

Document public

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes

Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020
Modules 1.1 & 1.2 - Année 2

Rapport final

BRGM/RP-68683-FR
Avril 2019



Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes

Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020

Modules 1.1 & 1.2 - Année 2

Rapport final

BRGM/RP-68863-FR

Avril 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM AP17BDX019

E. Buscarlet, O. Cabaret et M. Saltel

Avec la collaboration de
L. Carpentier

Vérificateur :

Nom : L. ARNAUD

Fonction : Hydrogéologue

Date : 10/04/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : N. PEDRON

Fonction : Directeur Régional du
BRGM Nouvelle-Aquitaine

Date : 12/04/2019

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Modélisation hydrodynamique, recharge, régime permanent, réseau hydrographique, Bassin Nord-Aquitain, Modèle Nord-Aquitain, Bajocien, Bathonien, Callovo-Oxfordien, Kimméridgien, Tithonien, Cénomanién, Turonien, Coniacien-Santonien, Campano-Maastrichtien, Éocène moyen à inférieur, Éocène supérieur, Oligocène, Aquitanien, Serravallien, Plio-Quaternaire.

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

Buscarlet E., Cabaret O., Saltel M. (2019) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Modules 1.1 & 1.2 - Année 2. Rapport final. BRGM/RP-68863-FR, 57 p., 33 ill., 7 tabl., 2 ann.

Synthèse

Cette étude (AP17BDX019 et AP17BDX023) a été réalisée dans le cadre de l'année 2 de la convention « Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine » signée entre l'État, la Région Nouvelle-Aquitaine et le BRGM, portant sur la période 2015-2020 et conduite avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Elle s'inscrit dans le prolongement des travaux de modélisation des aquifères de la région Nouvelle-Aquitaine engagés par le BRGM Nouvelle-Aquitaine. Ces travaux ont vocation à élaborer des outils d'aide à la décision destinés à apporter des éléments scientifiques et techniques permettant aux gestionnaires de définir les stratégies d'exploitation des ressources en eaux souterraines de la Région. Certaines nappes sont en effet très sollicitées et parfois en situation de déséquilibre avec des prélèvements excédant leur possibilité de renouvellement. Elles requièrent donc une gestion raisonnée afin de préserver leur pérennité. L'objectif global de ce module est de développer le Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour obtenir une plus grande finesse de représentation des aquifères et être en mesure de mieux traiter ainsi les problèmes posés à une échelle plus locale, en particulier ceux soulevés par le SAGE "Nappes profondes de Gironde", mais aussi ceux qui émergent dans les départements voisins du Lot-et-Garonne et de la Dordogne.

Le travail réalisé au cours de cette année d'étude a consisté à actualiser les données d'entrée du modèle dans sa version 3.3b (prélèvements, flux d'infiltration) et les chroniques piézométriques jusqu'en 2015 pour bénéficier ainsi d'un outil le plus à jour possible. Cette actualisation a démontré que le modèle retranscrit bien la piézométrie mesurée avec les nouvelles données d'entrée sans qu'aucune modification des paramètres hydrodynamiques n'ait été nécessaire. Le calage du modèle peut donc être considéré comme robuste.

En parallèle à la maintenance de la version 3.3b du MONA, ce module a permis de poursuivre le développement de la version 4 du modèle, dont la nouvelle géométrie, représentant à une échelle plus fine la complexité des réservoirs du Nord du Bassin aquitain, avait été finalisée en année 4 de la convention régionale eaux souterraines 2008-2013. Le passage d'une maille de 2 km de côté à une maille de 500 m et la meilleure prise en compte des épontes ont pour objectif d'améliorer la représentativité du modèle. Les toits et les murs des 30 couches du modèle géologique ont donc été implémentés dans le modèle hydrodynamique, via l'interface graphique WinMarthe du logiciel de modélisation MARTHE.

Toutefois, en raison du très grand nombre de mailles de la version 4 et des longs temps de calculs associés, une version intermédiaire a été développée (MONA 3.5) pour aboutir à des temps de calculs raisonnables. Cette version intègre la géométrie de la version 4 dans un maillage de 2 km de côté, la prise en compte des données SAFRAN pour le calcul de la recharge via le module GARDENIA de MARTHE ainsi que le réseau hydrographique le plus détaillé possible pour contrôler les débordements.

Un travail important reste à mener pour cadrer la recharge dans la nouvelle version du MONA. La prise en compte du réseau hydrographique dans le modèle et la reproduction des débits observés dans les différentes stations de jaugeages permettra de mieux définir la répartition entre ruissellement et infiltration.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Actualisation des données spatio-temporelles du MONA version 3.3	11
2.1. PRELEVEMENTS	11
2.1.1. Collecte des données de prélèvements	11
2.1.2. Traitement des données collectées.....	13
2.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du MOdèle Nord-Aquitain pour la période 2012-2015	13
2.2. CALCUL DES PRECIPITATIONS EFFICACES ET ACTUALISATION DES DONNEES DE RECHARGE DES NAPPES DU MODELE NORD-AQUITAIN	15
2.2.1. Les précipitations efficaces	15
2.2.2. La recharge.....	17
2.3. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	20
2.3.1. Mise à jour des chroniques d'observations	20
2.3.2. Campagne piézométrique complémentaire.....	21
2.3.3. Les chroniques de calage	23
2.3.4. Les cartes piézométriques	24
3. Développement du MONA.....	29
3.1. DESCRIPTION DE LA VERSION 4 DU MONA.....	29
3.2. COMPARAISON ENTRE LA VERSION 3.3 ET LA VERSION 4	30
3.2.1. MONA V3.4a - Prise en compte du bilan hydroclimatique	30
3.2.2. MONA V3.4b - Intégration de la géométrie actualisée.....	34
3.3. DEVELOPPEMENT D'UNE VERSION INTERMEDIAIRE - MONA 3.5	39
3.3.1. Conceptualisation	39
3.3.2. Simulation en régime transitoire.....	47
4. Conclusion.....	53
5. Bibliographie	55

Liste des figures

Illustration 1 - Localisation des 6 314 points de prélèvements pris en compte dans l'actualisation 2015 du modèle	12
Illustration 2 - Évolution des prélèvements dans les couches du MOdèle Nord-Aquitain, de 1972 à 2015, tous départements confondus.....	15
Illustration 3 - Précipitations efficaces annuelles (Pe _{eff}) pour la station de Mérignac en Gironde, au cours de la période 1972 - 2015, pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm	16
Illustration 4 - Localisation des zones d'affleurement du modèle dans sa version 3.3b, pour chaque nappe, et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge	19
Illustration 5 - Localisation des 428 points de mesures piézométriques	21
Illustration 6 - Localisation des points d'observation de la campagne piézométrique complémentaire 2017	22
Illustration 7 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Eocène moyen).....	24
Illustration 8 - Évolution de la piézométrie de la nappe de l'Éocène moyen dans le secteur de Camblanes-et-Meynac	25
Illustration 9 - Niveaux piézométriques simulés par le MOdèle Nord-Aquitain, version MONA V3.3b-2015, dans l'aquifère « Eocène moyen », pour les années 2014 (haut) et 2015 (bas).....	26
Illustration 10 - Ecart entre les niveaux simulés en 2015 et en 2014 pour la nappe de l'Eocène moyen..	27
Illustration 11 - Ecart entre les niveaux simulés en 2015 et en 2014, pour la nappe de l'Eocène moyen et écart de prélèvements de plus de 50 000 m ³	27
Illustration 12 - Description des différentes couches du MONA V4 (Saltel, et al., 2017)	29
Illustration 13 - Zones météorologiques utilisées dans le modèle MONA V3.4a (le numéro en italique correspond au numéro de maille SAFRAN de Météo-France).....	31
Illustration 14 - Répartition des 11 zones de sol définies dans le MONA V3.4a	31
Illustration 15 - Comparaison des flux de recharges et débordements simulés sur l'ensemble du domaine modélisé entre MONA V3.3 (trait rouge) et MONA V3.4a (trait bleu).....	32
Illustration 16 - Comparaison des recharges annuelles, simulées en 2015, dans le MONA V3.3 et le MONA V3.4a	33
Illustration 17 - Niveaux piézométriques simulés par les modèles MONA V3.3 et MONA V3.4a, pour une sélection de piézomètres	34
Illustration 18 - Vue 3D du modèle géologique du bassin Nord-Aquitain (Saltel, et al., 2014)	35
Illustration 19 - Topographie du MONA V3.4b (m NGF) et localisation des coupes (le trait gris représente l'emprise du modèle MONA V3.3 initial)	36
Illustration 20 - Coupe ouest-est pour la comparaison de la géométrie des modèles MONA V3.3 et V3.4b	37
Illustration 21 - Coupe nord-sud pour la comparaison de la géométrie des modèles MONA V3.3 et V3.4b	38
Illustration 22 - Niveaux piézométriques simulés par le MONA V3.4b pour une sélection de piézomètres.....	38
Illustration 23 - Réseau hydrographique intégré dans le MONA V4 et points de mesure de débits disponibles	41
Illustration 24 - Total des prélèvements en eaux de surface et retenues d'eau dans le secteur d'étude (SIE-AEAG).....	42

Illustration 25 - Réseau hydrographique modélisé et localisation des prélèvements de surface	43
Illustration 26 - Total des prélèvements de surface modélisé dans le MONA V3.5	44
Illustration 27 - Cours d'eau représentés dans le modèle	44
Illustration 28 - Stations considérées pour l'évaluation des débits entrants dans les cours d'eau en limite de modèle	45
Illustration 29 - Exemple de la station de Tescou avec un ratio inférieur à 1	46
Illustration 30 - Exemple de la station de l'Aveyron avec un ratio supérieur à 1	46
Illustration 31 - Exemple de restitution de la piézométrie simulée dans les différentes versions du MONA, dans la nappe de l'Oligocène	49
Illustration 32 - Exemple de restitution de la piézométrie simulée dans les différentes versions du MONA, dans la nappe de l'Éocène moyen	50
Illustration 33 - Exemple de comparaison entre débits observés et débits simulés	51

Liste des tableaux

Tableau 1 - Volumes annuels en m ³ captés par les 74 nouveaux points intégrés dans le modèle	12
Tableau 2 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA-V3.3b de 2012 à 2015 (m ³ /an)	14
Tableau 3 - Précipitations efficaces (mm) en 2012, 2013, 2014 et 2015, calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA	16
Tableau 4 - Nombre de chroniques piézométriques utilisées pour le calage	20
Tableau 5 - Forages à retirer de la campagne piézométrique complémentaire	23
Tableau 6 - Stations considérées pour l'évaluation des débits entrants dans les cours d'eau en limite de modèle	47
Tableau 7 - Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles	48

Liste des annexes

Annexe 1 Historique du MOdèle Nord-Aquitain	59
Annexe 2 Actualisation des chroniques de calage - période 1972- 2015 (MONA V3.3b)	65

1. Introduction

Les travaux présentés dans ce rapport ont été effectués dans le cadre des modules 1 et 2 de l'axe 1 de l'année 2 de la convention "Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine" (convention comprenant 10 modules répartis en 4 axes) signée entre l'État, la Région Nouvelle-Aquitaine et le BRGM pour la période 2015-2020 avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

Cette étude fait suite aux travaux de modélisation des aquifères de la région Nouvelle-Aquitaine engagés par le BRGM Aquitaine depuis près de 25 ans pour disposer d'outils d'aide à la gestion et à la décision, et appuyer ainsi au mieux la définition des stratégies d'exploitation des ressources souterraines de la région. Certaines nappes sont en effet très sollicitées et mises en situation de déséquilibre.

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

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

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

La première partie du travail réalisé concerne l'actualisation de la version actuelle du MONA (Version 3.3b) : mise à jour des données d'entrée (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques piézométriques sur l'année 2015 afin de bénéficier d'un outil le plus à jour possible.

La deuxième partie est consacrée au développement de la nouvelle version du modèle et concerne les premières simulations en régime transitoire d'une version intermédiaire entre la version 4 et la version 3.3. L'objectif étant de bénéficier des améliorations des travaux antérieurs sur la géométrie des réservoirs, la recharge tout en ayant des temps de calculs raisonnables pour effectuer le calage en régime transitoire.

2. Actualisation des données spatio-temporelles du MONA version 3.3

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

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

2.1. PRELEVEMENTS

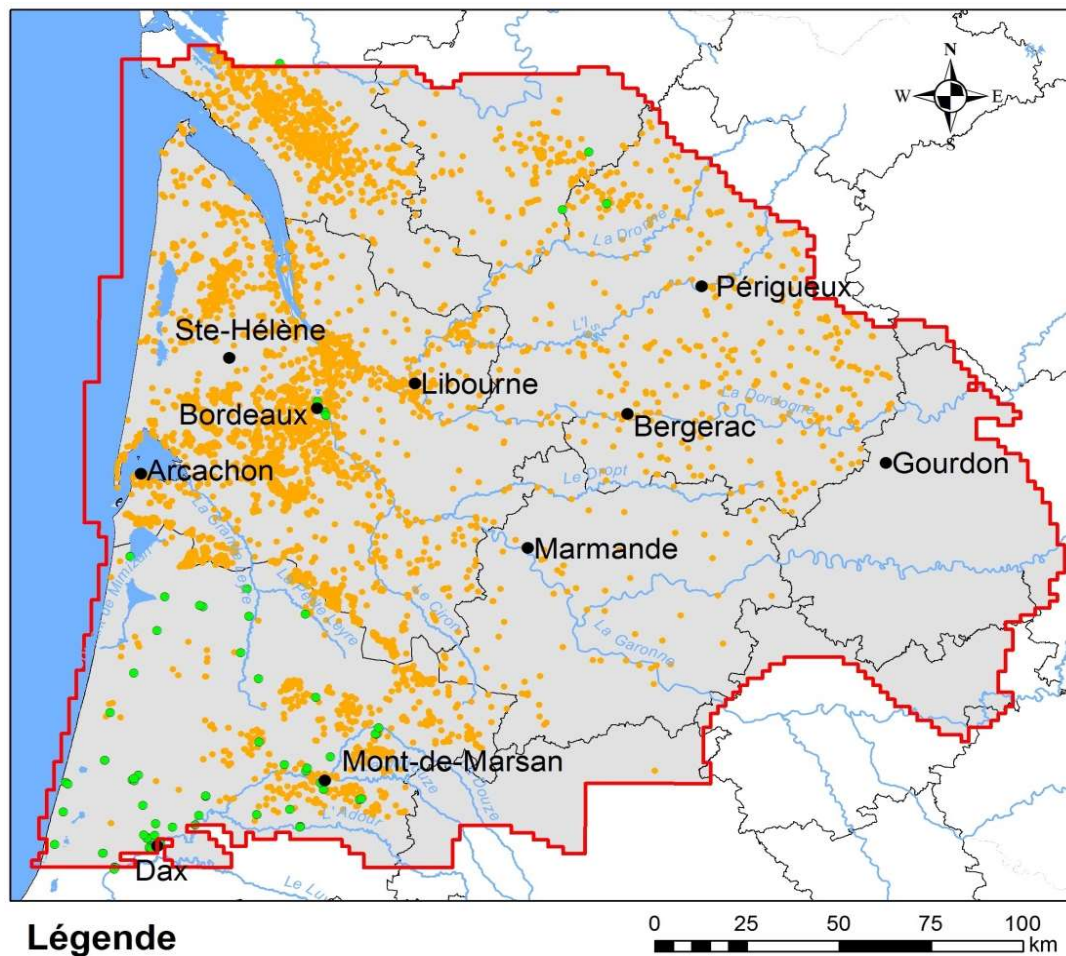
Afin de restituer au mieux les variations piézométriques de chacune des nappes modélisées sur l'ensemble de la période considérée (1972-2015), il est nécessaire d'acquérir une connaissance la plus exhaustive possible des prélèvements dans les nappes. Un important travail de collecte des données de prélèvements est donc nécessaire.

2.1.1. Collecte des données de prélèvements

Le BRGM dispose d'une base de données de prélèvements référençant l'ensemble des volumes prélevés chaque année dans les différents ouvrages situés dans la zone d'extension du MONA. Cette base est constituée des données recueillies annuellement dans le cadre du programme de « Gestion des nappes d'eaux souterraines du département de la Gironde » (GN33). La collecte des données est réalisée auprès des exploitants et chaque prélèvement est rattaché à un ouvrage parfaitement localisé. En complément, la Chambre d'Agriculture de la Gironde fournit les estimations des prélèvements agricoles basées sur des sollicitations auprès des agriculteurs et sur les conditions climatiques de l'année considérée.

Dans les autres départements, le BRGM ne procède pas au recueil annuel des volumes prélevés sur les captages d'eaux souterraines. Les données sont recueillies principalement auprès de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Ponctuellement, des études spécifiques peuvent alimenter la base des données de prélèvements.

Lors de la dernière actualisation, la base comprenait 6 240 points de prélèvements. Suite au travail mené lors de cette étude, 74 nouveaux points de prélèvement ont pu être ajoutés à la base pour un total de 6 314 forages (Illustration 1). Pour chaque forage, des volumes annuels sont renseignés sur la période 1972-2015. Les points de prélèvements sont particulièrement concentrés au niveau de l'agglomération de Bordeaux et de ses environs, au sud de la Charente-Maritime et à l'est des Landes. Les points ajoutés représentent un volume de près de 13 millions de m³ pour 2015 (Tableau 1), soit 4,4% du volume total. Ils correspondent essentiellement à des anciens forages répertoriés dans le cadre du projet GAIA. La nappe de l'Oligocène regroupe environ la moitié des volumes prélevés sur les 74 forages.



Légende

Points de prélèvement

- Anciens points
- Nouveaux Points

Illustration 1 - Localisation des 6 314 points de prélèvements pris en compte dans l'actualisation 2015 du modèle

Aquifères	2012	2013	2014	2015
Quaternaire	777 368	754 514	679 561	673 003
Langhien-Serravallien	1 976 407	2 144 877	2 199 945	1 925 985
Aquitanién	2 392 207	2 595 112	2 378 836	2 739 469
Oligocène	6 657 075	7 155 618	6 885 732	6 602 652
Coniacien-Santonien	390 101	347 835	368 867	400 033
Turonien	457 638	556 443	543 873	409 447
Cénomanién	0	192 601	180 591	169 092
Tithonien	56 168	50 663	40 243	35 437
TOTAL	12 706 963	13 797 661	13 277 646	12 955 117

Tableau 1 - Volumes annuels en m³ captés par les 74 nouveaux points intégrés dans le modèle

2.1.2. Traitement des données collectées

Les chroniques brutes de prélèvements recensés proviennent d'organismes différents ayant chacun leurs objectifs propres (connaissance pour le BRGM et les Chambres d'Agriculture, redevance pour l'AEAG, besoins de gestion et redevances pour les entreprises privées et les syndicats/régies), d'où des architectures de bases de données très hétérogènes. Chaque organisme applique généralement son propre système de codification pour identifier les ouvrages malgré l'existence de l'indice national issu de la Banque du Sous-Sol (BSS). De plus, suivant les bases de données, la qualité de la géolocalisation des points peut être très variable et la valeur des volumes prélevés aux points d'eau également. De ce fait, un travail important est mené depuis plusieurs années pour établir le lien entre les codes BSS et les codes adoptés par les différents organismes, et notamment ceux de l'AEAG qui dispose des données de volumes les plus nombreuses à l'échelle du territoire. Depuis 5 ans, la création d'une base de données unique des prélèvements au sein du BRGM Nouvelle-Aquitaine permet une gestion cohérente et homogène de celle-ci (validation géologique, historique des modifications, typologie de la source d'information, ...). Cette démarche bénéficie à l'ensemble des projets pour lesquels son utilisation est nécessaire. Elle répond plus particulièrement à un besoin de connaissance fine des volumes prélevés, que ce soit ou non dans le cadre de projets de modélisation. Pour mener à bien le suivi sur le long terme des prélèvements, l'ensemble des données collectées par le BRGM auprès de l'AEAG, des exploitants, dans les rapports de bureaux d'études ou dans des thèses est compilé au sein de la Base « Prélèvements » propre au BRGM Nouvelle-Aquitaine. Cette base identifie chaque volume prélevé à un ouvrage, son « type » (volume réel, estimé ou reporté), sa « source » (l'organisme ayant fourni la donnée) et un commentaire (facultatif) permettant d'apporter un complément d'information. Cette procédure permet d'assurer un suivi sur le long terme de l'évolution des volumes prélevés en un point, de faciliter sa mise à jour d'année en année en identifiant la source d'information ou encore d'enregistrer les écarts de volumes d'une source d'information à une autre (les volumes déclarés à l'Agence de l'Eau peuvent être différents pour un même point de ceux figurant dans des rapports ou même de ceux fournis directement par l'exploitant).

Le rapprochement entre les données issues de la BSS et les points de prélèvements provenant de l'AEAG a été réalisé sous un SIG (Système d'Information Géographique). La toponymie associée au forage (profondeur de l'ouvrage, usage...) a permis d'affiner la mise en relation. Lors de cette actualisation, une attention particulière a été portée au département des Landes comme le montre la carte en illustration 1.

Le travail de rapprochement des bases est réalisé en premier lieu avec les volumes AEP et industriels disponibles via l'Agence de l'Eau. L'actualisation réalisée dans le cadre de cette étude permet à ce jour de disposer de 1 533 ouvrages avec une correspondance entre code BSS et code AEAG sur les 6 314 forages que contient la base forage MONA, contre 1 293 lors de la dernière actualisation.

2.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du MOdèle Nord-Aquitain pour la période 2012-2015

Les prélèvements totaux, par an et par nappe, injectés dans le modèle Nord-Aquitain pour les années 2012 à 2015 sont indiqués ci-après (Tableau 2).

Lorsqu'un ouvrage capte plusieurs aquifères à la fois, le volume prélevé est soit réparti sur chaque couche en fonction des informations fournies par les diagraphies de flux, soit divisé en parts égales entre chaque aquifère faute de renseignement.

Aquifères	2012	2013	2014	2015
Langhien-Serravallien	25 074 195	24 610 006	24 648 737	25 671 649
Aquitanien	37 783 698	37 491 620	37 097 724	38 023 952
Oligocène	69 336 078	71 263 077	70 245 723	69 130 974
Eocène supérieur	2 806 701	2 573 087	2 683 633	2 868 552
Eocène moyen	58 826 546	53 360 899	52 193 592	58 581 981
Eocène inférieur	9 636 781	9 075 498	9 122 762	9 854 934
Campanien	14 466 896	14 293 286	14 261 846	14 664 146
Coniacien-Santonien	20 188 245	19 960 747	18 780 581	19 166 979
Turonien	27 891 484	27 480 405	27 203 709	26 656 750
Cénomanién	12 434 921	12 673 659	12 501 802	12 711 127
Tithonien	1 065 818	963 294	851 298	963 809
Kimméridgien	3 131 041	3 338 948	2 995 652	3 050 850
Bathonien-Callov-Oxfordien	11 327 557	10 698 284	10 790 168	11 325 291
Bajocien	4 269 302	4 332 054	4 297 800	4 369 170
TOTAL	298 239 262	292 114 864	287 675 027	297 040 161

Tableau 2 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA-V3.3b de 2012 à 2015 (m³/an)

En termes de nature des prélèvements, parmi les 6314 forages, on retrouve 4216 ouvrages à usage agricole, 1204 ouvrages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP), 232 forages liés à une activité industrielle, 402 points de prélèvements connaissant des usages variés (thermalisme, embouteillage, chauffage, eau individuelle, etc.) et enfin 260 ouvrages n'ayant pas d'usage connu. La répartition géographique des points de prélèvements est la suivante :

- Gironde : 4 399 forages,
- Charente-Maritime : 688 forages,
- Landes : 610 forages,
- Dordogne : 400 forages,
- Charente : 131 forages,
- Lot-et-Garonne : 85 forages,
- Gers : 1 forage.

Sur les 6 314 points de prélèvement intégrés dans le modèle, 89 se trouvent hors de l'extension du MONA V3, à moins de 2 km de la limite, mais ont tout de même été intégrés dans le modèle dans la maille la plus proche. Le maillage de la version 3 du modèle (2 km x 2 km) ne permet pas de retranscrire au mieux les limites de réservoirs, cette opération a donc été menée pour augmenter la représentativité.

Le graphique des prélèvements annuels (Illustration 2) montre que les aquifères de l'Oligocène et de l'Eocène moyen sont les plus sollicités. En effet, les volumes prélevés dans ces réservoirs s'élèvent à près de 20% du volume total pour chacun d'eux. Il apparaît que l'Oligocène est l'aquifère le plus exploité depuis les années quatre-vingt-dix. La tendance est relativement stable depuis les années 2000, hors variations annuelles liées au contexte climatique. Pour certaines nappes (Oligocène, Aquitanien, Turonien...) on observe une baisse des prélèvements. Pour

l'Oligocène, cette baisse intervient même si des volumes non négligeables ont été ajoutés suite à l'ajout des 74 nouveaux points. Cette inflexion s'inscrit dans une tendance générale de la baisse de la consommation visible à l'échelle nationale. Cette réduction de la demande vient donc compenser voire contrebalancer la croissance démographique de la population française.

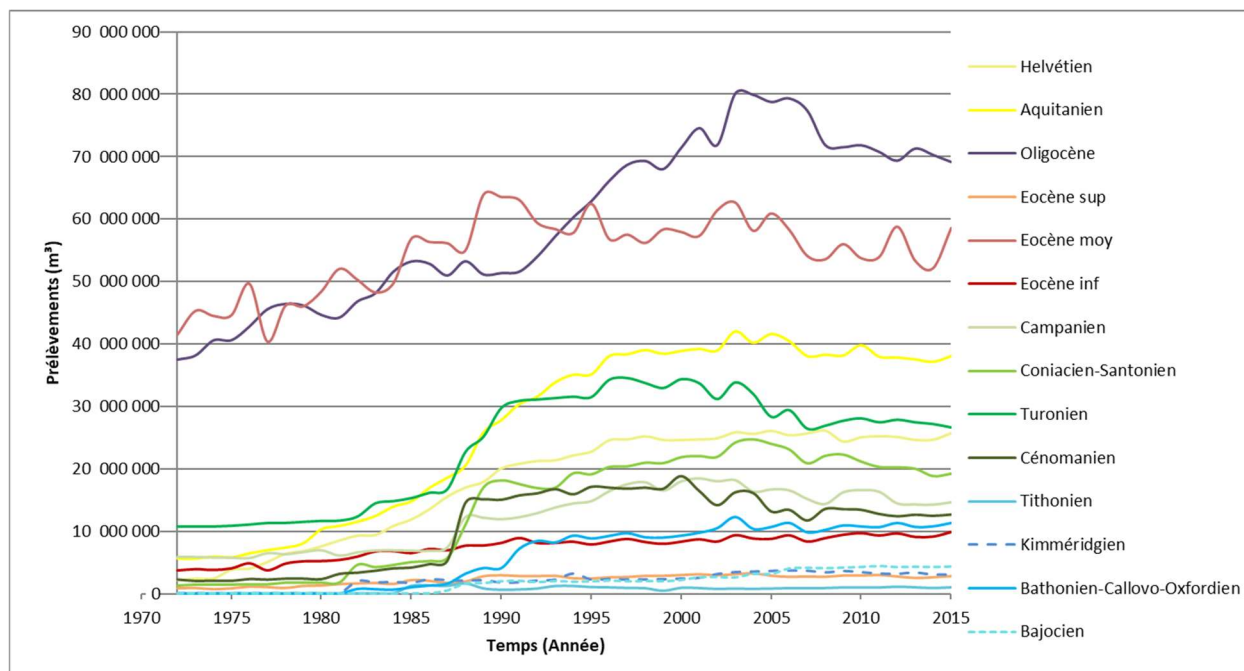


Illustration 2 - Évolution des prélèvements dans les couches du MOdèle Nord-Aquitain, de 1972 à 2015, tous départements confondus

Comme dans les versions antérieures du MONA, les prélèvements dans la nappe du Plio-Quaternaire ne sont pas pris en compte. Dans le cadre du module 1.3 sur le modèle Plio-Quaternaire, un travail de synthèse sur les prélèvements a été réalisé. Il a permis d'établir la chronique des prélèvements sur cette nappe sur la période 2000-2014. Un travail spécifique de ventilation mensuelle a été réalisé. Cependant, un travail reste à réaliser sur la connaissance des prélèvements avant 2000. Et plus spécifiquement sur le territoire des Landes où l'affectation des prélèvements physiques à un point BSS n'est pas établie pour les forages servant à l'irrigation.

