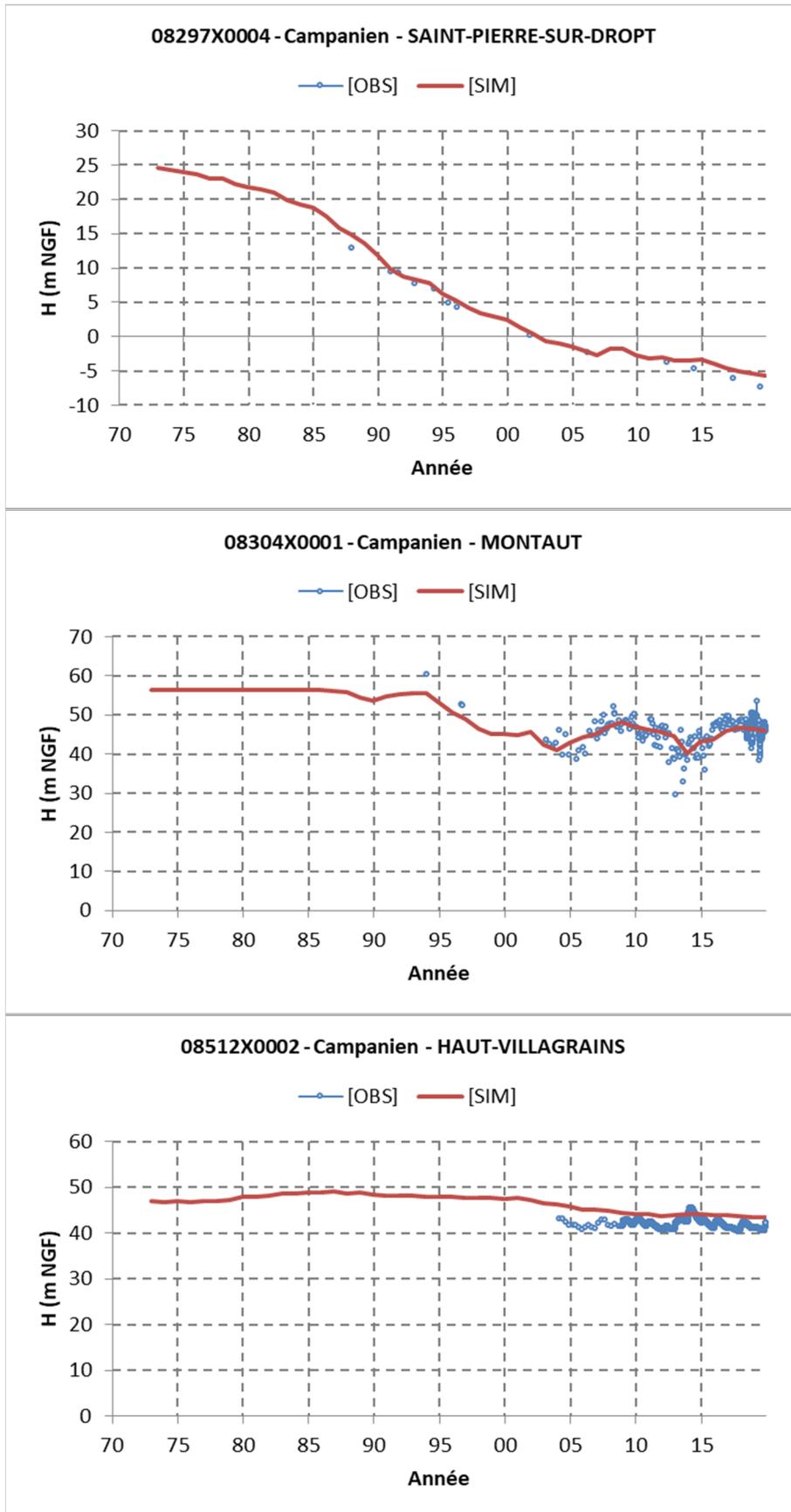


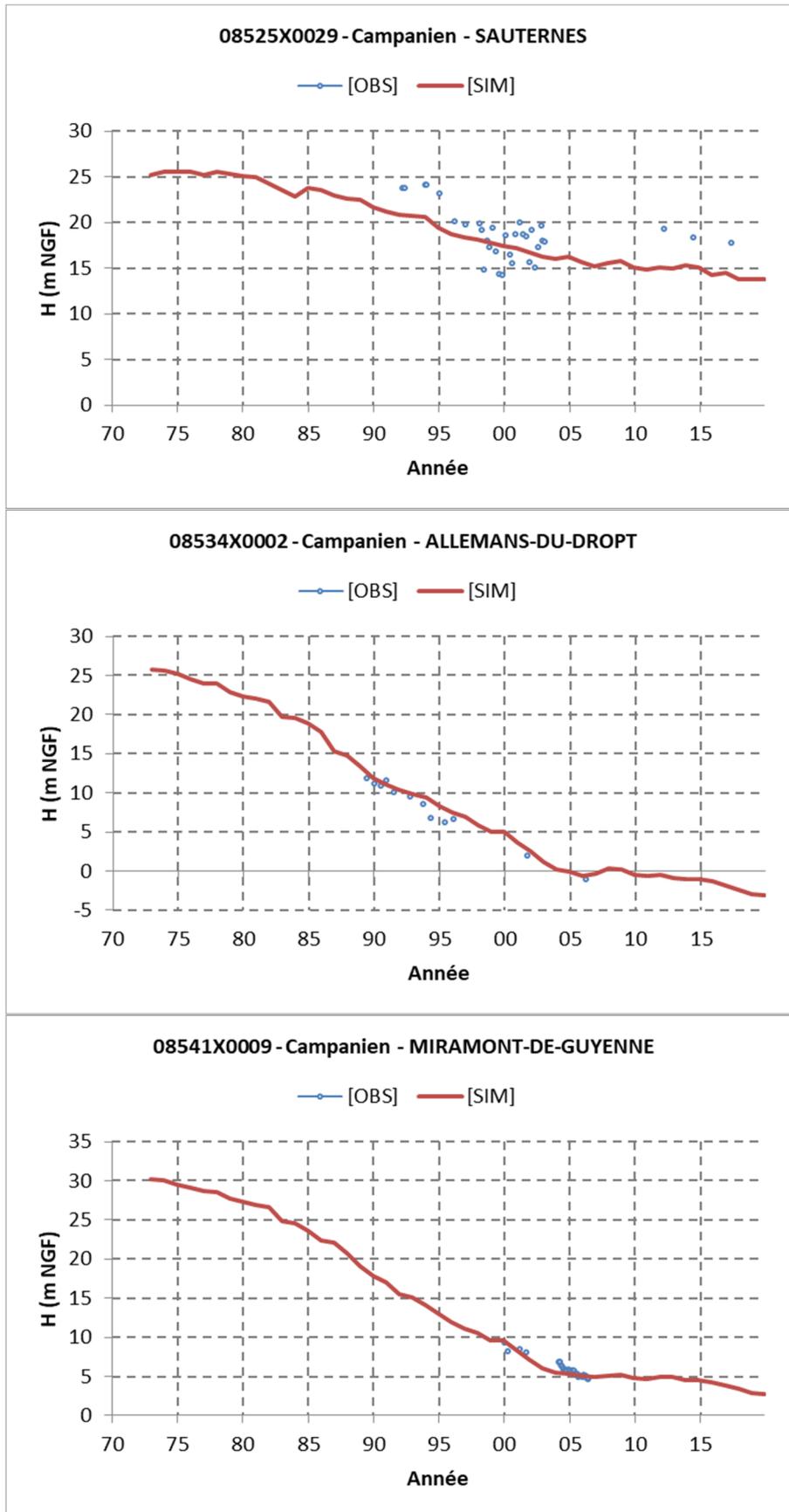


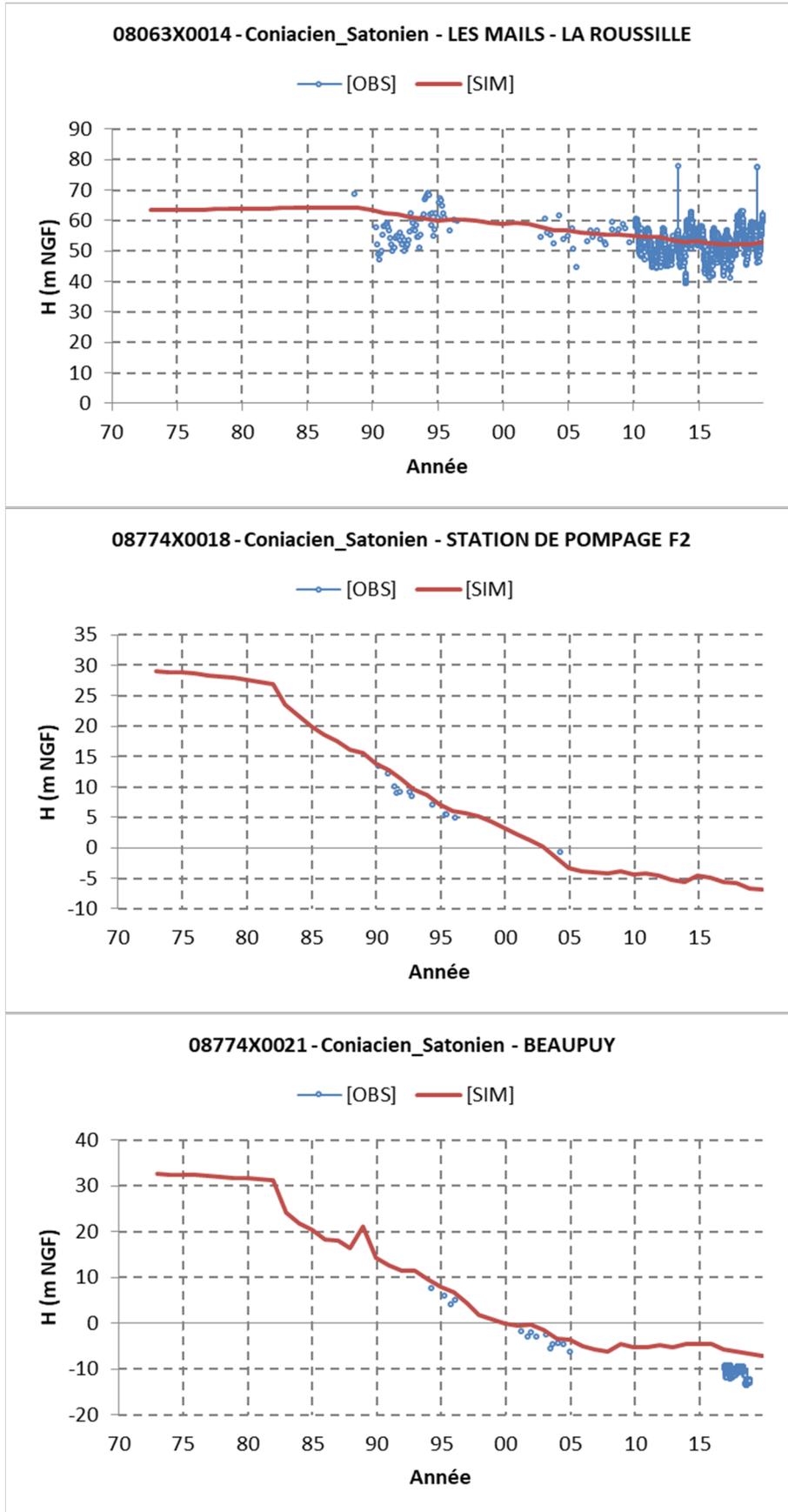


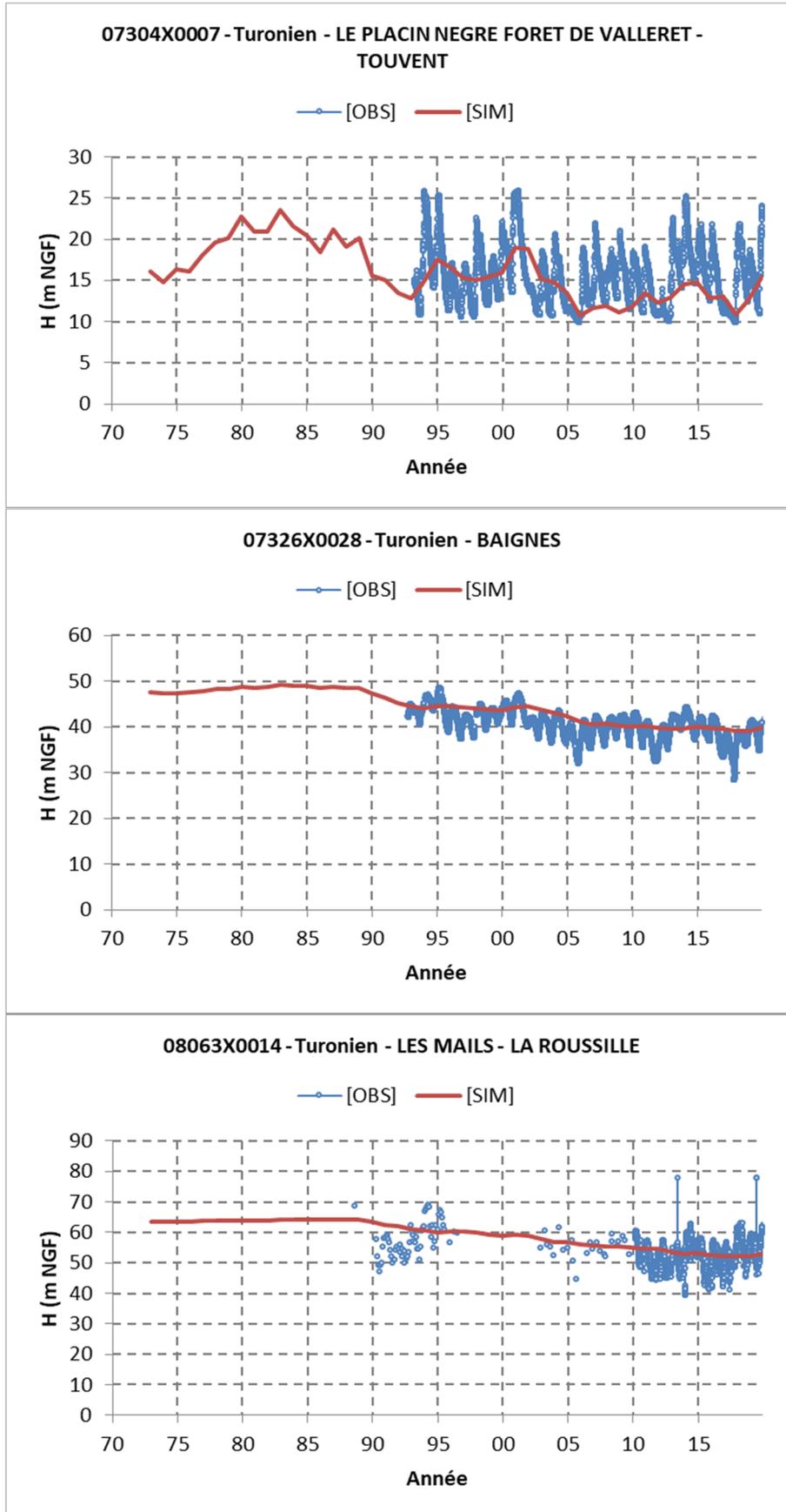


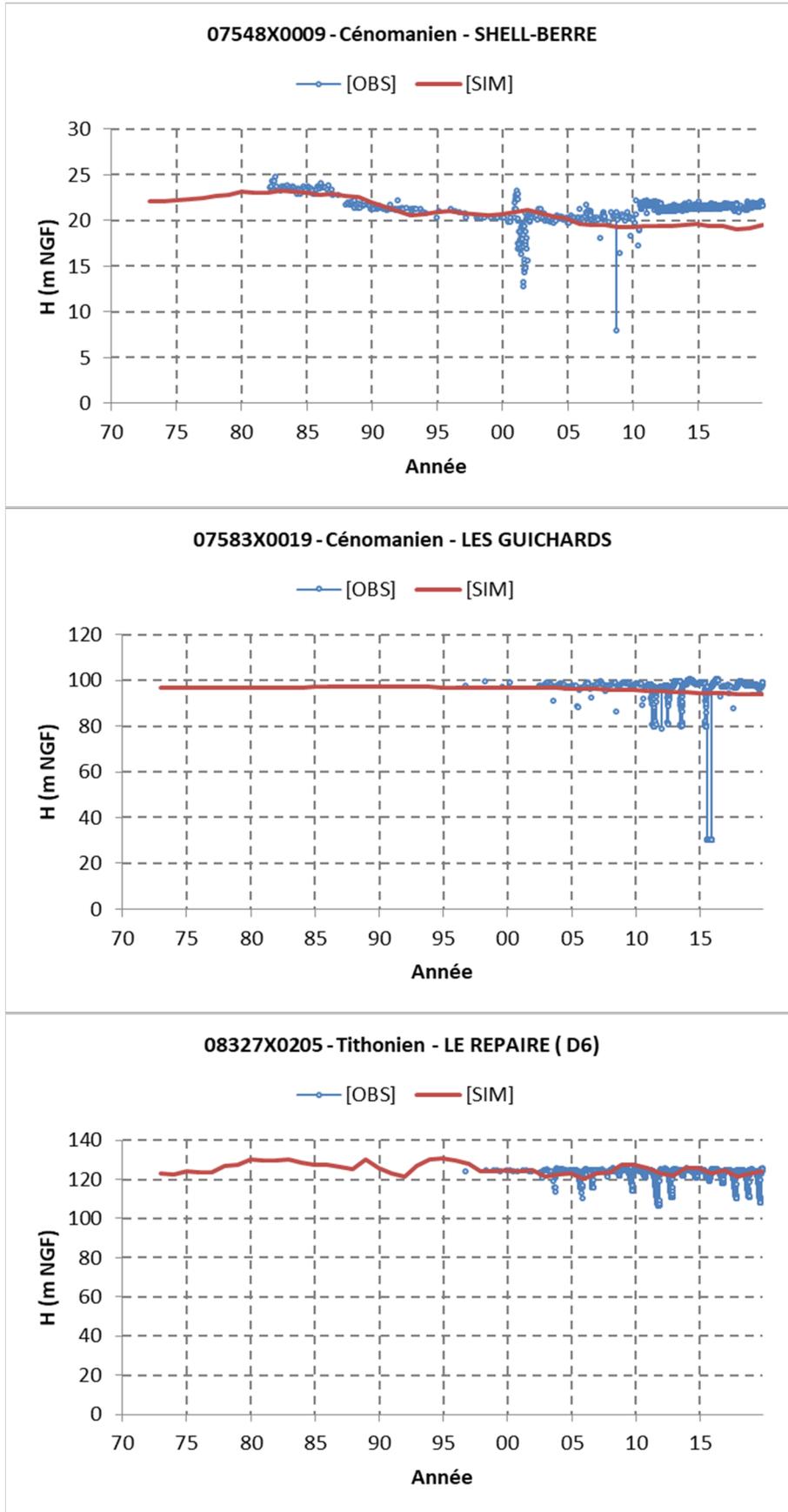


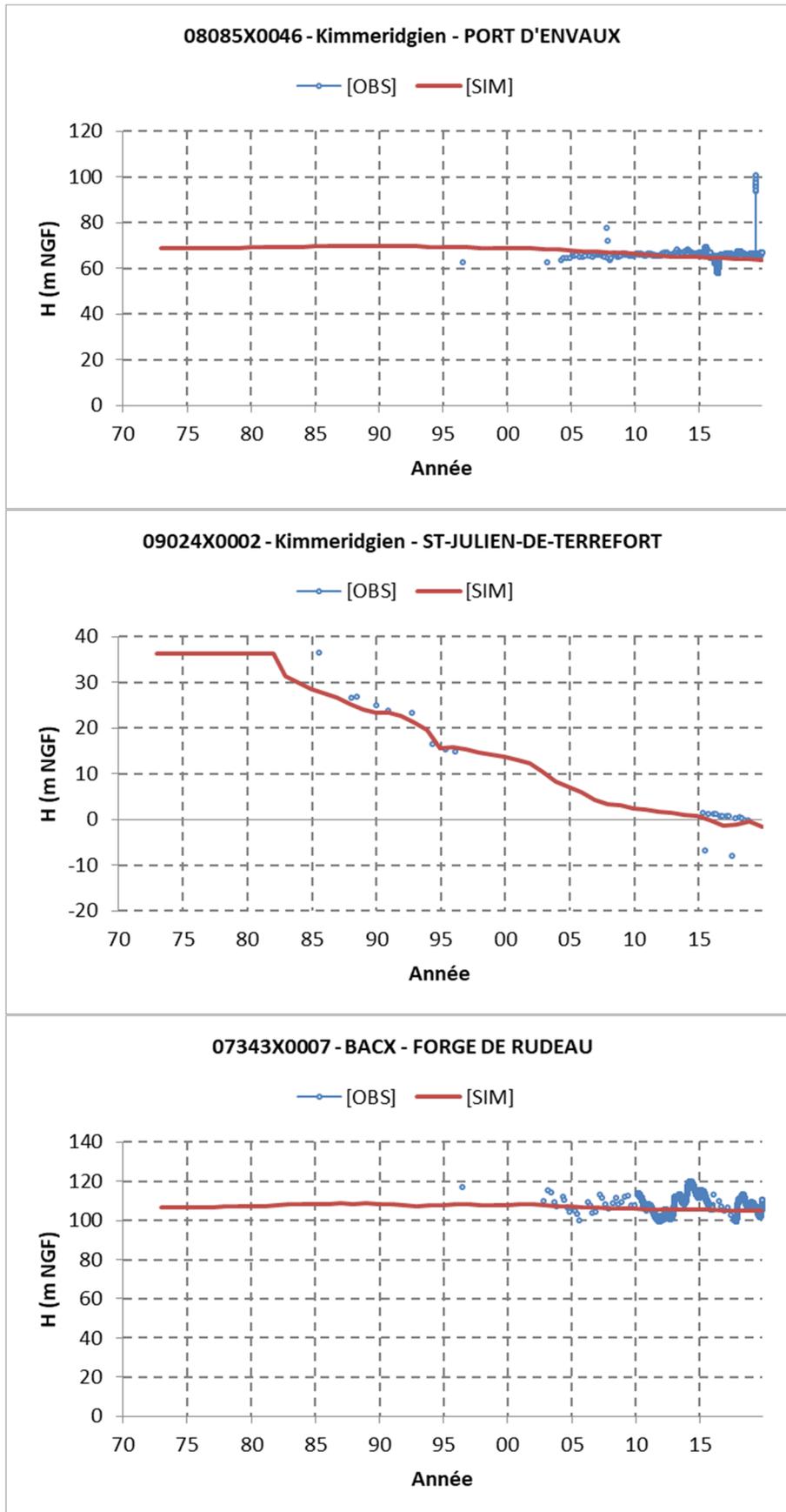


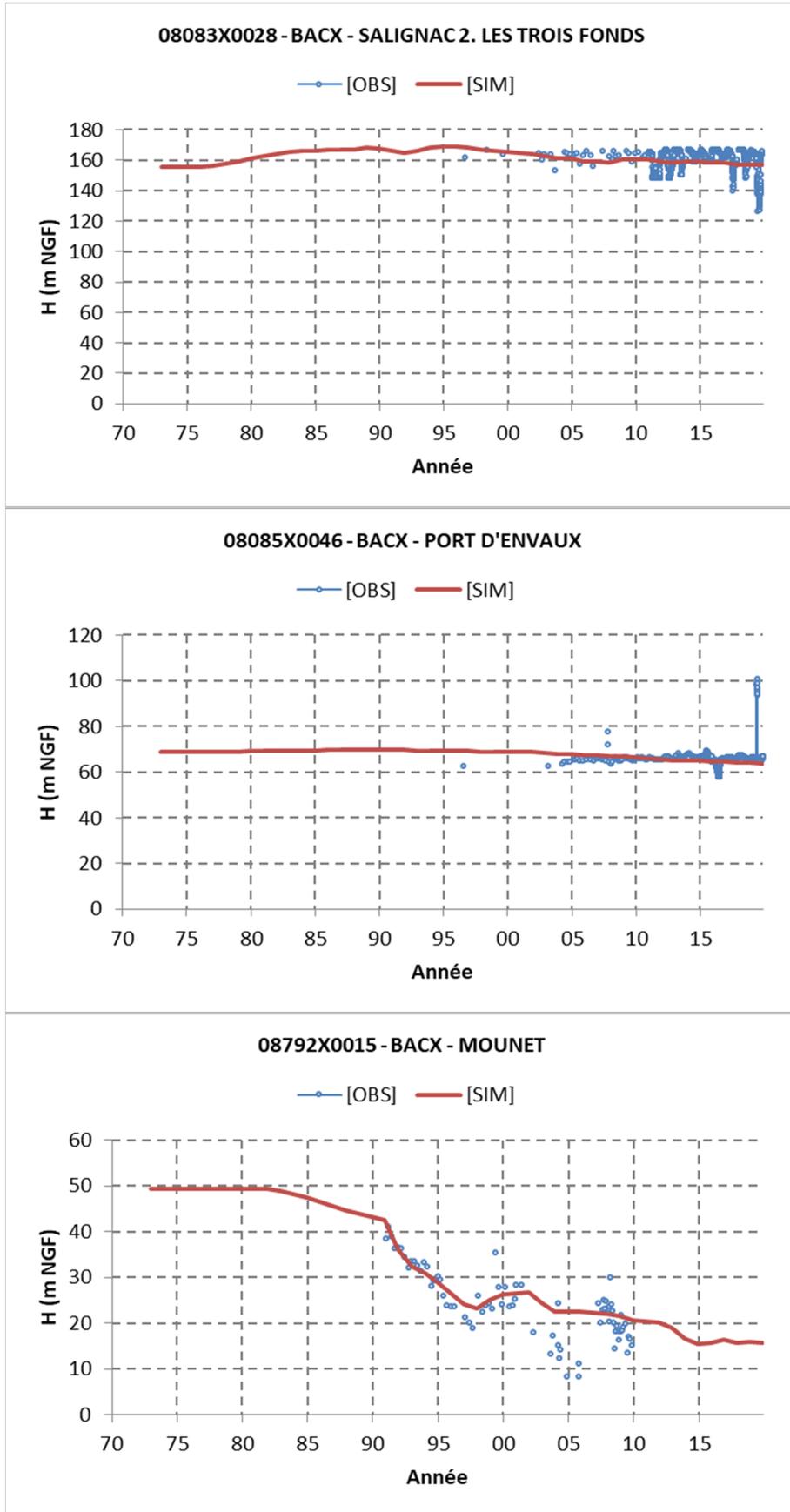


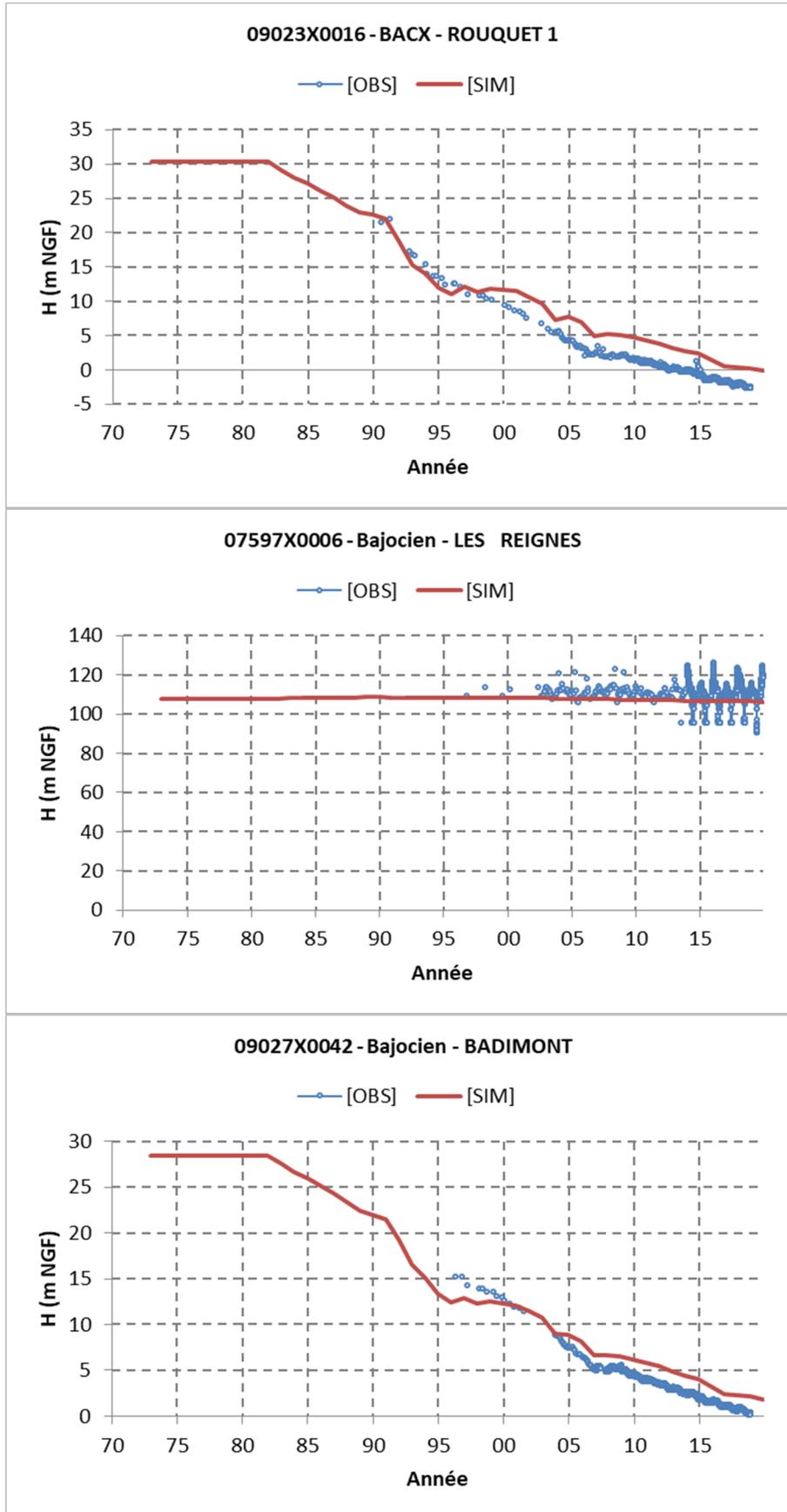












## **Annexe 3      Liste des points d'eau utilisés pour les analyses statistiques**



Développements du MONA et maintenance des modèles régionaux de Nouvelle-Aquitaine

N°	Indice BSS	Profondeur atteinte	Profondeur crépines	Coordonnées (Lambert-93)		Z (m NGF)	Département	Commune	Source des données
				X	Y				
1	07301X0165	58.0	16-55	381837	6500812	2.72	GIRONDE	VERDON-SUR-MER(LE)	ADES
2	07305X0001	95.0	75-95	385348	6490206	2.87	GIRONDE	SAINT-VIVIEN-DE-MEDOC	ADES
3	07305X0036	108.0	63-106	387441	6486621	4.10	GIRONDE	JAU-DIGNAC-ET-LOIRAC	BSS EAU
4	07305X0052	163.0	92.73-158.55	381297	6488120	12.40	GIRONDE	GRAYAN-ET-L'HOPITAL	BSS EAU
5	07306X0066	111.5	42-111.50	394513	6486615	2.46	GIRONDE	JAU-DIGNAC-ET-LOIRAC	ADES
6	07307X0087	104.0	11-76;80-100	399197	6482401	3.56	GIRONDE	SAINT-CHRISTOLY-MEDOC	ADES
7	07542X0001	45.0	30-38	391043	6474983	4.20	GIRONDE	LESPARRE-MEDOC	ADES
8	07542X0002	207.0	170.5-200.5	391059	6474999	3.85	GIRONDE	LESPARRE-MEDOC	ADES
9	07542X0042	60.0	15-60	393438	6478367	9.00	GIRONDE	CIVRAC-EN-MEDOC	BSS EAU
10	07543X0010	95.0	74.80-90.80	400033	6477709	5.00	GIRONDE	COUQUEQUES	BSS EAU
11	07543X0085	202.0	151-193	398580	6474754	14.35	GIRONDE	ORDONNAC	ADES
