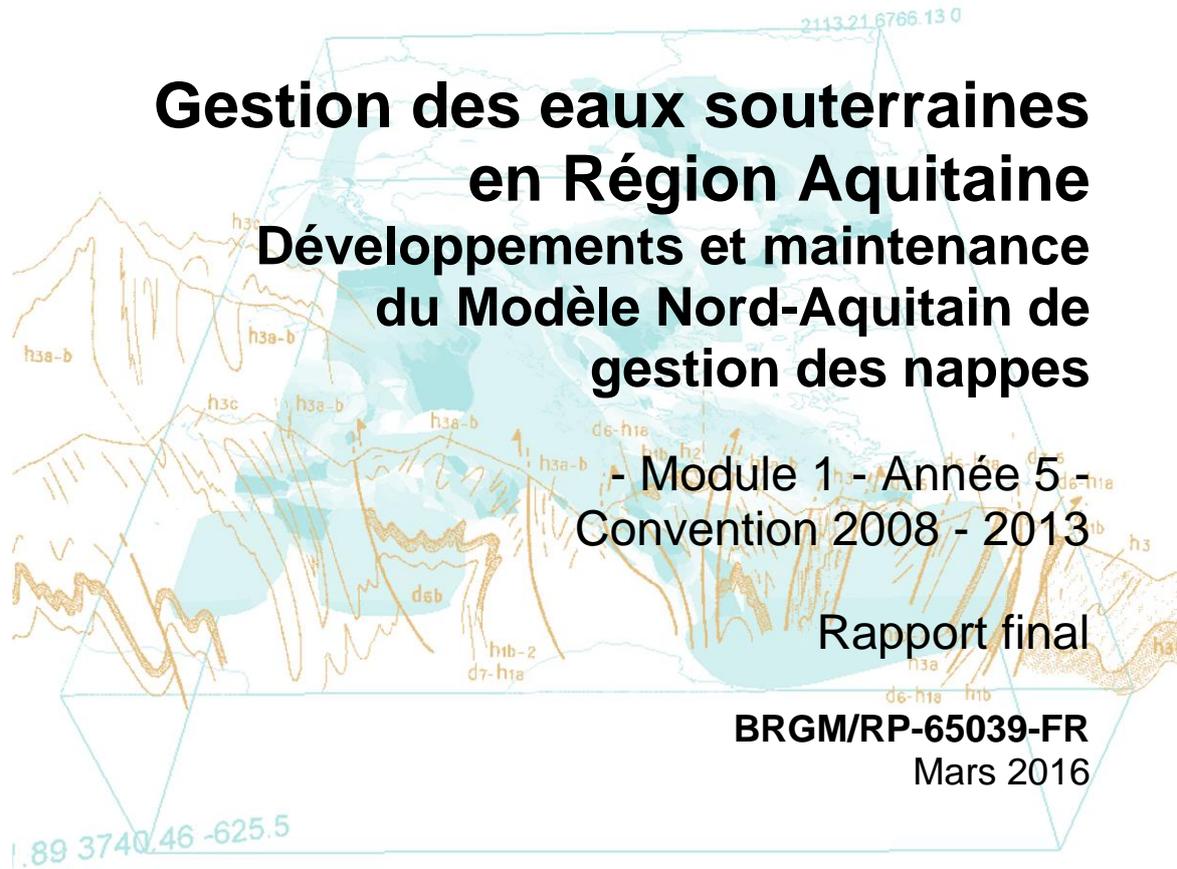


Document public



Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes

- Module 1 - Année 5 -
Convention 2008 - 2013

Rapport final

BRGM/RP-65039-FR
Mars 2016



Prefecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTRE
DU DEVELOPPEMENT DURABLE



RÉGION
AQUITAINE



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

- Module 1 - Année 5 -
Convention 2008 - 2013

Rapport final

BRGM/RP-65039-FR
Mars 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM PSP13AQI19

M. Saltel, A. Wuilleumier et O. Cabaret



Vérificateur :

Nom : Jean-Jacques SEGUIN

Fonction : Hydrogéologue

Date : 16 juin 2016

Approbateur :

Nom : Nicolas PEDRON

Fonction : Directeur du BRGM
Aquitaine

Date : 20 juin 2016

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

Mots-clés : Modélisation 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 moy à inf, Éocène sup, Oligocène, Aquitanien, Serravallien, Plio-Quaternaire.

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

Saltel M., Wuilleumier A., et Cabaret O. (2016) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. Module 1 - Année 5 - Convention 2008-2013. Rapport final BRGM/RP-65039-FR, 82 p., 39 ill., 21 tab, 10 ann.

Synthèse

Cette étude (PSP13AQ119 et PSP13AQ123) a été réalisée dans le cadre de l'année 5 de la convention "Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine" signée entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM pour la période 2008-2013 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 Aquitaine engagés par le BRGM Aquitaine pour élaborer des outils d'aide à la décision destinés à définir au mieux 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 stricte 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 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 2012 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. Le passage d'une maille de 2 km de côté à une maille de 500 m et la meilleure prise en compte des épontes a 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.

Les premières simulations, menées en régime permanent, ont été réalisées pour vérifier que les choix de construction du modèle (potentiels imposés, gamme de perméabilités, recharge,...) conduisent à des premiers résultats cohérents et préparatoires à la phase de calage en régime transitoire. Cela a nécessité des ajustements du champ des perméabilités issu de la version 3.3b du modèle, l'architecture des réservoirs (extensions, épaisseurs,...) ayant été revue. Par ailleurs, le travail de représentation du réseau hydrographique qui sera intégré au MONA a été initié. Il concerne 157 cours d'eau représentant un linéaire total de 5 632 km. Ainsi, pour chacune des 12 240 mailles parcourues par un cours d'eau dans le MONA, les paramètres suivants sont à renseigner : longueur du tronçon du cours d'eau, largeur du tronçon du cours d'eau, cote (absolue) du fond de la rivière (fond de l'eau), cote (absolue) de l'eau dans la rivière, épaisseur et perméabilité du lit de la rivière. Le travail sur le réseau hydrographique sera poursuivi pour être intégré lors de la phase de calage en régime transitoire.

Une phase importante de réflexion sur la méthodologie à utiliser pour intégrer les données climatiques est décrite dans ce rapport. Elle comprend une présentation de la démarche suivie, qui consiste à caractériser les entités hydrogéologiques du MONA v4 présentes à l'affleurement vis-à-vis de la recharge en s'appuyant la décomposition d'hydrogrammes à l'aide du logiciel

GARDENIA du BRGM. Un travail d'analyse préalable des données disponibles (climatiques, hydrologiques, piézométriques,...) a d'abord été réalisé avant toute modélisation GARDENIA.

Au total 15 bassins ont été modélisés permettant d'étudier 10 entités hydrogéologiques du MONA. Cette analyse a permis d'identifier les composantes majeures qui contrôlent la recharge.

Cette première approche de la caractérisation de la recharge doit s'accompagner d'un travail de spatialisation pour attribuer les différents paramètres à des zones homogènes en termes de comportement. Cette spatialisation peut se faire sur des critères géologiques (par entité hydrogéologique – nappe représenté dans le MONA), sur les caractéristiques des sols (cartes pédologiques, ou encore sur l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) pour définir les pôles infiltrants et ruisselants.

Ce travail sera réalisé lors de la phase de calage en régime transitoire qu'il reste à mener lors de la prochaine convention. En effet, les prochains travaux seront consacrés au calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire afin d'aboutir à un MONA version 4 opérationnel. En amont, un travail spécifique sur les points d'observation doit être mené de manière à disposer du nombre de points le plus exhaustif et le plus fiable possible. Un inventaire complet ainsi qu'une validation de l'horizon capté dans chaque piézomètre est primordial.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Actualisation des données spatio-temporelles	11
2.1. PRÉLÈVEMENTS	11
2.1.1. Collecte des données de prélèvements	11
2.1.2. Traitement des données collectées	12
2.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du modèle Nord-Aquitain sur la période 2011-2012	14
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	16
2.3. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	19
2.3.1. Mise à jour des chroniques d'observations	19
2.3.2. Campagne piézométrique complémentaire	20
2.4. RÉSULTATS DU MODÈLE ACTUALISÉ	22
2.4.1. Les chroniques de calage	22
2.4.2. Les cartes piézométriques	23
3. Développement de la version 4 du MONA	27
3.1. PREMIERES SIMULATIONS EN REGIME PERMANENT	27
3.2. ÉLABORATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE	38
3.3. RÉFLEXION SUR LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR INTEGRER LES DONNEES CLIMATIQUES ET CALCULER LE FLUX DE RECHARGE DANS LE MODÈLE	40
3.3.1. Méthodologies d'évaluation de la recharge	40
3.3.2. Données disponibles pour l'évaluation de la recharge	44
3.3.3. Modélisations GARDENIA	64
4. Conclusion	77
5. Bibliographie	79

Liste des illustrations

Illustration 1 - Carte de répartition des points de prélèvements dans l'extension du modèle (6235 ouvrages)	12
Illustration 2 - Évolution des prélèvements dans les couches du Modèle Nord Aquitain de 1972 à 2012 tous départements confondus.....	15
Illustration 3 - Évolution des précipitations efficaces annuelles à la station de Mérignac (33) 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	18
Illustration 5 - Localisation des 430 points de mesures piézométriques	20
Illustration 6 - Localisation des 42 points de mesures complémentaires ayant fait l'objet d'une mesure piézométrique en 2012 et mise en évidence des nappes captées	21
Illustration 7 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Eocène moyen).....	22
Illustration 8 - Contrôle du calage par la réalisation de mesures complémentaires.....	23
Illustration 9 - Niveaux piézométriques simulés par le modèle Nord-Aquitain version MONA V3.3b-2011 dans l'aquifère « Eocène moyen » pour les années 2010 et 2011	24
Illustration 10 - Carte des variations du niveau de la nappe de l'Eocène moyen entre 2011 et 2012.	25
Illustration 11 - Exemple de visualisation 3D du modèle géologique	27
Illustration 12 - Localisation des zones d'affleurement du modèle dans sa version 4 pour chaque nappe et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge	29
Illustration 13 - Évolution du maillage entre la version 3 et la version 4 du MONA.....	30
Illustration 14 - Localisation des 307 points d'observation pour les simulations en régime permanent (année 1996).....	32
Illustration 15 - Diagramme de dispersion de la nappe du Plio-Quaternaire.....	35
Illustration 16 - Diagramme de dispersion de la nappe du Coniacien-Santonien	35
Illustration 17 - Première restitution piézométrique dans le MONA V4 (Nappe de l'Oligocène)	37
Illustration 18 - Réseau hydrographique intégré dans le MONA et points de mesures de débit disponibles	38
Illustration 19 - Algorithme de calcul de la pluie efficace (à gauche) et processus de recharge (à droite)	43
Illustration 20 - Maillage des données SAFRAN de Météo-France et extension du MONA	45
Illustration 21 - Mailles SAFRAN sélectionnées (en rouge) et grille AURELHY 1971-2000 (Météo-France). Les mailles sont référencées par leurs coordonnées X,Y en Lambert 2 étendu kilométrique.....	46
Illustration 22 - Stations de mesure du débit des cours d'eau (Banque HYDRO).....	49
Illustration 23 - Bassins versants des stations de débit délimités à l'aide du MNT de l'IGN au pas de 50 m	50
Illustration 24 - Entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement - MONA V4	51
Illustration 25 - Localisation des piézomètres de suivi	52
Illustration 26 - IDPR sur l'emprise du MONA V4 - version 2015 provisoire	53
Illustration 27 – Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone d'entité hydrogéologique	54

Illustration 28 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone du Langhien-Serravalien (secteur de Mont-de-Marsan - Eauze).....	55
Illustration 29 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Aquitainien	56
Illustration 30 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Oligocène (OLNP et OL2M) ..	57
Illustration 31 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Éocène supérieur	58
Illustration 32 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Éocène moyen	59
Illustration 33 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée pour la zone principale d'affleurement de l'Éocène inférieur	60
Illustration 34 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée pour la zone principale d'affleurement de l'éponte située au toit du Campanien	61
Illustration 35 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par entité hydrogéologique	62
Illustration 36 - Principales entités géologiques affleurantes et tracé des bassins versants sélectionnés ..	67
Illustration 37 - Données d'entrée et de calage des modèles GARDENIA	69
Illustration 38 - Vue, aux stations hydrométriques, des valeurs de RDE déduites des modélisations (fond : entités hydrogéologiques MONA V4)	73
Illustration 39 - Coefficient RUIPER et part simulée du débit souterrain dans le débit du cours d'eau	75

Liste des tableaux

Tableau 1 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA-V3.3b en 2010 et 2012 (m ³ /an)	14
Tableau 2 - Précipitations efficaces (mm) en 2010, 2011 et 2012 calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA	16
Tableau 3 - Nombre de chroniques piézométriques utilisées pour le calage	19
Tableau 4 - Comparaison des différentes versions du MONA.....	28
Tableau 5 - Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA en version V4.	28
Tableau 6 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA-V4 en 1996 (m ³ /an)	31
Tableau 7 - Nombre de points d'observation par nappe pour les simulations en régime permanent.....	31
Tableau 8 - Résidu absolu calculé en régime permanent pour chacune des couches du modèle.....	34
Tableau 9 - Réserve utilisable du sol en fonction de sa texture (Baize et al., 1995)	42
Tableau 10 - Comparaison de la pluviométrie annuelle 1959-1983 à celle de 1990-2014 (d'après données SAFRAN - Météo-France).....	46
Tableau 11 - Identification de ruptures dans les chroniques d'ETP analysées par application du test de « segmentation de Hubert ».....	47
Tableau 12 - Comparaison de l'ETP annuelle 1959-1983 à celle de 1990-2014 (d'après données SAFRAN – Météo-France)	47
Tableau 13 - Comparaison de l'ETP de septembre à avril de la période 1958-1983 à la période 1989-2014 (d'après données SAFRAN - Météo-France).....	47
Tableau 14 - Comparaison de la pluviométrie de septembre à avril de la période 1958-1983 à la période 1989-2014 (d'après données SAFRAN – Météo-France)	48
Tableau 15 - Comparaison de la pluie efficace calculée par année hydrologique sur la période 1958-1983 à celle de 1989-2014 (d'après données SAFRAN – Météo-France)	48
Tableau 16 - Bassins versants présentant à l'affleurement une entité hydrogéologique prédominante	51
Tableau 17 - Valeurs médianes de l'IDPR par entité hydrogéologique présente à l'affleurement	63

Tableau 18 - Entités hydrogéologiques présentes à l’affleurement dans les bassins versants modélisés	65
Tableau 19 - Bassins versants ayant fait l’objet de modélisations GARDENIA et données associées	70
Tableau 20 - Valeurs de RDE et de temps de demi-percolation par bassin versant	72
Tableau 21 - Valeurs de RUIPER et d’IDPR par bassin versant (* la valeur de l’IDPR dans le bassin versant de la Berle de la Garroueyre est supposée identique à celle du Canteloup).....	75

Liste des annexes

Annexe 1 Historique du Modèle Nord Aquitain	83
Annexe 2 Exemple d’une fiche technique d’un forage mesuré	89
Annexe 3 Résultats de la campagne de mesure.....	93
Annexe 4 Actualisation des chroniques de calage – période 1972 - 2012	97
Annexe 5 Liste des stations hydrométriques avec une mesure de débit sur le domaine d’extension du MONA	117
Annexe 6 Chroniques de données pluviométriques et d’évapotranspiration en six mailles de la grille SAFRAN de Météo-France.....	123
Annexe 7 Entités hydrogéologiques du MONA V4.....	129
Annexe 8 Fonctionnement du logiciel GARDENIA et principes de calage	133
Annexe 9 Modélisations GARDENIA : tableau récapitulatif des résultats par bassin versant	139
Annexe 10 Modélisations GARDENIA : chroniques de calage	143

1. Introduction

Les travaux présentés dans ce rapport ont été effectués dans le cadre du module 1 de l'année 5 de la convention "Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine" (convention comprenant 6 modules) signée entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM pour la période 2008-2013 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 Aquitaine engagés par le BRGM Aquitaine depuis près de 20 ans pour disposer d'outils d'aide à la gestion et à la décision, et définir ainsi au mieux 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 20 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)]. 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 composé de 3 couches (Oligocène, Eocène et Crétacé supérieur) et à mailles carrées de 5 km de côté, ce modèle (MONA V3.3b-2007) intègre aujourd'hui 30 couches (du Plio-Quaternaire au Jurassique moyen) à mailles carrées de 500 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). D'un point de vue plus global, 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 module de la Convention a pour objectif la maintenance et le 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 2012 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 permanent, l'intégration du réseau hydrographique et la réflexion menée sur la prise en compte de la recharge.

2. Actualisation des données spatio-temporelles

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

2.1. PRÉLÈVEMENTS

Afin de restituer au mieux les variations piézométriques de chacune des nappes modélisées sur l'ensemble de la période considérée (1972-2012), 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 pour 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 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 les sollicitations auprès des agriculteurs et des conditions climatiques de l'année considérée.

Concernant 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.

La base de données des prélèvements comprend actuellement 7 446 ouvrages parmi lesquels seuls 6 235 entrent dans l'extension totale du modèle, sollicitant l'ensemble des couches aquifères. Pour chaque forage, des volumes annuels sont renseignés sur la période 1972-2012. Les points de prélèvements (Illustration 1) sont particulièrement concentrés au niveau de l'agglomération de Bordeaux et de ses environs, du sud de la Charente-Maritime et à l'est des Landes. En revanche, aucun point de prélèvements dans le Lot n'est actuellement pris en compte.

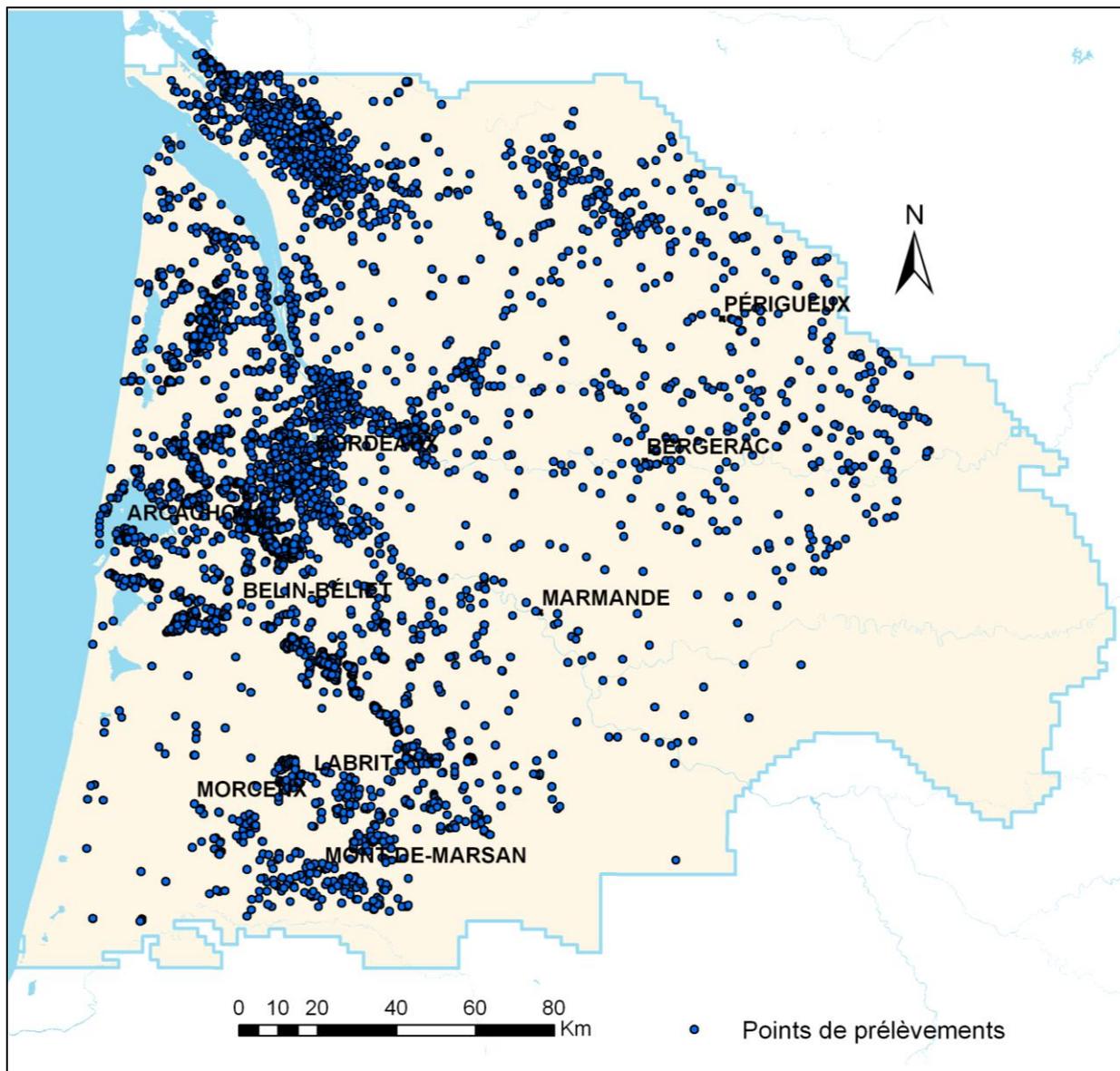


Illustration 1 - Carte de répartition des points de prélèvements dans l'extension du modèle (6235 ouvrages)

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, redevance pour l'AEAG). L'organisation qui en découle conduit à une grande hétérogénéité dans les données. 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 a été réalisé pour faire la liaison entre les codes BSS et les codes AEAG. Le but étant d'identifier de manière permanente chaque ouvrage et ainsi attribuer facilement les volumes prélevés pour les prochaines actualisations de la base. Cette identification a été faite à partir du nom de la commune, du nom attribué au point de prélèvement, de la localisation, de la profondeur de l'ouvrage et des chroniques des volumes prélevés.

Cette recherche s'est focalisée principalement sur les départements de la Dordogne (24), du Lot-et-Garonne (47), des Landes (40) et de la Charente-Maritime (17) pour les forages servant à l'Alimentation en Eau Potable (AEP) et les points à usage industriel. En effet, du fait du faible taux de correspondance entre codes, il a été choisi de se concentrer dans un premier temps sur les usages dont les volumes sont considéré comme fiables et sur les départements où seul l'AEAG et une demande directe à l'exploitant permettent d'obtenir des informations sur les volumes prélevés.

Ce travail de correspondance entre bases a permis de mettre en évidence certaines incohérences : différence de profondeur finale de l'ouvrage, différence dans l'usage du forage, erreur dans les correspondances déjà existantes,...

Au final, la correspondance entre code BSS et code AEAG porte sur 1 053 forages.

La base des volumes prélevés du modèle disposait déjà de chroniques pour certains points de prélèvements. De ce fait, grâce à la recherche de correspondance entre les codes de l'AEAG et de la BSS, les historiques de prélèvements sur la période 1996-2011 ont pu être vérifiés. Ceci a permis dans certains cas de remplacer les reports effectués jusque-là faute de données, par des volumes réels. Lorsque aucun volume n'était attribué aux ouvrages dans la base des volumes, ces volumes réels ont été rajoutés en précisant la source (souvent AEAG). Une trentaine de chroniques de volumes prélevés sur la période de 1996 à 2004 et plus de 200 chroniques de 2004 à 2011 ont pu être ainsi vérifiées ou ajoutées.

En complément de la vérification des historiques des prélèvements déjà intégrés dans le modèle sur la période 1996-2011, nous avons procédé à la mise à jour des volumes de 2012. Pour les points avec correspondance de codes AEAG et BSS, les volumes réels indiqués sur le site de l'AEAG sont intégrés à la base des volumes.

Concernant les points sans correspondance de code, les volumes de l'année 2012 ajoutés à la base sont soit obtenus auprès de l'exploitant directement (il s'agit alors de volumes réels) soit issus d'un report de l'année précédente (ici 2011) lorsque le forage est à notre connaissance, toujours en exploitation.

Les ouvrages agricoles représentent un cas particulier : les seules sources d'informations sont les recueils effectués par les Chambres d'Agriculture et dans une moindre mesure les données transmises par l'AEAG (très difficiles à exploiter car les redevances pour cet usage ne sont pas gérées à l'ouvrage mais au compteur). Le recoupement des données est donc très difficile (notamment dans le Miocène et le Plio-Quaternaire où les ouvrages agricoles sont très nombreux) et les données bancarisées correspondent alors souvent au report des prélèvements, depuis l'année de mise en service du forage.

Concernant ces ouvrages, ce sont principalement des reports qui ont donc été effectués pour l'année 2012.

2.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du modèle Nord-Aquitain sur la période 2011-2012

Les prélèvements totaux, par an et par nappe, injectés dans le modèle Nord-Aquitain pour les années 2010 à 2012 sont indiqués ci-après (Tableau 1).

Aquifères	Prélèvements (en m ³) selon les années		
	2010	2011	2012
Helvétien	22 776 557	22 569 585	22 438 020
Aquitainien	36 235 524	34 610 160	34 254 531
Oligocène	65 546 439	64 355 765	62 501 748
Eocène supérieur	2 958 608	3 100 516	2 640 996
Eocène moyen	53 207 472	53 481 913	58 674 579
Eocène inférieur	9 734 517	9 309 642	9 930 242
Campanien	16 486 550	16 314 338	14 778 631
Coniacien-Santonien	20 014 824	19 028 502	19 521 375
Turonien	28 354 994	27 628 318	28 155 211
Cénomanién	13 491 039	13 304 997	13 016 657
Tithonien	689 342	691 336	790 902
Kimméridgien	3 268 009	3 026 241	3 092 824
BACX	10 783 916	10 098 379	11 279 780
Bajocien	4 232 333	4 395 760	4 208 901
TOTAL	287 780 131	281 915 457	285 284 404

Tableau 1 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA-V3.3b en 2010 et 2012 (m³/an)

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

Le modèle comprend entre autres 3 886 ouvrages à usage agricole, 226 ouvrages industriels et 939 points d'eau destinés à l'AEP (alimentation en eau potable).

Les 6 235 points du modèle se répartissent ainsi : 85 forages en Lot-et-Garonne, 539 dans les Landes, 4396 en Gironde, 399 en Dordogne, 686 en Charente-Maritime, 129 en Charente et 1 dans le Gers (Illustration 1).

Sur les 6235 ouvrages considérés comme entrant dans les limites du MONA, 75 ouvrages, situés à l'extérieur du maillage mais très proches des limites du MONA, ont été légèrement déplacés afin d'être pris en compte. Cette opération est liée à la taille du maillage de la version 3 du modèle (2km x 2km) qui ne permet pas de retranscrire de façon stricte les limites d'extension des réservoirs. C'est la raison pour laquelle certains forages se trouvent en dehors du maillage du modèle.

La représentation graphique des prélèvements par année (Illustration 2) montre que les réservoirs de l'Oligocène et de l'Eocène moyen sont les plus sollicités. En effet, les volumes pompés sont largement supérieurs à ceux des autres nappes, avec près de 20% du volume total représenté pour chacun d'eux. L'Oligocène est devenu, depuis le début des années quatre-vingt-dix, l'aquifère le plus exploité parmi les nappes modélisées.

Par ailleurs, il est possible de constater qu'en dehors des fluctuations liées aux conditions climatiques (plus ou moins favorables), les prélèvements peuvent être considérés comme quasi stables depuis les années 2000 à l'exception de l'Oligocène.

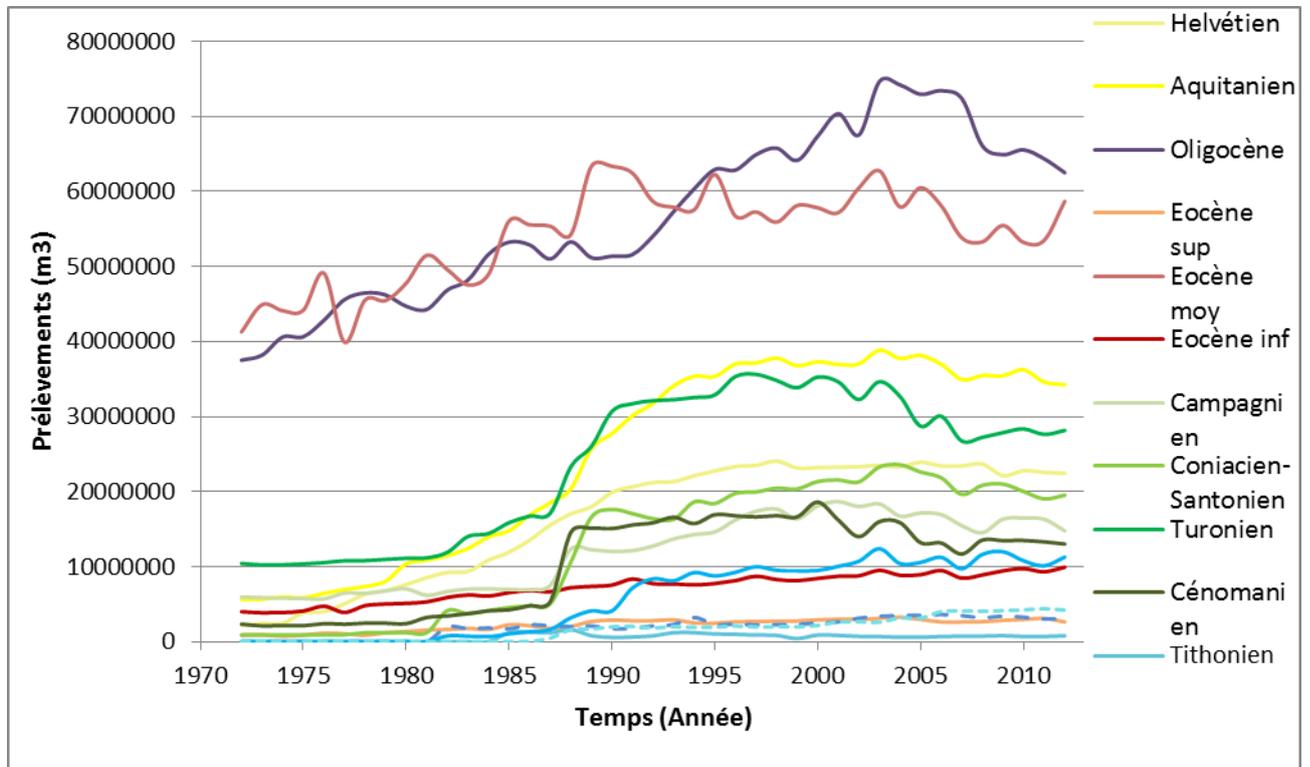


Illustration 2 - Évolution des prélèvements dans les couches du Modèle Nord Aquitain de 1972 à 2012 tous départements confondus

Les prélèvements de l'aquifère du Plio-Quaternaire n'ont pas été pris en compte. En effet, la connaissance des prélèvements sur cet aquifère est très parcellaire selon les années et n'est pas uniforme selon les départements.

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

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 Publithèque). Les données de ces stations sont utilisées dans le modèle pour le calcul de la recharge des nappes par zones météorologiques (ZMTO).

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

- des précipitations (P),
- de l'évapotranspiration potentielle (ETP),
- de la capacité maximale en eau du sol (la réserve utile RU), fixée à deux valeurs : 100 mm et 150 mm.

L'évolution des précipitations efficaces annuelles depuis 1972 (pour une RU de 150 mm) à la station de mesure de Mérignac en Gironde (Illustration 3) montre que l'année 2012 correspond à une année moyenne alors que pour les autres stations, les valeurs de 2012 sont inférieures à la moyenne (Tableau 2).

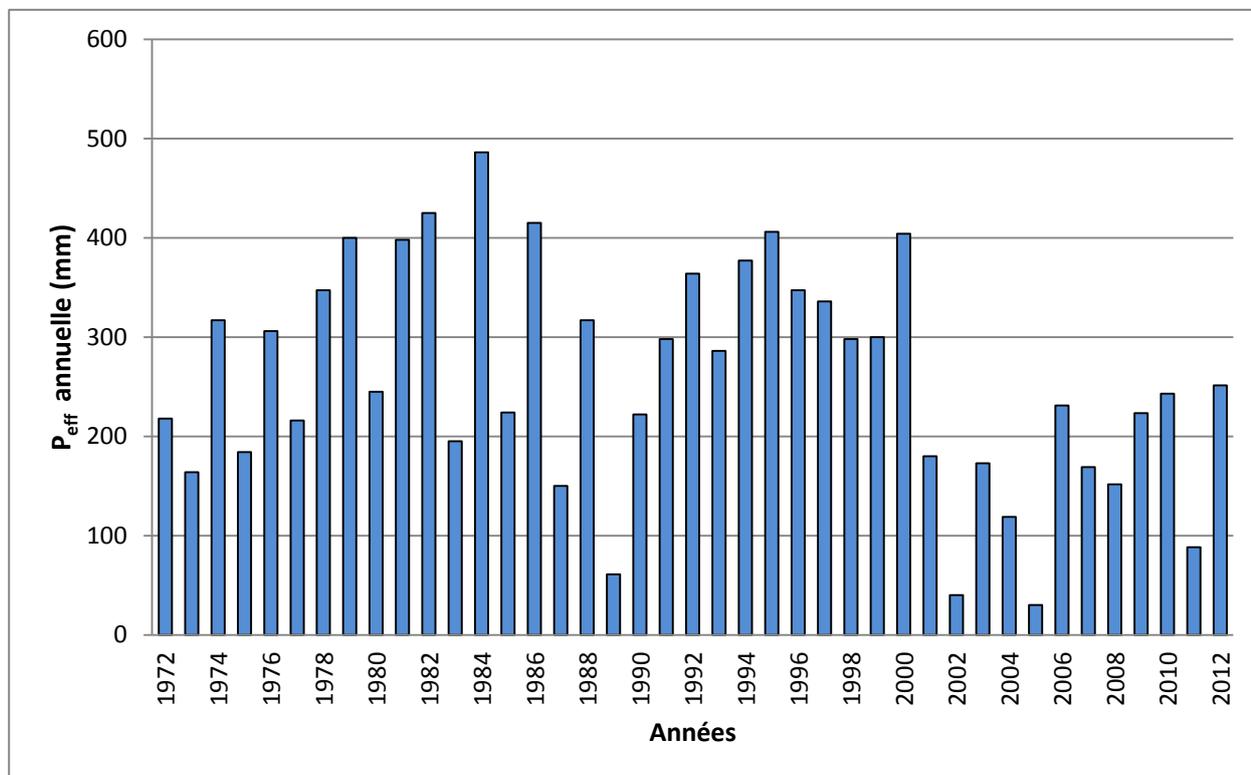


Illustration 3 - Évolution des précipitations efficaces annuelles à la station de Mérignac (33) pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm

Années	Précipitations efficaces Pe _{eff} (mm) selon les stations				
	Mérignac (33)	Cognac (16)	Gourdon (46)	Bergerac (24)	Mont-de-Marsan (40)
2010	243	183	114	115	296
2011	88	67	34	39	146
2012	251	144	91	31	268
Moyenne	259	166	168	155	292

Tableau 2 - Précipitations efficaces (mm) en 2010, 2011 et 2012 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 dernier rapport BRGM/RP-53 659-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 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 moyenne calculée sur la période 1971-2011.

La localisation des zones de recharge de chaque couche du modèle ainsi que les stations météorologiques qui s'y rattachent est présentée 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 35 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), 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-Callovo-Oxfordien
- 1 : numéro de la station météorologique
- 9 : superficie réelle de l'affleurement dans la maille comprise 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.

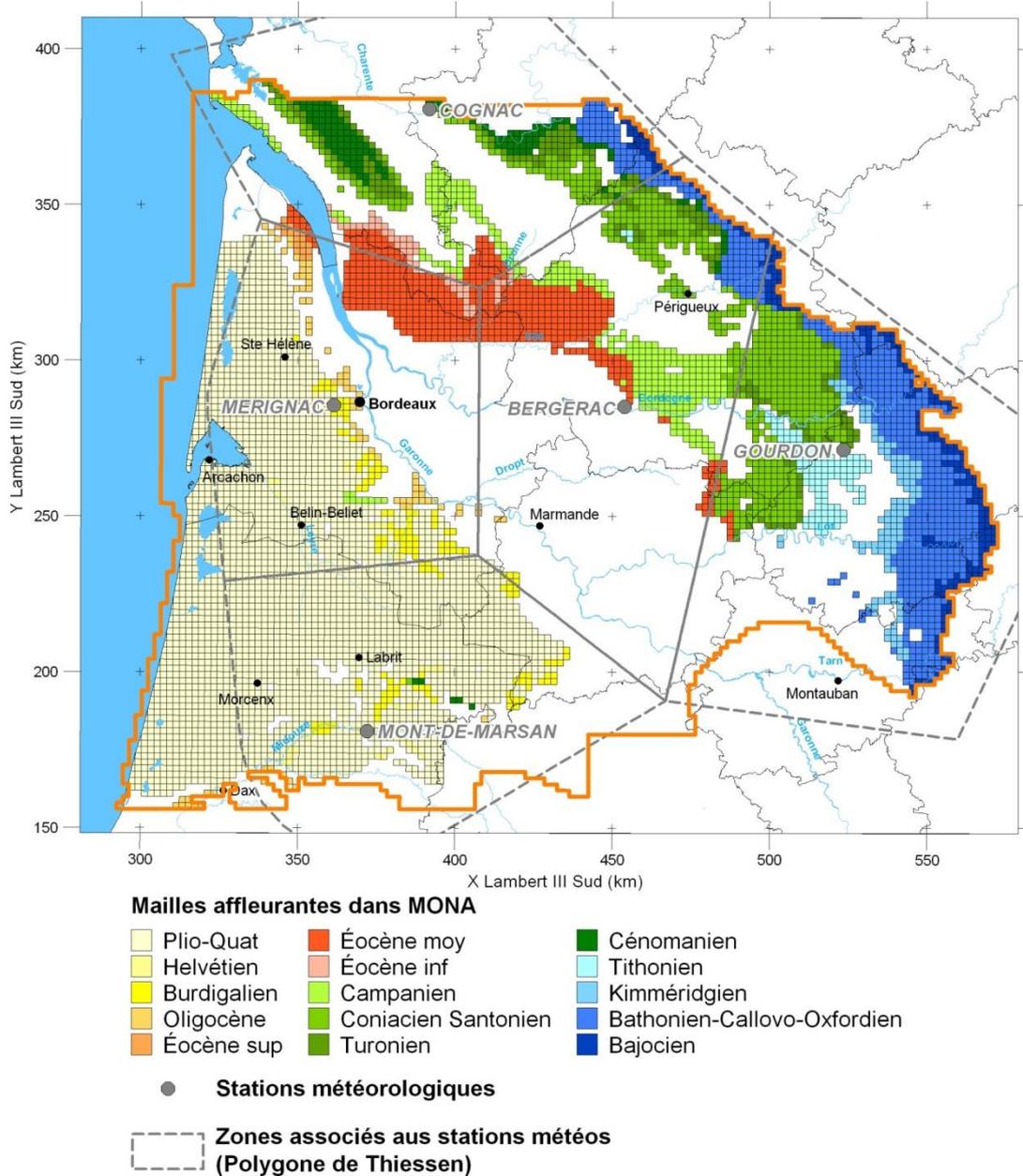


Illustration 4 - Localisation des zones d'affleurement du modèle dans sa version 3.3b pour chaque nappe et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge

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

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

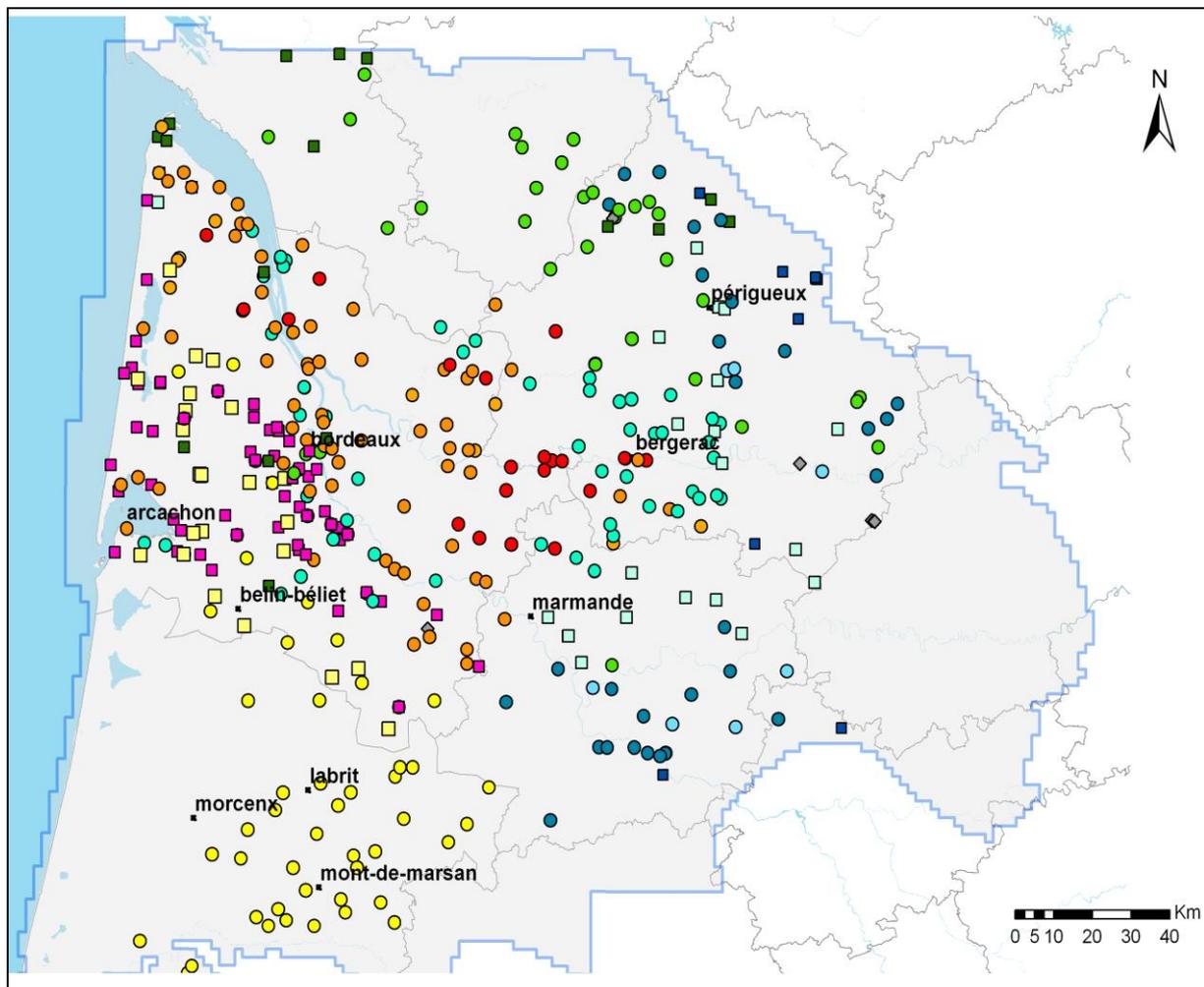
2.3.1. Mise à jour des chroniques d'observations

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 épente). Le pas d'acquisition des mesures est variable d'un point à un autre (journalier, hebdomadaire, ..., annuel). L'attribution du réservoir capté pour chacun des points d'observation a fait l'objet d'une validation par le géologue régional. C'est au total 430 chroniques qui sont utilisées pour le calage et la validation du modèle (Tableau 3).