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

2.2.1. Les précipitations efficaces

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

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

- des précipitations (P),
- de l'évapotranspiration potentielle (ETP),

- de la capacité maximale en eau du sol (la réserve utile RU), fixée à deux valeurs : 100 mm et 150 mm. L'utilisation de deux valeurs distinctes est liée à la règle adoptée pour le calcul de la recharge (cf. 2.2.2).

L'évolution des précipitations efficaces annuelles calculées depuis 1972 (pour une RU de 150 mm) avec les données pluviométriques de la station de mesure de Mérignac en Gironde (Illustration 3) présente une valeur relativement faible pour 2015, correspondant à la moitié de la moyenne inter-annuelle sur la période 1972-2015. La situation est encore plus critique pour les autres stations météorologiques prises en compte dans le modèle (Tableau 3). La pluie efficace est remarquablement faible pour la station de Bergerac en Dordogne, avec seulement 11 mm en 2015.

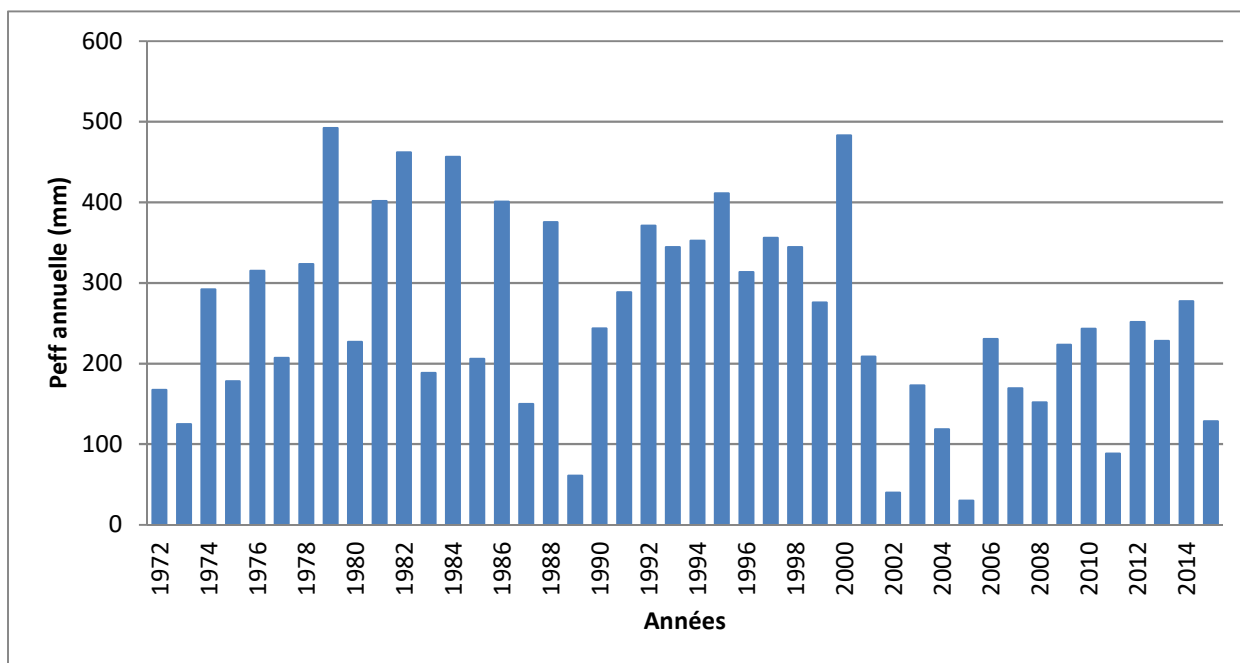


Illustration 3 - Précipitations efficaces annuelles (Pe_{eff}) pour la station de Mérignac en Gironde, au cours de la période 1972 - 2015, pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm

Années	Précipitations efficaces Pe _{eff} (mm) selon les stations					
	Mérignac RU 150 (33)	Mérignac RU 100 (33)	Cognac (16)	Gourdon (46)	Bergerac (24)	Mont-de- Marsan (40)
2012	251	301	144	91	31	268
2013	228	278	197	267	163	421
2014	277	326	165	173	191	275
2015	129	130	52	43	11	190
Moyenne 1972-2015	258	305	158	164	150	295

Tableau 3 - Précipitations efficaces (mm) en 2012, 2013, 2014 et 2015, calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA

2.2.2. La recharge

Le mode de calcul de la recharge pour la période d'actualisation est le même que celui utilisé lors des phases de calage des différentes versions du modèle qui se sont succédées depuis 1998. Le calcul est détaillé dans le rapport BRGM/RP-53659-FR (Pédron, et al., 2005). Dans cette phase, la recharge année par année a été évaluée suivant les secteurs en prenant comme référence la pluie efficace annuelle moyenne de la station météo considérée, calculée sur la période 1972-2000 (avec une RU maximale de 150 mm).

A partir des valeurs de recharge du régime permanent, les valeurs année par année pour chaque zone d'infiltration définie lors de la phase de calage sont obtenues par :

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

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

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

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

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

La localisation des zones de recharge de chaque couche du modèle ainsi que les stations météorologiques qui s'y rattachent sont présentées en illustration 4. Les 5 stations météorologiques considérées (Mérignac, Bergerac, Gourdon, Cognac et Mont de-Marsan) sont utilisées pour le calcul de la recharge dans les mailles d'affleurement. Elles ont été choisies pour leur représentativité. Elles sont bien réparties sur le territoire modélisé et présentent des chroniques de pluies et d'ETP sur plus de 40 ans qui peuvent donc être utilisées pour le calcul de la recharge du modèle sur chaque pas de temps depuis l'état initial (1972).

Le Plio-Quaternaire constitue l'aquifère le plus superficiel du modèle Nord-Aquitain et affleure sur toute la partie ouest de la zone d'étude. L'attribution des flux d'infiltration s'y fait donc par grandes plages. Par contre, les zones d'affleurement des aquifères plus profonds sont peu nombreuses et souvent localisées. Il peut y avoir des écarts importants entre la superficie réelle des affleurements et la superficie des mailles correspondantes (4 km² par maille), ce qui impose de distribuer le flux d'infiltration dans les mailles en fonction de la superficie réelle des affleurements. Les superficies des affleurements dans les mailles de la grille du modèle de 2 km de côté ont été entièrement recalculées et regroupées en classes (0 à 10%, 10 à 20%, ...).

Chaque maille de recharge directe a ensuite été rattachée (en utilisant les polygones de Thiessen) à une station météorologique en fonction de sa localisation géographique (Illustration 4) de façon à moduler la recharge calculée en fonction de la variabilité spatiale des pluies efficaces.

Chaque maille d'affleurement du modèle est affectée d'un numéro de zone de recharge (ou météorologique [ZMTO] dans le logiciel MARTHE) qui dépend de la couche considérée, de la station météorologique à laquelle elle est rattachée et de la classe correspondant au rapport de la superficie réelle de l'affleurement sur la superficie totale de la maille (4 km²).

La nomenclature de codification des mailles est décrite ci-dessous :

14 1 9

- 14 : numéro de la couche du modèle, en l'occurrence le Bathonien-Callovio-Oxfordien ;
1 : numéro de la station météorologique ;
9 : superficie réelle de l'affleurement dans la maille, comprise ici entre 90 et 100% (Classe 9).

Cette numérotation permet d'ajouter des couches ou de prendre en compte des stations météorologiques supplémentaires sans modifier l'existant.

Les données de pluies efficaces calculées à la station de Mérignac, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour l'Eocène (sup., moy. et inf.), le Campano-Maastrichtien et le Turonien-Coniacien-Santonien.

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

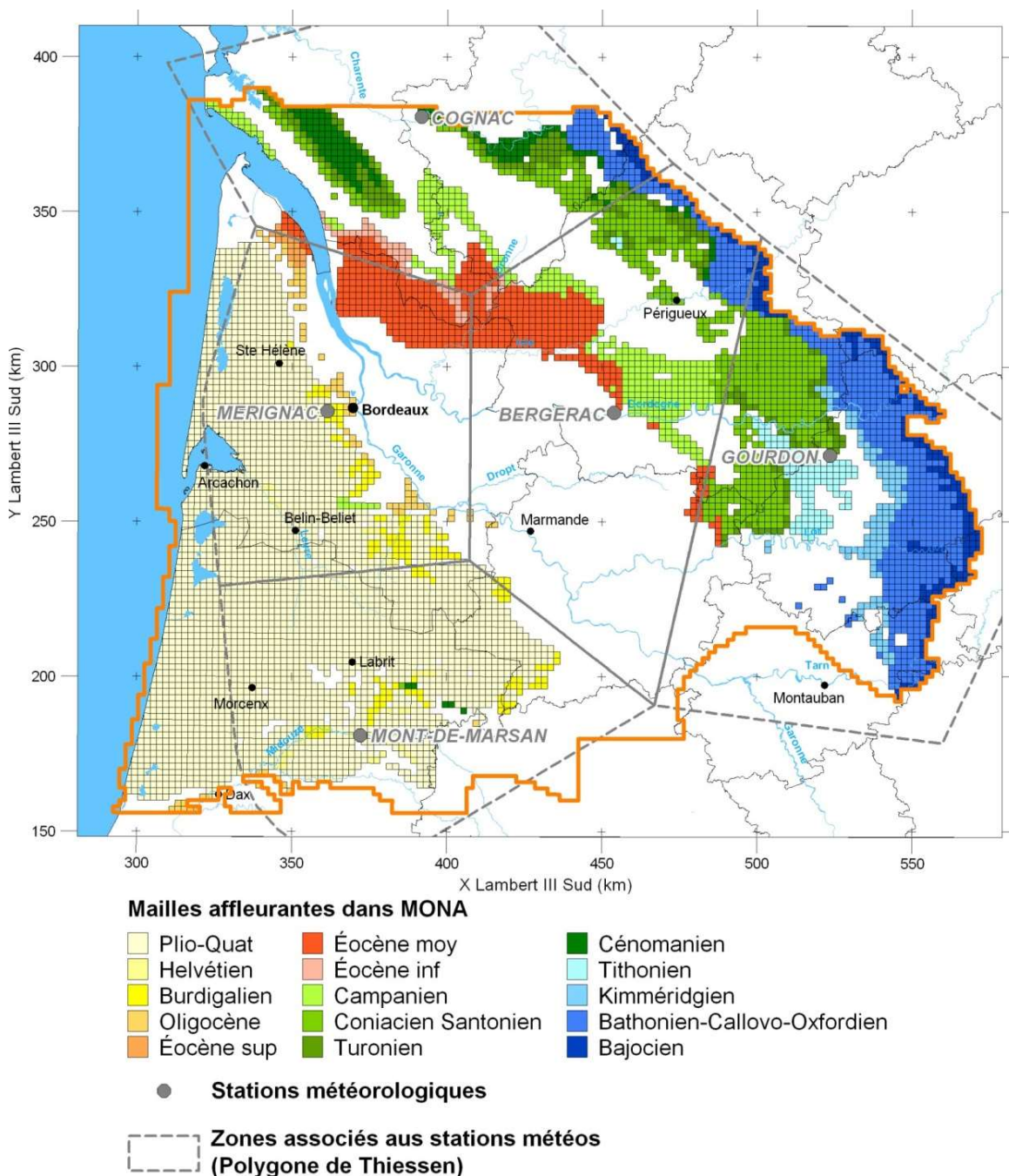


Illustration 4 - Localisation des zones d'affleurement du modèle dans sa version 3.3b, pour chaque nappe, et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge

Les données de la station de Mérignac, pour une RU de 100 mm, sont utilisées pour le calcul de la recharge des nappes plio-quaternaire, miocènes (Aquitanién-Burdigalien et Langhien - Serravallien) et oligocène. Les données des stations de Cognac et de Gourdon, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour le Turonien-Coniacien-Santonien et le Campano-Maastrichtien.

Les données de Mont-de-Marsan, pour une RU de 100 mm, sont utilisées pour le Plio-Quaternaire. Les pluies efficaces trimestrielles supérieures ou égales à 250 mm sont réduites de 30 %. Cet écrêtage simule la diminution de l'infiltration (augmentation de la part du ruissellement) dans les écoulements durant les périodes fortement pluvieuses.

2.3. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

2.3.1. Mise à jour des chroniques d'observations

Le calage et la validation du modèle s'appuient sur des chroniques de référence que le modèle doit restituer au mieux en respectant à la fois les niveaux observés, la pente, la phase et l'amplitude des variations.

Pour qu'une chronique piézométrique soit exploitable, elle doit être suffisamment étoffée et longue. L'aquifère capté doit être connu avec certitude et être unique (sauf lorsque deux réservoirs sont sollicités mais pas individualisés par une éponte). Le pas d'acquisition des mesures est variable d'un point à un autre (journalier, hebdomadaire, ..., annuel). L'attribution du réservoir capté pour chacun des points d'observation a fait l'objet d'une validation par le géologue régional du BRGM. Ce sont au total 428 chroniques qui sont utilisées pour le calage et la validation du modèle (Tableau 4). Du fait que certains ouvrages captent plusieurs aquifères, ce sont au total 437 points de contrôle qui permettent de valider le calage du modèle.

L'ensemble des chroniques piézométriques utilisées pour le calage du modèle Nord-Aquitain a été actualisé jusqu'en 2015. Ces données ont été principalement extraites de la Banque de Données sur les Eaux Souterraines (BDES) gérée par le BRGM et la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES). La localisation des points de mesures est présentée en illustration 5.

<i>Aquifère</i>	<i>Couche du modèle</i>	<i>Nombre de chroniques utilisées pour le calage</i>
<i>Plio-Quaternaire</i>	1	24
<i>Langhien-Serravallien</i>	2	10
<i>Aquitainien</i>	3	43
<i>Oligocène</i>	4	60
<i>Éocène sup</i>	5	10
<i>Éocène moy</i>	6	76
<i>Éocène inf</i>	7	24
<i>Campanien</i>	8	56
<i>Coniacien-Santonien</i>	9	22
<i>Turonien</i>	10	35
<i>Cénomanién</i>	11	21
<i>Tithonien</i>	12	7
<i>Kimmeridgien</i>	13	8
<i>Bathonien-Callov-Oxfordien</i>	14	32
<i>Bajocien</i>	15	9
	TOTAL	437

Tableau 4 - Nombre de chroniques piézométriques utilisées pour le calage

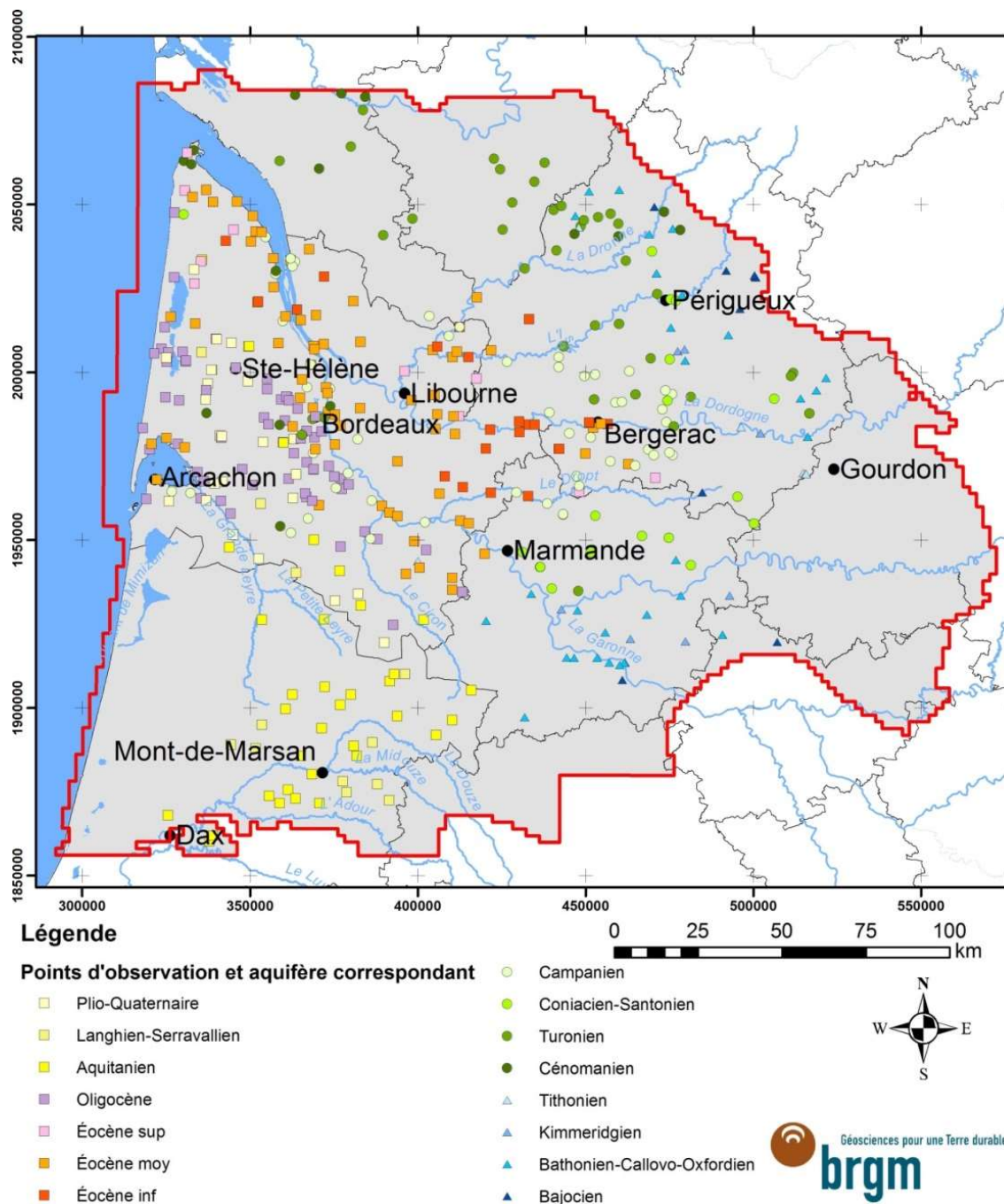


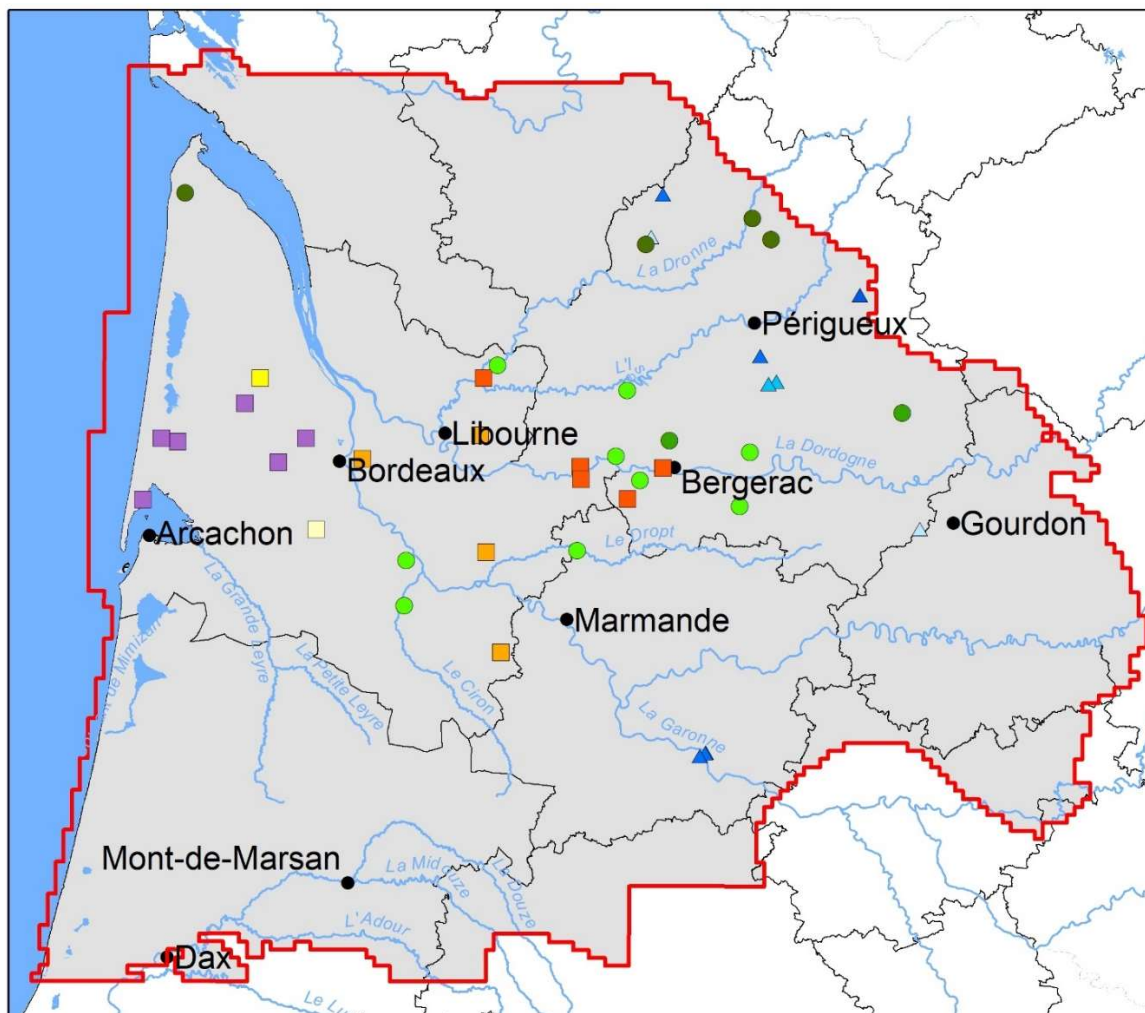
Illustration 5 - Localisation des 428 points de mesures piézométriques

2.3.2. Campagne piézométrique complémentaire

Sur les 428 points d'observation du modèle, certains ne sont plus suivis depuis de nombreuses années. Pour s'assurer de la fiabilité des simulations réalisées, des campagnes de mesures ponctuelles sont réalisées à intervalles réguliers. La première campagne de ce type a été réalisée en 2012, suivi d'une deuxième en 2014. L'objectif est de vérifier que les tendances d'évolutions de la piézométrie calculées par le modèle sont bien en concordance avec les observations.

Les ouvrages intégrés dans cette campagne se situent dans les départements de la Dordogne, de la Gironde et du Lot-et-Garonne. Lors de la campagne réalisée en 2017, 42 points ont été

mesurés, sur un fichier initial de 55 points (Illustration 6). Cette campagne a permis de soulever une mutualisation possible sur 3 sites, une impossibilité de faire une mesure sur 4 sites suite à un rebouchage ou à un effondrement et un suivi régulier sur 5 forages (Tableau 5). Ces 12 forages seront retirés de la prochaine campagne de terrain laissant ainsi la possibilité d'intégrer d'autres points de mesure.



Légende

Points de mesures complémentaires

■ Plio-Quaternaire	■ Éocène inf	▲ Tithonien
■ Aquitanien	● Campanien	▲ Kimméridgien
■ Oligocène	● Turonien	▲ BaCX
■ Éocène moy	● Cénomanién	▲ Bajocien

0 25 50 75 100 km



Illustration 6 - Localisation des points d'observation de la campagne piézométrique complémentaire 2017

Indice BSS	Commune	Lieu-dit	Raison du retrait
07298X0015	GRAYAN-ET-L'HOPITAL	VIDEAU	Situé à proximité d'un forage suivi par le BRGM, mutualisation possible.
08253X0010	LES VIVIERS	GIRONDE	Situé à proximité d'un forage suivi par le BRGM, mutualisation possible.
07598X0004	TOURTOIRAC	LA ROUGERIE	Situé à proximité d'un forage suivi par le BRGM, mutualisation possible.
08785X0002	CLAIRAC	BROC	Suivi par un enregistreur.
08773X0011	LAGRUERE	MOULIOT	Suivi par un enregistreur.
07818X0030	SAINT-MEDARD-DE-MUSSIDAN	DOMAINE DE BASSY	Suivi par un enregistreur.
07787X0002	MOULIS-EN-MEDOC	UNION COOPERATIVE FORESTIERE D'AQUITAINE	Rebouché. Le forage 07787X0010 situé à proximité capte la même nappe et dispose d'un enregistreur.
08275X0070	LEOGNAN	LIPOMEY	Rebouché.
09023X0001	AGEN	PRES DU PONT-CANAL	Forage inaccessible dû à la réhabilitation du site. Un ouvrage à une centaine de mètres capte la même nappe.
07807X0002	COUTRAS	LA FOURCHEE	Forage abandonné.
08268X0021	BARP(LE)	CEA - LE BARP	Données de piézométrie transmises trimestriellement par le CEA.
07807X0004	COUTRAS	CHAMP DE FOIRE	Remplacé par le 07807X0132 suite à un effondrement du forage. Le 07807X0132 capte la même nappe que le 07807X0004.

Tableau 5 - Forages à retirer de la campagne piézométrique complémentaire

2.3.3. Les chroniques de calage

Les graphiques de comparaison entre les courbes d'évolution tracées à partir des mesures et des charges hydrauliques calculées par le modèle pour les différentes nappes sont présentés en annexe 2. L'exemple de restitution ci-dessous (Illustration 7) montre en points bleus les mesures brutes observées et en rouge les niveaux calculés par le modèle version MONA 3.3b 2015 au droit du piézomètre considéré. Sur cette chronique, le modèle retranscrit bien les variations de charges. Néanmoins, comme le modèle calcule les charges au pas de temps annuel, il n'est pas possible de retranscrire les variations saisonnières, comme l'illustrent les variations de la chronique mesurée à partir de 2008.

L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant sur la grande majorité des chroniques de calage pour les nappes considérées (Annexe 2). La plupart des points sont bien reproduits en niveaux, en phase et en pente. Ces résultats confirment la fiabilité du modèle. En effet, sur la période 2013-2015, le modèle retranscrit très convenablement les variations de charge avec les nouvelles données d'entrée sans qu'aucune modification des paramètres hydrodynamiques n'ait été nécessaire.