12	07544X0091	111.0	6-111.4	401766	6477549	2.92	GIRONDE	SAINT-YZANS-DE-MEDOC	ADES
13	07548X0117	200.0	92-190	405288	6461127	9.00	GIRONDE	PAUILLAC	ADES
14	07548X0234	155.0	23.5 –148	405254	6469680	3.49	GIRONDE	SAINT-ESTEPHE	ADES
15	07555X0027	9.0	2.7-8.5	414988	6468882	1.05	GIRONDE	BRAUD-ET-SAINT-LOUIS	ADES
16	07555X0040	64.0	52-59	410294	6469011	3.60	GIRONDE	BRAUD-ET-SAINT-LOUIS	ADES
17	07774X0001	435.1	225-250	374559	6452546	15.30	GIRONDE	CARCANS	BSS EAU
18	07778X0036	262.0	200.3-252.3	378319	6449698	15.00	GIRONDE	CARCANS	ADES
19	07783X0002	146.0	100-146	398770	6457173	10.00	GIRONDE	SAINT-LAURENT-MEDOC	ADES
20	07784X0079	34.5	26.4-34.5	406705	6457994	4.14	GIRONDE	SAINT-JULIEN-BEYCHEVELLE	ADES
21	07785X0001	238.0	139-238	381846	6450410	21.00	GIRONDE	CARCANS	BSS EAU
22	07786X0047	179.0	96.5-179	387094	6445419	29.00	GIRONDE	BRACH	ADES
23	07788X0001	242.0	141-172; 215-218; 227-242	400890	6444204	26.05	GIRONDE	CASTELNAU-DE-MEDOC	ADES
24	07788X0037	194.0	129-189	406520	6444430	16.00	GIRONDE	AVENSAN	BSS EAU

## Développements du MONA et maintenance des modèles régionaux de Nouvelle-Aquitaine

N°	Indice BSS	Profondeur atteinte	Profondeur crépines	Coordonnées (Lambert-93)		Z (m NGF)	Département	Commune	Source des données
				X	Y				
25	07791X0002	90.0	74-89	413275	6451243	3.50	GIRONDE	PLASSAC	ADES
26	07791X0008	124.0	94.7-119.80	412399	6457255	4.39	GIRONDE	SAINT-GENES-DE-BLAYE	ADES
27	07791X0204	80.0	34-44; 47.9-79.4	408679	6452368	3.28	GIRONDE	CUSSAC-FORT-MEDOC	ADES
28	07791X0205	24.0	???	408684	6452348	3.28	GIRONDE	CUSSAC-FORT-MEDOC	ADES
