



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Développement du Modèle Mio-Plio-Quaternaire

Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020
Module 1.3 - Année 3

Rapport final

BRGM/RP-71436-FR

Version 2 du 17 février 2022

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

Cabaret O., Manceau J.C.

Vérificateur :

Nom : Olivier DOUEZ

Fonction : Hydrogéologue

Date : 20/01/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Nicolas PEDRON

Fonction : Directeur Régional
BRGM Nouvelle Aquitaine

Date : 17/02/2022

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

Ce rapport a été réalisé en partenariat avec :

PRÉFÈTE
DE LA RÉGION
NOUVELLE-AQUITAINE
Liberté
Égalité
Fraternité

RÉGION
Nouvelle-
Aquitaine

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

EAU
GRAND SUD-OUEST
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE

Mots clés : Plio-Quaternaire, Triangle landais, Modèle numérique, Hydrogéologie

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

Cabaret O., Manceau J.C. (2022) - Développement du Modèle Mio-Plio-Quaternaire. Rapport final V2. BRGM/RP-71436-FR, 52 p.

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

Synthèse

Le travail abordé dans le présent rapport - module « Développement du modèle hydrogéologique mio-plio-quaternaire » - s'inscrit dans le cadre de la Convention Régionale sur les Eaux Souterraines 2015-2020, signée entre la Région Nouvelle-Aquitaine, l'Etat et le BRGM, avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Ce travail est dans la continuité des travaux démarrés au cours de la précédente convention (2008-2013) et a pour but le développement d'un outil de modélisation des nappes du triangle landais. Ce modèle a pour objectif de fournir des éléments de compréhension sur le fonctionnement des réservoirs superficiels (recharge, interactions avec les aquifères sous-jacents, relations nappes-rivières, ...) et d'appuyer les SAGE en vue d'une gestion raisonnée de l'eau, à l'échelle de leur territoire.

Les premières années du module ont permis d'initier la synthèse des données disponibles à l'échelle du triangle landais, afin d'évaluer les possibilités de modélisation et les besoins futurs en termes de données d'entrée du modèle. La géométrie du modèle hydrodynamique a été élaborée, à partir du modèle géologique réalisé antérieurement, puis actualisé à l'aide du modèle géologique élaboré dans le cadre du MODèle Nord-Aquitain (MONA-v4), pour garantir l'interopérabilité des deux outils. Les premières simulations en régime permanent ont été effectuées (Corbier et Cabaret, 2014), par intégration des données de recharge des nappes et de paramètres hydrodynamiques, puis par la prise en compte du réseau hydrographique (Corbier et Cabaret, 2015). Par la suite, les prélèvements pour l'AEP et l'usage industriel ont été introduits au modèle (Cabaret et Vergnes, 2017). Concernant les prélèvements agricoles, seuls ceux du département de la Gironde ont été intégrés en raison du nombre très importants d'ouvrages dans le triangle landais et de la difficulté à accéder à des données exhaustives et fiables. À la suite des premiers tests et compte tenu de la complexité du modèle en termes de représentation des formations géologiques (trop détaillées), une simplification de l'outil de modélisation (principalement par regroupement de certaines couches présentant des comportements hydrodynamiques semblables) a été menée. Une meilleure prise en compte de la recharge a été intégrée à ce nouvel outil, afin de pouvoir réaliser les premiers tests en régime transitoire, au pas de temps mensuel, sur l'ensemble du triangle landais, pour la période 2000 - 2014 (Cabaret et al., 2019).

Ce rapport présente ainsi la poursuite du développement de ce modèle. Différentes tâches ont été menées dans le cadre de ce travail, avec tout d'abord la mise à jour des données d'entrée du modèle pour la période 2015-2019, afin de disposer de 20 années de mesures. Cette mise à jour a concerné les suivis piézométriques, les suivis de débit dans les cours d'eau, la consolidation des données de rejet et de prélèvements en cours d'eau. Un travail spécifique a été réalisé pour ventiler les prélèvements agricoles en nappes, à la fois spatialement et temporellement, dans les territoires des SAGE Leyre et Born-et-Buch, en raison de la quantité d'informations plus importantes apportées notamment par les études initiées par ces SAGE.

Ensuite, une première calibration en régime transitoire du modèle hydrodynamique, pour la période 2000-2019, au pas de temps mensuel, a été effectuée. L'objectif principal de cette calibration a été de vérifier la capacité du modèle, dans sa configuration actuelle et moyennant des modifications raisonnables, à reproduire les observations de terrain. La calibration sur l'ensemble du triangle landais a été réalisée, dans un premier temps, à partir des données du modèle les plus robustes : à savoir les points de suivi (piézométrie et débit des cours d'eau) bénéficiant de plus de 15 données. Sauf exception, de bons résultats ont été obtenus. Une attention particulière a été portée sur les territoires du SAGE Leyre et du SAGE Born-et-Buch. Pour ces secteurs, les résultats du modèle ont été également comparés aux points de suivi

bénéficiant de moins de 15 données, avec le même objectif d'identification des comportements anormaux, pouvant traduire des difficultés de représentativité du modèle. Là encore, les résultats sont satisfaisants.

Plusieurs voies d'amélioration de ce premier calage en régime transitoire sont envisagées, au-delà de la résolution de problèmes conceptuels locaux. La principale concerne la connaissance (en terme de localisation géographique, d'aquifère capté et de volume) des prélèvements agricoles, qui ne pourra se faire qu'en concertation avec les acteurs locaux. Une seconde piste concerne l'ajustement des propriétés du modèle pour permettre une calibration acceptable. En effet, aucune modification des propriétés hydrodynamiques, dans les secteurs ne bénéficiant pas d'informations piézométriques (en particulier des chroniques), n'a pu être menée : un travail d'homogénéisation des modifications du modèle entre zones calibrées et non calibrées devra être conduit, notamment au regard de la connaissance géologique et hydrogéologique locale. Au final, et comme l'a montré le travail de calibration, l'interprétation des résultats du modèle sera à l'heure actuelle surtout pertinente à l'échelle régionale, mis à part dans les secteurs où les limites du modèle (résolutions horizontale, verticale ; réseau hydrographique ; etc.) ont des conséquences limitées et qui bénéficient de données suffisantes pour s'assurer de sa représentativité locale. Comme tout modèle hydrodynamique, c'est un outil évolutif et sa capacité de représentation des écoulements souterrains s'affinera à mesure que des données additionnelles viendront l'alimenter.

Sommaire

1. Introduction.....	7
2. Rappels des caractéristiques du modèle hydrodynamique	9
3. Développement du modèle hydrogéologique.....	11
3.1. Nappes.....	11
3.1.1. <i>Prélèvements</i>	11
3.1.2. <i>Piézométrie</i>	13
3.2. Cours d'eau.....	16
3.2.1. <i>Débits prélevés</i>	16
3.2.2. <i>Rejets en cours d'eau</i>	18
3.2.3. <i>Débits observés</i>	19
4. Poursuite du calage du modèle hydrogéologique	21
4.1. Modifications faites sur la couche 8, suite au calage préliminaire	21
4.2. Procédure suivie pour la calibration	22
4.3. Evaluation de la calibration	23
4.4. Résultats de la calibration.....	24
4.4.1. <i>SAGE Leyre</i>	25
4.4.2. <i>SAGE Born-et-Buch</i>	30
4.4.3. <i>Nord du modèle : SAGE Estuaire et SAGE Lacs Médocains</i>	36
4.4.4. <i>Est et sud-est du modèle (dont SAGE Ciron et SAGE Midouze)</i>	41
4.4.5. <i>Sud du modèle</i>	45
5. Conclusion.....	49
6. Bibliographie.....	51

Liste des figures

Figure 1 - Simplification de la géométrie du modèle des sables plio-quaternaires (Cabaret et al., 2019)	10
Figure 2 - Localisation des ouvrages de prélèvements industriels, AEP et autres (eau collective et service public) et chronique d'évolution reconstituée pour la période 2000-2019.....	12
Figure 3 - Répartition des volumes agricoles intégrés au modèle et évolution temporelle au cours de la période 2000-2019	13
Figure 4 - Localisation des 498 ouvrages mis à jour (à gauche) et des 98 nouveaux ouvrages intégrés à la base de données (à droite).....	14
Figure 5 - Tableau de répartition du nombre d'ouvrages, par couche de modèle disposant d'au moins une mesure mensuelle au cours de la période 2000-2019	14
Figure 6 - Répartition des 596 ouvrages disposant d'au moins une mesure mensuelle de piézométrie pour la période 2000-2019	15
Figure 7 - Répartition temporelle du nombre d'ouvrages par couche disposant d'une mesure mensuelle	15

Figure 8 - Localisation des points de prélèvements en eau de surface (à gauche : non intégrés au modèle ; à droite : intégrés au modèle avec les volumes de juillet 2019, par usage).....	17
Figure 9 - Chronique des prélèvements mensuels en eau de surface, intégrés au modèle, et représentation des prélèvements par usage	18
Figure 10 - Localisation des STEP et volumes rejetés dans les cours d'eau en décembre 2019	18
Figure 11 - Localisation des stations hydrométriques et nombre de mois disposant de valeurs de débits (à gauche : pour l'ensemble de la période modélisée (2000-2019) ; à droite : pour la période de mise à jour (2015-2019))	19
Figure 12 - Secteurs géographiques utilisés pour la présentation des résultats de calibration	24
Figure 13 - Comparaison : simulations vs. observations, pour le secteur du SAGE Leyre [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs]	28
Figure 14 - Diagramme de dispersion des biais : charges moyennes observées vs. charges moyennes simulées, pour chacun des ouvrages du secteur du SAGE Leyre [Les points rouges correspondent aux points bénéficiant de moins de 15 données mensuelles ; les points noirs sont les ouvrages dont les chroniques ont été analysées ; la droite grisée pleine correspond à la droite de distribution théorique des points ; les droites grisées en pointillés sont les écarts à la droite théorique ± 5 m]	29
Figure 15 - Comparaison : simulations vs. observations pour le secteur du SAGE Born-et-Buch [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs].....	34
Figure 16 - Résultats de la simulation alternative avec lentille argileuse, au droit des ouvrages 08494X0077 et 08494X0127	34
Figure 17 - Diagramme de dispersion des biais : charges moyennes observées vs. charges moyennes simulées, pour chacun des ouvrage du secteur du SAGE Born-et-Buch [Les points rouges correspondent aux points bénéficiant de moins de 15 données mensuelles ; les points noirs sont les ouvrages dont les chroniques ont été analysées ; la droite grisée pleine correspond à la droite de distribution théorique des points ; les droites grisées en pointillés sont les écarts à la droite théorique ± 5 m]	35
Figure 18 - Comparaison simulations vs. observations pour le secteur du Nord du modèle : SAGE Estuaire et SAGE Lacs Médocains [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs].....	40
Figure 19 - Résultat de la simulation alternative avec reprise à la nappe, au droit du point d'observation 07298X0037	40
Figure 20 - Comparaison simulations vs. observations pour le secteur de l'Est et sud-est du modèle (dont SAGE Ciron et SAGE Midouze) [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs].....	44
Figure 21 - Comparaison simulations vs. observations pour le secteur du Sud du modèle [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs].....	47

1. Introduction

Le développement du modèle hydrogéologique mio-plio-quaternaire présenté dans ce rapport s'inscrit dans le cadre de la Convention Régionale sur les Eaux Souterraines 2015-2020, signée entre la région Nouvelle-Aquitaine, l'État et le BRGM, avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Ce travail est dans la continuité des travaux initiés au cours de la précédente convention (2008-2013). Cet outil de modélisation des nappes du triangle landais a pour objectif de fournir des éléments de compréhension sur le fonctionnement des réservoirs superficiels (recharge, interactions avec les aquifères sous-jacents, relations nappes-rivières, ...) et d'appuyer les SAGE en vue d'une gestion raisonnée de l'eau, à l'échelle de leur territoire.

La première année de ce travail (Corbier et Cabaret, 2014) a consisté à réaliser la synthèse des données disponibles à l'échelle du triangle landais, afin d'évaluer les possibilités de modélisation. La géométrie du modèle a été adaptée du modèle géologique, élaboré dans le cadre de la précédente convention régionale, puis a été développée simultanément au MOdèle Nord-Aquitain-v4 (MONA-v4) pour garantir l'interopérabilité des deux outils. Ainsi, le maillage (taille et position), la topographie et la géométrie du réservoir du Miocène sont analogues dans les deux modèles hydrodynamiques. Les premières simulations effectuées en régime permanent ont permis d'assurer un bon fonctionnement de l'outil, malgré une construction de modèle non encore finalisée, les travaux de modélisation devant se focaliser par la suite sur la vérification et le calage de la recharge des aquifères, sur l'ajustement de leurs paramètres hydrodynamiques, sur une meilleure prise en compte du réseau hydrographique et sur l'intégration des prélèvements.

En deuxième année (Corbier et Cabaret, 2015), les travaux se sont concentrés sur l'intégration du réseau hydrographique, conjointement avec le MONA et les autres outils de modélisation développés au BRGM Nouvelle-Aquitaine (Modèle Oligocène et Modèle Phonème), afin d'assurer une compatibilité d'ensemble. Un exercice spécifique sur la connaissance de la morphologie des cours d'eau (nécessaire avant l'intégration dans le modèle) a été effectué au travers d'une campagne de mesures de terrain, sur le territoire des Lacs médocains. À partir du bilan des données disponibles à l'échelle du territoire modélisé, les caractéristiques réunies sur les cours d'eau ont été intégrées dans le modèle, puis une vérification de son bon fonctionnement a été réalisée (convergence et gammes de débits restitués).

En troisième année de projet (Cabaret et Vergnes, 2017), il a été jugé nécessaire de parfaire la représentation numérique du réseau hydrographique et d'introduire les données de prélèvements au modèle qui, jusqu'ici, étaient inexistantes, en raison notamment de la quantité importante de forages exploités et des possibles problèmes de convergence numérique du modèle que pouvait générer leur intégration. En l'absence de ces données les années précédentes, seul un calage global général visait à garantir les ordres de grandeur observés de la piézométrie. Des acquisitions de mesures de débits ont été réalisées en complément de celles faites dans le cadre du module 3.2 « Plio-Quaternaire - Relations nappes / rivières / étangs » de la même convention régionale, permettant d'obtenir de nouvelles mesures de débits au travers de la réalisation de jaugeages, sur les territoires de l'estuaire de la Gironde et de cours d'eau en rive gauche de Garonne, et le long de la façade sud-atlantique. En parallèle, la compilation des données de prélèvements a abouti à la reconstitution des chroniques annuelles de prélèvements, pour la période de 2000 à 2014, pour les usages AEP et industriels sur l'ensemble du triangle landais. Concernant l'usage agricole, le nombre d'ouvrages, la complexité des modes de prélèvements et la difficulté de rattachement des compteurs de redevance de l'Agence de l'Eau, à des ouvrages physiques, n'ont permis d'intégrer que les volumes girondins, comptant toutefois 2 709 ouvrages, tous avec une chronique reconstituée pour la période 2000-2014. Au terme de cet exercice, la construction et le calage du modèle en régime permanent ont été poursuivis.

En quatrième année (Cabaret et al., 2019), une simplification du nombre de couches dans le modèle a été effectuée pour permettre de faciliter la gestion des données, de limiter les temps de calculs et surtout d'être davantage représentatif de la réalité hydrodynamique des aquifères plio-quaternaires (les aquifères étant souvent en continuité hydraulique). Ensuite, un passage en régime transitoire a été réalisé, consistant à la simulation des écoulements au pas de temps mensuel, pour la période 2000-2014, et nécessitant une adaptation et une mise en forme des données d'entrée et de sortie du modèle. Pour ce faire, des réflexions ont été menées sur la ventilation mensuelle des prélèvements connus annuellement. Puis, en parallèle du développement du MONA-v4, la manière d'appréhender la recharge dans ces aquifères a été revisitée.

À l'issue de ces quatre premières années, la poursuite du développement du modèle s'est orientée tout d'abord vers la mise à jour des données d'entrée du modèle pour la période 2015-2019, afin de disposer de 20 années de mesures. À l'issue de cette mise à jour, un calage global en régime transitoire de l'ensemble du modèle (piézométrie, débit) a été effectué afin de valider les mises à jour. Puis, un calage plus fin sur les territoires des SAGE Leyre et Born-et-Buch, comportant des informations plus détaillées, issues notamment des études initiées par ces SAGE, a été réalisé. Le présent rapport fait ainsi état de cette mise à jour, puis des résultats des simulations et calages effectués sur l'ensemble du territoire du triangle landais, et plus particulièrement sur ceux des SAGE Leyre et Born-et-Buch.

2. Rappels des caractéristiques du modèle hydrodynamique

Les principales spécifications du modèle mio-plio-quaternaire sont les suivantes (des informations plus détaillées sont disponibles dans le rapport RP-68674-FR (Cabaret et al., 2019) :

- Le nombre de couches, depuis la première version du modèle (rapport RP-63168-FR ; Corbier et Cabaret, 2014), a évolué. Une simplification du modèle conceptuel initial a ainsi été menée au cours du précédent exercice (rapport RP-68674-FR ; Cabaret et al., 2019) pour passer de 17 à 8 couches (Figure 1) avec les modalités de regroupement suivantes :
 - les substratums des nouvelles couches 1 et 8 ont été déterminés à partir de la topographie et des épaisseurs cumulées des anciennes couches 1 à 6 et 13 à 17 ;
 - une perméabilité équivalente aux couches regroupées a été calculée (pondération selon l'épaisseur de la couche), en attendant le calage en régime transitoire, qui doit permettre de déterminer ces dernières. Aucune anisotropie de perméabilité n'a été appliquée, anisotropie qui pourrait permettre de rendre compte de la succession de niveaux perméables et semi-perméables ;
- Le maillage du modèle est au pas de 500 m, semblable au MODèle Nord-Aquitain v4 (MONA-v4, en cours de développement), afin d'en assurer la compatibilité, et s'étend sur environ 17 800 km² (Figure 1). La surface topographique du modèle a été obtenue à partir du MNT au pas de 25 m, de l'IGN : import des valeurs minimums au niveau des rivières et des valeurs moyennes ailleurs. Des relevés bathymétriques ont été intégrés pour la façade atlantique, le bassin d'Arcachon, l'estuaire de la Gironde et les principaux lacs. Les charges de la couche 8 sont imposées, à partir des charges calculées par le modèle MONA-v3.
- Les pluies efficaces et leur répartition, entre infiltration vers les eaux souterraines et ruissellement vers les eaux de surface, ont été intégrées au modèle via un bilan hydroclimatique réalisé à partir de l'outil GARDENIA (Thiéry, 2015a) couplé au logiciel Marthe (Thiéry, 2015b) et des données SAFRAN (Météo-France). Des zones de sol ont été prédéfinies afin de paramétrer ces bilans selon une méthode cartographique croisant zones de réserve utile homogène et zones IDPR¹ homogène.
- Le calcul du bilan hydro-climatique (ruissellement + recharge) est réalisé au pas de temps journalier, tandis que le calcul hydrodynamique (écoulements souterrains + débits de rivière) est réalisé au pas de temps mensuel.