Aquifère	Couche du modèle	Nombre de chroniques utilisées pour le calage
<i>Plio-Quaternaire</i>	1	24
<i>Serravallien</i>	2	13
<i>Aquitaniens</i>	3	41
<i>Oligocène</i>	4	59
<i>Éocène supérieur</i>	5	10
<i>Éocène moyen</i>	6	76
<i>Éocène inférieur</i>	7	23
<i>Campanien</i>	8	57
<i>Coniacien-Santonien</i>	9	21
<i>Turonien</i>	10	34
<i>Cénomaniens</i>	11	18
<i>Tithonien</i>	12	7
<i>Kimméridgien</i>	13	7
<i>Bathonien-Calovo-Oxfordien</i>	14	31
<i>Bajociens</i>	15	9
TOTAL		430

Tableau 3 - Nombre de chroniques piézométriques utilisées pour le calage

L'ensemble des chroniques piézométriques utilisées dans le cadre du modèle Nord-Aquitain a été actualisé jusqu'en 2012. 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.



Points d'observation et aquifère correspondant

- | | |
|--------------------|----------------|
| ■ Plio-Quaternaire | ■ Coniacien |
| ● Serravalien | ● Turonien |
| ● Aquitanien | ■ Cénomanién |
| ■ Oligocène | ◆ Tithonien |
| ● Éocène_sup | ● Kimméridgien |
| ● Éocène_moy | ● BaCX |
| ● Éocène_inf | ■ Bajocien |
| ● Campanien | |

Illustration 5 - Localisation des 430 points de mesures piézométriques

2.3.2. Campagne piézométrique complémentaire

Sur les 430 points d'observation du modèle, certains ne sont plus suivis depuis de nombreuses années. Pour s'assurer de la fiabilité des simulations réalisées des campagnes ponctuelles sont réalisées tous les deux ans. L'objectif est de vérifier que les tendances d'évolutions de la piézométrie calculée par le modèle sont bien en concordance. Ces mesures permettent donc de valider et/ou d'améliorer le calage du modèle. La première campagne de ce type a été réalisée en 2012. En 2014 sur les 54 points visités, 42 mesures ont pu être réalisées (Illustration 6).

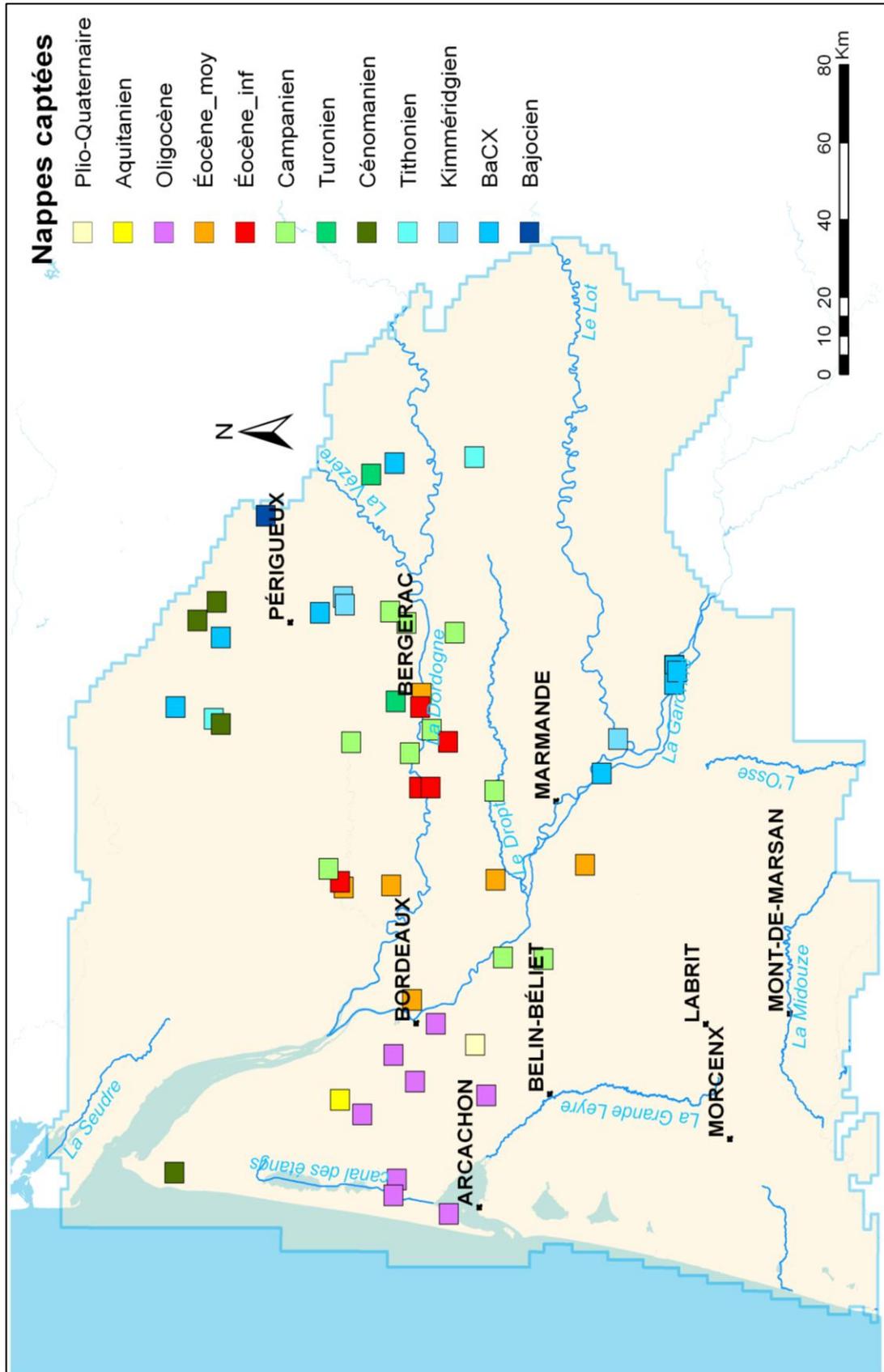


Illustration 6 - Localisation des 42 points de mesures complémentaires ayant fait l'objet d'une mesure piézométrique en 2012 et mise en évidence des nappes captées

Cette campagne a permis de mettre à jour les fiches techniques des forages mesurés (cf. Annexe 2) avec notamment, la mise à jour du contact des exploitants d'ouvrages d'eau auprès des communes et de vérifier l'état actuel de l'ouvrage (exploité, abandonné, rebouché etc.). Les valeurs mesurées sont présentées en annexe 3.

2.4. RÉSULTATS DU MODÈLE ACTUALISÉ

2.4.1. Les chroniques de calage

Les graphiques de comparaison entre les courbes d'évolution tracées à partir des mesures et des charges calculées par le modèle pour les différentes nappes sont présentés en annexe 4. L'exemple de restitution ci-dessous (Illustration 7) montre en points bleu les mesures brutes observées et en rouge les niveaux calculés par le modèle version MONA 3.3b 2012 au droit du piézomètre considéré.

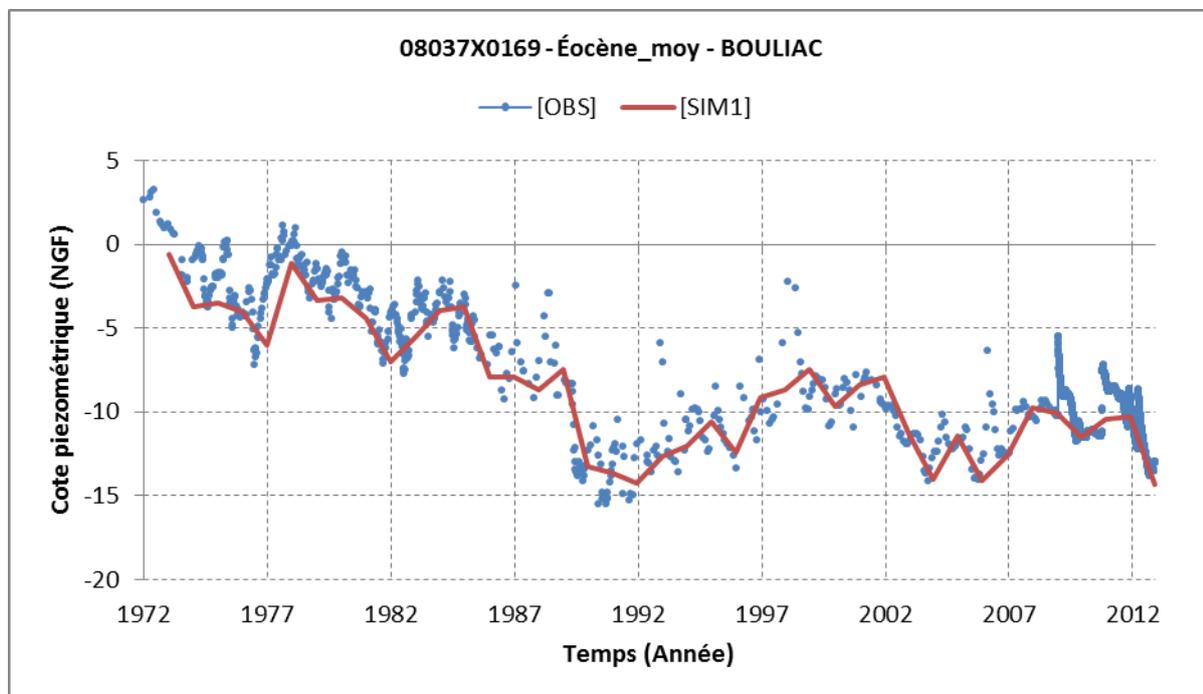


Illustration 7 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Éocène moyen)

L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant sur la grande majorité des chroniques de calage pour les nappes considérées (Annexe 4). 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 2011-2012, 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.

L'actualisation du modèle jusqu'en 2012 a été l'occasion de confronter les simulations aux mesures complémentaires réalisées sur des forages dont le suivi avait été arrêté (cf. chapitre 2.3.2). L'objectif est de vérifier qu'il n'y a pas au cours du temps de dérive entre les observations et la simulation et que le calage reste donc satisfaisant. Les exemples présentés en illustration 8 permettent d'attester de la robustesse du modèle, les simulations étant en concordance avec les récentes mesures.

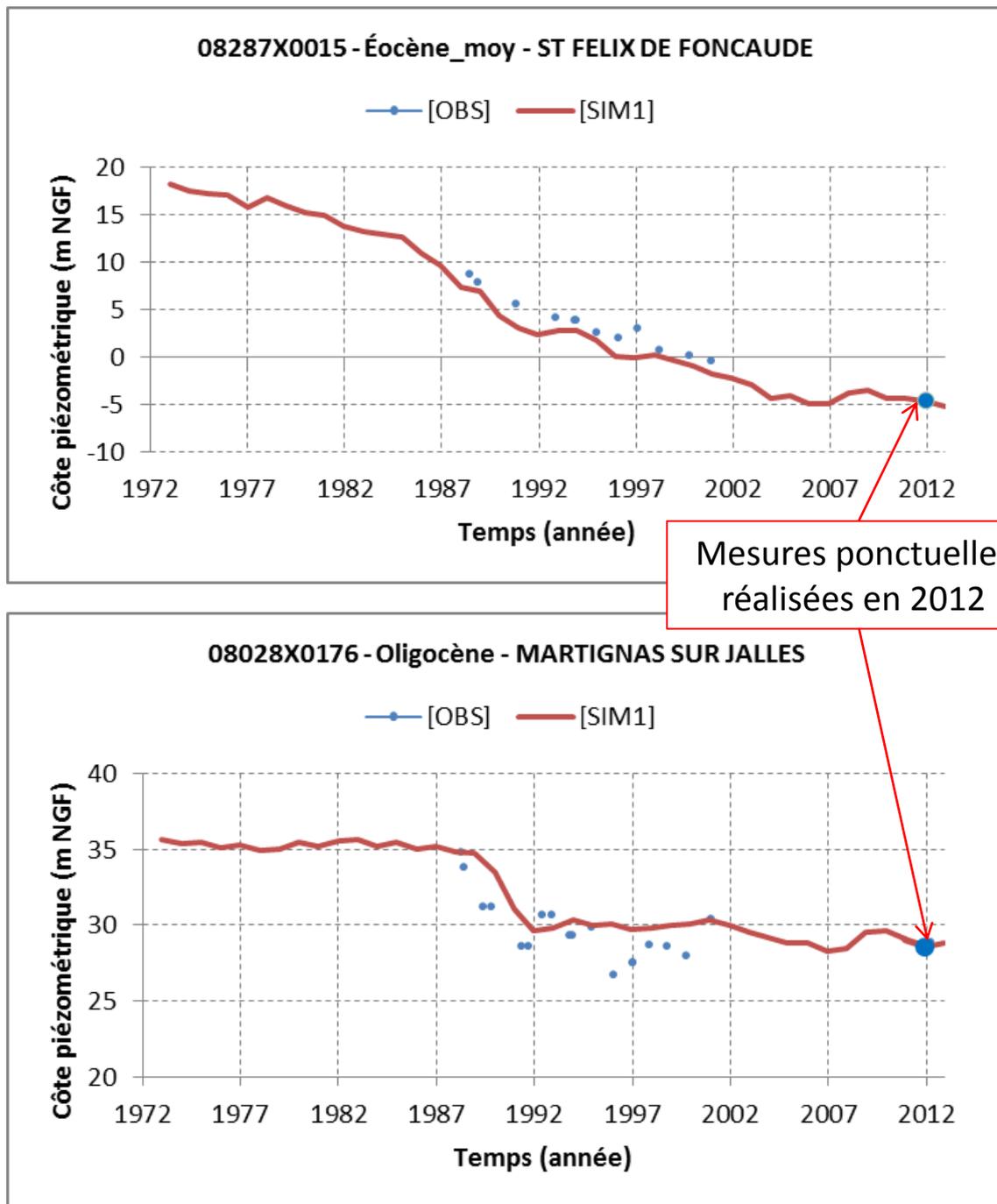
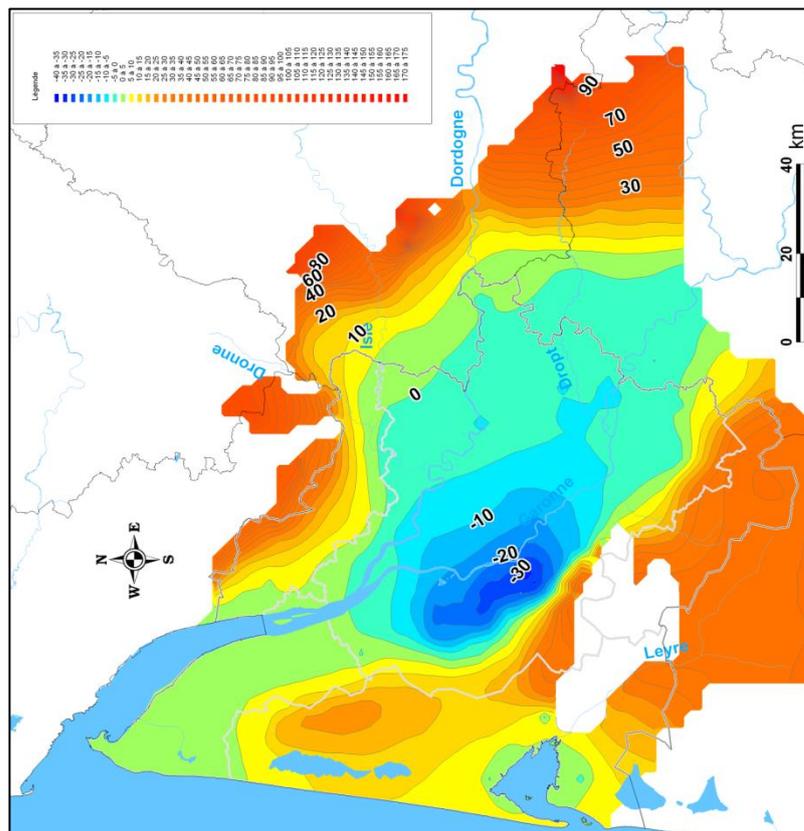


Illustration 8 - Contrôle du calage par la réalisation de mesures complémentaires

2.4.2. Les cartes piézométriques

Le modèle actualisé dans sa version MONA V3.3b-2012 permet de restituer les cartes piézométriques simulées des nappes pour chaque année. La carte piézométrique de l'aquifère « Eocène moyen » pour l'année 2012 peut être comparée à celle de l'année précédente (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.

Piézométrie 2012



Piézométrie 2011

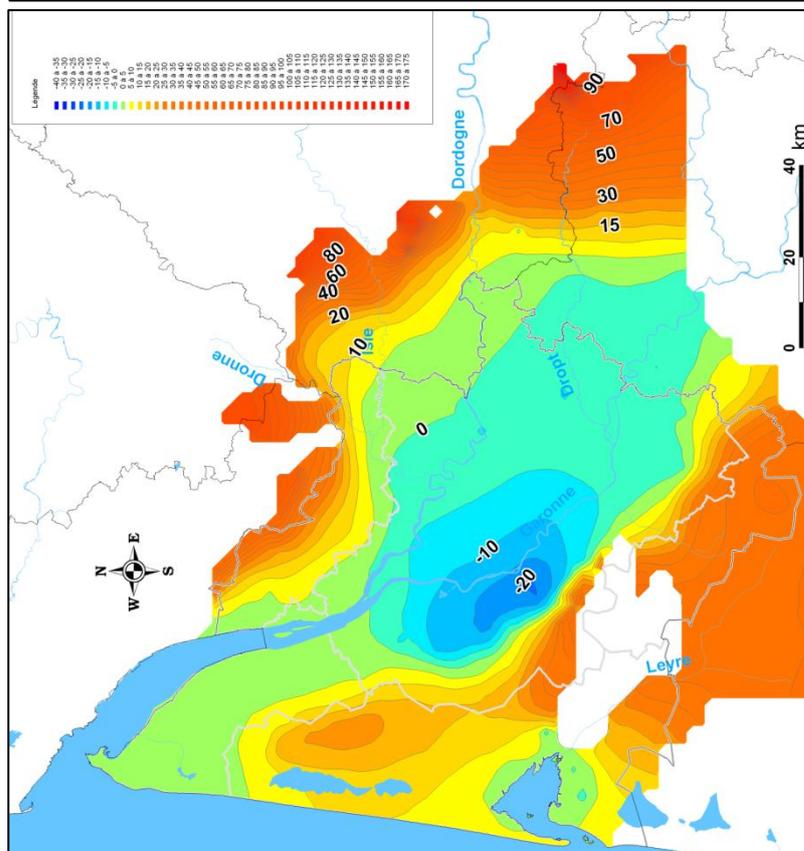


Illustration 9 - Niveaux piézométriques simulés par le modèle Nord-Aquitain version MONA V3.3b-2011 dans l'aquifère « Eocène moyen » pour les années 2010 et 2011

La comparaison des deux cartes montre un abaissement de la piézométrie au droit du cône de dépression situé sous l'agglomération de Bordeaux avec une charge passant de -20 m NGF à -30 m NGF de 2011 à 2012. Ceci est confirmé par des données observées : situé au cœur du cône de dépression, à Villenave d'Ornon, sur l'ouvrage 08272X0391 un relevé piézométrique de -32,14 m NGF a été effectué en septembre 2012. Par ailleurs, au droit de la Garonne, l'absence de zones d'infiltration directe des eaux de pluie, combinée à des prélèvements continus, induit une poursuite de la baisse piézométrique, ce qui se traduit notamment par une extension plus importante de l'isopièze -5 m NGF par rapport à 2011. En effet, sur la carte de 2012, l'isopièze -5 m NGF atteint La Réole, alors qu'en 2011, elle ne dépasse pas Podensac. Les niveaux les plus bas, pour les années 2011 et 2012, sont situés au niveau de Martillac et Villenave d'Ornon alors que dans les années 70, ils étaient mesurés dans le secteur de Blanquefort.

La carte de différence entre la piézométrie de l'année 2011 et celle de 2012 (Illustration 10) montre une baisse du niveau piézométrique centrée sur l'agglomération bordelaise mais allongée selon l'axe de la Garonne. La baisse la plus forte (près de 10 m) est observée à proximité de Martillac et correspond naturellement à une augmentation des prélèvements dans ce secteur. Parallèlement, de légères hausses du niveau sont, quant à elles, observées au nord de la Gironde, autour du Bassin d'Arcachon, vers Montflanquin en Lot-et-Garonne et aux alentours de Bergerac en Dordogne. Ces hausses du niveau sont dans la plupart des cas comprises entre 0 et 1 mètre, à l'exception du sud de Bergerac et au niveau de Biganos où elles sont supérieures à 3 mètres pouvant atteindre localement jusqu'à 6 mètres.

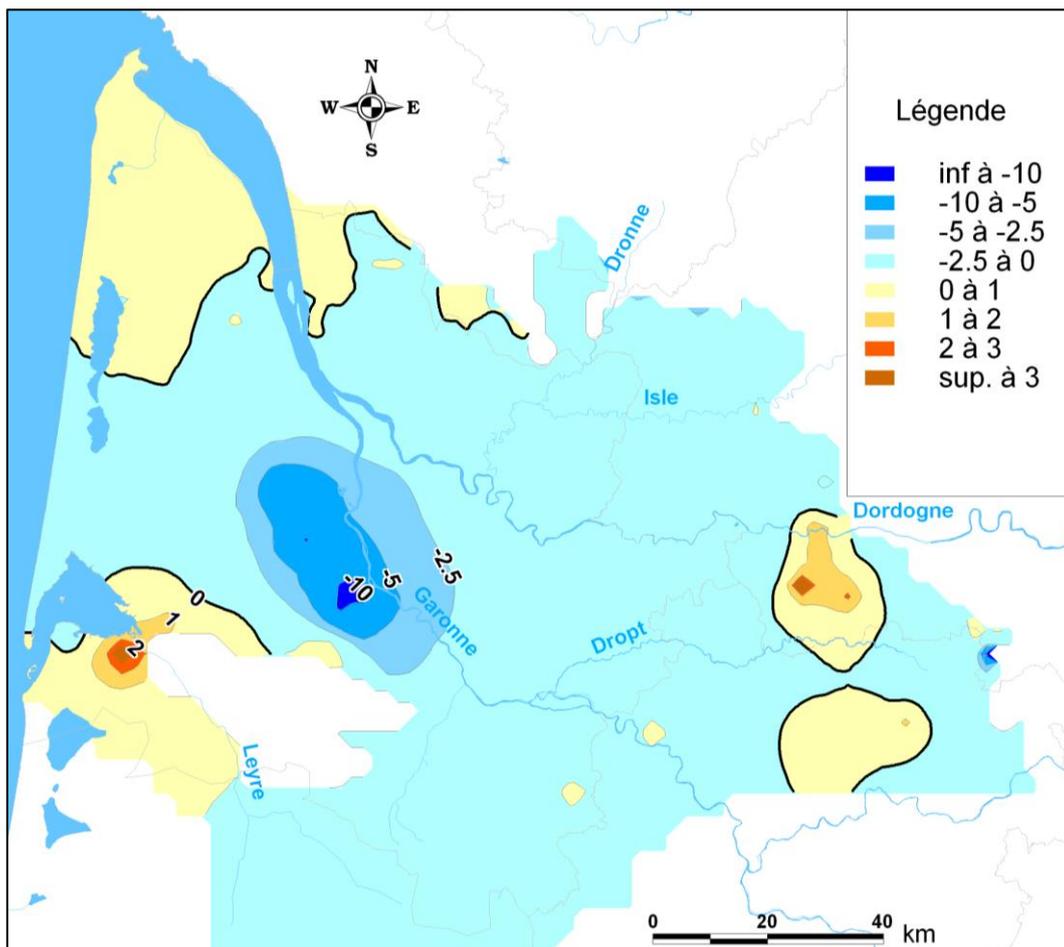


Illustration 10 - Carte des variations du niveau de la nappe de l'Eocène moyen entre 2011 et 2012.

3. Développement de la version 4 du MONA

3.1. PREMIERES SIMULATIONS EN REGIME PERMANENT

Le transfert complet de la géométrie issue des 3 modèles construits à l'aide du logiciel GDM a été effectué et tous les contrôles d'usage ont été réalisés pour s'assurer de la parfaite transposition (Illustration 11).

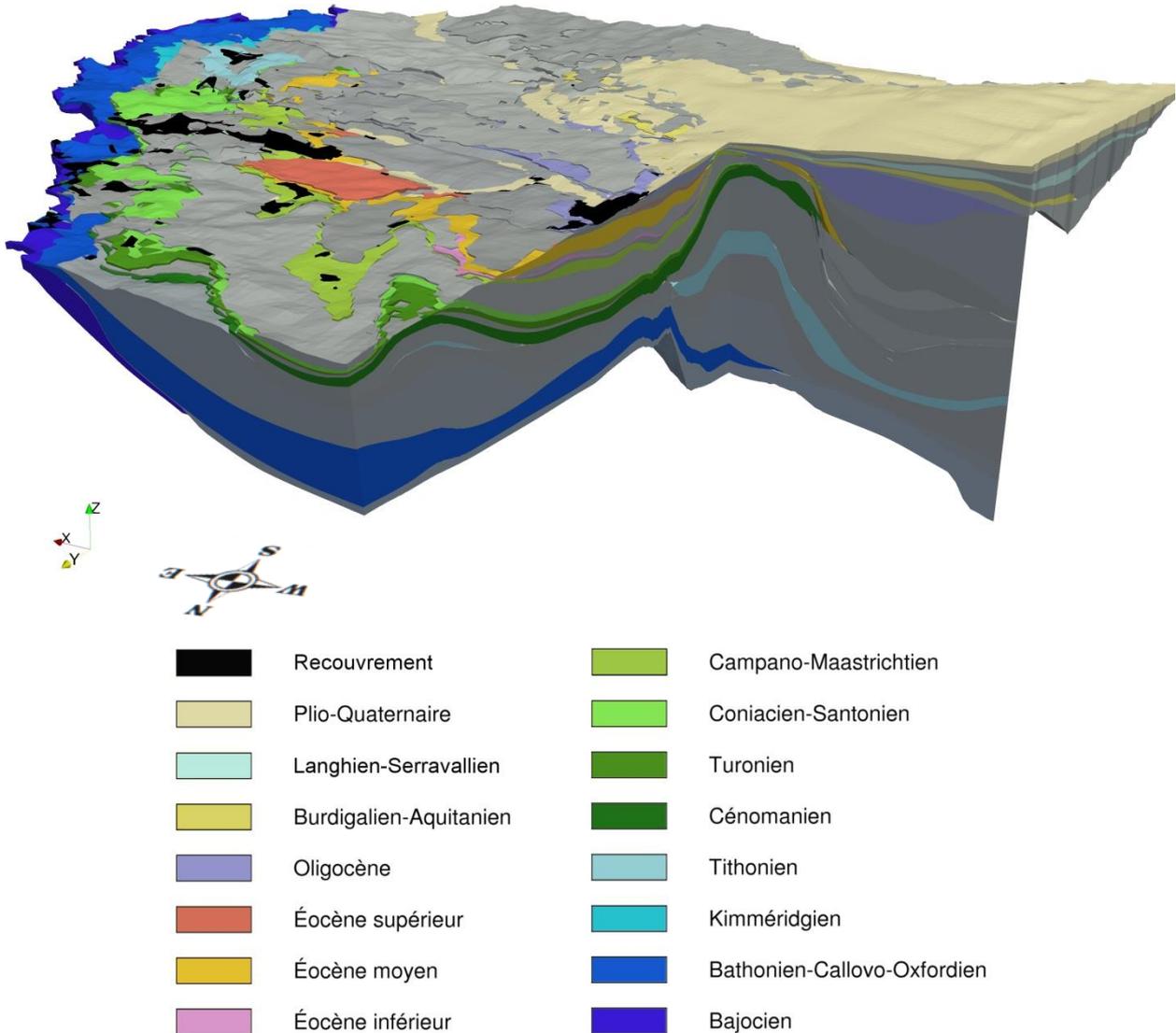


Illustration 11 - Exemple de visualisation 3D du modèle géologique

Les toits et les murs des 30 couches du modèle (Tableau 5) ont été implémentés dans le modèle hydrodynamique via l'interface graphique WinMarthe du logiciel de modélisation **MARTHE** (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements). Celle-ci permet également un contrôle de cohérence géométrique qui a servi d'ultime vérification.

Dans sa nouvelle configuration, le modèle comprend désormais 30 couches (15 aquifères et 15 épontes) soit 2 382 835 mailles de calcul effectives, ce qui représente 35 fois plus de mailles que dans la version 3.3b du MONA (Tableau 4).

MONA V3.3b	MONA V4
15 couches aquifères	30 couches
Pseudo 3D	3D
66 973 mailles	2 382 835 mailles
2 km x 2 km	500 m x 500 m

Tableau 4 - Comparaison des différentes versions du MONA

Le nombre de mailles dans chaque couche du modèle est rappelé ci-après :

Formation	N° de couche	Codification MONA	Nombre de mailles	Superficie en km ²
Formations de recouvrement et alluvions flamandaises	1	RECO	8 451	2 113
Aquifère du Plio-Quaternaire	2	QUAT	66 821	16 705
Éponte au sommet du Langhien-Serravallien	3	EPLS	49 862	12 466
Aquifère du Langhien-Serravallien	4	LASE	39 857	9 964
Éponte au sommet de l'Aquitainien	5	EPAQ	59 732	14 933
Aquifère de l'Aquitainien	6	AQUI	51 643	12 911
Éponte Chattien-Miocène	7	EPCM	100 683	25 171
Aquifère de l'Oligocène	8	OLNP	58 673	14 668
Éponte à la base de l'Oligocène	9	EPOL	93 847	23 462
Aquifère de l'Éocène supérieur	10	EOCS	38 156	9 539
Éponte à la base de l'Éocène supérieur	11	EPES	88 724	22 181
Aquifère de l'Éocène moyen	12	EOCM	79 163	19 791
Éponte à la base de l'Éocène moyen	13	EPEO	81 167	20 292
Aquifère de l'Éocène inférieur	14	EOCI	62 964	15 741
Éponte au sommet du Campanien	15	EPCA	93 016	23 254
Aquifère du Campanien	16	CAMP	69 592	17 398
Éponte au sommet du Coniacien Santonien	17	EPCS	95 941	23 985
Aquifère du Coniacien-Santonien	18	COST	96 370	24 093
Éponte au sommet du Turonien	19	EPTU	71 417	17 854
Aquifère du Turonien	20	TURO	102 018	25 505
Éponte au sommet du Cénomaniens	21	EPCE	108 764	27 191
Aquifère du Cénomaniens	22	CENO	86 186	21 547
Éponte au sommet du Tithonien	23	EPTI	58 380	14 595
Aquifère du Tithonien	24	TITH	37 483	9 371
Éponte au sommet du Kimméridgien	25	EPKI	123 820	30 955
Aquifère du Kimméridgien	26	KIMM	54 756	13 689
Éponte au sommet du réservoir du Bathonien-Calvo-Oxfordien	27	EPCX	118 402	29 601
Aquifère du Bathonien-Calvo-Oxfordien	28	BACX	149 946	37 487
Éponte au sommet du Bajocien	29	EPBJ	134 177	33 544
Réservoir du Bajocien	30	BAJO	102 824	25 706

Tableau 5 - Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA en version V4.

Suite à l'import de la géométrie du modèle dans Marthe, les premières simulations ont été réalisées en régime permanent en intégrant les champs de perméabilités issus de la version 3.3b du MONA. Ce sont les données de l'année 1996 qui ont été utilisées pour la simulation en

régime permanent. C'est en effet l'année pour laquelle nous disposons du plus grand nombre de points d'observation pour les nappes captives.

En première approche, la prise en compte de la recharge s'est basée sur la méthodologie appliquée pour la version 3 du modèle (voir chapitre 2.2.2). Le bilan hydroclimatique a été réalisé en amont du modèle (calcul de pluie efficace avec une RU maximale de 150 mm) à partir des 5 stations météorologiques de Mérignac, Bergerac, Gourdon, Cognac et Mont de Marsan. Le flux de recharge a été intégré par zones de sol en fonction de la couche aquifère affleurante et de la station météorologique à laquelle elle est rattachée (Illustration 12).

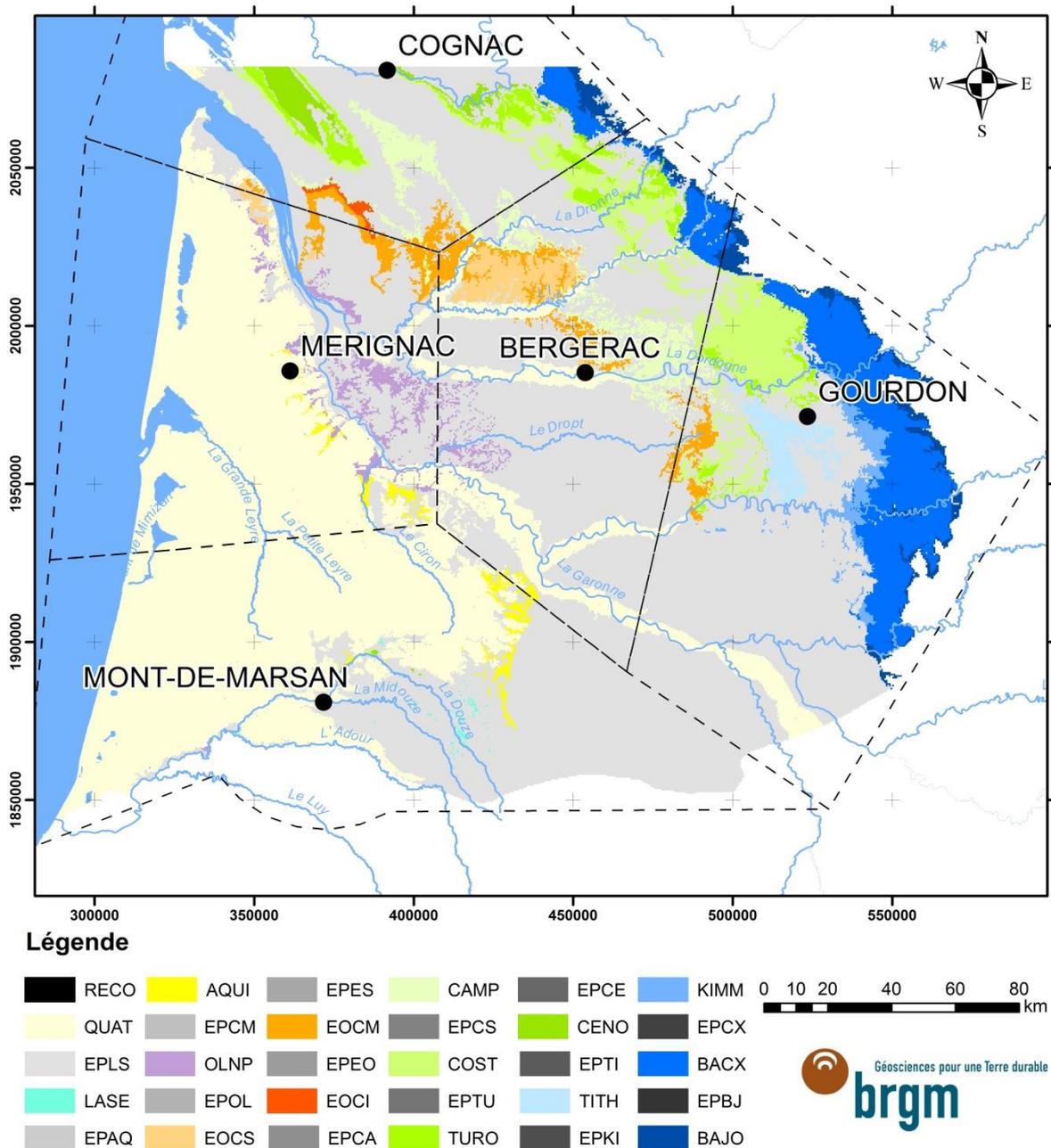


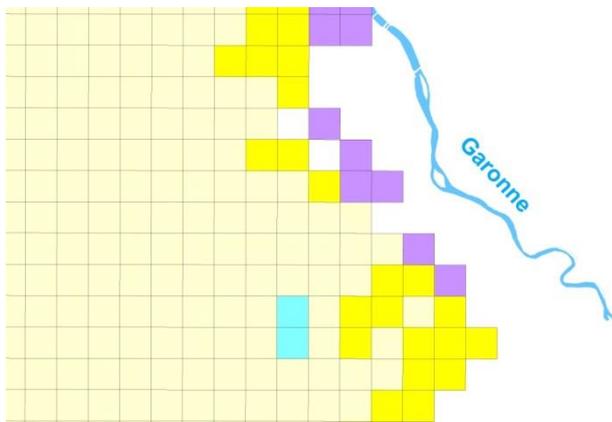
Illustration 12 - Localisation des zones d'affleurement du modèle dans sa version 4 pour chaque nappe et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge

Il y a ainsi 47 zones : 1 zone correspond à l'ensemble des horizons « imperméables » (ZONE 1) et les 46 autres correspondent aux zones aquifères. A titre d'exemple, pour l'aquifère du Plio-

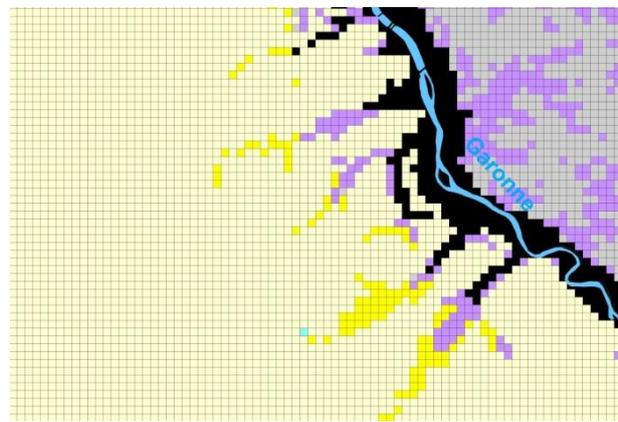
Quaternaire qui correspond à la couche 2 du modèle et qui est influencé par les 5 stations météorologiques les zones de sol sont numérotées de la manière suivante :

- ZONE 21 : Aquifère du Plio-Quaternaire – station de Cognac
- ZONE 22 : Aquifère du Plio-Quaternaire – station de Mérignac
- ZONE 23 : Aquifère du Plio-Quaternaire – station de Bergerac
- ZONE 24 : Aquifère du Plio-Quaternaire – station de Gourdon
- ZONE 25 : Aquifère du Plio-Quaternaire – station de Mont-de-Marsan

Le premier chiffre correspond au numéro de la couche dans le modèle (couche 2 pour le Plio-Quaternaire) et le second correspond à la station météorologique. La taille des mailles de la version 4 (0.25 km²) étant plus fine que celle de la version 3 (4 km²), aucune pondération n'a été utilisée pour prendre en compte le rapport de la superficie réelle de l'affleurement sur la superficie totale de la maille. Le maillage à 500 m permet en effet une meilleure représentativité de la complexité des corps géologiques modélisés (Illustration 13).



Zones d'affleurement du MONA V3 à la maille de 2 km



Zones d'affleurement du MONA V4 à la maille de 500 m

Illustration 13 - Évolution du maillage entre la version 3 et la version 4 du MONA

La part de la pluie efficace participant à la recharge des nappes a été déterminée à partir du travail de calage en régime transitoire effectué sur la version 3 du modèle. Néanmoins cette méthode de travail ne constitue qu'une première approche pour effectuer les simulations en régime permanent. Une réflexion plus détaillée sur l'intégration des données climatiques dans la version 4 du modèle est présentée au chapitre 3.3.

Les potentiels ont été imposés sur la façade atlantique pour les horizons aquifères. Seule la Garonne a été considérée en potentiel imposé au droit de la nappe de l'Oligocène. A terme ce potentiel sera remplacé par la mise en place d'un réseau hydrographique plus détaillé dans le modèle (voir chapitre 3.2).