29	07791X0219	57.5	29-57	413165	6451284	4.30	GIRONDE	PLASSAC	ADES
30	07791X0220	30.0	6-24.5	412399	6457262	4.38	GIRONDE	SAINT-GENES-DE-BLAYE	ADES
31	07792X0006	163.0	81-152	417796	6452647	27.84	GIRONDE	BERSON	ADES
32	07793X0004	143.0	60-138	426506	6450163	7.50	GIRONDE	PUGNAC	ADES
33	07794X0001	187.0	123-128.69; 140.9-179.6	434022	6454931	39.33	GIRONDE	SAINT-YZAN-DE-SOUDIAC	ADES
34	07794X0007	80.0	62.30-75.30	428954	6456717	40.00	GIRONDE	SAINT-SAVIN	BSS EAU
35	07795X0105	53.2	31-45; 49-53	411142	6447461	3.67	GIRONDE	SOUSSANS	ADES
36	07795X0106	123.0	98.1-103.8; 105-123	411139	6447458	3.59	GIRONDE	SOUSSANS	ADES
37	07796X0001	194.0	194	416975	6443491	6.16	GIRONDE	AMBES	BSS EAU
38	07796X0025	248.0	195.2-213.2; 219.2-243.6	419593	6440289	5.00	GIRONDE	AMBES	ADES
39	07796X0045	150.0	101.36-147.36	417235	6442439	4.21	GIRONDE	AMBES	ADES
40	07796X0069	196.0	???	420007	6444037	7.05	GIRONDE	BOURG	ADES
41	07796X0106	263.0	200-255.3	420632	6442012	3.00	GIRONDE	AMBES	ADES
42	07796X0110	265.0	217-243.5; 252.5-257.5	417033	6443733	4.50	GIRONDE	AMBES	ADES
43	07798X0004	290.0	132-290	430944	6444543	40.00	GIRONDE	PEUJARD	BSS EAU
44	07808X0002	120.0	85-114.2	458306	6439828	15.50	GIRONDE	SAINT-MEDARD-DE-GUIZIERES	BSS EAU
45	07815X0056	131.0	119-131	469818	6441747	46.00	DORDOGNE	PIZOU(LE)	ADES
46	08022X0008	305.0	278-305	386582	6436610	32.42	GIRONDE	SAINTE-HELENE	ADES
47	08032X0001	276.0	194.38-267.18	416212	6437866	5.92	GIRONDE	LUDON-MEDOC	ADES
48	08032X0222	265.0	169-259	413480	6433531	18.00	GIRONDE	BLANQUEFORT	ADES