¹ Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, créé par le BRGM, pour qualifier l'aptitude du sous-sol à laisser s'infiltrer l'eau

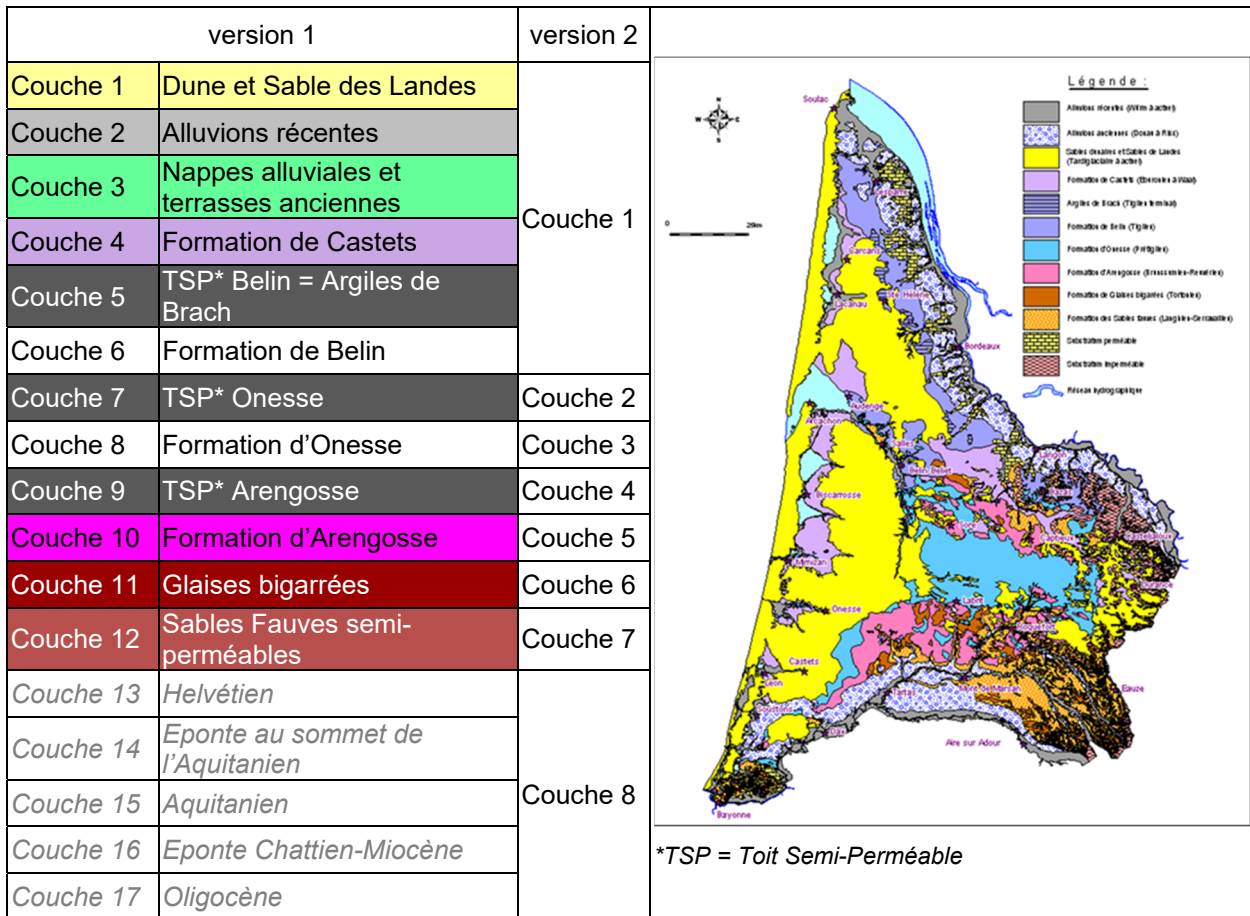


Figure 1 - Simplification de la géométrie du modèle des sables plio-quaternaires (Cabaret et al., 2019)

- Enfin, concernant le calage préliminaire mené en régime transitoire :

- l'indicateur de performance utilisé correspond, pour chaque point de suivi, à l'écart entre la moyenne des simulations et la moyenne des observations ;
- à quelques exceptions près, les résultats des niveaux piézométriques apparaissent globalement satisfaisants pour les SAGE Leyre, Born-et-Buch et Lacs médocains. En revanche, des écarts très importants (> 10 m) sont à souligner dans certains secteurs : SAGE Ciron et SAGE Midouze. Le plus souvent, les écarts sont négatifs, c'est-à-dire que les niveaux simulés sont largement sous-estimés. Ce constat est également fait pour la couche 3 (formation d'Onesse). Par contre, aucun écart important n'est observé pour la couche 5 (formation d'Arengosse).
- les ordres de grandeur des débits des cours d'eau sont, une nouvelle fois, correctement retranscrits par le modèle au droit des SAGE Leyre, Born-et-Buch et Lacs médocains, ainsi que pour la Leyre. En revanche, des écarts très importants sont observés en périphérie du modèle, au niveau de cours d'eau s'écoulant directement sur la couche 8 (où des charges hydrauliques ont été imposées).

3. Développement du modèle hydrogéologique

Le développement du modèle plio-quaternaire, en régime transitoire, au pas de temps mensuel, pour la période 2000-2019, requiert de préparer, en amont des simulations, les fichiers d'entrée et de sortie du modèle pour chacun de ses 240 pas de temps. Une préparation minutieuse des données de prélèvements, opérés dans les nappes du Plio-Quaternaire : piézométries observées et débits dans les cours d'eau ainsi que recharge vers les nappes, s'avère donc nécessaire. Parfois, l'absence de données exhaustives impose des réflexions quant à la façon de prendre en compte ces données d'entrée et de sortie dans le modèle. Le chapitre suivant parcourt, pour chaque ensemble de données, les modes de préparation des fichiers et les réflexions ayant conduit à leur élaboration.

3.1. NAPPES

3.1.1. Prélèvements

Les données de prélèvements AEP et industriels ont été mises à jour pour la période 2015-2019, en s'appuyant d'une part, sur les données collectées dans le cadre des activités BRGM auprès des exploitants et d'autre part, sur les données de redevance de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG). Ceci permet d'avoir une base consolidée avec des prélèvements géolocalisés et les aquifères affectés connus.

Les chroniques reconstituées montrent l'empreinte des prélèvements industriels et AEP sur les nappes plio-quaternaires (Figure 2). La chronique de prélèvements, reconstituée pour l'usage industriel, reste à modérer car les prélèvements sont largement surévalués en raison du mode de calcul des volumes prélevés pour l'industrie du granulat, déjà explicité dans les travaux précédents (Cabaret et Vergnes, 2017).

Par ailleurs, cette chronique fait apparaître, à partir de 2009 - 2010, une nette augmentation des prélèvements qui s'estompe par la suite, pour revenir en 2015 à des volumes proches de ceux prélevés avant 2008. Cette augmentation s'explique en grande partie par l'impact de la tempête Klaus, survenue fin janvier 2009, ayant nécessité la mise en place d'arrosage pour le stockage du bois abattu. Ce phénomène avait déjà été abordé lors des précédents travaux (Cabaret et Vergnes, 2017).

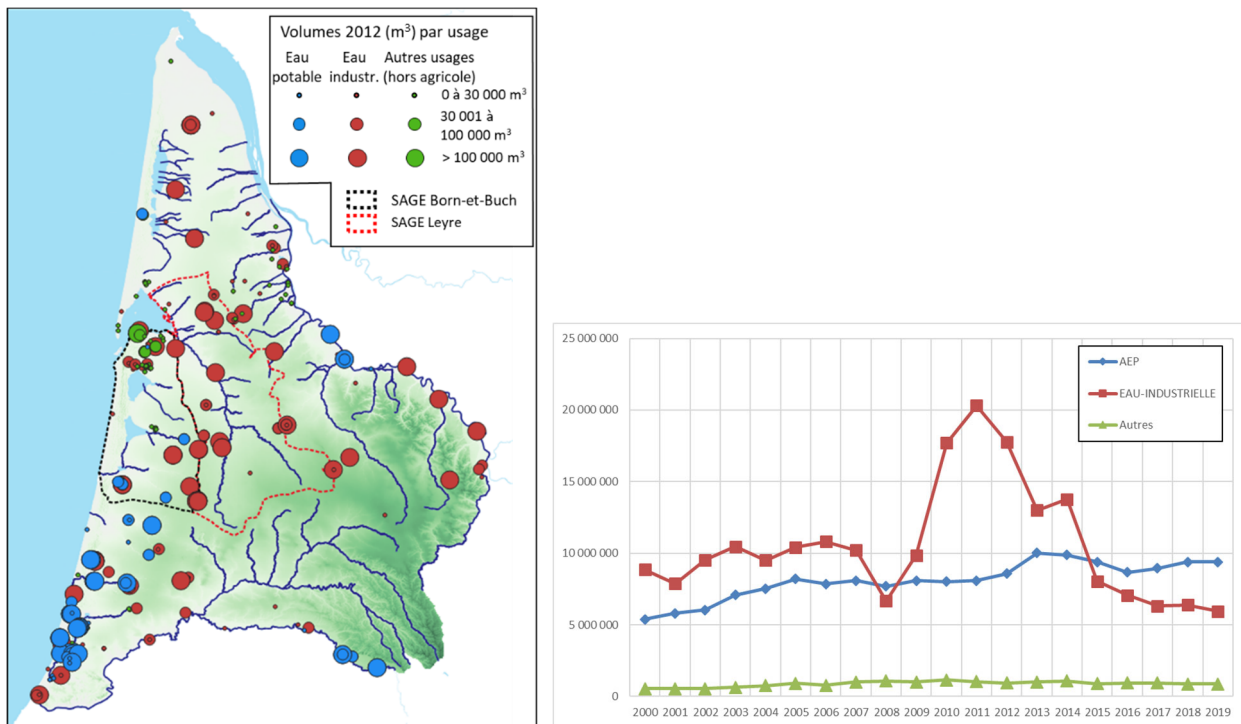


Figure 2 - Localisation des ouvrages de prélèvements industriels, AEP et autres (eau collective et service public) et chronique d'évolution reconstituée pour la période 2000-2019

Les prélèvements agricoles étaient jusqu'ici consolidés en Gironde, par croisement des bases de la Chambre d'Agriculture de Gironde et des données de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (Cabaret et Vergnes, 2017 ; Cabaret et al., en cours). Ce croisement permettait de bénéficier de la géolocalisation des ouvrages, obtenue des fichiers de la Chambre d'Agriculture, et d'une évaluation annuelle des prélèvements, obtenue de la base de données des redevances de l'Agence de l'Eau. Dans les Landes, aucun croisement n'avait été jusqu'ici effectué, pour obtenir des données plus précises que celles disponibles dans les fichiers AEAG, à savoir des volumes agricoles référencés au centroïde des communes. Pour les besoins de l'élaboration d'un modèle hydrogéologique, pour le territoire du Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon (SIBA), un premier travail de croisement entre la base AEAG et celle de la Chambre d'Agriculture des Landes permet d'avoir une répartition plus juste des volumes agricoles. Cette répartition n'est pas tout à fait exhaustive, car les volumes sont affectés aux ouvrages reconnus comme « exploités » par la Chambre d'Agriculture des Landes, sans pour autant correspondre aux volumes exactement prélevés. Les détails de ces affectations sont fournis dans le rapport Cabaret et al. (Projet MOHYS - phase 2, en cours). Ces premiers croisements ont permis de consolider les prélèvements agricoles, pour la période 2003-2019, de 32 communes. Ils se sont poursuivis dans le cadre de ce présent travail pour 34 communes supplémentaires, essentiellement dans les Landes.

Au terme de ce travail, 6 846 ouvrages ont été intégrés au modèle, dont 6 436 sont considérés prélevés au cours de la période 2000-2019 (Figure 3). Ils sont localisés essentiellement en Gironde et dans les territoires landais des SAGE Born-et-Buch et SAGE Leyre. La finalisation de la consolidation des volumes prélevés doit se poursuivre pour le reste du territoire des Landes. Les prélèvements à destination de l'agriculture s'avèrent, jusqu'ici, 10 fois plus importants que pour le reste des usages, et cela devrait augmenter avec la fin de consolidation des prélèvements pour l'ensemble du territoire couvert par le modèle.

Pour une reconstitution des chroniques mensuelles, les volumes agricoles ont été ventilés, au cours de la période de campagne d'irrigation, fixée arbitrairement entre juin et septembre. Des travaux de collecte de données dans les Landes (André et al., 2019) avaient montré que les prélèvements agricoles de 2016 à 2018 s'effectuaient entre juin (5 %), juillet (45 %), août (45 %) et septembre (5 %). Cette ventilation est adoptée pour le modèle.

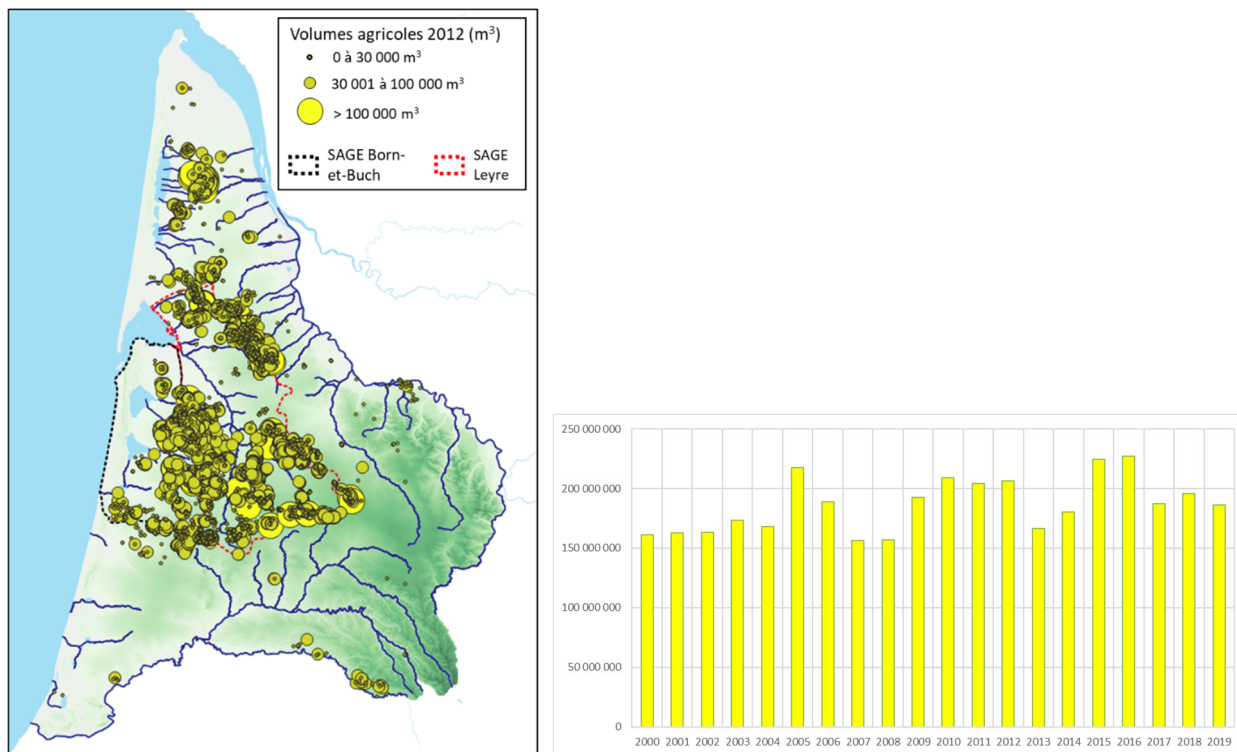


Figure 3 - Répartition des volumes agricoles intégrés au modèle et évolution temporelle au cours de la période 2000-2019

3.1.2. Piézométrie

La compilation des données piézométriques a consisté à (Figure 4) :

- mettre à jour les 498 chroniques disposant jusqu'ici d'au moins une mesure pour la période 2000-2014, en les complétant pour la période 2015-2019 ;
- intégrer les mesures de 98 nouveaux ouvrages ayant été soit réalisées à partir de 2015, c'est notamment le cas des campagnes piézométriques effectuées en 2016 sur le territoire du SAGE Estuaire, soit collectées postérieurement aux derniers travaux (Cabaret et al., 2019). Ces dernières mesures concernent celles disponibles autour des lacs médocains dans la thèse de D. Buquet (2017) ou dans des études à proximité des étangs de Born-et-Buch.

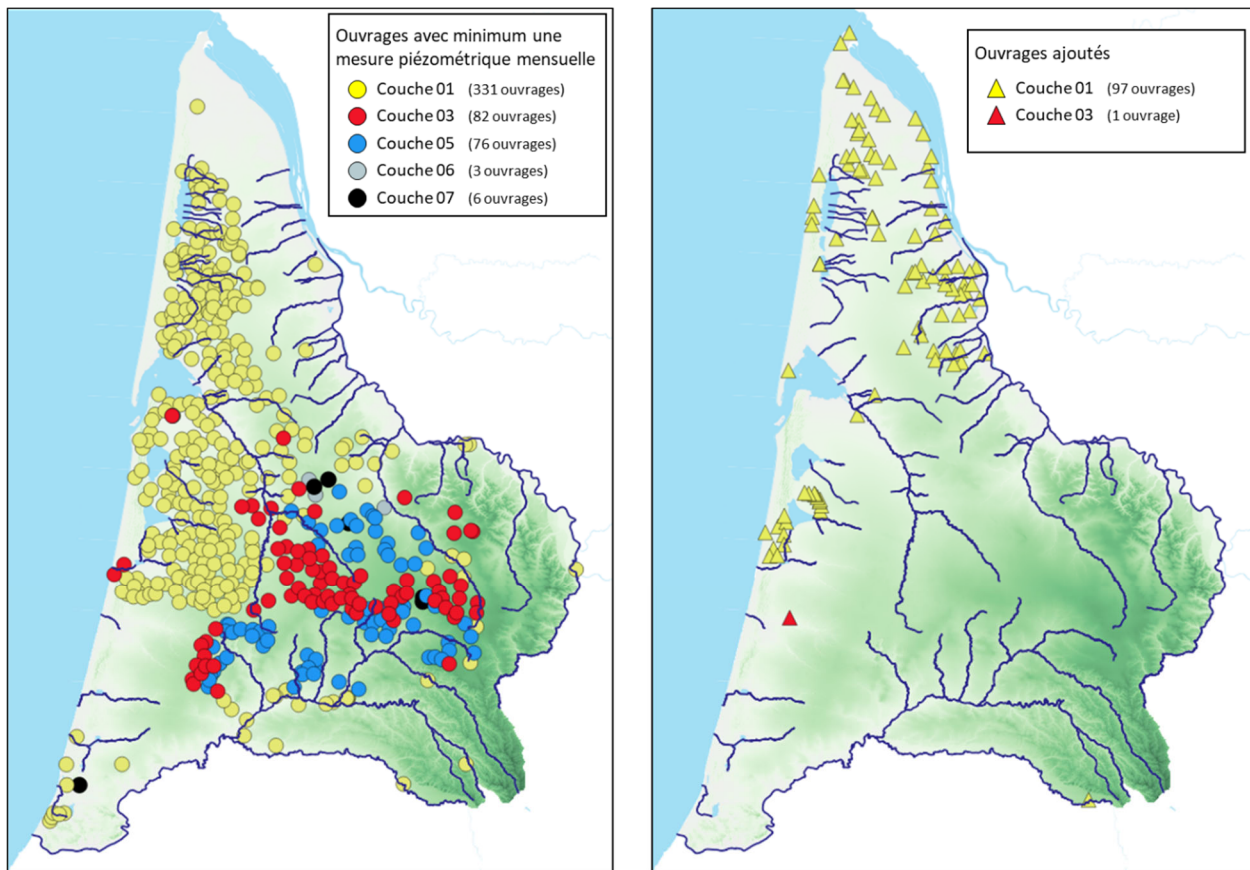


Figure 4 - Localisation des 498 ouvrages mis à jour (à gauche) et des 98 nouveaux ouvrages intégrés à la base de données (à droite)

Au final, 596 ouvrages disposent d'au moins une mesure mensuelle, pour la période 2000-2019, avec des répartitions différentes selon les couches du modèle (Figure 4 et Figure 5), qui témoignent notamment de la superficie des couches concernées. Il existe davantage de mesures, mais des incertitudes demeurent sur la couche captée en raison de la méconnaissance du positionnement des crépines ou de la profondeur de l'ouvrage. De plus, les ouvrages captant plus d'une couche ont été écartés. Ce nombre total est susceptible d'évoluer suite au travail de modélisation (chapitre 3). En effet, les difficultés de calage de certaines piézométries nécessitent une révision plus fine des conditions de captage de l'ouvrage, donc de nouvelles affectations pourront être proposées.