Les prélèvements correspondent aux données de l'année 1996. Dans la base de prélèvements, 7 305 forages sont recensés au total dont 3 241 forages présentent des volumes prélevés. La plupart des forages captent une seule et même nappe mais un total de 179 forages captent de 2 à 4 nappes. A l'échelle du modèle les nappes les plus sollicitées sont celle de l'Oligocène et de l'Éocène moyen avec plus de 50 millions de m³ chacune pour l'année 1996 (Tableau 6). Ces nappes sont principalement utilisées pour l'alimentation en eau potable, notamment dans le département de la Gironde. A noter qu'à ce jour les prélèvements dans la nappe du Plio-Quaternaire ne sont pas exhaustifs et qu'un travail de recueil des données et de validation (correspondance point de prélèvement Agence de l'Eau / indice BSS) important reste à mener sur cette nappe.

Codification MONA	N° de couche	Volume annuel prélevé en 1996 (en m³)
RECO	1	1 434 314.3
QUAT	2	11 163 651.0
LASE	4	23 359 134.0
AQUI	6	36 381 414.3
OLNP	8	63 149 840.9
EOCS	10	2 655 348.6
EOCM	12	56 690 309.9
EOCI	14	8 793 253.7
CAMP	16	27 556 509.9
COST	18	22 138 274.7
TURO	20	42 516 726.5
CENO	22	31 174 511.8
TITH	24	2 303 650.4
KIMM	26	2 353 923.5
BACX	28	9 389 778.0
BAJO	30	2 092 794.0

Tableau 6 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA-V4 en 1996 (m³/an)

Au total, 307 piézomètres disposent au moins d'une mesure en 1996 et permettent de comparer simulations et observations. A noter que c'est la nappe de l'Éocène moyen qui présente le nombre de points d'observation le plus important en raison de son importance stratégique et de sa grande extension (Tableau 7).

Codification MONA	N° de couche	Nombre de points d'observation
QUAT	2	7
LASE	4	11
AQUI	6	28
OLNP	8	37
EOCS	10	5
EOCM	12	60
EOCI	14	19
CAMP	16	49
COST	18	17
TURO	20	20
CENO	22	10
TITH	24	7
KIMM	26	7
BACX	28	24
BAJO	30	6

Tableau 7 - Nombre de points d'observation par nappe pour les simulations en régime permanent

Certaines nappes présentent un faible nombre de points d'observations vis-à-vis de leur superficie. C'est notamment le cas de la nappe du Plio-Quaternaire avec seulement 7 points d'observations en 1996. A cette époque, les nappes captives focalisaient l'attention en raison des enjeux liés à l'alimentation en eau potable. Dans les années 2000, le suivi de la nappe libre du Plio-Quaternaire s'est peu à peu densifié jusqu'à atteindre un total de 24 piézomètres. Par ailleurs, les nappes du Jurassique sont globalement peu suivies du fait des profondeurs importantes de ces réservoirs dans certains secteurs du Bassin aquitain. La répartition de l'ensemble des points d'observation est présentée sur l'illustration 14.

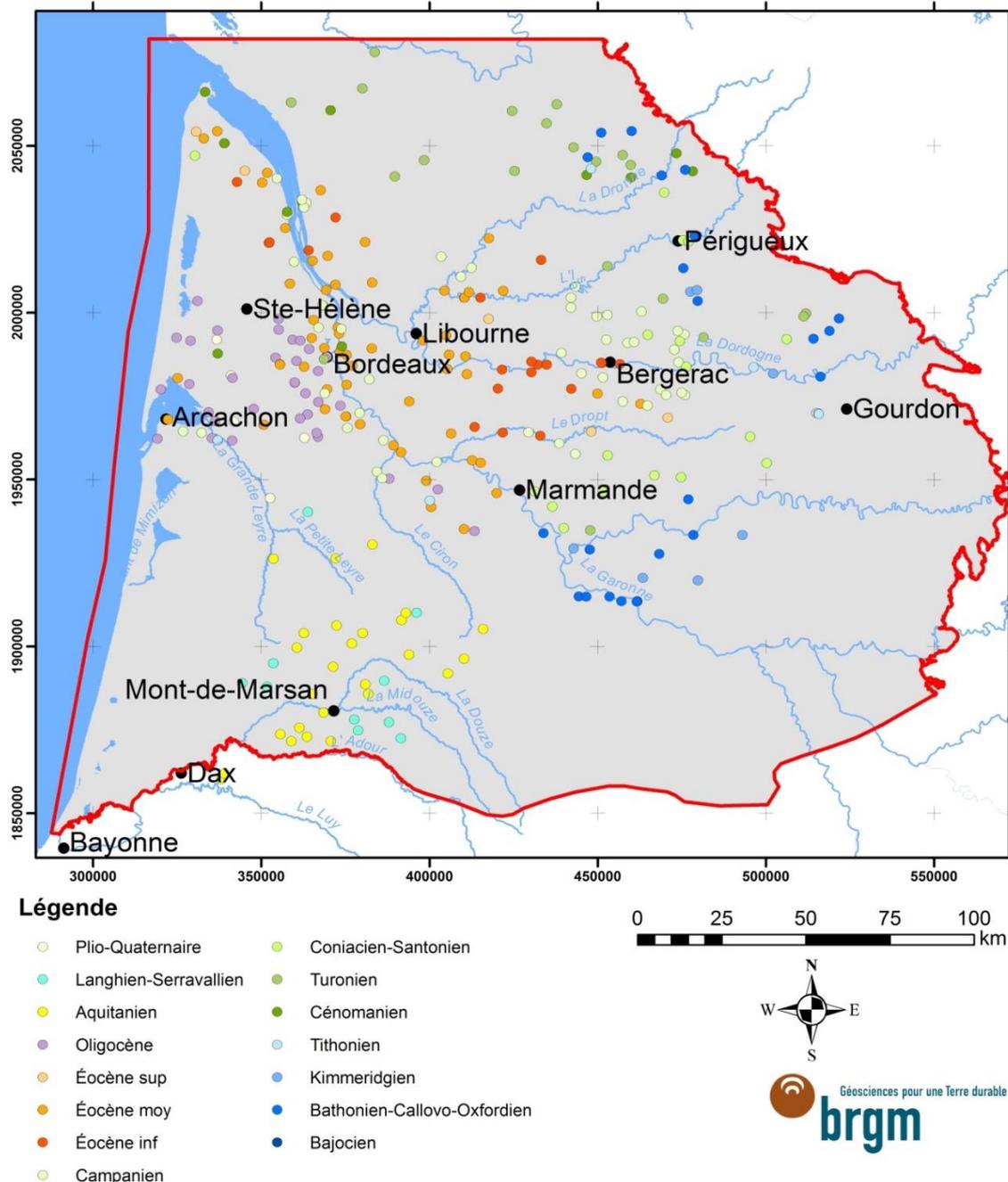


Illustration 14 - Localisation des 307 points d'observation pour les simulations en régime permanent (année 1996)

A noter que la répartition des points n'est pas forcément homogène au regard de l'extension des nappes considérées. Ainsi, la majeure partie des points d'observation de la nappe de l'Oligocène est localisée en Gironde alors que le réservoir s'étend sur une grande partie du département des Landes. Inversement la plupart des piézomètres de surveillance de la nappe de l'Aquitainien sont localisés dans les Landes et sont très peu nombreux en Gironde. Certaines zones du modèle sont complètement dépourvues de points d'observation. C'est notamment le cas à l'ouest de la Grande Leyre ou dans toute la partie sud-ouest du modèle.

Les simulations en régime permanent ont été réalisées afin de s'assurer du bon fonctionnement du modèle après les modifications apportées à la géométrie dans le cadre de la construction de la version 4. Cette phase nécessite des ajustements du champ des perméabilités issu de la version 3.3b du modèle. En effet, l'architecture des réservoirs (extensions, épaisseurs,...) a été revisitée ce qui entraîne des évolutions dans les transmissivités prises en compte. Des ajustements de perméabilités ont été opérés de manière à réduire au maximum les dénoyages au sein du modèle.

Par ailleurs, du fait de l'exploitation importante des nappes du système aquifère multicouche tertiaire nord aquitain (notamment les nappes de l'Éocène et de l'Oligocène), il n'est pas possible de considérer l'existence d'un régime permanent au sein de ce complexe. Le régime permanent correspondrait à l'état initial du système avant tout soutirage pour lequel les données sont trop fragmentaires.

Bien que la comparaison d'un régime pseudo-stabilisé (modélisation) et d'un régime non stationnaire (valeurs observées) reste sommaire, cette étape permet une première évaluation du modèle avant le passage au régime transitoire.

L'objectif est ici de s'assurer que le modèle fonctionne bien et que les choix de construction (potentiels imposés, gamme de perméabilités, recharge,...) sont corrects. Il n'est pas recherché ici un calage fin du modèle qui sera effectué lors de la prochaine convention. Les simulations ont été réalisées pas à pas pour évaluer tour à tour l'impact de la prise en compte de la recharge, de l'intégration des prélèvements,... La convergence du modèle est ici satisfaisante avec une convergence globale à 0.11 % (d'erreur).

La qualité du calage peut être évaluée en calculant pour chaque point d'observation l'erreur résiduelle ou résidu R_i :

$$R_i = H_{sim} - H_{obs}$$

R_i : différence entre le résultat calculé et l'observation au point donné noté de i à n

H_{sim} : valeur simulée

H_{obs} : valeur observée

Le résidu moyen \bar{R} pour un nombre de points d'observation n peut alors être calculé ainsi :

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

Le calage montre un résidu \bar{R} sur l'ensemble des points d'observation de 4,93 m ce qui traduit une certaine surestimation des niveaux. A noter que les erreurs de sous-estimation et de surestimation des niveaux peuvent globalement se compenser.

En complément, le résidu absolu $|\bar{R}|$ correspondant à la valeur moyenne de la valeur absolue des écarts entre simulations et observations a aussi été calculé :

$$|\bar{R}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i|$$

Le résidu absolu montre une valeur globale sur l'ensemble du modèle de 10,45 m. Cependant, le bilan couche à couche montrent des disparités dans la restitution des niveaux moyens observés pour l'année 1996 (Tableau 8).

Couche	CODE	Nom	Erreur moyenne réduite (m)
Couche 2	QUAT	Plio-Quaternaire	2.84
Couche 4	LASE	Langhien-Serravallien	5.92
Couche 6	AQUI	Aquitainien	7.55
Couche 8	OLNP	Oligocène	5.29
Couche 10	EOCS	Éocène sup	4.94
Couche 12	EOCM	Éocène moy	8.81
Couche 14	EOCI	Éocène inf	10.88
Couche 16	CAMP	Campanien	9.93
Couche 18	COST	Coniacien-Santonien	18.24
Couche 20	TURO	Turonien	15.32
Couche 22	CENO	Cénomanién	5.03
Couche 24	TITH	Tithonien	7.88
Couche 26	KIMM	Kimméridgien	23.10
Couche 28	BACX	Bathonien-Callové-Oxfordien	20.83
Couche 30	BAJO	Bajocién	11.49

Tableau 8 - Résidu absolu calculé en régime permanent pour chacune des couches du modèle

En effet, il apparaît que les couches des aquifères du Tertiaire sont mieux calées que celles correspondant aux aquifères du Crétacé et du Jurassique. Ainsi le diagramme de dispersion de la nappe du Plio-Quaternaire est tout à fait satisfaisant pour une première approche en régime permanent (Illustration 15).

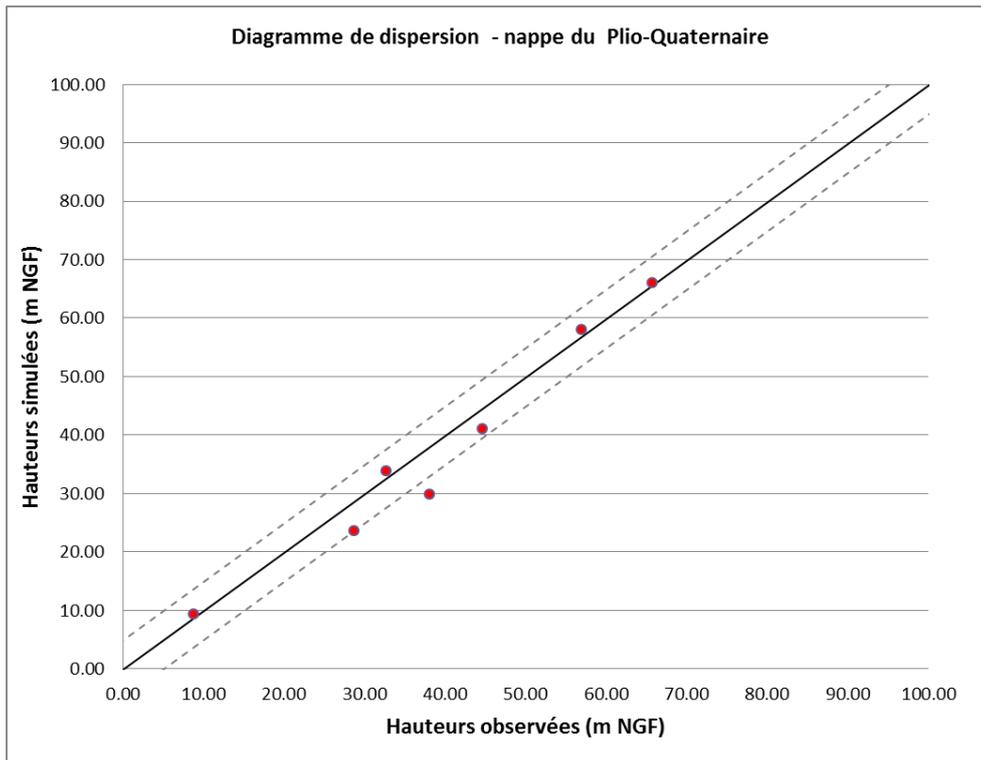


Illustration 15 - Diagramme de dispersion de la nappe du Plio-Quaternaire

D'autres nappes vont nécessiter un travail de recalage supplémentaire comme c'est le cas par exemple de la nappe du Coniacien-Santonien (Illustration 16).

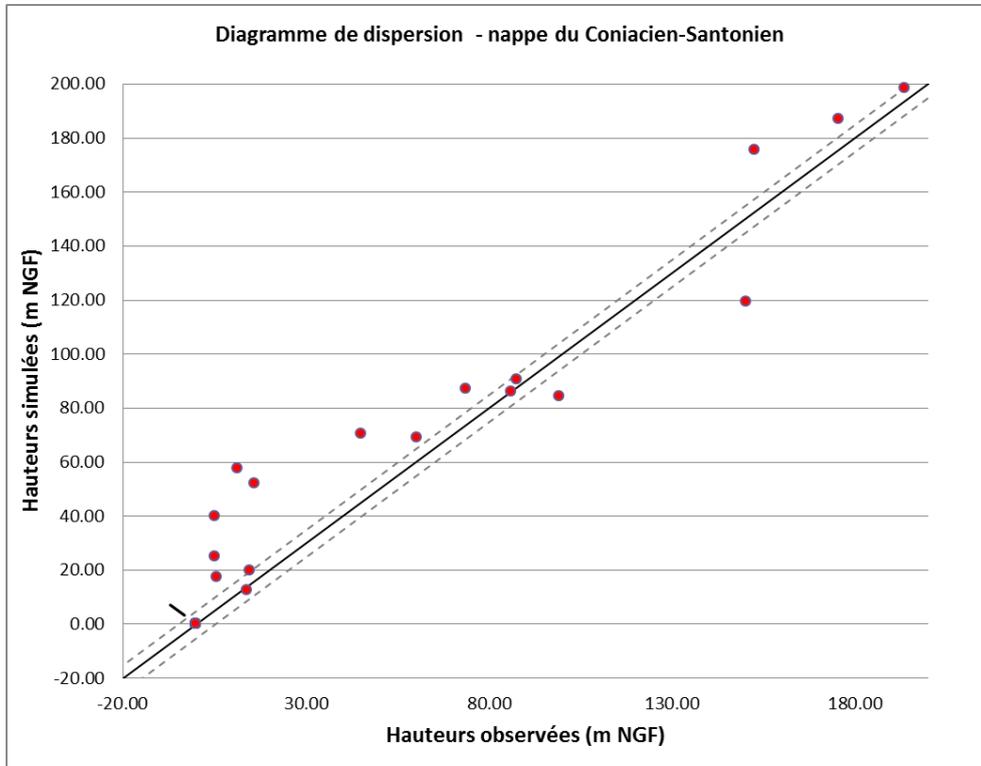


Illustration 16 - Diagramme de dispersion de la nappe du Coniacien-Santonien

Il faut cependant garder à l'esprit que les charges observées en 1996 dans les aquifères du système aquifère multicouches nord aquitain ne peuvent être considérées comme la résultante d'un régime permanent. En effet, pour les nappes captives, comme par exemple la nappe de l'Éocène, c'est l'exploitation prolongée des eaux souterraines sur plusieurs décennies qui aboutit à l'état observé en 1996. Le régime d'exploitation des nappes variant sans cesse d'une année sur l'autre (avec une tendance à l'augmentation sur la majorité d'entre elles), il est illusoire de vouloir retranscrire fidèlement les charges observées en régime permanent.

Un travail important de recalage de l'outil reste à mener en régime transitoire. Cependant, la finesse de représentation du modèle (maille de 500 m) va permettre in fine une meilleure restitution de la piézométrie en reproduisant plus fidèlement les variations de la topographie notamment sur les zones d'infiltration et de débordement. Il apparaît important dans l'avenir d'effectuer un travail spécifique sur les points d'observation de manière à valider l'horizon capté dans chaque piézomètre en cohérence avec la géométrie actualisée du MONA. Ce travail est à prévoir dans le cadre de la future convention.

Les restitutions des cartes piézométriques issues du modèle sont tout à fait encourageantes au regard des cartes piézométriques connues sur cette nappe comme le montre l'exemple de la carte de l'Oligocène (Illustration 17).

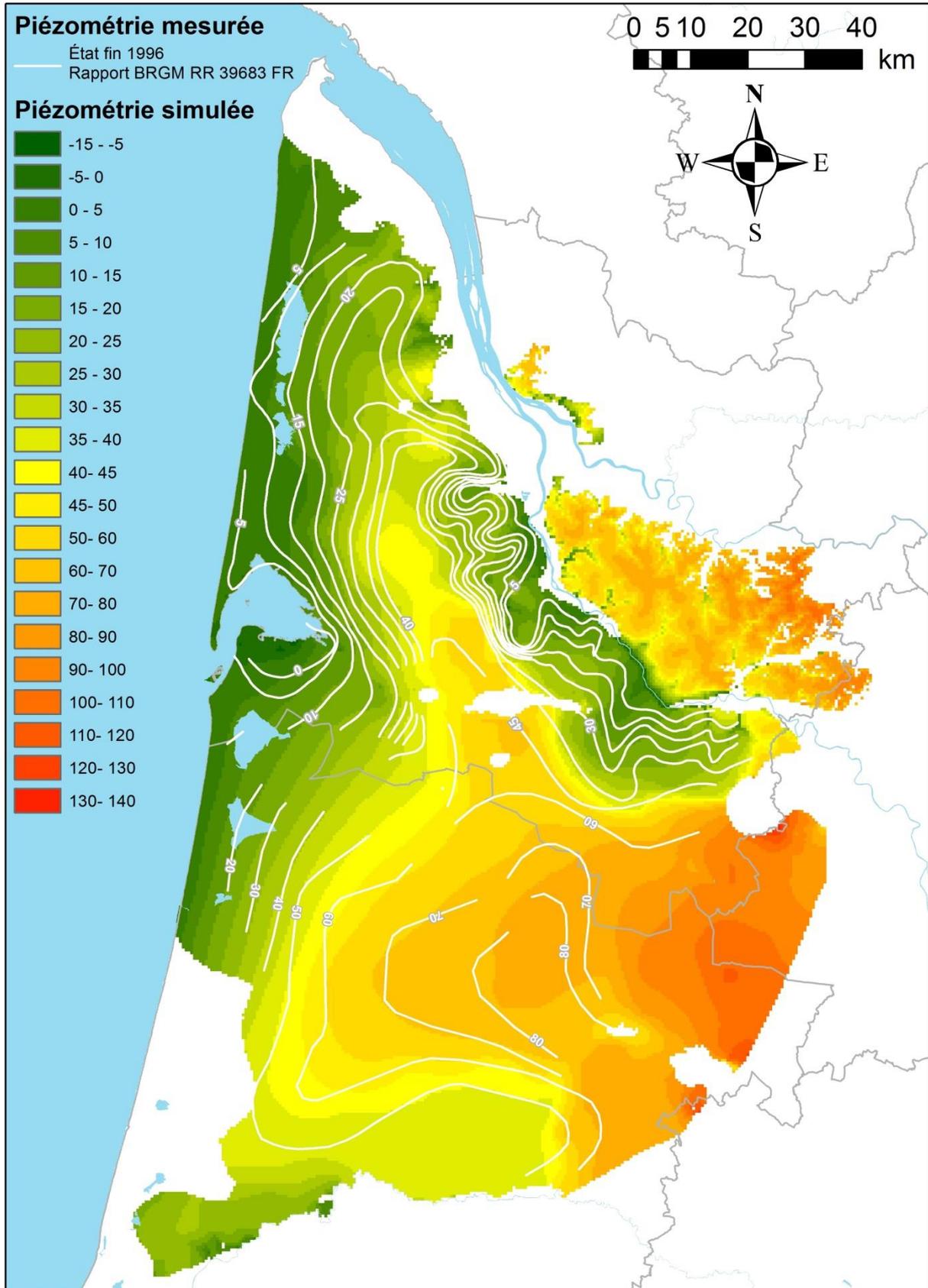


Illustration 17 - Première restitution piézométrique dans le MONA V4 (Nappe de l'Oligocène)

3.2. ÉLABORATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Les échanges nappes/rivières ont un rôle prépondérant dans l'hydrodynamique régionale : les nappes sont en effet souvent en étroite relation avec les rivières, avec en particulier un rôle de soutien des débits d'étiage des cours d'eau. Ainsi, la restitution du réseau hydrographique doit faire l'objet d'une attention particulière.

Le logiciel de modélisation WinMarthe dispose du module "échanges nappes/rivières" qui permet un couplage direct entre nappes et cours d'eau. Ce module nécessite d'une part l'introduction de la structure de réseau hydrographique, découpé en affluents et tronçons (un « arbre de branchement des affluents » permet de spécifier la connexion des affluents entre eux et le sens d'écoulement), et d'autre part l'attribution de caractéristiques morphologiques spécifiques du cours d'eau.

Le choix des cours d'eau intégrés au modèle s'est effectué sur la base des données de débit disponibles. Celles-ci proviennent en premier lieu de la banque hydro qui recense sur le domaine d'extension du MONA 195 stations hydrométriques en service ou non (Annexe 5) réparties sur 109 cours d'eau, disposant d'au moins une mesure de débit sur la période 1972-2014 (Illustration 18). En complément, des jaugeages ponctuels ont été réalisés depuis 2009 dans le cadre de travaux précédents menés par le BRGM, notamment sur le triangle landais (Corbier et al., 2014). Les cours d'eau concernés par ces jaugeages seront modélisés.

Au final, le réseau hydrographique intégré au MONA concerne 157 cours d'eau représentant un linéaire total de 5 632 km. Leur tracé provient de la BD Carthage® de l'IGN.

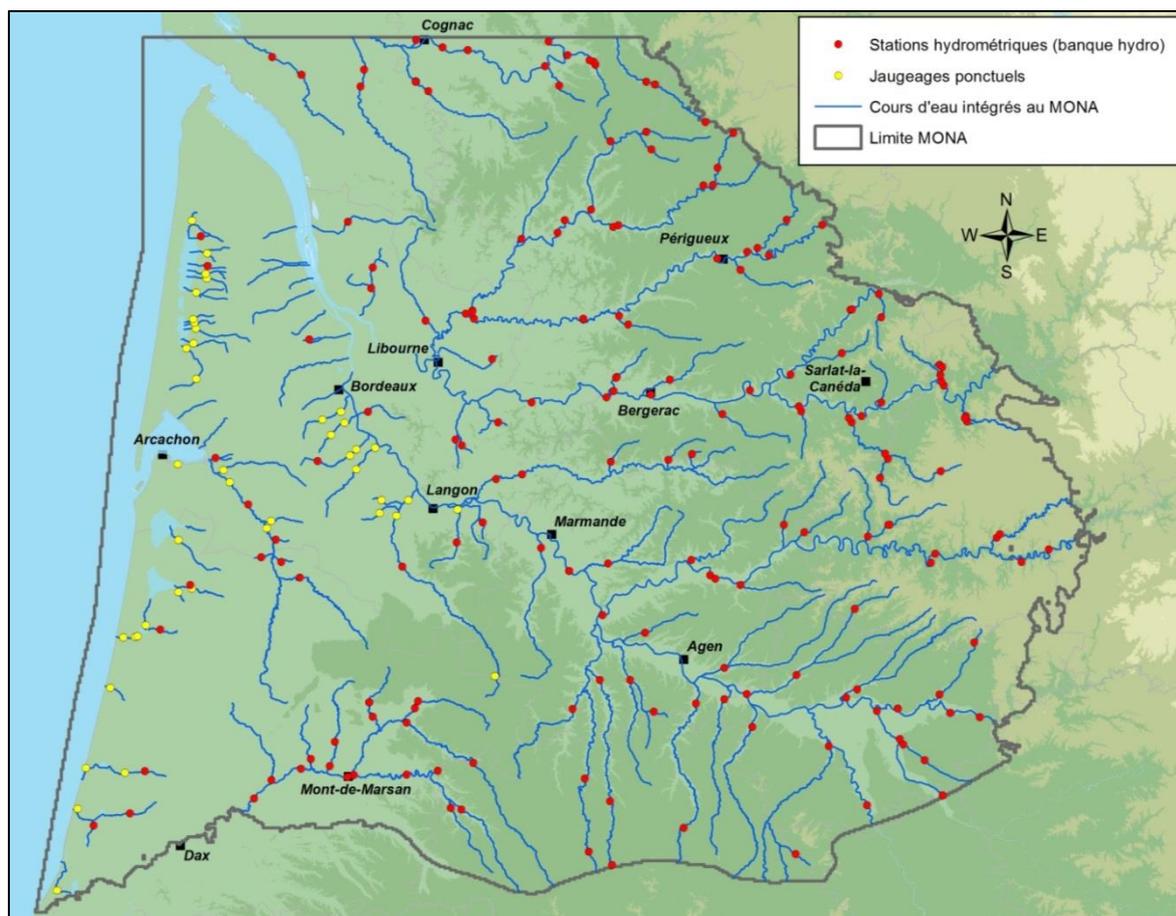


Illustration 18 - Réseau hydrographique intégré dans le MONA et points de mesures de débit disponibles

Les caractéristiques nécessaires pour permettre le couplage nappes/rivières dépendent du mode de représentation du réseau hydrographique choisi. Afin de limiter les inconnues et éviter de démultiplier les paramètres de calage (coef de strickler,...), le choix s'est porté sur une modélisation avec des cotes de rivière fixées. Ainsi, pour chacune des 12 240 mailles parcourues par un cours d'eau dans le MONA, les paramètres suivants sont à renseigner :

- **Longueur du tronçon du cours d'eau,**
- **Largeur du tronçon du cours d'eau :**

Elle est obtenue à partir de diverses sources. D'une part, sur le triangle landais, le travail de modélisation en cours des aquifères du Mio-Plio-Quaternaire a nécessité des mesures de terrain. Celles-ci ont été réalisées sur les territoires des Lacs Médocains et de Born-et-Buch, complétées par des données de la Fédération de Pêche de Gironde (FDAAPPMA33). D'autre part, des rapports de quelques SAGE du bassin Adour-Garonne font mention de la morphologie des cours d'eau.

Ces données ne suffisent pas à couvrir l'ensemble du domaine du MONA. Aussi, un complément a été apporté par les travaux du SYRAH-CE au cours desquels le paramètre de « largeur théorique à pleins bords » a été obtenue. Celle-ci représente la largeur du lit mineur ou largeur à pleins bords du cours d'eau en mètres, pour chaque tronçon qui compose le réseau TGH (Tronçons Géomorphologiquement Homogènes). La méthodologie qui s'appuie sur un traitement SIG est largement décrite dans les Cahiers techniques SYRAH-CE (Valette et al., 2010).

Sur quelques cours d'eau, cette largeur a été affinée à partir des photos aériennes.

- **Cote (absolue) du fond de la rivière (fond de l'eau) :**

En général, elle a été calculée en considérant le minimum du MNT au pas de 25 m sur le tronçon de rivière correspondant à la maille. Un encaissement supplémentaire a été défini par l'appui des données de terrain et de photos satellites.

L'imprécision du MNT a conduit à corriger certaines valeurs en considérant les points cotés des cartes IGN 1/25 000.

- **Cote (absolue) de l'eau dans la rivière :**

La hauteur d'eau dans la rivière a été obtenue à partir des mesures de terrain et des données de la banque hydro.

- **Épaisseur et perméabilité du lit de la rivière :**

En l'absence de données existantes pour ces deux paramètres, une épaisseur de 0,1 m a été arbitrairement fixée sur l'ensemble du réseau à l'exception des cours d'eau majeurs où les épaisseurs sont reprises des précédentes modélisations. La perméabilité retenue correspond quant à elle à la perméabilité de la première couche traversée par le tronçon du cours d'eau.

Ces deux paramètres sont généralement considérés comme paramètres de calage.

Pour chaque cours d'eau, il est possible de calculer un débit en tout point (= maille) de son linéaire que l'on peut comparer avec les chroniques disponibles sur les stations hydrométriques.

L'ensemble des paramètres a été intégré au MONA en régime permanent afin de s'assurer dans un premier temps de la bonne construction du réseau hydrographique et de la cohérence de ses caractéristiques puis de vérifier la convergence du modèle.

3.3. RÉFLEXION SUR LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR INTEGRER LES DONNEES CLIMATIQUES ET CALCULER LE FLUX DE RECHARGE DANS LE MODÈLE

La mise en œuvre de la version 4 du MONA est également l'occasion d'améliorer le zonage de la recharge par rapport à la méthodologie appliquée dans la version 3.3b du modèle (cf. chapitre 2.2.2). En effet, dans la version 3.3b, la recharge est calculée à partir des données climatiques de 5 stations météorologiques et il paraît pertinent de bénéficier de données mieux spatialisées pour améliorer le calcul de la recharge dans le modèle.

3.3.1. Méthodologies d'évaluation de la recharge

Plusieurs études en cours au BRGM et en collaboration avec des organismes publics portent sur la caractérisation de la recharge :

- Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines (Seguin, à paraître) ;
- Caractérisation de la recharge des aquifères et évaluation future en contexte de changement climatique. Application au Bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport BRGM/RP-64779-FR (Caballero et al., 2015) ;
- Projet de recherche REGARD : Modélisation des Ressources en Eau sur le bassin de la GARonne – Interaction entre les composantes naturelles et anthropiques et apport de la téléDétection (Bardeau, à paraître).

Par ailleurs, le rapport rédigé par Barthelemy et Seguin (2013 - « Modélisation maillée des écoulements souterrains - Principes, démarche et recommandations ») propose un cadre méthodologique pour le calcul de la recharge appliquée à la modélisation hydrogéologique maillée.

Le travail présenté ici n'a donc pas vocation à proposer de nouvelles réflexions méthodologiques concernant le calcul de la recharge mais se focalise sur l'application d'une méthode de caractérisation de la recharge à l'échelle du Modèle Nord Aquitain.

Paramètres à quantifier pour caractériser la recharge dans un modèle maillé

Une partie du texte ci-après est tirée du rapport relatif à l'évaluation de la recharge (Seguin, à paraître).

À l'échelle des aquifères, plusieurs méthodes existent pour le calcul de la recharge, chacune avec ses limitations et son domaine d'application spatial et temporel. Classiquement, la recharge se déduit d'une partition de la pluie efficace en ruissellement et infiltration, ce qui implique donc de déterminer dans un premier temps la pluie efficace, et plus en amont encore, de spatialiser correctement la pluie brute et l'évapotranspiration. Outre les données disponibles à chaque station météo, Météo France synthétise l'évolution de plusieurs variables climatiques dont Pluie et ETP via le module SAFRAN. SAFRAN/France est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface du sol. Il utilise des observations de surface combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres sont analysés par pas de 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). Le système d'analyse Safran a été développé à l'origine par le Centre d'études de la neige (Durand et al., 1993) pour la prévision des risques d'avalanches. L'acronyme Safran signifiant : Système

d'Analyse Fournissant des Renseignements A la Neige. Il a été étendu à l'ensemble du bassin du Rhône (Etcheverry, 2001) puis à la France entière (LeMoigne, 2002).

Le calcul de la pluie efficace repose sur l'évaluation de la capacité temporaire du sol à stocker une quantité d'eau susceptible d'être reprise ultérieurement par l'ETP. Plusieurs terminologies ont été utilisées pour qualifier cette capacité temporaire :

- Capacité de rétention ou de stockage du sol (Barthélemy et al., 2013) ;
- Capacité de rétention du sol ou Réserve Disponible pour l'Évapotranspiration (RDE) (Domez et al., 2012).

Cette notion est voisine, mais conceptuellement différente de celle de réserve utile (RU) employée en agronomie et qui est définie comme la différence entre le volume d'eau contenu dans le sol à la capacité de rétention et le volume d'eau restant au point de flétrissement. Pour une surface unitaire et une couche de sol d'épaisseur Δz , on a donc en supposant un sol homogène :

$$RU = (\theta_{ret} - \theta_{fp}) \Delta z$$

• *Capacité de rétention*

C'est la teneur en eau θ_{ret} au-delà de laquelle la composante gravitaire de la charge l'emporte sur la pression capillaire. Pour de nombreux sols, la capacité de rétention correspond à la valeur moyenne suivante de la pression :

$$\theta = \theta_{ret} \Rightarrow h = -3,3 \text{ m} \quad \text{ou} \quad \Psi = 0,33 \text{ bar} \quad \text{ou} \quad pF = 2,5$$

• *Point de flétrissement permanent*

C'est la teneur en eau θ_{fp} en deçà de laquelle les forces retenant l'eau dans le sol surpassent la capacité d'extraction racinaire.

$$\theta = \theta_{fp} \Rightarrow h = -160 \text{ m} \quad \text{ou} \quad \Psi = 16 \text{ bar} \quad \text{ou} \quad pF = 4,2$$

Le tableau 9 donne des valeurs par cm de sol de la réserve utilisable du sol en fonction de sa texture. Rigoureusement, la RU d'un sol dépend donc de l'épaisseur de sol considérée. En pratique, une valeur moyenne souvent utilisée à l'échelle d'un territoire (grande variété de sols) est 100 mm. Pour un sol sableux, on peut retenir 25 à 30 mm.

En général, lorsqu'un modèle hydrogéologique est utilisé, il s'agit d'un paramètre de calage permettant de restituer la pluie efficace constatée à l'échelle d'un bassin versant donné (Croiset et al., 2013). La pluie efficace simulée par le modèle dépend en effet à la fois de ce paramètre mais aussi de la ou des chroniques météorologiques utilisées. Les valeurs attribuées dans un modèle à la réserve disponible pour l'évapotranspiration à l'issue du calage peuvent donc différer des valeurs calculées à partir des cartes pédologiques (cf. page 63). Cependant ces cartes peuvent servir de base pour la définition des zones de sol servant au calcul de la recharge à l'aide du module Gardenia dans Marthe. Ainsi, les cartes pédologiques réalisées en Poitou-Charentes ont été utilisées dans le cadre de l'actualisation du modèle maillé des aquifères du Jurassique en Poitou-Charentes (Domez, 2015). Il en a été de même en Gironde dans le cadre du projet PHONEME (Saltel et al., 2015).

Classe de texture (selon le triangle de Jamagne)	Humidité % à la capacité au champ (pF=2.5)	Humidité % au point de flétrissement permanent (pF=4.2)	Eau utile (g d'eau pour 100 g de sol)	Densité apparente (sans dimension)	Réservoir utilisable (mm d'eau par cm de sol)
S	8	3	5	1.35	0.7
SL	12	5	7	1.40	1.0
SA	19	10	9	1.50	1.35
LIS	15	7	8	1.50	1.20
LS	19	9	10	1.45	1.45
LmS	20	9	11	1.45	1.60
LSA	22	11	11	1.50	1.65
LAS	24	12	12	1.45	1.75
LI	17	8	9	1.45	1.30
Lm	23	10	13	1.35	1.75
LA	27	13	14	1.40	1.95
AS	33	22	11	1.55	1.70
A	37	25	12	1.45	1.75
AL	32	19	13	1.40	1.80
A lourde	29	18	11	1.50	1.65

Tableau des réservoirs en eau selon les textures, Service de cartographie des sols de l'Aisne, Jamagne et al., 1977 ; in Baize et Jabiol, 1995).

Tableau 9 - Réserve utilisable du sol en fonction de sa texture (Baize et al., 1995)

Une fois la pluie efficace calculée, il reste à faire la part entre ruissellement et infiltration, partition conditionnée par de nombreux paramètres (relief, type de sol, couverture végétale, ...). Une approche parfois utilisée est celle basée sur l'**IDPR** ou **Indice de Développement et de Persistance des Réseaux** (Desprats et al., 2010). La recharge et le ruissellement doivent être estimés pour chaque maille et à chaque pas de temps du modèle.

Une autre approche consiste à identifier la contribution des eaux souterraines au débit d'un cours d'eau : cette décomposition de l'hydrogramme permet d'évaluer les parts respectives des eaux souterraines et des eaux de ruissellement transitant en moyenne dans un bassin versant. Il repose sur le principe que le débit du cours d'eau à l'exutoire traduit quantitativement et temporellement (parfois avec un décalage temporel plus ou moins important selon l'inertie de la nappe), à l'échelle de son bassin versant, des dynamiques d'écoulement intervenant en son sein, qu'il s'agisse d'écoulement lent ou rapide.

Si le ruissellement est habituellement considéré comme étant transmis immédiatement au cours d'eau le plus proche selon les parcours définis, la recharge est transmise avec un temps de retard à la nappe qu'il est nécessaire de caractériser.

On peut ainsi parler de déphasage temporel induit par la zone non saturée (ZNS). Le pas de temps privilégié pour la caractérisation de ces dynamiques est journalier.

Le schéma de l'illustration 19 propose une représentation simplifiée du processus de recharge (à droite) et un algorithme de calcul pour la pluie efficace (à gauche).

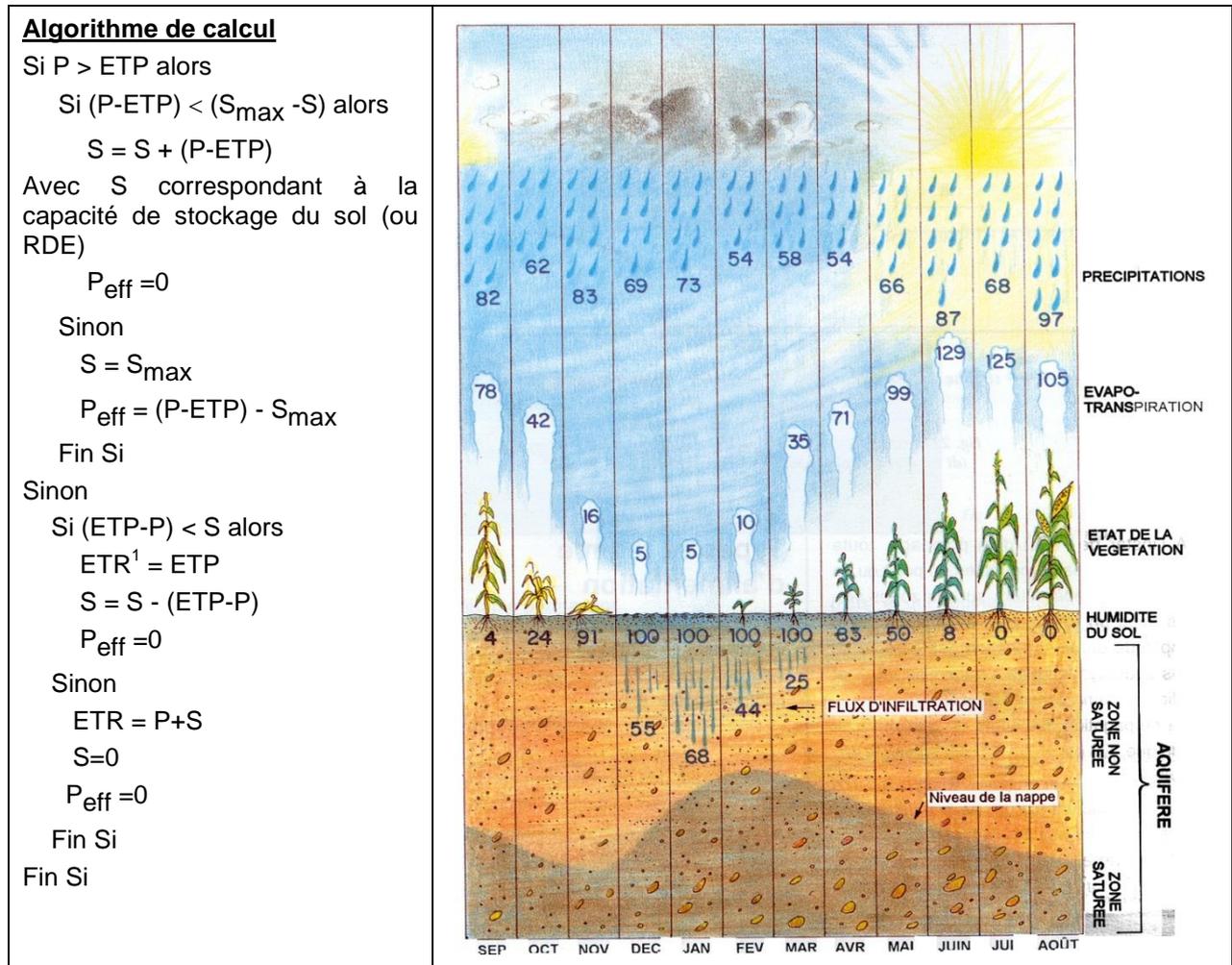


Illustration 19 - Algorithme de calcul de la pluie efficace (à gauche) et processus de recharge (à droite)

En résumé, la caractérisation de la recharge va reposer sur :

- l'utilisation de la grille SAFRAN de Météo-France pour la spatialisation et la connaissance de la variation journalière de la pluviométrie et de l'évapotranspiration ;
- des paramètres associés au processus de recharge qui permettent, à partir des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle, i) de calculer la pluie efficace, ii) de définir la distribution de la pluie efficace entre écoulements de surface et écoulements souterrains, et iii) de rendre compte du déphasage entre la pluie et la recharge effective de la nappe, associé à la traversée de la zone non saturée. Ces paramètres sont au nombre de trois.