## Développements du MONA et maintenance des modèles régionaux de Nouvelle-Aquitaine

N°	Indice BSS	Profondeur atteinte	Profondeur crépines	Coordonnées (Lambert-93)		Z (m NGF)	Département	Commune	Source des données
				X	Y				
49	08033X0237	267.0	229-262	420609	6431175	3.97	GIRONDE	BASSENS	ADES
50	08033X0294	265.0	190-265	421697	6430791	3.80	GIRONDE	BASSENS	ADES
51	08034X0031	326.0	250-320	432213	6430310	3.36	GIRONDE	SAINT-SULPICE-ET-CAMEYRAC	ADES
52	08035X0338	235.0	129.7-230	409973	6428148	11.00	GIRONDE	HAILLAN(LE)	ADES
53	08035X0376	429.0	270-426	412111	6424845	42.50	GIRONDE	EYSINES	ADES
54	08035X0393	411.0	244-403	407315	6427895	15.00	GIRONDE	SAINT-MEDARD-EN-JALLES	ADES
55	08035X0425	218.0	161-210	412894	6428060	5.00	GIRONDE	EYSINES	ADES
56	08036X0015	320.0	258.95-277.10; 283.65-313.90	416603	6425104	2.70	GIRONDE	BOUSCAT(LE)	BSS EAU
57	08036X0018	245.7	196.6-245.5	419143	6424199	4.80	GIRONDE	BORDEAUX	ADES
58	08036X0019	245.0	192.6-244.8	418525	6425124	3.80	GIRONDE	BORDEAUX	ADES
59	08037X0015	300.0	241-296	421147	6423761	4.21	GIRONDE	CENON	ADES
60	08037X0021	214.0	211	421034	6429398	4.93	GIRONDE	BASSENS	ADES
61	08037X0039	310.0	275-306	422049	6421352	27.86	GIRONDE	FLOIRAC	ADES
62	08037X0040	284.0	228-284	420474	6427375	4.45	GIRONDE	BORDEAUX	ADES
63	08037X0169	251.0	201.83-245.20	424822	6419702	72.10	GIRONDE	BOULIAC	ADES
64	08037X0402	295.0	259-292	421079	6421510	3.70	GIRONDE	FLOIRAC	ADES
65	08037X0425	350.0	269-347	423189	6422963	64.00	GIRONDE	CENON	BSS EAU
66	08037X0429	330.0	216.4-312	422697	6425764	36.00	GIRONDE	LORMONT	ADES
67	08038X0236	312.0	240.35-306.38	430674	6424855	20.00	GIRONDE	POMPIGNAC	BSS EAU
68	08046X0005	298.0	269-270	445971	6427097	11.70	GIRONDE	LIBOURNE	ADES
69	08047X0042	294.0	234-290.17	453035	6418494	7.00	GIRONDE	SAINT-JEAN-DE-BLAIGNAC	ADES
70	08047X0050	312.0	247.78-308	453651	6422801	12.00	GIRONDE	SAINT-PEY-D'ARMENS	BSS EAU
71	08048X0048	295.0	249-292	458497	6422254	23.00	GIRONDE	SAINT-MAGNE-DE-CASTILLON	BSS EAU
72	08051X0001	180.0	101.19-121.69; 137.69-177.69	465430	6433383	66.60	DORDOGNE	MINZAC	ADES

## Développements du MONA et maintenance des modèles régionaux de Nouvelle-Aquitaine

N°	Indice BSS	Profondeur atteinte	Profondeur crépines	Coordonnées (Lambert-93)		Z (m NGF)	Département	Commune	Source des données
				X	Y				
73	08253X0012	505.0	345-495	368498	6414693	8.00	GIRONDE	LEGE-CAP-FERRET	BSS EAU
74	08254X0012	471.0	421.15-468.34	372945	6416447	5.80	GIRONDE	ARES	ADES
75	08261X0030	483.0	384-478	378343	6413603	17.52	GIRONDE	ANDERNOS-LES-BAINS	ADES
76	08264X0004	494.0	428.8-479.03	403353	6420285	44.95	GIRONDE	SAINT-JEAN-D'ILLAC	ADES
77	08271X0213	419.0	270-408.5	410563	6419515	42.50	GIRONDE	MERIGNAC	ADES
78	08272X0005	332.0	282-332	419882	6418686	5.52	GIRONDE	BEGLES	ADES
79	08272X0391	312.0	180-306	417281	6412763	30.00	GIRONDE	VILLENAVE-D'ORNON	ADES
80	08272X0404	327.0	184-327	414718	6414387	18.00	GIRONDE	GRADIGNAN	ADES
81	08273X0262	341.0	289.69-336	422736	6417098	4.05	GIRONDE	LATRESNE	ADES
82	08273X0272	250.0	120-244	424003	6410792	5.00	GIRONDE	QUINSAC	ADES
83	08273X0288	277.0	192-272	423127	6414044	4.18	GIRONDE	CAMBLANES-ET-MEYNAC	ADES
84	08276X0085	380.0	225.5-376.25	416646	6406746	52.00	GIRONDE	MARTILLAC	ADES
85	08277X0003	307.0	183.5-307	424513	6404104	7.91	GIRONDE	CASTRES-GIRONDE	ADES
86	08277X0152	305.0	196.5-301	422828	6404571	30.80	GIRONDE	BREDE(LA)	ADES
87	08277X0153	360.0	256-349	421252	6407727	23.00	GIRONDE	SAINT-MEDARD-D'EYRANS	ADES
88	08278X0023	125.0	89.5-91.5; 108-110; 118-125	427442	6408917	6.86	GIRONDE	BAURECH	ADES
89	08278X0111	284.0	206-274	429551	6402035	32.00	GIRONDE	ARBANATS	ADES
90	08278X0127	305.0	173-293	427063	6402180	31.95	GIRONDE	PORTETS	ADES
91	08278X0186	200.0	128-195	428461	6408184	7.00	GIRONDE	BAURECH	ADES
92	08281X0018	375.0	300-370	438851	6412402	78.13	GIRONDE	SAUVE(LA)	ADES
93	08281X0020	325.0	220-288; 299-305; 319-323	433929	6409173	92.12	GIRONDE	HAUX	ADES
94	08282X0029	338.0	294-338	441693	6408899	51.20	GIRONDE	TARGON	BSS EAU
95	08284X0011	326.0	238-298	458874	6416921	12.00	GIRONDE	SAINT-PEY-DE-CASTETS	BSS EAU
96	08285X0012	200.0	146-191	433732	6404393	10.91	GIRONDE	PAILLET	ADES

Développements du MONA et maintenance des modèles régionaux de Nouvelle-Aquitaine

N°	Indice BSS	Profondeur atteinte	Profondeur crépines	Coordonnées (Lambert-93)		Z (m NGF)	Département	Commune	Source des données
				X	Y				
97	08288X0003	350.0	233.68-278.78	455745	6404379	91.00	GIRONDE	SAUVETERRE-DE-GUYENNE	ADES
98	08305X0001	146.0	92.5-146	495678	6399368	108.00	DORDOGNE	EYMET	ADES
99	08308X0006	82.0	61-82	518436	6403370	135.00	DORDOGNE	SAINTE-SABINE-BORN	ADES
100	08521X0018	230.0	175-225	436937	6395705	8.22	GIRONDE	BARSAC	ADES
101	08521X0239	200.0	155-195	439143	6393658	9.00	GIRONDE	SAINTE-CROIX-DU-MONT	ADES
102	08522X0011	152.0		441283	6390173	14.43	GIRONDE	TOULENNE	ADES
103	08522X0017	158.0	106-150	441585	6392620	32.58	GIRONDE	VERDELAIS	ADES
104	08523X0092	254.0	164-218	450039	6390951	16.30	GIRONDE	CAUDROT	ADES
105	08524X0018	312.0	243-303.92	460215	6391090	15.75	GIRONDE	REOLE(LA)	BSS EAU
106	08526X0003	210.0	179.75-208	446521	6385060	57.04	GIRONDE	AUROS	ADES
107	08763X0002	274.0	203-219; 228-240	447974	6377181	42.02	GIRONDE	BAZAS	BSS EAU
108	08764X0003	380.0	289.50 - 339.17	457668	6370519	151.30	GIRONDE	GRIGNOLS	BSS EAU
109	08764X0008	287.0	215-287	458805	6371376	77.76	GIRONDE	GRIGNOLS	ADES



## **Annexe 4 Disponibilité des mesures des chroniques piézométriques par an**







## **Annexe 5      Résultats des analyses des tendances de haute, moyenne et faible fiabilité**



## Résultats d'analyse de tendance de haute fiabilité

Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente selon méthode de Sen (cm/an)	Test Mann- Kendall P-value	Tendance significative	Rupture	Test de rupture Pettitt P-value	Période d'analyse	
							Début	Fin
07301X0165	0.201	2.6	0.074	NS	2012	0.226	2009	2018
07306X0066	0.011	0.6	0.303	NS	2012	0.376	1998	2018
07307X0087	0.126	-2	0.336	NS	2004	0.629	1998	2009
07544X0091	0.085	1.2	0.163	NS	2007	0.413	1999	2018
07548X0234	0.391	-0.8	0.398	NS	2004	0.604	1998	2018
07555X0027	0.293	0.4	0.589	NS	2011	0.413	2009	2018
07555X0040	0.446	-0.9	<b>0.035</b>	BS	1988	<b>0.025</b>	1976	2018
07784X0079	0.260	1.5	0.457	NS	2006	0.446	2004	2018
07786X0047	0.141	-1	0.876	NS	2014	0.890	2005	2018
07788X0001	-0.296	6	0.653	NS	2017	0.999	2009	2018
07791X0008	0.573	1.8	0.488	NS	2006	0.363	2004	2018
07791X0204	0.278	-1.8	0.241	NS	2015	0.446	1999	2018
07791X0205	0.167	0.2	0.717	NS	2015	0.999	2003	2018
07791X0219	0.425	0.5	0.857	NS	2015	0.627	2003	2018
07791X0220	0.42	1.5	0.276	NS	2007	0.231	2004	2018
07794X0001	<b>0.836</b>	-10.3	<b>0.003</b>	* BS	1989	<b>0.000</b>	1963	2018
07795X0105	0.489	1.1	0.346	NS	2006	0.291	2004	2018
07795X0106	0.498	1.5	0.586	NS	2006	0.541	2004	2018
07796X0001	0.277	-7	<b>0.021</b>	BS	1980	0.148	1972	1990
07796X0025	0.548	-16.5	<b>0.016</b>	BS	2011	0.061	2007	2018
08022X0008	<b>0.643</b>	-3	0.150	* NS	2014	0.112	2005	2018
08032X0001	<b>0.611</b>	-10.7	<b>0.021</b>	* BS	2002	<b>0.038</b>	1998	2018
08032X0222	0.093	-10.5	<b>0.042</b>	BS	1986	0.345	1982	2017
08033X0237	0.382	-1.3	0.930	NS	1995	0.612	1991	2018
08033X0294	<b>0.925</b>	74.5	<b>0.007</b>	* HS	2007	<b>0.001</b>	1998	2018
08035X0376	0.269	-55.5	<b>0.003</b>	BS	2007	0.105	1998	2018
08035X0393	<b>0.823</b>	-38.8	<b>0.002</b>	* BS	2011	0.075	2000	2018
08035X0425	<b>1.000</b>	-10.9	0.451	* NS	1988	0.112	1973	2000
08037X0015	0.455	-3.8	0.477	NS	1988	0.151	1972	2015
08037X0021	<b>0.845</b>	-9.5	0.393	* NS	1983	0.180	1977	2001
08037X0169	<b>0.660</b>	-26.2	<b>0.000</b>	* BS	1985	<b>0.000</b>	1969	2018
08046X0005	<b>0.905</b>	-35.3	<b>0.000</b>	* BS	1999	<b>0.000</b>	1981	2018
08051X0001	<b>0.688</b>	-10.8	<b>0.000</b>	* BS	2010	<b>0.011</b>	2003	2018
08264X0004	<b>0.851</b>	-21.7	<b>0.000</b>	* BS	1989	<b>0.000</b>	1969	2018
08272X0005	0.273	-28.0	<b>0.019</b>	BS	2001	0.122	1996	2018
08273X0288	0.226	-15.7	<b>0.036</b>	BS	2011	0.054	1993	2018
08276X0085	<b>0.982</b>	-79.3	<b>0.009</b>	* BS	1988	<b>0.002</b>	1977	2000
08277X0152	<b>0.871</b>	-101	<b>0.000</b>	* BS	1981	<b>0.005</b>	1972	1996
08278X0023	<b>0.758</b>	-18.8	<b>0.000</b>	* BS	2002	<b>0.005</b>	1993	2018
08278X0127	<b>0.788</b>	-38.6	<b>0.000</b>	* BS	1999	<b>0.000</b>	1979	2018
08288X0003	<b>0.723</b>	-23.2	<b>0.000</b>	* BS	2012	<b>0.031</b>	2007	2018
08522X0011	<b>0.649</b>	-31	<b>0.000</b>	* BS	2013	0.066	2009	2018
08764X0008	<b>0.842</b>	-43	<b>0.000</b>	* BS	2009	<b>0.003</b>	2000	2018

\*P-value corrigé (autocorrélation &gt; 0.6)