Couche du modèle	Nb d'ouvrages avec au moins une mesure mensuelle
Couche 01	428
Couche 03	83
Couche 05	76
Couche 06	3
Couche 07	6
Total modèle	596

Figure 5 - Tableau de répartition du nombre d'ouvrages, par couche de modèle disposant d'au moins une mesure mensuelle au cours de la période 2000-2019

Seuls 55 ouvrages disposent d'au moins 15 mesures mensuelles, pour la période 2000-2019 (Figure 6). Ils sont répartis essentiellement dans la moitié nord du domaine d'étude.

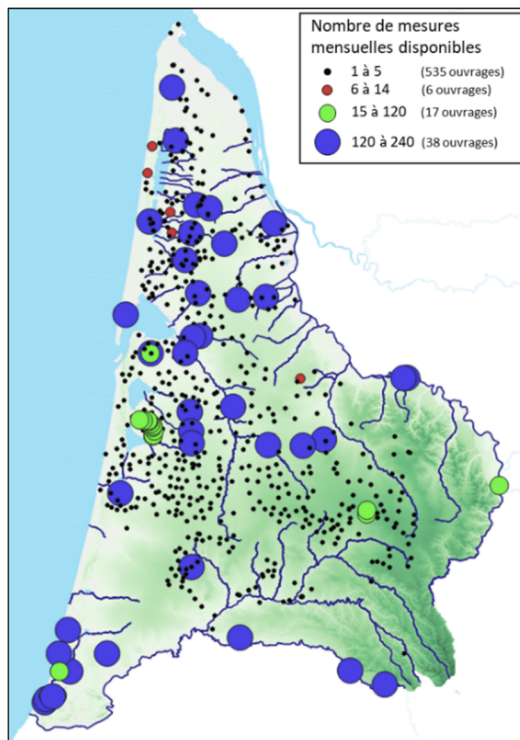


Figure 6 - Répartition des 596 ouvrages disposant d'au moins une mesure mensuelle de piézométrie pour la période 2000-2019

La répartition temporelle montre que le nombre d'ouvrages disposant d'une mesure mensuelle minimum a augmenté jusqu'en 2008, puis s'est stabilisé aux alentours de 40 depuis (Figure 7). Certaines périodes, disposant de mesures ponctuelles réalisées durant des campagnes piézométriques dédiées, permettent de disposer certains mois de plus de 100 points, avec un maximum de 243 points en octobre 2011.

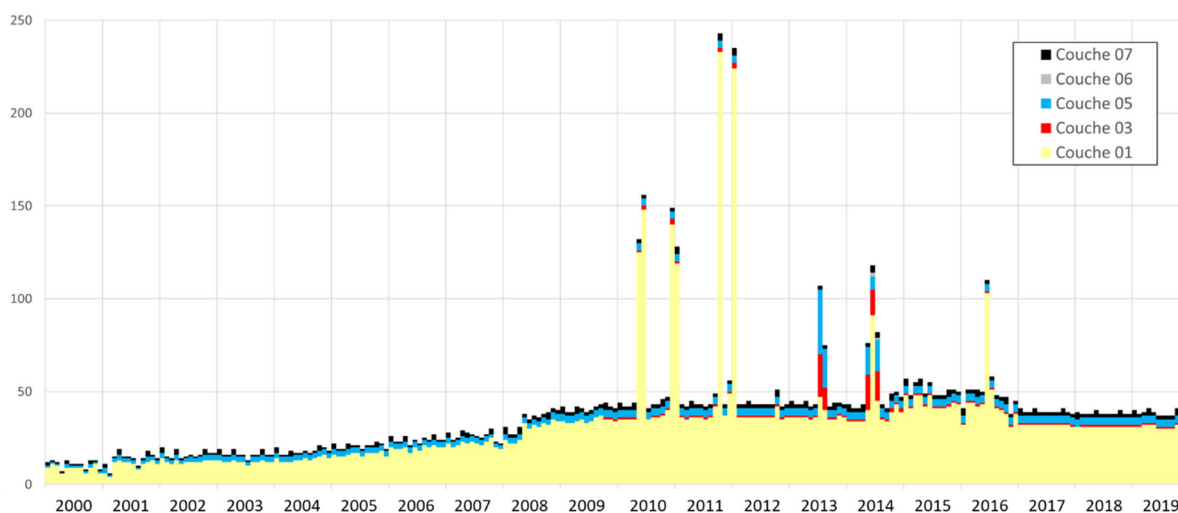


Figure 7 - Répartition temporelle du nombre d'ouvrages par couche disposant d'une mesure mensuelle

3.2. COURS D'EAU

3.2.1. Débits prélevés

Les prélèvements en eau de surface (cours d'eau, lacs et retenues artificielles) impactent les débits dans les cours d'eau, voire les niveaux dans la nappe, et doivent ainsi être pris en considération dans le modèle. Les données disponibles sont celles provenant du SIE Adour-Garonne qui référence près de 2 500 ouvrages de prélèvement d'eau de surface, au cours de la période 2000-2019.

Les 920 retenues artificielles du territoire modélisé (Figure 8) se situent principalement en bordure de domaine plio-quaternaire (sur le bassin versant de l'Adour et entre le Ciron et la Garonne). Identifiables dans les fichiers de l'Agence de l'Eau, ces retenues n'ont pas été prises en compte en raison de la difficulté de leur localisation, de la méconnaissance du type de prélèvement, de leur fonctionnement (retenue collinaire, bassine, lac, ...) et de l'identification du cours d'eau impacté. En attendant davantage d'informations sur leur possible impact, seuls les prélèvements directs dans les cours d'eau seront considérés par la suite. 1 565 ouvrages de prélèvements en cours d'eau sont identifiés dans les fichiers de l'Agence. Toutefois, ne sont considérés pour le modèle que ceux prélevant directement dans les cours d'eau modélisés et ceux prélevant dans leur bassin versant associé. Ainsi, 762 ouvrages sont écartés. Ils concernent soit des prélèvements opérés dans des bassins versants de cours d'eau non modélisés, soit des prélèvements effectués dans les bassins versants de l'Adour et de la Garonne, constituant les limites méridionale et orientale du modèle, pour lesquels les débits ne peuvent être correctement restitués car les bassins versants ne sont pas totalement inscrits dans le modèle.

Pour les aspects de modélisation, chacun des 803 ouvrages de prélèvements de surface a été raccordé au cours d'eau le plus proche de l'emplacement indiqué dans les fichiers de l'Agence de l'Eau (Figure 8). Cela introduit deux biais :

- les coordonnées géographiques des ouvrages, fournies par l'Agence de l'Eau, correspondent au centroïde de commune pour les prélèvements agricoles. Ainsi, les prélèvements, rattachés au cours d'eau le plus proche du centroïde de la commune, peuvent être en réalité effectués sur un autre bassin versant, quand la commune se situe sur 2 bassins versants distincts ;
- la projection du point de prélèvement sur le cours d'eau se fait par proximité géographique et non par la prise en considération de l'endroit où l'affluent sur lequel s'effectue le prélèvement rejoint le cours d'eau modélisé. Ainsi, la partie du cours d'eau impactée par le prélèvement n'est pas forcément exacte.

Dans les territoires des SAGE Leyre et Born-et-Buch, les prélèvements de surface, peu nombreux, ont fait l'objet d'une attention particulière car un calage fin du modèle est attendu. La localisation des points de prélèvements se veut ainsi plus précise.

Les territoires les plus impactés par les prélèvements en cours d'eau sont ceux du bassin versant de l'Adour et les cours d'eau du Ciron et de l'Avance, où les volumes agricoles sont très importants. Pour améliorer la restitution des débits des cours d'eau de ces territoires, une connaissance plus fine de la localisation des ouvrages de prélèvements est attendue. En dehors de ces territoires, les cours d'eau restent globalement peu affectés par les prélèvements directs.

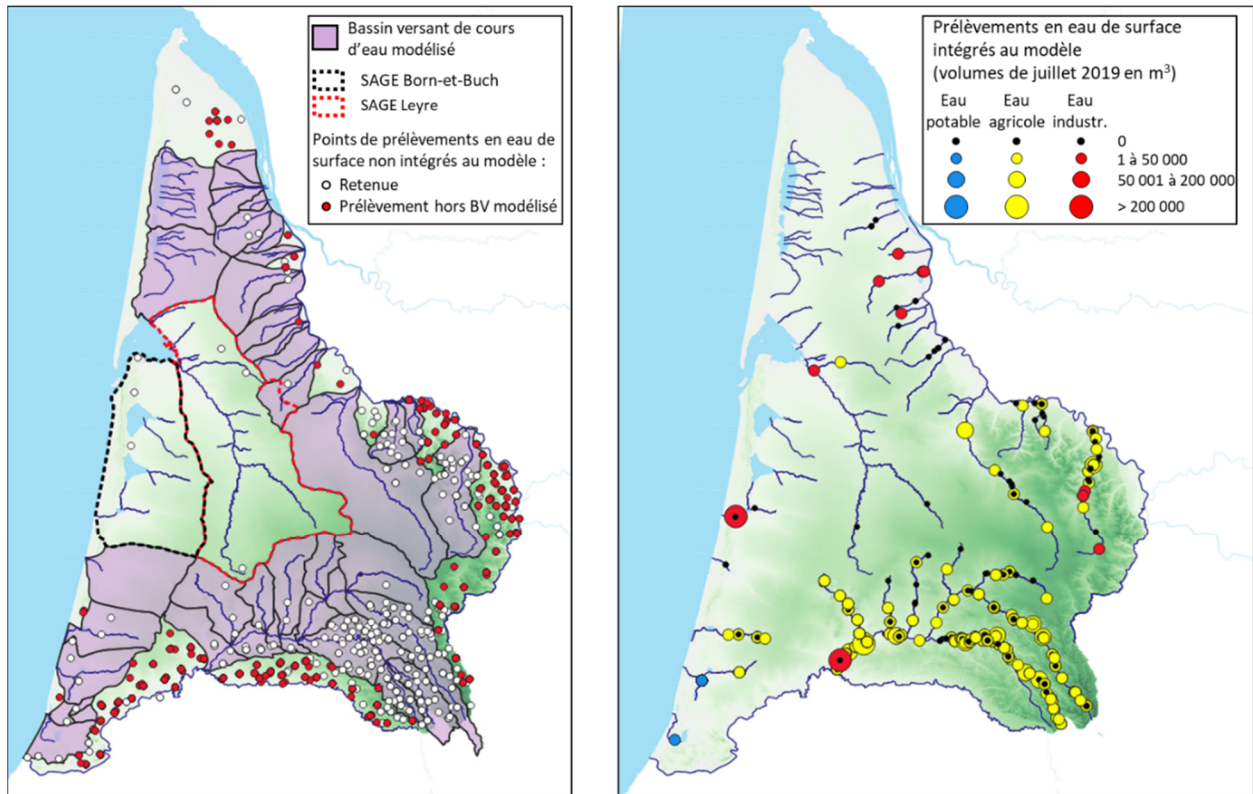


Figure 8 - Localisation des points de prélèvements en eau de surface (à gauche : non intégrés au modèle ; à droite : intégrés au modèle avec les volumes de juillet 2019, par usage)

Les chroniques de prélèvements annuels des 803 ouvrages ont été reconstituées à partir des données de redevance de l'Agence de l'Eau. Ces données commençant en 2003, une rétroaction a été effectuée entre 2000 et 2002, reprenant les volumes de 2003. Sur l'ensemble du territoire, les prélèvements industriels sont les plus importants, notamment pour les besoins des papeteries de Gascogne à Mimizan (10 Mm³/an) ou encore SMURFIT KAPPA dans le cours d'eau à Biganos (> 8 Mm³/an). En dehors des prélèvements de SMURFIT KAPPA, pour lesquels l'exploitant a transmis une partie des relevés mensuels (période 2009-2019), les prélèvements annuels pour les usages industriels et d'eau potable ont été divisés par douze, pour une reconstitution mensuelle (Figure 9). Les prélèvements en eau de surface, pour les besoins agricoles, sont très importants dans le territoire, même s'ils ont été divisés par deux en 20 ans (de 23 Mm³ en 2000 à 11 Mm³ en 2019).

À l'instar des prélèvements en eau souterraine, les prélèvements dans les eaux de surface pour l'activité agricole sont ventilés entre juin et septembre : juin (5 %), juillet (45 %), août (45 %) et septembre (5 %). Il apparaît, dès lors, que les prélèvements agricoles en eau de surface sont très importants lors de la survenue des basses eaux et concentrent donc les pressions sur les milieux de surface, au cours de la période estivale.

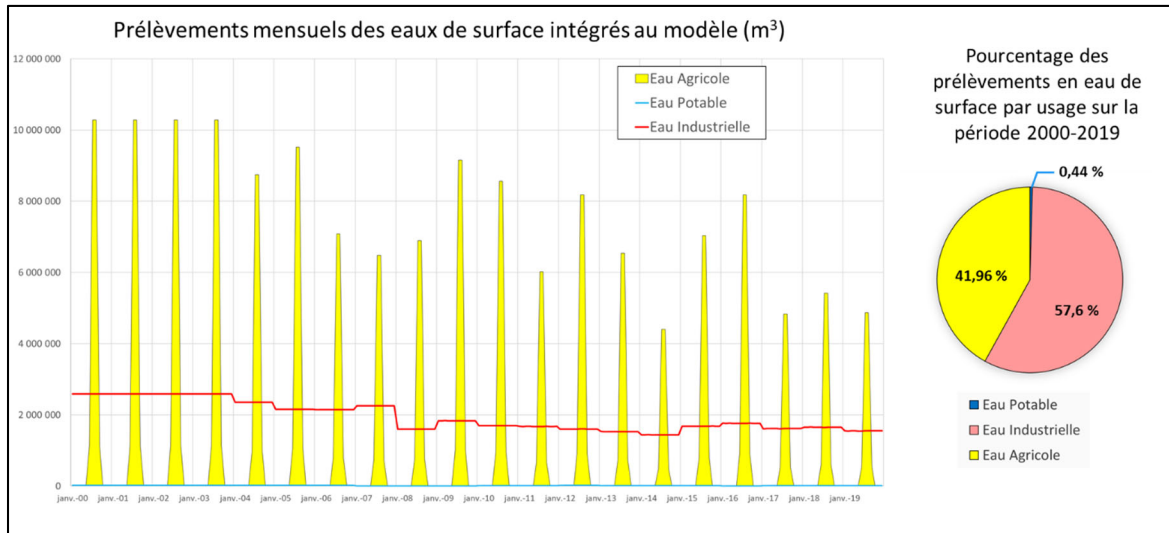


Figure 9 - Chronique des prélèvements mensuels en eau de surface, intégrés au modèle, et représentation des prélèvements par usage

3.2.2. Rejets en cours d'eau

Les stations d'épuration des eaux domestiques ont été recensées à partir des données disponibles dans le SIE Adour-Garonne. 341 STEP ont été identifiées au sein de la zone modélisée (Figure 10). Pour 65 d'entre elles, le milieu de rejet est de type « infiltration », et pour 177, les cours d'eau utilisés pour le rejet ne sont pas modélisés. Ainsi, 99 STEP ont été retenues et leurs débits associés sont injectés dans les cours d'eau modélisés correspondants.

Les volumes de rejets industriels n'étant pas disponibles directement dans le SIE Adour-Garonne, un travail supplémentaire devra être mené dans la suite des travaux pour les connaître.

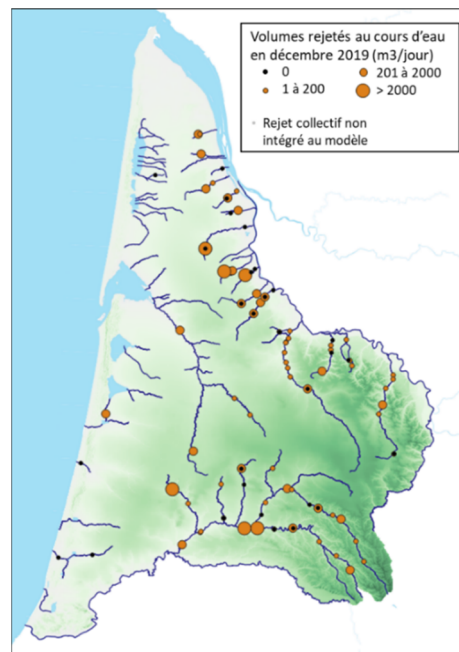


Figure 10 - Localisation des STEP et volumes rejetés dans les cours d'eau en décembre 2019

3.2.3. Débits observés

Dans l'emprise du territoire modélisé, 154 stations de jaugeages sont identifiées et bénéficient d'au moins une valeur de débit pour la période 2000-2019 (Figure 11). Ces mesures de débit proviennent de la base nationale Hydroportail et de la synthèse des données bibliographiques, réalisée lors des travaux effectués notamment dans le cadre de la Convention Régionale sur les Eaux Souterraines et complétée, au cours du temps, par l'appui de partenaires institutionnels (animateurs de SAGEs, syndicats d'eau, universitaires, ...).

Les stations disposant des suivis les plus importants et réguliers sont celles issues d'Hydroportail : elles sont en majorité complètes pour la période modélisée. Les données récupérées correspondent alors à la moyenne mensuelle. Les données issues de la bibliographie correspondent davantage à des mesures ponctuelles, provenant de campagnes ciblées lors des hautes eaux ou basses eaux. Afin de pouvoir les intégrer au modèle, ces données ponctuelles journalières ont été assimilées à la moyenne mensuelle.