Les trois paramètres nécessaires pour quantifier et spatialiser la recharge à partir des chroniques journalières de pluviométrie et d'évapotranspiration sont :

¹ On gardera à l'esprit que ce paramètre est calculé et non mesuré

- la capacité de rétention du sol ou réserve disponible pour l'évapotranspiration ;
- la partition de la pluie efficace entre écoulements de surface et écoulements souterrains ;
- le temps de demi-percolation.

Méthodologie de caractérisation de la recharge

Dans le cadre de cette étude, l'approche a consisté à caractériser le comportement - vis-à-vis de la recharge - des entités hydrogéologiques du MONA v4 présentes à l'affleurement. Ceci a été effectué en s'appuyant sur le principe de la décomposition des hydrogrammes.

Dans cette optique, il a été recherché des bassins versants suffisamment homogènes dans leur géologie à l'affleurement pour que le comportement du cours d'eau puisse être représentatif d'une seule entité hydrogéologique (cf. chapitre 3.3.3). L'anthropisation du bassin versant (prélèvements, barrages, retenues collinaires, drainages agricoles, imperméabilisation des surfaces urbaines...) et l'écart parfois très important entre bassin versant topographique et bassin versant souterrain (par exemple l'Ouyse) ont restreint les possibilités de réalisation de ces simulations. En pratique, on verra que le nombre d'entités hydrogéologiques directement caractérisables de la sorte demeure ainsi limité (cf. Tableau 19). Pour les autres, il a été nécessaire de travailler par analogie et en s'appuyant sur des descripteurs complémentaires tels que l'IDPR (cf. chapitre 3.3.3).

La décomposition des hydrogrammes a été effectuée à l'aide du logiciel GARDENIA (cf. page 64), dont les paramètres de calage peuvent être directement utilisés dans le logiciel MARTHE, ce qui facilite la démarche et en assure – à ce niveau – la cohérence.

Les paramètres du processus de recharge (la réserve disponible pour l'évapotranspiration, la partition de la pluie efficace et le temps de demi-percolation) sont affectés d'une incertitude importante car ils ne peuvent être déduits de mesures de terrain. Ces paramètres sont donc réévalués au cours du processus de calage dans le modèle maillé afin de reproduire au mieux les fluctuations de la nappe. Le jeu de paramètres issu des simulations effectuées à l'aide du logiciel GARDENIA (cf. page 70) est donc à considérer comme un jeu de valeurs initiales qui resteront à ajuster lors de la phase de calage du modèle hydrodynamique sous MARTHE.

Enfin, pour chaque maille du modèle, les chroniques de pluie et d'évapotranspiration proviendront de la grille SAFRAN élaborée par Météo France, données qui ont également été utilisées pour les simulations effectuées avec le logiciel GARDENIA.

3.3.2. Données disponibles pour l'évaluation de la recharge

Données climatologiques

- **Les données SAFRAN**

La pluviométrie et l'évapotranspiration ont été fournies par Météo France et sont issues de la ré-analyse SAFRAN. La carte présentée en illustration 20 permet de visualiser le maillage de la grille SAFRAN sur l'extension du MONA. A chaque maille sont notamment associées une chronique journalière de pluviométrie et de l'ETP sur la période allant d'août 1958 à fin 2014.

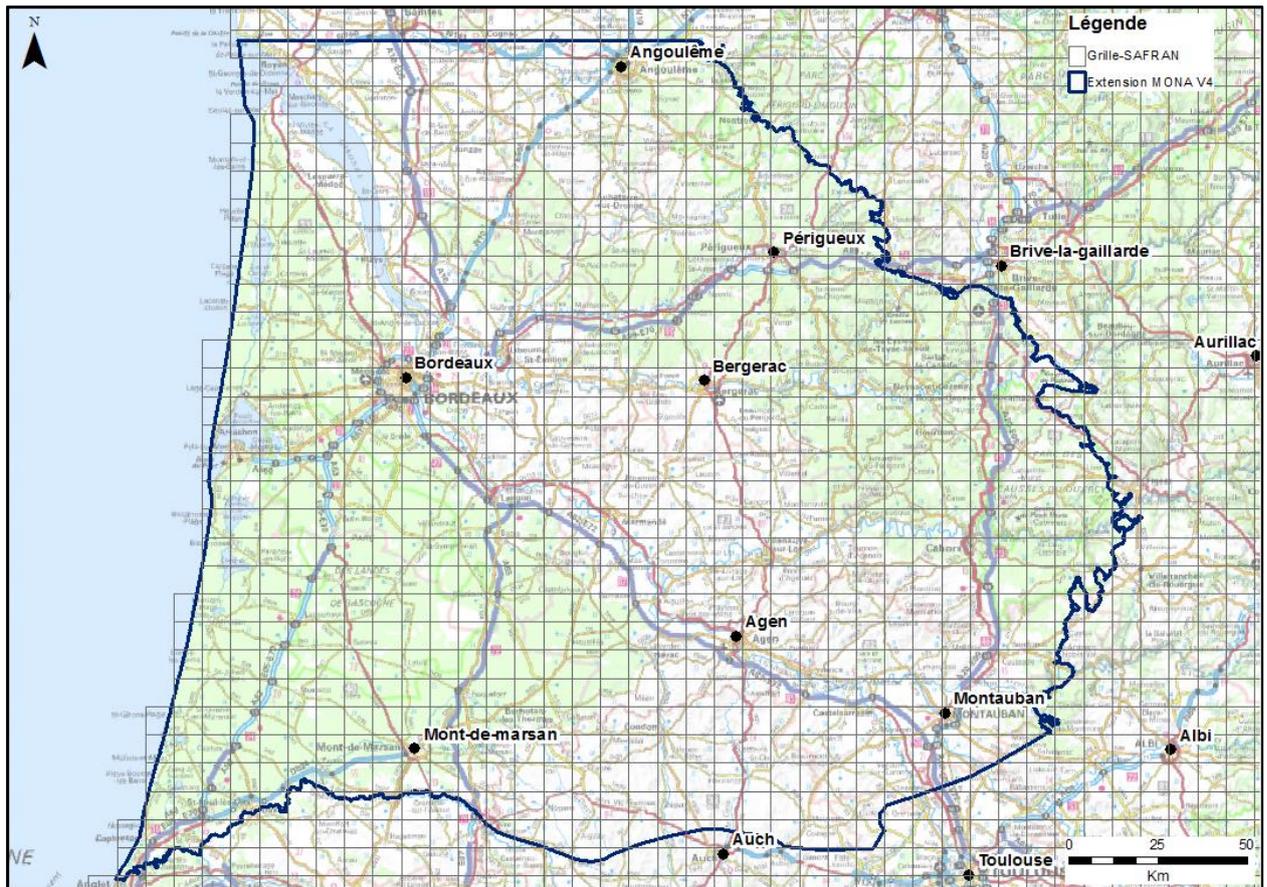


Illustration 20 - Maillage des données SAFRAN de Météo-France et extension du MONA

- **Analyse des chroniques de données disponibles**

Une analyse des données SAFRAN a été réalisée en sélectionnant six mailles de la grille dans des contextes pluviométriques variés (cf. Illustration 21). Le but est ici d'observer l'existence éventuelle de particularités sur les chroniques disponibles, que celles-ci s'avèrent locales ou systématiques. Les chroniques pluviométriques et d'ETP des six mailles sélectionnées sont présentées en annexe 6.

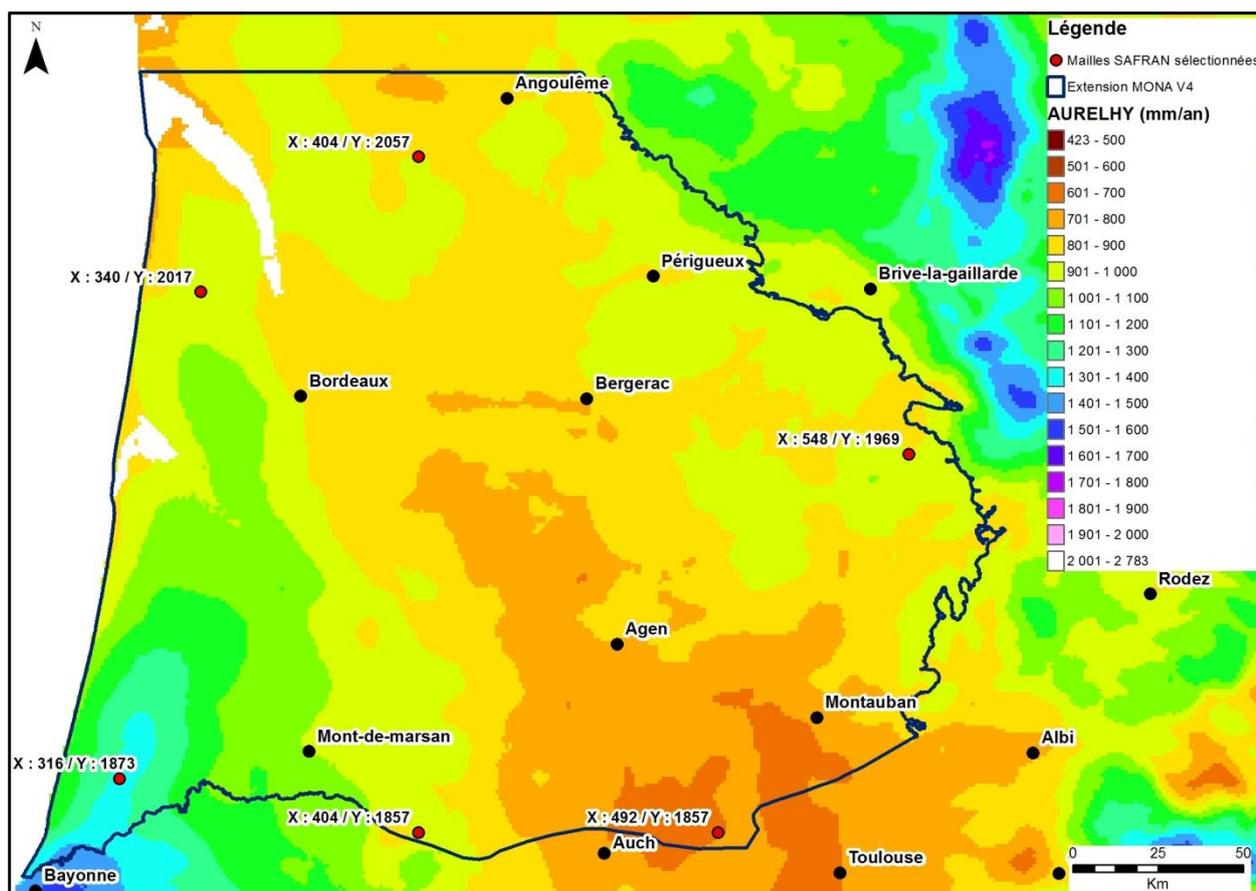


Illustration 21 - Mailles SAFRAN sélectionnées (en rouge) et grille AURELHY 1971-2000 (Météo-France). Les mailles sont référencées par leurs coordonnées X, Y en Lambert 2 étendu kilométrique.

Une première observation des chroniques de pluviométrie ne montre pas de tendance aisément identifiable. Ceci est confirmé par la réalisation de tests statistiques applicables aux séries temporelles (Vernoux et al., 2011) qui mettent en évidence l'absence de tendance ou de rupture dans les chroniques pluviométriques de ces six mailles. Un calcul de moyennes sur une période de 25 ans montre par contre une légère baisse de la pluviométrie annuelle par comparaison des périodes 1959-1983 et 1990-2014 (cf. Tableau 10).

Pluie annuelle (mm)	316 / 1873	404 / 1857	548 / 1969	492 / 1857	340 / 2017	404 / 2057
Moyenne 1959-1983	1180	889	995	727	973	837
Moyenne 1990-2014	1167	846	946	696	952	830
Ratio	-1.1%	-4.8%	-4.9%	-4.2%	-2.2%	-0.9%

Tableau 10 - Comparaison de la pluviométrie annuelle 1959-1983 à celle de 1990-2014 (d'après données SAFRAN - Météo-France)

Le résultat est tout autre concernant l'Evapotranspiration : le test de Mann-Kendall appliqué aux six séries temporelles fait apparaître une tendance à la hausse avec un seuil de signification de 0.001, soit un indice de confiance particulièrement fort. Le test de Pettit complète ce résultat en indiquant que l'hypothèse de l'absence d'une rupture dans la série temporelle doit être réfutée pour les six chroniques avec, à chaque fois, un seuil de confiance de 99% (il s'agit là encore d'un indice de confiance particulièrement élevé). Enfin, l'application de la méthode dite de « segmentation de Hubert » (Hubert et al., 1989) confirme l'existence d'une ou de plusieurs ruptures dans ces séries temporelles (cf. Tableau 11). Notons que cette méthode identifie systématiquement une rupture dans la série temporelle en 1988 ou à défaut en 1987 (maille SAFRAN de coordonnées 316 / 1873).

Chronique	XL93	YL93	Résultats des tests
ETP	316	1873	Petit: absence de rupture rejetée à 99%
			Segmentation de Hubert: rupture en 1987
	340	2017	Petit: absence de rupture rejetée à 99%
			Segmentation de Hubert: rupture en 1988
	404	1857	Petit: absence de rupture rejetée à 99%
			Segmentation de Hubert: ruptures en 1981, 1988, 1995
	404	2057	Petit: absence de rupture rejetée à 99%
			Segmentation de Hubert: ruptures en 1988, 2012
	492	1857	Petit: absence de rupture rejetée à 99%
			Segmentation de Hubert: ruptures en 1988, 1991, 1997
	548	1969	Petit: absence de rupture rejetée à 99%
			Segmentation de Hubert: ruptures en 1988, 2002

Tableau 11 - Identification de ruptures dans les chroniques d'ETP analysées par application du test de « segmentation de Hubert »

Enfin, notons que la comparaison de l'ETP moyenne annuelle sur la période 1990-2014 est bien supérieure - parfois de plus de 25% - à celle de la période 1959-1983 (cf. Tableau 12).

ETP (mm)	316 / 1873	404 / 1857	548 / 1969	492 / 1857	340 / 2017	404 / 2057
Moyenne 1959-1983	702	649	657	661	711	750
Moyenne 1990-2014	772	822	818	837	859	884
Ratio	9.9%	26.7%	24.5%	26.5%	20.9%	17.9%

Tableau 12 - Comparaison de l'ETP annuelle 1959-1983 à celle de 1990-2014 (d'après données SAFRAN – Météo-France)

Le même calcul est effectué mais en considérant cette fois des années hydrologiques (septembre à août - en démarrant en septembre pour intégrer le démarrage potentiel de la recharge) et en ne considérant l'ETP que des mois de septembre à avril, c'est-à-dire les mois durant lesquels la pluie est le plus susceptible de générer de la pluie efficace (cf. Tableau 13).

ETP 8 mois (mm)	316 / 1873	404 / 1857	548 / 1969	492 / 1857	340 / 2017	404 / 2057
Moyenne 1958-1983	303	287	280	271	308	325
Moyenne 1989-2014	346	370	349	368	383	384
Ratio	14.1%	29.1%	24.5%	36.0%	24.5%	18.4%

Tableau 13 - Comparaison de l'ETP de septembre à avril de la période 1958-1983 à la période 1989-2014 (d'après données SAFRAN - Météo-France)

L'augmentation constatée par comparaison des deux périodes est plus importante encore que celle constatée en cumulant l'ETP annuelle : l'impact sur la quantité de pluie efficace disponible annuellement n'en est que d'autant plus important.

Le même calcul effectué sur la pluviométrie est présenté au Tableau 14. En dehors de la maille de coordonnées (404 / 1857), le calcul montre que la légère baisse de pluviométrie annuelle moyenne observée au Tableau 10 est accentuée sur les périodes de génération de pluie efficace. En d'autres termes, et toujours en dehors de la maille de coordonnées (404 / 1857), on observe une baisse préférentielle de la pluviométrie durant la toute fin de l'été, l'automne, l'hiver et le début du printemps. De même que pour la pluviométrie annuelle, notons que ces baisses ne sont cependant pas significatives au sens du test de Mann-Kendall.

Pluie 8 mois (mm)	316 / 1873	404 / 1857	548 / 1969	492 / 1857	340 / 2017	404 / 2057
Moyenne 1958-1983	901	622	697	493	746	626
Moyenne 1989-2014	868	625	649	464	715	595
Ratio	-3.6%	0.6%	-7.0%	-5.8%	-4.2%	-5.0%

Tableau 14 - Comparaison de la pluviométrie de septembre à avril de la période 1958-1983 à la période 1989-2014 (d'après données SAFRAN – Météo-France)

En prenant pour hypothèse une Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (RDE) de 100 mm, il est possible de procéder au calcul d'une pluie efficace journalière. Les valeurs sont ensuite sommées par année hydrologique et la moyenne en est faite pour deux périodes de 25 ans pour chacune des mailles sélectionnées. Les résultats obtenus figurent dans le Tableau 15.

Pluie efficace (mm)	316 / 1873	404 / 1857	548 / 1969	492 / 1857	340 / 2017	404 / 2057
Moyenne 1958-1983	614	335	434	218	431	295
Moyenne 1989-2014	536	269	310	127	344	229
Baisse (mm)	78	66	124	91	86	65
Ratio	-12.6%	-19.8%	-28.6%	-41.6%	-20.0%	-22.1%

Tableau 15 - Comparaison de la pluie efficace calculée par année hydrologique sur la période 1958-1983 à celle de 1989-2014 (d'après données SAFRAN – Météo-France)

Il ressort de ce calcul que la baisse de pluie efficace constatée par comparaison entre ces deux périodes de 25 ans est de l'ordre de 12 à 41%. L'ampleur importante de la variation constatée en pourcentage d'une maille à l'autre dépend pour beaucoup de la valeur absolue de la pluie efficace : la baisse constatée demeure en pratique comprise entre 65 et 124 mm. Il n'en demeure pas moins que la baisse de plus de 40% de la pluie efficace calculée pour une maille du département du Gers ne peut qu'induire une modification majeure des écoulements dans le bassin versant correspondant.

Une fois ce constat effectué, la question reste de savoir de quelle façon cette baisse potentiellement drastique de la pluie efficace est à prendre en compte dans le calcul de la recharge des aquifères. En effet, outre la question de la quantité d'eau disponible pour l'écoulement, la baisse pourrait induire une modification de la répartition entre ruissellement et infiltration. Cette question n'est pas abordée dans ce rapport faute de temps et de retour d'expérience sur ce sujet.

Indépendamment de la question de la recharge, ce constat invite à s'interroger sur le mode de constitution de scénarios climatiques : à défaut le cas échéant d'utiliser des scénarios climatiques élaborés sur la base des modifications du climat envisagées par le GIEC, il paraît par exemple peu pertinent d'utiliser des données climatiques antérieures à 1988 pour simuler l'effet de nouveaux prélèvements sur la ressource en eau.

Données hydrologiques

Les stations de débit prises en compte dans le cadre de l'étude sont celles de la banque HYDRO. Elles sont localisées sur l'illustration 22.

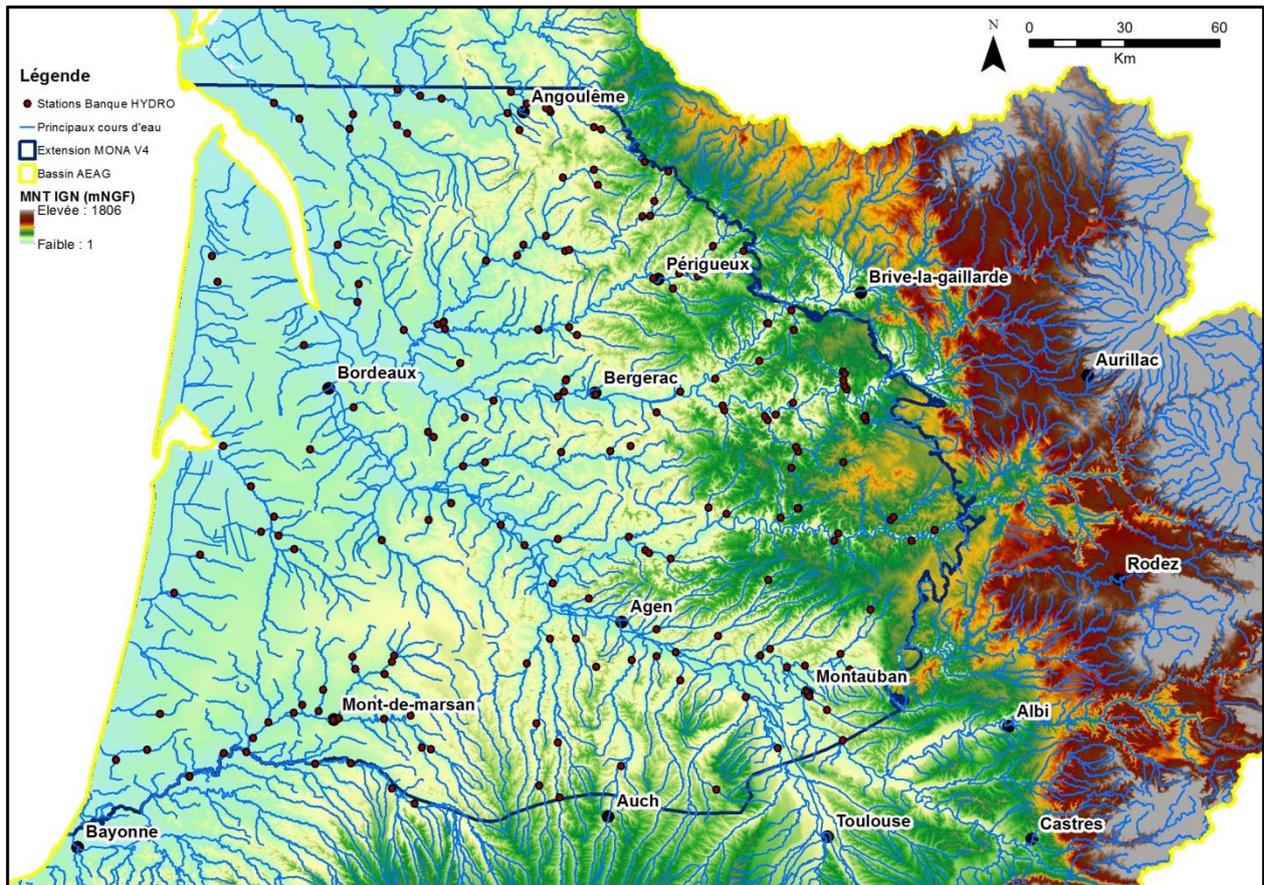


Illustration 22 - Stations de mesure du débit des cours d'eau (Banque HYDRO)

Une pré-sélection des stations a été effectuée sur la base des critères suivants :

- capacité à représenter une dynamique d'écoulement rencontrée au sein de la zone représentée par le MONA, c'est-à-dire que des stations de débit situées en bordure immédiate du MONA - et dont l'essentiel du bassin versant se situe en dehors de la zone - ne sont pas retenues ;
- existence d'une chronique de débits d'au moins 5 ans ;
- ne pas être située sur un des principaux cours d'eau (Garonne, Dordogne, Charente, Lot, Tarn,...), dont les bassins versants très étendus présentent à l'affleurement des formations géologiques au comportement hydrogéologique hétérogène.

Cette pré-sélection a conduit à retenir 117 stations sur les 195 stations initialement identifiées. Lorsque cela a été possible, le bassin versant topographique correspondant à la station de débit a été délimité en s'appuyant sur le MNT de l'IGN au pas de 50 m. Une analyse des délimitations obtenues a conduit à écarter d'autres stations de débits compte tenu de spécificités propres à chacune (bassin versant fortement anthropisé pour le Dropt, bassin versant souterrain très différent du bassin versant topographique pour l'Ouyse). Au final, un bassin versant a pu être délimité par cette méthode pour 95 stations de débit (cf. Illustration 23). Ces délimitations demeurent néanmoins à prendre parfois avec précaution, en particulier dans le triangle landais dans lequel la faible topographie et l'anthropisation (drainage, s n'est pas un élément favorable à une approche automatique.

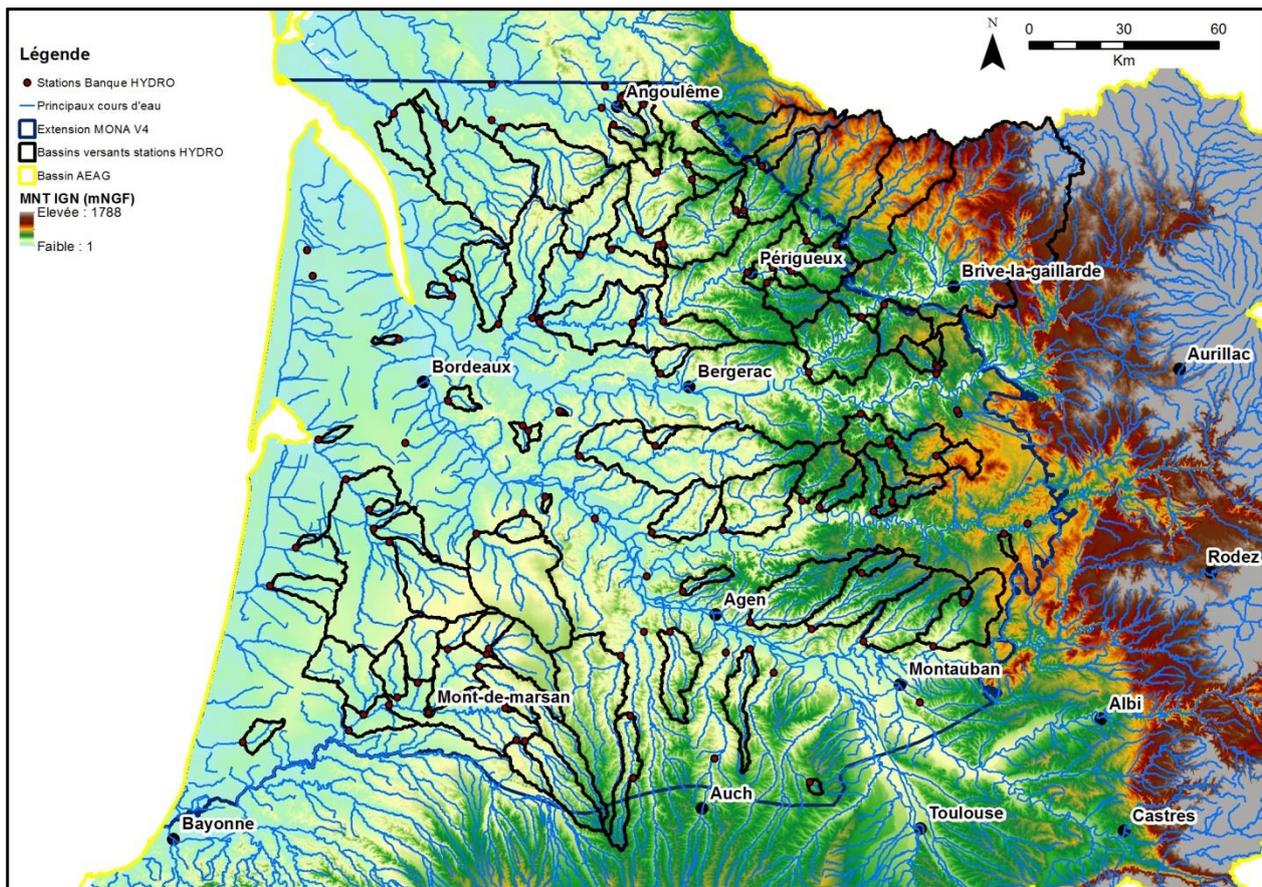


Illustration 23 - Bassins versants des stations de débit délimités à l'aide du MNT de l'IGN au pas de 50 m

Les bassins versants délimités ont été confrontés aux entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement. Celles-ci ont été identifiées à partir de la carte géologique simplifiée produite à l'aide du MONA V4 (cf. Illustration 24). La correspondance des sigles employés avec les entités hydrogéologiques figure en annexe 7.

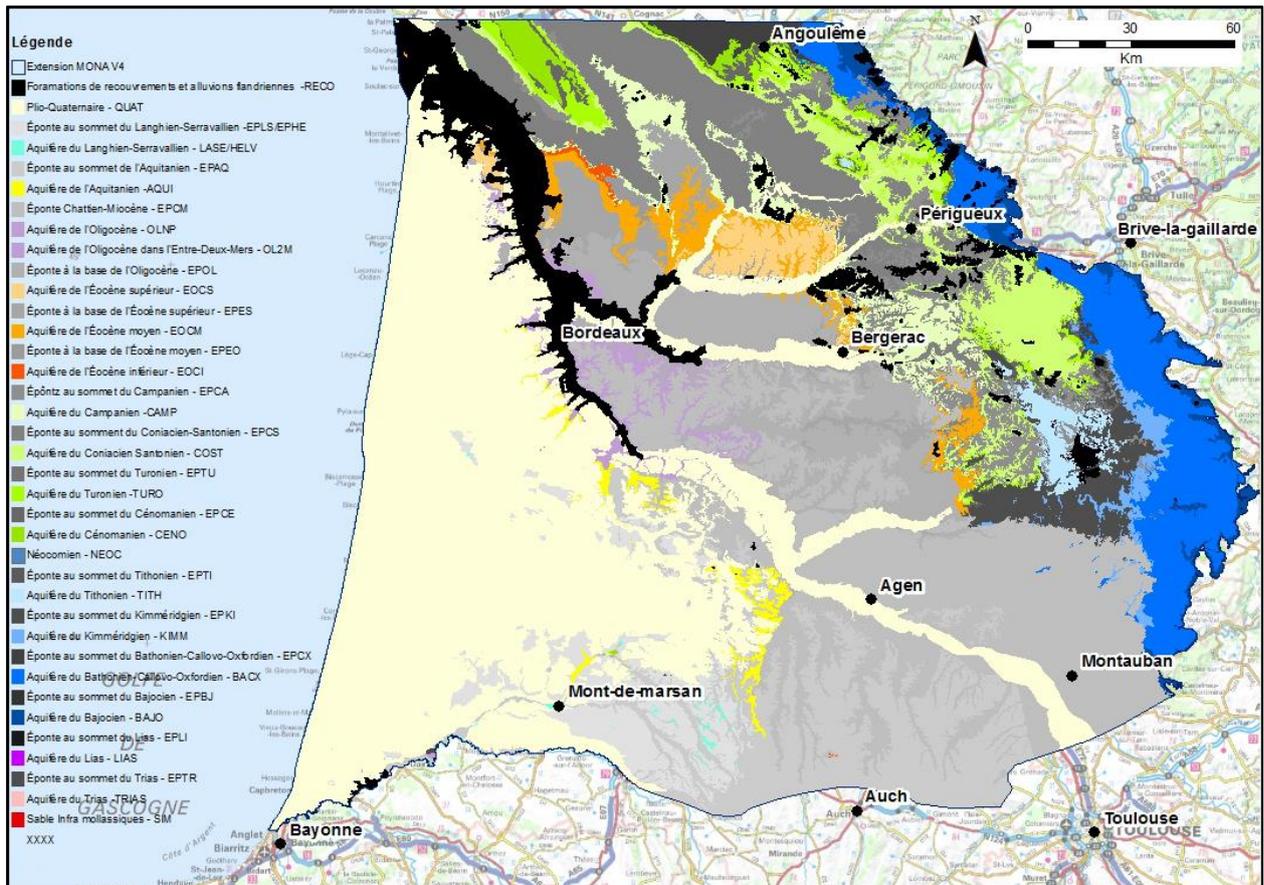


Illustration 24 - Entités hydrogéologiques présentes à l’affleurement - MONA V4

Le calcul, en pourcentage, des superficies occupées par chaque entité hydrogéologique dans chacun des bassins versants permet d’identifier ceux qui sont constitués très majoritairement par une seule entité hydrogéologique, entité agissant dès lors de façon ultra-prédominante dans la partition de la pluie efficace et le temps d’infiltration vers la nappe. Cette approche a permis d’identifier 15 bassins versants listés au tableau 16.

Code HYDRO	Bassin versant	Géologie du Bassin Versant
P2315020	La Borrèze à Lachapelle-Auzac [Lamothe]	BACX (80.2%)
P4254010	La Beune à Tamniès [Moulin du Maillet]	COST (100%)
O8190630	Le Girou à Cénevières	DOGGER (100%)
Q2094310	L'Isaute à Monlezun-d'Armagnac	EPHE (75%) + EPAQ (25%)
P2454310	L'Ourajoux à Salviac [Lafuste]	60% TITH, 20% épontes, 20% RECO
R4122523	Le Né [total] à Salles-d'Angles [Les Perceptiers]	EPCS (77.8%) - CAMP (14.4%)
O2825010	Le Pest à Laréole [Cologne]	EPAQ (100%)
P5404010	L'Eyraud à la Force [Bitarel]	EPOL (73,5%), EPES (7%), EOC-INF (15%), CAMP (3%)
P9414010	Le Moron à Saint-Christoly-de-Blaye	EPES 93.4% + EPOL 6.6%
S3214010	Le Canteloup à Saint-Paul-en-Born [Talucat]	QUAT 100%
S2134010	La Petite Leyre à Belhade	QUAT 100%
O8584010	La Lède à Casseneuil	EPOL (61%) EOC et COST à l'amont
S4214010	Le Magescq à Magescq	QUAT 100%
O6445010	La Masse de Prayssas à Frégimont	EPCM 100%
R3010010	La Charreau à Voueil-et-Giget [Pont Neuf]	CONIACIEN-TURONIEN (69.7%)

Tableau 16 - Bassins versants présentant à l’affleurement une entité hydrogéologique prédominante

Données piézométriques

Les données piézométriques utilisées dans le cadre de cette étude sont celles qui ont été inventoriées dans le cadre du développement du MONA. On dénombre plus de 400 chroniques piézométriques, tous aquifères confondus. La localisation des piézomètres figure en Illustration 25.

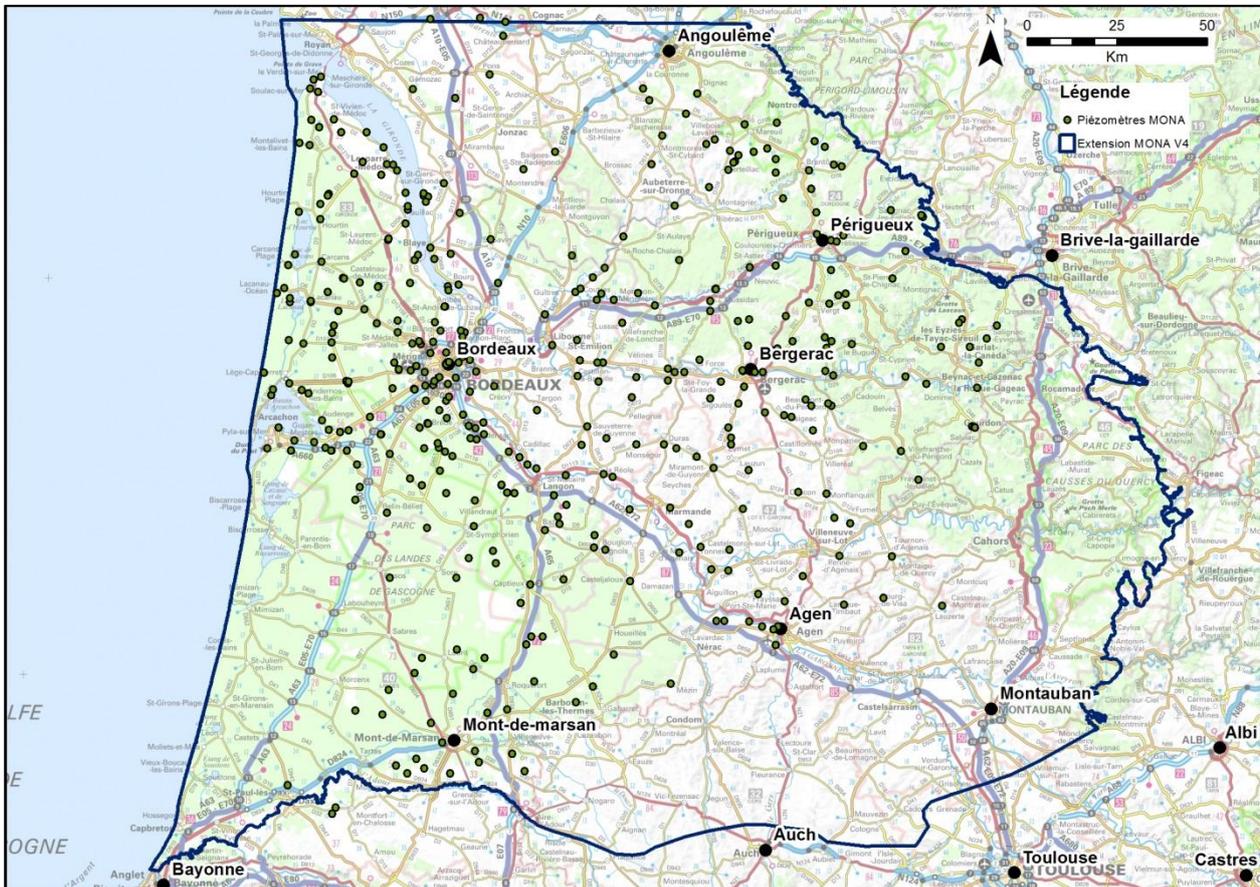


Illustration 25 - Localisation des piézomètres de suivi

Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR)

- À l'échelle du Modèle Nord Aquitain

L'IDPR, publié par le BRGM en 2006 en région Aquitaine (Mardhel, 2006), est en cours de révision courant 2015. La révision – dont la finalisation est prévue pour 2016 – porte notamment sur la prise en compte de la pente des cours d'eau dans le calcul de l'indice. La taille de la maille de calcul est par ailleurs réduite puisqu'elle passe à 25 m. A titre de test, il a été possible de travailler sur cette version actualisée, mais provisoire. Il est entendu que les calculs effectués à partir de la grille provisoire sont susceptibles d'être modifiés à la marge. Deux précautions ont donc été prises pour maîtriser l'incertitude associée au paramètre :

- les valeurs issues de la grille 2015 de l'IDPR ne sont pas utilisées directement en tant que telles mais sont utilisées pour créer un « faisceau de présomptions » du comportement dominant d'une entité hydrogéologique donnée ;
- les valeurs de l'IDPR présenté à l'échelle nationale en 2010 sont calculées en parallèle, dans l'objectif de contrôler la modification apportée par le nouveau calcul.

L'illustration 26 présente la version 2015 de l'IDPR sur l'emprise du MONA V4. Pour mémoire, l'IDPR traduit la capacité ruisselante ou infiltrante des formations géologiques présentes à l'affleurement sous la forme d'une valeur comprise entre 0 (pôle infiltrant) et 2000 (pôle ruisselant).

On observe sur cette illustration plusieurs zones présentant une prépondérance de l'infiltration :

- la zone périphérique du bassin sédimentaire dans laquelle prédominent les formations géologiques du Jurassique et du Crétacé ;
- le cordon dunaire situé à l'ouest du triangle landais, en bordure du littoral ;
- la zone d'affleurement des sables fauves à l'ouest d'Agen et au nord et nord-est de Mont-de-Marsan ;
- à l'ouest de Mont-de-Marsan, vers Castets, dans un secteur dans lequel on retrouve des sables dunaires ;
- les coteaux calcaires de l'Oligocène situés à l'ouest et au sud-est de Bordeaux.