BS : Baisse significative

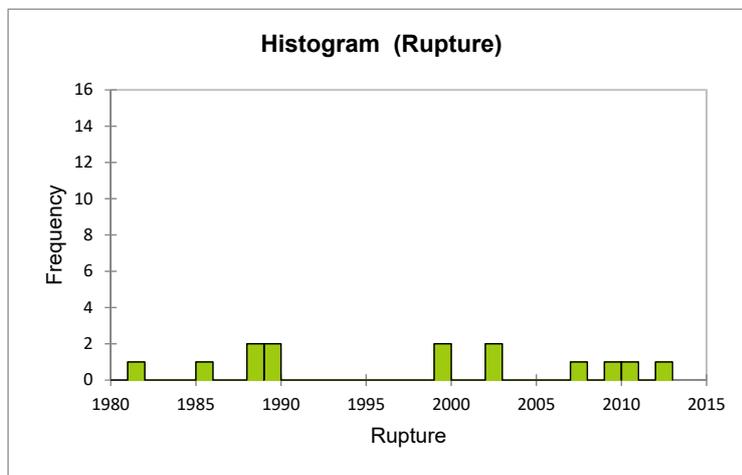
HS : Hausse significative

NS : Non significative

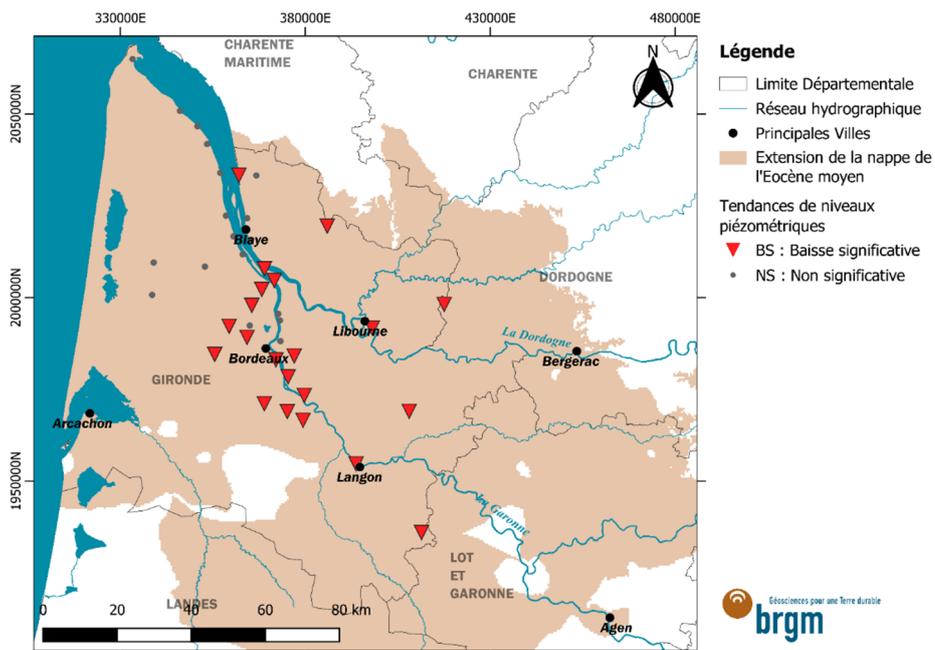
Description statistique des pentes estimés du groupe de haute fiabilité

Statistique	Pente selon méthode de Sen (cm/an)
Nombre d'observations significatives	21
Nombre total d'observations analysés	43
Minimum	-101.000
Maximum	-0.900
1st Quartile	-38.600
Médiane	-23.200
3rd Quartile	-10.800
Moyenne	-29.657
Variance (n-1)	599.990
Ecart-type (n-1)	24.495

Nombre de ruptures (test de Pettitt) par an sur le groupe de haute fiabilité



Répartition spatiale des résultats des tendances de haute fiabilité



Résultats de moyenne fiabilité

Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente selon méthode de Sen (cm/an)	Test Mann- Kendall P- value	Tendance significative	Rupture	Test de rupture Pettitt P-value	Période d'analyse	
							Début	Fin
07301X0165	0.230	0.5	0.231	NS	2012	0.261	2000	2018
07305X0001	0.306	-2.4	0.289	NS	2009	0.648	1998	2018
07306X0066	0.011	0.6	0.303	NS	2012	0.376	1998	2018
07307X0087	0.126	-2	0.336	NS	2004	0.629	1998	2009
07542X0001	0.206	2.1	0.079	NS	2011	0.122	2005	2018
07542X0002	0.286	2.5	0.185	NS	2012	0.358	1998	2018
07543X0085	0.509	-4	<b>0.000</b>	BS	2009	<b>0.025</b>	1998	2018
07544X0091	0.069	1	0.184	NS	2007	0.376	1998	2018
07548X0117	<b>0.653</b>	-5.4	<b>0.001</b> *	BS	2009	<b>0.037</b>	1998	2018
07548X0234	0.391	-0.8	0.398	NS	2004	0.604	1998	2018
07555X0027	0.270	0.5	0.079	NS	2010	0.100	1998	2018
07555X0040	0.437	-0.8	<b>0.049</b>	BS	1988	<b>0.043</b>	1976	2018
07778X0036	0.326	-7.8	<b>0.001</b>	BS	2013	<b>0.051</b>	2005	2018
07784X0079	0.260	1.5	0.457	NS	2006	0.446	2004	2018
07786X0047	0.260	0.7	0.804	NS	2005	0.893	2004	2018
07788X0001	-0.214	0	1.000	NS	2004	0.999	1999	2018
07791X0008	0.573	1.8	0.488	NS	2006	0.363	2004	2018
07791X0204	0.278	-1.8	0.241	NS	2015	0.446	1999	2018
07791X0205	0.167	0.2	0.717	NS	2015	0.999	2003	2018
07791X0219	0.425	0.5	0.857	NS	2015	0.627	2003	2018
07791X0220	0.420	1.5	0.276	NS	2007	0.231	2004	2018
07793X0004	0.220	-1	1.000	NS	2009	0.890	2008	2018
07794X0001	<b>0.921</b>	-10.8	<b>0.001</b> *	BS	1989	<b>0.000</b>	1961	2018
07795X0105	0.489	1.1	0.346	NS	2006	0.291	2004	2018
07795X0106	0.498	1.5	0.586	NS	2006	0.541	2004	2018
07796X0001	0.471	-8.9	<b>0.006</b>	BS	1980	0.098	1972	1991
07796X0025	0.548	-16.5	<b>0.016</b>	BS	2011	0.061	2007	2018
07796X0045	0.245	8.6	0.074	NS	1997	0.180	1993	2002
07796X0069	0.575	-12	<b>0.001</b>	BS	2002	<b>0.038</b>	1998	2018
07796X0106	0.599	-6.2	0.457	NS	2002	0.079	1993	2007
07796X0110	0.075	4.6	0.696	NS	1995	0.890	1993	2003
07815X0056	<b>0.637</b>	0.3	0.928 *	NS	2007	0.413	2002	2010
08022X0008	<b>0.604</b>	-3.1	0.104 *	NS	2014	0.106	2004	2018
08032X0001	0.471	-5	0.111	NS	2002	0.185	1988	2018
08032X0222	<b>0.682</b>	-9	<b>0.038</b> *	BS	1988	<b>0.024</b>	1982	2018
08033X0237	0.585	1	0.643	NS	1995	0.187	1989	2018
08033X0294	<b>0.921</b>	61.7	<b>0.010</b> *	HS	2007	<b>0.001</b>	1996	2018
08034X0031	0.376	-17.2	<b>0.007</b>	BS	2011	0.061	2006	2018
08035X0376	0.301	-25.3	<b>0.007</b>	BS	2007	0.069	1983	2017
08035X0393	0.383	-13.5	<b>0.027</b>	BS	2011	<b>0.043</b>	1979	2018
08035X0425	<b>0.787</b>	-8.1	0.438 *	NS	1988	<b>0.015</b>	1972	2003
08036X0018	0.330	-15.5	<b>0.021</b>	BS	1988	0.090	1984	2018
08036X0019	0.432	-9.3	0.115	NS	1988	0.211	1983	2018
08037X0015	<b>0.610</b>	-9.2	<b>0.028</b> *	BS	1988	<b>0.003</b>	1972	2018
08037X0021	<b>0.701</b>	-10.6	0.258 *	NS	1984	<b>0.008</b>	1972	2003
08037X0040	<b>0.626</b>	49.6	<b>0.003</b> *	HS	1995	<b>0.049</b>	1990	2002
08037X0169	<b>0.876</b>	-31.4	<b>0.000</b> *	BS	1988	<b>0.000</b>	1967	2018
08037X0402	<b>0.784</b>	11.7	0.375 *	NS	1996	0.174	1986	2003
08037X0425	0.514	-59.2	<b>0.005</b>	BS	1988	0.103	1972	1991

Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente selon méthode de Sen (cm/an)	Test Mann- Kendall P- value	Tendance significative	Rupture	Test de rupture Pettitt P-value	Période d'analyse	
							Début	Fin
08037X0429	<b>0.606</b>	-6.8	0.697 *	NS	1988	0.128	1980	2002
08046X0005	<b>0.905</b>	-35.3	<b>0.000</b> *	BS	1999	<b>0.000</b>	1981	2018
08047X0042	0.474	-32.7	<b>0.000</b>	BS	2009	<b>0.007</b>	1991	2018
08051X0001	0.421	-14	<b>0.000</b>	BS	2010	<b>0.003</b>	1996	2018
08261X0030	0.555	-10.9	<b>0.004</b>	BS	2002	<b>0.017</b>	1997	2016
08264X0004	<b>0.901</b>	-24.7	<b>0.000</b> *	BS	1989	<b>0.000</b>	1965	2018
08271X0213	<b>0.645</b>	9	0.902 *	NS	1985	0.246	1972	2002
08272X0005	0.527	-1.2	0.836	NS	1994	0.471	1990	2018
08272X0391	<b>0.762</b>	-44.2	<b>0.000</b> *	BS	2001	<b>0.001</b>	1980	2018
08272X0404	<b>0.639</b>	-44.3	<b>0.000</b> *	BS	2011	<b>0.005</b>	1989	2018
08273X0262	0.592	5.3	0.711	NS	1989	0.378	1987	2003
08273X0272	<b>0.616</b>	-22.1	0.218 *	NS	1990	0.140	1986	2003
08273X0288	<b>0.637</b>	-19.9	<b>0.000</b> *	BS	2001	<b>0.002</b>	1987	2018
08276X0085	<b>0.936</b>	-56.2	<b>0.000</b> *	BS	1989	<b>0.000</b>	1974	2018
08277X0003	<b>0.706</b>	-37.9	<b>0.000</b> *	BS	2008	<b>0.007</b>	1997	2018
08277X0152	<b>0.855</b>	-85.1	<b>0.001</b> *	BS	1987	<b>0.000</b>	1971	2003
08277X0153	<b>0.728</b>	-97.2	<b>0.000</b> *	BS	1988	<b>0.002</b>	1977	2001
08278X0023	<b>0.646</b>	-16.7	<b>0.000</b> *	BS	2001	<b>0.000</b>	1989	2018
08278X0127	<b>0.847</b>	-42.6	<b>0.000</b> *	BS	1999	<b>0.000</b>	1978	2018
08278X0186	0.440	-20.9	<b>0.049</b>	BS	1999	0.226	1992	2003
08285X0012	<b>0.785</b>	-34.4	<b>0.000</b> *	BS	2003	<b>0.002</b>	1995	2018
08288X0003	<b>0.739</b>	-21	<b>0.000</b> *	BS	2011	<b>0.015</b>	2005	2018
08305X0001	<b>0.617</b>	-2.8	0.360 *	NS	2009	0.204	1996	2012
08308X0006	0.293	-5.8	<b>0.006</b>	BS	2004	0.274	1996	2013
08521X0018	0.193	-38.3	<b>0.000</b>	BS	2008	<b>0.001</b>	1976	2018
08521X0239	<b>0.681</b>	-54.3	<b>0.000</b> *	BS	1997	<b>0.049</b>	1993	2003
08522X0011	<b>0.850</b>	-38.4	<b>0.000</b> *	BS	2007	<b>0.002</b>	1998	2018
08522X0017	<b>0.862</b>	-84.8	<b>0.000</b> *	BS	1986	<b>0.000</b>	1971	2003
08524X0018	<b>0.742</b>	-64.5	<b>0.000</b> *	BS	1976	0.066	1972	1981
08526X0003	<b>0.846</b>	-46.6	<b>0.000</b> *	BS	2005	<b>0.004</b>	1998	2018
08764X0008	<b>0.829</b>	-46	<b>0.000</b> *	BS	2008	<b>0.001</b>	1998	2018

\*P-value corrigé (autocorrélation > 0.6)