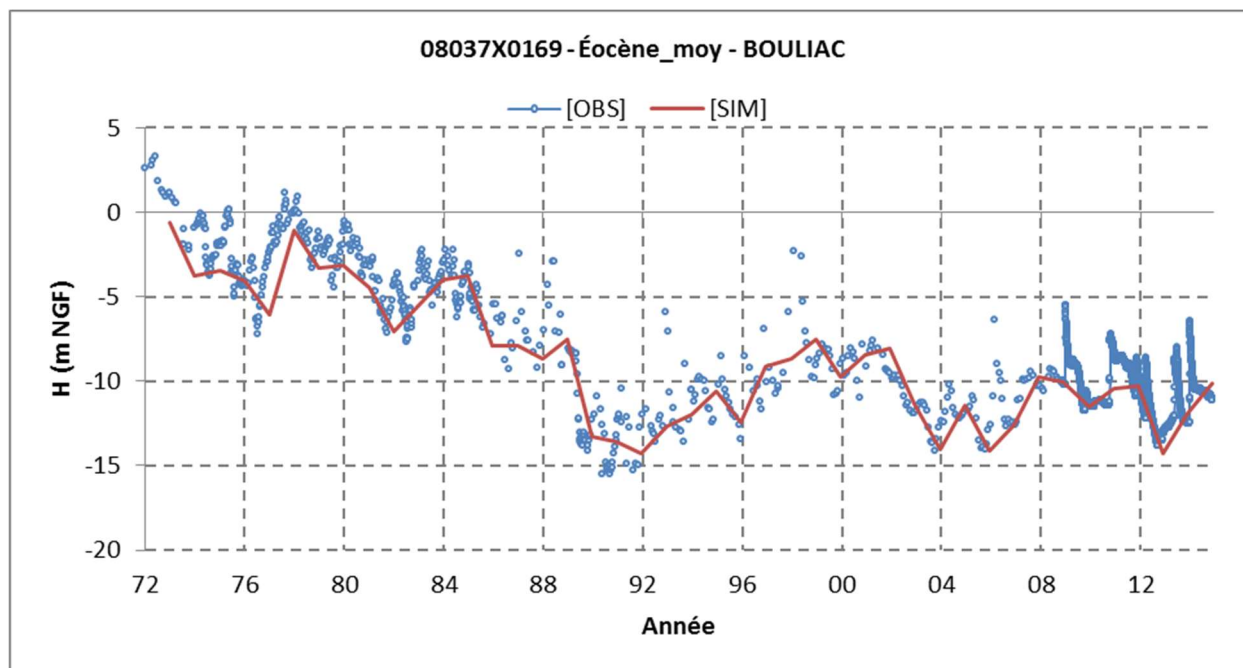


Illustration 7 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Eocène moyen)

2.3.4. Les cartes piézométriques

Le modèle actualisé dans sa version MONA V3.3b-2015 permet de restituer les cartes piézométriques simulées des nappes pour chaque année. Les cartes piézométriques de l'aquifère « Eocène moyen » pour les années 2014 et 2015 peuvent ainsi être comparées (Illustration 9). Ce réservoir présente un enjeu important dans le nord du Bassin aquitain, notamment en Gironde où il est sollicité pour l'alimentation en eau potable de l'agglomération bordelaise. La comparaison des deux cartes montre une baisse de la piézométrie à l'ouest et au sud-ouest de l'agglomération bordelaise se traduisant par une diminution des charges au droit du cône de dépression situé sous l'agglomération de Bordeaux. Les baisses pouvant atteindre près de 10 m entre 2014 et 2015 (Illustration 10). Ceci est confirmé par des données observées : situé au droit de la dépression, à Camblanes-et-Meynac, sur l'ouvrage 08273X0288 un relevé piézométrique de - 14 m NGF avait été effectué en septembre 2014. Depuis lors, la tendance générale est à la baisse avec un niveau atteignant - 21 m NGF fin 2014 (Illustration 8).

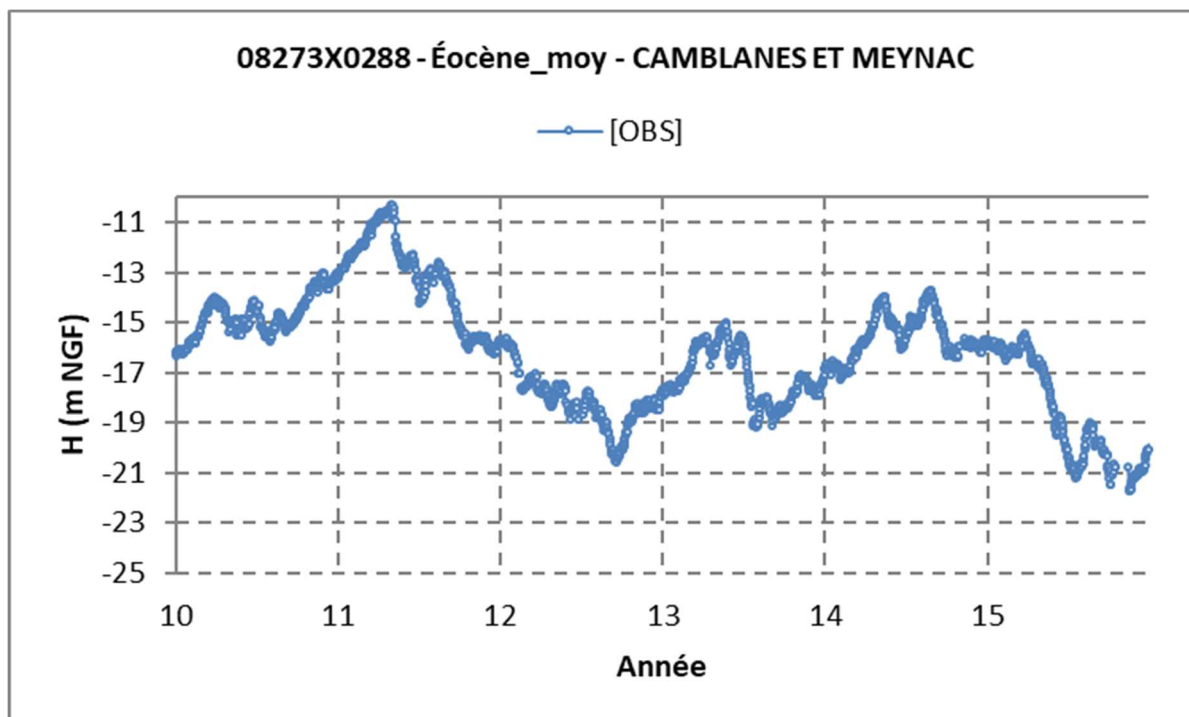


Illustration 8 - Évolution de la piézométrie de la nappe de l'Éocène moyen dans le secteur de Camblanes-et-Meynac

L'évolution à la baisse des niveaux de la nappe est significative en 2015, elle est particulièrement marquée au sud de Bordeaux. Cette évolution contraste avec la tendance observée depuis 2012 (Saltel, 2017) qui se traduisait par une hausse des charges. La comparaison entre les données de prélèvements et la piézométrie montre une corrélation nette (Illustration 11). En effet, au droit des zones où la piézométrie a baissé de plus de 5 mètres, les volumes prélevés ont augmenté de plus de 5 millions de m³. En effet, la nappe étant captive, les variations de la piézométrie sont dues sur le court terme aux variations des volumes prélevés. L'analyse des volumes prélevés depuis 2011 sur ces points illustre que l'augmentation des volumes en 2015 impacte directement les chroniques piézométriques. Il y a corrélation entre les volumes prélevés et les niveaux piézométriques.

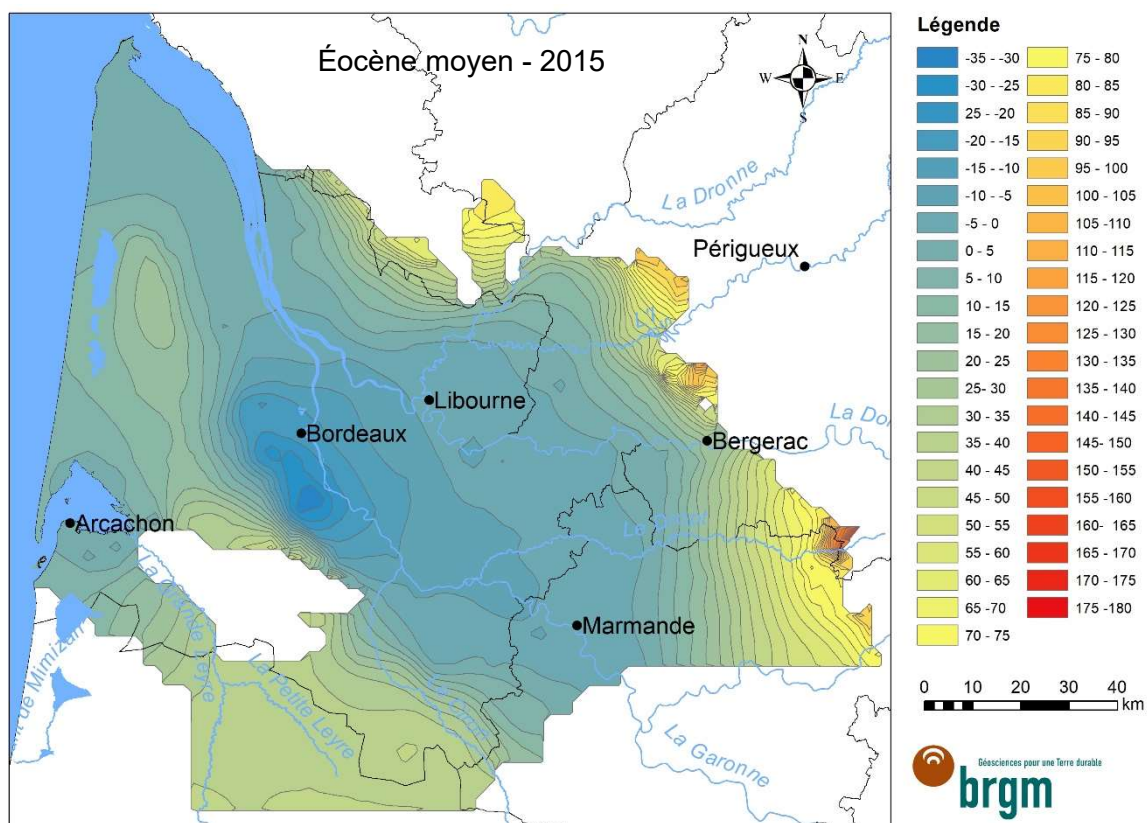
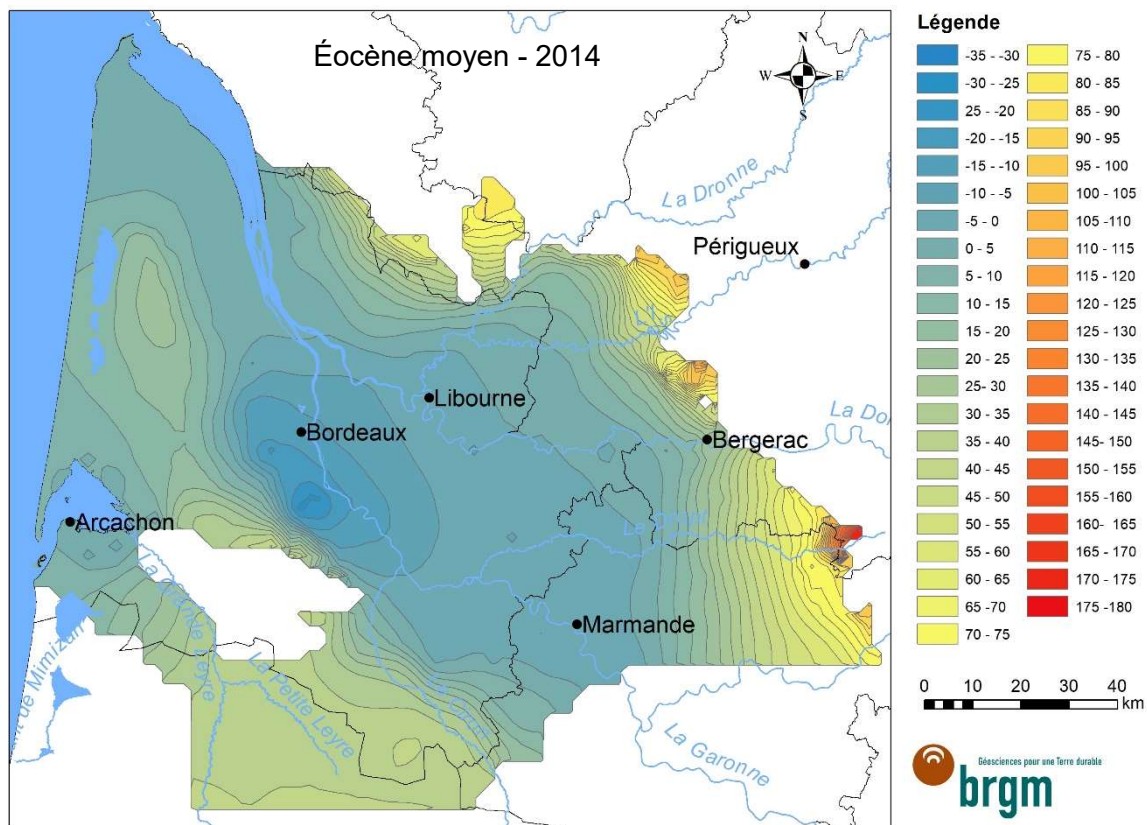


Illustration 9 - Niveaux piézométriques simulés par le MOdèle Nord-Aquitain, version MONA V3.3b-2015, dans l'aquifère « Eocène moyen », pour les années 2014 (haut) et 2015 (bas)

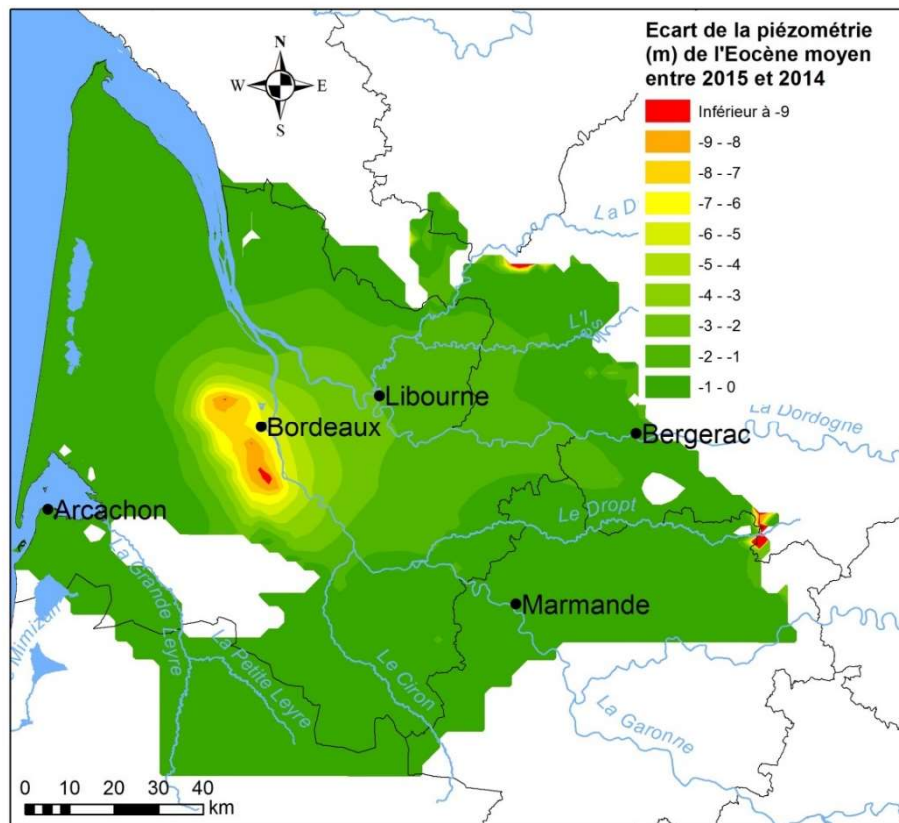


Illustration 10 - Ecart entre les niveaux simulés en 2015 et en 2014 pour la nappe de l'Eocène moyen

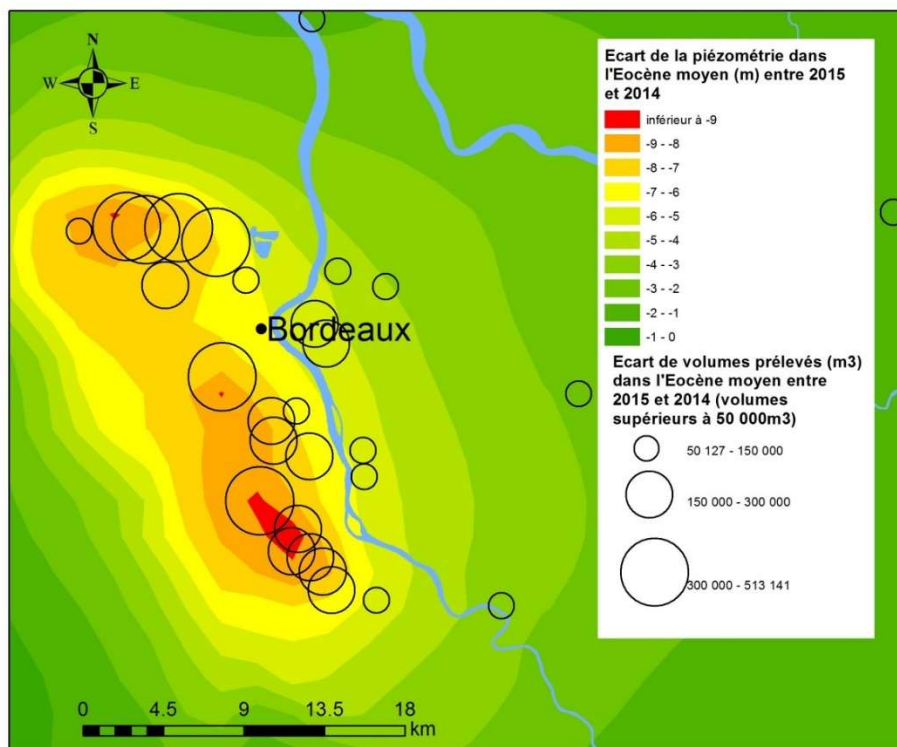


Illustration 11 - Ecart entre les niveaux simulés en 2015 et en 2014, pour la nappe de l'Eocène moyen et écart de prélèvements de plus de 50 000 m³

3. Développement du MONA

3.1. DESCRIPTION DE LA VERSION 4 DU MONA

Le développement du MOdèle Nord-Aquitain version 4 (MONA V4) a été initié dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » 2008-2013. Il s'appuie essentiellement sur la représentation plus fine de la géologie des réservoirs du nord du bassin Aquitain, modélisée à l'aide du logiciel GDM. Dans sa configuration actuelle, le MONA V4 comporte 30 couches dont 15 aquifères, 14 épontes et une couche de recouvrement quaternaire (Illustration 12), définies avec des mailles carrées de 500 m de côté (soit 2 379 154 mailles de calcul effectives). Des premières simulations en régime permanent ont été menées, avec des résultats encourageants en particulier pour les aquifères du Tertiaire.

			NATURE	Codification MONA	N° Couche
IVaire et Illaire			Formations de recouvrement et alluvions flandriennes		
QUATERNAIRE				RECO	1
TERTIAIRE	NEOGENE	Plio-Quaternaire	AQUIFERE	QUAT	2
		Eponte au sommet du langhien-Serravallien	EPONTE	EPLS	3
		Langhien Serravallien (Miocène moyen)	AQUIFERE	LASE	4
		Eponte au sommet de l'Aquitani	EPONTE	EPAQ	5
		Aquitani (Miocène inférieur)	AQUIFERE	AQUI	6
	PALEOGENE	Eponte Chattien-Miocene	EPONTE	EPCM	7
		Oligocène	AQUIFERE	OLNP	8
		Eponte à la base de l'Oligocène	EPONTE	EPOL	9
		Eocène supérieur	AQUIFERE	EOCS	10
		Eponte à la base de l'Eocène supérieur	EPONTE	EPES	11
		Eocène moyen	AQUIFERE	EOCM	12
		Eponte à la base de l'Eocène moyen	EPONTE	EPEO	13
		Eocène inférieur	AQUIFERE	EOCI	14
SECONDAIRE	CRETACE	Eponte au sommet du Campanien	EPONTE	EPCA	15
		Campanien	AQUIFERE	CAMP	16
		Eponte au sommet du Coniacien-Santonien	EPONTE	EPCS	17
		Coniacien-Santonien	AQUIFERE	COST	18
		Eponte au sommet du Turonien	EPONTE	EPTU	19
		Turonien	AQUIFERE	TURO	20
		Eponte au sommet du Cenomanien	EPONTE	EPCE	21
		Cénomanien	AQUIFERE	CENO	22
	JURASSIQUE	Eponte au sommet du Tithonien	EPONTE	EPTI	23
		Tithonien	AQUIFERE	TITH	24
		Eponte au sommet du Kimméridgien	EPONTE	EPKI	25
		Kimméridgien	AQUIFERE	KIMM	26
		Eponte au sommet du Bathonien-Callov-Oxfordien	EPONTE	EPCX	27
		Bathonien-Callov-Oxfordien	AQUIFERE	BACX	28
		Eponte au sommet du Bajocien	EPONTE	EPBJ	29
		Bajocien	AQUIFERE	BAJO	30

Illustration 12 - Description des différentes couches du MONA V4 (Saltel, et al., 2017)

Le développement du MONA V4 se poursuit à présent dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » 2015-2020. Il se concentre sur le passage du modèle en régime transitoire et s'accompagne de modifications importantes par rapport à la version précédente du modèle (V3.3b) ; en particulier :

- la recharge est calculée à l'aide d'un bilan hydroclimatique Pluie-Évapotranspiration réalisé avec le schéma GARDENIA couplé à MARTHE. Les données de pluie et d'évapotranspiration utilisées sont issues des réanalyses SAFRAN fournies par Météo-France, disponibles à l'échelle de la maille SAFRAN 8 km x 8 km sur l'ensemble du secteur d'étude, au pas de temps

journalier. Les paramètres de sol nécessaires au schéma GARDENIA (Réserve disponible pour l'évapotranspiration, Temps de demi-percolation, Paramètre de Ruissellement-Percolation) ont été définis et spatialisés sur le secteur d'étude sur la base de simulations GARDENIA réalisées sur une sélection de bassins versants (Saltel, et al., 2015) ;

- la prise en compte du réseau hydrographique sur le secteur d'étude et des échanges nappe-rivière. Le réseau hydrographique est couplé à la nappe lors des calculs d'écoulement, ainsi qu'au bilan hydroclimatique, dans la mesure où c'est vers le réseau hydrographique qu'est dirigé le ruissellement et le débordement ;
- La répartition temporelle des prélèvements sur l'année (pas de temps trimestriel ou annuel), avec en particulier une discrétisation temporelle plus fine des prélèvements AEP liée au tourisme saisonnier et une répartition des prélèvements agricoles sur les périodes d'irrigation.

En dehors de ces modifications majeures, les conditions hydrauliques aux limites du MONA V4 restent dans l'ensemble similaires à la version V3.3b (Saltel, et al., 2017). Plusieurs tests de simulation en régime transitoire ont été menés sur la période 1996-2014 ; le calcul de la recharge est réalisé au pas de temps journalier et le calcul hydrodynamique est réalisé au pas de temps trimestriel. Le modèle converge de manière satisfaisante et la simulation est achevée en 9h30 sur un ordinateur portable avec un processeur de 2.5 GHz et 16 Go de RAM, sur une version 64 bits de MARTHE (Note : Le modèle V3.3b tourne en 8 minutes sur la même machine). L'augmentation substantielle du temps de calcul est surtout liée au nombre de mailles (15 couches et 66 973 mailles actives dans la version 3.3b ; 30 couches et 2 379 154 mailles actives dans la version 4).

3.2. COMPARAISON ENTRE LA VERSION 3.3 ET LA VERSION 4

Du fait de l'ampleur des temps de calcul du MONA V4 dans sa version actuelle et sur les machines usuelles, il s'avère difficile de procéder à la vérification simple des données d'entrée et la comparaison entre versions du MONA. Dans un premier temps, il est décidé de revenir au modèle V3.3b et d'y insérer les nouvelles modifications de manière séquentielle (prise en compte de la recharge, nouvelle géométrie) et de comparer à chaque étape les sorties du modèle modifié avec le modèle initial V3.3b. Dans la suite du rapport, les modèles modifiés seront dénommés comme suit :

- modèle MONA V3.4a ► intégration à la version 3.3b du calcul de la recharge via le module GARDENIA,
- modèle MONA V3.4b ► intégration à la version 3.3b du calcul de la géométrie du V4 à la maille de 2 km.

3.2.1. MONA V3.4a - Prise en compte du bilan hydroclimatique

De la même manière que pour le MONA V4 (Saltel, et al., 2017), les données de pluie et d'évapotranspiration sont issues des réanalyses SAFRAN fournies par Météo-France, définies à l'échelle de la maille SAFRAN de dimension 8 km x 8 km sur l'ensemble du secteur d'étude, et qui constituent autant de zones météorologiques (« zones Météo ») dans lesquelles les données climatiques sont uniformes (Illustration 13). A noter que la recharge n'est calculée qu'au droit des affleurements de couches aquifères.

Les paramètres des réservoirs du schéma GARDENIA sont définis en utilisant la même méthode que pour le MONA V4 (Saltel, et al., 2015). 11 zones de sol basées sur la géologie sont définies sur l'ensemble du secteur d'étude, correspondant à des comportements homogènes vis-à-vis de la recharge et du ruissellement (Illustration 14).

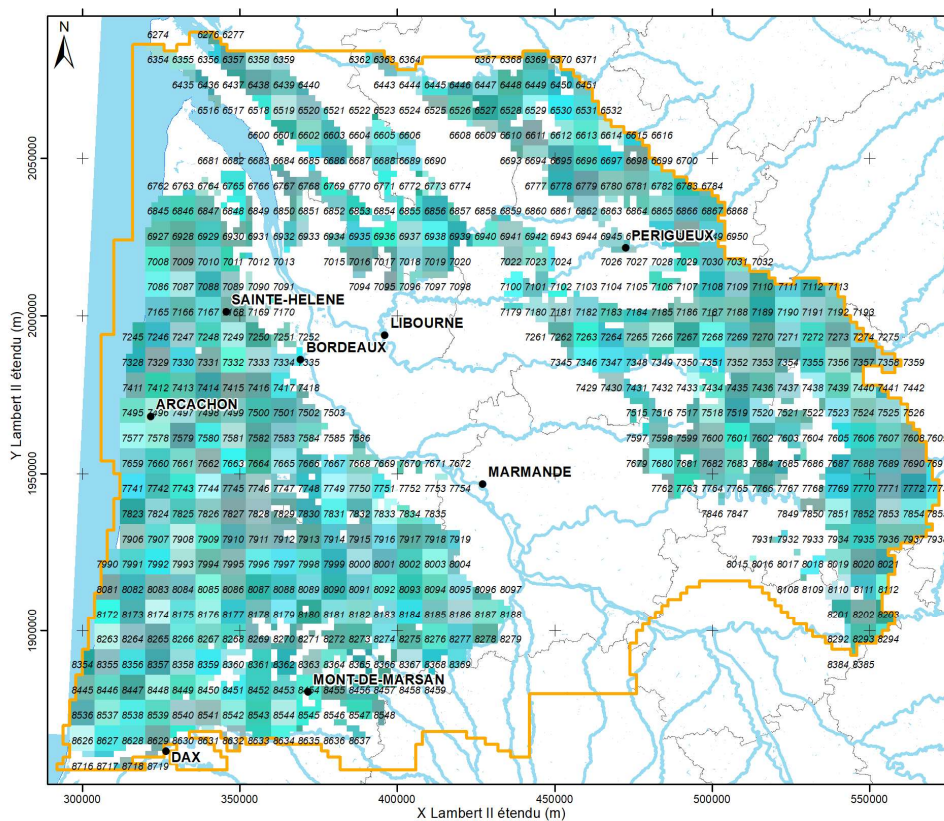


Illustration 13 - Zones météorologiques utilisées dans le modèle MONA V3.4a (le numéro en italique correspond au numéro de maille SAFRAN de Météo-France)

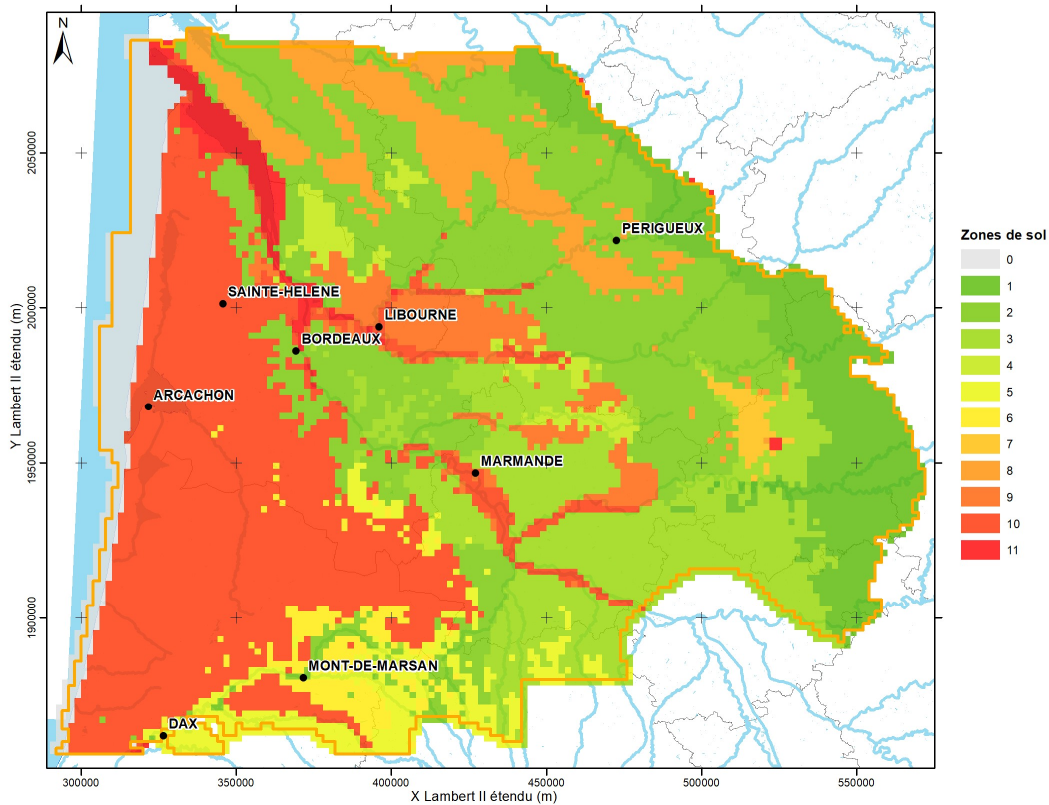


Illustration 14 - Répartition des 11 zones de sol définies dans le MONA V3.4a

Toutes les mailles de surface situées dans la même zone Météo et la même zone de Sol ont alors le même bilan hydroclimatique, suivant le schéma GARDENIA.