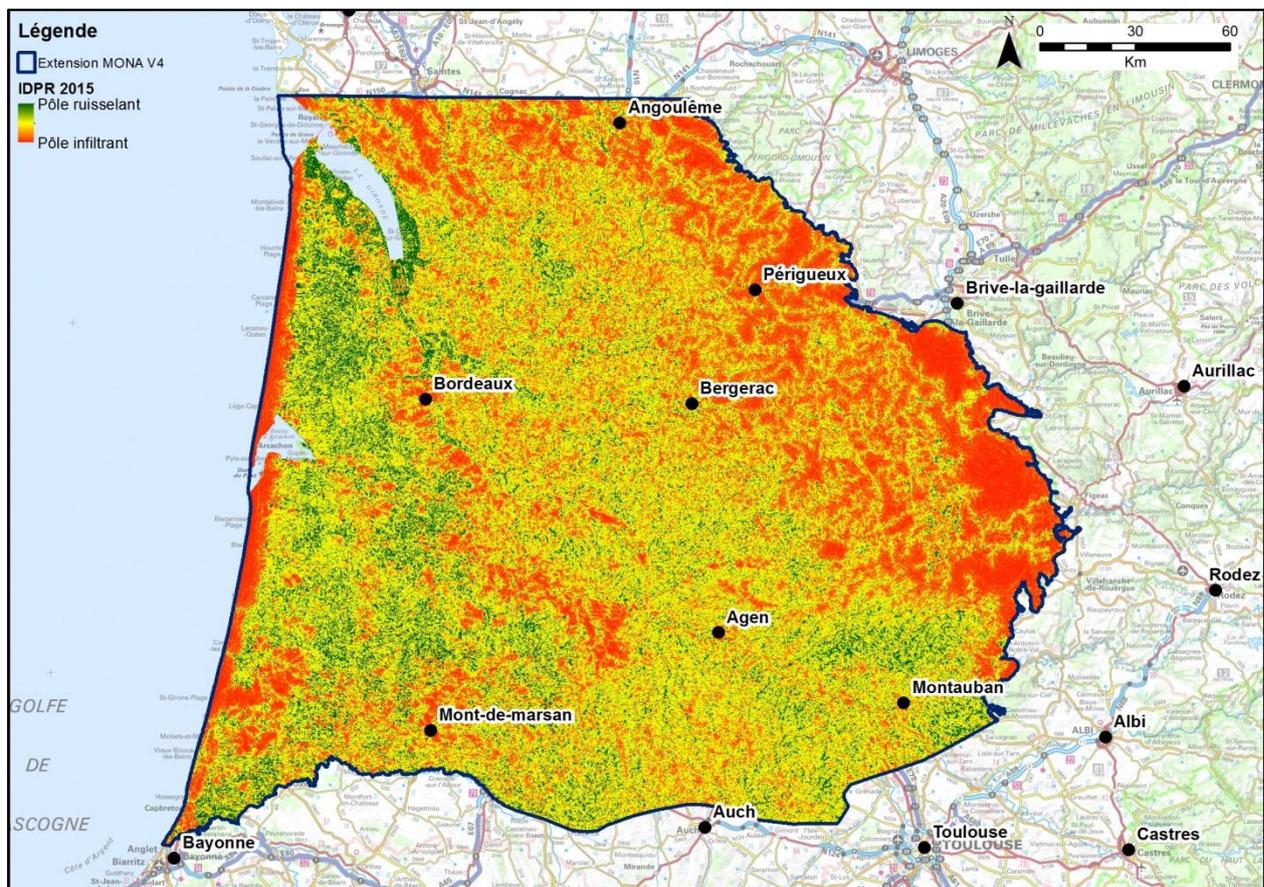


Illustration 26 - IDPR sur l'emprise du MONA V4 - version 2015 provisoire

Pour chaque polygone correspondant à une entité hydrogéologique à l'affleurement (cf. Illustration 24 - 2903 polygones sont présents sur le territoire du MONA), des statistiques sommaires (moyenne, médiane, écart-type, max, min) des mailles d'IDPR incluses dans le polygone ont été calculées. La valeur médiane des mailles d'IDPR calculée par polygone figure en Illustration 27.

- **À l'échelle de la carte hydrogéologique du Modèle Nord Aquitain**

On observe sur cette illustration une capacité inégale à restituer la diversité des comportements observée sur l'illustration 26. Ainsi, si les parties les plus amont du bassin sédimentaire présentent aussi à l'échelle des polygones une prédominance marquée de l'infiltration – étendue cependant dans certaines zones alluviales de façon probablement exagérée (vallée de la Dordogne par exemple), on observe que :

- le cordon dunaire littoral et la zone de Castets n'apparaissent plus comme infiltrantes, ceux-ci étant entièrement intégrés dans le polygone des formations quaternaires de vaste étendue ;
- la représentation des coteaux calcaires au sud-est de Bordeaux et en rive gauche de la Garonne est très atténuée, quand elle ne disparaît pas complètement.

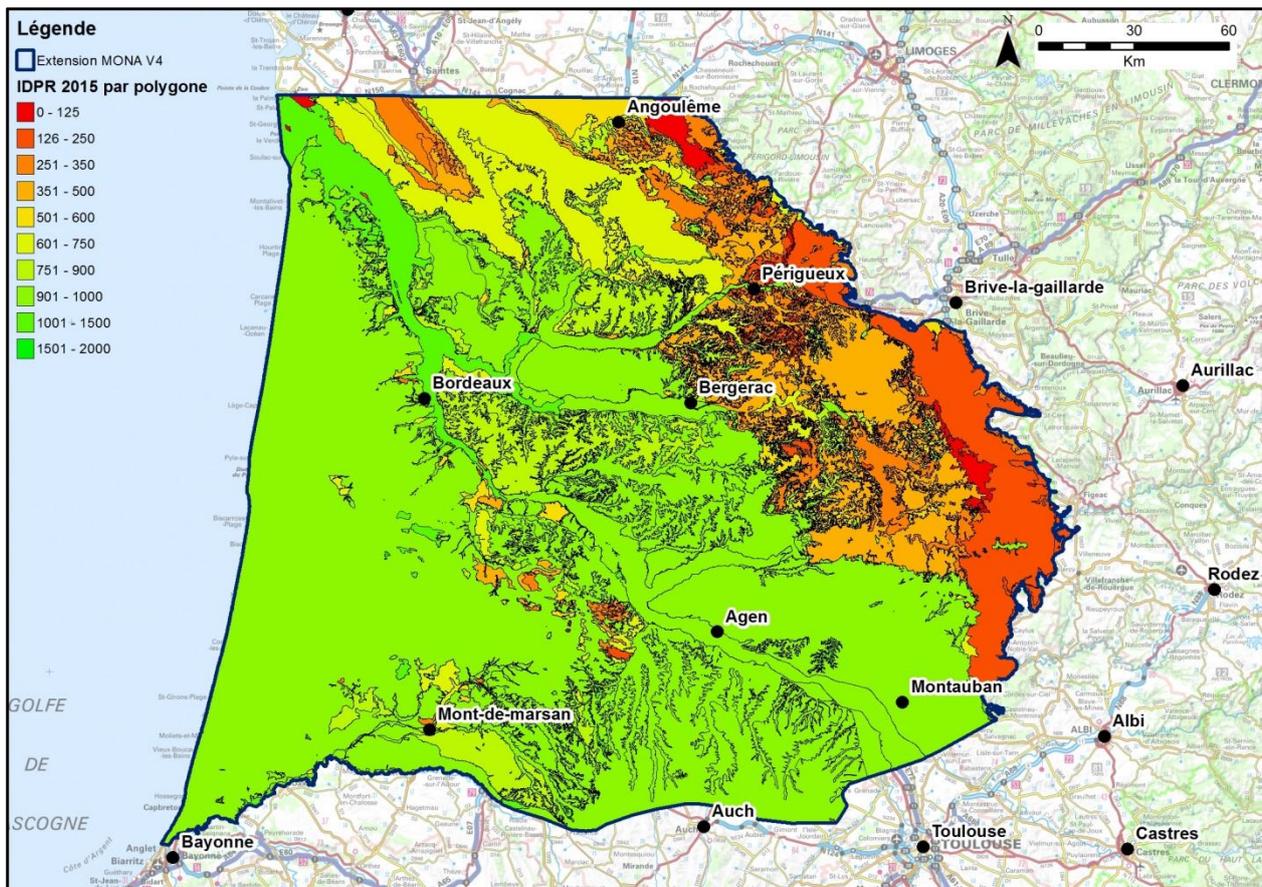


Illustration 27 – Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone d'entité hydrogéologique

On peut faire remarquer dès à présent que l'utilisation de l'IDPR sur le triangle Landais est peu adaptée du fait de l'anthropisation du réseau hydrographique et du caractère sub-affleurant de la nappe. Une description plus détaillée des valeurs médianes de l'IDPR calculées pour les polygones des formations du Tertiaire est proposé dans ce qui suit.

Langhien-Serravallien

L'illustration 28 présente la valeur de l'IDPR 2015 par polygone du Langhien-Serravallien dans le secteur de Mont-de-Marsan - Eauze. Dans cette zone, le Langhien-Serravallien est constitué par les sables fauves et affleure sur une superficie de 36.8 km² pour un IDPR médian de 1000. La cartographie ne fait pas apparaître de zonation géographique spécifique dans ce secteur. Le

fait que ces affleurements soient localisés principalement dans les vallées et non sur les plateaux induit une valeur d'IDPR plus modérée. Pour mémoire, le Langhien-Serravallien affleure aussi très localement dans la vallée de la Leyre au voisinage de Belin-Beliet (superficie d'affleurement de 2.3 km² pour un IDPR médian de 1000) et dans la partie aval de la vallée de la Midouze au voisinage de Tartas (superficie d'affleurement de 1.6 km² pour un IDPR médian de 718).



Illustration 28 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone du Langhien-Serravallien (secteur de Mont-de-Marsan - Eauze)

Aquitanien

L'illustration 29 présente la valeur de l'IDPR 2015 par polygone de l'Aquitanien. La cartographie laisse envisager un découpage en trois zones d'affleurement :

- en rive gauche de la Garonne, entre Birac et Saint-Médard-en-Jalles, sur une superficie de 106.1 km² et pour un IDPR médian de 1000 ;
- le long d'un axe Nord-Sud entre Damazan et Gondrin, en rive gauche de la Gélise et de la Baïse aval, sur une superficie de 171.5 km² et pour un IDPR médian de 373. On note que la valeur de l'IDPR diminue de l'amont vers l'aval ;
- le long de la vallée de la Douze, à l'amont de Mont-de-Marsan, sur une superficie de 20.8 km² et pour un IDPR médian de 1000.

Tout comme pour le Langhien-Serravallien, le fait que les affleurements soient localisés principalement dans les vallées et non sur les plateaux induit une valeur d'IDPR plus faible par rapport à l'environnement proche.

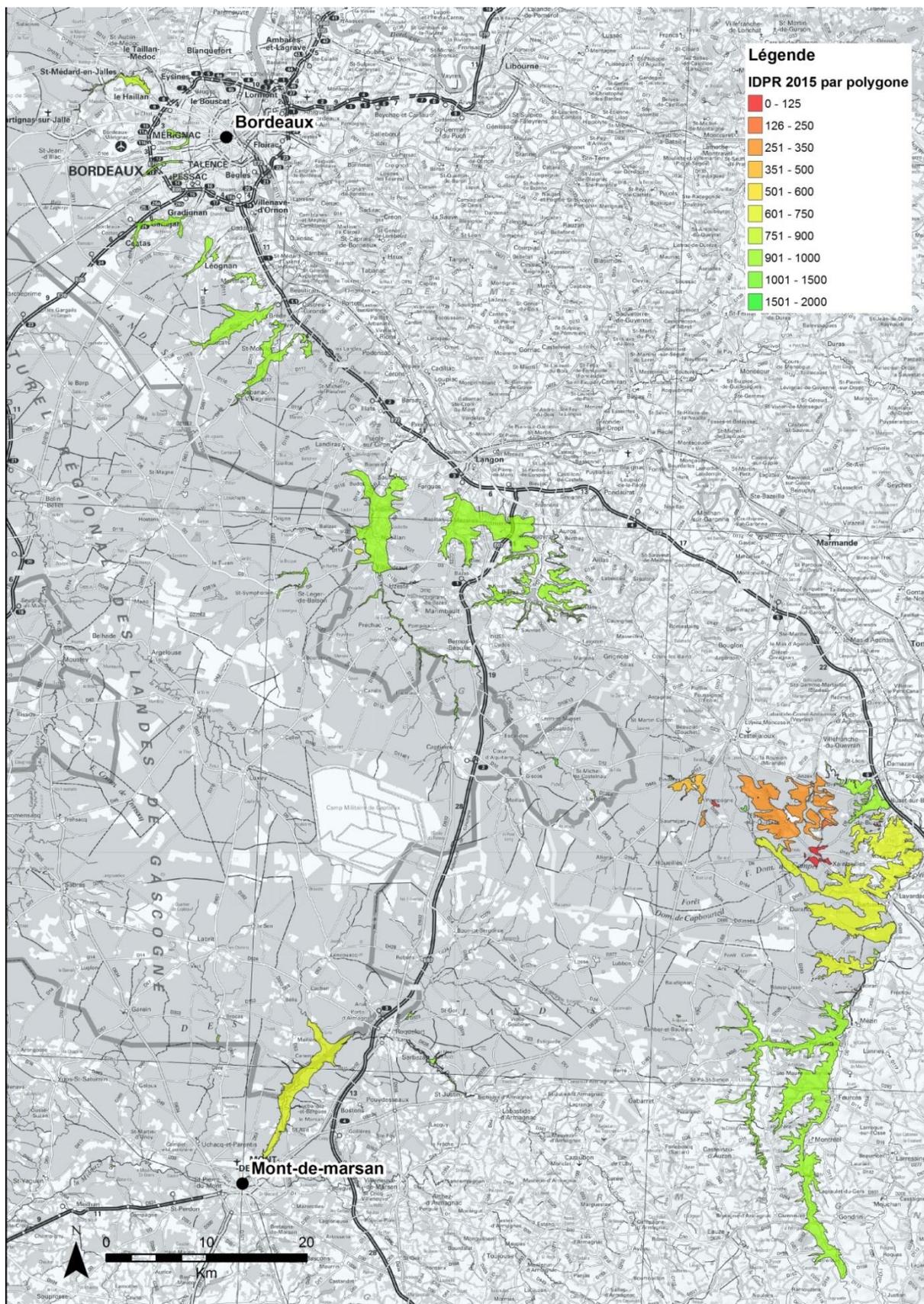


Illustration 29 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Aquitainien

Oligocène

L'illustration 30 présente la valeur de l'IDPR 2015 par polygone de l'Oligocène, que l'on soit dans l'Entre-deux-Mers (appellation OL2M) ou en rive gauche de la Garonne (appellation OLNP). Pour mémoire, l'Oligocène affleure aussi très localement dans la vallée de l'Adour (superficie totale de 5.5 km² pour un IDPR médian de 1000).

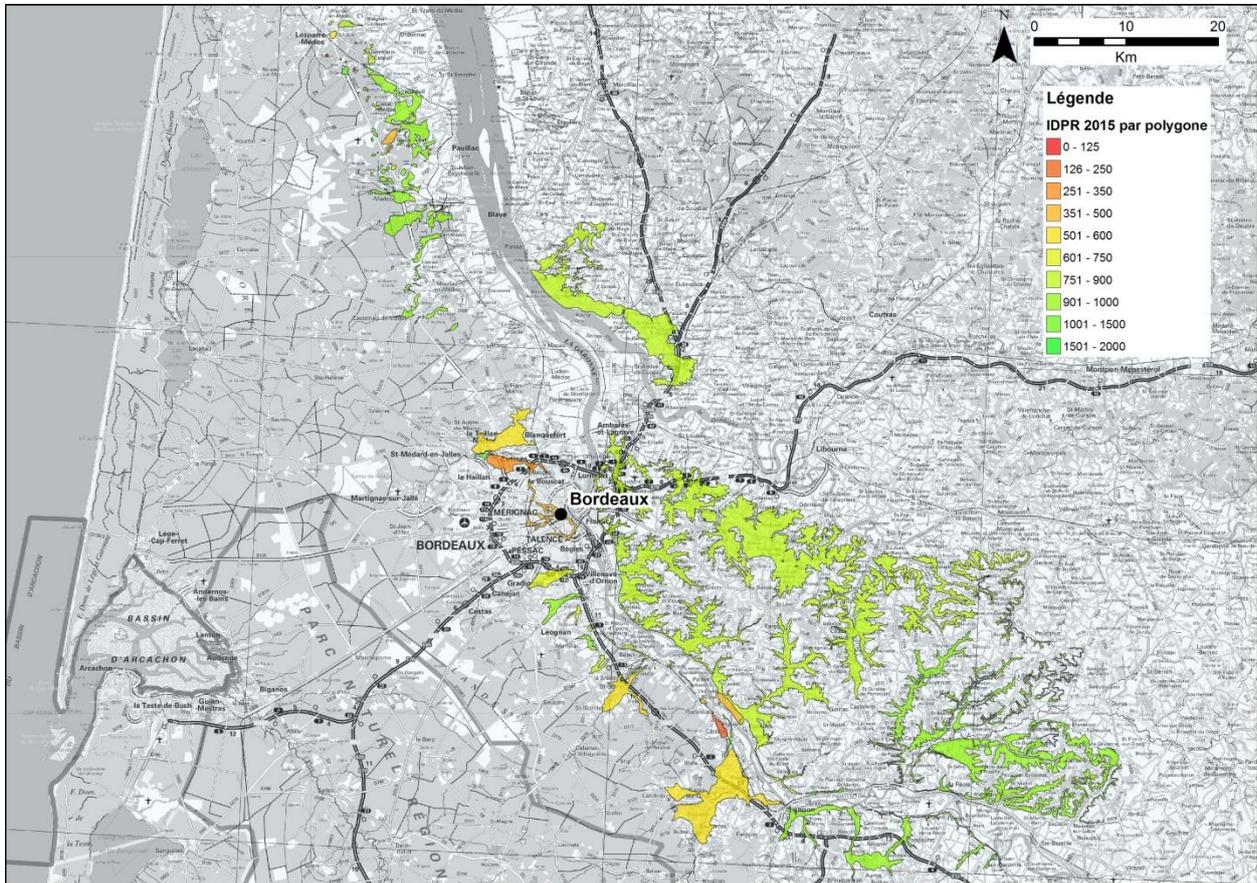


Illustration 30 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Oligocène (OLNP et OL2M)

Cette cartographie fait apparaître une certaine zonation des valeurs d'IDPR :

- la rive gauche de la Garonne, de Meilhan-sur-Garonne à Blanquefort, les affleurements couvrant une superficie de 101.4 km² et présentant un IDPR médian de 611 ;
- la rive gauche de la Garonne, de Castelnau-de-Médoc à Lesparre-Médoc, les affleurements couvrant une superficie de 44.2 km² et présentant un IDPR médian de 960 ;
- la rive droite de la Garonne, de Castelnau-sur-Gupie au nord de Marmande au Roque-de-Thau au sud de Blaye, les affleurements couvrant une superficie de 408.0 km² et présentant un IDPR médian de 1000.

L'IDPR médian de ces trois zones a été calculé en ne retenant que les polygones d'une superficie supérieure à 0.1 km².

De la même manière que pour le Langhien-Serravallien et l'Aquitainien, les affleurements de l'Oligocène sont majoritairement localisés dans les vallées et non sur les plateaux ce qui induit une valeur d'IDPR plus faible par rapport à l'environnement proche.

Éocène supérieur

L'illustration 31 présente la valeur de l'IDPR 2015 par polygone de l'Éocène supérieur.

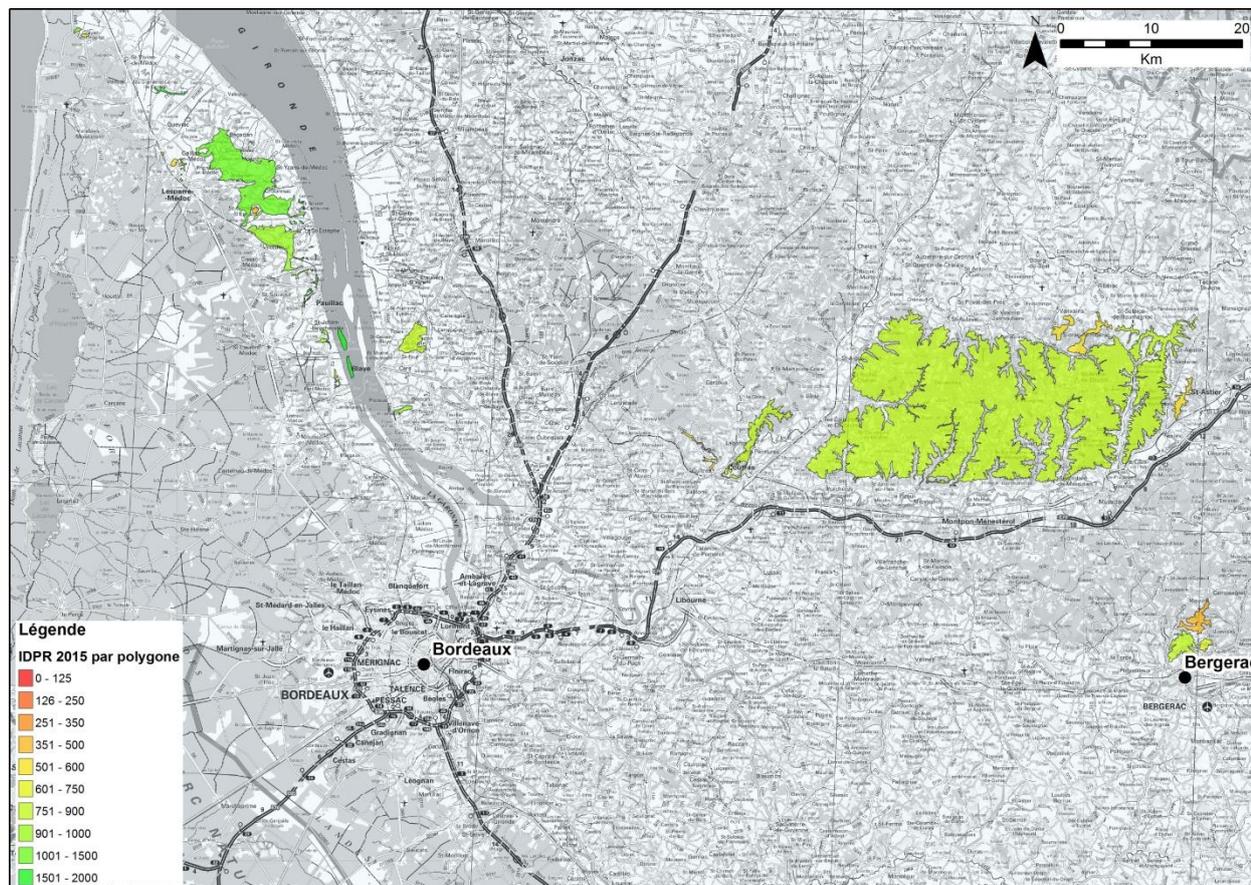


Illustration 31 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Éocène supérieur

Cette cartographie fait apparaître une certaine zonation des valeurs d'IDPR :

- au nord de Bergerac, les affleurements couvrant une superficie de 461.7 km² et présentant un IDPR médian de 689 ;
- en rive droite de la Garonne, entre l'Isle et la Dronne, les affleurements couvrant une superficie de 11.5 km² et présentant un IDPR médian de 794 ;
- en rive droite de la Garonne, à proximité de Blaye, les affleurements couvrant une superficie de 6.6 km² et présentant un IDPR médian de 850 ;
- en rive gauche de la Garonne, entre Fort-Médoc et Saint-Vivien-de-médoc, les affleurements couvrant une superficie de 57 km² et présentant un IDPR médian de 1000.

L'IDPR médian de ces zones a été calculé en ne retenant que les polygones d'une superficie supérieure à 0.1 km².

Éocène moyen

L'illustration 32 présente la valeur de l'IDPR 2015 par polygone de l'Éocène moyen.

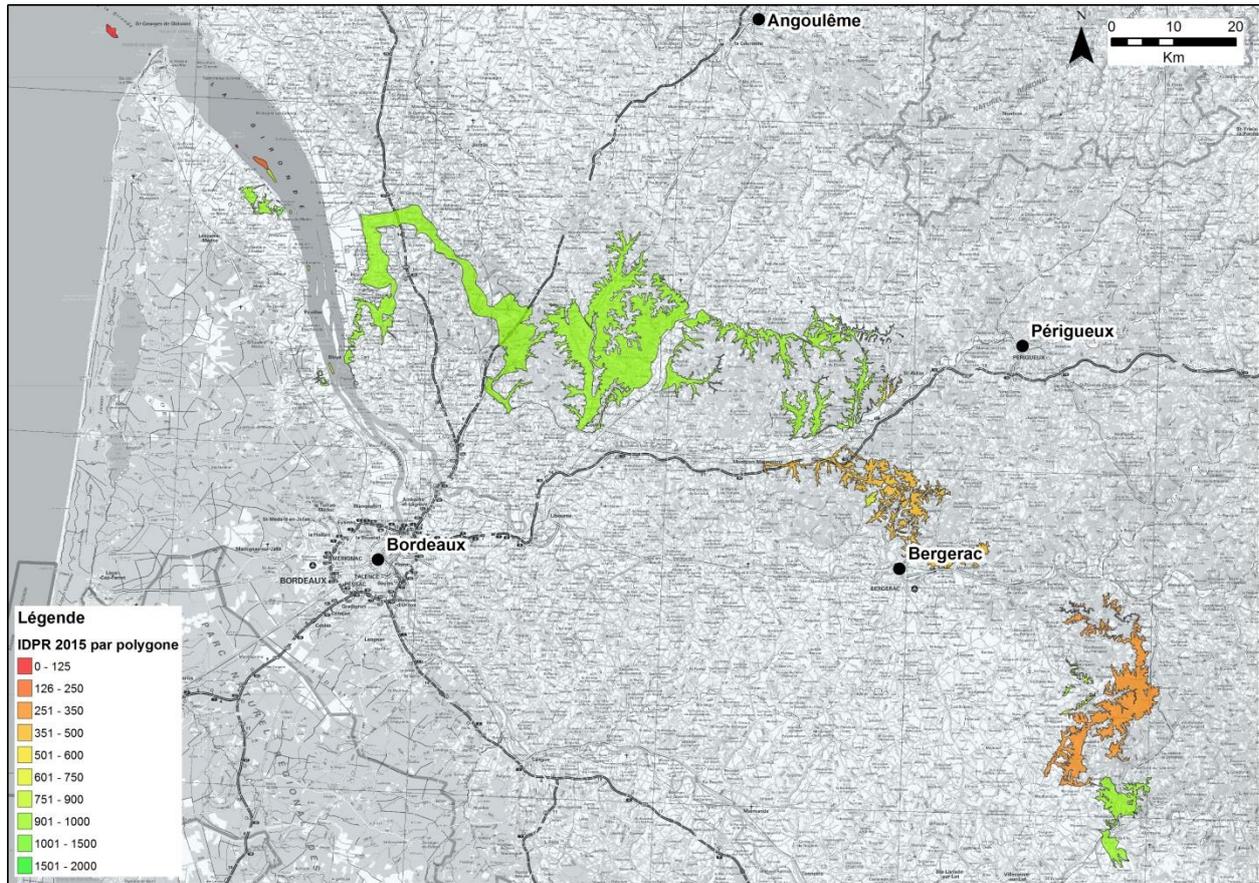


Illustration 32 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par polygone de l'Éocène moyen

Cette cartographie fait apparaître une zonation des valeurs d'IDPR :

- au nord et à l'ouest de l'Isle, jusqu'à l'embouchure de la Gironde, les affleurements couvrant une superficie de 578.6 km² et présentant un IDPR médian de 905 ;
- entre l'Isle et la Dordogne, au nord de Bergerac, les affleurements couvrant une superficie de 94.5 km² et présentant un IDPR médian de 428 ;
- entre la Dordogne et le Lot, au nord de Fumel, les affleurements couvrant une superficie de 133.1 km² et présentant un IDPR médian de 315 ;
- entre la Dordogne et le Lot, au sud de Fumel, les affleurements couvrant une superficie de 39.6 km² et présentant un IDPR médian de 908.

L'IDPR médian de ces zones a été calculé en ne retenant que les polygones d'une superficie supérieure à 0.1 km².

Éocène inférieur

L'Éocène inférieur affleure très majoritairement sur un secteur spécifique en rive droite de la Garonne, au Nord-Est de Blaye, entre Mirambeau et Bussac-Forêt. L'illustration 33 en précise la localisation et présente la valeur médiane de l'IDPR 2015 pour cette zone (1000). Les autres zones d'affleurement de l'Éocène inférieur, d'une superficie cumulée de 1.2 km², demeurent dispersées et insuffisamment étendues pour présenter un comportement caractéristique identifiable à l'aide de l'IDPR.

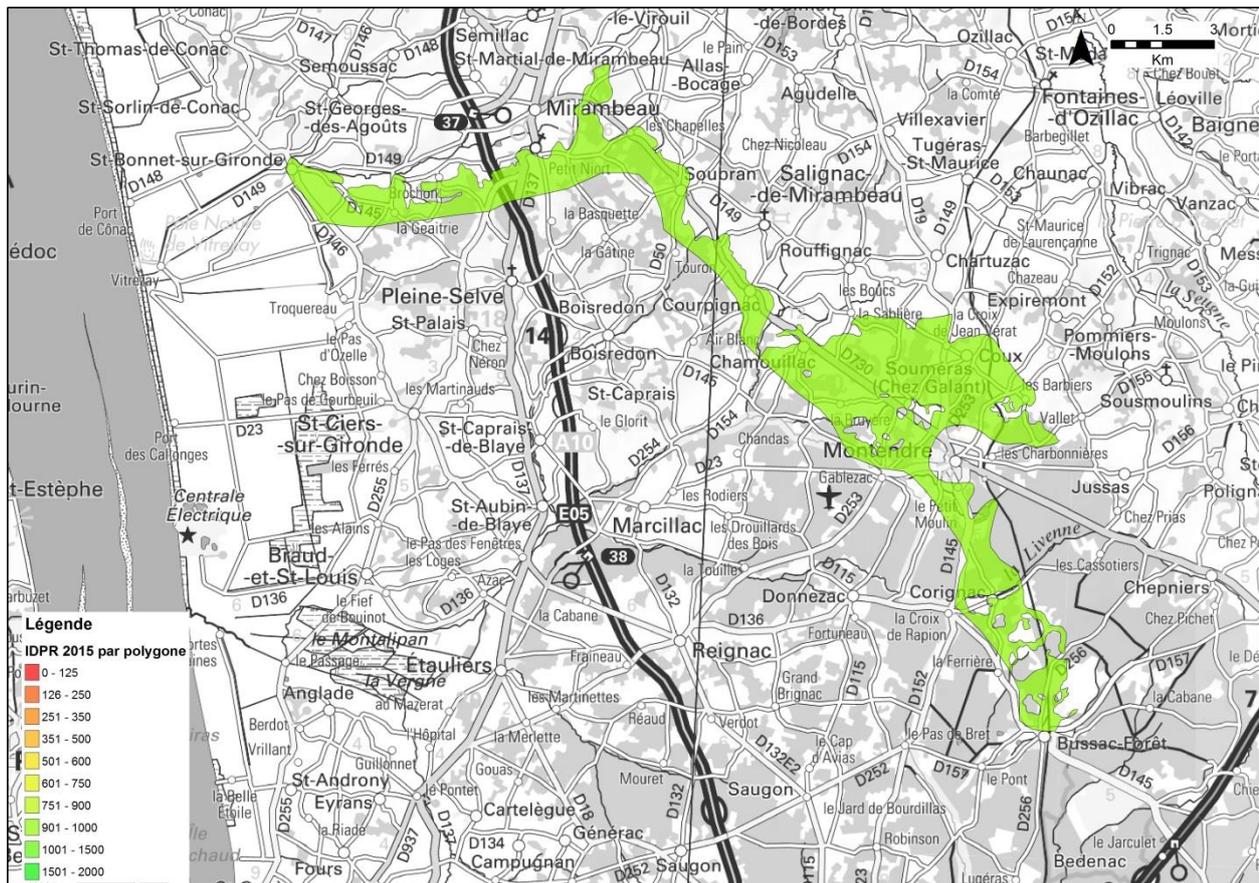


Illustration 33 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée pour la zone principale d'affleurement de l'Éocène inférieur

L'éponte située au toit du Campanien

L'éponte située au toit du Campanien affleure sur près de 1400 km² de façon discontinue de l'Est de Cahors au Sud de Saintes. L'illustration 34 en précise la localisation et présente la valeur médiane de l'IDPR 2015 pour les polygones constituant cette formation.

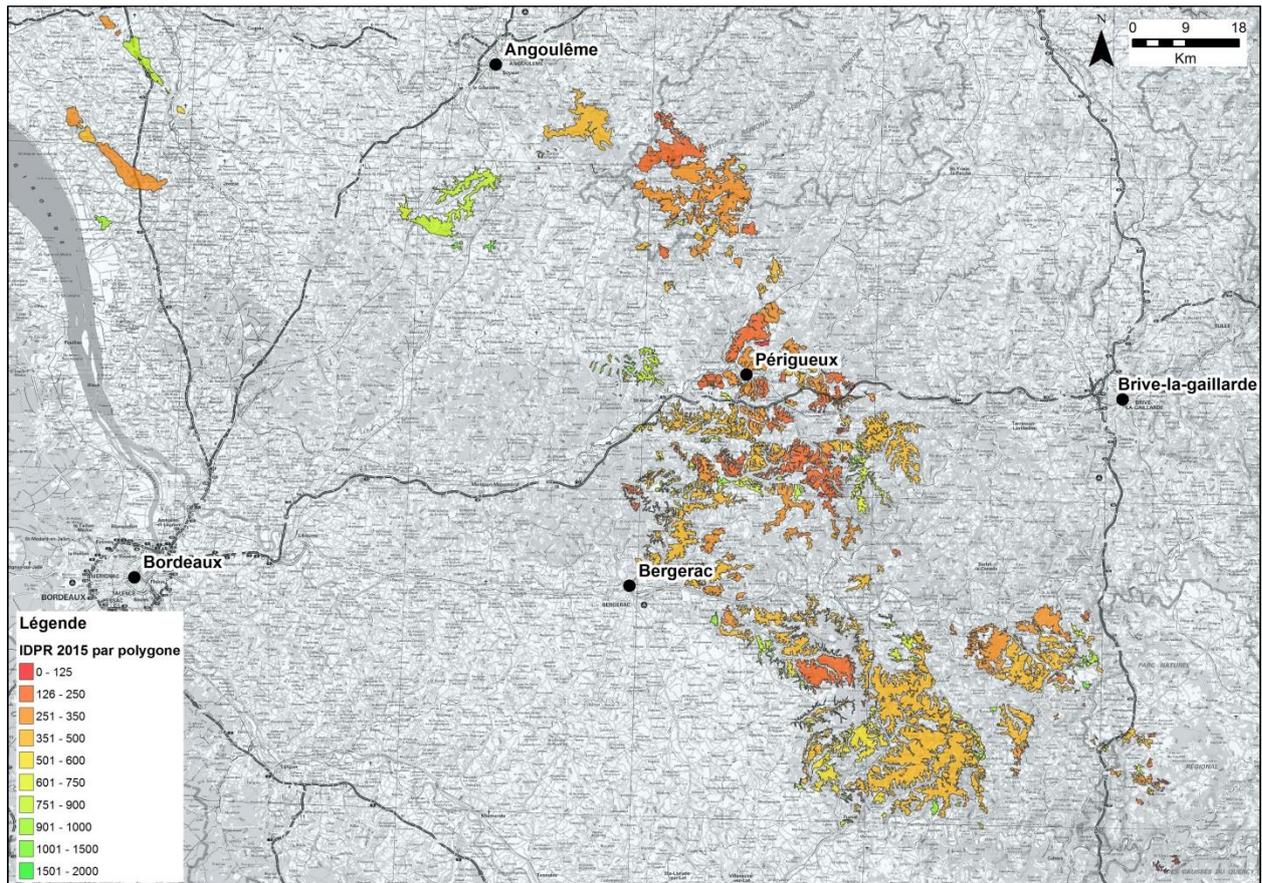


Illustration 34 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée pour la zone principale d'affleurement de l'éponte située au toit du Campanien

- **À l'échelle des entités hydrogéologique du Modèle Nord Aquitain**

A titre de test, le même calcul a été effectué non pas par polygone mais à l'échelle des 35 entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement. La valeur médiane des mailles d'IDPR calculée par entité hydrogéologique figure en illustration 35. Cette illustration fait apparaître sans surprise un degré de lissage des résultats plus important que dans le cas du calcul par polygone. Ainsi, les zones d'infiltration préférentielle identifiée au nord de Mont-de-Marsan et à l'ouest d'Agen disparaissent sur cette représentation, faute d'une différenciation à l'échelle suprarégionale de ces entités d'extension limitée. La gamme des valeurs médianes d'IDPR est également réduite puisque l'on passe d'un spectre balayant l'ensemble des valeurs possibles de l'IDPR (0 à 2000) à des valeurs comprises entre 42 et 1024. La discrimination d'un territoire à un autre en est donc réduite.

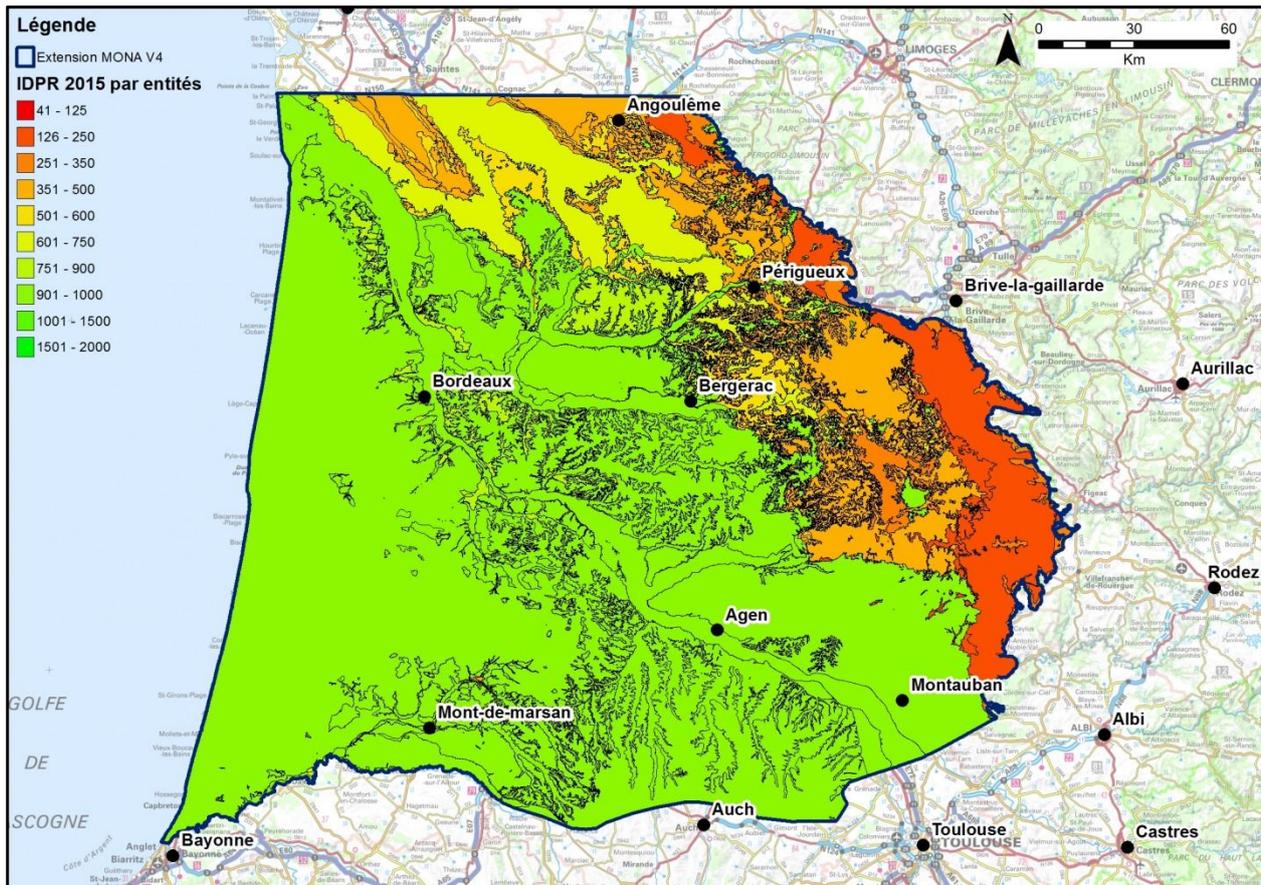


Illustration 35 - Valeur médiane de l'IDPR 2015 calculée par entité hydrogéologique

Par contre, cette représentation par entité hydrogéologique permet de tenter de dégager des comportements globaux à leur échelle, sous réserve que leurs surfaces d'affleurement soient suffisamment conséquentes et continues pour avoir un impact sur l'organisation des réseaux hydrographiques (et donc pouvoir être détectées via l'IDPR). Ces deux contraintes ont été prises en compte en :

- considérant qu'une superficie d'affleurement minimale de 5 km² était nécessaire pour pouvoir conduire cette analyse. (Ceci a conduit à faire sortir de l'analyse 5 entités hydrogéologiques (EPLI, EPTI, EPTR, LIAS, SIM). Notons que la formation dont la présence à l'affleurement est la plus faible hormis les cinq entités suscitées occupe une superficie de 28.5 km², ce qui relève implicitement le seuil de coupure.
- en vérifiant qu'il existe au moins une superficie continue d'affleurement d'au minimum 5 km² pour chacune des 29 entités hydrogéologiques conservées pour la suite de l'analyse.

Les valeurs médianes obtenues sont présentées au tableau 17 (IDPR 2015 et IDPR 2007) et classées par entités hydrogéologiques. Cette classification met en évidence un certain échelonnement des valeurs d'IDPR 2015 (une constatation similaire mais moins marquée est observée avec les valeurs d'IDPR 2007) : la gamme des valeurs rencontrées dans le Jurassique s'étend ainsi de 143 à 497, tandis qu'elle est de 412 à 642 dans le Crétacé et de 834 à 1000 dans le Tertiaire si l'on excepte l'éponte située au sommet du Campanien (EPCA, IDPR médian de 359). Cette constatation met en avant l'existence d'une faible discrimination des épentes, non justifiable par les surfaces d'affleurements de celles-ci, hormis pour celle située au sommet du Turonien EPTU (28.5 km²). Notons que l'éponte située au toit du Campanien est peu épaisse et potentiellement assez perméable, ne serait-ce qu'au voisinage des zones d'affleurement. On observe par exemple un transfert de pression entre l'Eocène et le

Campanien sous Bordeaux, l'essentiel des prélèvements se faisant dans l'Eocène mais une baisse de la piézométrie étant aussi observée dans le Campanien. La faible valeur de l'IDPR pour l'EPCA paraît donc plausible.