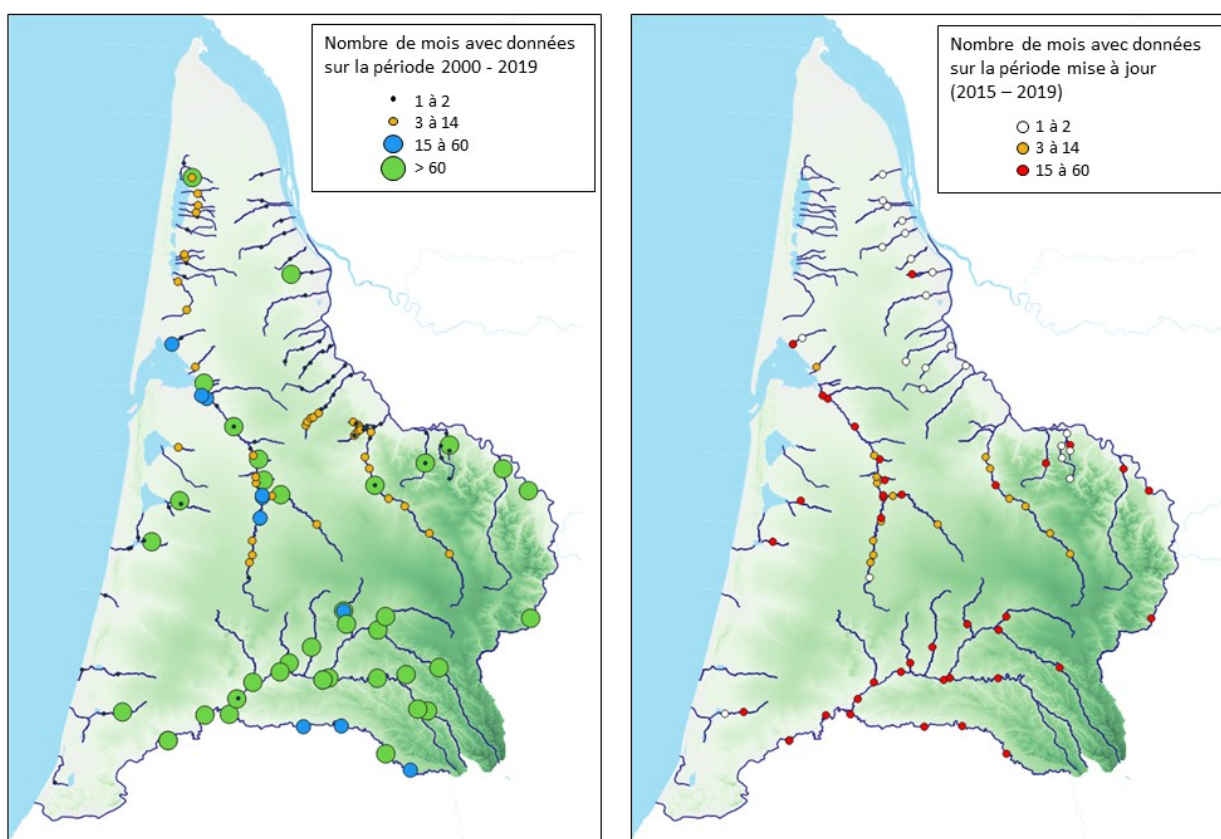


Figure 11 - Localisation des stations hydrométriques et nombre de mois disposant de valeurs de débits (à gauche : pour l'ensemble de la période modélisée (2000-2019) ; à droite : pour la période de mise à jour (2015-2019))

La mise à jour entre 2015 et 2019 a permis d'intégrer des jaugeages ponctuels, réalisés entre 2016 et 2018, sur le territoire des SAGE Estuaire et Vallée de la Garonne (Barrière et Saltel, 2017 ; Barrière, 2019). Les SAGE Ciron et SAGE Leyre, cours d'eau côtiers et milieux associés avaient inscrit, dans leurs Plans d'Aménagement et de Gestion Durable, des dispositions visant à approfondir les connaissances des réseaux superficiels et des nappes plio-quaternaires. Ils ont ainsi engagé, en 2018 et 2019, une étude spécifique au cours de laquelle des jaugeages ponctuels et des suivis continus ont été réalisés (ANTEAGroup, 2019). Ces données ont été

recupérées pour alimenter le modèle mio-plio-quaternaire. Enfin, des suivis de débits de cours d'eau, réalisés pour le compte du Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon, ont été mis à disposition. Ces informations, répertoriées dans le cadre du projet MOHYS (Douez et Cagnimel, 2018), ont donc été utilisées pour ce modèle.

Les 10 stations relatives à des bassins versants dépassant l'extension du modèle n'ont pas été considérées pour la suite de la calibration du modèle. Les débits à ces stations, situées principalement le long de l'Adour et de la Garonne, ne peuvent en effet être retranscrits par le modèle. À l'instar de mesures piézométriques, seules les chroniques bénéficiant de plus de 15 mesures mensuelles ont été considérées : cela concerne 38 stations.

4. Poursuite du calage du modèle hydrogéologique

4.1. MODIFICATIONS FAITES SUR LA COUCHE 8, SUITE AU CALAGE PRELIMINAIRE

Suite au calage préliminaire (voir chapitre 2), il a été remarqué que les écarts les plus importants entre les observations et les résultats du modèle semblaient résulter des charges imposées au niveau de la couche 8.

Pour rappel, la géométrie du modèle mio-plio-quaternaire a été construite en lien avec le modèle MONA-v4, en cours de développement. L'objectif du modèle mio-plio-quaternaire est de simuler les écoulements dans les aquifères superficiels et de bénéficier des résultats du MONA pour contraindre notamment la dernière couche, correspondant aux formations aquifères les plus profondes (Helvétien à Oligocène, en particulier) et ce, afin de rendre compte au mieux des échanges verticaux. La difficulté principale vient du fait que les charges calculées ne sont seulement disponibles que dans la version antérieure du MONA (v3), pour laquelle la géométrie est différente de la dernière version (v4). La prise en compte d'une géométrie et d'un champ de charge, issus de modèles différents, entraînent donc des biais importants notés dans Cabaret et al. (2019), auxquels il convient de remédier.

À noter également que pour le calage préliminaire, le champ de charge considéré pour la couche 8 était fixe au cours du temps, en première approche. Même s'il est difficile d'estimer les conséquences de ce choix lorsque les nappes, s'établissant au sein de ces formations, sont captives, la prise en compte de la variabilité dans le temps de ces charges est nécessaire lorsque les nappes sont libres, afin de retranscrire les évolutions des charges et des débits induits par la variabilité climatique.

Les modifications suivantes ont donc été faites, en lien avec la couche 8 :

1/ Dans la mesure où il n'existe, à l'heure actuelle, aucune charge calculée dans les aquifères présents au sein de la couche 8, aucune condition de charge imposée n'y est appliquée en régime transitoire ; les charges y seront donc calculées comme dans les autres couches du modèle (le mur de la couche 8 est donc une limite à flux nul). Ces calculs permettront de mieux approcher les charges et les débits aux rivières, mesurés au droit des affleurements de ces couches (lorsque les nappes y sont libres). La limite de ces calculs, au sein de la couche 8, concerne la bonne retranscription des échanges entre les aquifères profonds du secteur et les aquifères du Mio-Plio-Quaternaire. La bonne retranscription de ces échanges était d'ailleurs la raison pour laquelle il était souhaitable d'imposer des charges calculées par le MONA dans la couche 8.

2/ On rappelle que la couche 8 est un agglomérat de formations aquifères et aquitards. Sa perméabilité (équivalente) avant calage est estimée à partir des épaisseurs des différentes formations et d'une perméabilité homogène, de 10^{-4} m/s pour les formations aquifères et de 10^{-9} m/s pour les formations aquitards (moyenne pondérée). Afin d'éviter des échanges trop importants entre cette couche 8 et les formations sus-jacentes, lorsqu'une formation éponte (éponte du sommet de l'Aquitainien ou éponte Chattien-Miocène) est située au sommet de la couche 8, une anisotropie verticale a également été appliquée (fixée à 10^{-5} avant la calibration). Puisque les propriétés affectées à cette couche 8 sont des propriétés équivalentes aux 3 formations aquifères de l'Helvétien / Aquitainien / Oligocène et des épontes intercalées, les charges mesurées ne peuvent être utilisées pour calibrer le modèle.

4.2. PROCEDURE SUIVIE POUR LA CALIBRATION

Le modèle construit contient différents degrés de liberté, sur lesquels il est possible d'agir, dans des proportions raisonnables, pour que le modèle puisse retranscrire au mieux les observations de terrain, qu'elles soient relatives aux charges hydrauliques ou bien aux débits des cours d'eau, dont les plus importantes sont les suivantes :

- paramètres hydrodynamiques des aquifères : perméabilités, coefficients d'emmagasinement ;
- paramètres du bilan hydroclimatique (3 paramètres : 1 jouant principalement sur la quantité de Pluie efficace disponible et les 2 autres sur la partition Ruissellement / Infiltration) ;
- paramètre du réseau hydrographique ;
- géométrie du modèle.

Les paragraphes suivants décrivent la procédure choisie pour calibrer le modèle étant donnés ces nombreux degrés de liberté.

Les perméabilités et les coefficients d'emmagasinement sont classiquement calibrés et varient généralement dans l'espace, selon des plages de variation plus ou moins continues. Un autre levier sur lequel il est possible de jouer est l'anisotropie verticale entre couches. A noter que lorsque les nappes sont libres, les charges hydrauliques sont généralement assez rapidement peu dépendantes des propriétés hydrodynamiques (perméabilités, coefficients d'emmagasinement) de secteurs très proches : ce constat fait que lorsqu'aucune mesure piézométrique n'existe, les incertitudes concernant ces paramètres hydrodynamiques sont très importantes, voire totales, puisque leur portée est limitée et qu'ils peuvent, dans certains cas, ne pas jouer sur l'évolution des charges connues du secteur. L'approche choisie est donc la suivante : partant des paramètres du modèle initial, les paramètres sont modifiés autour des points d'observation, dans un premier temps. Ensuite, un travail d'homogénéisation de ces zones (de paramètres hydrodynamiques) est possible, en prenant en compte des informations autres que piézométriques ou débitmétriques (ex. faciès géologiques, etc.).

Des zones « de sol », c'est-à-dire des zones au sein desquelles sont définis les paramètres reliés aux bilans hydroclimatiques, ont été prédéfinies par Cabaret et al. (2019). Les paramètres associés à ces zones ont ensuite été renseignés à la lumière des résultats de modélisations globales, réalisées pour quelques bassins versants de la zone d'étude. On rappelle que les paramètres des modèles GARDENIA (Thiéry, 2015a) à transférer aux modèles maillés MARTHE (Thiéry, 2015b) sont les paramètres associés aux réservoirs « sol » (capacité de rétention du sol ~ réserve utile) et « ZNS » de GARDENIA (paramètre de répartition de l'excédent de pluie en ruissellement et infiltration, temps de demi-percolation de l'infiltration vers la nappe). Les paramètres issus des modélisations GARDENIA sont très spécifiques aux sites étudiés, rendant la paramétrisation initiale difficile. Malgré tout, un comportement « moyennement infiltrant », se retrouvant sur la quasi-totalité des bassins, semble se dégager. Dans la première version du modèle (Cabaret et al., 2019), un jeu de données homogène correspondant à ce comportement moyen a été utilisé pour la majeure partie du secteur d'étude. Un comportement très infiltrant était également attendu, notamment au niveau des systèmes dunaires. Ce qui est proposé lors de la phase de calage, présentée dans ce rapport, c'est de diminuer l'ensemble des possibles en choisissant parmi ces deux jeux de paramètres. *NB* : La variabilité spatiale des données climatiques initiales (précipitation et ETP) reste bien prise en compte.

Les caractéristiques initiales du réseau hydrographique, détaillées dans la rapport Corbier et Cabaret (2015) sont conservées. Des modifications au cas par cas pourront être faites

(notamment concernant les perméabilités du lit de la rivière, cote topographique du lit des cours d'eau), si cela est jugé nécessaire lors de la calibration.

Le dernier point est relatif à la géométrie du modèle qui peut paraître, à première vue, plus ou moins figée dans la mesure où cette dernière dépend du modèle géologique construit qui lui est unique (même si des modifications à la marge sont toujours réalisables). Des modifications impactantes sont quand même possibles sur la topographie puisque cette dernière est interpolée au pas de 500 m à partir d'un MNT plus précis de 25 m. Le choix fait initialement est le suivant : les valeurs minimales du MNT 25 m ont été importées dans les mailles "rivière" et les valeurs moyennes dans les autres mailles ; ce choix permet de mieux représenter les relations nappes / rivières, au niveau de l'emplacement du réseau hydrographique considéré. Cependant, il n'est pas toujours possible de représenter, de façon exhaustive, le réseau hydrographique. Dans des secteurs où le réseau de drainage est important, contraignant alors les charges hydrauliques, le minimum du MNT 25 m peut permettre de mieux modéliser ces charges hydrauliques : c'est typiquement le cas du secteur d'étude où existent de multiples crastes, qui ont été aménagées pour drainer les landes et qui ont donc un rôle majeur sur les niveaux des nappes subaffleurantes. A noter également que, dans certains secteurs, il existe un très faible relief nécessitant une prise en compte précise de ce dernier. Afin d'identifier les secteurs pour lesquels ce phénomène se produit, deux scénarios extrêmes (deux types de simulations) ont été considérés : l'un pour lequel la topographie a été prise en tout point égale au minimum du MNT et l'autre où ce choix n'a été fait que pour les mailles "rivière". Le modèle calibré au final sera un panaché de ces deux scénarios.

4.3. EVALUATION DE LA CALIBRATION

La zone d'étude a été divisée en 5 secteurs géographiques listés ci-dessous et cartographiés à la figure 12 :

- **zone SAGE Leyre**, correspondant au périmètre de ce SAGE. Ce territoire est à cheval entre le Pays de Buch et la Grande Lande.
- **zone SAGE Born-et-Buch**, correspondant au périmètre de ce SAGE. Ce territoire est à cheval entre le Pays de Buch et le Pays de Born ;
- **zone Nord**, correspondant au Médoc viticole, ainsi qu'aux Landes du Médoc et de Bordeaux. Dans cette zone, sont inscrits les périmètres des SAGE Estuaire et Lacs Médocains ;
- **zone Est et Sud-Est**, correspondant à la Haute Lande Girondine, aux Graves, au Marmandais, aux Landes du Lot-et-Garonne, aux Petites Landes, à la partie gersoise du modèle (Bas-Armagnac) et à une partie de la Grande Lande. Dans cette zone, sont inscrits les périmètres des SAGE Ciron et Midouze et une partie du SAGE Vallée de la Garonne ;
- **zone Sud**, correspondant au sud des Petites Landes, aux Landes de Dax, au sud du Pays de Born, au Marensin, à la Maremne et au Seignanx.

Les chroniques piézométriques et débitmétriques sont utilisées pour mener à bien la calibration du modèle. Pour tous les secteurs, des fiches sont ainsi produites permettant de juger visuellement de la qualité du calage par comparaison des chroniques simulées (en orange) et observées (en bleu). Des critères statistiques ont également été utilisés pour aider à faire cette comparaison : RMSE (*racine carrée de l'écart quadratique moyen*) normé ou non / coefficient de Nash-Sutcliffe (*ratio de l'écart quadratique moyen sur la variance des observations*) avec ou sans biais. À noter que le calcul de ces indicateurs n'est pas trivial, dans la mesure où les valeurs observées et simulées ne sont pas forcément simultanées. Un léger décalage est alors possible et peut jouer sur les valeurs des critères statistiques, qui ne doivent pas être regardées seules.

À noter également que lorsque les chroniques sont courtes, voire constituées de quelques données, la comparaison sous cet angle temporel, chronique par chronique, est assez limitée : il est en effet possible de juger d'un décalage absolu (détection d'un biais), mais difficile de juger si la dynamique souterraine est bien retranscrite par le modèle. Les fiches sont donc produites seulement pour les chroniques disposant d'au moins 15 mesures au cours de la période d'observation (ce qui correspond à un peu plus d'une année de mesure, sans quoi la dynamique temporelle est difficile à saisir). Néanmoins, ce choix exclut bon nombre de points de mesure, notamment ceux relevés très ponctuellement lors des campagnes piézométriques. Nous proposons donc, pour les deux secteurs dans lesquels la calibration s'est particulièrement focalisée (SAGE Born-et-Buch et SAGE Leyre), un diagramme de dispersion des charges piézométriques (représentant les charges calculées vs. les charges observées), permettant ainsi de vérifier le respect des gradients piézométriques à l'échelle de ces secteurs.

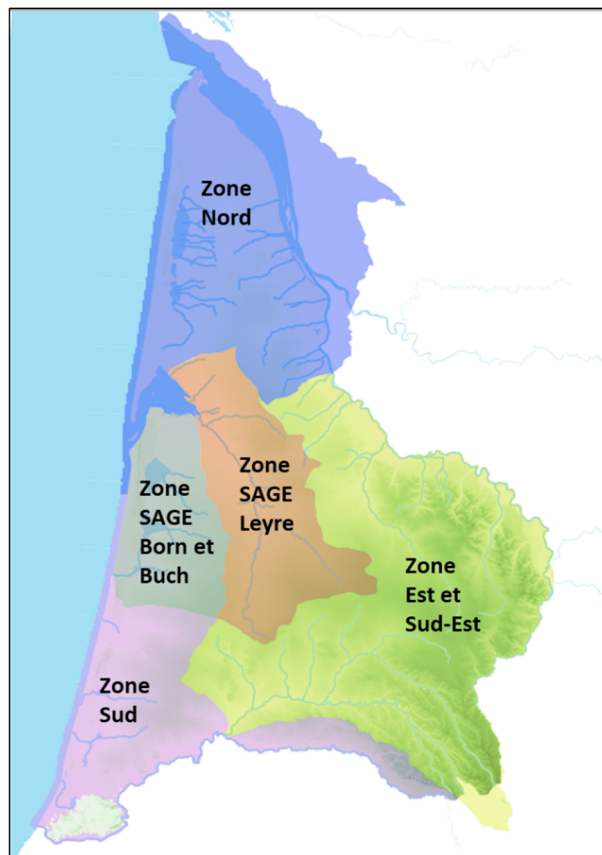


Figure 12 - Secteurs géographiques utilisés pour la présentation des résultats de calibration

4.4. RESULTATS DE LA CALIBRATION

Dans cette section, les résultats de la calibration et les principaux choix de modélisation sont décrits secteur par secteur. Un travail plus important a été réalisé pour les deux premiers secteurs, en raison de la meilleure qualité des données disponibles. La discussion se fait, dans la mesure du possible, à l'échelle du point d'observation, de manière à pouvoir expliquer localement le comportement du modèle et à pouvoir évaluer une éventuelle homogénéité de comportements entre ouvrages.

4.4.1. SAGE Leyre

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à la Figure 13.]