Une fois ces paramètres définis, la simulation est menée de 1972 à 2015. Le calcul de la recharge est réalisé au pas de temps journalier tandis que le calcul hydrodynamique est réalisé au pas de temps annuel.

Sur la totalité du domaine modélisé, la recharge simulée par le schéma GARDENIA est plus élevée de 45% en moyenne par rapport au modèle V3.3 (Illustration 15). Ce surplus de recharge se retrouve principalement dans le débordement, qui est deux fois plus élevé dans le MONA V3.4a.

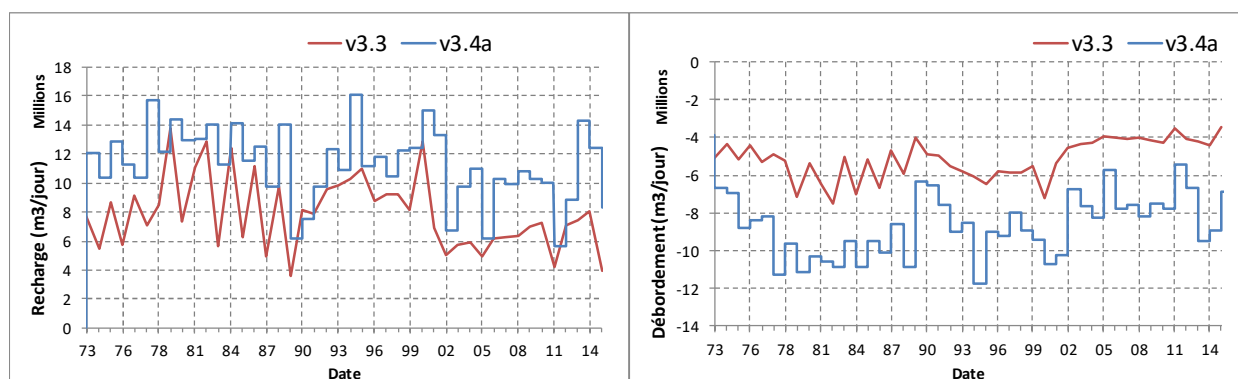


Illustration 15 - Comparaison des flux de recharges et débordements simulés sur l'ensemble du domaine modélisé entre MONA V3.3 (trait rouge) et MONA V3.4a (trait bleu)

A titre d'exemple, l'illustration 16 présente les cartes de recharge simulées pour l'année 2015 dans les deux modèles. Dans le MONA V3.3 (Illustration 16, en haut), la recharge présente une forte disparité entre l'est et l'ouest. Ceci est lié au fait que la recharge est pondérée en fonction de l'occupation réelle des affleurements dans chaque maille. Cette pondération n'est pas effectuée dans le bilan hydroclimatique du MONA V3.4a. Pour ce dernier (Illustration 16, milieu), la répartition de la recharge est similaire au maillage SAFRAN. Les ordres de grandeur sont globalement plus élevés dans le MONA V3.4a (Illustration 16, en bas). On distingue cependant des disparités selon les secteurs : à l'est, la recharge annuelle pour l'année 2015 est supérieure de 100 à 200 mm, tandis que sur le triangle landais (nappe du Plio-Quaternaire) à l'ouest elle est plus faible de 50 à 100 mm. Seule la recharge calculée sur les affleurements aquitaniens et la bordure est du Plio-Quaternaire, au centre du modèle, apparaît plus élevée que dans le MONA V3.3.

Dans les secteurs où la recharge calculée dans le MONA V3.4a est plus élevée, les niveaux piézométriques sont plus hauts (par exemple à Bouliac dans l'Eocène moyen, ou à Berre dans le Cénomanien, Illustration 17). De manière générale, les niveaux piézométriques simulés dans les aquifères du Jurassique et du Crétacé sont plus élevés que dans le MONA V3.3 du fait de l'augmentation importante de recharge sur leurs affleurements. Inversement, les niveaux sont plus faibles dans l'Aquitaniens (Cestas). Proche des exutoires de nappe, la piézométrie reste relativement inchangée (Canejan dans l'Oligocène). Dans l'ensemble, la prise en compte du bilan hydroclimatique couplé introduit plus de variations piézométriques, qui apparaissent plus lissées dans le MONA V3.3 que dans le MONA V3.4a.

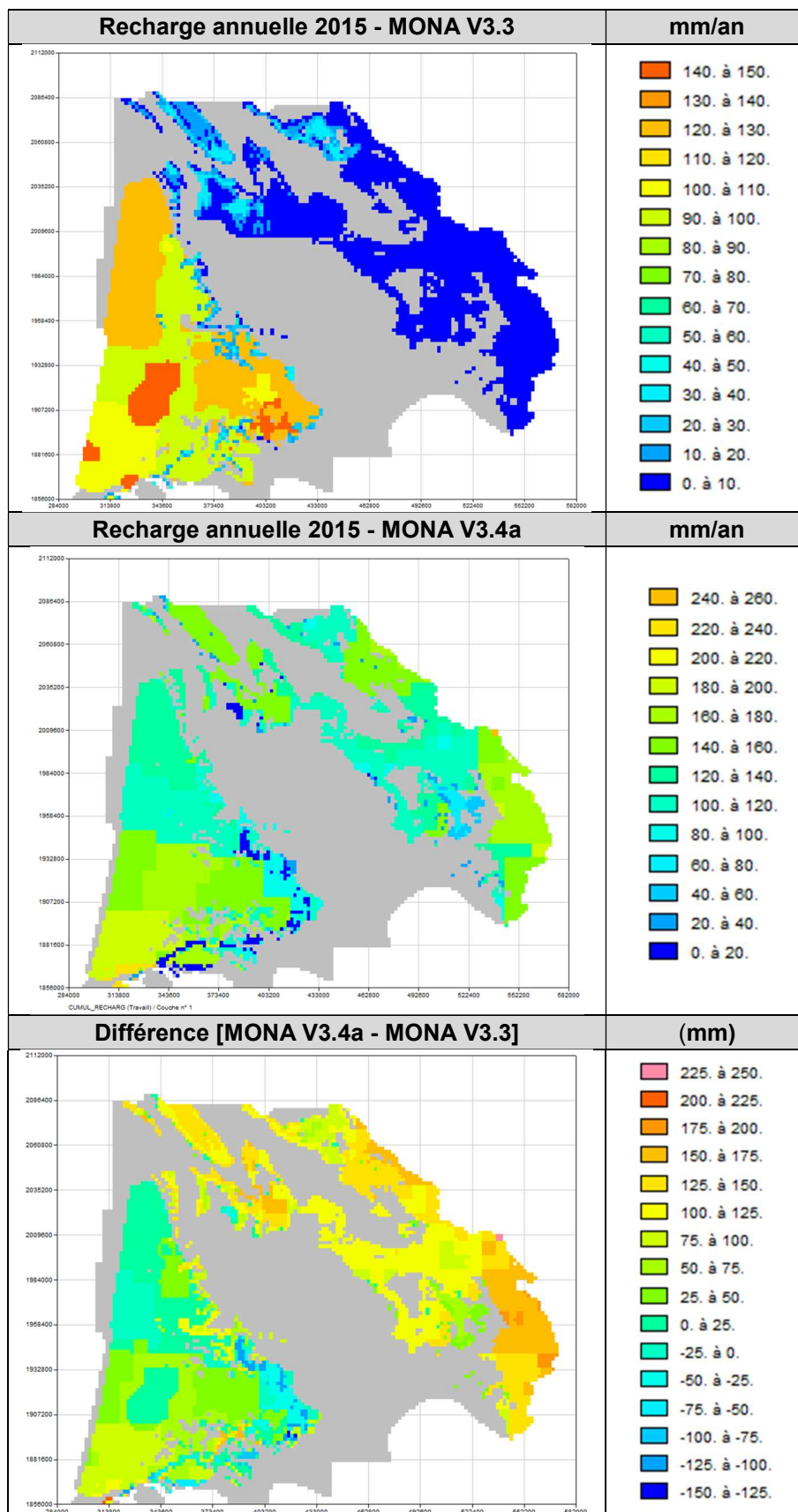


Illustration 16 - Comparaison des recharges annuelles, simulées en 2015, dans le MONA V3.3 et le MONA V3.4a

La recharge des nappes reste difficile à appréhender et constitue donc un paramètre de calage. A ce stade de l'étude, il n'est pas possible de statuer sur la validité des ordres de grandeur simulés dans le MONA V3.3 ou V3.4a. On peut toutefois considérer que l'approche GARDENIA est plus pertinente : elle introduit une prise en compte plus fine du cycle de l'eau dans les premiers mètres du sol, avec un réservoir sol à remplissage et vidange progressifs, ainsi qu'une répartition entre infiltration et ruissellement plus réaliste, là où le MONA V3.3 ne fait intervenir qu'un bilan hydrologique simple (type « tout ou rien » pour le calcul de la pluie efficace et un coefficient d'infiltration pondéré à partir du calage en régime permanent, voir par exemple Pedron et al, 2005, BRGM/RP-53659-FR). L'utilisation des données SAFRAN permet également une spatialisation de la pluie et de l'ETP bien plus robuste que l'approche par polygones de Thiessen. Par ailleurs, les paramètres utilisés ont été au préalable calés sur une sélection de bassins versants (Saltel, et al., 2015), ce qui confère plus de robustesse à l'approche couplée.

In fine, pour contraindre de manière satisfaisante la recharge, il sera nécessaire de prendre en compte le réseau hydrographique dans le modèle. Cette approche permettra de contrôler les débits sortants sur les rivières et d'estimer le bilan hydraulique du bassin d'un point de vue global mais aussi spatialisé. Cette approche permettra de mieux cadrer la recharge.

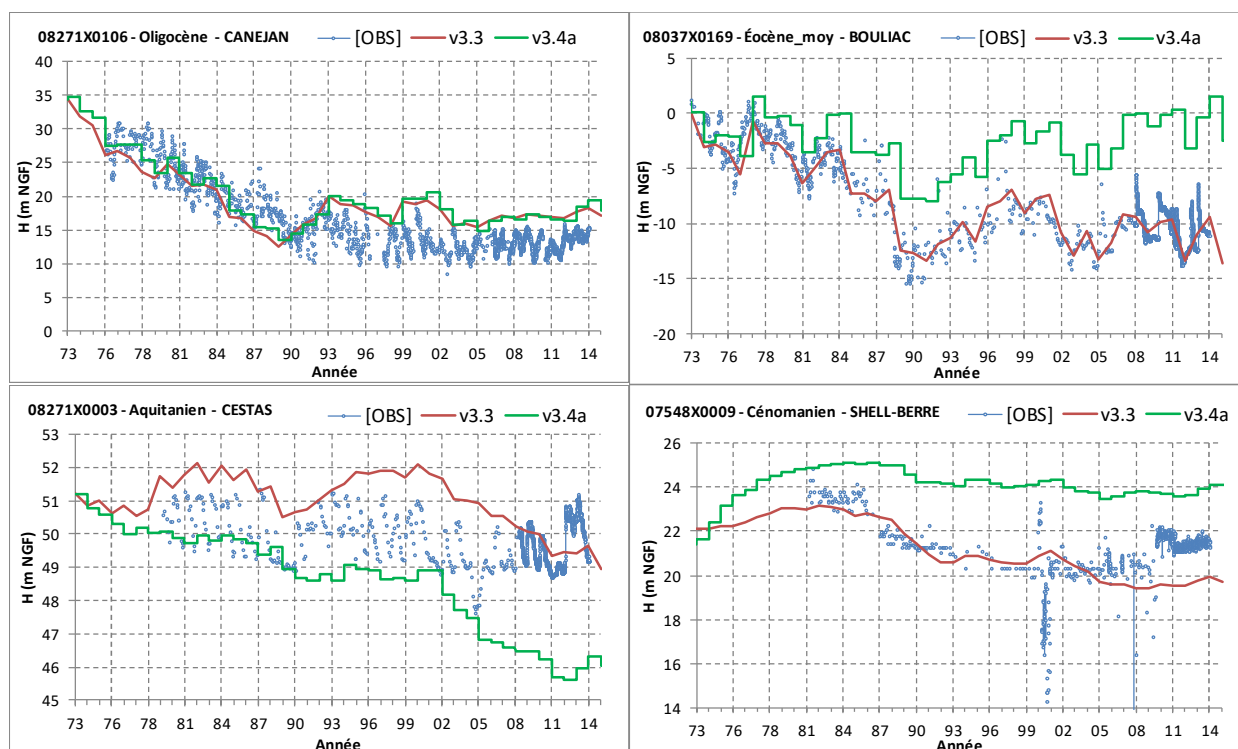


Illustration 17 - Niveaux piézométriques simulés par les modèles MONA V3.3 et MONA V3.4a, pour une sélection de piézomètres

3.2.2. MONA V3.4b - Intégration de la géométrie actualisée

Au cours de la précédente convention, le Bassin Nord-Aquitain a fait l'objet d'une modélisation géologique complète à la maille de 500 m (Saltel, et al., 2014), intégrant un modèle numérique de terrain (de l'IGN (2006) au pas de 25 m rééchantillonné au pas de 500 m), 3 480 forages, 343 diagraphies, les affleurements cartographiés sur l'ensemble du secteur d'étude, le tracé des failles et des données sismiques (Illustration 18). Le modèle géologique décrit la géométrie des 15 aquifères principaux et des 15 horizons imperméables/semi-imperméables (épontes) du Bassin Nord-Aquitain, à la maille de 500 m de côté.

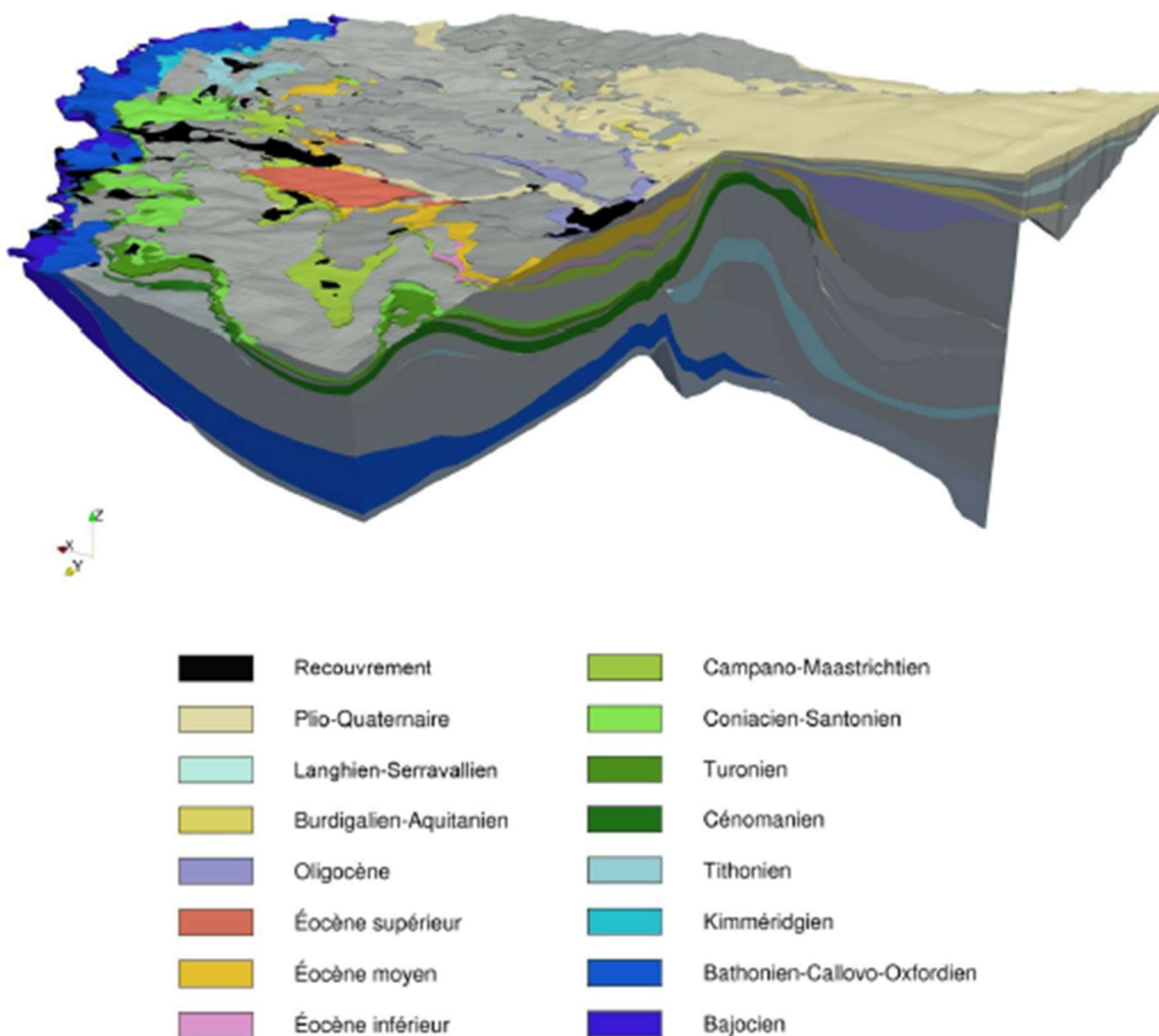


Illustration 18 - Vue 3D du modèle géologique du bassin Nord-Aquitain (Saltel, et al., 2014)

En repartant du modèle MONA V3.3, la géométrie des 30 couches est transférée dans le modèle et moyennée à la maille de 2 km. Les épontes sont à présent explicitement décrites, avec une perméabilité correspondante à celle définie dans le MONA V3.3 et des valeurs d'emménagement (qui n'étaient pas prises en considération dans les versions précédentes du modèle) par défaut de 10^{-6} (en m^{-1} , coefficient d'emménagement captif spécifique) en régime captif et 10^{-2} en régime libre (sans unité). Le nouveau modèle MONA V3.4b obtenu compte à présent 158 672 mailles actives.

L'intégration des altitudes de substratum provenant de la version 4 introduit des modifications importantes de géométrie et d'extension des couches (Illustration 19 à Illustration 21).

L'illustration 22 présente la piézométrie simulée pour une sélection d'ouvrages. La simulation est menée de 1972 à 2015 au pas de temps annuel. A l'image de Badimont dans le Bajocien (Illustration 22, en bas à droite), les différences piézométriques sont substantielles pour les aquifères profonds du Jurassique, la géométrie ayant été revue de manière conséquente dans le modèle géologique.

De manière générale, les changements de géométrie sont importants et nécessiteront, à transmissivité équivalente, des ajustements de perméabilité. Le modèle géologique actuel représente l'état des connaissances le plus à jour et le plus abouti sur la géométrie du Bassin Nord-Aquitain. La prise en compte du modèle géologique dans le modèle MONA constitue une étape importante dans l'amélioration de la représentativité du modèle et de sa robustesse, mais implique cependant une phase de recalage non négligeable.

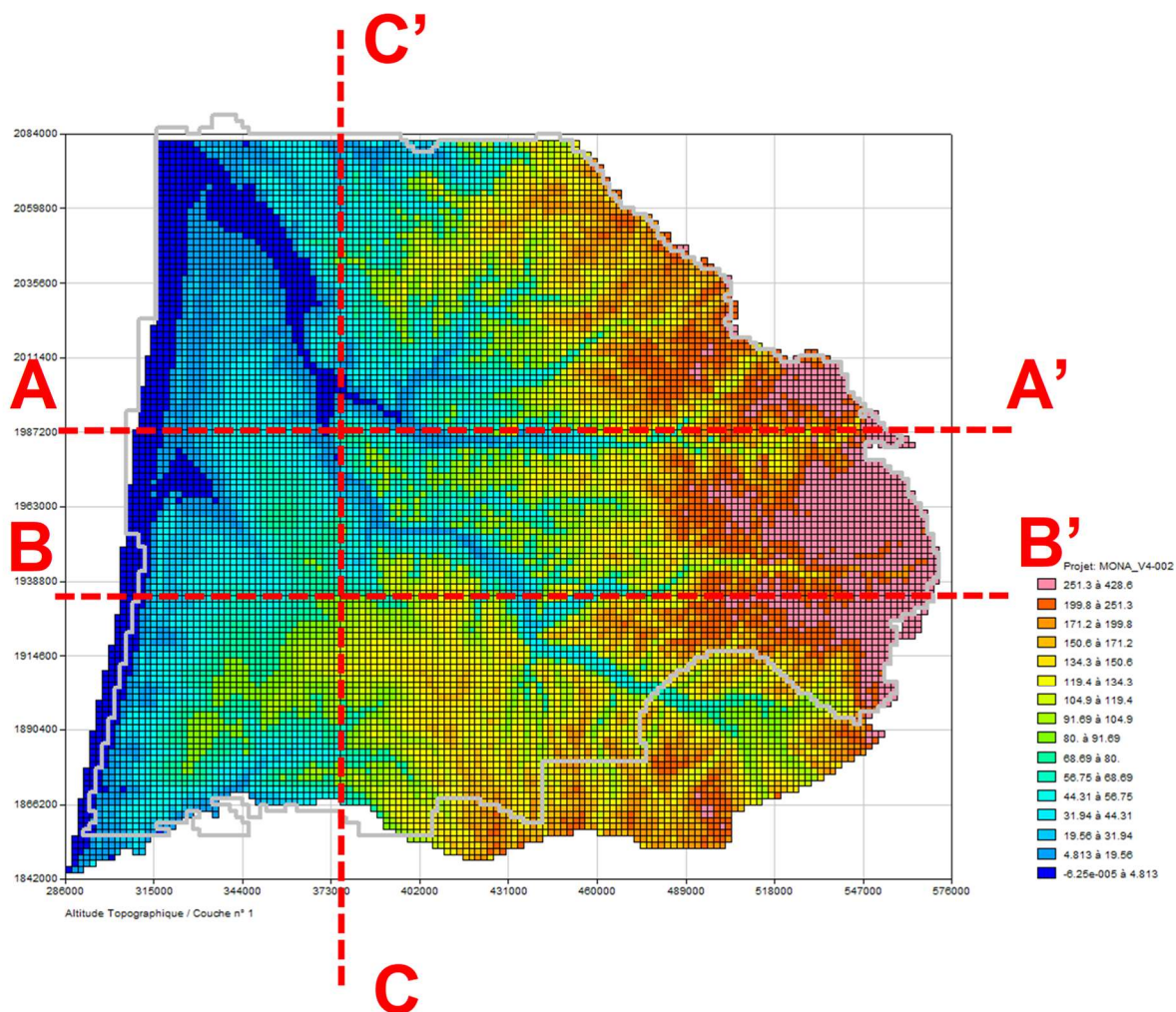


Illustration 19 - Topographie du MONA V3.4b (m NGF) et localisation des coupes (le trait gris représente l'emprise du modèle MONA V3.3 initial)

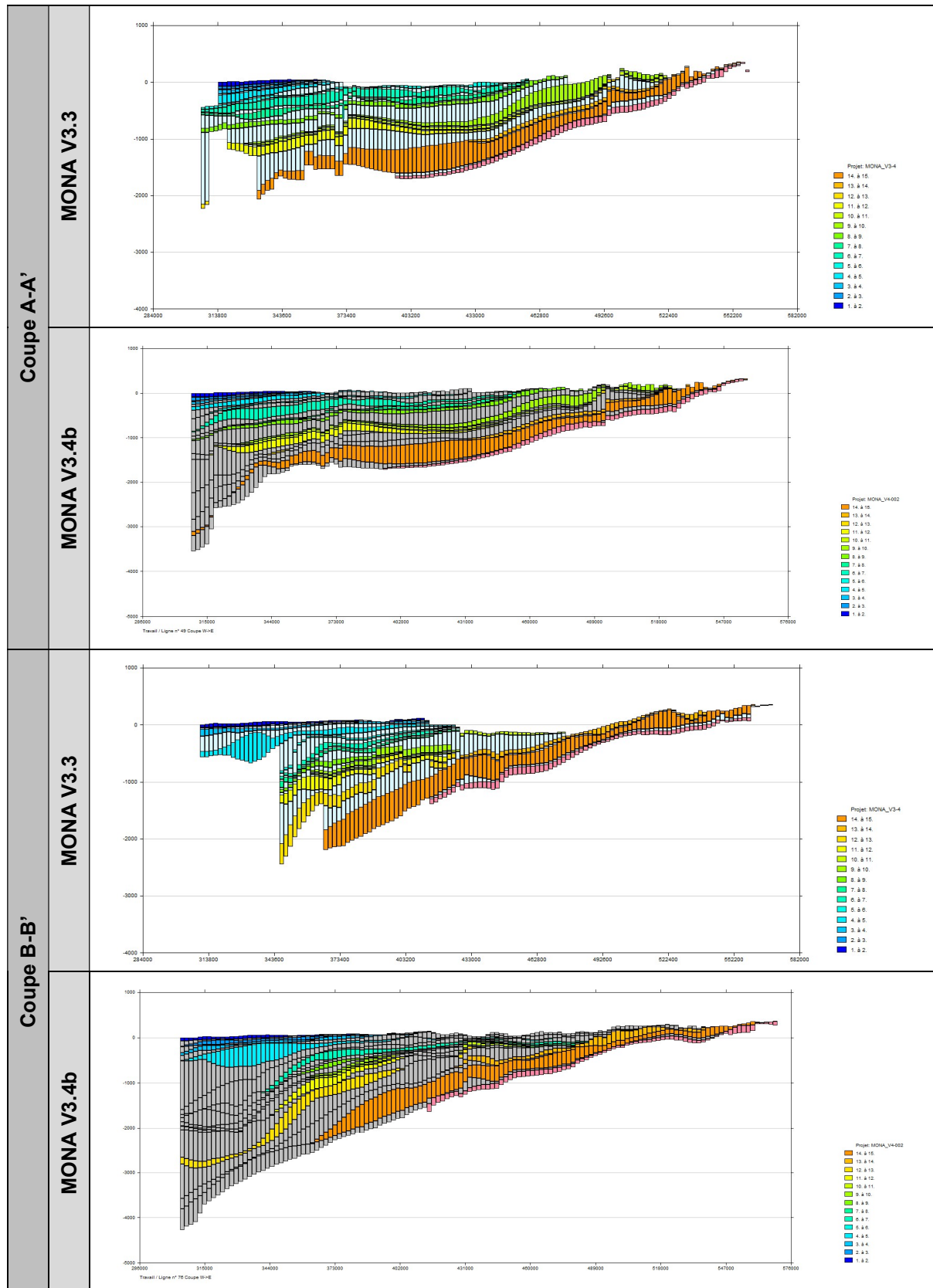


Illustration 20 - Coupe ouest-est pour la comparaison de la géométrie des modèles MONA V3.3 et V3.4b