Période	Formation	Superficie (km ²)	MEDIAN2015	MEDIAN2007
Tertiaire	RECO	1 387.1	1000	1052
	QUAT	14 376.1	1000	1000
	EPHE	1 578.8	929	1000
	HELV	40.8	983	1000
	EPAQ	3 517.8	997	1037
	AQUI	298.0	914	1000
	EPCM	6 760.3	996	1018
	OLNP	154.2	834	1000
	OL2M	404.4	896	1000
	EPOL	2 755.7	952	1000
	EOCS	535.8	872	1024
	EPES	926.3	991	1043
	EOCM	838.4	903	1000
	EPEO	66.7	968	1002
	EOCI	50.5	1000	1010
	EPCA	1 389.3	359	659
Crétacé	CAMP	1 093.7	580	852
	EPCS	3 088.6	641	887
	COST	1 756.8	407	704
	EPTU	28.5	466	798
	TURO	567.9	440	673
	EPCE	362.2	511	685
	CENO	313.2	412	545
Jurassique	TITH	372.8	326	574
	EPKI	850.2	491	657
	KIMM	332.7	183	234
	EPCX	348.6	497	746
	BACX	2 557.9	143	263
	BAJO	581.5	304	519

Tableau 17 - Valeurs médianes de l'IDPR par entité hydrogéologique présente à l'affleurement

Données pédologiques

Les cartes pédologiques fournissent des informations sur le type d'horizon rencontrés, leurs épaisseurs et la texture des sols rencontrés. Ces données peuvent servir à estimer la réserve utile (RU) des sols (Bruand et al., 2004).

La Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1 000 000 permet d'avoir une distribution spatiale de la distribution de la RU à l'échelle nationale. Cependant, la finesse de représentation n'est pas assez précise à l'échelle régionale. Par ailleurs, l'évaluation de la RU pour cette carte s'est appuyée sur peu de données d'observations.

Un programme de cartographie au 1/250 000 est actuellement en cours d'élaboration (programme IGCS). Les cartes sont réalisées département par département avec pour objectif de finaliser une carte à l'échelle de la France à l'horizon 2019-2020. Ces cartes sont beaucoup plus précises et s'appuient sur de nombreuses observations de terrain. Elles sont donc plus fiables pour déterminer une spatialisation de la RU.

La région Poitou-Charentes a été une région pilote pour la réalisation de ces cartes au 1/250 000.

En Aquitaine, les cartes départementales ne sont pas toutes disponibles. Les cartes des départements des Landes, de Gironde ont été finalisées mais les cartes du Lot-et Garonne, de Dordogne et des Pyrénées-Atlantiques sont encore en cours d'élaboration.

Étant donné la disparité des données à l'échelle du modèle nord aquitain, l'analyse de ces données n'a pas été entreprise dans le cadre de ce rapport. Ce travail pourra être réalisé une fois l'ensemble des cartes finalisées à l'échelle du MONA (fin 2016-début 2017)

3.3.3. Modélisations GARDENIA

Utilisation du logiciel GARDENIA

GARDÉNIA est un modèle global conceptuel qui permet de réaliser le bilan hydrologique de bassins versants à partir de chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP), représentatives. Une fois calé sur les observations disponibles, le modèle peut permettre de simuler l'évolution du débit à l'exutoire et/ou du niveau piézométrique en un point de la nappe en lien avec le cours d'eau pour différentes données de pluie et ETP choisies par le modélisateur. Le fonctionnement du logiciel est décrit de façon plus détaillée en annexe 8.

Dans cette étude, c'est avant tout la capacité du logiciel à proposer une décomposition du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant qui est utilisée. L'écoulement de l'eau dans le bassin versant est ainsi réparti entre ruissellement et infiltration à l'aide de paramètres spécifiques (les paramètres de calage).

Il est important de noter que l'objectif classique d'un modèle global n'est pas de fournir un jeu de paramètres réalistes, mais de se caler au mieux sur une chronique (aussi longue que possible) pour réaliser des prévisions de niveaux ou de débits. Il peut ainsi très bien arriver que le jeu de paramètres obtenus après calage ne soit pas du tout « physique »², ce qui n'empêchera pas nécessairement la prévision d'être très bonne mais rendant impossible son utilisation pour une interprétation physique des paramètres de calage.

Il convient par ailleurs de rappeler que la modélisation globale ne fournit pas une décomposition unique de l'hydrogramme d'un cours d'eau mais plusieurs solutions parmi lesquelles le modélisateur choisit celle qu'il retient comme étant la plus pertinente pour sa problématique. Ce choix induit nécessairement une certaine variabilité dans les paramètres issus du travail de modélisation.

Dans le cadre de cette étude, il a été choisi d'effectuer les calages non pas en optimisant un critère numérique de calage (Nash) mais en recherchant le meilleur calage (Nash élevé) susceptible de proposer – au travers de la valeur des paramètres de calage – un comportement

² Dans le sens où les valeurs obtenues permettent de donner un sens physique cohérent au comportement hydrodynamique du système.

hydrodynamique « cohérent ». Des éléments de contrôle complémentaires des résultats obtenus sont décrits dans la partie « résultats » de ce chapitre.

Bassins versants modélisés et données associées

Les bassins versants sélectionnés pour le calcul de la recharge ont été choisis en fonction de leur capacité à représenter le comportement d'une entité hydrogéologique vis-à-vis de ce phénomène (cf. Tableau 18). L'objectif premier a été de travailler sur des bassins versants aussi homogènes que possible en terme de géologie et pour lesquels une chronique de débit assez longue est disponible.

Au total, quinze bassins versants ont ainsi été sélectionnés : **La Borrèze** à Lachapelle-Auzac [Lamothe], **Le Girou** à Cénevières, **La Charreau** à Voueil-et-Giget [Pont Neuf], **La Masse** de Prayssas à Frégimont, **L'Ourajoux** à Salviac [Lafuste], **L'Isaute** à Monlezun-d'Armagnac, **La Petite Leyre** à Belhade, **Le Moron** à Saint-Christoly-de-Blaye, **L'Eyraud** à la Force [Bitarel], **Le Magescq** à Magescq, **Le Canteloup** à Saint-Paul-en-Born [Talucat], **Le Pest** à Laréole [Cologne], **Le Né** [total] à Salles-d'Angles [Les Perceptiers], **La Lède** à Casseneuil, **La Beune** à Tamniès [Moulin du Maillet]. La localisation des bassins versants et des stations hydrologiques correspondantes est présentée en Illustration 36 (on pourra se reporter au Tableau 18 pour trouver la correspondance entre le code d'identification des stations et la dénomination de celles-ci).

Dans le cas du bassin versant de la Beune, on notera cependant que la chronique est particulièrement courte (2010-2014). Il a cependant fait l'objet d'une modélisation compte tenu de sa très forte homogénéité - l'aquifère du Coniacien-Santonien occupant la totalité de la superficie à l'affleurement - et de l'absence d'un autre bassin versant présentant une telle homogénéité pour cette formation.

Station HYDRO	GRIDCODE	Nom Station	Période QJO	Superficie (km ²)	Lame Eau (mm)	Entité hydrogéologique ciblée
O2825010	492578	Le Pest à Laréole [Cologne]	1970 - 2006	20	112	EPAQ (100%)
O6445010	452004	La Masse de Prayssas à Frégimont	1978 - 2014	57	162	EPCM (100%)
O8190630	553514	Le Girou à Cénevières	2005 - 2014	23	-	DOGGER (100%)
O8584010	464421	La Lède à Casseneuil	1970 - 2014	411	172	EPOL (61%)
P2315020	531662	La Borrèze à Lachapelle-Auzac [Lamothe]	2003 - 2014	122	412	BACX (80.2%)
P2454310	517502	L'Ourajoux à Salviac [Lafuste]	1990 - 2014	126	274	TITH (60%) - RECO (21%) - EPCA (16%)
P4254010	505031	La Beune à Tamniès [Moulin du Maillet]	2010 - 2014	55	-	COST (100%)
P5404010	444310	L'Eyraud à la Force [Bitarel]	1966 - 2010	74	216	EPOL (73%) - EOCM (15%)
P9414010	378514	Le Moron à Saint-Christoly-de-Blaye	1972 - 1989	31	293	EPES (93.4%)
Q2094310	399583	L'Isaute à Monlezun-d'Armagnac	1970 - 2006	111	240	EPHE (75%) - EPAQ (25%)
R3010010	428828	La Charreau à Voueil-et-Giget [Pont Neuf]	2008 - 2014	49	-	CONIACIEN - TURONIEN (69.7%)
R4122523	390150	Le Né [total] à Salles-d'Angles [Les Perceptiers]	2000 - 2014	602	246	EPCS (77.8%) - CAMP (14.4%)
S2134010	358901	La Petite Leyre à Belhade	1995 - 2014	403	264	QUAT (99.4%)
S3214010	321185	Le Canteloup à Saint-Paul-en-Born [Talucat]	1991 - 2014	155	451	QUAT (100%)
S4214010	313020	Le Magescq à Magescq	1970 - 2014	60	561	QUAT (100%)

Tableau 18 - Entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement dans les bassins versants modélisés

Il apparaît d'ores et déjà à la lecture du tableau 18 et par comparaison à l'annexe 7 (liste des entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement) que seules 10 des entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement pourront être directement caractérisées par cette approche en comparaison des 30 entités représentées dans le modèle. Des plus anciennes aux plus récentes, il s'agit des entités codées BAJO, BACX, TITH, TURO, COST, EPES, EPOL, EPCM, EPAQ et QUAT. Il sera donc nécessaire de finaliser la caractérisation des paramètres par une approche par analogie ou classement relatif des entités hydrogéologiques.

Démarche de Calage

- **Généralités**

À l'issue du calage, le modèle fournit :

- les différentes composantes de l'écoulement (évapotranspiration réelle, infiltration, écoulement rapide...);
- une représentation graphique permettant de comparer observations et simulations ;
- des critères numériques d'évaluation globale de la qualité de l'ajustement, dont notamment le critère de Nash qui est utilisé par la suite.

La qualité du calage et son évolution sont appréciées visuellement par superposition des chroniques mesurées et calculées de niveau piézométrique et de débit, ainsi que par des critères numériques globaux. À l'issue du calage, on peut considérer que l'on dispose d'un jeu de paramètres représentatifs du bassin versant et donc utilisables dans le cadre de la présente étude, sous réserve que les valeurs des paramètres soient hydrologiquement réalistes.

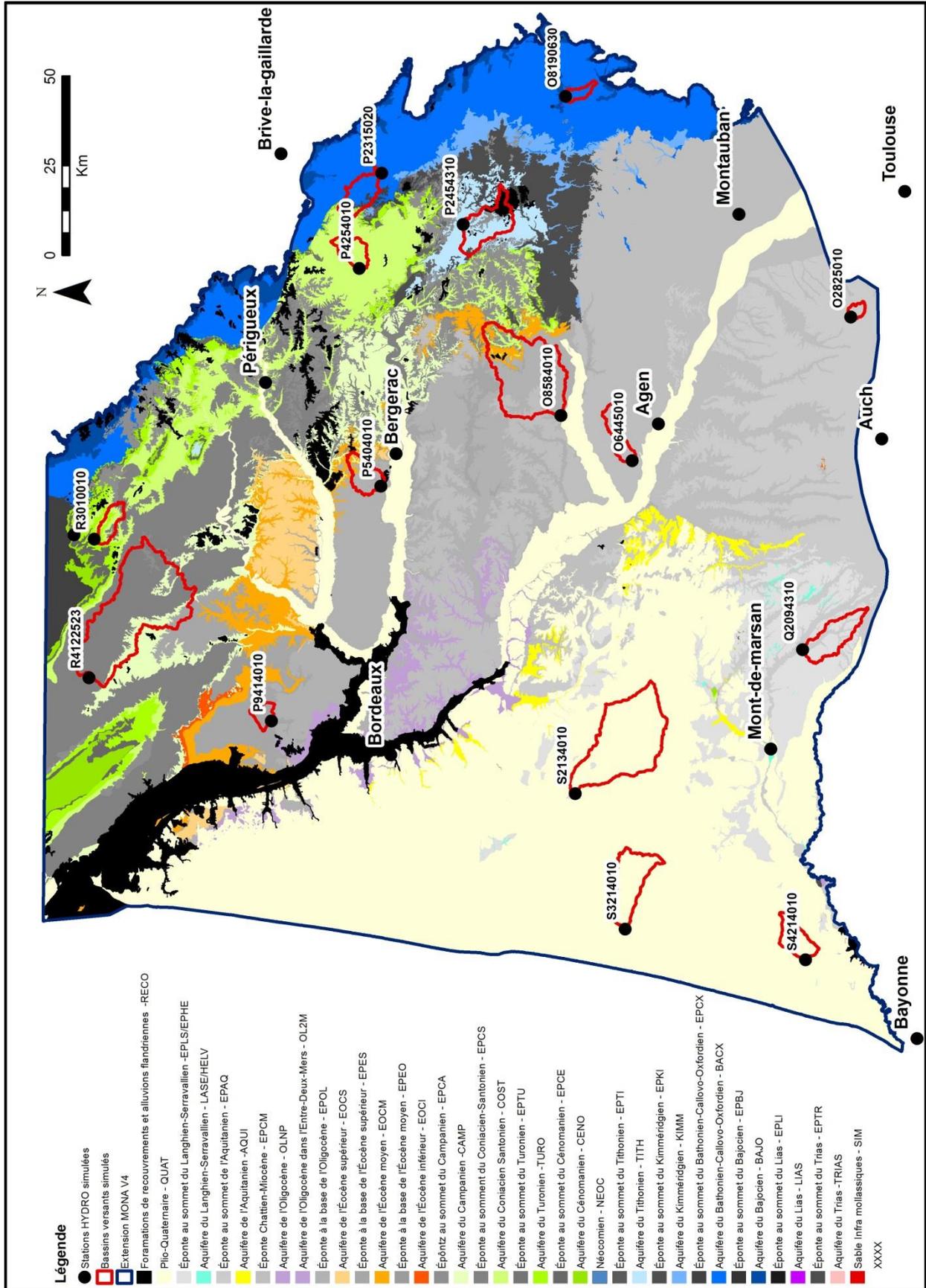


Illustration 36 - Principales entités géologiques affleurantes et tracé des bassins versants sélectionnés

- **Paramètres hydrologiques du modèle**

On pourra se reporter à l'annexe 8 pour une description des équations utilisées dans le logiciel. Les paramètres hydrologiques du modèle sont au nombre de huit.

Quatre paramètres dimensionnels caractérisent les différents réservoirs :

- la capacité de rétention du sol (mm), ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » (1) ;
- le RUIPER (mm) correspondant à la hauteur d'eau dans le réservoir représentant la Zone Non Saturée (ZNS) pour laquelle il y a égale répartition entre écoulement rapide ou ruissellement (RUI) et la percolation (PER) (2) ;
- le temps de demi-percolation du réservoir représentant la ZNS (exprimé en mois) (3) ;
- le temps de demi-décroissance du réservoir souterrain (exprimé en mois) (4).

La « capacité de rétention du sol » ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » (RDE) sert à générer la pluie efficace à partir d'une pluie et d'une ETP données. La pluie efficace simulée par le modèle dépend à la fois de la capacité de stockage du sol et des chroniques météorologiques utilisées. Les valeurs attribuées dans le modèle à la réserve disponible pour l'évapotranspiration à l'issue du calage ne sauraient donc être comparées directement à des données relatives au sol (RU). Notons par ailleurs que le paramètre représentant la RDE peut être pris en compte sous une forme qui permet la génération de pluie efficace (paramètre RUMAXPROG de GARDENIA), y compris lorsque la réserve disponible pour l'évapotranspiration n'est pas totalement saturée en eau. Dans ce cas, les valeurs obtenues pour le RUMAXPROG sont généralement supérieures à celles qui seraient obtenues en utilisant le RUMAX.

Deux coefficients correctifs permettent d'ajuster si nécessaire les chroniques de pluie (5) et d'ETP (6) prises en compte pour la modélisation. Ces coefficients sont globaux, c'est-à-dire qu'ils portent sur l'ensemble de la chronique considérée. L'un porte sur la pluviométrie, l'autre sur l'ETP.

Enfin, deux autres paramètres peuvent être ajustés lors du calage d'un modèle lorsque celui-ci prend en compte un niveau piézométrique :

- le coefficient d'emmagasinement « équivalent » (7) ;
- le niveau de base local (8).

Il est à noter que seuls les trois premiers paramètres dimensionnels des modèles GARDENIA sont transférés au modèle maillé réalisé avec le logiciel MARTHE : « capacité de rétention du sol », hauteur d'équi-répartition (RUIPER) et temps de demi-percolation du réservoir ZNS.

- **Données d'entrée et données de calage**

Les données d'entrée sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. Les données de calage sont de deux types : niveaux piézométriques et données de débit. Les données utilisées pour la modélisation sont présentées au chapitre 3.3.2.

Toutes les modélisations ont été effectuées au pas de temps journalier.

La période de calage dépend de la longueur de la chronique de débit sur le bassin versant, les données climatiques couvrant une période de plus de 50 ans (1958-2014). Pour la plupart des bassins versants, elle couvre une durée de plus de 20 ans, ce qui permet de disposer de

contextes climatiques variables pour le calage, mais on retiendra pour mémoire qu'elles ne couvrent pas toutes les mêmes années, ce qui pourrait le cas échéant influencer les résultats (cf. analyse des données climatiques page 45). Elles s'échelonnent entre 1966 et 2014 (cf. Tableau 18).

L'illustration 37 et le tableau 19 synthétisent les données d'entrée et de calage retenues pour les différents modèles.

Une seule maille de la grille SAFRAN a été retenue au final par bassin versant, bien que des tests aient pu être effectués avec les chroniques de pluie et ETP correspondant à une autre maille. En particulier, lorsque le bassin versant comportait plusieurs mailles SAFRAN, il a été choisi de ne pas constituer une chronique de pluie à partir d'une pondération des différentes chroniques disponibles mais de conserver une chronique de pluie représentative d'une altitude moyenne dans le bassin versant. Ce choix permet de limiter les effets de lissage des pluies les plus intenses (orages) mais conduira nécessairement à un réajustement des paramètres lors de la phase de calage sous MARTHE : les pluies appliquées pour ces bassins versants dans le logiciel maillé différencieront de celles utilisées dans GARDENIA.

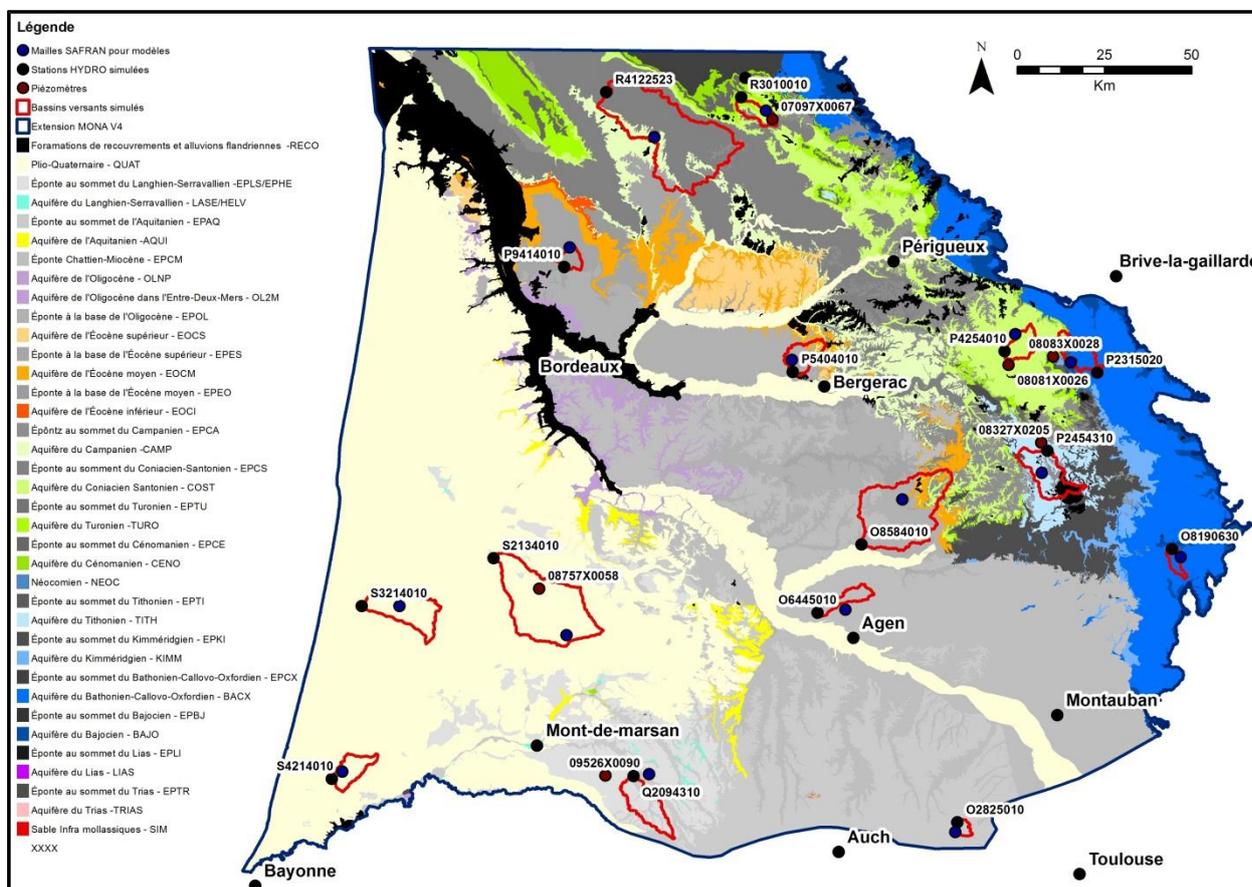


Illustration 37 - Données d'entrée et de calage des modèles GARDENIA

Station HYDRO	Nom station HYDRO	XL2E SAFRAN	YL2E SAFRAN	Formation	Piézomètre
O2825010	Le Pest à Laréole [Cologne]	492 000	1 857 000	EPAQ (100%)	-
O6445010	La Masse de Prayssas à Frégimont	460 000	1 921 000	EPCM (100%)	-
O8190630	Le Girou à Cénevières	556 000	1 937 000	DOGGER (100%)	-
O8584010	La Lède à Casseneuil	476 000	1 953 000	EPOL (61%) EOC et COST à l'amont	-
P2315020	La Borrèze à Lachapelle-Auzac [Lamothe]	524 000	1 993 000	BACX (80.2%)	08083X0028 Bathonien
P2454310	L'Ourajoux à Salviac [Lafuste]	516 000	1 961 000	TITH (60%) - RECO (21%) - EPCA (16%)	08327X0205 Tithonien
P4254010	La Beune à Tamniès [Moulin du Maillet]	508 000	2 001 000	COST (100%)	08081X0026 Coniacien
P5404010	L'Eyraud à la Force [Bitarel]	444 000	1 993 000	EPOL (73%) - EOCM (15%)	-
P9414010	Le Moron à Saint-Christoly-de-Blaye	380 000	2 025 000	EPES (93.4%)	-
Q2094310	L'izaute à Monlezun-d'Armagnac	404 000	1 873 000	EPHE (75%) - EPAQ (25%)	09526X0090 Serravalien
R3010010	La Charreau à Voeuil-et-Giget [Pont Neuf]	436 000	2 065 000	CONIACIEN - TURONIEN (69.7%)	07097X0067 Turonien
R4122523	Le Né [total] à Salles-d'Angles [Les Perceptie]	404 000	2 057 000	EPES (77.8%) - CAMP (14.4%)	-
S2134010	La Petite Leyre à Belhade	380 000	1 913 000	QUAT (99.4%)	08757X058 Aquitanien
S3214010	Le Canteloup à Saint-Paul-en-Born [Talucat]	332 000	1 921 000	QUAT (100%)	-
S4214010	Le Magescq à Magescq	316 000	1 873 000	QUAT (100%)	-

Tableau 19 - Bassins versants ayant fait l'objet de modélisations GARDENIA et données associées

Dans le bassin versant de la petite Leyre, le piézomètre de Callen, suivi par le Conseil Départemental des Landes (08757X0058) au rythme de deux mesures par an, n'a pas été retenu compte tenu du faible nombre de mesures et du fait qu'il capte l'aquifère de l'Aquitainien.

Résultats des modélisations

Les calages réalisés sur les différents bassins sont dans l'ensemble de bonne qualité, avec un coefficient de Nash égal à 0.76 en moyenne. Ils s'échelonnent entre 0.62 et 0.91.

Les graphiques de calage et le tableau détaillé présentant les résultats obtenus par modèle figurent en annexe 9 et annexe 10.

La **pluie efficace simulée** a été contrôlée en confrontant le module du débit simulé au module du débit observé à la station hydrométrique. L'écart entre le module simulé et le module observé est inférieur à 5% pour l'ensemble des bassins versants, soit bien inférieur à la précision de la mesure du débit, à l'exception de trois cas suivants :

- le Girou à Cénevières (écart de 45,1%). Ce bassin versant est entièrement constitué à l'affleurement par les formations calcaires du Bathonien et du Bajocien. En maintenant la superficie connue du bassin versant de surface (22.6 km²), il n'a pas été possible d'obtenir un meilleur ajustement et une meilleure représentation de la chronique de débit, en respectant tout à la fois un débit d'étiage faible et des pics de débit importants en hiver. On notera que l'ajustement obtenu présente un coefficient de Nash de 0.62. Un tel écart sur le module du débit est trop important pour que la décomposition obtenue puisse être considérée comme correcte.

Ainsi, et compte tenu du caractère karstique du bassin versant, un test de modélisation a été effectué en laissant la possibilité au logiciel de modifier la superficie de ce dernier (ce qui sous-entend que l'on suppose que le bassin versant souterrain est sensiblement différent du bassin versant de surface). Avec une superficie de 41.9 km², soit un accroissement de 85% de la surface du bassin versant topographique, on obtient un calage bien meilleur (Nash de 0.75), pour lequel l'écart de module est réduit à 11% (voire plus faible encore pour une superficie légèrement supérieure – 44 km² environ). L'hypothèse d'un bassin versant souterrain particulièrement plus étendu que le bassin versant de surface ne pouvant être écartée *a priori*, ce résultat de calage est conservé, d'autant plus qu'il traduit une prédominance de l'infiltration cohérente avec les valeurs de l'IDPR sur ce secteur. Notons que la modélisation a été effectuée en considérant un réservoir à double seuil dont les vitesses de restitution de l'eau demeurent très rapides (temps de demi-décroissance de l'ordre de quelques jours). L'existence de ces écoulements, faute de pouvoir en identifier une origine souterraine, serait très facilement

attribuable à des écoulements de surface (la première simulation donnait un pourcentage d'écoulement souterrain de 41% uniquement). Notons enfin qu'il n'a pas été trouvé dans la littérature de résultats de traçages sur ce bassin versant mais le Trou-Madame, qui correspond à la source du Girou, est une émergence karstique connue des spéléologues ;

- la Lède à Casseneuil (écart de 14,2%). Bien que sensible, cet écart demeure en limite de la fourchette d'incertitude associée à la mesure des débits en rivière. On retiendra que la simulation surestime le débit moyen écoulé, ce qui suppose une pluie efficace potentiellement trop importante. Lors de la phase de calage du débit du cours d'eau dans le modèle maillé, il pourra donc être envisagé d'augmenter la valeur de la réserve disponible pour l'évapotranspiration. Compte tenu de la taille du bassin versant, la surestimation pourrait le cas échéant être due à l'utilisation d'une chronique de pluie surestimant la pluie moyenne sur celui-ci.
- le Pest à La Réole (écart de 10,7%). Cet écart demeure dans l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la mesure des débits : il a donc été considéré comme acceptable. Notons cependant que le coefficient de Nash est assez médiocre (0.62) malgré de nombreuses tentatives pour améliorer le calage. Le résultat est donc à prendre avec précaution. Notons également qu'une simulation complémentaire réalisée avec le logiciel TEMPO³ n'a pas permis d'obtenir un calage suffisamment bon pour que l'on puisse en déduire une interprétation du comportement hydrodynamique du bassin versant, qui reste donc à comprendre.

Lorsqu'une **chronique piézométrique** était disponible, une modélisation menée à la fois sur le niveau piézométrique et le débit a systématiquement été mise en œuvre. Une bonne corrélation entre ces deux données de calage n'existant pas dans tous les cas, l'utilisation de la chronique piézométrique n'a cependant pas toujours permis de mieux cerner la dynamique du cours d'eau. Dans ce cas, la modélisation retenue ne prend pas en compte du niveau piézométrique. Ce sont au final les bassins versants de l'Ourajoux, de l'Izaute, de la Borrèze et de la Beune qui comportent une modélisation avec calage débit et niveau dans le tableau des résultats présenté en annexe 9.

Les simulations effectuées comportent le cas échéant un **débit résiduel** sortant ou entrant dans le bassin versant et pris en compte pour optimiser le calage : ceci peut facilement être expliqué par l'existence d'écoulements souterrains non comptabilisés et se produisant :

- en nappe alluviale ;
- vers des nappes captives, en alimentation de celles-ci ;
- via des conduits karstiques vers ou depuis un autre bassin versant.

En règle générale, ces débits ne sont pas quantifiés et seuls des ordres de grandeur peuvent au mieux être estimés, sous réserve d'un minimum de connaissance sur le bassin versant (existence, dimensions et vitesses d'écoulements dans les conduits karstiques ; épaisseur et largeur des alluvions, homogénéité de ceux-ci, porosité efficace et vitesses d'écoulement dans les différentes lentilles qui les composent...).

Dans le processus de calage on s'attache à minimiser ce débit non expliqué, sauf à pouvoir lui en donner une justification physique. Dans la plupart des modèles réalisés, ce débit demeure faible, inférieur à un tiers du module observé (cf. Annexe 9). Deux bassins versants dépassent cependant ce seuil :

- la Beune à Tamniès, dont la courte chronique de débit (2010-2014) a été calée avec un débit sortant important, supérieur au module observé en sortie en surface de ce bassin

³ <http://www.brgm.fr/projet/tempo-outil-modelisation-gestion-hydrosystemes>

versant. Ce dernier est composé entièrement à l’affleurement de formations du Coniacien-Santonien (COST), caractérisé par un important développement de réseaux karstiques. Ces réseaux et leur alimentation via l’épikarst ont par exemple été étudiés lors de récents travaux (Lopez, 2009). Sans pouvoir être confirmée, l’hypothèse d’un débit sortant important reste donc plausible. Notons que seule la prise en compte de cette hypothèse a permis de restituer un calage cohérent, respectant notamment le module écoulé à la station de débit.

- l’Izaute à Monlezun d’Armagnac, dont la chronique a été calée avec un débit sortant représentant 36% du module du débit du bassin versant. Ce dernier est composé à l’affleurement de formations correspondant à l’éponte située au toit de l’Aquitain aquifère (EPAQ) et de celle située au sommet du Langhien-Serravallien. Nous ne disposons pas d’éléments permettant de confirmer l’hypothèse de ce débit sortant (310 l/s) mais il a été nécessaire d’intégrer ce facteur pour obtenir un calage correct (coefficient de Nash de 0.72). Le résultat obtenu après calage est donc à prendre avec précaution.

Les dix entités hydrogéologiques dominantes dans les bassins versants concernés par ces modélisations présentent des gammes de valeurs des paramètres (Réserve Disponible pour l’Évapotranspiration - RDE, RUIPER, temps de demi-percolation du réservoir représentant la ZNS - T1/2PERCO, cf. page 68) assez distinctes.

La **Réserve Disponible pour l’Évapotranspiration (RDE)** est ajustée lors de la phase de calage pour générer une pluie efficace qui soit en adéquation avec le module du débit du cours d’eau. Cet ajustement a été effectué en considérant la possibilité d’une génération de pluie efficace en l’absence d’une saturation complète de la RDE (paramètre RUMAXPROG de GARDENIA). Les valeurs obtenues s’échelonnent entre 141 et 646 mm (cf. Tableau 20). Plus de la moitié des valeurs obtenues est comprise entre 200 et 300 mm, ce qui constitue le cœur de l’échantillon des valeurs obtenues (espace interquartile).

Bassin	Code HYDRO	Géologie du Bassin Versant	Nash Q	RDE (mm)	T demi_perco (mois)
La Borrèze	P2315020	BACX (80.2%)	0.85	140.9	0.49
La Beune	P4254010	COST (100%)	0.91	163.1	2.33
Le Girou	O8190630	DOGGER (100%)	0.75	181.0	0.05
L’Izaute	Q2094310	EPHE (75%) + EPAQ (25%)	0.72	200.3	0.45
L’Ourajoux	P2454310	60% TITH, 20% épontes, 20% RECO	0.68	212.7	1.03
Le Né	R4122523	EPCS (77.8%) - CAMP (14.4%)	0.89	222.6	5.38
Le Pest	O2825010	EPAQ (100%)	0.62	232.3	4.57
L’Eyraud	P5404010	EPOL (73,5%), EPES (7%), EOC-INF (15%), CAMP (3%)	0.73	278.9	0.74
Le Moron	P9414010	EPES 93.4% + EPOL 6.6%	0.77	280.1	5.62
Le Magescq	S4214010	QUAT 100%	0.72	340.4	0.90
Le Canteloup	S3214010	QUAT 100%	0.87	290.1	2.67
La Petite Leyre	S2134010	QUAT 100%	0.89	294.6	1.40
La Garroueyre	S1215010	QUAT 100%	0.85	246.9	2.11
La Lède	O8584010	EPOL (61%) EOC et COST à l’amont	0.73	318.9	2.12
La Masse de Prayssas	O6445010	EPCM 100%	0.69	468.4	2.20
La Charreau	R3010010	CONIACIEN-TURONIEN (69.7%)	0.80	646.1	1.16

Tableau 20 - Valeurs de RDE et de temps de demi-percolation par bassin versant

Une spatialisation des valeurs obtenues ne fait pas apparaître de tendance globale (cf. Illustration 38). On observe cependant que :

- les quatre bassins versants situés les plus à l'Est et reposant sur des formations du Jurassique ou du Coniacien-Santonien (bassin versant de la Beune) ont une RDE faible comparativement aux autres valeurs obtenues (valeurs comprises entre 141 et 213 mm) ;
- les bassins versants situés dans le Plio-Quaternaire ont des valeurs assez voisines, comprises entre 290 et 340 mm, la valeur la plus élevée étant rencontrée dans le bassin versant du Magescq qui présente la pluviométrie la plus élevée (cf. Illustration 21). En complément, la modélisation effectuée sur la Garroueyre dans le cadre du projet PHONEME (Saltel, 2015) avait abouti à une valeur de 247 mm pour la RDE. Les quatre valeurs disponibles montrent une diminution du Sud vers le Nord de la RDE, que l'on constate être en cohérence avec la diminution de la pluviométrie vers le Nord ;
- la valeur extrêmement élevée pour la Charreau sort largement de la gamme de variation attendue pour ce paramètre. Cette valeur pourrait s'expliquer par les prélèvements existants dans le bassin versant, qui se font aussi bien en eaux souterraines qu'en eaux de surface, mais qui n'ont pas été intégrés dans la modélisation globale réalisée. L'impact des prélèvements a été simulé sur la période 2000-2008 à l'aide du modèle maillé Crétacé de Charentes (Douez et al., 2012). Cet impact a été évalué à environ 5 à 20 l/s durant les mois d'été pour les prélèvements effectués directement dans le cours d'eau et à 5 à 8 l/s pour les prélèvements en eaux souterraines. La forte valeur de RDE pourrait faciliter le calage, en compensant l'absence de prise en compte de ces prélèvements par une forte baisse de la pluie efficace.

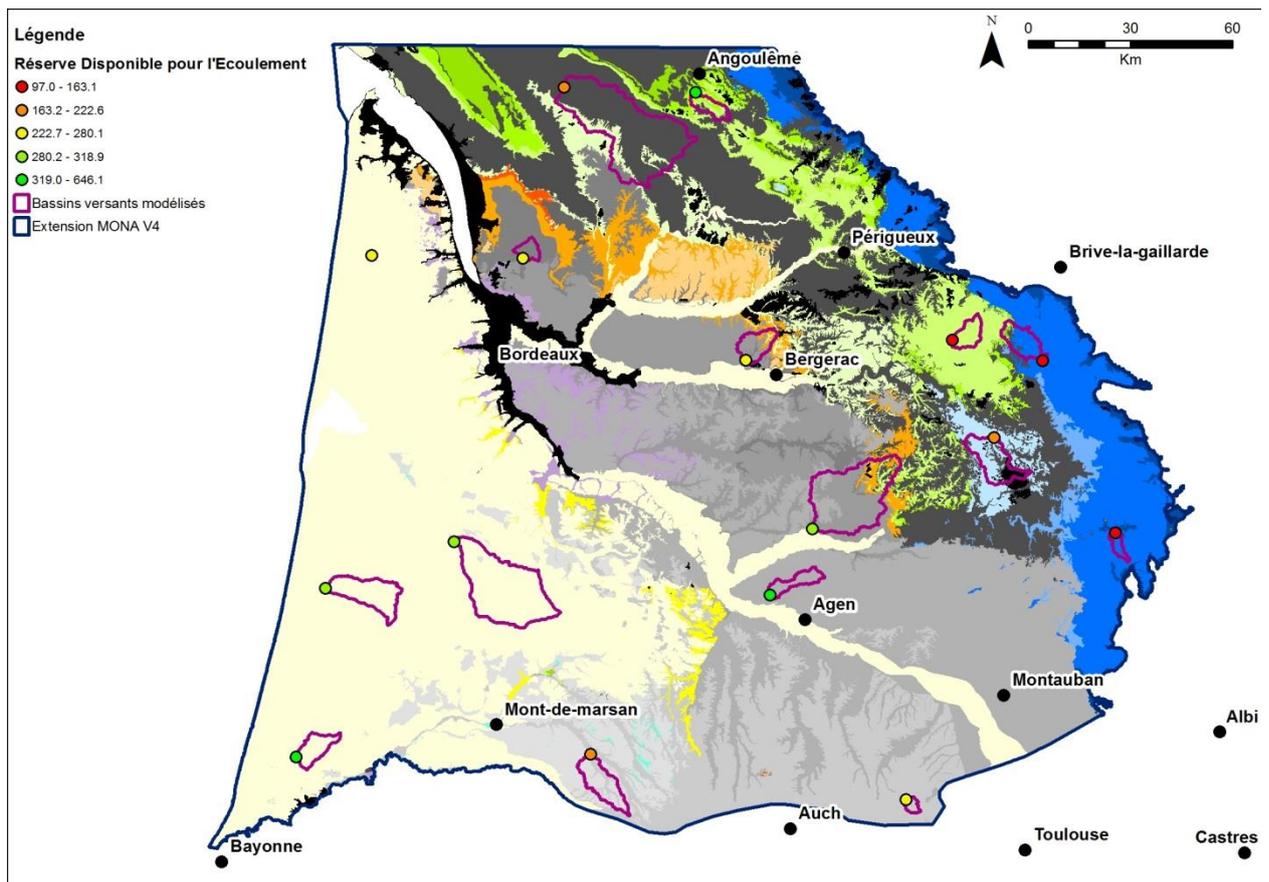


Illustration 38 - Vue, aux stations hydrométriques, des valeurs de RDE déduites des modélisations (fond : entités hydrogéologiques MONA V4)

Notons qu'aucune corrélation entre la valeur de RDE déduite des modélisations et les valeurs de Pluie ou de Pluie efficace correspondantes n'a été identifiée.

Le temps de demi-percolation varie entre 0.05 et 5.6 mois, ce qui traduit l'existence de circulations souterraine d'extrêmement rapides à relativement lentes. On note que ces temps sont très courts dans le Jurassique (de 0.05 à 1 mois), assez courts pour les aquifères du Crétacé (de 1.1 à 2.3 mois) et dans le Plio-Quaternaire (0.9 à 2.5 mois). Concernant les épentes, il est vraisemblable que la modélisation globale ne fournisse qu'une valeur très incertaine de ce temps de demi-percolation, le modèle étant globalement moins sensible aux paramètres uniquement liés aux écoulements souterrains compte tenu de leur plus faible contribution au débit du cours d'eau.

Le caractère plus ou moins infiltrant des formations affleurantes est géré dans le logiciel par la valeur de la **hauteur de répartition entre ruissellement et percolation** (coefficient RUIPER, cf. Illustration 39). Le bassin versant du Girou (Bathonien et Bajocien aquifères), celui du Magescq (Plio-Quaternaire), de la Beune (Coniacien-Santonien) et de la Petite Leyre (Plio-Quaternaire), puis la Borrèze sont par ordre décroissant les bassins versants apparaissant comme les plus infiltrant sur la base de ce critère. Ce classement des formations n'est pas en cohérence avec les valeurs obtenues pour l'IDPR (cf. Tableau 21). On peut avancer les explications suivantes :

- un bassin versant comme la Borrèze n'est pas entièrement composé à l'affleurement de la même entité hydrogéologique, ce qui signifie que le comportement traduit par le modèle est intégrateur de l'ensemble des écoulements survenant dans le bassin versant, et comporte donc potentiellement une part plus ruisselante ;
- si le Plio-Quaternaire comporte des formations de lithologie hétérogène (argiles et sables notamment), la nappe des sables est en règle générale sub-affleurante dans le triangle landais, ce qui ne constitue pas un contexte favorable à l'utilisation de l'IDPR comme indicateur de l'infiltration. En effet, cette présence de la nappe au voisinage de la surface du sol génère un réseau hydrographique important, en règle générale aménagé au fil du temps par l'intervention de l'homme. On notera d'autre part que dans un contexte de ce type, un écoulement rapide qui pourrait être apparenté à un phénomène de ruissellement ou de ruissellement légèrement différé pourrait tout aussi bien être dû à l'existence de terrains déjà saturés en eau, rendant l'infiltration impossible. C'est cette compréhension du phénomène qui est privilégiée dans la suite de ce rapport. Elle restera à valider lors de la phase de calage du modèle maillé.