BS : Baisse significative

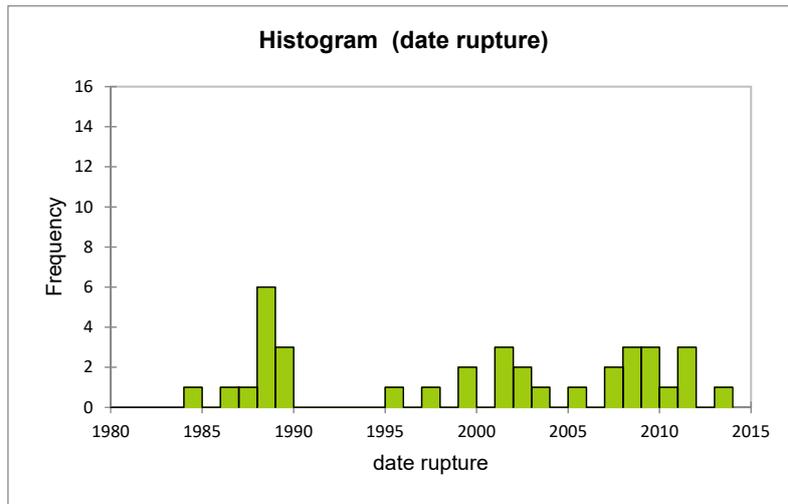
HS : Hausse significative

NS : Non significative

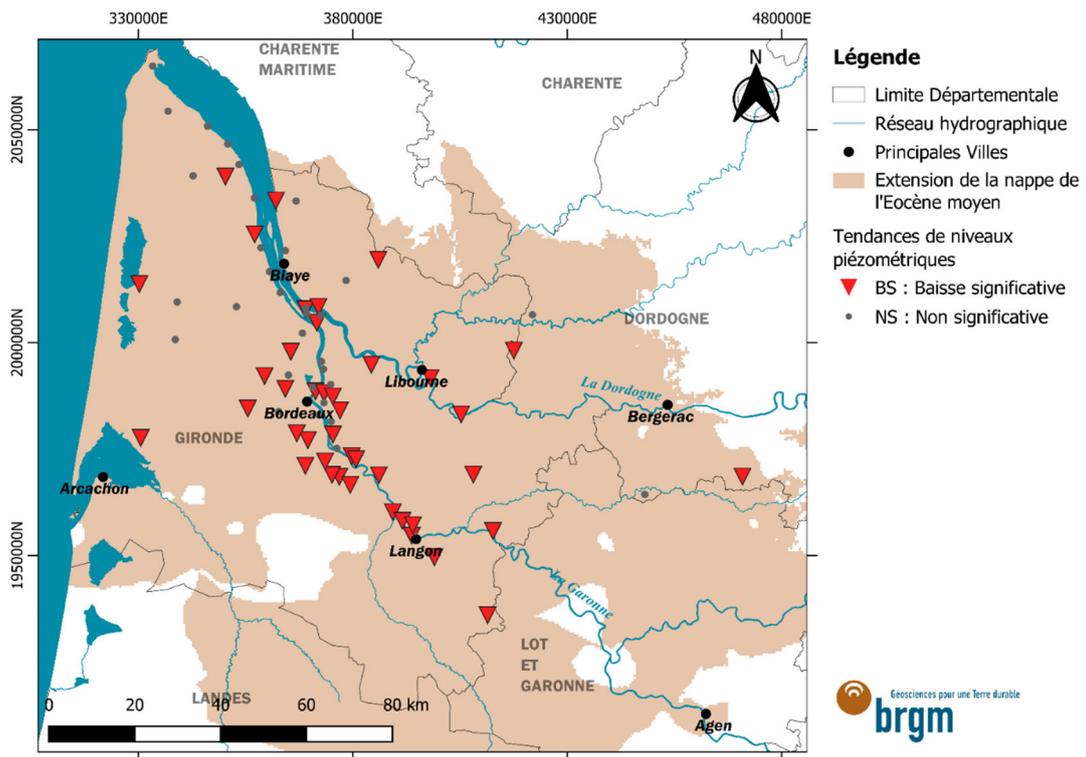
### Description statistique des pentes estimés du groupe de moyenne fiabilité

Statistique	Pente selon méthode de Sen (cm/an)
Nombre d'observations significatives	41
Nombre total d'observations analysés	80
Minimum	-97.200
Maximum	-0.800
1st Quartile	-44.200
Médiane	-24.700
3rd Quartile	-12.000
Moyenne	-30.810
Variance (n-1)	559.222
Ecart-type (n-1)	23.648

Nombre de ruptures (test de Pettitt) par an sur le groupe de moyen fiabilité



Répartition spatiale des résultats des tendances de moyen fiabilité



Résultats de faible fiabilité

Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente selon méthode de Sen (cm/an)	Test Mann- Kendall P-value	Tendance	Test de rupture Petitt P-value	Rupture	Période d'analyse	
							Début	Fin
07301X0165	0.175	0	0.977	NS	0.520	2012	1994	2018
07305X0001	0.355	-3.8	<b>0.000</b>	BS	<b>0.002</b>	1997	1960	2020
07305X0036	-0.282	-1.8	0.073	NS	0.071	1995	1979	2011
07305X0052	0.214	-4.4	<b>0.006</b>	BS	0.060	2001	1990	2011
07306X0066	0.011	0.6	0.303	NS	0.376	2012	1998	2018
07307X0087	0.126	-2	0.336	NS	0.629	2004	1998	2009
07542X0001	0.477	-1.1	<b>0.048</b>	BS	<b>0.007</b>	2002	1979	2018
07542X0002	<b>0.630</b>	1.8	0.257 *	NS	<b>0.024</b>	1998	1961	2018
07542X0042	-0.252	-4.6	0.187	NS	0.261	2003	1996	2011
07543X0010	0.113	-4.2	<b>0.001</b>	BS	<b>0.010</b>	2000	1977	2011
07543X0085	0.421	-3.7	<b>0.000</b>	BS	<b>0.005</b>	2004	1995	2018
07544X0091	0.069	1	0.184	NS	0.376	2007	1998	2018
07548X0117	0.567	-3	<b>0.002</b>	BS	<b>0.028</b>	2002	1970	2018
07548X0234	0.391	-0.8	0.398	NS	0.604	2004	1998	2018
07555X0027	0.143	0.4	0.079	NS	0.096	2005	1975	2018
07555X0040	0.437	-0.8	<b>0.049</b>	BS	<b>0.043</b>	1988	1976	2018
07774X0001	0.049	0.7	0.526	NS	0.604	2005	1979	2011
07778X0036	<b>0.737</b>	-8.7	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.002</b>	2006	1997	2018
07783X0002	0.249	0	0.940	NS	0.755	1978	1976	2018
07784X0079	0.260	1.5	0.457	NS	0.446	2006	2004	2018
07785X0001	0.134	2.6	0.064	NS	<b>0.039</b>	1984	1978	2002
07786X0047	0.260	0.7	0.804	NS	0.893	2005	2004	2018
07788X0001	-0.011	-2.5	0.535	NS	0.773	2002	1958	2018
07788X0037	<b>0.707</b>	-17.9	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.007</b>	2000	1985	2011
07791X0002	<b>0.871</b>	-6.6	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.000</b>	1988	1973	2007
07791X0008	0.477	-3.4	<b>0.003</b>	BS	<b>0.012</b>	1998	1979	2018
07791X0204	0.278	-1.8	0.241	NS	0.446	2015	1999	2018
07791X0205	0.167	0.2	0.717	NS	0.999	2015	2003	2018
07791X0219	0.425	0.5	0.857	NS	0.627	2015	2003	2018
07791X0220	0.420	1.5	0.276	NS	0.231	2007	2004	2018
07792X0006	<b>0.620</b>	-15.1	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.003</b>	1997	1973	2006
07793X0004	0.473	-0.6	0.967	NS	0.999	1988	1981	2018
07794X0001	<b>0.921</b>	-10.8	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.000</b>	1989	1961	2018
07794X0007	<b>0.761</b>	-20.3	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1990	1971	2011
07795X0105	0.489	1.1	0.346	NS	0.291	2006	2004	2018
07795X0106	0.498	1.5	0.586	NS	0.541	2006	2004	2018
07796X0001	0.471	-8.9	<b>0.006</b>	BS	0.098	1980	1972	1991
07796X0025	0.548	-16.5	<b>0.016</b>	BS	0.061	2011	2007	2018
07796X0045	0.189	-5	0.488	NS	0.363	2001	1993	2003
07796X0069	<b>0.755</b>	-11.5	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1988	1970	2018
07796X0106	<b>0.602</b>	-12.6	<b>0.023</b> *	BS	<b>0.016</b>	1988	1980	2007
07796X0110	0.280	4.1	0.141	NS	0.345	1995	1991	2011
07798X0004	<b>0.845</b>	-17.9	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.003</b>	1997	1986	2013
07808X0002	<b>0.777</b>	-22.4	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1995	1951	2011
07815X0056	<b>0.737</b>	-23.4	0.105 *	NS	0.140	1999	1994	2010
08022X0008	<b>0.604</b>	-3.1	0.104 *	NS	0.106	2014	2004	2018
08032X0001	0.346	-9.8	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	1988	1960	2018
08032X0222	<b>0.747</b>	-9.8	<b>0.002</b> *	BS	<b>0.000</b>	1988	1973	2018
08033X0237	0.539	-0.5	0.973	NS	0.539	1995	1988	2018
08033X0294	<b>0.947</b>	50.7	<b>0.046</b> *	HS	<b>0.001</b>	2007	1979	2018

Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente selon méthode de Sen (cm/an)	Test Mann- Kendall P-value	Tendance	Test de rupture Pettitt P-value	Rupture	Période d'analyse	
							Début	Fin
08034X0031	0.418	-20.1	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	2001	1976	2018
08035X0338	0.050	-13.7	0.495	NS	0.606	1988	1966	2003
08035X0376	0.393	-25.6	<b>0.000</b>	BS	<b>0.015</b>	1988	1969	2018
08035X0393	<b>0.640</b>	-13.7	<b>0.043</b> *	BS	<b>0.008</b>	1988	1978	2018
08035X0425	<b>0.692</b>	-16	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1988	1972	2013
08036X0015	0.436	-7.3	0.159	NS	<b>0.025</b>	1989	1980	2011
08036X0018	0.124	-9.1	<b>0.038</b>	BS	0.052	1988	1943	2018
08036X0019	0.567	-8.9	0.139	NS	<b>0.044</b>	1988	1979	2012
08037X0015	0.231	-11.7	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	1984	1941	2018
08037X0021	<b>0.718</b>	-13.3	0.130 *	NS	<b>0.003</b>	1984	1972	2005
08037X0039	0.115	0.3	0.968	NS	0.354	1996	1960	2013
08037X0040	0.147	-0.3	0.955	NS	0.583	1988	1960	2013
08037X0169	<b>0.792</b>	-33.9	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.000</b>	1988	1963	2018
08037X0402	0.222	1.4	0.884	NS	0.554	1996	1970	2013
08037X0425	<b>0.647</b>	-30.2	<b>0.016</b> *	BS	<b>0.001</b>	1986	1972	2000
08037X0429	<b>0.669</b>	-13.3	0.082 *	NS	<b>0.012</b>	1988	1978	2013
08038X0236	<b>0.666</b>	-27	<b>0.003</b> *	BS	<b>0.009</b>	1997	1980	2011
08046X0005	<b>0.905</b>	-35.3	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1999	1981	2018
08047X0042	0.487	-37.3	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	2003	1991	2018
08047X0050	0.530	-41	<b>0.000</b>	BS	<b>0.002</b>	2001	1988	2011
08048X0048	<b>0.647</b>	-53.5	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.002</b>	2001	1990	2011
08051X0001	0.295	-18.8	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	2004	1976	2018
08253X0012	0.422	-15.2	<b>0.000</b>	BS	0.055	1997	1986	2006
08254X0012	0.402	-16.9	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	1999	1965	2013
08261X0030	<b>0.791</b>	-19.7	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1997	1971	2016
08264X0004	<b>0.901</b>	-24.7	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1989	1965	2018
08271X0213	<b>0.707</b>	-28.1	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.000</b>	1988	1972	2013
08272X0005	0.188	-7.4	0.192	NS	0.378	2002	1966	2018
08272X0391	0.594	-45.7	<b>0.000</b>	BS	<b>0.001</b>	1988	1975	2018
08272X0404	0.542	-34.8	<b>0.000</b>	BS	<b>0.012</b>	1988	1975	2018
08273X0262	0.235	-32.3	0.163	NS	<b>0.021</b>	1989	1969	2003
08273X0272	0.260	-33.6	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	2001	1970	2013
08273X0288	<b>0.767</b>	-46.1	<b>0.003</b> *	BS	<b>0.000</b>	1989	1974	2018
08276X0085	<b>0.732</b>	-57.4	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1989	1970	2018
08277X0003	<b>0.757</b>	-44.3	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	2001	1977	2018
08277X0152	<b>0.886</b>	-70.9	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1989	1970	2013
08277X0153	<b>0.643</b>	-75.3	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	2000	1973	2013
08278X0023	<b>0.649</b>	-28.4	<b>0.002</b> *	BS	<b>0.000</b>	2001	1967	2018
08278X0111	<b>0.805</b>	-46.1	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.000</b>	1999	1977	2013
08278X0127	<b>0.616</b>	-47	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1998	1970	2018
08278X0186	0.510	-25.8	<b>0.000</b>	BS	<b>0.001</b>	2001	1988	2012
08281X0018	<b>0.756</b>	-59.3	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1991	1977	2004
08281X0020	<b>0.898</b>	-30.1	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1999	1987	2015
08282X0029	<b>0.781</b>	-37	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.011</b>	1998	1991	2018
08284X0011	0.485	-39.2	<b>0.000</b>	BS	<b>0.003</b>	1998	1986	2011
08285X0012	<b>0.737</b>	-43.7	<b>0.001</b> *	BS	<b>0.000</b>	2000	1975	2018
08288X0003	0.533	-34.2	<b>0.000</b>	BS	<b>0.000</b>	2005	1964	2018
08305X0001	0.250	1.8	0.475	NS	0.360	1997	1960	2013
08308X0006	<b>0.603</b>	-6.4	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.003</b>	2001	1994	2013
08521X0018	<b>0.891</b>	-60.7	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1995	1996	2018
08521X0239	<b>0.882</b>	-45.6	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.001</b>	2001	1992	2013
08522X0011	<b>0.817</b>	-62.8	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1998	1964	2018
08522X0017	<b>0.855</b>	-74.6	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1986	1964	2013

Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente selon méthode de Sen (cm/an)	Test Mann- Kendall P-value	Tendance	Test de rupture Pettitt P-value	Rupture	Période d'analyse	
							Début	Fin
08523X0092	<b>0.777</b>	-77.5	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1993	1976	2011
08524X0018	<b>0.970</b>	-91.3	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1987	1972	2007
08526X0003	<b>0.891</b>	-73	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	1993	1959	2018
08763X0002	0.488	-100.6	<b>0.000</b>	BS	<b>0.023</b>	1989	1977	1996
08764X0003	<b>0.882</b>	-89.5	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.005</b>	1984	1971	1997
08764X0008	<b>0.808</b>	-68.2	<b>0.000</b> *	BS	<b>0.000</b>	2001	1983	2018

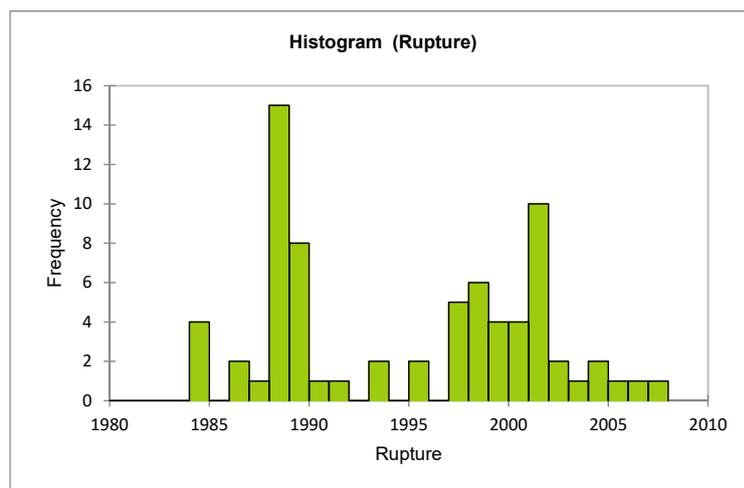
\*P-value corrigé (autocorrélation > 0.6)

BS : Baisse significative  
 HS : Hausse significative  
 NS : Non significative

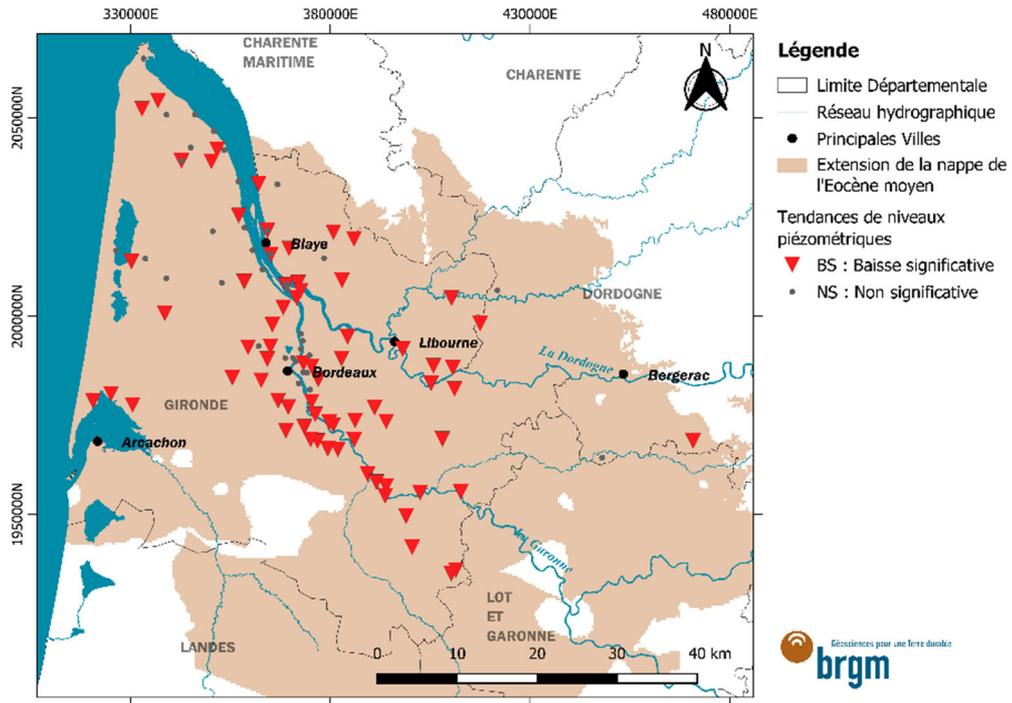
### Description statistique des pentes estimés du groupe de faible fiabilité

Statistique	Pente selon méthode de Sen (cm/an)
Nombre d'observations significatives	70
Nombre total d'observations analysés	109
Minimum	-100.600
Maximum	-0.800
1st Quartile	-45.675
Médiane	-26.400
3rd Quartile	-11.925
Moyenne	-31.916
Variance (n-1)	614.557
Ecart-type (n-1)	24.790