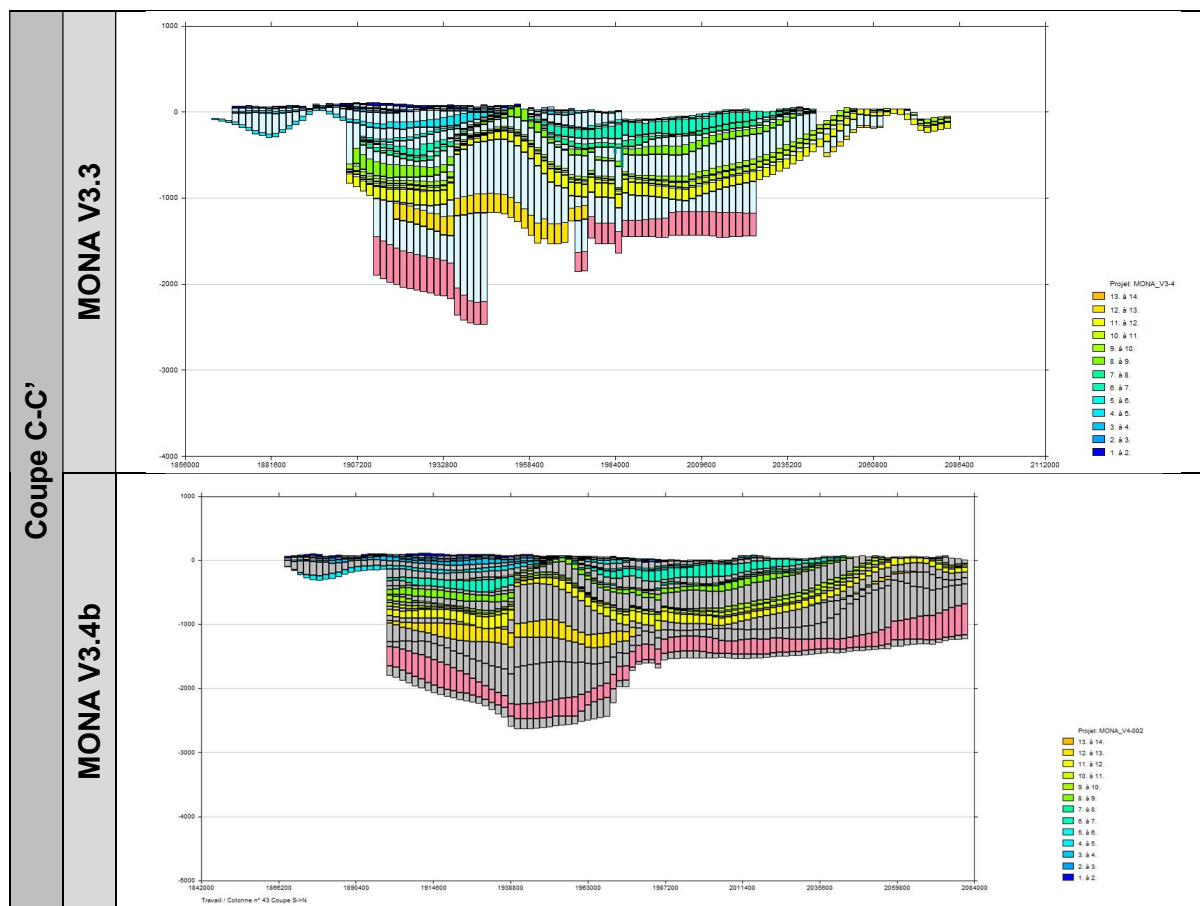


Illustration 21 - Coupe nord-sud pour la comparaison de la géométrie des modèles MONA V3.3 et V3.4b

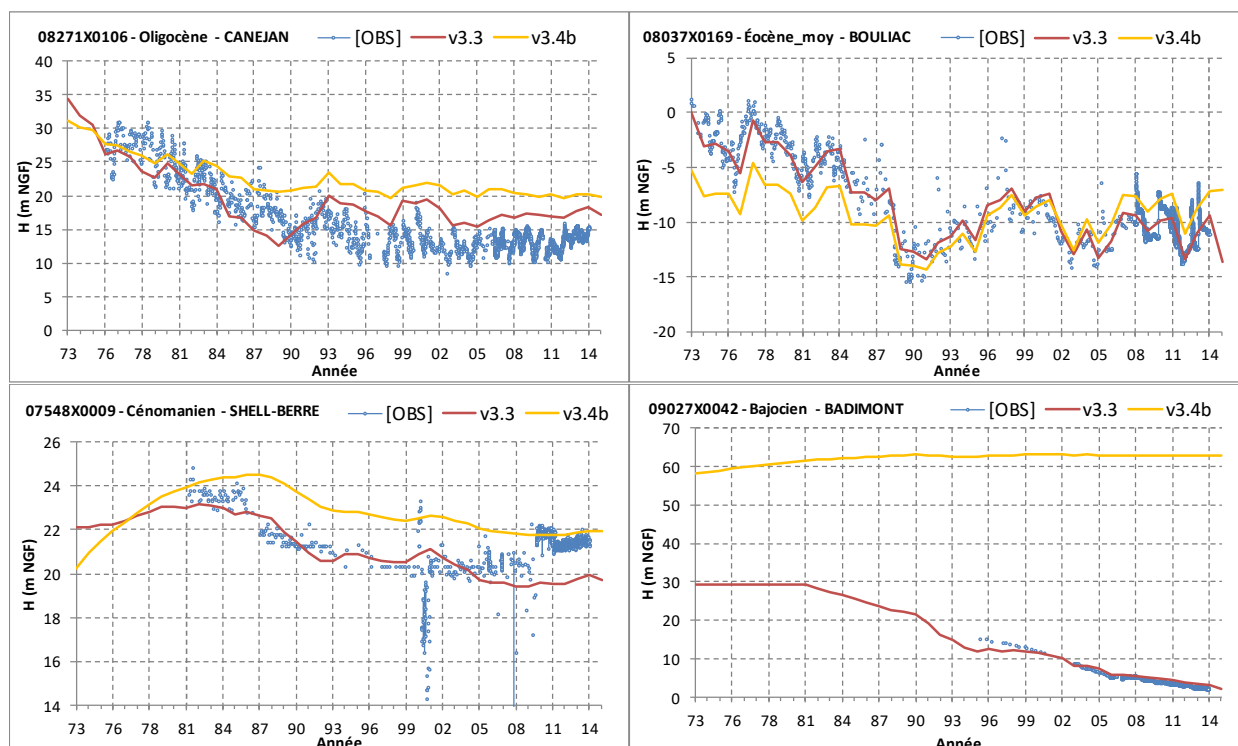


Illustration 22 - Niveaux piézométriques simulés par le MONA V3.4b pour une sélection de piézomètres

3.3. DEVELOPPEMENT D'UNE VERSION INTERMEDIAIRE - MONA 3.5

3.3.1. Conceptualisation

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

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

Géométrie

La version 3.5 intègre la géométrie de la version 4 dans un maillage de 2 km de côté de la même manière que la version 3.4b. Le modèle comprend donc 30 couches et intègre explicitement les éponges. Les perméabilités des aquitards correspondent à celles définies dans le MONA V3.3 tandis que les coefficients d'emménagement ont été fixés par défaut à 10^{-6} en régime captif et à 10^{-2} en régime libre.

Ainsi le nombre de mailles est ramené à 158 672 dans la version 3.5 ce qui correspond à une augmentation du nombre de mailles d'un facteur 2,4 en comparaison avec la version 3.3 (66 973 mailles).

Avec 2 382 835 de mailles dans la version 4, le nombre de mailles était multiplié par 35,6.

Recharge

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

Discretisation temporelle

Le bilan hydroclimatique est effectué au pas de temps journalier tandis que le calcul hydrodynamique se fait quant à lui au pas de temps mensuel en fin de chaque mois. La période de simulation couvre la période 1972-2015 en démarrant au 31 juillet pour se baser sur les cycles hydrologiques et non sur les années calendaires.

Prélèvements

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

Conditions imposées

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

- **Potentiel imposé**

Des charges ont été imposées aux limites ouest de manière à retranscrire les niveaux de l'océan Atlantique et leur influence sur les couches aquifères.

- **Flux nuls**

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

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

Réseau hydrographique

L'intégration du réseau hydrographique pour valider les débordements et donc cadrer la recharge est primordiale. A noter que les bassins versants ont été délimités dans le modèle en définissant pour chaque maille de surface les directions aval pour le ruissellement. Cette approche permet d'orienter les flux de ruissellement et de débordement du modèle et d'éviter qu'ils aillent alimenter un bassin éloigné. La définition du réseau hydrographique sur l'ensemble du secteur d'étude (Illustration 23) a été précédemment décrite durant le développement du MONA V4 (Saltel, et al., 2017). Le couplage du réseau hydrographique avec le système aquifère offre la possibilité de modéliser les échanges nappe-rivière et d'estimer le débit des cours d'eau. On peut alors comparer ces débits simulés avec les débits mesurés en station (et disponibles sur la banque HYDRO) pour améliorer le calage du modèle et ajuster les paramètres liés à la recharge.

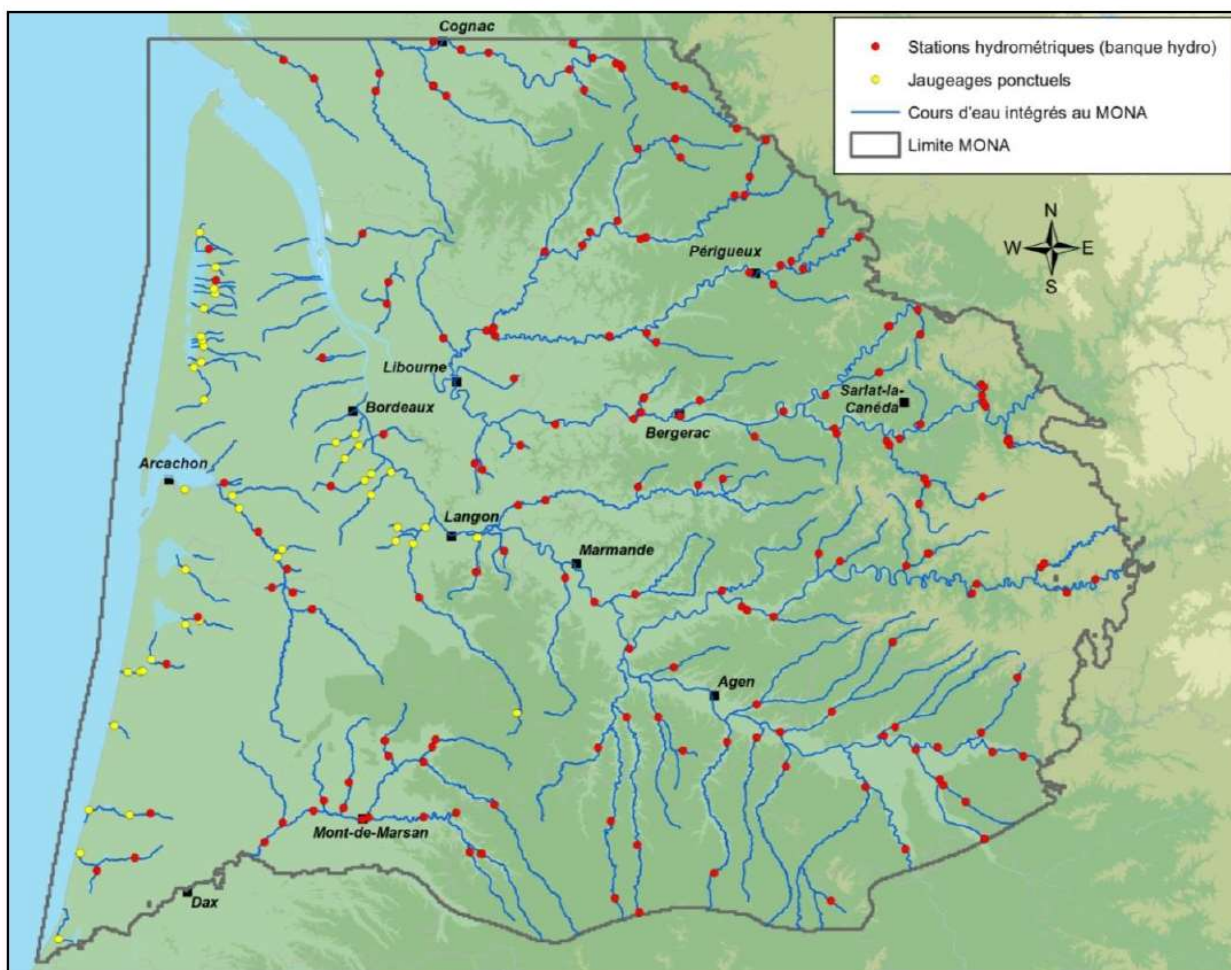


Illustration 23 - Réseau hydrographique intégré dans le MONA V4 et points de mesure de débits disponibles

Les données de prélèvements sur les eaux continentales ont été obtenues auprès du Système d'Information sur l'Eau du Bassin Adour-Garonne (SIE-AEAG). Ces données recensent, au pas de temps annuel, 7 934 points de prélèvements sur les eaux de surface et en retenues d'eau à partir de 2003 (Illustration 24). Ce recensement inclut également les prises d'eau qui sont par la suite restituées au réseau hydrographique, en particulier les centrales nucléaires EDF du Blayais ($> 5 \text{ Mdm}^3$ en 2016) et de Golfech ($> 198 \text{ Mm}^3$ en 2016), ainsi que la zone industrielle du bec d'Ambès ($> 130 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en 2016). Ceux-ci ne sont pas considérés dans la suite de l'étude.

En dehors de ces utilisateurs, les prélèvements de surface et en retenues d'eau sont compris entre 250 et 400 Mm^3/an sur la période 2013-2016, ils sont essentiellement destinés à l'irrigation ($\sim 70\%$), puis l'industrie (environ 20%) et l'AEP (10%).

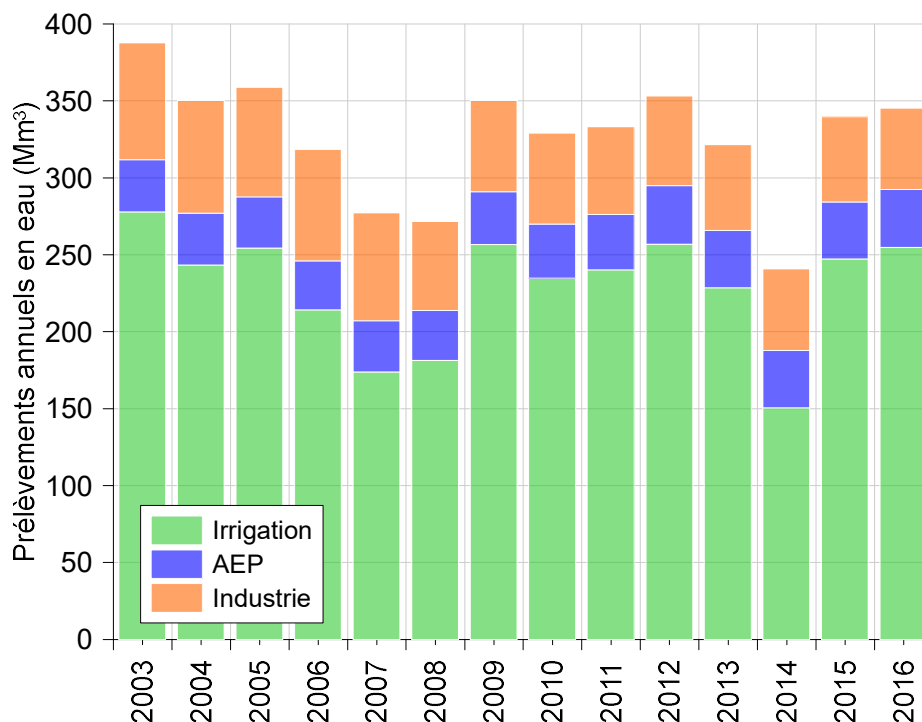


Illustration 24 - Total des prélèvements en eaux de surface et retenues d'eau dans le secteur d'étude (SIE-AEAG)

Ces prélèvements ont été affectés au réseau hydrographique modélisé, aux mailles correspondantes. A noter que ces débits n'ont pas fait l'objet à ce stade d'une ventilation en fonction des usages (ex : en fonction des périodes d'irrigation) au pas de temps mensuel. Le réseau hydrographique considéré dans le modèle correspond au réseau hydrologique principal (Illustration 25) et ne prend pas en compte le chevelu hydrologique de faible importance. Les prélèvements localisés dans ces secteurs n'ont pas été inclus. De manière générale, les prélèvements situés à moins de 2 km du réseau hydrographique modélisé ont été intégrés au modèle (taille de la maille). Enfin, les prélèvements correspondant aux retenues d'eau ont été écartés dans la mesure où les périodes de remplissage des retenues ne sont pas connues.

Suivant cette méthodologie, ce sont 3 335 prélèvements de surface qui ont finalement été retenus dans le modèle (Illustration 26), représentant 60 à 70% des prélèvements recensés dans le secteur d'étude.

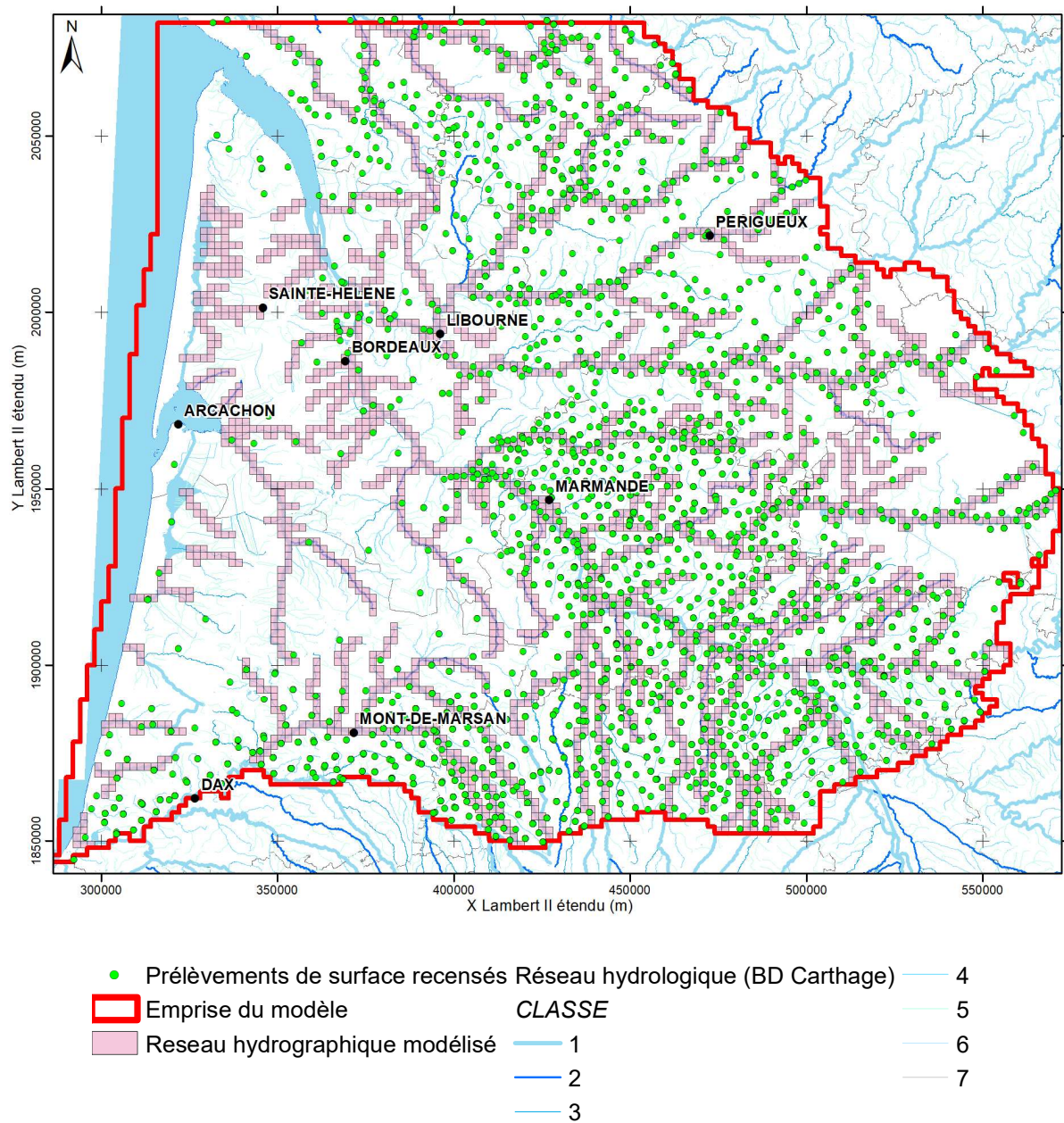


Illustration 25 - Réseau hydrographique modélisé et localisation des prélèvements de surface

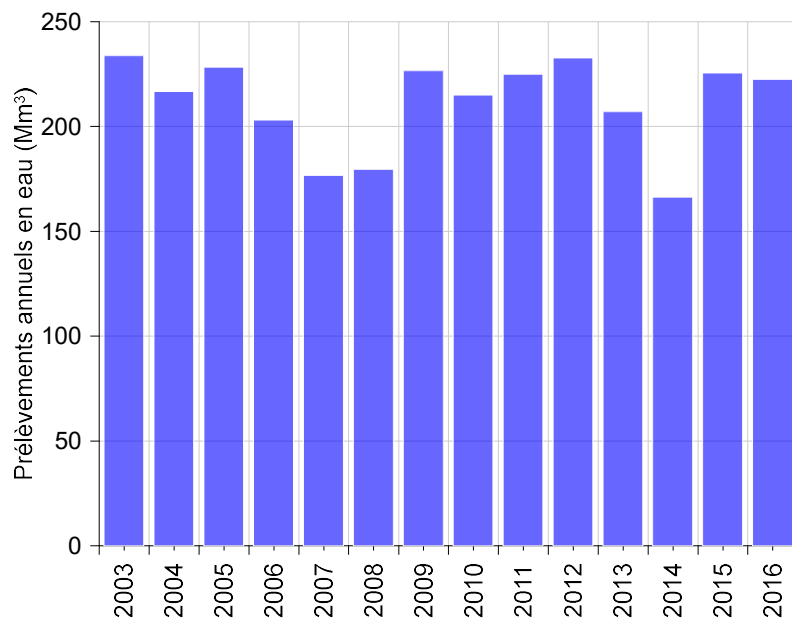


Illustration 26 - Total des prélèvements de surface modélisé dans le MONA V3.5

Plusieurs cours d'eau intégrés dans le modèle prennent naissance en dehors des limites de représentation du modèle, que ce soit sur le Massif Central à l'est ou dans les Pyrénées au sud (Illustration 27).

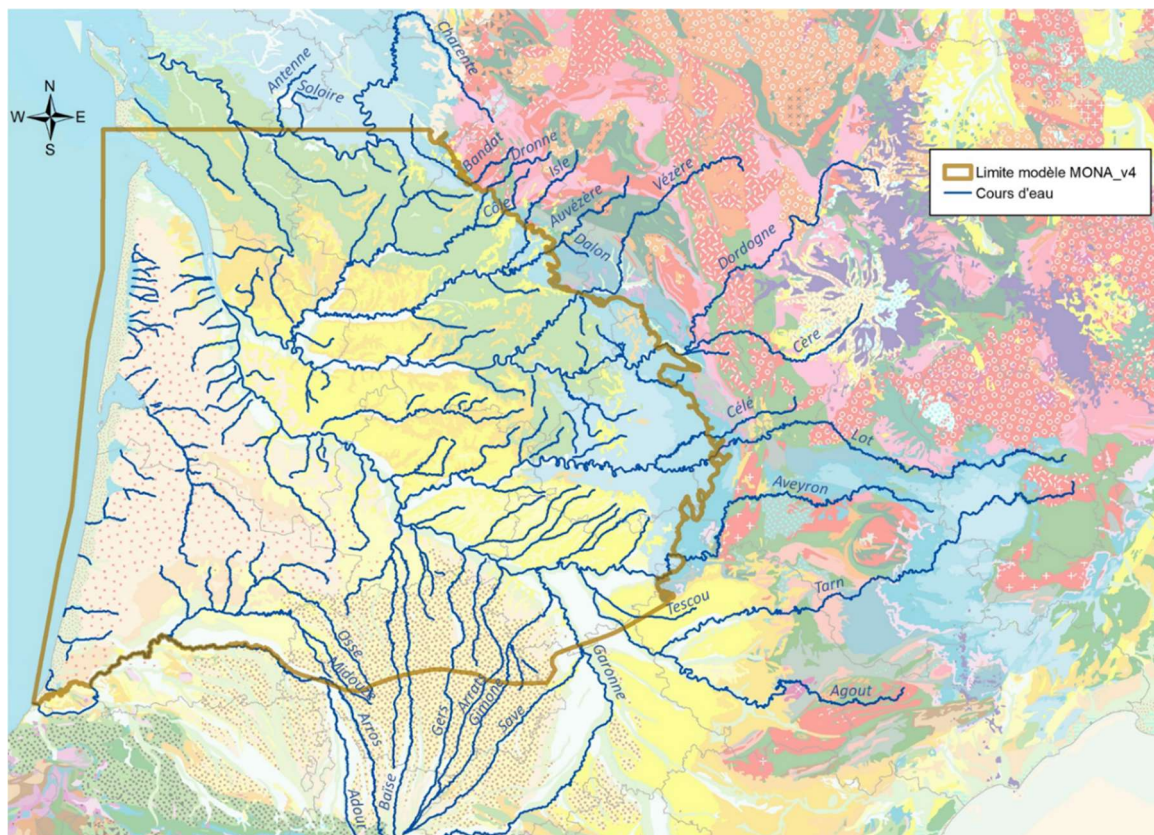


Illustration 27 - Cours d'eau représentés dans le modèle

Afin de simuler au mieux le réseau hydrographique, il est nécessaire d'intégrer, en limite de modèle, les débits entrant dans le cours d'eau (Illustration 28).

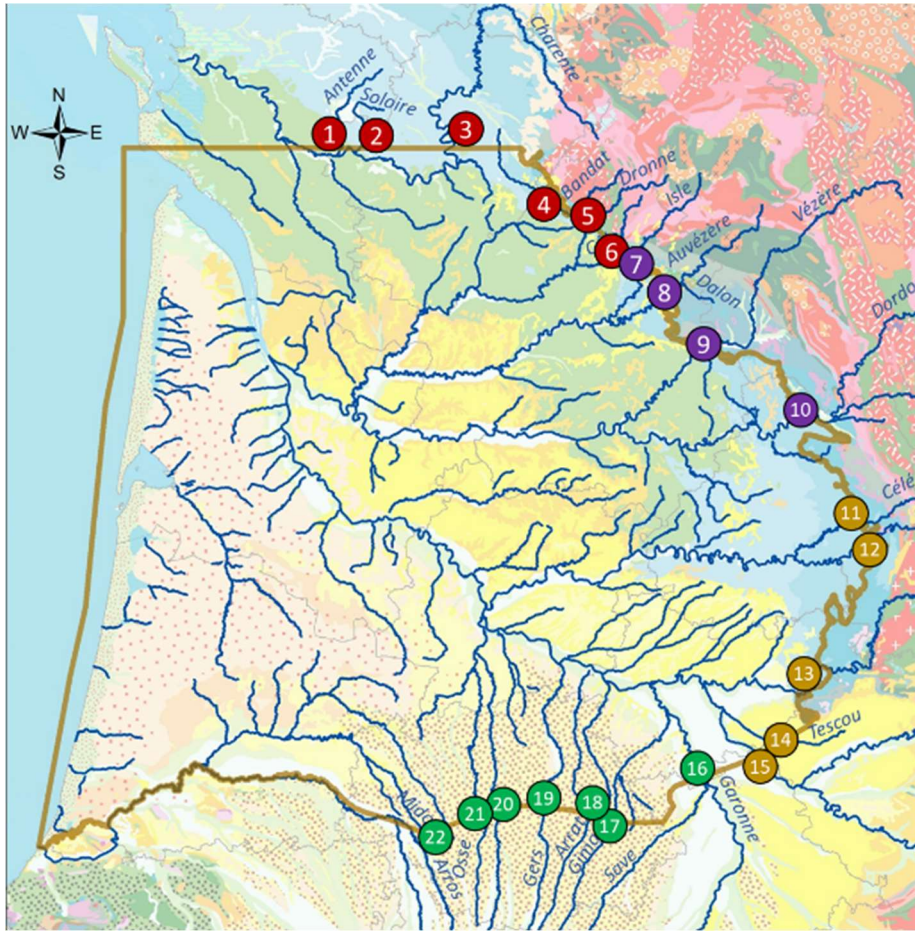


Illustration 28 - Stations considérées pour l'évaluation des débits entrants dans les cours d'eau en limite de modèle

Trois cas de figures ont été rencontrés :

1. Aucune donnée n'est disponible à proximité de la première maille où le cours d'eau est présent. Dans ce cas aucune donnée n'est intégré au modèle.
2. Une station hydrométrique existe à proximité de la première maille du cours d'eau, les données de débits existantes sont intégrées en amont. Lorsque les chroniques ne sont pas complètes sur la période de simulation du modèle, des valeurs moyennes calculées en concordance avec les pas de temps hydroclimatique sont incorporées.
3. Une station hydrométrique existe à distance de la première maille du cours d'eau, alors les données de la station sont incorporées en pondérant les valeurs en fonction du ratio entre la superficie du bassin versant calculée depuis la limite du modèle et celle calculée à partir de la position de la station de mesure. Deux configurations sont possibles :
 - soit les ratios sont inférieurs à 1 quand la station de référence est à l'intérieur de l'emprise du MONA (Illustration 29).
 - soit les ratios sont supérieurs à 1 quand la station de référence est à l'extérieur de l'emprise du MONA (Illustration 30).