Les sept formations qui présentent les valeurs de RUIPER les plus faibles correspondent en totalité aux bassins versants dans lesquels une ou plusieurs épente(s) constitue(nt) l'essentiel des formations à l'affleurement. On retrouve ici une forte cohérence entre le rôle présumé de ces formations et le comportement déduit de la modélisation globale (une faible valeur de RUIPER correspondant à une prépondérance de l'écoulement rapide).

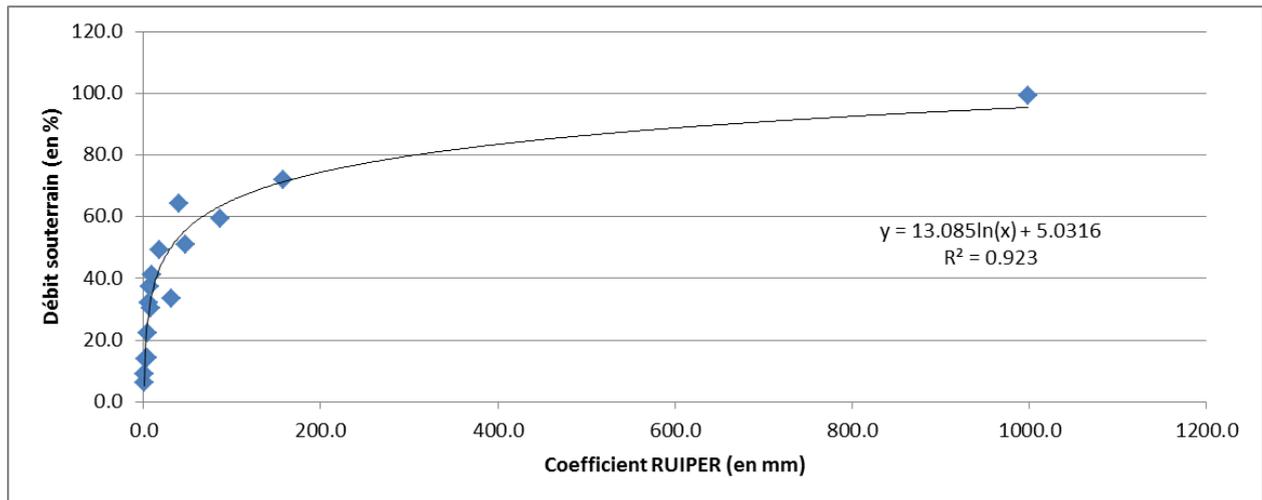


Illustration 39 - Coefficient RUIPER et part simulée du débit souterrain dans le débit du cours d'eau

Bassin	Code HYDRO	Géologie du Bassin Versant	Nash Q	RUIPER (mm)	%Q_souterr	%Q_rapide	IDPR median
Le Girou	O8190630	DOGGER (100%)	0.75	998.0	99.3	0.7	64.0
Le Magescq	S4214010	QUAT 100%	0.72	157.9	71.9	28.2	896.0
La Beune	P4254010	COST (100%)	0.91	86.5	59.4	41.2	370.0
La Petite Leyre	S2134010	QUAT 100%	0.89	47.6	50.8	49.1	1000.0
La Borrèze	P2315020	BACX (80.2%)	0.85	40.2	64.1	36.2	272.0
Le Canteloup	S3214010	QUAT 100%	0.87	31.3	33.4	66.5	1000.0
La Charreau	R3010010	CONIACIEN-TURONIEN (69.7%)	0.80	18.1	49.2	51.6	266.0
La Garroueyre	S1215010	QUAT 100%	0.85	13.9	29.4	70.5	1000*
L'Ourajoux	P2454310	60% TITH, 20% épontes, 20% RECO	0.68	8.1	30.3	69.8	295.0
L'Isaute	Q2094310	EPHE (75%) + EPAQ (25%)	0.72	6.9	37.3	63.2	970.0
L'Eyraud	P5404010	EPOL (73,5%), EPES (7%), EOC-INF (15%), CAMP (3%)	0.73	6.3	32.2	68.3	723.0
Le Né	R4122523	EPCS (77.8%) - CAMP (14.4%)	0.89	5.0	14.3	85.8	688.0
La Masse de Prayssas	O6445010	EPCM 100%	0.69	4.7	22.3	77.7	751.0
La Lède	O8584010	EPOL (61%) EOC et COST à l'amont	0.73	1.8	13.8	86.3	965.0
Le Moron	P9414010	EPES 93.4% + EPOL 6.6%	0.77	1.1	6.0	94.1	816.0
Le Pest	O2825010	EPAQ (100%)	0.62	1.0	8.9	91.1	1000.0

Tableau 21 - Valeurs de RUIPER et d'IDPR par bassin versant (* la valeur de l'IDPR dans le bassin versant de la Berle de la Garroueyre est supposée identique à celle du Canteloup)

4. Conclusion

Ce module de l'année 4 de la Convention porte principalement sur l'évolution du Modèle Nord-Aquitain avec l'objectif de concevoir une nouvelle version du modèle, actualisée et enrichie de nouvelles couches devenant ainsi de plus en plus performante pour définir au mieux les stratégies d'exploitation des ressources en eau souterraines de la région. Le programme de cette année 5 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 2012 afin de bénéficier d'un outil le plus à jour possible. L'actualisation du modèle jusqu'en 2012 a permis de démontrer que le modèle retranscrit bien les chroniques piézométriques avec les nouvelles données d'entrée sans qu'aucune modification des paramètres hydrodynamiques n'ait été nécessaire. Par ailleurs, les simulations faites ont été confrontées aux mesures complémentaires réalisées en 2012 sur des forages dont le suivi avait été arrêté. Ces vérifications permettent d'attester de la robustesse du modèle, les simulations produisant des résultats en concordance avec les récentes mesures.
- Dans un second temps, le développement de la version 4 du modèle a été poursuivi. Le but étant d'obtenir une plus grande finesse de représentation des aquifères. Cela permettra de mieux traiter les problèmes posés à une échelle plus locale, en particulier ceux soulevés par le SAGE "Nappes profondes de Gironde", mais aussi ceux qui émergent dans les départements voisins de Lot-et-Garonne et de la Dordogne. Le travail réalisé cette année 5 de la convention constitue une phase préparatoire au calage du modèle en régime transitoire ; il a aussi permis d'élaborer l'architecture du réseau hydrographique et de poser les bases de la méthodologie à utiliser pour calculer les flux de recharge à introduire dans le modèle à partir des données climatiques.

Les choix faits et les travaux entrepris pour construire la version 4 du modèle ont abouti à des ajustements des champs de perméabilités issus de la version 3.3b du modèle liés aux évolutions importantes de la géométrie du modèle. Cette étape de construction de la version 4 a permis aussi de constater le bon fonctionnement du modèle et de vérifier les premiers résultats obtenus, notamment la piézométrie simulée ; elle sera suivie du calage en régime transitoire. En parallèle, la construction du réseau hydrographique a été initiée dès cette année. Ce sont 157 cours d'eau qui ont été pris en compte sur un linéaire total de 5632 km. Cependant il faut garder à l'esprit que le réseau hydrographique ne sera pleinement intégré au modèle une fois que le calage de la piézométrie en régime transitoire terminé.

Enfin, une partie importante de l'amélioration de la représentativité du modèle passe par une meilleure prise en compte de la recharge dans le modèle. Une réflexion sur la méthodologie a été initiée dans cette étude, accompagnée d'une analyse des données disponibles pour caractériser la recharge (données climatiques, hydrologiques, piézométriques,...). L'approche qui a été privilégiée correspond à la décomposition des hydrogrammes de cours d'eau en utilisant le logiciel GARDENIA pour déterminer les composantes majeures qui contrôlent la recharge. Au total 15 bassins versants représentatifs de 10 entités hydrogéologiques (correspondant à 10 couches du MONA) ont été étudiés pour apprécier les paramètres contrôlant la recharge.

Un travail important de spatialisation pour répartir les paramètres sur des zones homogènes en termes de comportement reste à mener. Il fera partie intégrante du travail de calage en régime transitoire, objet de la prochaine convention. En effet, les prochains travaux seront consacrés

au calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire afin d'aboutir à une version opérationnelle du MONA v4. En amont, un travail spécifique sur les points d'observation doit aussi être mené pour valider l'horizon capté dans chaque piézomètre en concordance avec la géométrie actualisée.

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 Cénomaniens et du Jurassique moyen et supérieur au modèle nord aquitain. BRGM/RR-40110-FR, 59 p. 24 fig., 13 tab., 6 ann.

Amraoui N., Bichot F., Seguin J.J., Platel J.P., 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.

Baize D., Jabiol B. (1995) - Guide pour la description des sols. *INRA Éditions*, 430 p

Bardeau M. (à paraître) - Projet de recherche REGARD : Modélisation des Ressources en Eau sur le bassin de la GARonne – Interaction entre les composantes naturelles et anthropiques et apport de la téléDétection.

Barthélemy Y., Seguin J.J. (2013) - Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations. Rapport final..

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

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

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

Bruand A., Duval O., Cousin I. (2004) - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des sols*, Vol. Volume 11, 3, 323-332.

Caballero Y., Lanini S., Seguin J.J., Charlier J.-B., Ollivier C. (2015) - Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. rapport de fin de 1ère année. BRGM/RP-64779-FR, 159 p., 102 il., 3CD.

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.

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

Croiset N., Wulleumier A., Bessière H., Gresselin F. (2013) - Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phases 2 : construction et calage du modèle hydrogéologique; Rapport BRGM/RP-62648-FR. 130 p., 88 ill., 20 tab., 11 ann.

Desprats J.F., Fleury P., Marechal J.C., Thiéry D., Pinson S., Mardhel V., Stollsteiner P., Cerdan O., P. Ollivier (2010) - Appui aux actions SCHAPI : Modélisation de bassins versants, indice de saturation des karsts et caractérisation du ruissellement. Rapport annuel 2010 - BRGM/RP59216-FR, 184 p., 66 ill., 10 ann.

Duez O. (2015) - Actualisation 2008-2011 du modèle maillé des aquifères du Jurassique en Poitou-Charentes. Rapport BRGM/RP-64816-FR - Rapport final, 161 p., 223 ill., 4 ann.

Duez O., Bichot F. (2012) - Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Crétacé du Sud Charentes. BRGM/RP-61056-FR, 201 p., 202 ill., 3 ann.

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) - A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. Annals of Glaciology, ,, Vol. vol.18, pp.65-71.

Etcheverry D. (2001) - Une approche déterministe des distributions des temps de transit de l'eau souterraine par la théorie des réservoirs. *Thèse de doctorat : Université de Neuchâtel,*

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.

Hubert Pierre, Pierre Carbonnel Jean, Chaouche Ali (1989) - Segmentation des séries hydrométéorologiques- application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. Journal of Hydrology, Vol. 110, 349-367.

LeMoigne P. (2002) - Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système Safran. Note de centre GMME.

Lopez B. (2009) - Les processus de transfert d'eau et de dioxyde de carbone dans l'épikarst. Aide à la conservation des grottes ornées par le développement de nouvelles méthodologies pour l'étude de l'environnement des cavités - Application à la grotte de LASCAUX. *Thèse de doctorat : Thèse de Doctorat - Université de Bordeaux 1, 384p.,*

Mardhel V. (2006) - Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines de la région Aquitaine. Rapport BRGM/RP-55311-FR, 105 p.

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., 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., 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., 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., 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., 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.

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.

Rosenbrock H.H. (1960) - An automatic method for finding the greatest or least value of a function. Comp. J., Vol. 3, pp 175-184.

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 developpement durable et de l'énergie - Armines - BRGM.

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., 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., Arnaud L. (2015) - Modèle PHONEME : construction, paramétrisation et évaluation qualitative et statistique du calage en régime transitoire. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-65368-FR, 58 p., 41 fig., 6 ann..

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 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.*

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

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

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

Seguin JJ. (à paraître) - Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines.

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

Valette L., Cunillera A. (2010) - Cahiers techniques SYRAH-CE - Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref Lyon, MAEP-LHQ, Lyon. 96 p.

Vernoux J.F., Seguin J.J. (2011) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 1. Rapport final - BRGM/RP-59286-FR, 129 p., 69 ill., 27 tab., 4 ann.

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 (+Cénomaniens et Jurassique) développé au cours de l'année 2 de la convention « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine 1996-2001 ».

MONA V3

Développements réalisés dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » 2002-2006. Au cours de l'année 1 (Pédron 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 effectués.

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

Exemple d'une fiche technique d'un forage mesuré

N°BSS : 08294X0001

Département : DORDOGNE (24)

Commune : MONESTIER

Lieu-dit : LA BASTIDE

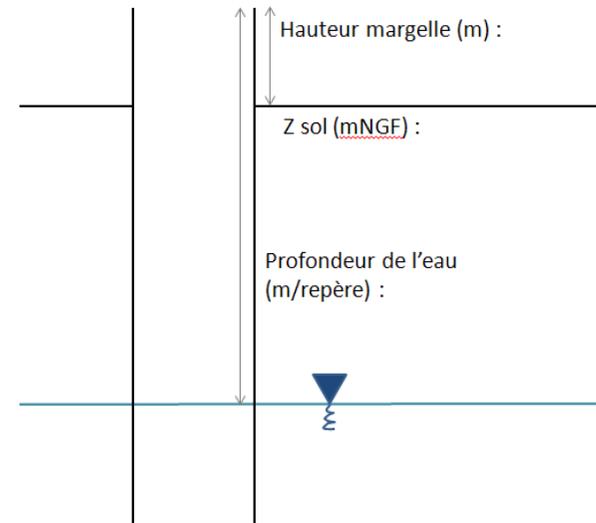
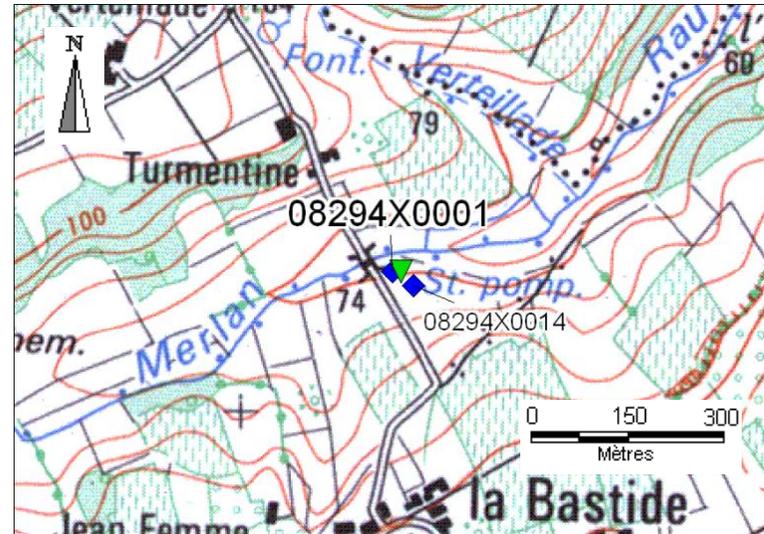
Coordonnées X | Y (en Lambert II étendu) :

Dans la base de données : 442135.7 | 1977203.9

Mesures sur place : 442148.4 | 1977203.9

Nappe captée : Éocène_inf

Date de la mesure : 24/6/2014 **Niveau piézométrique (m)** : -4.915



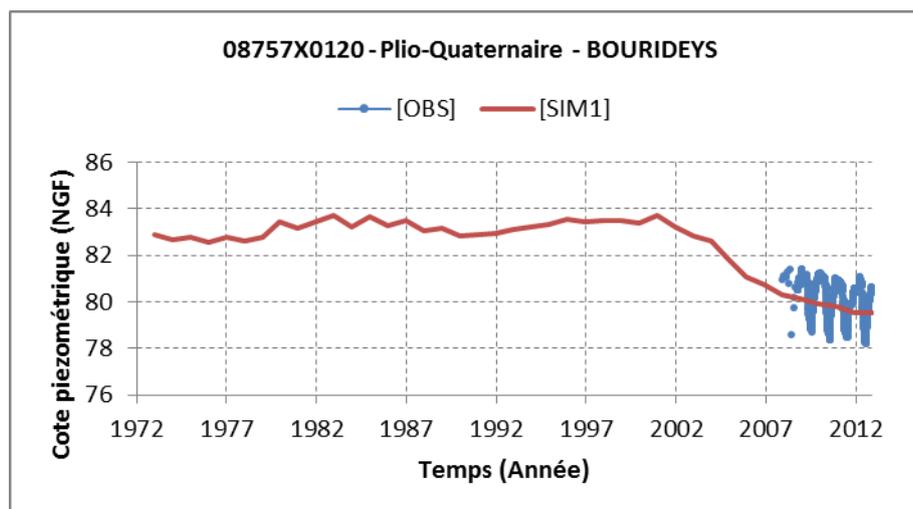
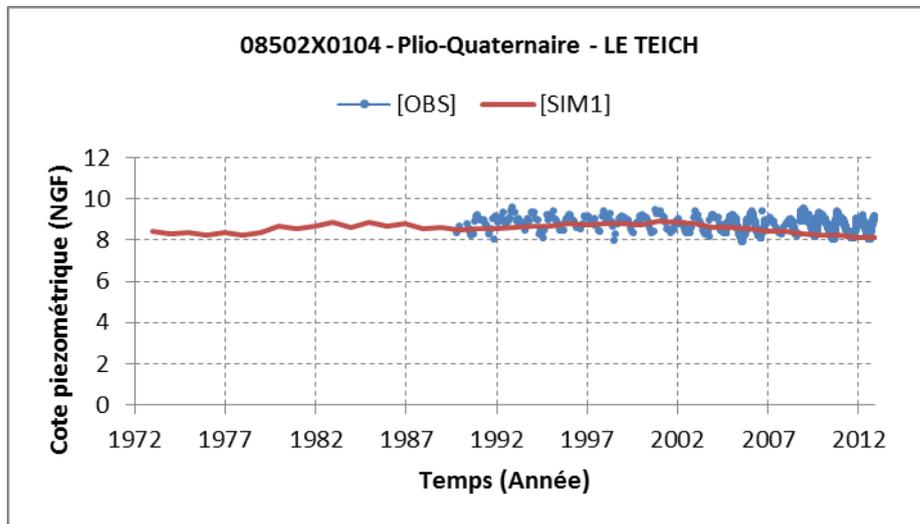
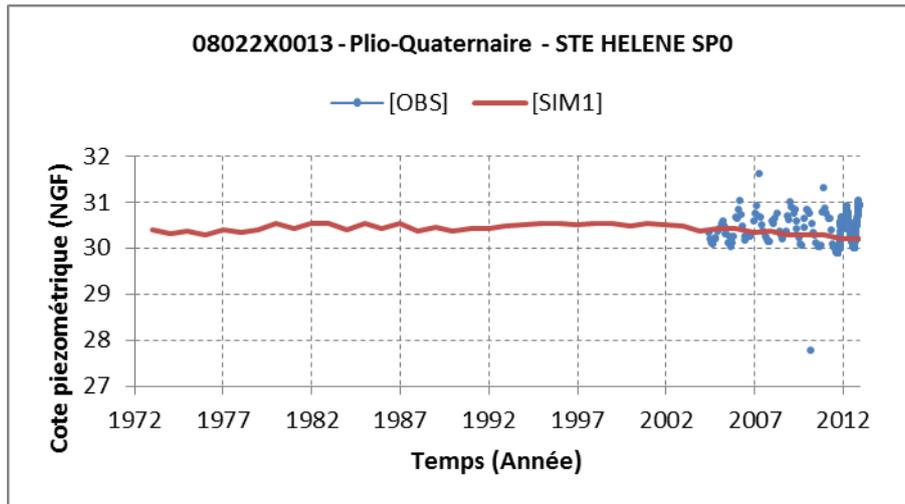
Annexe 3

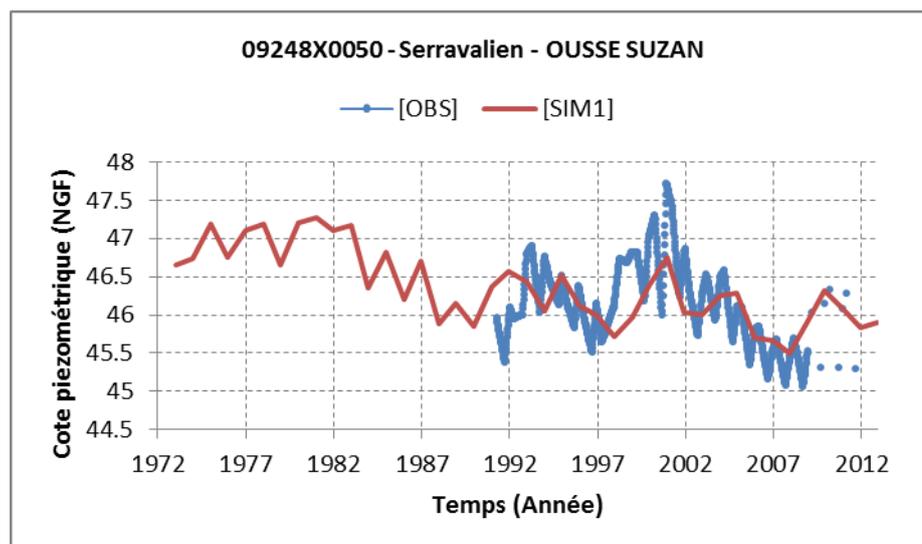
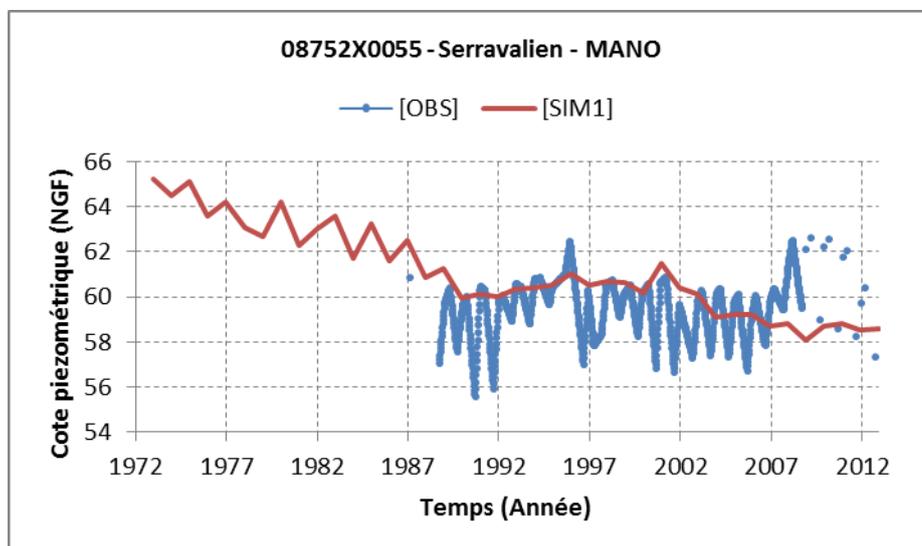
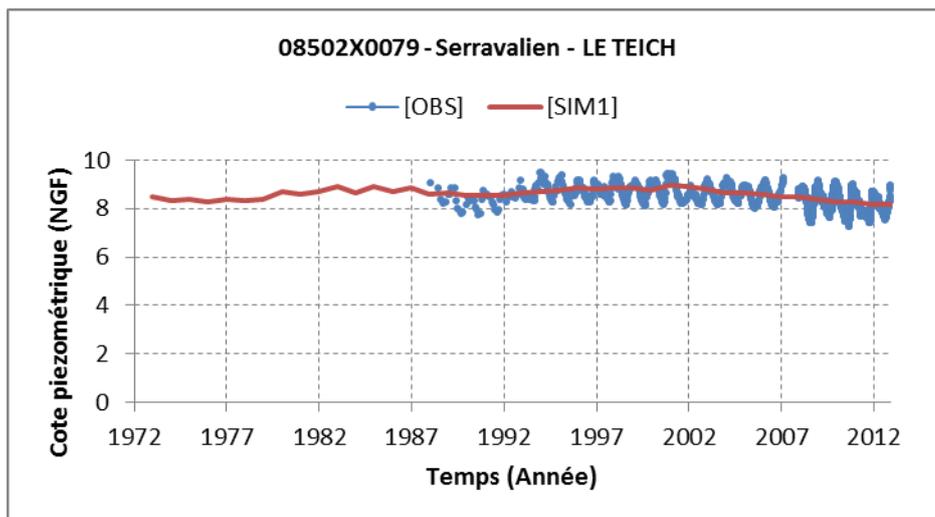
Résultats de la campagne de mesure

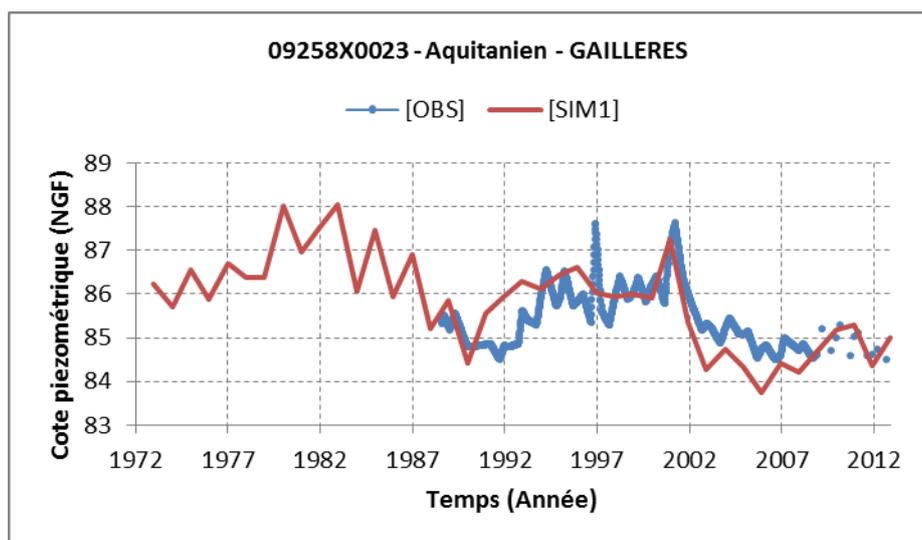
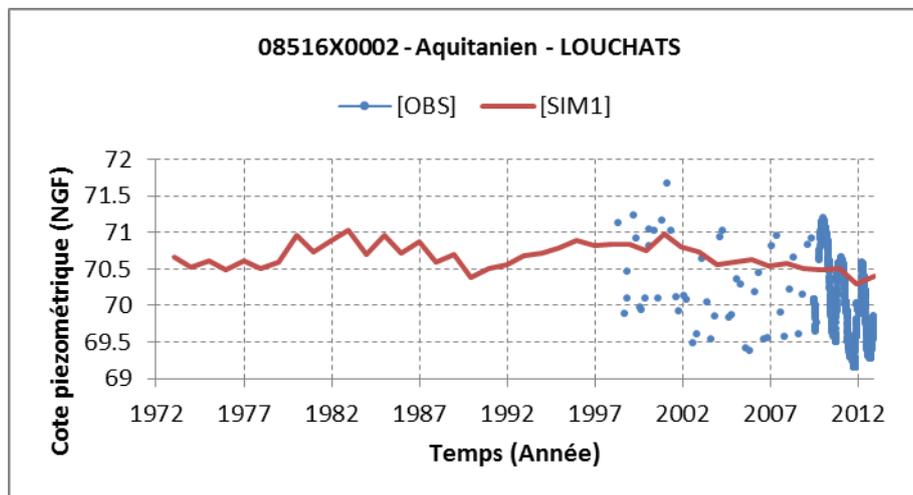
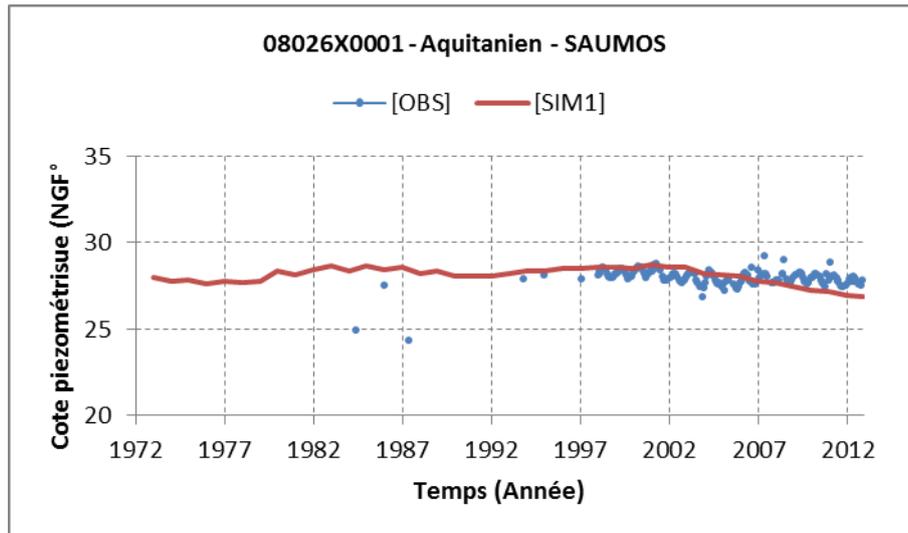
INDICE	Prof (m)	XOUVL2E	YOUVL2E	Altitude (m NGF)	Commune	Dept	Nappe captée	Date mesure	Mesures profondeur de la nappe (m/repère)	Margelle (m)	Niveau piézométrique (m NGF)
09023X0001	351.75	461762.6	1913513.6	45.89	AGEN	47	BaCX	09/07/2014	41.8	-4.6	-0.51
09023X0017	407	461592.4	1913443.7	43.7	AGEN	47	BaCX	09/07/2014	44.5	0.33	-0.47
07831X0007	400	475486.7	2013344.3	175	ATUR	24	BaCX	17/06/2014	63.43	0.83	112.4
08066X0049	140	451049.1	1985047.9	25	BERGERAC	24	Éocène_inf	24/06/2014	21.2	0.415	4.215
07787X0002	29	349600.1	2007685.3	30	CASTELNAU-DE-MEDOC	33	Ste Hélène	01/07/2014	3.15	0.36	27.21
08764X0005	284	410270	1938673	62	CAUVIGNAC	33	Éocène_moy	08/07/2014	68.89	0.3	-6.59
08037X0425	350	375345	1987375	64	CENON	33	Éocène_moy	13/06/2014	76	0.4	-11.6
08521X0238	405	386311	1961760	17	CERONS	33	Campanien	11/07/2014	2.28	0.675	15.395
07345X0021	137	448017.4	2043217.1	135	CHERVAL	24	Tithonien	10/06/2014	17.2	0.3	118.1
07807X0004	262	405879.1	2007663.8	15.35	COUTRAS	33	Éocène_inf	12/06/2014	11.4	0.75	4.7
07298X0015	797	330685.7	2054239.7	8.85	GRAYAN-ET-L'HOPITAL	33	Cénomaniens	26/06/2014	6.44	0.3	2.71
07836X0005	426	479512	2006828.7	175	LACROPTÉ	24	Kimméridgien	17/06/2014	56.25	0.55	119.3
08065X0025	273	445182.7	1981862.8	32	LAMONZIE-SAINT-MARTIN	24	Campanien	24/06/2014	35.28	0.43	-2.85
08253X0010	533	320108	1977035	5.01	LEGE-CAP-FERRET	33	Oligocène	01/07/2014	2.93	0.85	2.93
08275X0070	2.7	363739.3	1969541.8	59	LEOGNAN	33	Plio-Quaternaire	08/07/2014	1.88	0.81	57.93
08028X0176	176	354263.7	1986507.9	38.26	MARTIGNAS-SUR-JALLE	33	Ste Hélène	16/07/2014	12.57	0.53	26.22
08062X0020	528	452557.3	1991949.5	55	MAURENS	24	Turonien	24/06/2014	18	0.49	37.49
08294X0001	288	442135.7	1977203.9	75	MONESTIER	24	Éocène_inf	24/06/2014	80.41	0.495	-4.915
08304X0019	198	470329.3	1975373.4	100	NAUSSANNES	24	Campanien	17/06/2014	2.75	0.25	97.5
09023X0019	450	460260.4	1912764.3	45	PASSAGE(LE)	47	BaCX	09/07/2014	43.32	2.13	3.81
07808X0015	215	409304.6	2010859.9	19	PEINTURES(LES)	33	Campanien	12/06/2014	15.6	0.81	4.21
08018X0002	303	328941.2	1991638.1	20.24	PORGE(LE)	33	Ste Hélène	12/06/2014	10.5	0.83	10.57
08018X0004	381	324841.1	1992576.7	14.5	PORGE(LE)	33	Ste Hélène	12/06/2014	5	-0.4	9.1
08057X0030	336	430269.3	1985342.2	23	PORT-SAINTE-FOY-ET-PONCHAPT	24	Éocène_inf	30/07/2014	24.6	0.595	-1.005
08075X0001	63	472833.2	1988927.8	175	PRESSIGNAC-VICQ	24	Campanien	17/06/2014	30.72	0	144.28
07355X0007	60	473448.1	2047791.2	155	QUINSAC	24	Cénomaniens	16/06/2014	35.65	0	119.35
08293X0001	324	430315.4	1982170.6	15	SAINT-ANDRE-ET-APPELLES	33	Éocène_inf	13/06/2014	21.7	0.8	-5.9
07341X0007	431	451054.4	2053964	105	SAINTE-CROIX-DE-MAREUIL	24	BaCX	16/06/2014	2.16	0.46	103.3
08023X0039	157	345775	2001347	42	SAINTE-HELENE	33	Ste Hélène	13/06/2014	4.9	0.25	37.35
08043X0008	318	404967	1993248	26	SAINTE-EMILION	33	Éocène_moy	13/06/2014	27.87	0.16	-1.71
08287X0015	305	406455	1963822	29.25	SAINTE-FELIX-DE-FONCAUDE	33	Éocène_moy	11/07/2014	36.54	0.88	-6.41
08082X0010	122	511217	1998876.7	170	SAINTE-GENIES	24	Turonien	23/06/2014	1.54	0.77	169.23
08327X0204	103	515650.7	1969784.9	128	SAINTE-MARTIAL-DE-NABIRAT	24	Tithonien	17/06/2014	1.7	0.85	127.15
07818X0030	70	442009	2004534	57	SAINTE-MEDARD-DE-MUSSIDAN	24	Campanien	24/06/2014	7.45	0.38	49.93
08035X0008	17	361117.7	1992548.7	13.54	SAINTE-MEDARD-EN-JALLES	33	Ste Hélène	13/06/2014	4.6	-2.8	6.14
07355X0005	68	478233.4	2042416.6	126	SAINTE-PIERRE-DE-COLE	24	Cénomaniens	25/06/2014	2.61	0	123.39
08058X0013	275	439176.8	1987992.8	22	SAINTE-PIERRE-D'EYRAUD	24	Campanien	24/06/2014	24.1	0.55	-1.55
08297X0004	342	429432.7	1964186.3	32	SAINTE-PIERRE-SUR-DROPT	47	Campanien	24/06/2014	37.15	0.54	-4.61
07835X0014	375	477540.9	2006320.3	156	SALON	24	Kimméridgien	17/06/2014	60.97	0.115	95.145
08525X0029	363	385903	1950406	48	SAUTERNES	33	Campanien	08/07/2014	29.94	0.34	18.4
07598X0004	66	500584.6	2028586.9	160	TOURTOIRAC	24	Bajocien	16/06/2014	7.42	0.365	152.945
07581X0009	192	446710.1	2041268.5	101	VERTEILLAC	24	Cénomaniens	16/06/2014	4.53	0.57	97.04

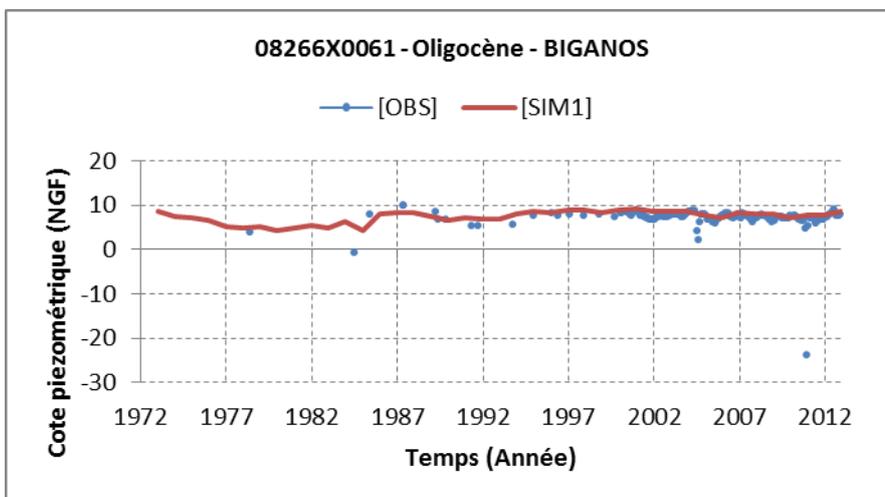
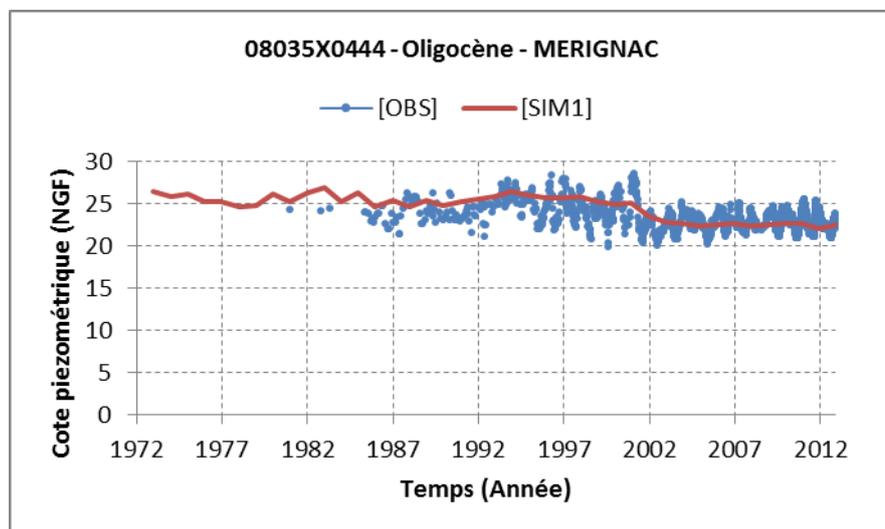
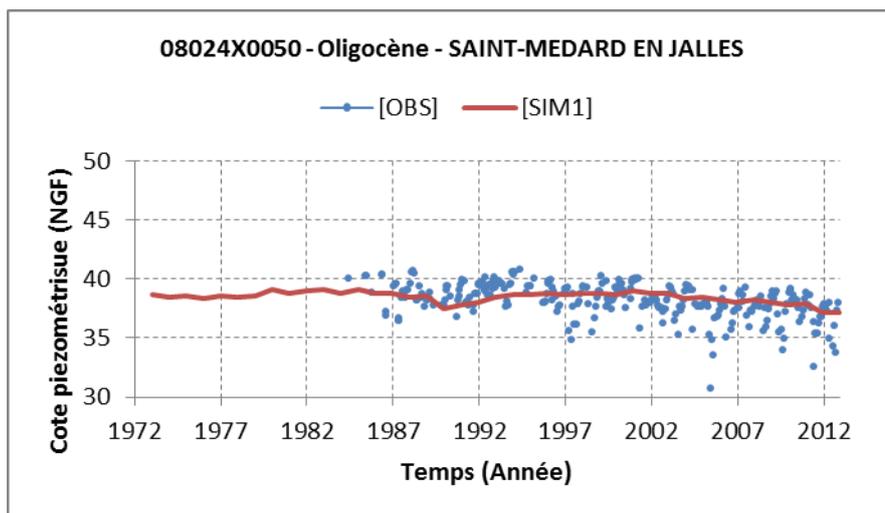
Annexe 4