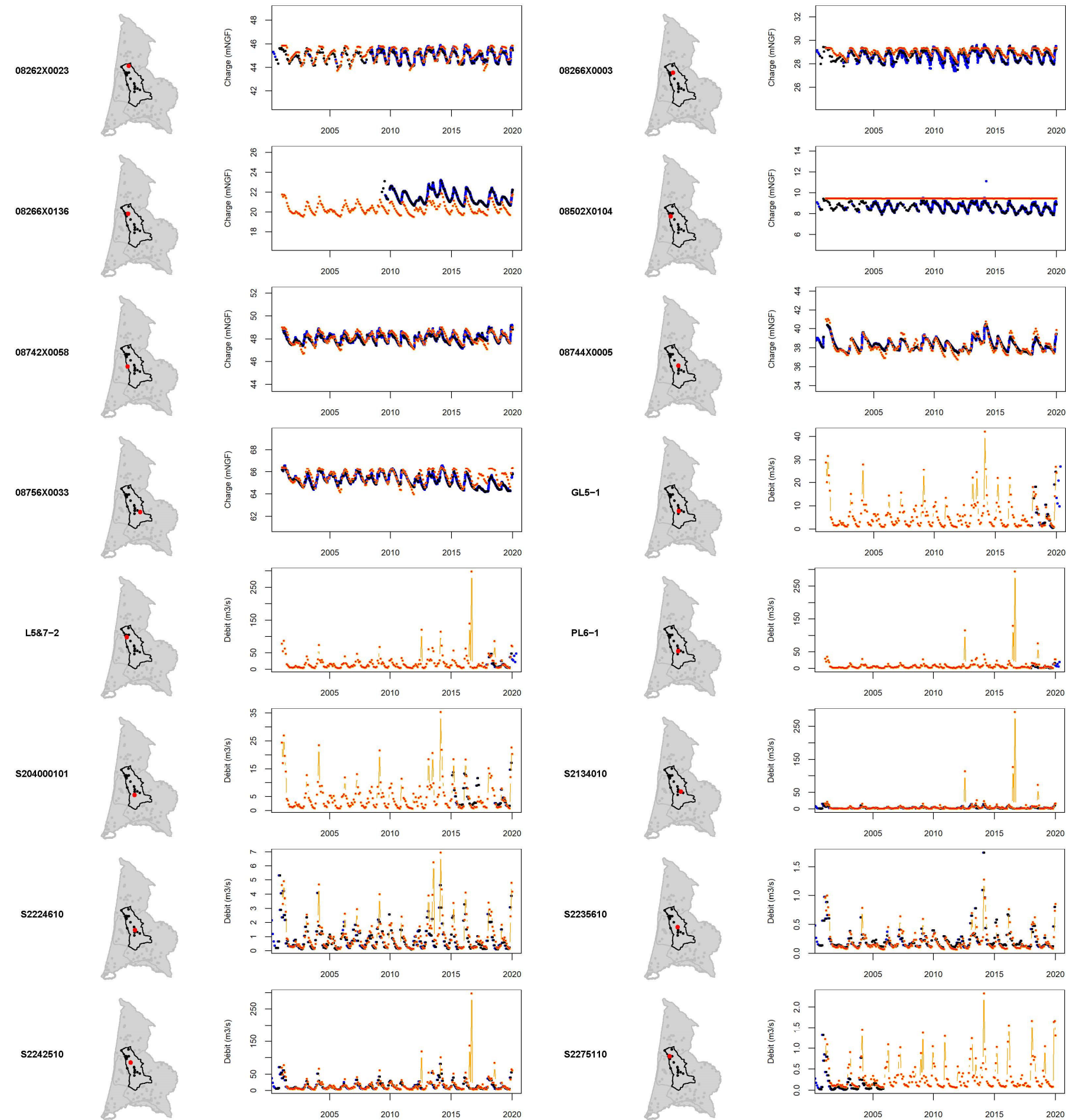
La partie nord du périmètre du SAGE Leyre correspond aux bassins versants des cours d'eau côtiers du bassin d'Arcachon. Ce territoire est souvent caractérisé par un réseau de drainage important de la nappe, d'où l'utilisation du minimum du MNT 25 m comme topographie du modèle dans ce secteur.

Les charges mesurées à l'ouvrage 08262X0023 montrent l'importance du réseau de drainage, constituant une limite de débordement stable en hautes eaux (la topographie du modèle au droit de la maille de cet ouvrage a été fixée à cette valeur de débordement). De même, les battements annuels observés ici (dus notamment aux prélèvements estivaux dans le secteur) sont bien retranscrits par le modèle. Les mesures de débit à la station S2275110 (le Tagon à Biganos) sont quant à elles retranscrites de façon acceptable pour la durée d'observation disponible (2000-2006). À noter que les débits semblent légèrement surestimés par le modèle, ce qui pourrait s'expliquer par la non-prise en compte de cours d'eau proches pour lesquels les débits seraient affectés, par défaut, au cours d'eau explicitement pris en compte dans le modèle. L'ouvrage 08266X0136, situé à 300 m de la crête de Tagon, montre des charges observées qui sont plus hautes que les charges simulées, mais des variations très bien retranscrites par le modèle (Nash, sans biais, très correct à 0.7). Il existe toutefois une différence, entre le MNT 25 m et l'altitude prise en compte, pour estimer les niveaux à ce point (respectivement entre 23 et 24 m NGF dans la maille considérée vs. 26 m NGF), du même ordre de grandeur que le RMSE observé (~1.2 m) qui pourrait éventuellement expliquer cette observation par une imprécision de nivellement. Juste à côté, l'ouvrage 08266X0003 montre une dynamique différente qui reste très correctement reproduite par le modèle ; on note toutefois l'effet de pompages en ce point ou très proches, mais aucun prélèvement n'y est affecté dans le modèle. À noter également que la topographie du modèle a dû être modifiée localement à l'aide de la carte IGN pour mieux prendre en considération l'impact des exutoires locaux sur les charges observées.

Le reste du périmètre du SAGE Leyre est constitué du bassin versant de la Leyre. A proximité, au niveau du delta de la Leyre, les chroniques débitométriques simulées en aval de la Leyre (L5&L7-2, l'Eyre à Mios Le Teich ; SIBA07, La Leyre à Biganos) sont conformes aux observations, même si la comparaison n'a pu être faite que sur des données récentes et de durée limitée. Non loin du delta, les niveaux du point de suivi 08502X0104 ne sont pas très bien reproduits par le modèle, qui indique un débordement en ce point. Le réseau hydrographique local, non pris en compte dans le modèle, pourrait éventuellement expliquer ces observations.

Plus en amont, le débit de la Leyre mesuré à Salles (S2242510) est très correctement restitué par le modèle, pour toute la période d'observation (à la fois en débit moyen et à l'étiage). Le modèle retranscrit également très correctement les débits observés aux six autres stations bénéficiant de données dans le bassin versant : S2235610 (le ruisseau de Bouron à Belin-Béliet), S2224610 (le ruisseau de Castera à Moustey), GL5-1 (la grande Leyre au Moustey), PL6-1 (la petite Leyre au Moustey), S2134010 (la Petite Leyre à Belhade), S204000101 (l'Eyre à Pissos). Concernant la piézométrie, l'ouvrage 08742X0058, situé en limite ouest du territoire du SAGE, présente des charges observées en cohérence avec les charges simulées. Du fait du réseau de drainage dense dans cette zone, c'est logiquement la prise en compte de la topographie à partir du minimum du MNT 25 m qui a fourni les meilleurs résultats. Dans la partie centrale du bassin versant du SAGE, les niveaux piézométriques aux deux points de suivi 08744X0005 et 08756X0033 ont également pu être bien retranscrits par le modèle hydrodynamique, à la fois en valeur absolue et en dynamique.

On voit donc que le modèle hydrodynamique se comporte correctement dans ce secteur, au droit de tous les points de suivi bénéficiant de chroniques temporelles (mis à part le point de suivi 08502X0104). Pour ce secteur du SAGE Leyre, la calibration du modèle a également été faite à partir des points de mesure piézométriques bénéficiant de données plus ponctuelles (faites lors de campagnes piézométriques par exemple) par l'intermédiaire d'un diagramme de dispersion, présentant les biais (c'est-à-dire la différence entre la moyenne des résultats de simulation et des observations, pour chacun des points de mesure ponctuelles). L'idée est d'utiliser ces points de mesures ponctuelles pour vérifier que la carte piézométrique, à l'échelle du secteur, est bien retranscrite par le modèle, les mesures ponctuelles ne permettant pas vraiment d'évaluer la dynamique d'évolution des niveaux. Pour ce premier calage, l'approche adoptée a consisté à identifier les points d'observations s'éloignant trop d'un biais nul (cas idéal), au-delà de 5 m de différence, pour identifier les raisons de ces biais et les corriger : à noter que ce décalage-limite peut paraître important à première vue, mais il permet d'identifier les biais réellement anormaux. Les incertitudes à propos des données de base (mesures, nivellement) et les décalages possibles entre la date de la mesure et les dates de réalisation des calculs (1 fois par mois) font que des écarts incompressibles sont possibles entre simulations et observations ponctuelles. De plus, les paramètres du modèle, en particulier hydrodynamiques, peuvent être modifiés pour diminuer les biais identifiés. Toutefois, lorsque très peu de mesures sont disponibles, pour un point de mesure, il est difficile d'identifier d'où viennent les différences observées (niveaux absolus et / ou battements mal estimés).



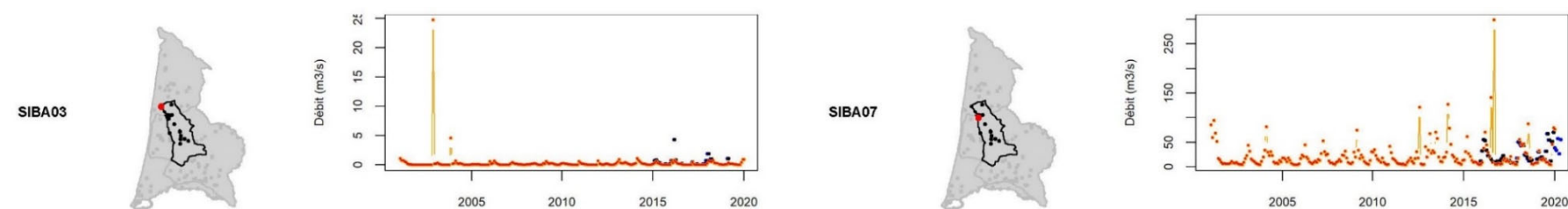


Figure 13 - Comparaison : simulations vs. observations, pour le secteur du SAGE Leyre [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs]

La figure 14 montre le diagramme de dispersion, après calibration. On voit qu'un seul point de suivi reste anormal (08508X0108). Ce point, dont les niveaux ont été relevés lors d'une campagne piézométrique, montre des niveaux très bas par rapport aux charges simulées, quelles que soient les configurations de modèle testées. Il serait nécessaire de s'assurer de la validité de cette mesure ponctuelle avant d'aller plus loin dans la modification du modèle hydrodynamique.

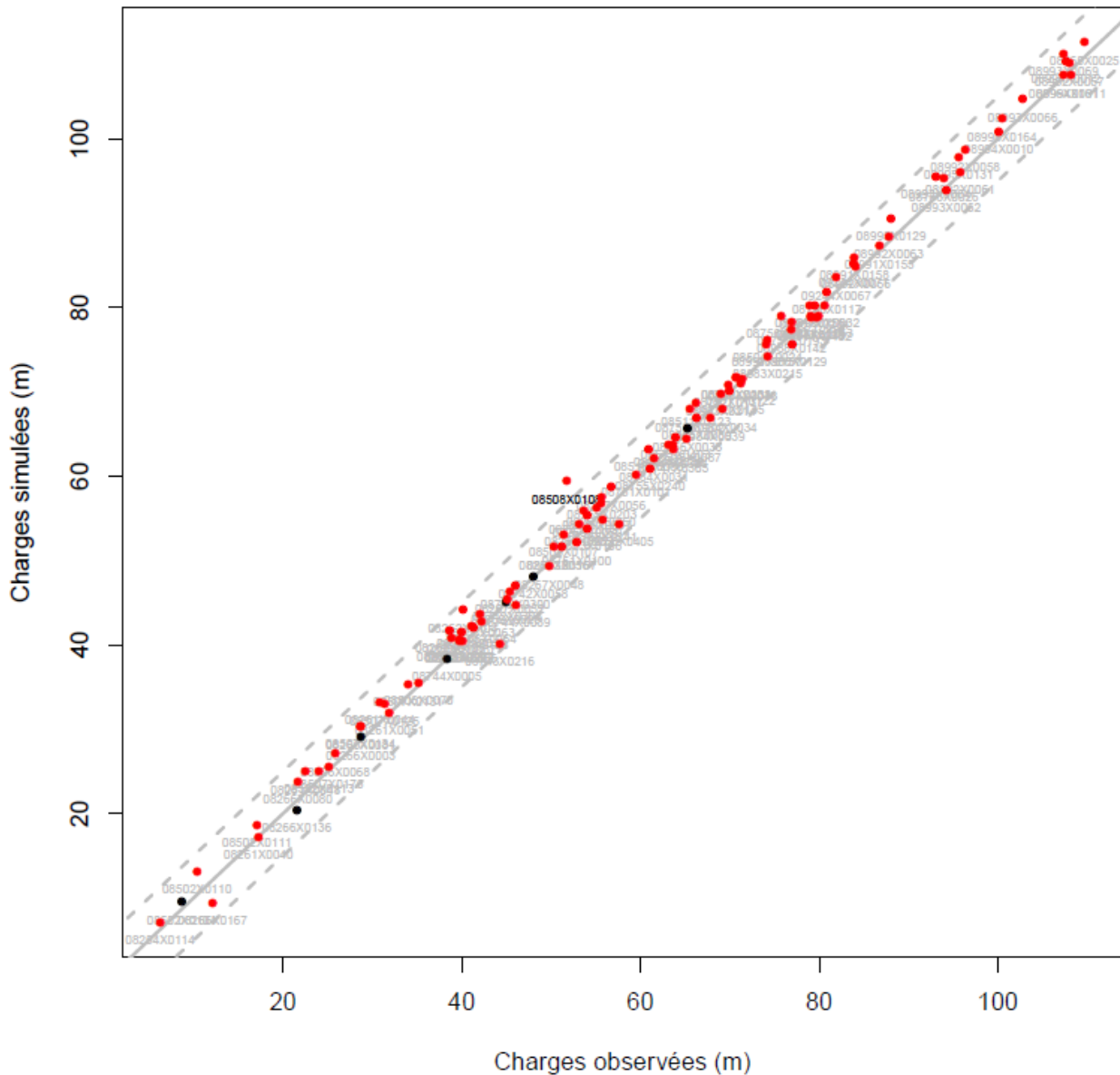


Figure 14 - Diagramme de dispersion des biais : charges moyennes observées vs. charges moyennes simulées, pour chacun des ouvrages du secteur du SAGE Leyre [Les points rouges correspondent aux points bénéficiant de moins de 15 données mensuelles ; les points noirs sont les ouvrages dont les chroniques ont été analysées ; la droite grise pleine correspond à la droite de distribution théorique des points ; les droites grises en pointillés sont les écarts à la droite théorique ± 5 m]

4.4.2. SAGE Born-et-Buch

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à la Figure 15.]

Le périmètre du SAGE est situé juste à l'ouest du SAGE Leyre et correspond aux bassins versants des lacs de Cazaux-Sanguinet, de Parentis-Biscarosse, du petit étang de Biscarosse et de l'étang d'Aureilhan.

A l'aval de ce périmètre, trois ouvrages très proches (08494X0126, 08494X0077 et 08494X0127) montrent des charges différenciées (environ 6 m de différence de charges entre le premier et les deux autres). L'ouvrage 08494X0126 capte les formations les plus superficielles (profondeur des crépines entre 15,5 et 19,5 m de profondeur, identifié comme la formation d'Onesse) et sa chronique montre des niveaux piézométriques très réactifs, avec un niveau de base assez marqué autour de 12,5 - 13 m NGF. Il est possible que cela traduise un lien important avec le réseau hydrographique de surface (le canal des Landes est tout proche, à ~150 m, mais sa connexion avec la nappe superficielle captée n'est pas connue). Une autre possibilité expliquant cette dynamique pourrait être une anisotropie verticale de la perméabilité, avec un substratum local autour du niveau de base observé (nappe perchée), mais le fait que les crépines soient situées sous ce niveau de base semble exclure cette seconde hypothèse.

Les ouvrages 08494X0077 et 08494X0127 captent des niveaux sableux plus profonds (identifiés comme la formation d'Arengosse) qui semblent, au regard de la différence de charge mesurée avec les niveaux plus superficiels, très déconnectés de ces derniers : le modèle hydrodynamique original ne contient toutefois aucun niveau semi-perméable entre les formations d'Onesse et d'Arengosse ce qui explique l'incapacité de ce dernier à modéliser la différence de charge observée (Figure 15). Ce secteur a été discuté dans le cadre du projet MOHYS par Cabaret et al. (2022), qui a permis d'identifier un toit argileux voire ligniteux entre les formations d'Onesse et d'Arengosse (Cabaret et al., 2022). L'extension minimale évaluée lors de cette étude a été intégrée dans une version alternative du modèle, pour limiter très fortement les connexions entre les deux couches 3 et 5 : les charges calculées par cette simulation alternative, dans les ouvrages 08494X0077 et 08494X0127, sont fournies à la Figure 16 ; elles diffèrent bien de celles de la Figure 15 (simulation sans lentille argileuse), mais cette différence est relativement faible et au contraire des observations, les simulations avec présence d'une lentille argileuse montrent des charges plus importantes dans la formation d'Arengosse que dans les formations superficielles. En effet, la présence seule d'un toit peu perméable entre les deux formations ciblées ne conduit pas forcément à une différence de charge similaire à celle observée : il faut également que les zones d'alimentation ou bien d'exutoires de la formation d'Arengosse, au-delà de la lentille argileuse, permettent l'établissement de charges plus basses, ce qui ne semble pas le cas avec l'extension actuelle du toit argileux. Rajoutons également que des variations annuelles non négligeables (de l'ordre du mètre) sont clairement visibles sur les chroniques piézométriques associées aux ouvrages 08494X0077 et 08494X0127 : même si la nappe captée ici est captive, il semble qu'une alimentation liée aux précipitations se produise non loin de ces points de suivi. En résumé, une meilleure compréhension et une conceptualisation du fonctionnement local du secteur semblent nécessaires avant d'aller plus loin dans la modification du modèle.

Au centre du territoire du SAGE, les différents piézomètres TIGF, affichant des données entre fin 2014 et fin 2016, permettent de tester le modèle sur une zone assez conséquente. Dans cette zone bénéficiant d'un réseau de drainage important, non explicitement pris en compte dans le modèle, la topographie y a été imposée au minimum du MNT 25 m, ce qui permet une bonne adéquation entre observations et simulations.