Un développement récent de MARTHE pourrait être évoqué (Amraoui et al., 2019) pour une intégration future. En effet, une nouvelle fonctionnalité de MARTHE permet à partir des paramètres de modélisation GARDENIA préalablement obtenus, de calculer à chaque pas de temps le débit entrant à partir des données de forçage climatique relatives aux mailles correspondant au bassin versant amont.

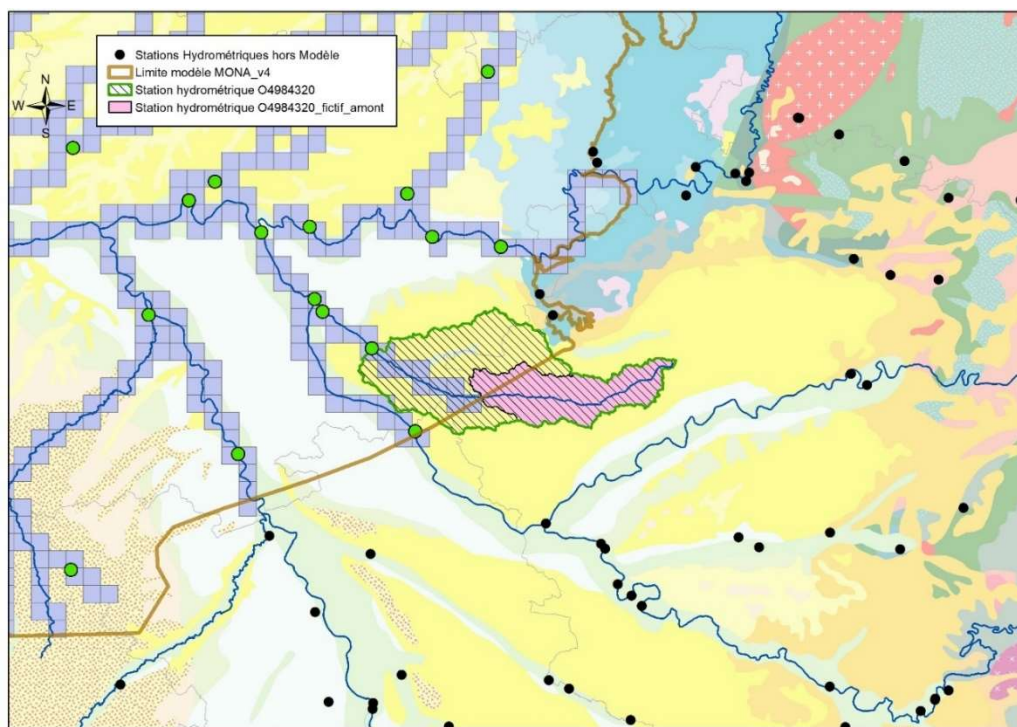


Illustration 29 - Exemple de la station de Tescou avec un ratio inférieur à 1

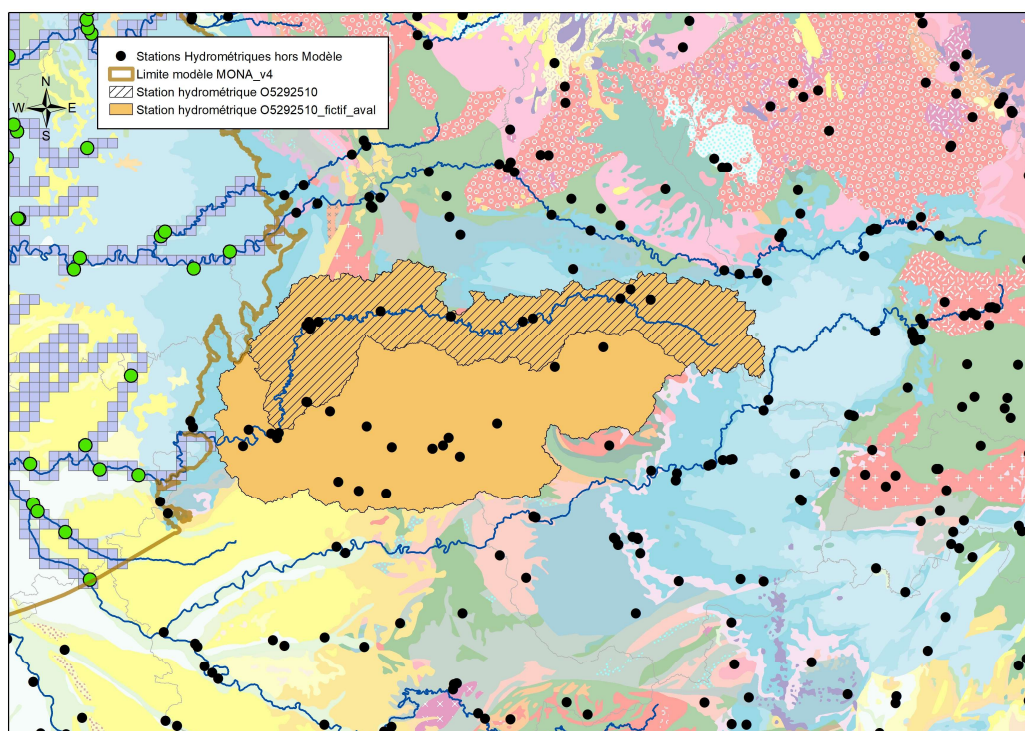


Illustration 30 - Exemple de la station de l'Aveyron avec un ratio supérieur à 1

Les actions entreprises sur l'ensemble des cours d'eau prenant naissance en dehors des limites de représentation du modèle sont récapitulées dans le tableau 6.

Point	X_Maille	Y_Maille	Cours d'eau	Débit injecté	BV Station proche (km²)	BV station fictive (km²)	ratio
1	389000	2079000	Antenne	Reprise de la station R3244010			
2	395000	2081000	Soloire	Faire le ratio de BV avec le R3114010	92	215	2.33695652
3	427000	2081000	Charente	Reprise de la station R224010			
4	467000	2061000	Bandiat	Reprise de la station R1254030			
5	475000	2057000	Dronne	Reprise de la station P8022520			
6	483000	2049000	Côle	Reprise de la station P8074010			
7	491000	2043000	Isle	Reprise de la station P6081510			
8	501000	2031000	Auvézère	Reprise de la station P6362510			
9	513000	2013000	Vézère	Faire le ratio de BV avec le P4001010	2446	2844	1.16271464
10	551000	1991000	Dordogne	Reprise de la station P2070020			
11	567000	1955000	Célé	Faire le ratio de BV avec le O8113510	678	780	1.15044248
12	571000	1949000	Lot	Reprise de la station O7971510			
13	557000	1903000	Aveyron	Faire le ratio de BV avec le O5292510	1598	3811	2.38485607
14	539000	1879000	Tescou	Faire le ratio de BV avec le O4984320	284	108	0.38028169
15	533000	1875000	Tarn	Reprise de la station O4931010			
16	513000	1867000	Garonne	Reprise de la station O2620010			
17	485000	1853000	Gimone	Pas de station à proximité			
18	475000	1853000	Arrats	Pas de station à proximité			
19	461000	1857000	Gers	Faire le ratio de BV avec le O6312520	498	679	1.36345382
20	443000	1857000	Baise	Reprise de la station O6612940			
21	439000	1855000	Osse	Faire le ratio de BV avec le O6834620	195	160	0.82051282
22	419000	1849000	Le Midou	Pas de station à proximité			

Tableau 6 - Stations considérées pour l'évaluation des débits entrants dans les cours d'eau en limite de modèle

3.3.2. Simulation en régime transitoire

Les premières simulations en régime transitoire ont pu être réalisées dans la version 3.5 du MONA. Cette version intermédiaire (MONA V3.5) comporte un total de 158 672 mailles actives avec un temps de calcul ramené à 2 h 45 pour 522 pas de temps mensuels sur la période 1972 - 2015. Les premiers résultats sont donc analysés sans qu'aucun calage n'ait été effectué. Elles présentent l'état zéro des écarts entre simulations et observations. Cette analyse est réalisée à partir des 428 points d'observations déjà utilisés pour le contrôle du calage de la version 3.3 du modèle. Au total, l'analyse concerne 17 912 mesures qui permettent de mesurer l'écart entre simulations et observations. La moyenne des écarts m entre piézométrie observée et simulée (ou biais) est très variable d'une nappe à l'autre.

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

A ce stade, les écarts sont encore trop importants pour toutes les nappes. Les nappes présentant les erreurs les moins fortes correspondent à la nappe du Plio-Quaternaire et de l'Oligocène avec des écarts respectifs moyens de 1,7m et de -1,8 m. La nappe présentant les écarts les plus importants est la nappe du Bathonien-Callovio-Oxfordien. Les valeurs négatives indiquent que les charges simulées sont plus élevées que les charges observées. Il y a donc dans ce cas une très

forte surestimation des niveaux. De manière générale, les nappes du Tertiaire présentent des erreurs moins importantes que les nappes du Crétacé et du Jurassique.

Cependant, avec la moyenne des écarts m , les écarts positifs et négatifs peuvent se compenser c'est pourquoi il est intéressant d'utiliser d'autres indicateurs. Le calcul du RMSE (Root Mean Squared Error), c'est-à-dire la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, est un autre indicateur statistique fréquemment utilisé pour évaluer la qualité du calage d'un modèle. Le RMSE présente des valeurs 30 % à 40 % plus grandes que celles de la moyenne des valeurs absolues des écarts.

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

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

Aquifère	N° de couche	Moyenne m (en m)	RMSE (en m)
Plio-Quaternaire	2	1.7	5.3
Langhien-Serravalien	4	-12.3	13.5
Aquitainien	6	-4.6	13.4
Oligocène	8	-1.9	7.5
Éocène sup	10	-3.7	8.1
Éocène moy	12	-12.2	13.7
Éocène inf	14	-23.8	24.9
Campanien	16	-15.5	18.4
Coniacien-Santonien	18	-43.1	44.6
Turonien	20	25.0	34.7
Cénomanién	22	-7.9	9.0
Tithonien	24	3.0	23.1
Kimméridgien	26	-72.7	76.8
Bathonien-Callovio-Oxfordien	28	-86.6	90.6
Bajocien	30	-40.2	44.6

Tableau 7 - Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles

La comparaison avec les simulations précédentes (version 3.4a et 3.4b) permet d'avoir des premières pistes d'explication sur les différences de calage entre la version 3.3 et la version 3.5. Ainsi, il apparaît que les modifications apportées à la recharge affectent peu l'Oligocène et que ce sont les modifications liées à la géométrie qui créent les différences observées pour le calage (Illustration 31). Les impacts liés aux modifications de la recharge semblent avoir un effet important sur la piézométrie de la nappe de l'Éocène moyen ce qui expliquerait le fait que les piézométrie simulées soient globalement surestimées (Illustration 32).

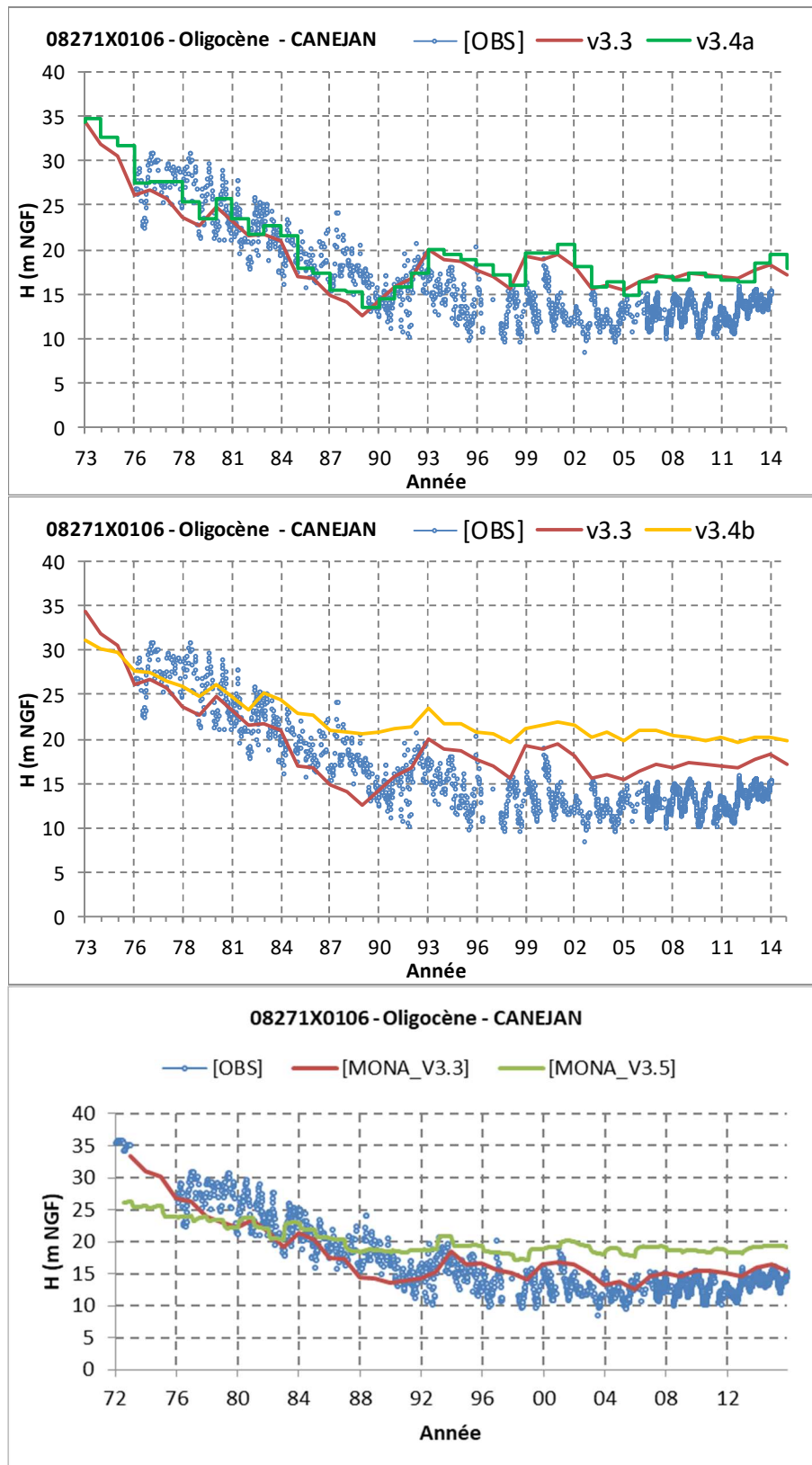


Illustration 31 - Exemple de restitution de la piézométrie simulée dans les différentes versions du MONA, dans la nappe de l'Oligocène

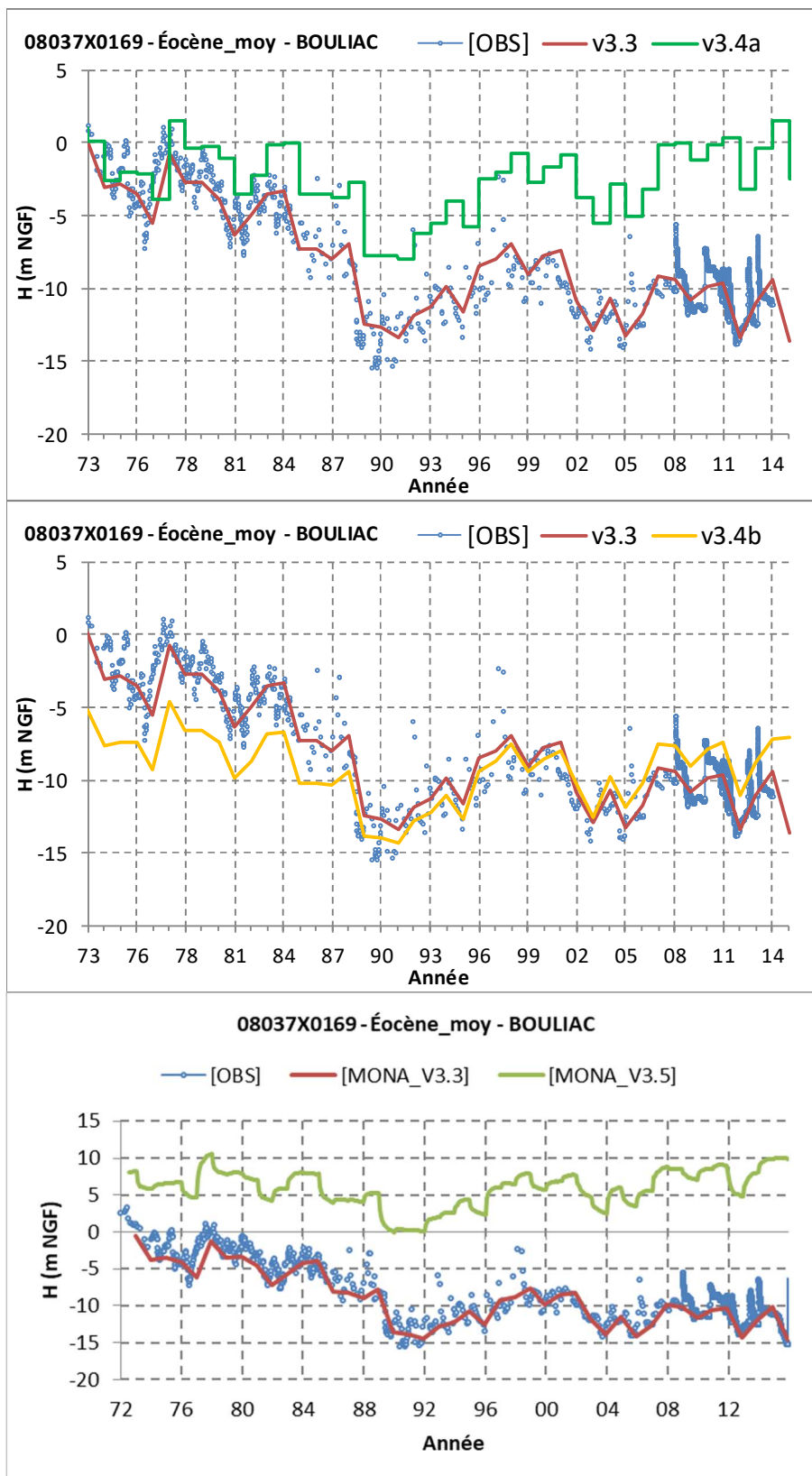


Illustration 32 - Exemple de restitution de la piézométrie simulée dans les différentes versions du MONA, dans la nappe de l'Éocène moyen

Un travail important reste à mener pour cadrer la recharge dans la nouvelle version du MONA. La prise en compte du réseau hydrographique dans le modèle et la reproduction des débits observés dans les différentes stations de jaugeages permettront de mieux définir la partition entre ruissellement et infiltration. L'illustration suivante montre quelques exemples de reproduction des débits en cours d'eau encourageants pour la suite du travail de calage (Illustration 33).

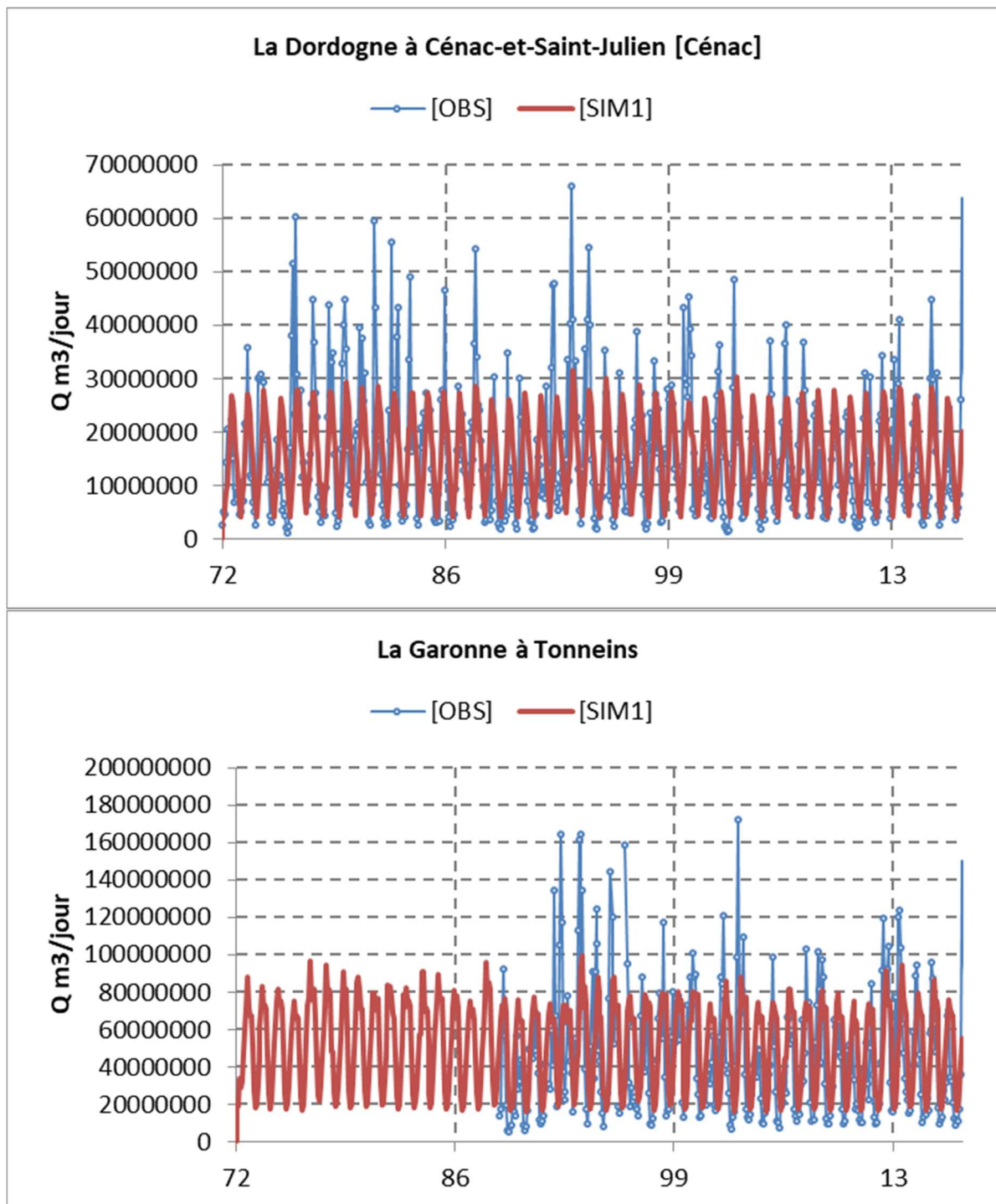


Illustration 33 - Exemple de comparaison entre débits observés et débits simulés

4. Conclusion

Ce module de l'année 2 de la Convention Régionale eaux souterraines 2015-2020 porte principalement sur l'évolution du MOdèle Nord-Aquitain avec l'objectif de concevoir une nouvelle version du modèle, actualisée, affinée et destinée à permettre aux gestionnaires de définir au mieux les stratégies d'exploitation des ressources en eau souterraines de la région. Le programme de cette année 2 est scindé en deux parties :

- Une première partie qui s'est focalisée sur la version actuelle du MONA (Version 3.3b) avec l'objectif d'actualiser les données d'entrées (prélèvements, flux d'infiltration) et les chroniques d'observation jusqu'en 2015 afin de bénéficier d'un outil le plus à jour possible.
- Une seconde partie qui a porté sur la poursuite du développement d'une nouvelle version du modèle. Le travail réalisé en cette année 2 de la convention constitue une phase préparatoire au calage du modèle en régime transitoire dans une version intégrant la nouvelle géométrie et le travail sur la recharge avec des temps de calcul raisonnables.

L'ajout des épontes dans la version 4 du MONA et le passage à un maillage plus fin (500 m x 500 m contre 2 000 m x 2 000 m dans la version 3.3b) a augmenté considérablement le nombre de mailles. Le nombre total de mailles actives est passé de 66 973 mailles dans la version 3.3b contre 2 382 835 dans la version 4. De ce fait, le temps de calcul a très fortement augmenté passant de 6 min pour 44 pas de temps annuels de 1972 à 2015 contre 9h30 pour 77 pas de temps trimestriels de 1996 à 2014. En raison de ces longs temps de calcul, une version intermédiaire du MONA a été développée pour obtenir des temps de calcul plus raisonnables. L'objectif étant d'intégrer dans un maillage à 2 km de côté les améliorations développées dans la version à 500 m de côté :

- la géométrie de la version 4,
- la prise en compte des données SAFRAN pour le calcul de la recharge via le module GARDENIA de Marthe,
- le réseau hydrographique le plus détaillé possible pour contrôler les débordements.

Cette version intermédiaire (MONA V3.5) comporte un total de 158 672 mailles actives avec un temps de calcul ramené à 2 h 45 pour 522 pas de temps mensuels sur la période 1972 – 2015. A ce stade, aucun calage n'a encore été réalisé et les comparaisons entre simulations et observations montrent des écarts encore globalement trop importants, les modifications de géométrie et de prise en compte du calcul des bilans hydroclimatiques ayant eu un fort impact sur les charges simulées par le modèle. Un travail important reste à mener pour cadrer la recharge dans la nouvelle version du MONA. La prise en compte du réseau hydrographique dans le modèle et la reproduction des débits observés dans les différentes stations de jaugeages permettront de mieux définir la répartition entre ruissellement et infiltration.

L'objectif de l'année 3 est d'entamer le calage de cette version intermédiaire du MONA V3.5 en cohérence avec les travaux de recherche initiés dans le cadre du projet ADEQWAT (BRGM et l'ENSEGID) et le projet POMONACC sur la paramétrisation et l'optimisation des procédures de calage des outils numériques. Une attention particulière sera apportée au cours de cette année à la restitution des piézométries en zone libre et des débits de cours d'eau pour définir le plus précisément possible la recharge dans ces secteurs en amont du calage des zones captives.

L'obtention d'une version 4 opérationnelle du MONA, du fait de sa complexité, reste l'objectif à moyen terme du projet. La version 3.5 servira de version intermédiaire opérationnelle à horizon de 2 ans.