### Nombre de ruptures (test de Pettitt) par an sur le groupe de faible fiabilité



### Répartition spatiale des résultats des tendances de haute fiabilité





## **Annexe 6      Résultat de analyses des tendances par périodes**



Période	Avant 1989			Avant 2001					1989 - 2001			Après 1989					Après 2001		
	Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Rupture	Pettitt P-value	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Rupture	Test de rupture (Pettitt)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)
07305X0001	0.448	-7	<b>0.004</b>	0.210	-4.5	<b>0.002</b>	1981	0.082	-0.158	-7.3	0.210	0.208	-3.7	<b>0.027</b>	2002	0.106	0.269	-16.1	0.902
07305X0052	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.662	-1.6	0.474	0.297	-3.9	<b>0.004</b>	2002	<b>0.034</b>	0.269	-2.3	0.300
07542X0001	-	-	-	-0.022	-1.3	0.419	1994	0.586	-	-	-	0.408	-0.6	0.297	2002	0.068	0.414	2.3	0.091
07543X0010	-	-	-	-0.315	-2.3	0.232	1994	0.614	-0.552	-3	0.304	0.047	-5.8	<b>0.002</b>	2003	<b>0.021</b>	-0.130	-6.3	0.161
07543X0085	-	-	-	-0.503	-2	0.764	1995	0.999	-0.503	-2	0.764	0.421	-3.7	<b>0.000</b>	2004	<b>0.005</b>	0.431	-3.9	<b>0.000</b>
07548X0117	-	-	-	<b>0.703</b>	0.3	0.839 *	1991	0.378	0.554	9.3	0.244	<b>0.642</b>	-3.9	<b>0.027</b> *	2002	<b>0.041</b>	0.410	-4.3	<b>0.003</b>
07555X0040	0.201	-1.0	0.380	0.410	-1.2	<b>0.024</b>	1985	<b>0.037</b>	0.204	1.7	0.669	0.328	0.5	0.486	2012	0.066	0.368	3.2	0.130
07778X0036	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.737</b>	-8.7	<b>0.000</b> *	2006	<b>0.002</b>	0.466	-8	<b>0.000</b>
07788X0037	-	-	-	-	-	-	-	-	0.234	1.7	1.000	<b>0.612</b>	-15.1	0.105 *	2000	<b>0.025</b>	0.389	5.8	0.917
07791X0002	0.228	-1.9	0.092	<b>0.902</b>	-5.7	<b>0.005</b> *	1986	<b>0.000</b>	0.420	5.7	<b>0.013</b>	0.485	-1.4	0.620	2001	0.197	0.222	-12.8	0.133
07791X0008	-	-	-	0.233	-3.2	0.086	1988	0.075	-	-	-	0.258	-1.9	0.224	1998	0.173	0.573	1.8	0.488
07792X0006	-	-	-	<b>0.664</b>	-14.2	<b>0.001</b> *	1984	<b>0.023</b>	-	-	-	<b>0.715</b>	-15.2	<b>0.001</b> *	2001	<b>0.049</b>	-	-	-
07794X0001	<b>0.865</b>	-14.4	<b>0.016</b> *	<b>0.898</b>	-16	<b>0.000</b> *	1986	<b>0.000</b>	0.591	-21.1	0.100	<b>0.672</b>	1.3	0.658 *	1996	0.073	<b>0.836</b>	10.5	<b>0.027</b> *
07794X0007	0.463	-17.3	<b>0.001</b>	<b>0.781</b>	-20.9	<b>0.000</b> *	1987	<b>0.003</b>	-	-	-	<b>0.721</b>	-13.5	<b>0.001</b> *	2003	<b>0.002</b>	<b>0.612</b>	-14.5	0.161 *
07796X0001	0.097	-5.4	0.069	0.471	-8.9	<b>0.006</b>	1980	0.098	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07796X0025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.548	-16.5	<b>0.016</b>
07796X0069	0.126	-6.8	0.099	<b>0.659</b>	-10.9	<b>0.005</b> *	1988	<b>0.000</b>	<b>0.646</b>	30.0	<b>0.013</b> *	<b>0.660</b>	-6.8	0.160 *	2002	0.103	0.376	-8.2	<b>0.034</b>
07796X0106	-0.034	-27	0.368	0.558	-10.8	0.263	1988	<b>0.013</b>	0.298	12.9	<b>0.006</b>	0.520	-1.7	0.806	2002	0.122	0.255	-23.2	0.448
07798X0004	-	-	-	<b>0.716</b>	-33.9	0.062 *	1989	0.078	-	-	-	<b>0.770</b>	-12.2	<b>0.002</b> *	1997	<b>0.007</b>	-	-	-
07808X0002	0.432	-12.9	<b>0.000</b>	<b>0.799</b>	-22.6	<b>0.000</b> *	1981	<b>0.001</b>	0.530	-32.5	<b>0.000</b>	0.551	-22.9	<b>0.000</b>	1999	<b>0.003</b>	0.228	-13.9	0.210
08022X0008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.604</b>	-3.1	0.104 *
08032X0001	0.094	-14.6	0.099	0.334	-12.2	0.008	1986	<b>0.001</b>	<b>0.743</b>	29.3	<b>0.000</b> *	<b>0.674</b>	-1.1	0.789 *	1995	0.393	0.412	-9.5	<b>0.041</b>
08032X0222	0.375	-5.3	0.692	<b>0.838</b>	-9.5	0.210 *	1988	<b>0.003</b>	<b>0.693</b>	49.7	<b>0.000</b> *	<b>0.603</b>	1	0.844 *	1993	0.141	0.284	-15.8	<b>0.041</b>
08033X0294	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.921</b>	61.7	<b>0.010</b> *	2007	<b>0.001</b>	<b>0.892</b>	86.5	<b>0.000</b> *
08034X0031	-	-	-	0.319	-35.3	<b>0.001</b>	1990	<b>0.022</b>	0.287	-8.7	0.161	<b>0.773</b>	-16.3	<b>0.000</b> *	2002	<b>0.000</b>	0.473	-16.8	<b>0.000</b>
08035X0376	0.112	-51.5	<b>0.048</b>	0.484	-26.1	0.206	1988	0.060	0.428	92.6	<b>0.005</b>	0.353	-11	0.285	2007	0.204	0.164	-43.4	<b>0.004</b>
08035X0393	0.326	9.0	1.000	<b>0.777</b>	-15.2	0.291 *	1988	<b>0.031</b>	0.597	101.7	<b>0.001</b>	0.512	2.2	0.797	1994	0.271	0.300	-38.7	<b>0.010</b>
08035X0425	0.297	-2.5	0.822	<b>0.794</b>	-9.2	0.289 *	1986	<b>0.005</b>	<b>0.719</b>	80.2	<b>0.000</b> *	0.513	4.7	0.761	1993	0.400	0.123	-13.5	0.502
08036X0018	-	-	-	0.211	-27.4	0.112	1988	0.067	0.226	55	<b>0.013</b>	0.185	3.5	0.514	1996	0.325	0.093	-7.7	0.289
08037X0015	0.124	-43	<b>0.000</b>	0.254	-25	<b>0.001</b>	1984	<b>0.002</b>	<b>0.736</b>	64.9	<b>0.001</b> *	<b>0.646</b>	6.4	0.392 *	1995	<b>0.031</b>	0.297	-14	0.225
08037X0169	<b>0.687</b>	-76.0	<b>0.000</b> *	<b>0.797</b>	-57	<b>0.001</b> *	1984	<b>0.000</b>	<b>0.696</b>	42.2	<b>0.000</b> *	0.577	-1.6	0.617	2011	0.264	0.359	-13.5	0.112
08037X0425	0.446	-49.7	<b>0.001</b>	<b>0.647</b>	-30.2	<b>0.016</b> *	1986	<b>0.001</b>	0.422	40.3	<b>0.034</b>	0.422	40.3	<b>0.034</b>	1994	<b>0.049</b>	-	-	-
08038X0236	-	-	-	-	-	-	-	-	0.562	7.3	0.492	<b>0.679</b>	-11.9	<b>0.027</b> *	2001	<b>0.007</b>	0.079	-10	<b>0.043</b>
08046X0005	-	-	-	<b>0.881</b>	-56.1	<b>0.000</b> *	1990	<b>0.001</b>	<b>0.621</b>	-24.8	<b>0.000</b> *	<b>0.835</b>	-25.6	<b>0.000</b> *	2003	<b>0.000</b>	<b>0.631</b>	-20.1	<b>0.001</b> *
08047X0042	-	-	-	0.172	-44.9	<b>0.000</b>	1995	<b>0.031</b>	<b>0.722</b>	-42.1	<b>0.000</b> *	<b>0.885</b>	-36.6	<b>0.000</b> *	2004	<b>0.000</b>	<b>0.731</b>	-28.6	<b>0.000</b> *
08047X0050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.794</b>	-39.6	<b>0.001</b> *	2002	<b>0.003</b>	0.536	-30.7	<b>0.000</b>
08048X0048	-	-	-	0.538	-57.5	<b>0.000</b>	1995	0.086	0.538	-57.5	<b>0.000</b>	<b>0.647</b>	-53.5	<b>0.000</b> *	2001	<b>0.002</b>	0.464	-29.7	<b>0.005</b>
08051X0001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.832</b>	-18.2	<b>0.000</b> *	2004	<b>0.000</b>	<b>0.760</b>	-13	<b>0.000</b> *
08253X0012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Période	Avant 1989			Avant 2001					1989 - 2001			Après 1989					Après 2001		
	Point d'eau (Code BSS)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Rupture	Pettitt P-value	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)	Mann-Kendall P-value	Rupture	Test de rupture (Pettitt)	Autocorrélation (ordre 1)	Pente de Sen (cm/an)
08254X0012	0.372	-25.5	0.001	0.220	-17.8	<b>0.000</b>	1988	<b>0.003</b>	0.221	-10.6	0.474	<b>0.617</b>	-15.7	<b>0.000</b> *	2003	<b>0.002</b>	0.450	-20.6	<b>0.005</b>
08261X0030	<b>0.601</b>	-29.7	0.000 *	<b>0.734</b>	-23.9	<b>0.000</b> *	1986	<b>0.001</b>	0.336	-17.4	0.071	0.465	-14.3	<b>0.000</b>	2002	<b>0.000</b>	0.395	-7.3	0.115
08264X0004	<b>0.853</b>	-46.4	0.002 *	<b>0.910</b>	-38.1	<b>0.000</b> *	1985	<b>0.000</b>	0.431	21.6	<b>0.038</b>	<b>0.683</b>	-9.8	0.182 *	2011	<b>0.008</b>	<b>0.676</b>	-29.0	<b>0.014</b> *
08271X0213	0.290	-16.5	0.099	<b>0.850</b>	-26.9	<b>0.002</b> *	1988	<b>0.000</b>	<b>0.628</b>	58.9	<b>0.002</b> *	0.440	-2.5	0.926	2010	0.484	0.314	-54.1	0.161
08272X0391	0.203	-121.0	0.003	0.528	-55.9	<b>0.005</b>	1988	<b>0.001</b>	<b>0.672</b>	55.5	<b>0.005</b> *	<b>0.629</b>	-26.3	0.083 *	2011	<b>0.011</b>	0.479	-61.7	<b>0.005</b>
08272X0404	0.227	-64.1	0.019	0.550	-26	0.124	1988	<b>0.006</b>	<b>0.624</b>	97.0	<b>0.000</b> *	<b>0.605</b>	-17.1	0.422 *	2011	<b>0.022</b>	0.469	-63.6	<b>0.006</b>
08273X0272	-	-	-	0.186	-35.3	0.091	1990	<b>0.024</b>	0.302	8.6	0.428	0.490	-22.1	<b>0.000</b>	2001	<b>0.000</b>	0.030	-28.3	0.100
08273X0288	<b>0.709</b>	-99.7	0.000 *	<b>0.824</b>	-80.2	<b>0.013</b> *	1988	<b>0.000</b>	0.318	20.7	0.161	0.456	-15.3	<b>0.001</b>	2001	<b>0.006</b>	0.255	-21.5	<b>0.041</b>
08276X0085	0.509	-90.0	0.000	<b>0.730</b>	-85.4	<b>0.000</b> *	1986	<b>0.000</b>	0.314	37.6	0.077	<b>0.661</b>	-22.9	0.127 *	2011	<b>0.008</b>	<b>0.686</b>	-56.1	<b>0.001</b> *
08277X0003	-	-	-	<b>0.830</b>	-70.1	<b>0.005</b> *	1988	<b>0.008</b>	-	-	-	<b>0.786</b>	-31.3	<b>0.000</b> *	2002	<b>0.000</b>	<b>0.605</b>	-35.5	<b>0.000</b> *
08277X0152	<b>0.759</b>	-109.3	0.000 *	<b>0.880</b>	-94.6	<b>0.000</b> *	1985	<b>0.000</b>	0.033	3.9	0.855	0.461	-26.9	<b>0.000</b>	2001	<b>0.001</b>	0.188	-48.4	<b>0.044</b>
08277X0153	0.522	-119.8	0.000	<b>0.639</b>	-97.1	<b>0.005</b> *	1989	<b>0.000</b>	-0.127	3.5	1.000	0.399	-37.8	<b>0.000</b>	2000	<b>0.000</b>	-0.341	-27.9	0.300
08278X0023	<b>1.000</b>	-91.1	0.001 *	<b>0.786</b>	-66	<b>0.018</b> *	1989	<b>0.001</b>	0.225	3	0.714	<b>0.646</b>	-16.7	<b>0.000</b> *	2001	<b>0.000</b>	0.378	-20.2	<b>0.001</b>
08278X0111	-	-	-	<b>0.816</b>	-72	<b>0.003</b> *	1989	<b>0.001</b>	0.052	-10.3	0.059	<b>0.707</b>	-26.9	<b>0.000</b> *	2001	<b>0.000</b>	0.382	-24.4	<b>0.016</b>
08278X0127	0.498	-98.3	0.000	0.590	-75		1988	<b>0.000</b>	0.265	-15.9	<b>0.003</b>	<b>0.796</b>	-30.8	<b>0.000</b> *	2002	<b>0.000</b>	<b>0.609</b>	-31.1	<b>0.000</b> *
08278X0186	-	-	-	0.214	-5.4	0.298	1989	0.617	0.007	-1.2	0.714	0.575	-21.2	<b>0.000</b>	2001	<b>0.001</b>	0.143	-26	0.062
08281X0018	<b>0.886</b>	-76.8	0.000 *	<b>0.960</b>	-75.1	<b>0.000</b> *	1986	<b>0.000</b>	<b>0.693</b>	-45.8	0.000 *	<b>0.848</b>	-40.1	<b>0.000</b> *	2003	<b>0.000</b>	<b>0.723</b>	-32	<b>0.000</b> *
08281X0020	-	-	-	<b>0.735</b>	-37.7	<b>0.007</b> *	1992	<b>0.018</b>	0.374	-26.9	0.001	<b>0.781</b>	-26.9	<b>0.000</b> *	2000	<b>0.000</b>	0.208	-17.7	0.077
08282X0029	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.734</b>	-35.3	0.007 *	<b>0.781</b>	-37	<b>0.001</b> *	1998	<b>0.011</b>	-	-	-
08284X0011	<b>0.819</b>	-84.3	0.000 *	<b>0.887</b>	-82.1	<b>0.000</b> *	1987	<b>0.001</b>	0.499	-56.7	0.000	<b>0.702</b>	-44.2	<b>0.000</b> *	2004	<b>0.000</b>	<b>0.744</b>	-32.2	<b>0.000</b> *
08285X0012	-	-	-	<b>0.796</b>	-70.5	0.001 *	1986	0.003	0.446	-23.3	0.020	<b>0.870</b>	-31.7	<b>0.000</b> *	2003	<b>0.000</b>	<b>0.673</b>	-31.4	<b>0.000</b> *
08288X0003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0.845</b>	-28.2	<b>0.000</b> *	2006	<b>0.000</b>	<b>0.731</b>	-22	<b>0.000</b> *
08308X0006	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.145	-7.7	0.108	<b>0.603</b>	-6.4	<b>0.000</b> *	2001	<b>0.003</b>	0.439	-5	<b>0.033</b>
08521X0018	<b>0.886</b>	-76.8	0.000 *	<b>0.960</b>	-75.1	0.000 *	1986	0.000	<b>0.693</b>	-45.8	0.000 *	<b>0.848</b>	-40.1	<b>0.000</b> *	2003	<b>0.000</b>	<b>0.723</b>	-32	0.000 *
08521X0239	-	-	-	<b>0.681</b>	-52.4	0.000 *	1996	0.066	<b>0.681</b>	-52.4	0.000 *	<b>0.882</b>	-45.6	<b>0.000</b> *	2001	<b>0.001</b>	<b>0.677</b>	-35.7	0.001 *
08522X0011	<b>0.819</b>	-84.3	0.000 *	<b>0.887</b>	-82.1	0.000 *	1987	0.001	0.499	-56.7	0.000	<b>0.702</b>	-44.2	<b>0.000</b> *	2004	<b>0.000</b>	<b>0.744</b>	-32.2	0.000 *
08522X0017	<b>0.856</b>	-66.5	0.000 *	<b>0.851</b>	-82	0.000 *	1983	0.000	<b>0.767</b>	-70.4	0.000 *	<b>0.838</b>	-66.5	<b>0.000</b> *	1998	<b>0.002</b>	<b>0.724</b>	-40.9	0.001 *
08523X0092	0.538	-88	0.000	<b>0.743</b>	-89.1	0.000 *	1989	0.001	<b>0.774</b>	-72.3	0.000 *	<b>0.845</b>	-63.5	0.000 *	1998	<b>0.002</b>	-	-	-
08524X0018	0.542	-92.7	0.000	<b>1.000</b>	-94.4	0.000 *	1984	0.000	0.539	-75.6	0.000	0.481	-72.8	0.000	1996	<b>0.011</b>	-	-	-
08526X0003	<b>0.696</b>	-76	0.000 *	<b>0.858</b>	-87	0.000 *	1984	0.000	<b>0.749</b>	-74.8	0.000 *	<b>0.841</b>	-55.4	0.000 *	2003	<b>0.000</b>	<b>0.765</b>	-37.7	0.000 *
08763X0002	-	-	-	0.488	-100.60	0.000	1989	0.023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08764X0003	<b>0.885</b>	-52.5	0.005 *	<b>0.882</b>	-89.5	0.000 *	1984	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08764X0008	-	-	-	<b>0.725</b>	-90.6	0.000 *	1992	0.007	<b>0.783</b>	-84.9	0.000 *	<b>0.851</b>	-60.2	0.000 *	2003	<b>0.000</b>	<b>0.771</b>	-39.4	0.000 *

\*P-value corrigé (Autocorrélation &gt;0.6)

- Data insuffisante



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Nouvelle-Aquitaine - site de Bordeaux**

Parc Technologique Europarc

24 avenue Léonard de Vinci

33600 - Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**