Plus en amont du territoire, à l'est de l'étang de Parentis-Biscarosse, les charges à l'ouvrage 08746X0031 sont bien retranscrites par le modèle. A noter que sans tenir compte des

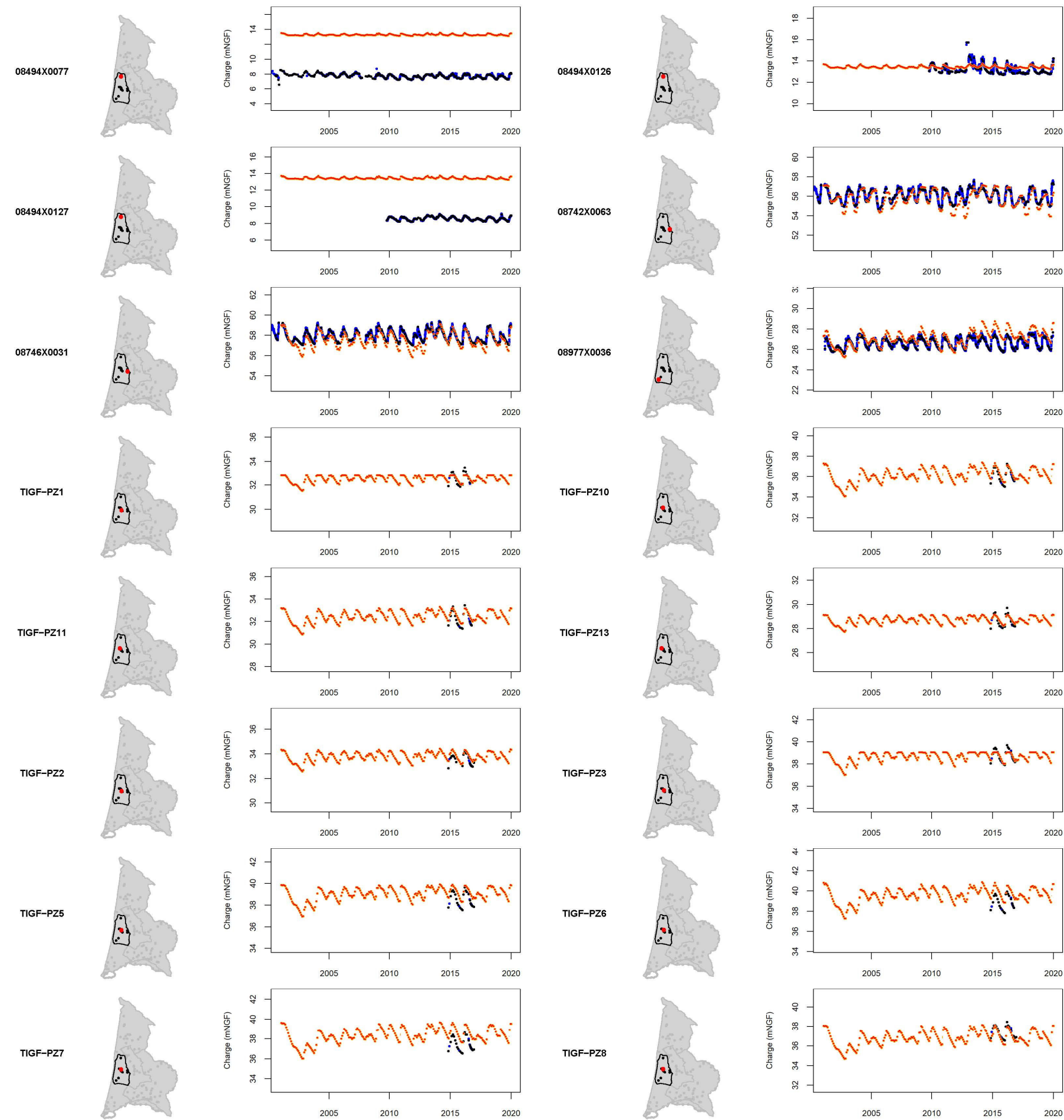
prélèvements autour de l'ouvrage, les résultats du modèle sont encore meilleurs. Il est alors probable que l'affectation des volumes prélevés dans le secteur soit légèrement différente de celle considérée dans le modèle.

Non loin de là, les charges de l'ouvrage 08742X0063, montrant une influence des pompages importante, sont plutôt bien reproduites par le modèle. L'inertie de la nappe semble surestimée par le modèle, indiquant vraisemblablement une hétérogénéité verticale qui n'est pas entièrement prise en compte par le modèle. À noter que par rapport à la version initiale du modèle, l'inertie a déjà pu être diminuée en augmentant légèrement l'extension du toit semi-perméable de la formation d'Onesse, qui était déjà présent dans le modèle au droit de ce point d'observation (plus exactement une anisotropie de perméabilité a été affectée localement à la formation d'Onesse).

Le modèle donne également des résultats très corrects au droit de l'ouvrage 08977X0036, situé en limite sud du territoire du SAGE. Seule l'inertie de la nappe est un peu surestimée du fait de la non prise en compte, dans le modèle, de certains cours d'eau (en l'occurrence le ruisseau de Notre-Dame et le ruisseau de Robichon) diminuant *de facto* la densité de drainage, voire d'une hétérogénéité verticale.

Les débits observés au droit des stations S3214010 (le ruisseau de Canteloup à Saint-Paul-en-Born, en amont du Lac d'Aureilhan) et S3124310 (le ruisseau des Forges à Parentis-en-Born, en amont de l'étang de Parentis-Biscarosse) sont correctement reproduits par le modèle, mais on peut tout de même noter la surestimation, par le modèle, des débits à l'étiage au niveau de la station S3124310.

Comme pour le territoire du SAGE Leyre, un diagramme de dispersion présentant les biais a été produit, de sorte à intégrer le maximum de données piézométriques pour la calibration du modèle. Le diagramme construit pour ce territoire du SAGE Born-et-Buch est présenté à la figure 17. On voit que les points de suivi discutés précédemment, au droit de La Teste-de-Buch, sont anormaux. En plus de ces points, trois autres ouvrages (08737X0047, 08973X0047 et 08497X0092) présentent des charges simulées différentes de la piézométrie mesurée : ces trois points sont situés dans des secteurs dunaires (et un très proche de la limite océanique) et sujets à une hétérogénéité verticale que le modèle n'est pas capable de bien reproduire (on rappelle que la couche 1 du modèle regroupe les formations allant des dunes jusqu'à la formation de Belin).



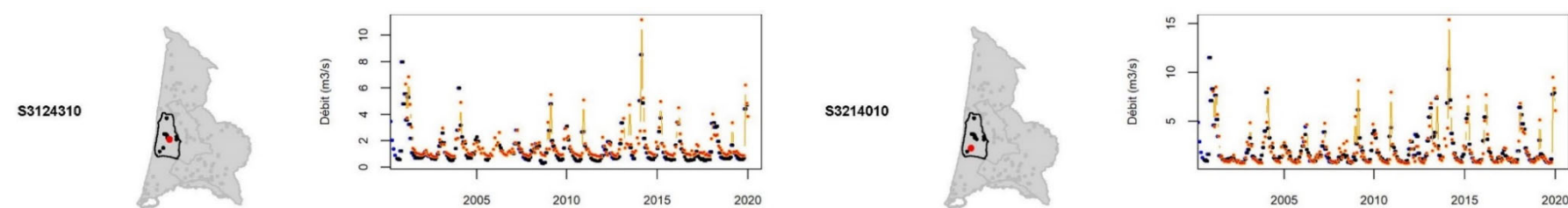


Figure 15 - Comparaison : simulations vs. observations pour le secteur du SAGE Born-et-Buch [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs]

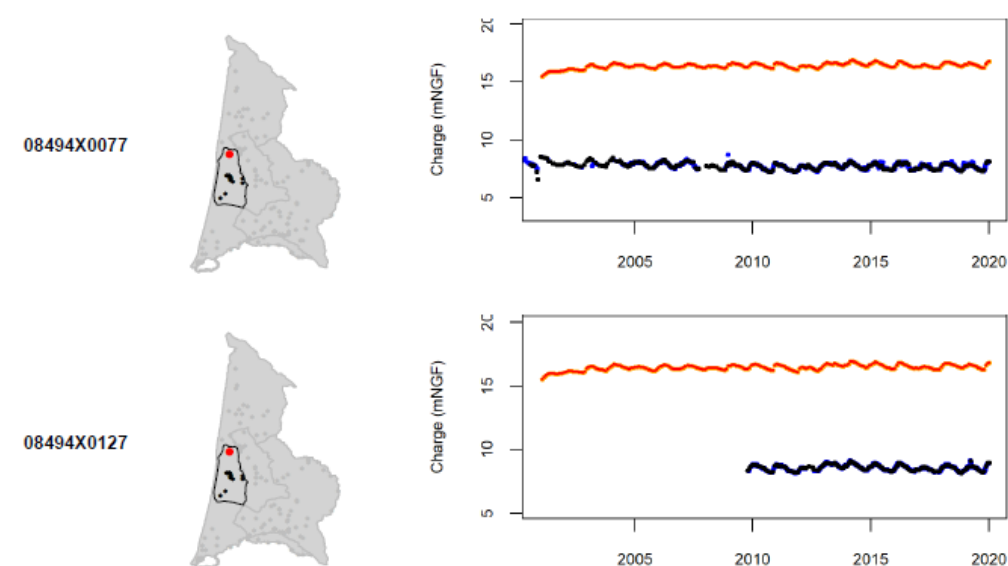


Figure 16 - Résultats de la simulation alternative avec lentille argileuse, au droit des ouvrages 08494X0077 et 08494X0127

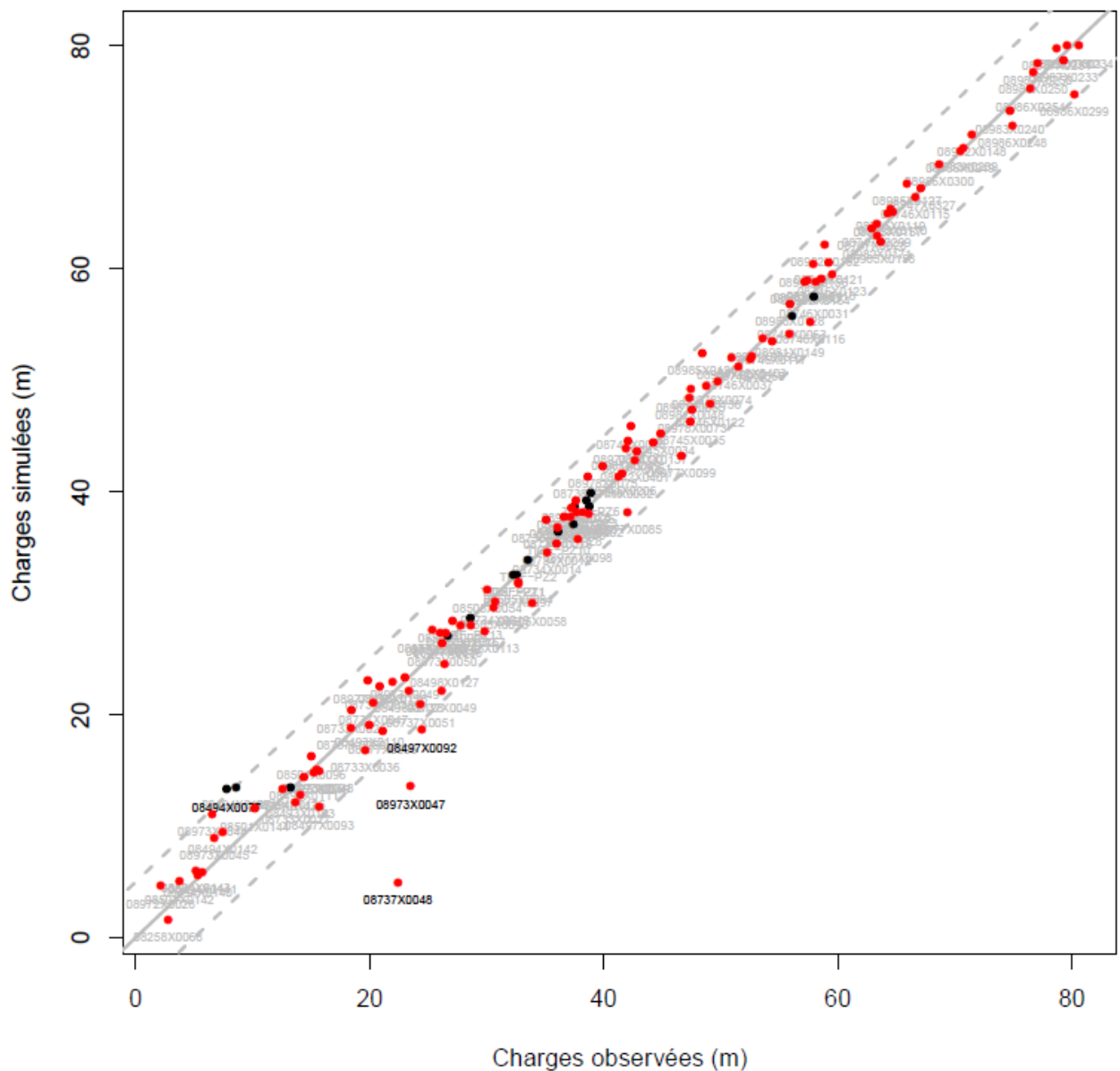


Figure 17 - Diagramme de dispersion des biais : charges moyennes observées vs. charges moyennes simulées, pour chacun des ouvrage du secteur du SAGE Born-et-Buch [Les points rouges correspondent aux points bénéficiant de moins de 15 données mensuelles ; les points noirs sont les ouvrages dont les chroniques ont été analysées ; la droite grisée pleine correspond à la droite de distribution théorique des points ; les droites grisées en pointillés sont les écarts à la droite théorique $\pm 5 m$]

4.4.3. Nord du modèle : SAGE Estuaire et SAGE Lacs Médocains

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à la Figure 18.]

La zone du modèle correspondant au SAGE Estuaire est caractérisée, dans sa partie nord, par un relief particulièrement peu marqué, avec des altitudes atteintes très faibles. De plus l'état actuel des eaux souterraines est fortement influencé par le drainage induit par les multiples crastes du secteur. Ainsi dans cette partie nord, dans la mesure où ces crastes ne sont pas individuellement représentées dans le modèle hydrodynamique, ces dernières ont été prises en considération, en forçant la topographie à la valeur minimale du MNT 25 m. La seule chronique piézométrique utilisée pour caler ce secteur nord est le point de mesure 07298X0037. Il est à noter que les charges observées à l'étiage sont faibles (inférieures à 1 m NGF parfois), du fait d'une vidange estivale particulièrement importante. Ce point de mesure étant situé à proximité des marais de la Perge et du Gua, des charges y ont été imposées de manière à voir quelle charge permettrait une telle vidange : même avec 0 m NGF (charge extrême, trop faible au regard des niveaux réels des marais), les niveaux à l'étiage ne sont visiblement pas atteignables (c'est cette simulation qui est affichée à la Figure 18). Trois solutions peuvent être envisagées pour expliquer cette difficulté du modèle : soit un problème de fiabilité des niveaux mesurés, soit un point de prélèvement non considéré, soit une « reprise à la nappe » (sub-affleurante) par la végétation notamment. Cette troisième option a été testée dans le modèle et permettrait effectivement une vidange de l'ampleur constatée (Figure 19) : cette hypothèse nécessite cependant d'être discutée, étant donné les profondeurs assez importantes atteintes par la nappe. L'hypothèse d'un point de prélèvement non considéré dans le modèle reste la plus probable.

Plus au sud, une adaptation du MNT introduit dans le modèle semble moins nécessaire puisque les crastes sont partiellement prises en compte comme réseau hydrographique. Toutefois, le réseau de crastes et la précision avec laquelle il est intégré au modèle, tant sur le nombre de crastes pris en compte que sur leur niveau, jouent sur l'adéquation charges simulées vs. charges observées. Par exemple la chronique associée au point d'observation 07545X0029, situé à proximité de la craste Moure, non considérée dans le modèle, montre que la cote du niveau de base, constitué par l'exutoire en aval du point d'observation, n'est pas très bien retranscrite et que l'inertie de la nappe est quelque peu surestimée par le modèle (on note également une sous-estimation de la charge, mais une incohérence entre l'altitude théorique du point de mesure - 18 m NGF - et celle considérée pour calculer les cotes sous ADES - 18,94 m NGF - pourrait l'expliquer). De la même manière, la prise en compte partielle du réseau hydrographique dans le modèle expliquerait les légères différences entre les charges calculées et celles observées, au niveau du point d'observation 07786X0051 (inertie plus forte dans les simulations). Au niveau du point 07786X0087, même si la dynamique est respectée, un biais de quelques mètres est visible. On note des différences de 2 m entre le MNT 25 m et la carte IGN du secteur, mais cette imprécision sur la topographie locale ne semble pas expliquer la totalité du biais. On remarque également que les niveaux observés sont plus bas que les altitudes des crastes du secteur (31,7 m NGF au plus haut vs. 34 m NGF).

Le point de suivi 08022X0013 ne peut être correctement pris en compte par le modèle, dans la mesure où il est situé très proche du centre de la maille d'un cours d'eau (craste de la Levade) et on rappelle que les niveaux d'eau sont fixes dans le modèle hydrodynamique (le niveau calculé est donc logiquement celui qui a été fixé pour la rivière). Les charges au point de suivi 08021X0009, situé plus à l'ouest et à proximité du réseau hydrographique intégré au modèle, sont quant à elles bien retranscrites. Un peu plus au nord, les évolutions au point de suivi 07785X0003 sont également bien reproduites par le modèle, moyennant une correction des niveaux de la craste du Pont des Tables, qui étaient initialement faibles au regard de la topographie du secteur. A noter que ce point d'eau présente des niveaux réactifs bien plus proches de ceux calculés par le modèle pour les formations plio-quaternaires que pour

l'Helvétien (que l'ouvrage capte au vu de sa coupe technique) : ce sont les charges de la couche 1, au droit de ce point, qui sont affichées à la Figure 18.