5. Bibliographie

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

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

Amraoui N., Thiery D., Vergnes J.-P. (2019) – La plate-forme Aqui-FR : état d'avancement 2018 et évaluation de la simulation longue durée 1958 - 2017. Rapport final. BRGM/RP-68577-FR, 49 p., 24 fig., 1 ann.

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

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

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

Cabaret O., Saltel M. (2012) - Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain - phase « Tendances et Scénarios » - Simulations complémentaires - Rapport final, BRGM/RP-61479-FR, 46 p., 21 fig., 4 ann.

Cabaret O., Saltel M. (2012) - Simulations d'impacts d'un champ captant d'une capacité de 10 et 12 millions de m³ dans l'Oligocène à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) – Sainte-Hélène (33) – Rapport BRGM/RP-61290-FR, 81 p., 62 fig., 3 ann.

Gomez E., Saltel M., Pédrón N. (2010) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain - Module 4 - Année 1 - Convention 2008-2013. BRGM/RP-57810-FR, 38 p., 15 ill., 8 ann..

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

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

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

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

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

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

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

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

Platel J.P., Pédron N., Gomez E., Saltel M. (2010) - Perspectives de gestion des nappes du Secondaire en Agenais-Périgord. Synthèse géologique et hydrogéologique, modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-59330-FR, 217p., 101 fig., 12 tab., 19 ann.

Saltel Marc (2008) - Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds - Fonctionnement hydrogéologique des antiformes du sud de Bordeaux. Thèse de doctorat : Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 268p., 268 p.

Saltel M., Pédron N., Platel J.P., Bourguine B., Gutierrez T. (2011) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 2 – BRGM/RP-59 959-FR, 63 p., 38 fig., 6 ann.

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

Saltel M., Pédron N. (2012) - Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain dans le cadre du module « Tendances et Scénarios » - Rapport final, BRGM/RP-60416-FR 56 p., 24 fig., 5 ann.

Saltel M., Cabaret O. (2012) - Explore 2070 - Hydrologie souterraine - Bassin Aquitain - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie - Armines - BRGM.

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

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

Saltel M., Wuilleumier A., Cabaret O. (2015) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 5. BRGM/RP-65039-FR, 82 p., 39 ill., 21 tab, 10 ann.

Saltel, M., Compère, F., Cabaret, O. (2017) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Module 1.1 - Année 1 - Convention 2015 – 2020. BRGM/RP-66832-FR, 43 p., 19 ill., 4 tabl., 2 ann.

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

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

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

Annexe 1

Historique du MOdèle Nord-Aquitain

MONA V1

Elaboration d'un 1er modèle régional à mailles carrées de 5 km de côté au début des années 90 [(Braneyre, et al., 1993) ; (Braneyre, et al., 1993) ; (Braneyre, et al., 1994)] fonctionnant en régime transitoire sur la période 1972-1992 et simulant les écoulements au sein de 4 couches aquifères : Mio-Plio-Quaternaire (à potentiels imposés), Oligocène, Éocène et Campano-Maastrichtien.

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

MONA V2

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

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

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

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

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

MONA V3

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

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

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

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

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

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

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

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

MONA V4

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

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

La construction du modèle géologique a été initiée en année 3 (Saltel, et al., 2012). Du fait de la limitation du logiciel en termes de nombre de couches, 3 modèles ont été nécessaires pour modéliser l'ensemble du système : un modèle pour les formations du Tertiaire, un autre pour le Crétacé et un dernier pour le Jurassique. Au final, le modèle géologique global comporte 30

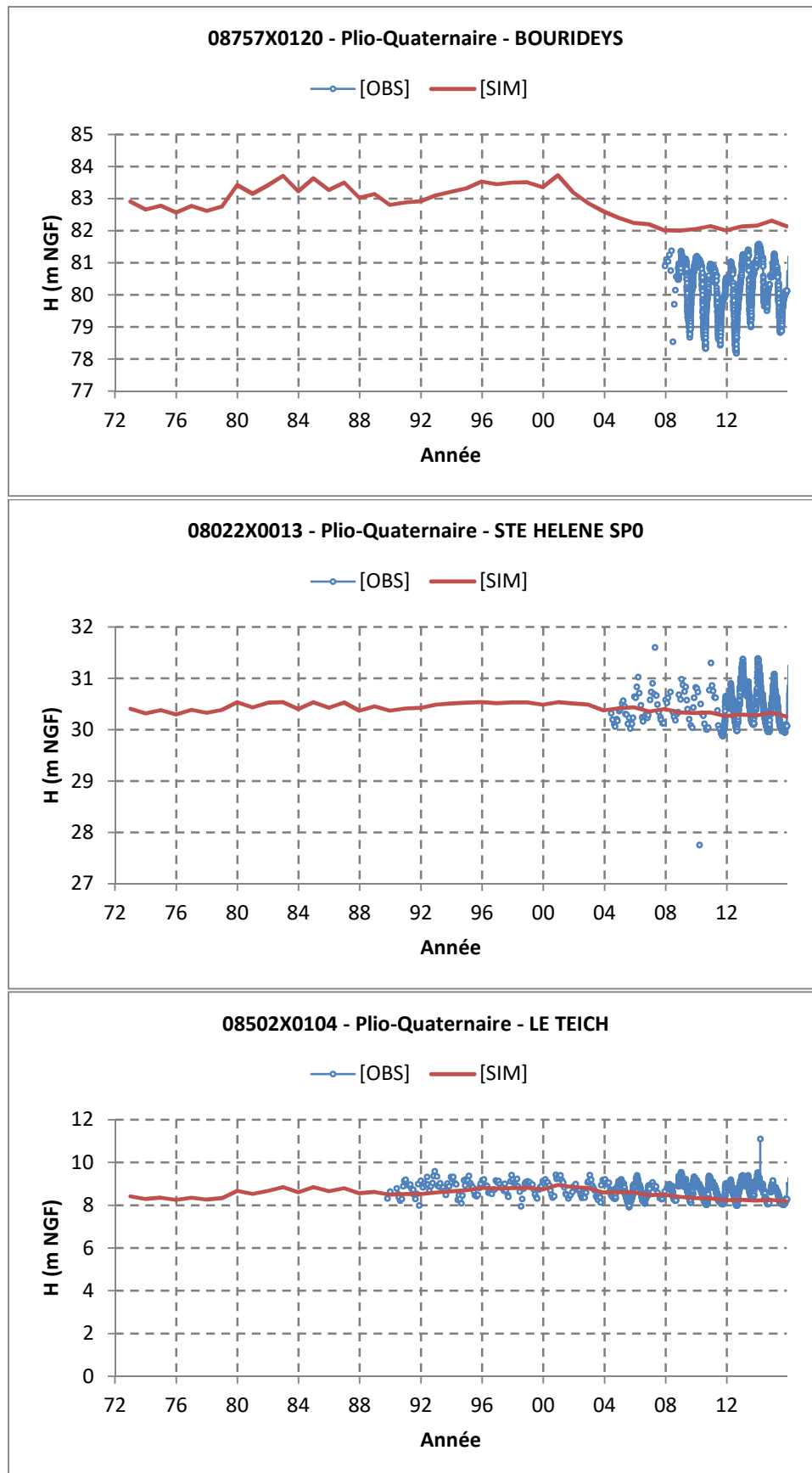
couches dont 15 aquifères, 14 éponges et une couche de recouvrement quaternaire, soit 31 surfaces.

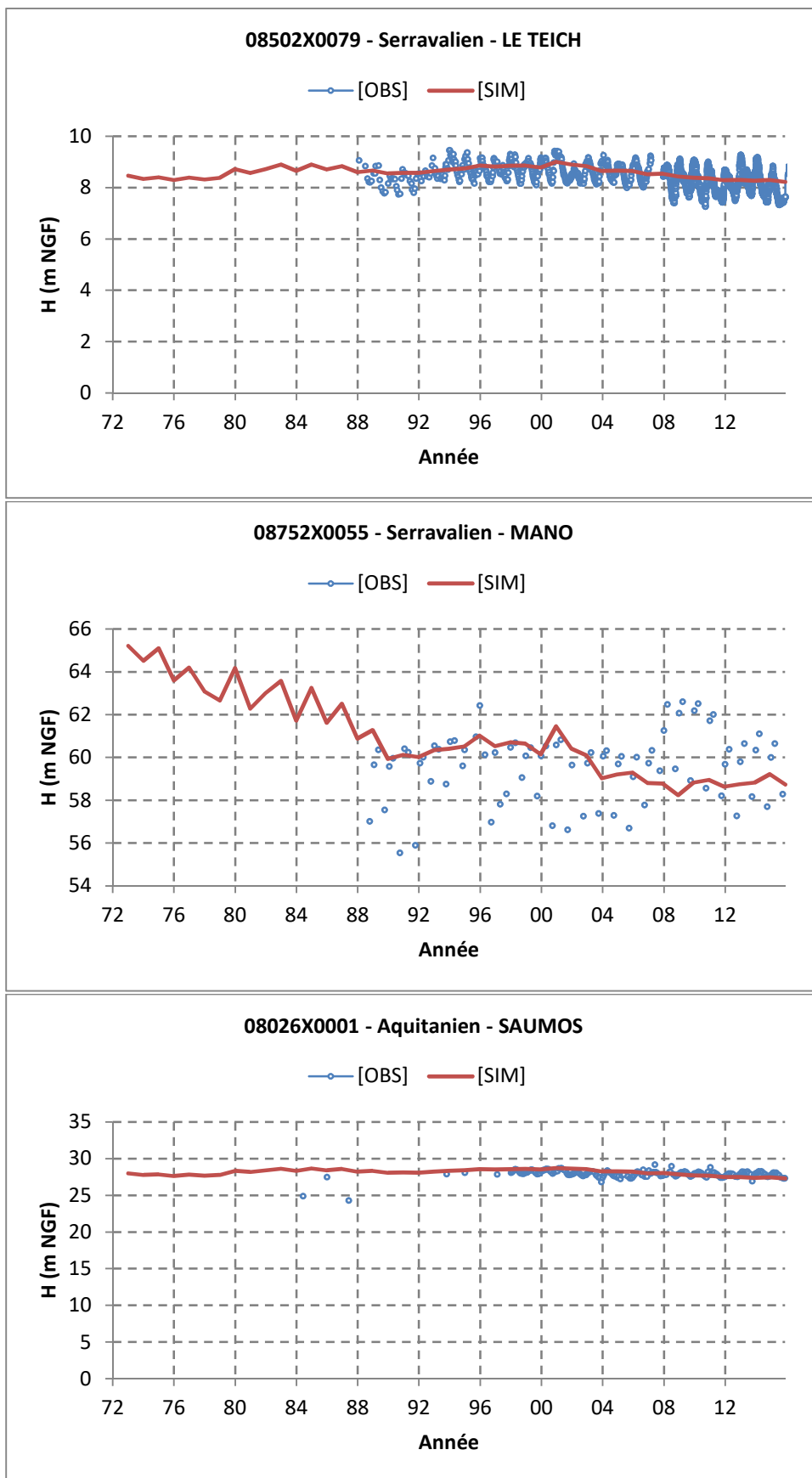
Un travail important de validation et de mise en cohérence des données a été réalisé. Il a notamment porté sur la correspondance des données de sondage et des cartes géologiques. Etant donné l'importance de la surface modélisée, ce sont près de 100 cartes géologiques qu'il a fallu revisiter pour faire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

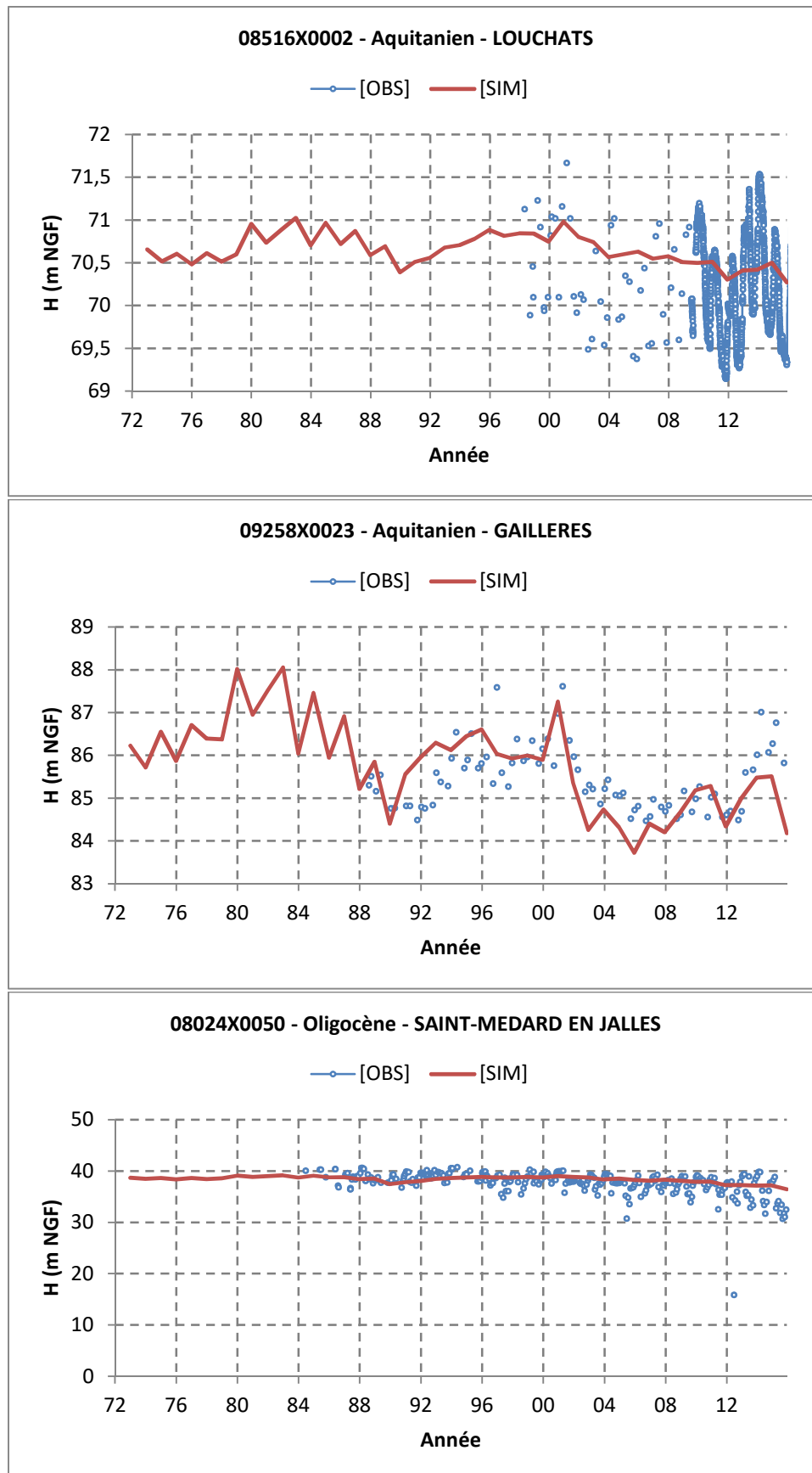
In fine, l'amélioration de la géométrie du modèle finalisé en année 4 (Saltel, et al., 2014) a permis de représenter à une échelle plus fine la complexité des réservoirs du Nord du Bassin aquitain. Les toits et les murs des 30 couches du modèle géologique ont été implémentés dans le modèle hydrodynamique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

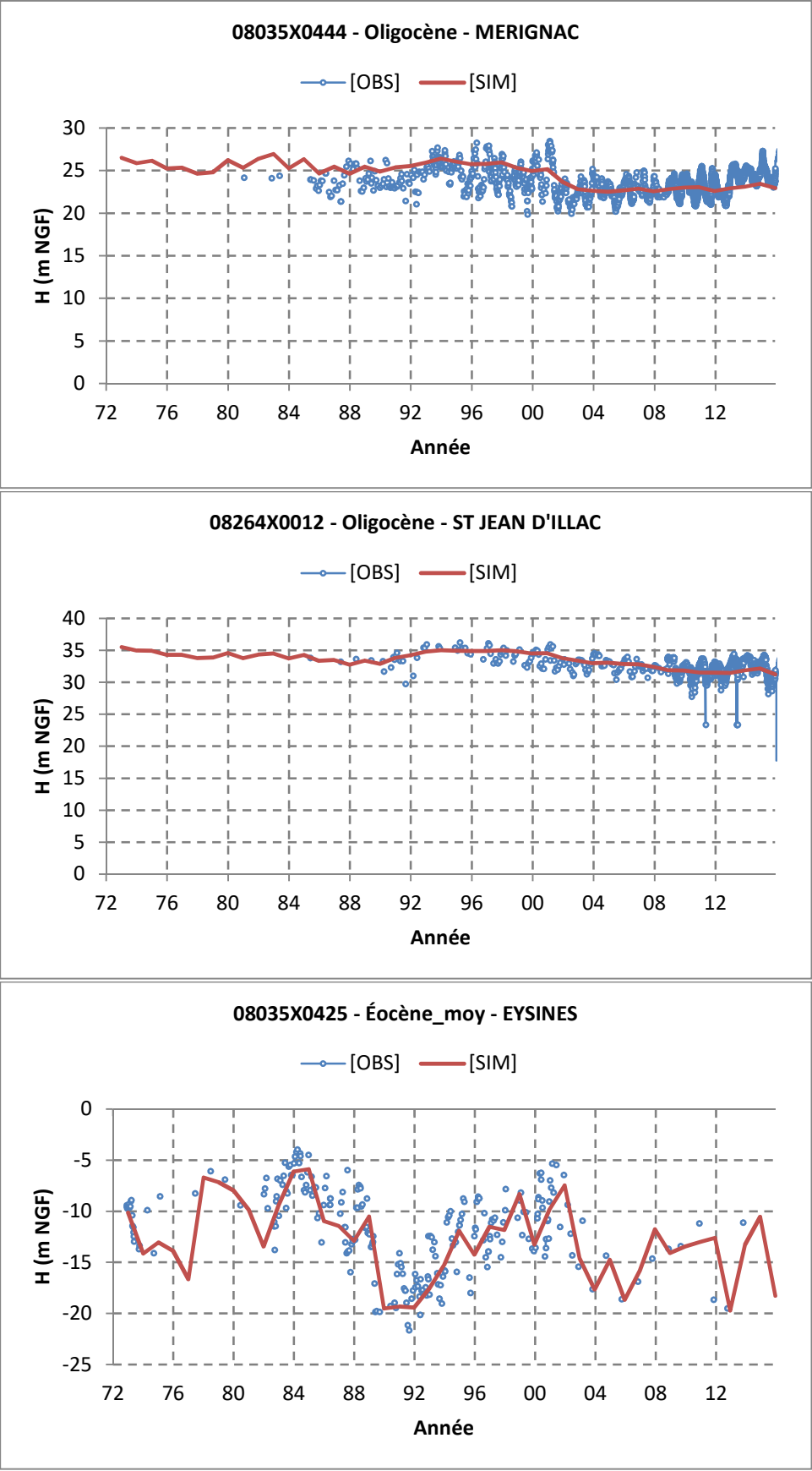
Annexe 2

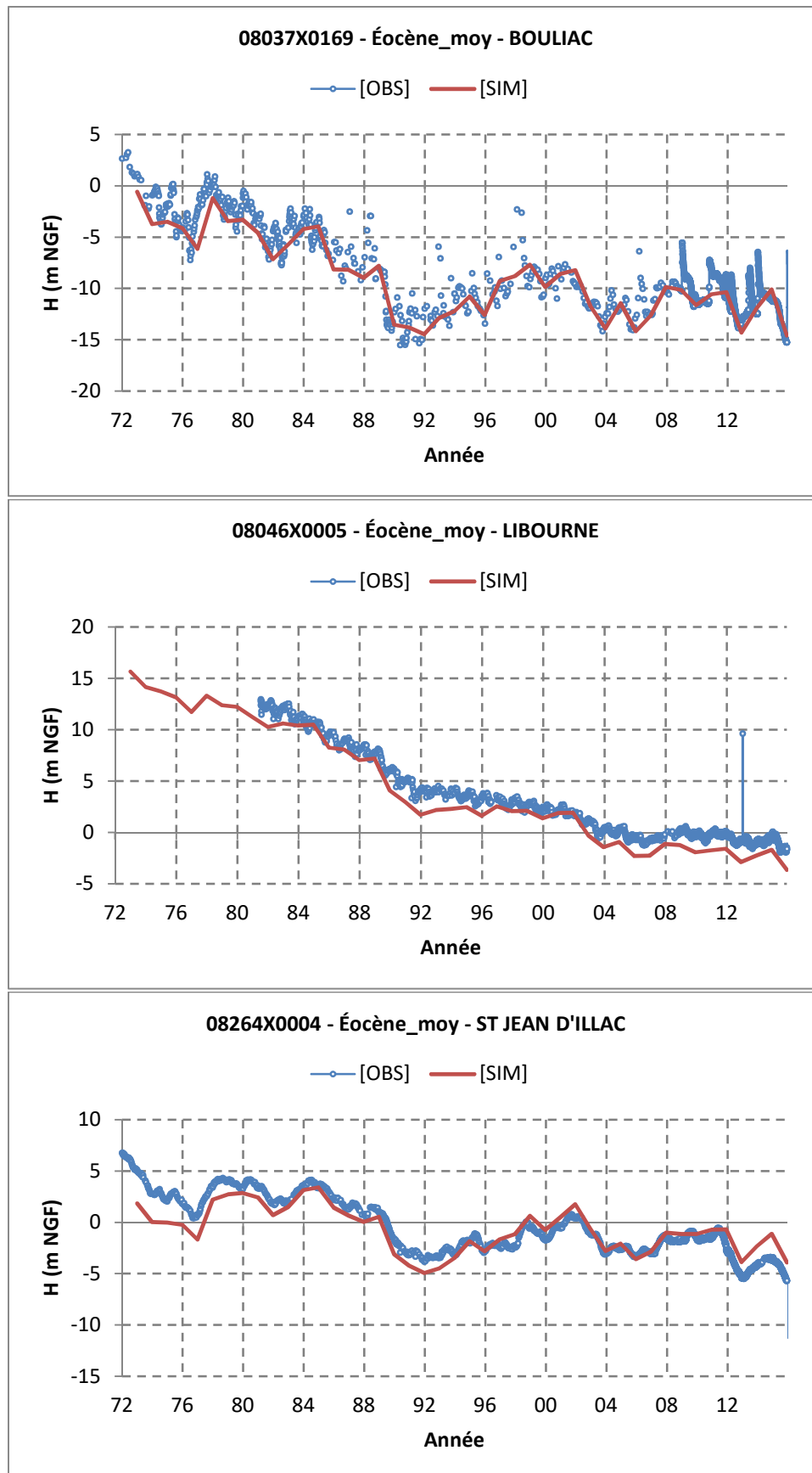
Actualisation des chroniques de calage - période 1972- 2015 (MONA V3.3b)