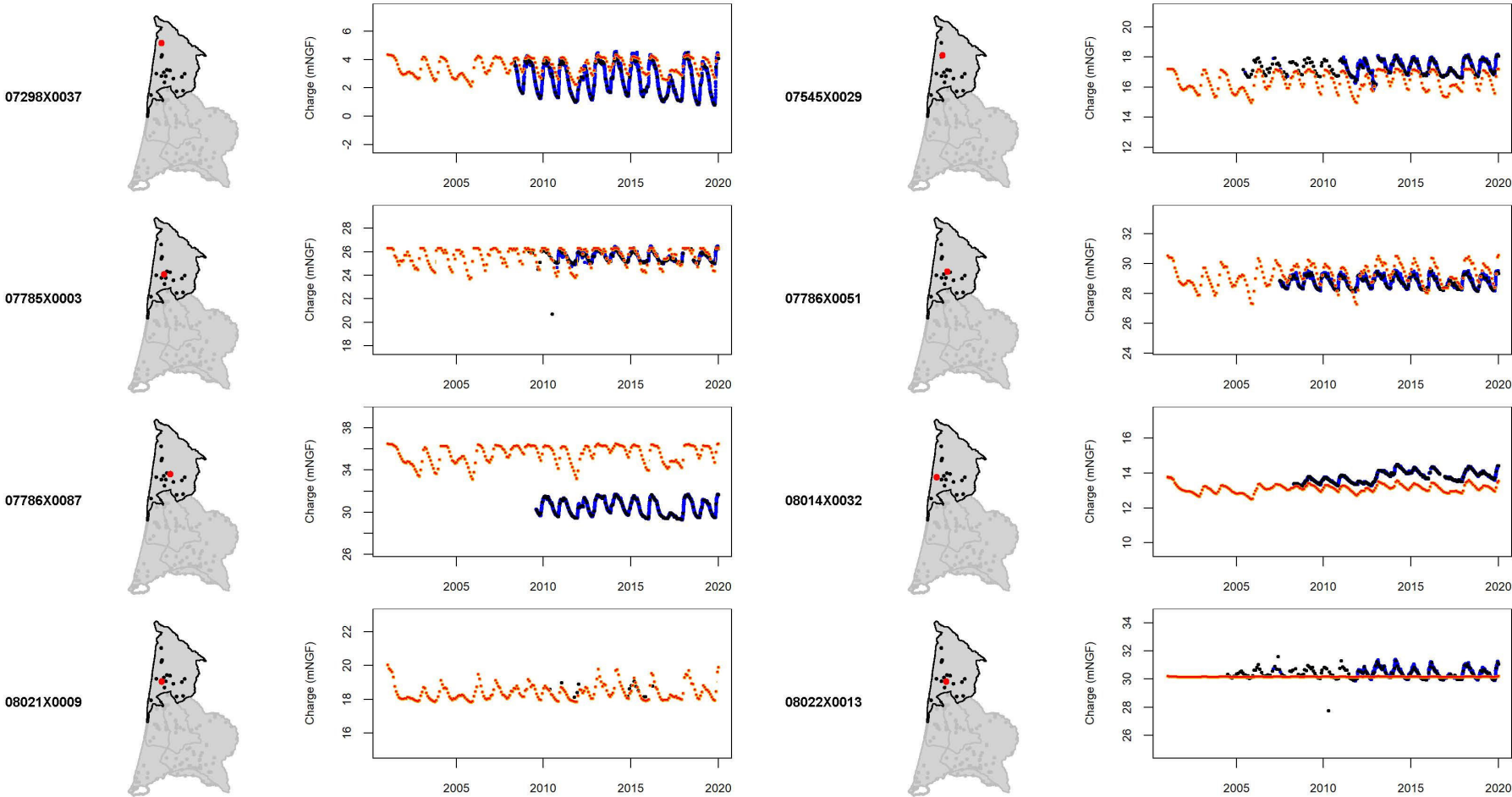
Dix km plus à l'est, la dynamique des charges au point de suivi 08023X0044 est bien respectée et l'impact des prélèvements bien estimé. Encore plus à l'est, le calage du point 08031X0302 a donné de très bons résultats avec forçage de la topographie du modèle au minimum du MNT 25 m, puisque dans cette zone du bec d'Ambès, le relief est peu marqué. Plus au sud, le modèle montre une bonne cohérence avec les observations faites à l'ouvrage 08025X0009.

La prise en compte du minimum du MNT dans les zones dunaires semble également parfois améliorer les choses comme le montre la plutôt bonne adéquation entre les résultats du modèle et le point de suivi 08014X0032, situé à proximité de l'étang de Lacanau : une légère différence de cote y est observée, mais la dynamique générale est correctement retranscrite. Plus au sud, à Lège-Cap-Ferret (ouvrage 08257X0086), l'adéquation entre modèle et observation est meilleure avec la moyenne du MNT 25 m.

Proche de Bordeaux, les niveaux suivis à l'ouvrage 08271X0299 ne sont pas très bien reproduits par le modèle : il semble qu'ils soient fortement impactés par un cours d'eau proche (on remarque en effet des niveaux très stables), vraisemblablement par le ruisseau du Serpent qui est canalisé et souterrain sur une grande partie de son cours. Le ruisseau n'étant pas intégré au modèle, les charges ne peuvent être finement modélisées.

Un peu plus à l'est, afin de mieux reproduire les charges mesurées à l'ouvrage 08264X0086, situé dans le bois de Laperge, caractérisé par un réseau de drainage important, il a fallu forcer la topographie au minimum du MNT 25 m. Néanmoins les charges restent un peu élevées.

Deux stations de débits avec suffisamment de données sont localisées dans le secteur : la station 09785310, localisée à l'est du secteur (La Jalle de Ludon au Pian-Médoc) et l'autre S1205110 à l'ouest (La Matouse à Hourtin). Dans ces deux secteurs, la calibration donne des résultats satisfaisants en matière de débits moyens (et donc de calcul de pluie efficace) et de débits d'étiage (et donc de relation "nappe-rivière").



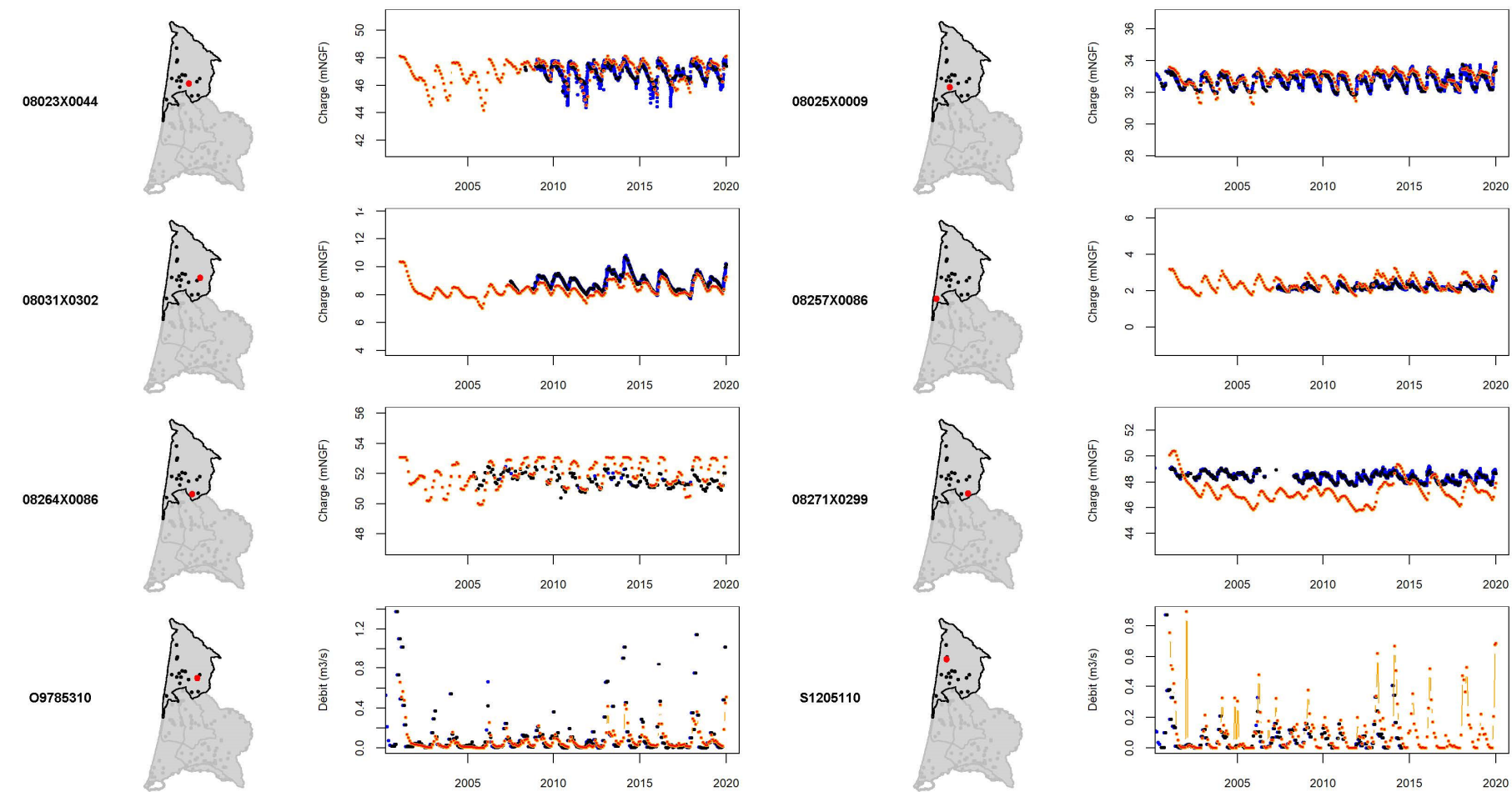


Figure 18 - Comparaison simulations vs. observations pour le secteur du Nord du modèle : SAGE Estuaire et SAGE Lacs Médocains [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs]

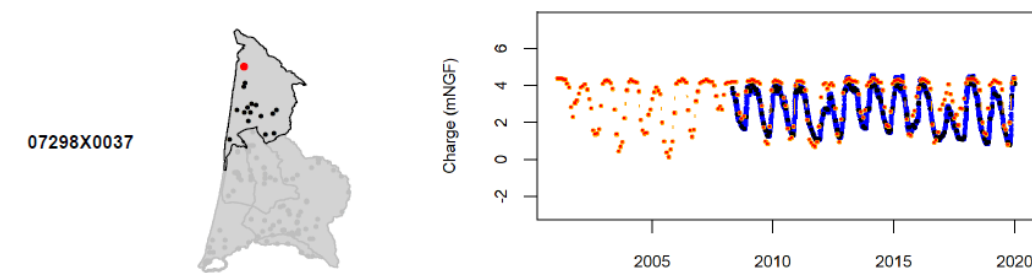


Figure 19 - Résultat de la simulation alternative avec reprise à la nappe, au droit du point d'observation 07298X0037

4.4.4. Est et sud-est du modèle (dont SAGE Ciron et SAGE Midouze)

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à la Figure 20.]

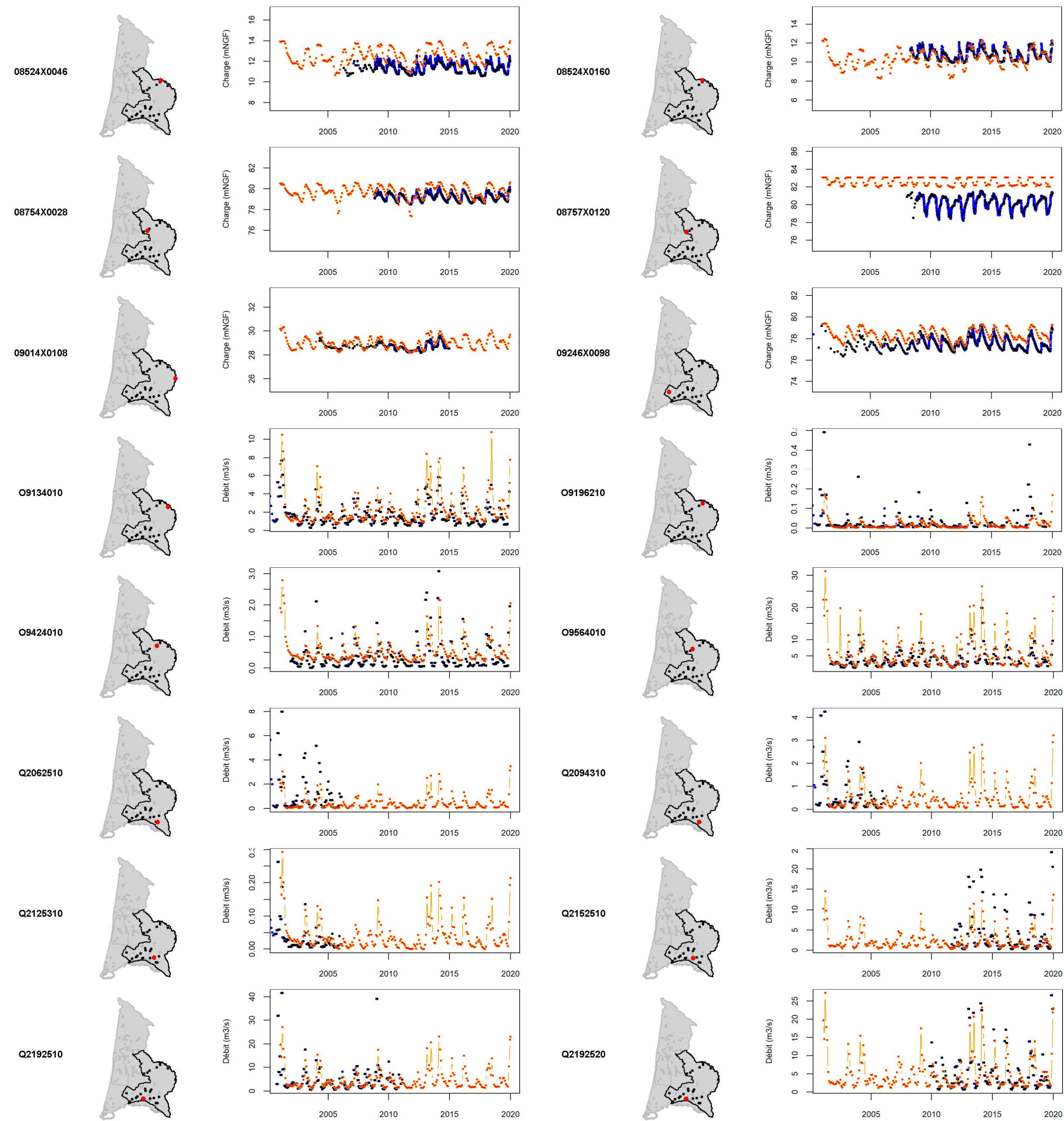
Sur le territoire du SAGE Ciron, trois points d'observation bénéficiant de suffisamment de données ont été utilisés pour la calibration : les piézomètres 08754X0028 et 08757X0120, et la station de débit 09564010 (le Ciron à Préchac). La qualité du modèle au droit de ces deux points de mesure est acceptable, mais moins bonne au droit de l'ouvrage 08757X0120 qui présente des charges surestimées et une mauvaise prise en compte des prélèvements : l'épaisseur des sables plio-quaternaires, très faible dans le modèle au droit de ce point d'observation, explique les difficultés à calibrer ce point (les niveaux observés ne peuvent être atteints puisque les formations plio-quaternaires n'existent pas à ces profondeurs). Il serait nécessaire de revoir la géométrie du modèle dans le secteur.

Plus à l'est, plusieurs points d'observation captent les alluvions récentes de la Garonne. Les points d'observation 08524X0046 et 08524X0160 sont proches du Canal Latéral à la Garonne et situés dans un petit périmètre. Moyennant une légère augmentation des niveaux absolus de la Garonne et de La Bassanne (+2 m) qui paraissaient, en première approche, légèrement sous-estimés, les charges calculées à l'ouvrage 08524X0160 sont plutôt correctement retranscrites par le modèle. Les charges sont surestimées par le modèle au droit de l'ouvrage 08524X0046, même si la dynamique est bien retranscrite, mais cela s'explique vraisemblablement par la non-prise en compte de la totalité du réseau de drainage dans ce secteur. Encore plus à l'est, le point 09014X0108 est quant à lui situé entre la Baïse et la Garonne. Les niveaux d'eau initialement considérés dans ces deux cours d'eau / fleuve semblent faibles au regard du MNT disponible et des charges calculées par le modèle. Une correction des niveaux d'eau, en cohérence avec le MNT disponible, a été donc appliquée à ces hauteurs et le calcul des charges, au droit de ce point d'observation, donne de bons résultats. Il s'agira dans une future version du modèle de corriger les mesures d'eau au-delà de ces points d'observation avec des valeurs plus précises.

Les débits de la Garonne ne peuvent être retranscrits dans le modèle, dans la mesure où seule une partie des bassins versants est incluse dans le modèle. Le calcul des débits de ses affluents donne des résultats acceptables à la station de la Cadanne à Pondauret (O9196210). Le calage a été obtenu après une correction au linéaire des niveaux d'eau, initialement considérés pour les cours d'eau, lorsqu'ils paraissaient trop faibles au regard du MNT disponible. En revanche, les débits de la station O9424010, le Beuve à Lados, semblent assez largement surestimés, en période d'étiage notamment, et différentes modifications du modèle ne semblent pas résoudre ce problème (perméabilité des formations affleurantes, correction des niveaux de la rivière). Cette surestimation pourrait venir des effets du lac de la Prade, intersectant le Beuve en amont de la station, dont il s'agira de connaître les modalités de fonctionnement (prélèvements, lâchers, etc.). La Banque Hydro mentionne effectivement un régime « fortement » influencé en étiage. La même observation est faite au niveau de la station de l'Avance à Montpouillan (O9134010), avec même un décalage temporel entre observations et simulations, mais elle est également classée comme « fortement » influencée.

Sur le territoire du SAGE Midouze, le seul point d'observation captant les formations plio-quaternaires disponibles est l'ouvrage 09246X0098. Les charges calculées suivent relativement bien la dynamique des observations, avec une légère surestimation des charges (peut-être du fait de la prise en compte incomplète du réseau hydrographique drainant la nappe dans le secteur).

D'amont en aval, les calculs des débits, au niveau des stations hydrométriques avec données disponibles (Q2062510 - le Midour à Laujuzan ; Q2094310 - l'Izaute à Monlezun d'Armagnac ; Q2125310 - la Houeillede à Lannemaigan ; Q2192510 & Q2192520 - le Midour à Mont-de-Marsan ; Q2242910 - la Douze à Cazaubon ; Q2292910 - la Douze à Roquefort ; Q2364010 - l'Estampon à Arue ; Q2414313 & Q2414315 - la Gouaneyre à Cachen ; Q2424310 - la Gouaneyre à Arue ; Q2503320 - la Midouze à Mont-de-Marsan ; Q2544310 - le ruisseau de l'Estrigon à Cère ; Q2584610 - le ruisseau de Geloux à Saint-Martin-d'Oney ; Q2593310 - la Midouze à Campagne ; Q2654010 - le Bès à Saint-Yaguen ; Q2663110 - la Midouze à Tartas), donnent des résultats satisfaisants. C'est à la station Q2062510 que les résultats sont les moins bons, mais ces derniers sont affectés par les limites du modèle qui n'englobent pas en totalité le bassin versant associé à cette station.