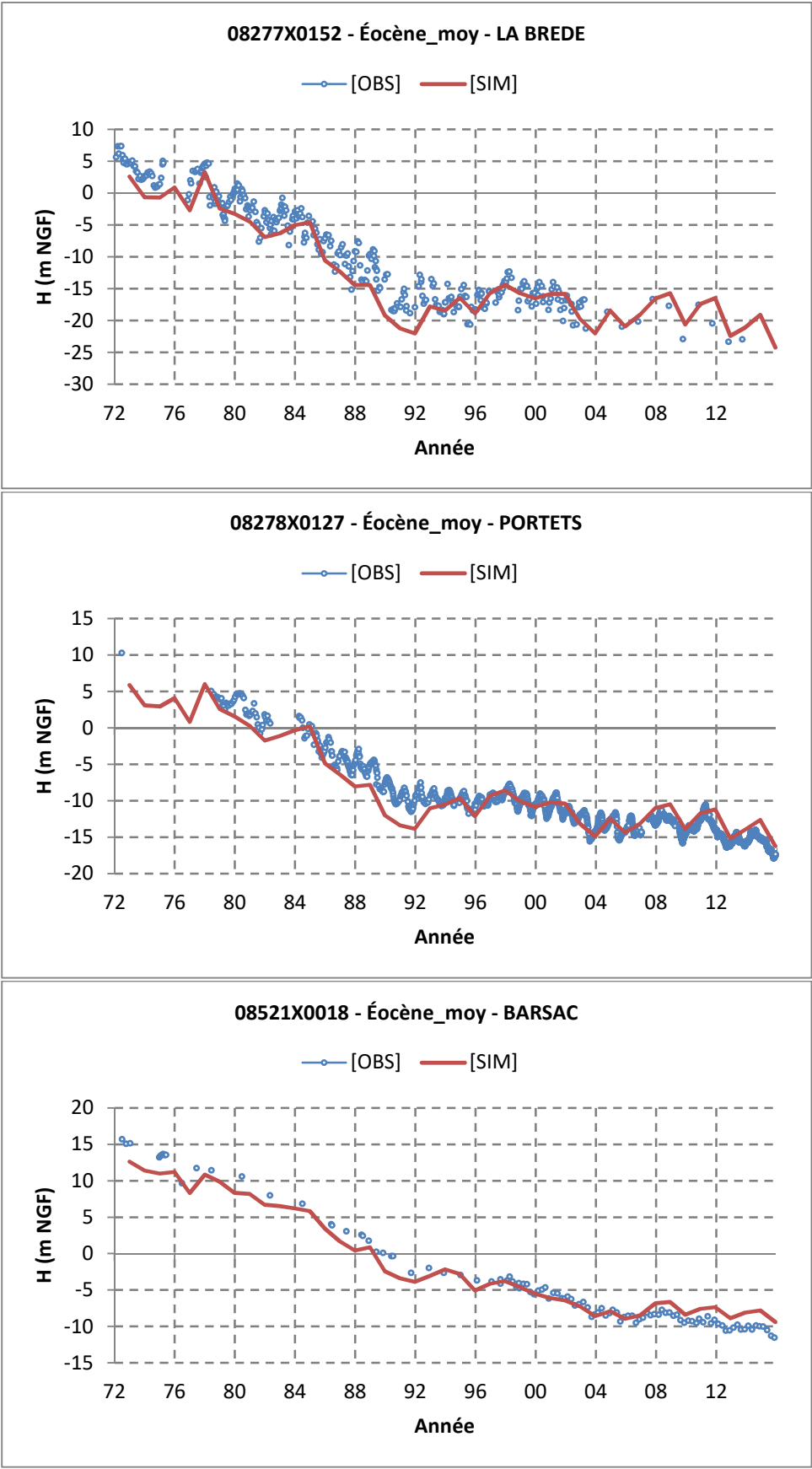


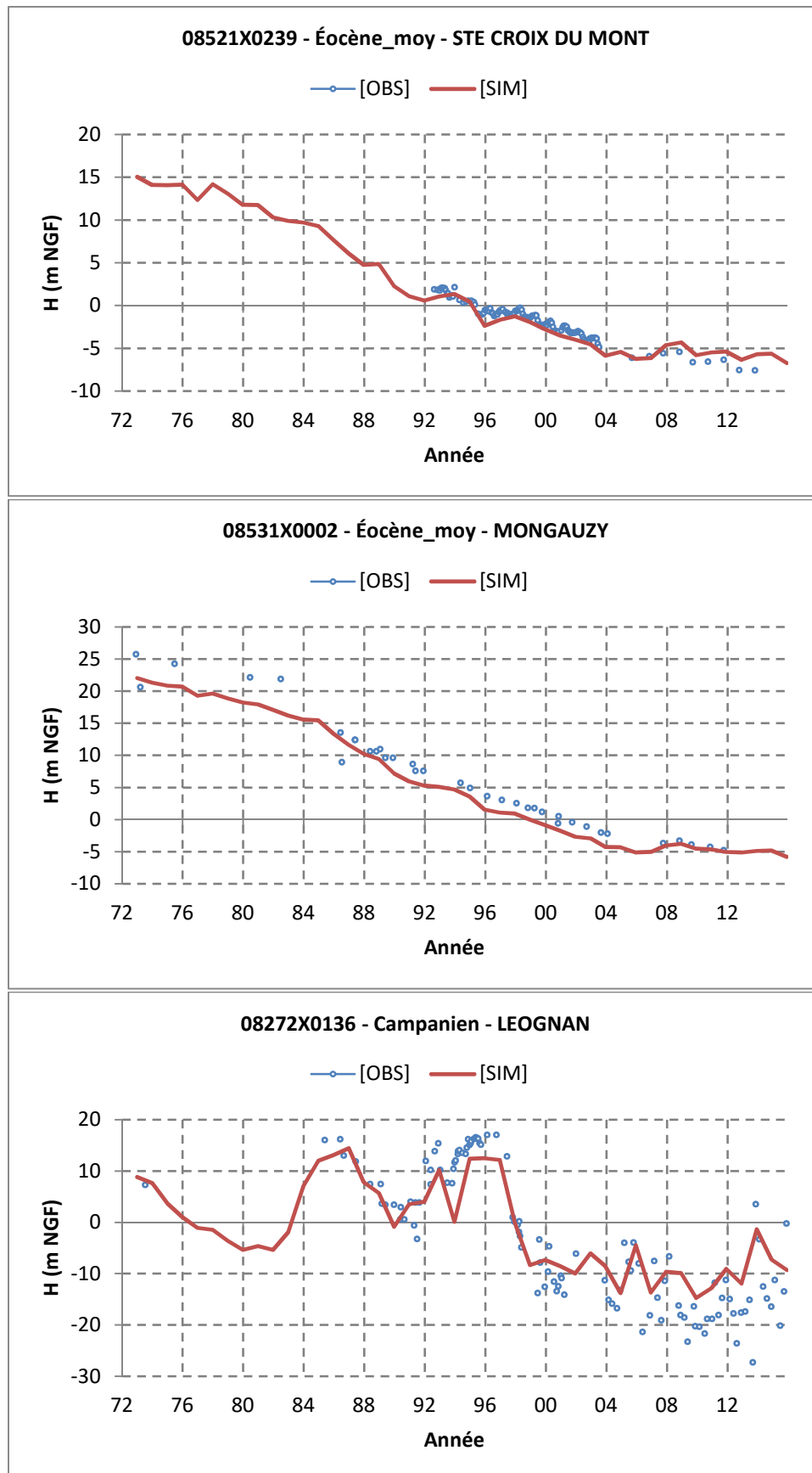


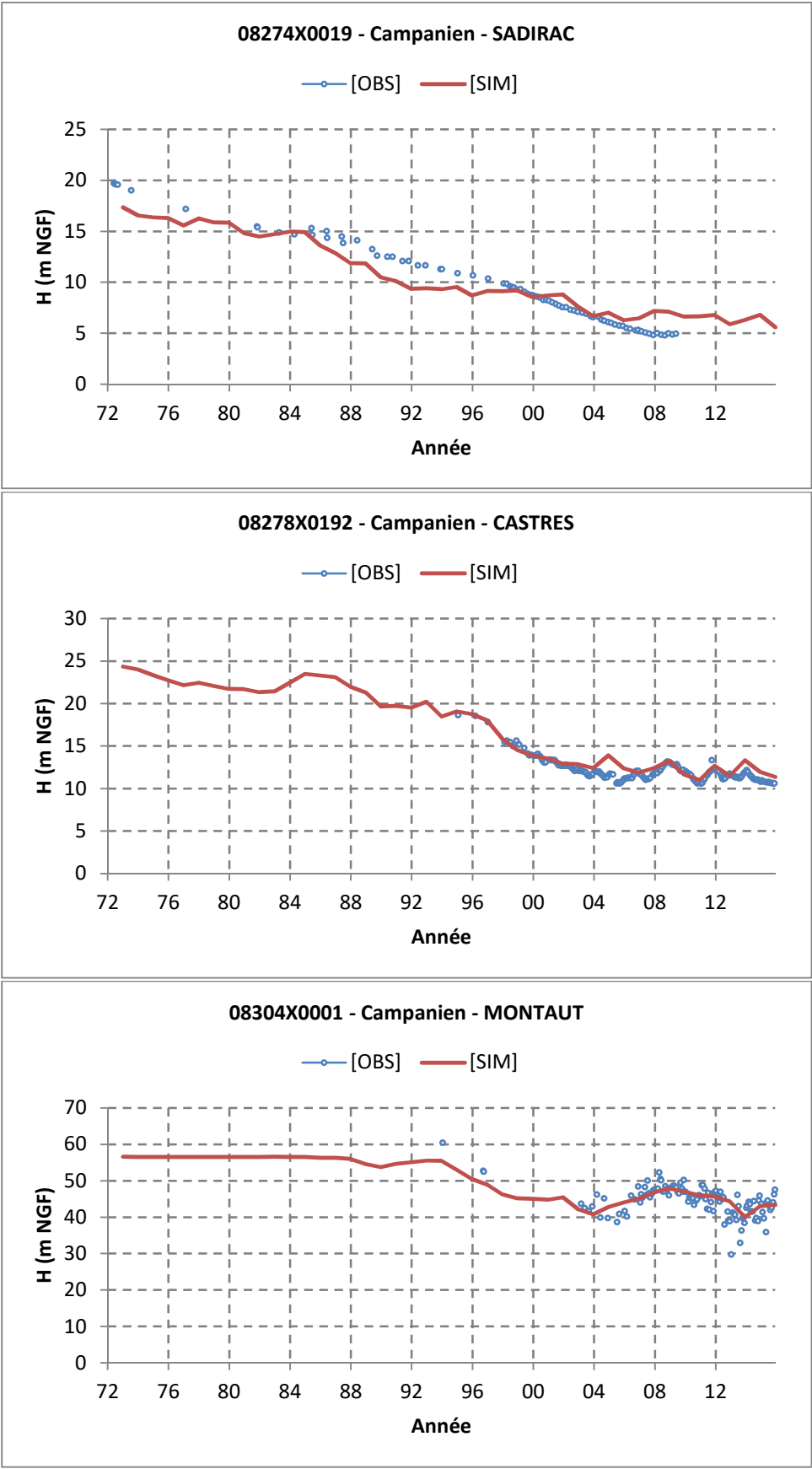


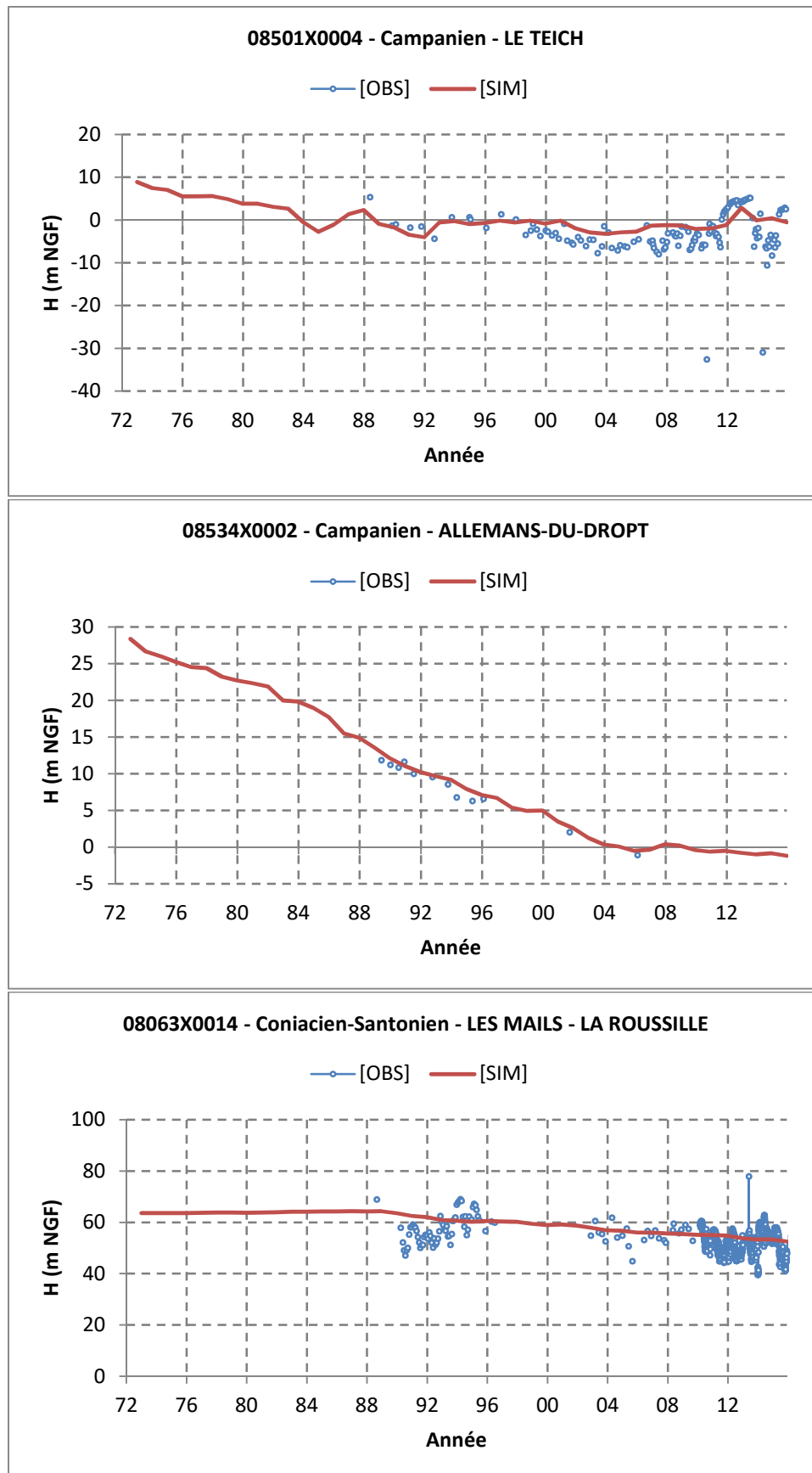


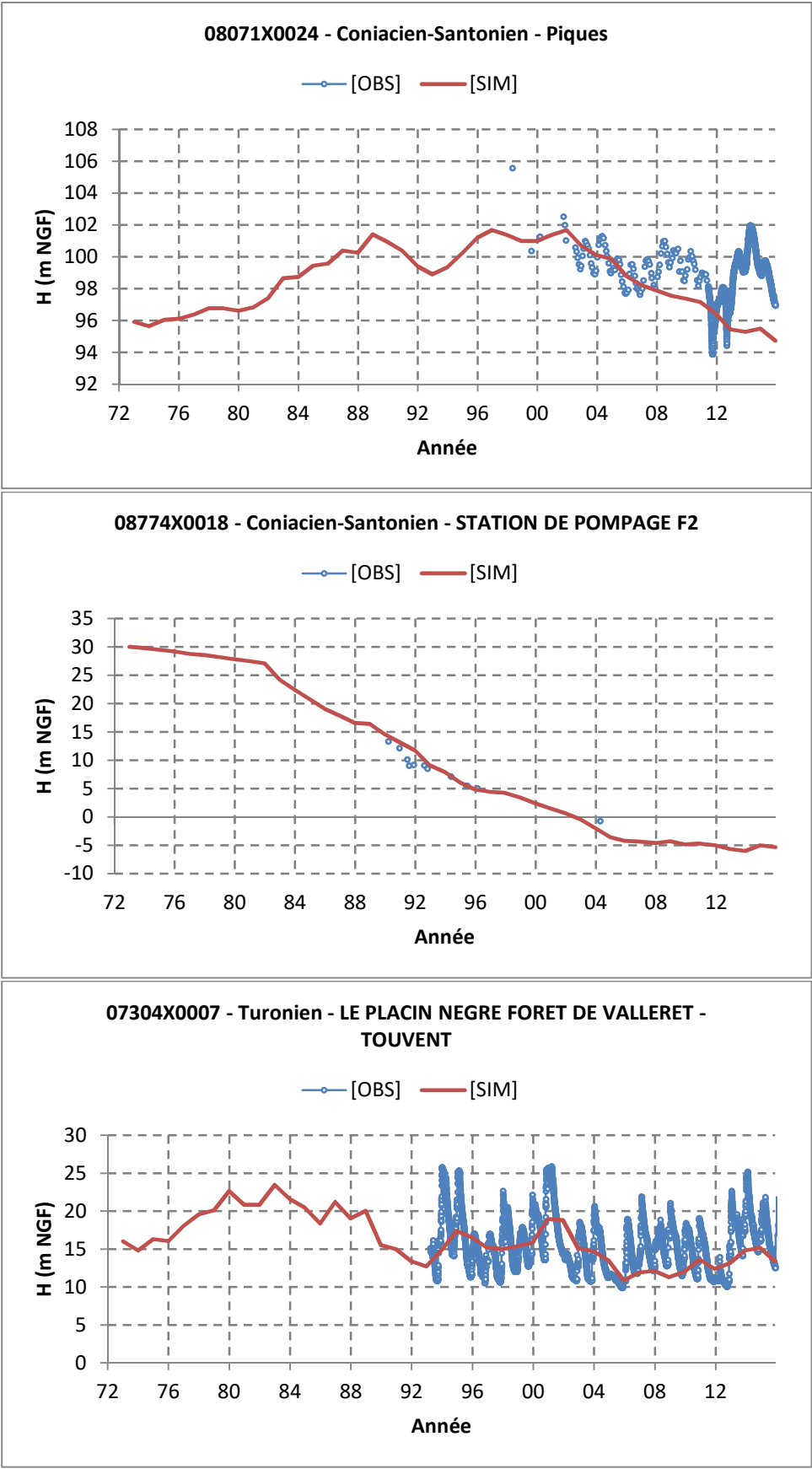


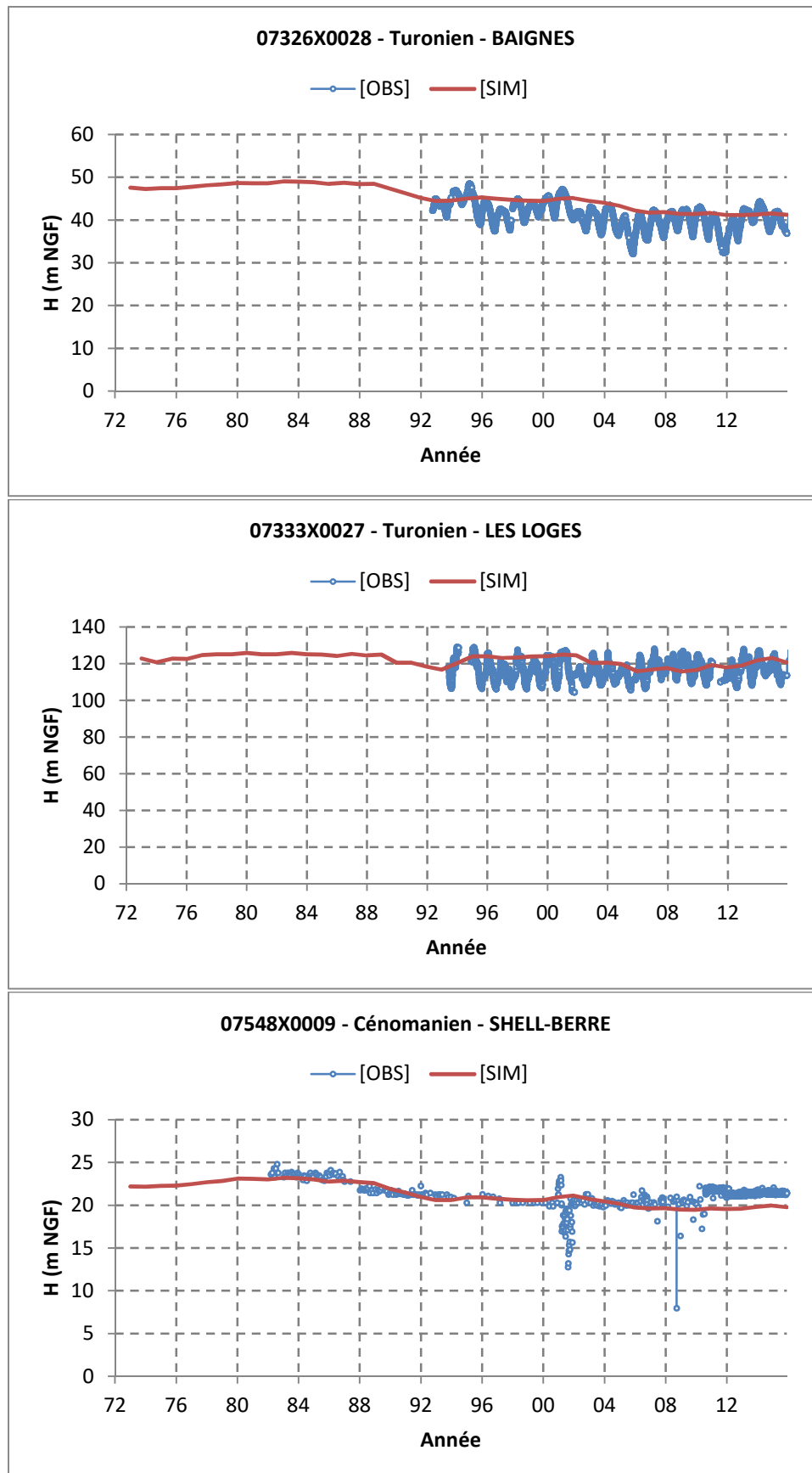


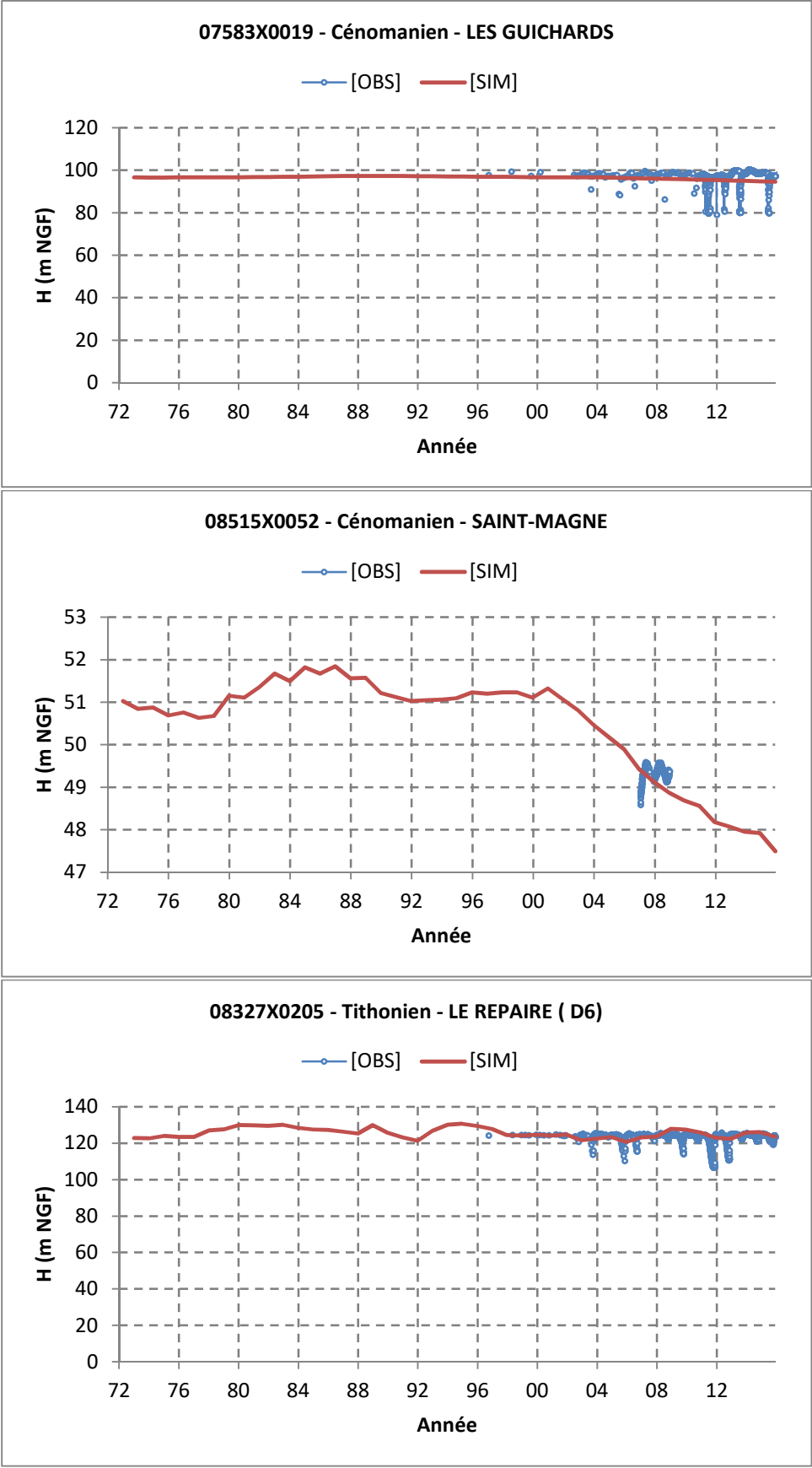


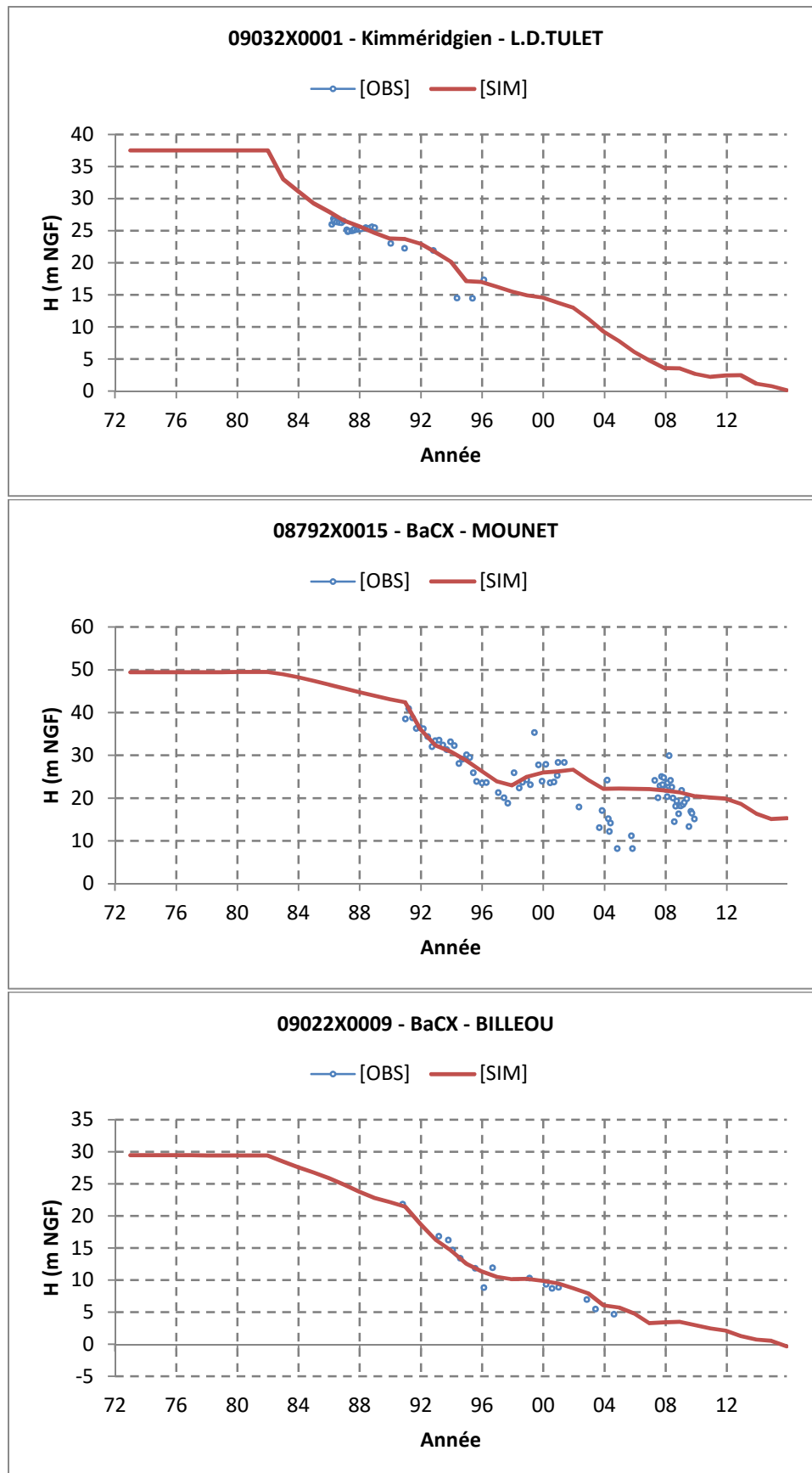


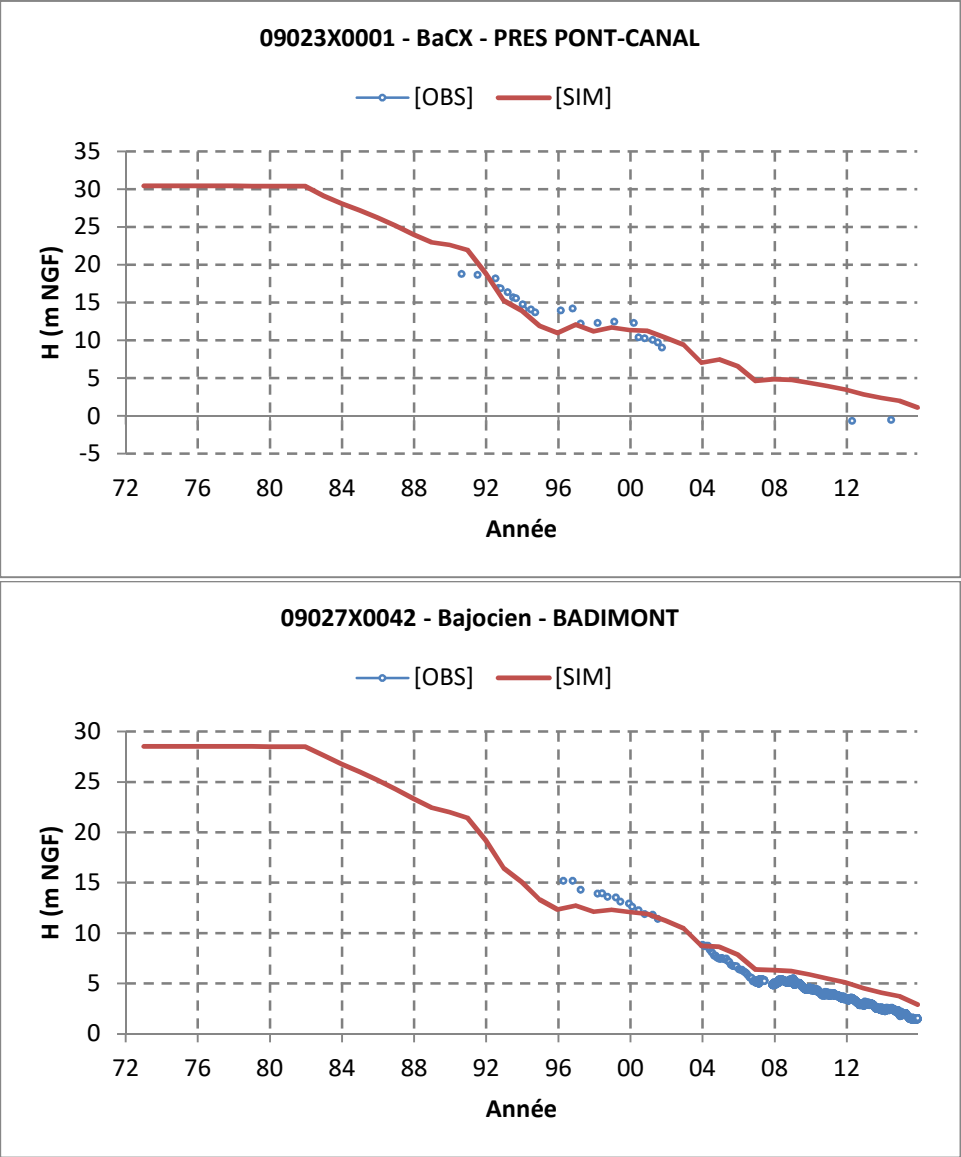














Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Nouvelle-Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci

33600 - Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70