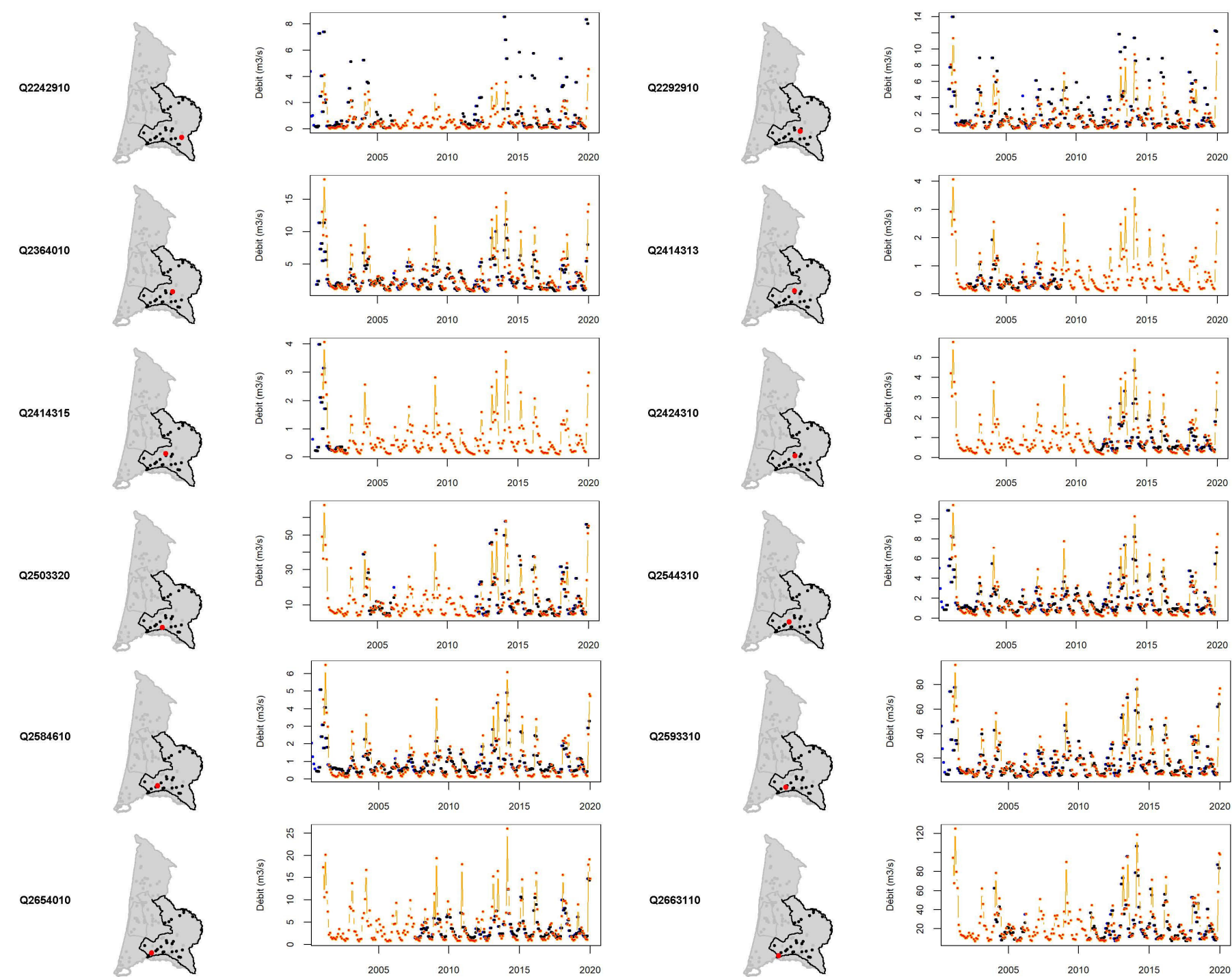


Figure 20 - Comparaison simulations vs. observations pour le secteur de l'Est et sud-est du modèle (dont SAGE Ciron et SAGE Midouze) [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs]

4.4.5. Sud du modèle

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à la Figure 21.]

Un certain nombre de points d'observation permettent de calibrer le modèle dans sa partie sud-ouest, proche de la côte atlantique.

Le point de suivi 09492X0014, situé dans le Marensin, capte les formations plio-quaternaires profondes (profondeur des crépines supérieure à 50 m) : même si la dynamique des niveaux est plutôt bien reproduite par le modèle, le battement est surestimé. Cela provient très vraisemblablement du fait que le modèle ne considère, dans le secteur, aucune hétérogénéité verticale des formations plio-quaternaires, alors que la piézométrie observée semble montrer une certaine anisotropie de perméabilité entre les différentes formations sableuses du Plio-Quaternaire.

Plus au sud, les niveaux piézométriques de l'ouvrage 09495X0003 sont très bien retranscrits par le modèle. Par contre, les débits du courant de Soustons (ou du ruisseau de Magescq) mesurés à Magescq (S4214010) ne sont pas bien reproduits par les calculs : cette chronique est caractérisée par une assez faible évolution des débits au cours de l'année, alors que le modèle fournit des débits faibles à l'étiage. Il serait nécessaire de mieux comprendre le fonctionnement de ce cours d'eau (et des effets anthropiques éventuels) pour ensuite le traduire dans le modèle.

Un peu plus au sud, dans le Maremne, le modèle retranscrit très correctement la dynamique des nappes au niveau des points d'eau (09761X0105, 09761X0107 et 09761X0009), et ce dans un secteur où les prélèvements sont importants. A noter qu'un problème de nivellement du point d'eau 09761X0107 semble exister : en effet, le modèle permet de bien retranscrire les charges observées après décalage de ces dernières de 7 m environ. Le MNT 25 m, éloigné de l'altitude de ce point d'eau, ainsi que les différences de charges inexplicables avec les piézomètres alentours semblent venir appuyer cette hypothèse. La Figure 21 a donc été produite en faisant cette translation de 7 m. A noter également que pour une bonne calibration du point de suivi 09761X0009, une répartition des débits des prélèvements AEP, avec volumes prélevés plus importants en été, est nécessaire.

En limite sud-ouest du modèle, entre Capbreton et la rive droite de l'Adour (Seignanx), la calibration a été réalisée à partir des chroniques disponibles sur 5 points d'eau, situés dans un rayon de moins de 3 km (09758X0007, 09758X0008, 09758X0009, 09765X0049, 09765X0158). Malgré la résolution du modèle qui ne permet pas exactement de prendre en compte des hétérogénéités de comportement à cette échelle, les charges calculées sont tout à fait acceptables. La topographie du modèle a été forcée avec le minimum du MNT 25 m, au niveau du Marais d'Orx, ce qui a permis d'obtenir des charges acceptables pour l'ouvrage 09765X0049, mais l'absence de chronique de prélèvement associée à cet ouvrage ne permet pas de reproduire l'effet des pompes estivaux, remarqué sur les mesures piézométriques. Les ouvrages 09765X0158 et 09758X0009 sont très proches du ruisseau du Boudigau et il a été nécessaire d'enlever ce cours d'eau du réseau hydrographique explicite pour pouvoir modéliser les charges au droits de ces ouvrages : le modèle considère en effet des hauteurs d'eau constantes dans le réseau hydrographique, ce qui entraîne des biais dans la modélisation des niveaux des nappes à proximité de ce réseau. Les résultats sont bons pour l'ouvrage 09758X0009, un peu moins pour l'ouvrage 09765X0158 : en particulier la baisse des niveaux observées au cours du temps n'est pas entièrement reproduite par le modèle.

Des différences importantes sont notées entre observations et simulations à l'ouvrage 09763X0267. L'explication la plus plausible à ces différences semble être la discrétisation

verticale du modèle hydrodynamique, qui ne permet pas de représenter les écoulements au sein des niveaux très superficiels que capte le piézomètre. Une analyse locale semble donc nécessaire.

Enfin, trois ouvrages sont situés dans les alluvions de l'Adour, à l'extrême sud du modèle. Les charges calculées par le modèle, à l'ouvrage 09515X0097, sont acceptables, dans la mesure où les charges moyennes sont plutôt respectées. L'inertie de la nappe dans ce secteur est toutefois surestimée vraisemblablement du fait de la non-prise en compte du réseau hydrographique local et les niveaux semblent directement influencés par des prélèvements non-pris en compte dans le modèle. De plus, il existe des différences de relief relativement importantes dans le secteur qui ne peuvent être bien pris en compte avec des mailles de 500 m de côté. Les charges de l'ouvrage 09792X0203, situé à moins de 300 m de l'Adour, suivent quant à elles vraisemblablement les variations de hauteurs de la rivière et par conséquent ne peuvent être correctement reproduites par le modèle, qui considère comme fixes les hauteurs des cours d'eau dans le temps : on observe donc logiquement des charges quasi stables dans le temps à un niveau proche de celui imposé dans l'Adour, dans ce secteur (environ 75,75 m NGF) et peu réactives. La même observation peut être faite à l'ouvrage 09793X0011 (le niveau de l'Adour a été ajusté localement).

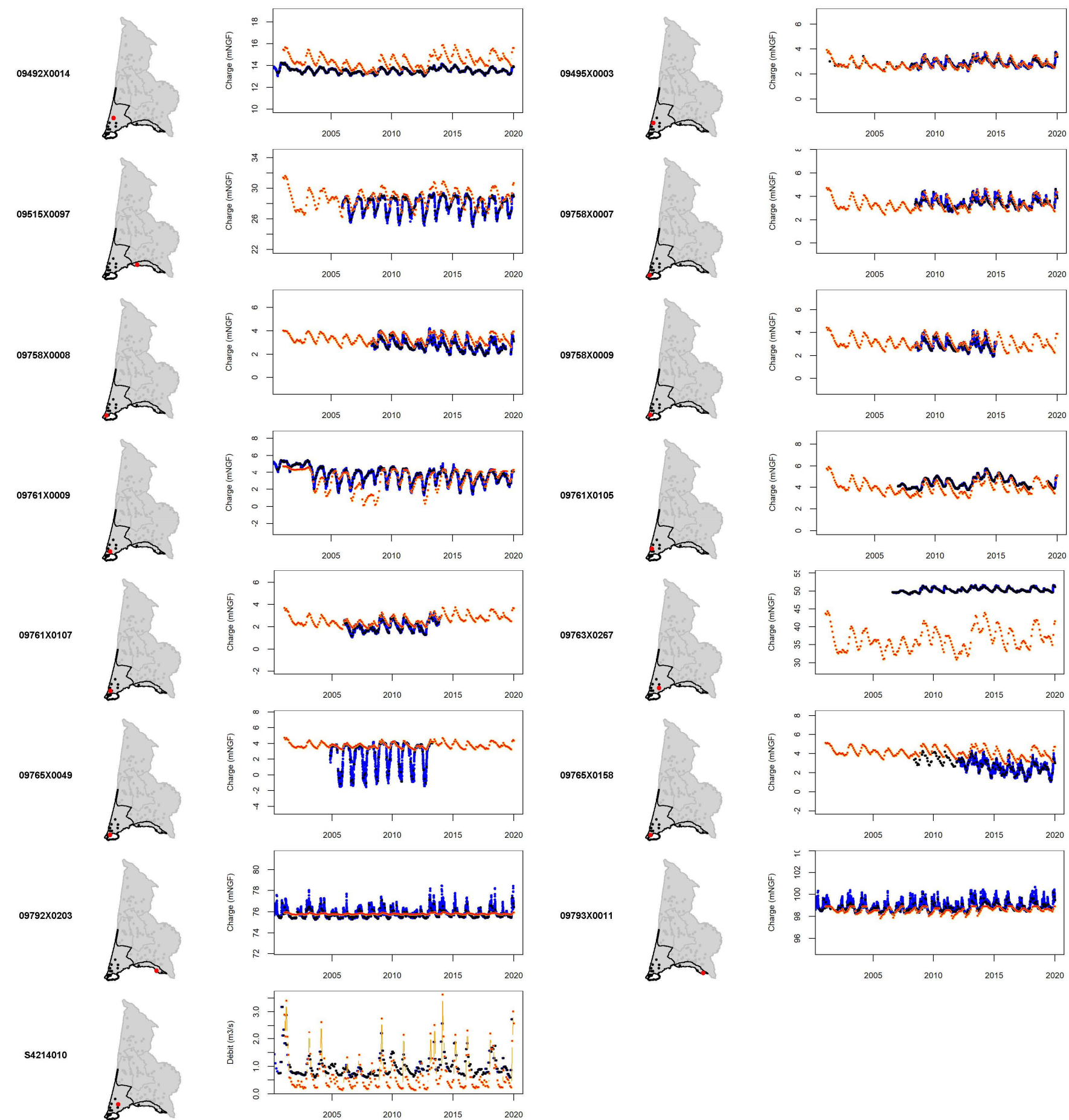


Figure 21 - Comparaison simulations vs. observations pour le secteur du Sud du modèle [rouge : variables simulées ; bleu : variables observées brutes ; noir : variables observées considérées dans le calcul des indicateurs]

5. Conclusion

Le développement du modèle mio-plio-quaternaire s'est poursuivi dans le cadre de la Convention Régionale sur les Eaux Souterraines, autour de deux axes.

Le premier axe a consisté à réaliser les mises à jour des données d'entrée et de sortie du modèle pour la période 2015-2019. La modélisation opérée ainsi, au pas de temps mensuel pour cette période, permet de disposer de 20 ans de suivi. Des données jusqu'ici non intégrées au modèle ont également été ajoutées. Il s'agit des rejets en cours d'eau (provenant principalement des STEP) et des données de prélèvements agricoles, dans les territoires des SAGE Leyre et Born-et-Buch, faisant l'objet d'un calage plus fin. La consolidation de ces prélèvements a été rendue possible par la mise à disposition par les Chambres d'Agriculture de Gironde et des Landes de leurs bases de données et le croisement avec les données de l'Agence de l'Eau. Ce qui a permis de disposer au final de prélèvements géolocalisés et complets pour la période 2000-2019, même si des limites à cet exercice existent (incohérences de volumes entre bases, incohérences d'exploitant, du nombre de compteurs, ...).

Le second axe de travail a consisté à réaliser la première calibration en régime transitoire du modèle hydrodynamique pour la période 2000-2019. Suite aux premières simulations transitoires réalisées lors de travaux antérieurs, le modèle a été adapté pour tenir compte temporairement des difficultés associées à la bonne intégration des charges dans la couche 8, en attendant de pouvoir bénéficier des charges calculées par le MOdèle Nord-Aquitain en cours de développement. Les conditions de charge imposée ont ainsi été levées et des perméabilités équivalentes ont été recalculées dans cette couche. Les nouvelles bases de données recensant les évolutions piézométriques et débitométriques ont été exhaustivement utilisées pour mener à bien la calibration du modèle. Le calage a consisté à faire varier différents paramètres pour restituer au mieux, avec le modèle, les chroniques piézométriques et débitométriques observées. Cette calibration a donc été réalisée à partir des paramètres suivants : perméabilités et coefficients d'emmagasinement essentiellement et, dans une moindre mesure, avec les paramètres du bilan hydroclimatique et du réseau hydrographique. A noter que la géométrie du modèle a également été revue, en cours de calage, et en particulier la topographie du modèle, pour mieux prendre en compte la forte anthropisation du secteur et son réseau de drainage dense. En ce qui concerne les chroniques piézométriques, seules celles disposant de plus de 15 données ont été utilisées, excepté dans les territoires des SAGE Leyre et Born-et-Buch, où l'ensemble des données récupérées a été utilisé. L'objectif principal de cette calibration est de vérifier que le modèle est capable, dans sa configuration actuelle et moyennant des modifications raisonnables, de reproduire les observations.

La calibration a donné, sauf exception, de bons résultats dans les 5 secteurs choisis pour l'analyse : SAGE Leyre / SAGE Born-et-Buch / Nord du modèle / Est et sud-est du modèle / Sud du modèle. On peut noter toutefois que dans le secteur de La Teste-de-Buch, la calibration de l'outil n'est pas optimale et qu'une réflexion quant au modèle conceptuel retenu au niveau local devra être menée. Dans les territoires du SAGE Leyre et du SAGE Born-et-Buch, où les résultats du modèle ont été également comparés aux autres points de suivi bénéficiant de moins de 15 données, avec le même objectif d'identification des comportements anormaux pouvant traduire des difficultés de représentativité du modèle, les résultats sont là encore satisfaisants.

Plusieurs voies d'amélioration de ce premier calage en régime transitoire sont envisagées, au-delà de la résolution de problèmes conceptuels locaux (e.g. La Teste-de-Buch). Les incertitudes associées aux prélèvements implémentés dans le modèle (localisation, affectation des volumes, affectation de la formation captée) font que, pour le moment, le modèle n'est pas capable de

prélever en tout point la quantité de consigne : le code de calcul limite en effet les débits de pompage pour éviter les dénoyages des mailles dans lesquels les prélèvements sont effectués. Un travail de localisation de ces limitations devra être effectué pour les expliquer au mieux. Il ne pourra être pertinent que si un travail de connaissances plus fin des prélèvements est effectué, en concertation avec les acteurs locaux. Enfin, les propriétés du modèle ont été ajustées pour permettre une calibration acceptable. Par conséquent, aucune modification des propriétés hydrodynamiques dans les secteurs ne bénéficiant pas de chroniques piézométriques n'a pu être menée : un travail d'homogénéisation des modifications du modèle, entre zones calibrées et non calibrées, devra être conduit notamment au regard de la connaissance géologique et hydrogéologique locale. Au final, et comme l'a montré le travail de calibration, l'interprétation des résultats du modèle sera à l'heure actuelle surtout pertinente à l'échelle régionale, mis à part dans les secteurs où les limites du modèle (résolution horizontale, verticale, réseau hydrographique etc.) ont des conséquences limitées et bénéficiant de données suffisantes pour s'assurer de sa représentativité locale. Comme tout modèle hydrodynamique, c'est un outil évolutif et sa capacité de représentation des écoulements souterrains s'affinera à mesure que des données additionnelles viendront l'alimenter.

6. Bibliographie

ANDRÉ L., CABARET O., DOUEZ O., SAPLAIROLES M., 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.

AnteaGroup (2019) - Contribution à la connaissance des relations nappes du Plio-Quaternaire / Eaux superficielles - Rapport d'avancement fin août 2019 - A 100176/A. Volet 1 - Phases 2 & 3.

BARRIÈRE J. avec la collaboration de BRANELLEC M, CAPÉLAN F., FONDIN A., GREGORIO R. (2019) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Appui aux SAGE aquitains dans la connaissance de l'aquifère Plio-Quaternaire et des relations nappes / rivières / étangs - Module 3.2 - Année 2. Rapport final. BRGM/RP-68803-FR, 61 p., 30 ill., 5 ann.

BARRIÈRE J. et SALTEL M. (2017) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Plio-Quaternaire - Relations nappes / rivières / étangs - Module 3.2 - Année 1. Rapport final. BRGM/RP-66844-FR, 80 p., 43 ill., 7 ann.

BUQUET D. (2017) - Cycle des éléments biogènes dans les lacs côtiers en Gironde. Thèse de l'Université de Bordeaux.

CABARET O., ARNAUD L., 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., VERGNES J-P. (2017) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développement du Modèle Mio-Plio-Quaternaire - Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020 - Module 1.3 - Année 1. Rapport final, BRGM/RP-66846-FR, 33 p.

CABARET O., WUILLEUMIER A. BARRIERE J., BOURBON P., AYACHE B. (En cours) - Projet MOHYS - Interprétation des investigations de terrain, construction et calage du Modèle Hydrogéologique du Bassin d'Arcachon. *En attente de parution*

CORBIER P. et CABARET O. (2014) - Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 6 - Année 4. Rapport final. BRGM/RP-63168-FR, 113 p., 81 ill., 3 ann.

CORBIER P. et CABARET O. (2015) - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 6 - Année 5 - Convention 2008-2013. Rapport final. BRGM/RP-64983-FR, 79 p., 46 ill., 5 ann.

DOUEZ O. et CAGNIMEL M. (2018) - MOHYS - Modèle Hydrogéologique du Bassin d'Arcachon - Travail de préfiguration. Rapport final. BRGM/RP-67851-FR - 90 p., 2 ann.

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

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



**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



Géosciences pour une Terre durable

brgm