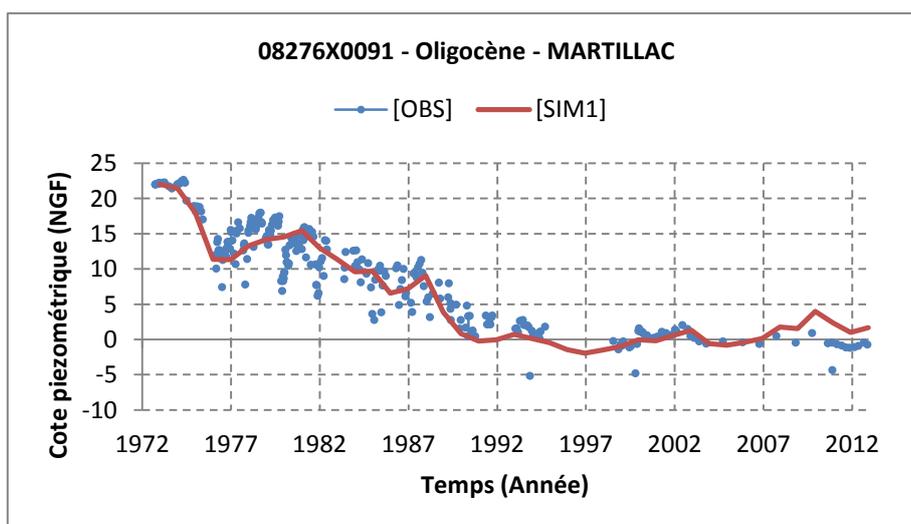
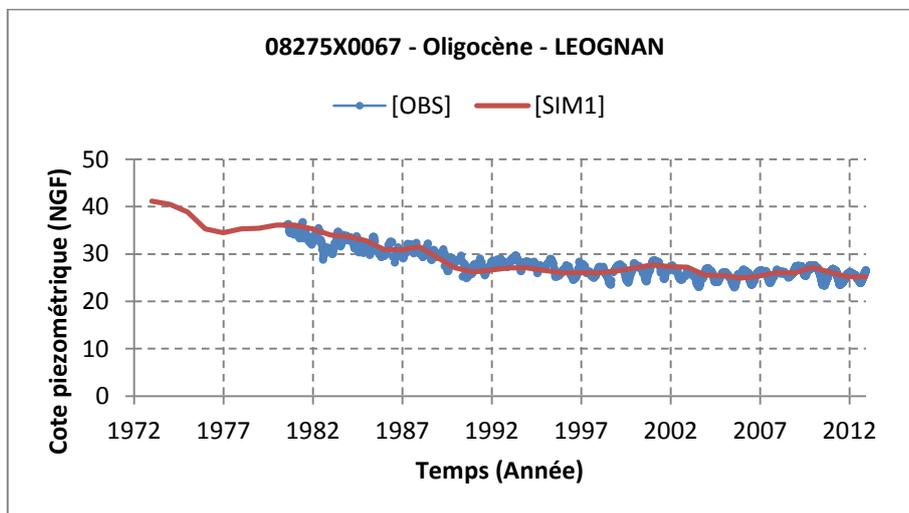
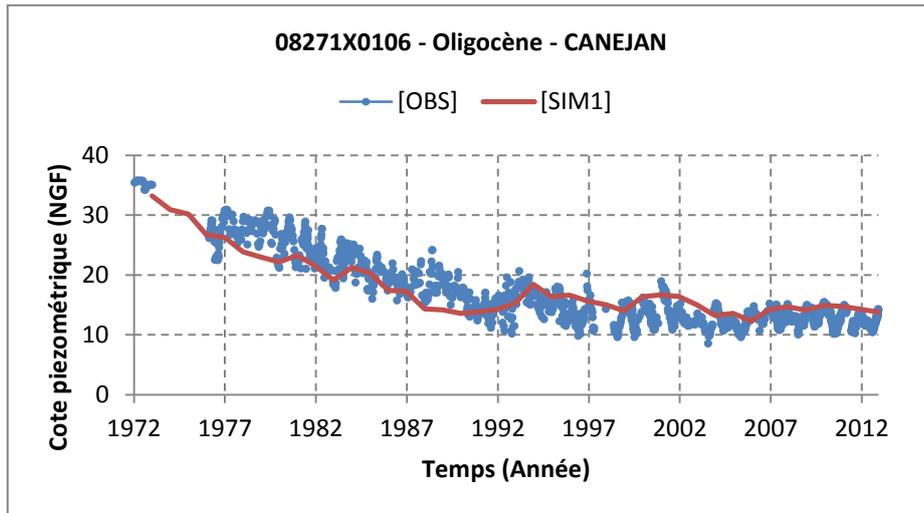
Actualisation des chroniques de calage – période 1972 - 2012

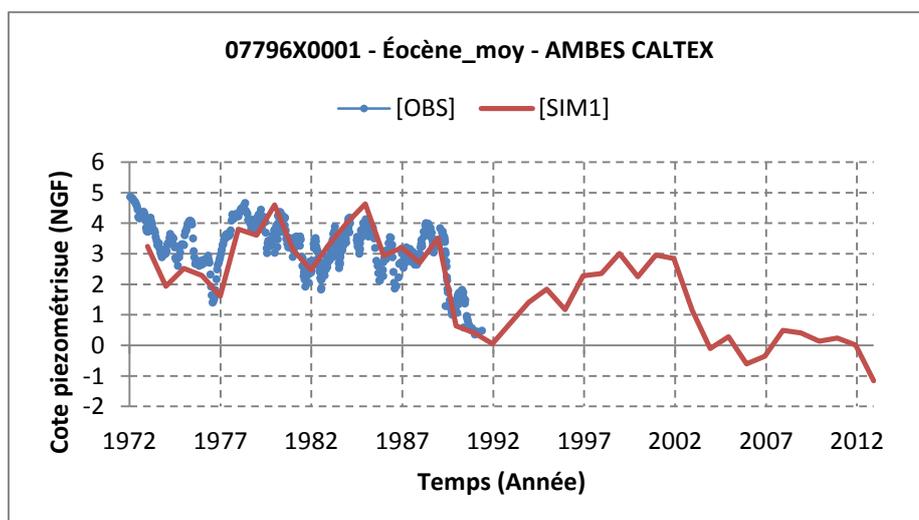
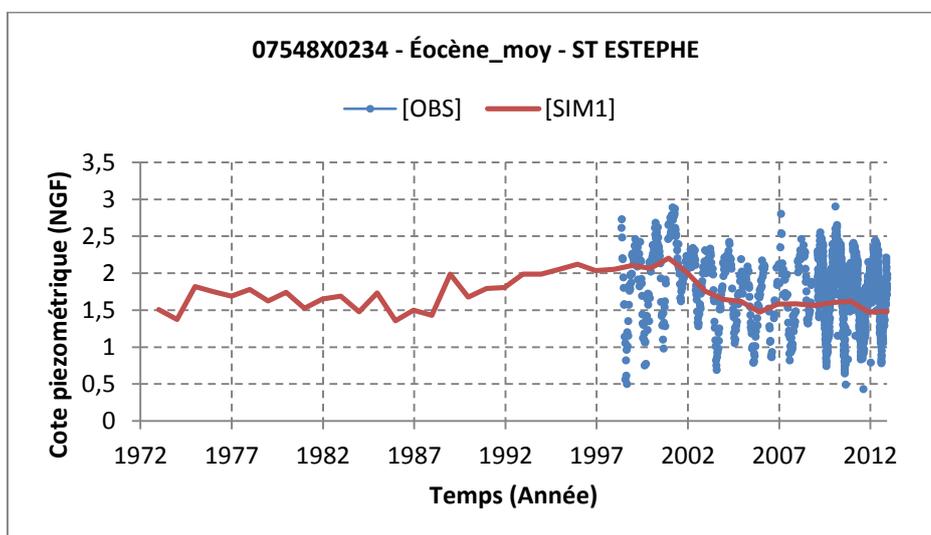
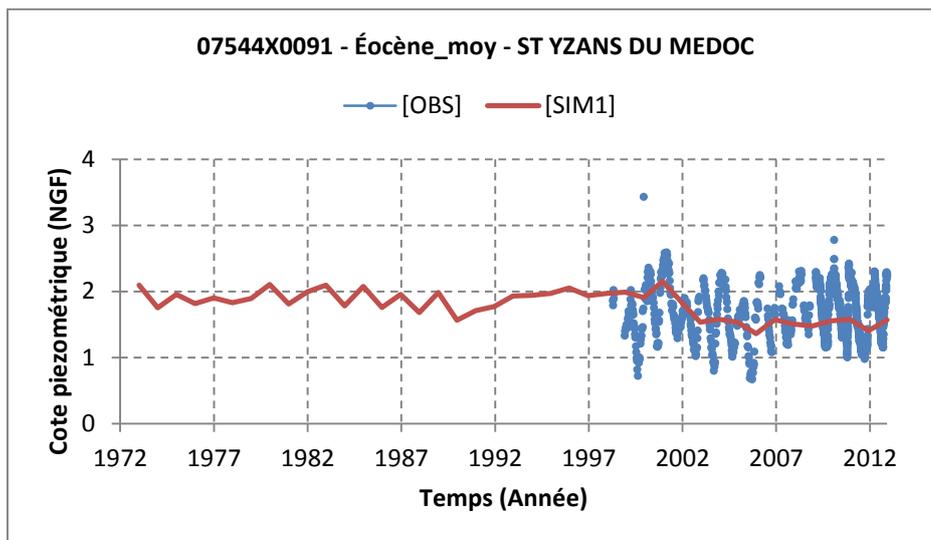


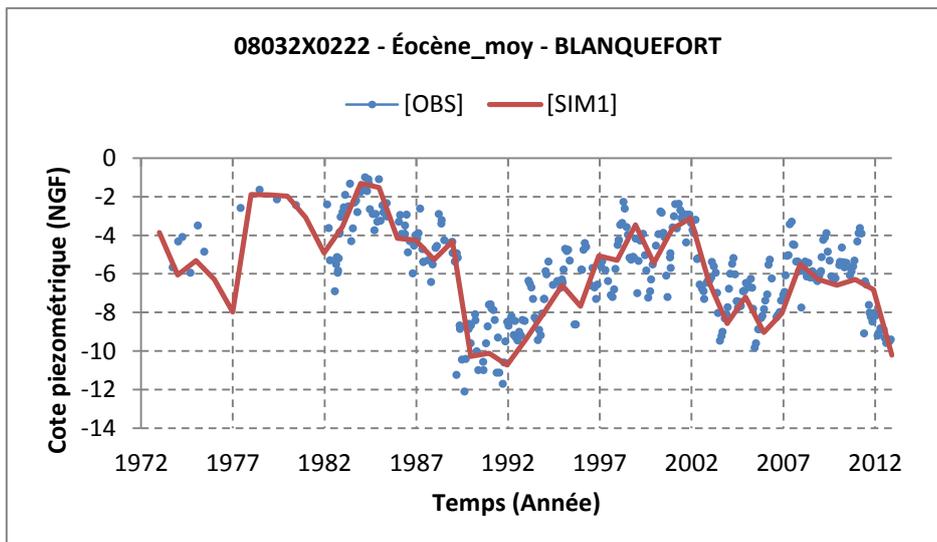
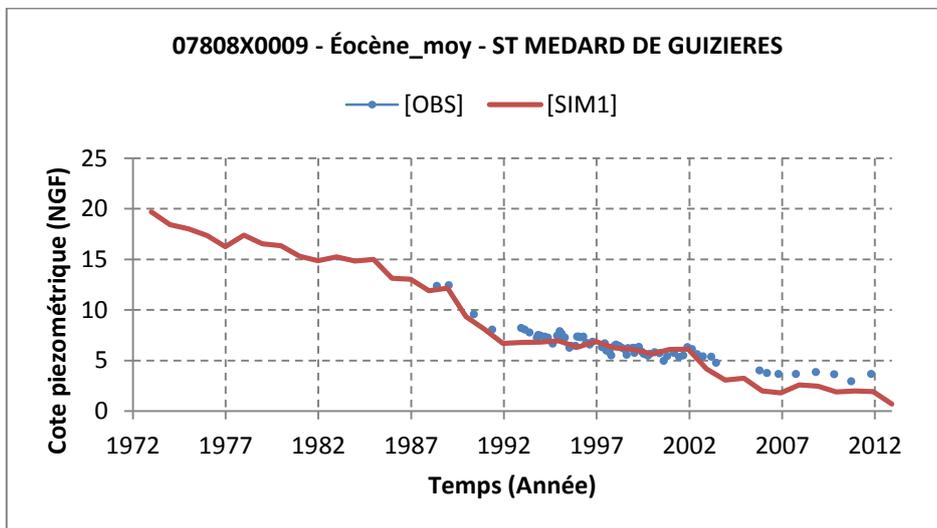
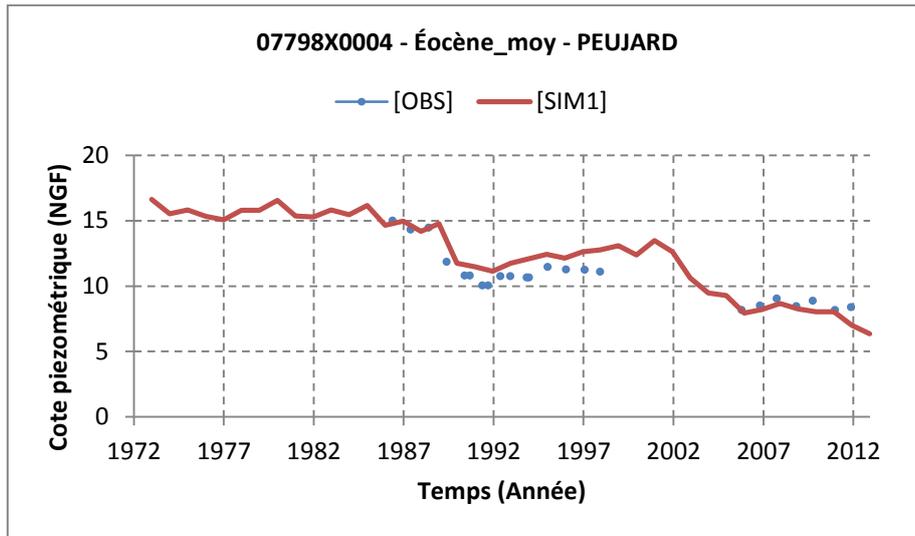


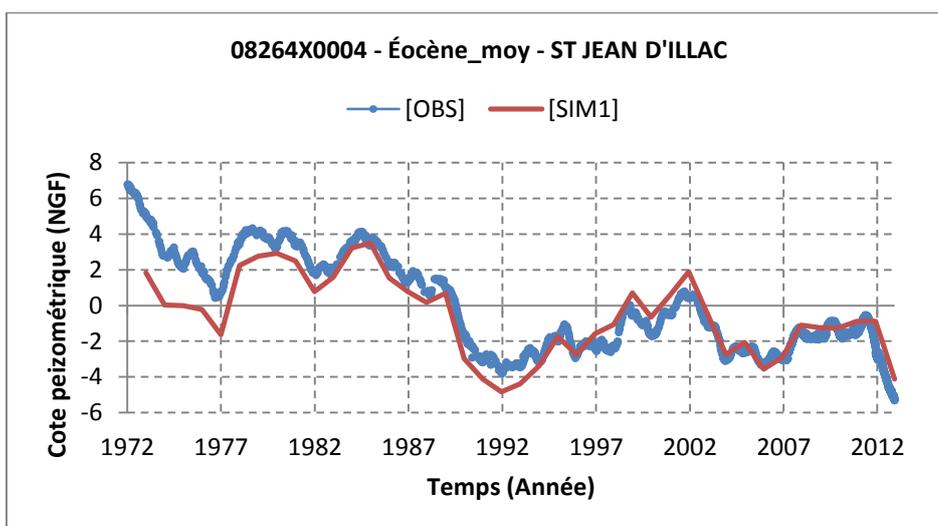
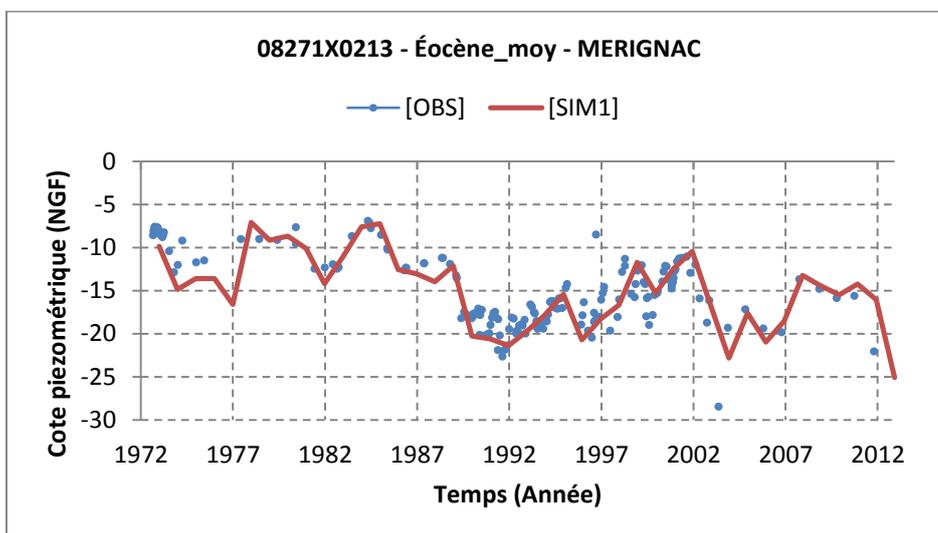
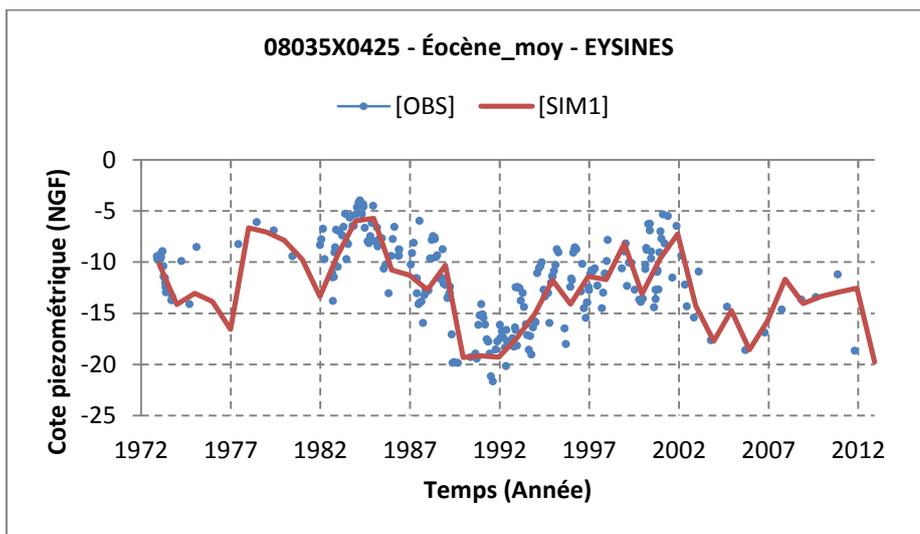


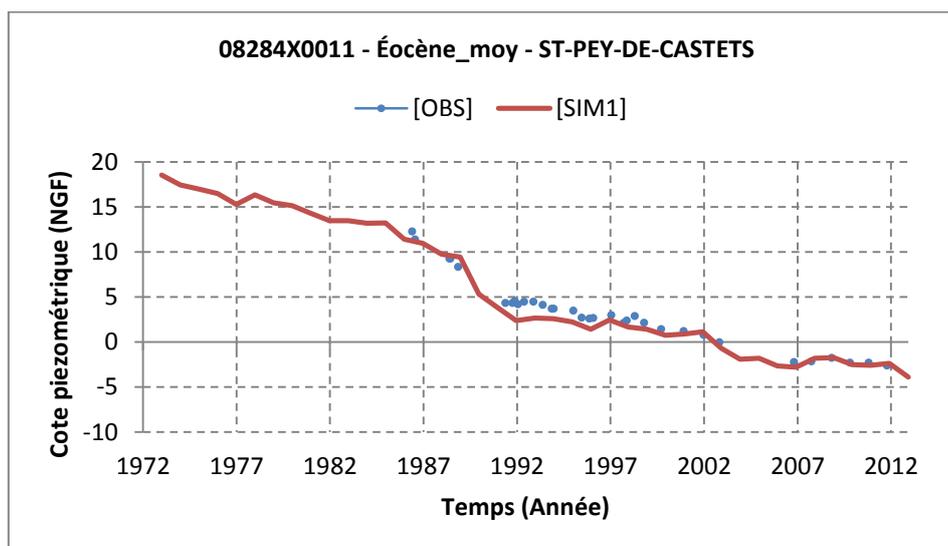
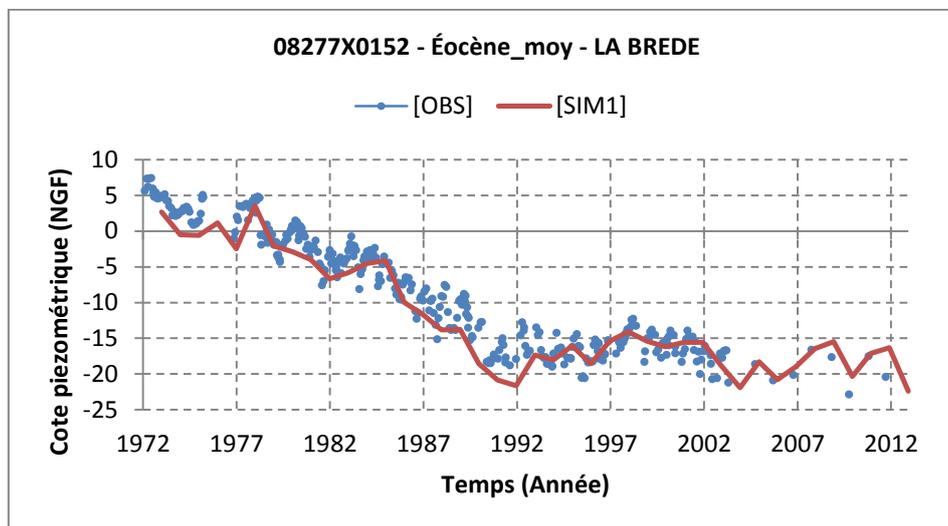
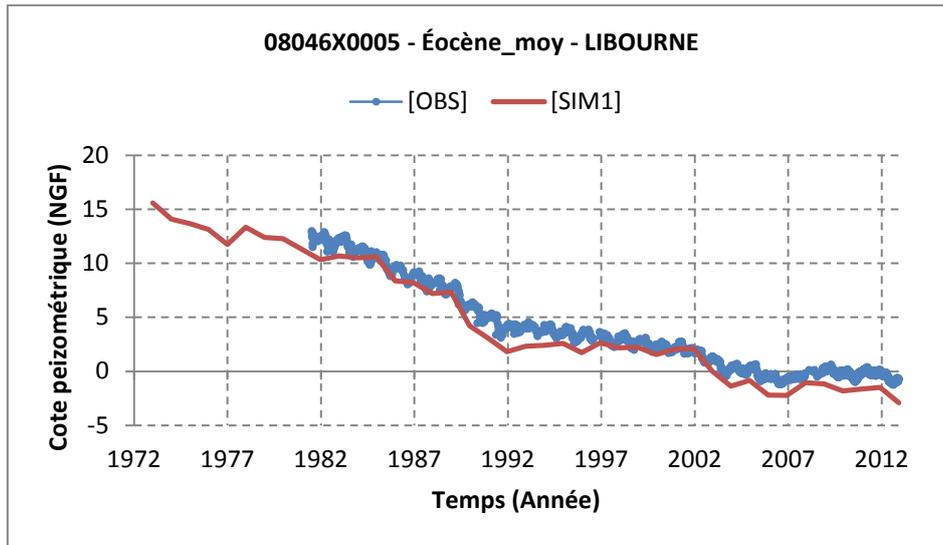


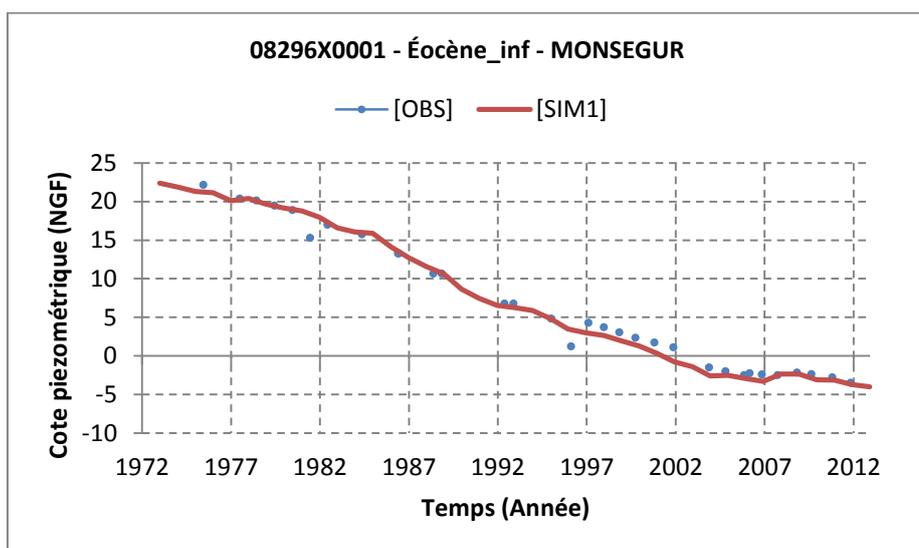
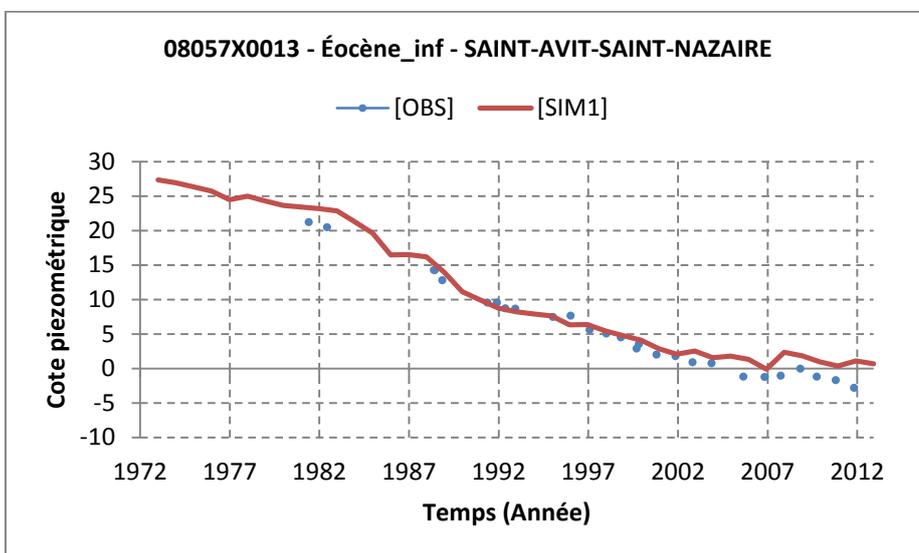
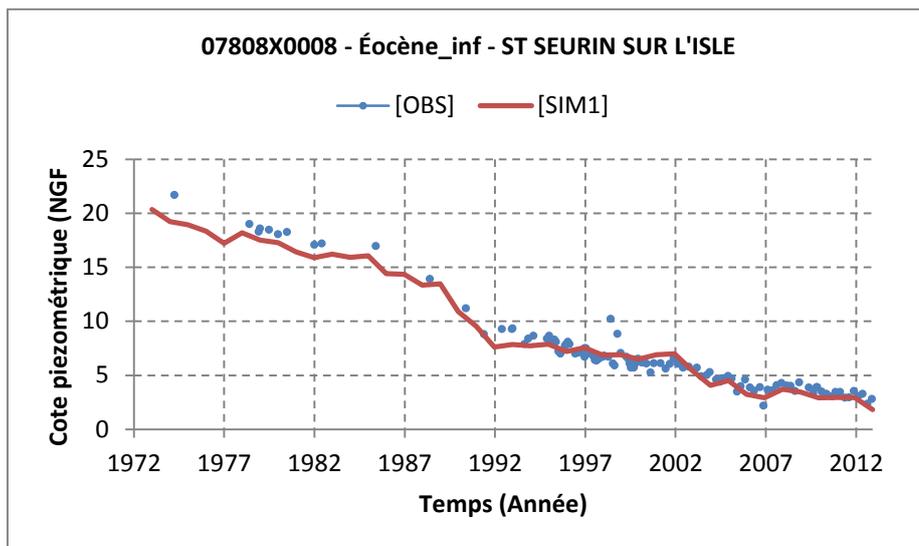


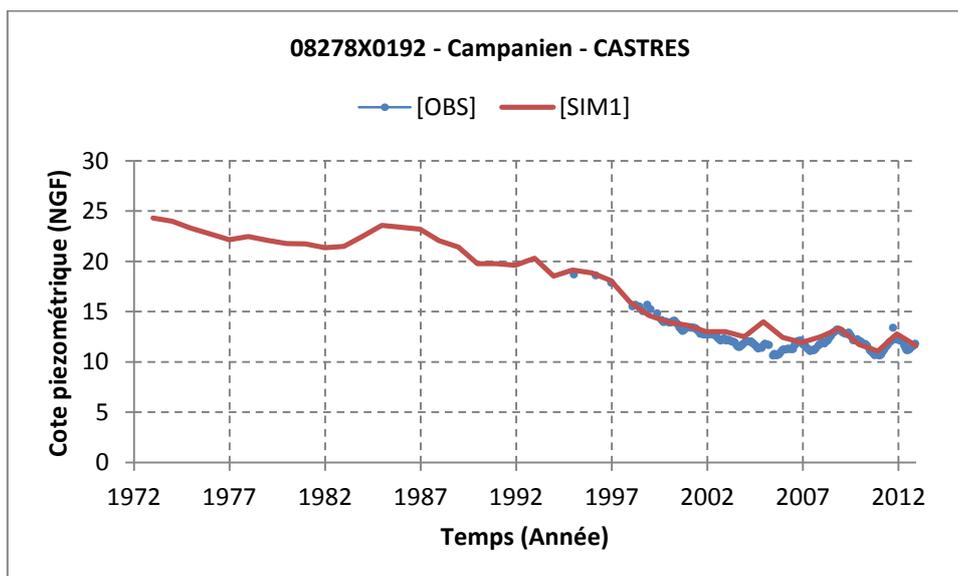
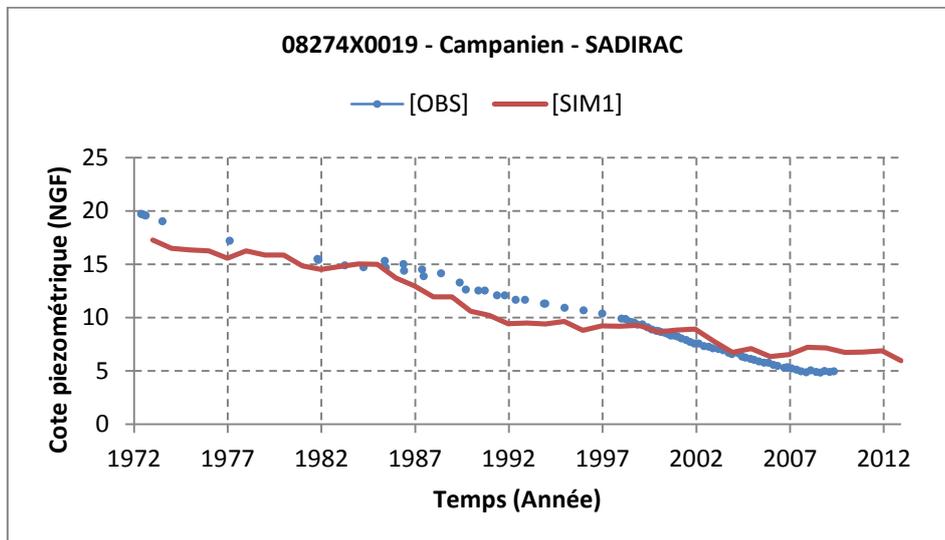
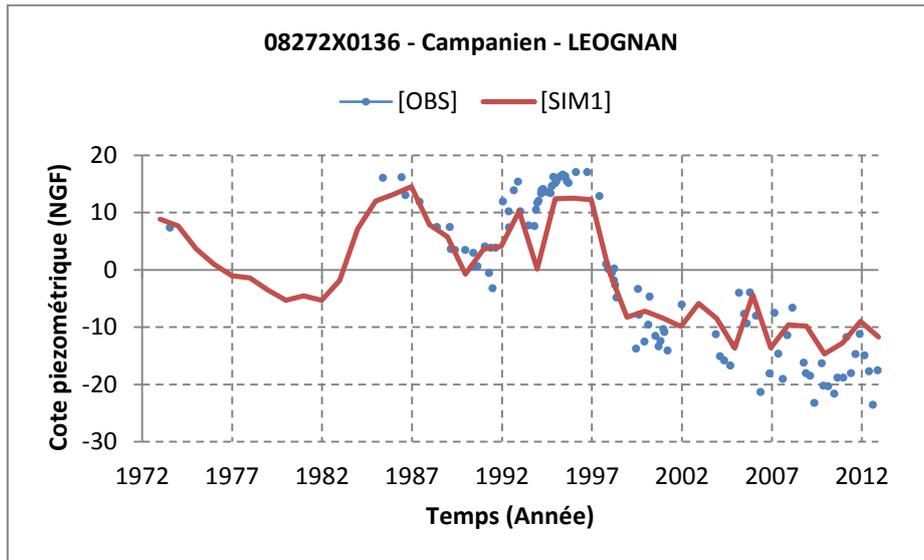


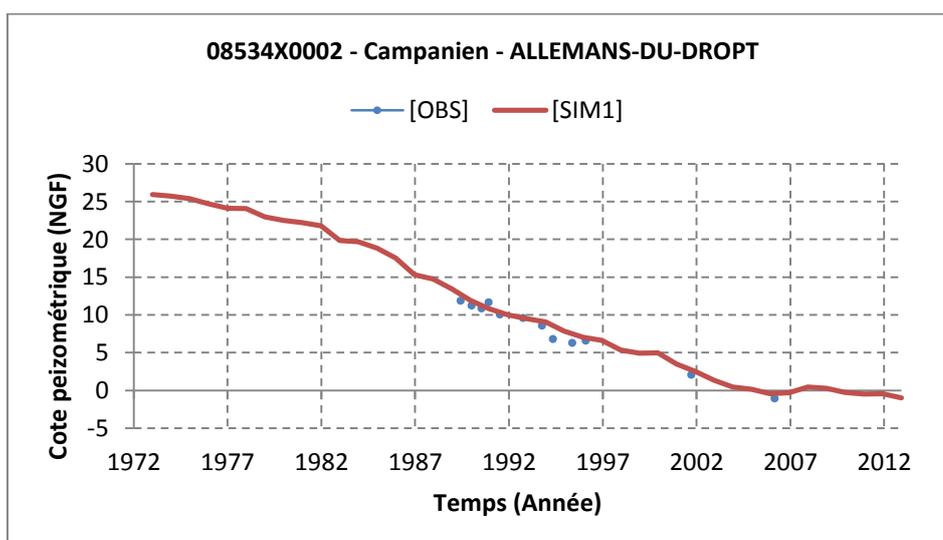
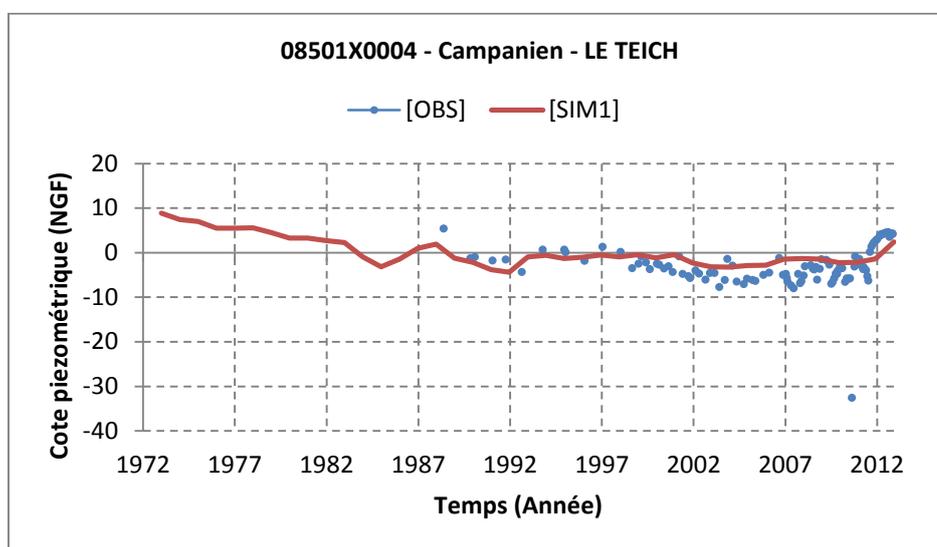
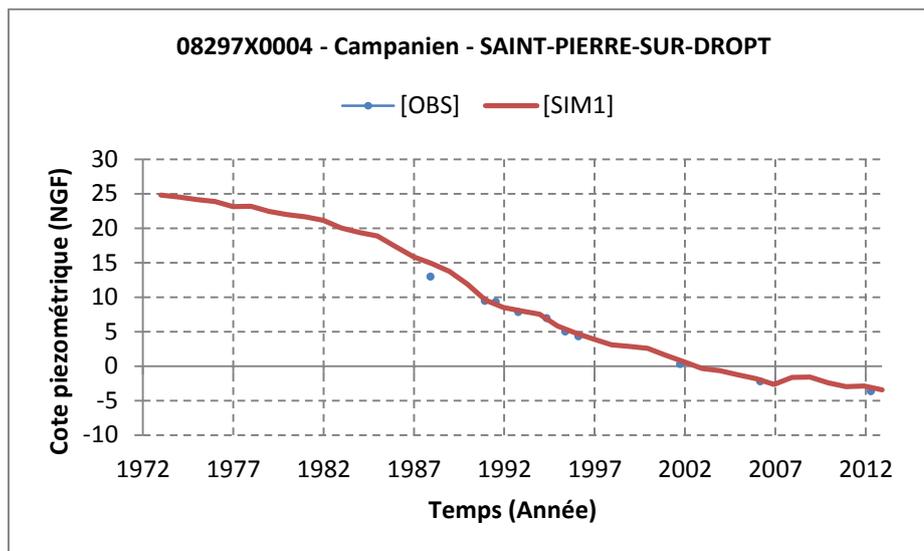


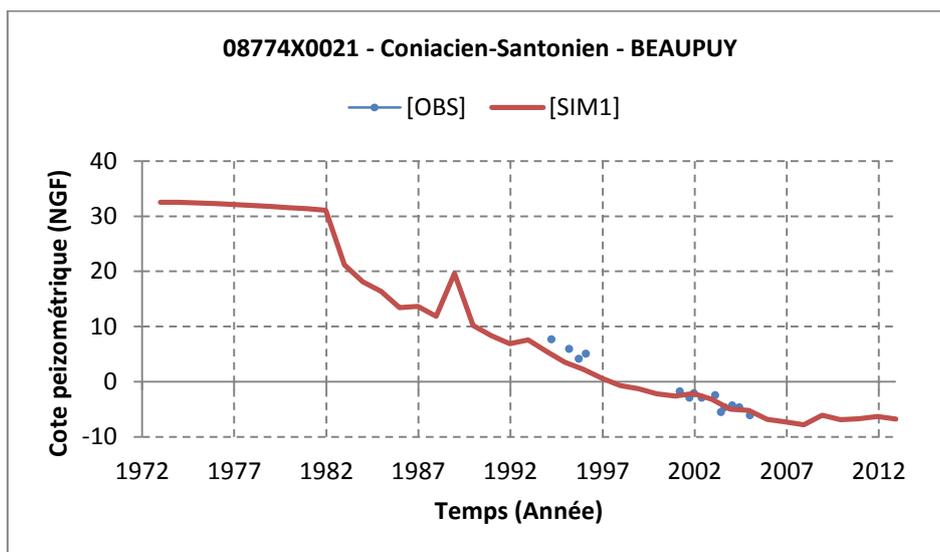
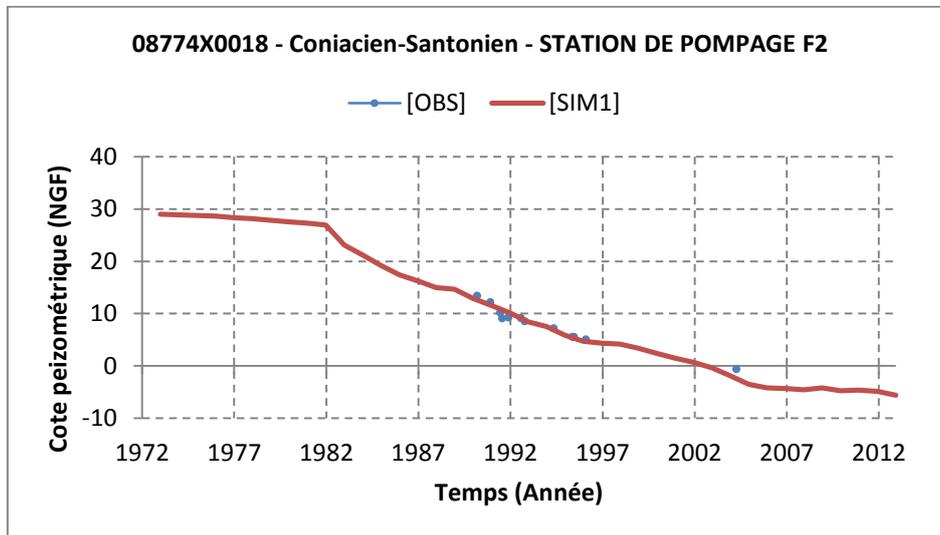
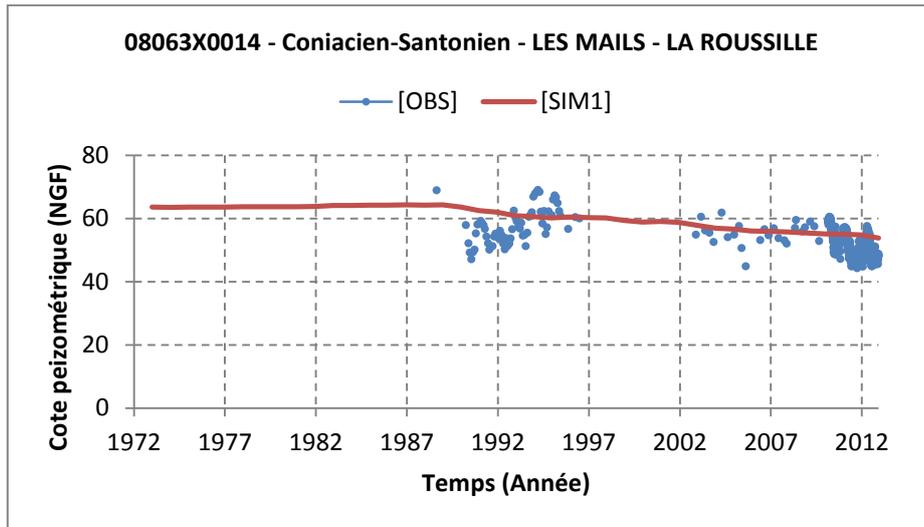


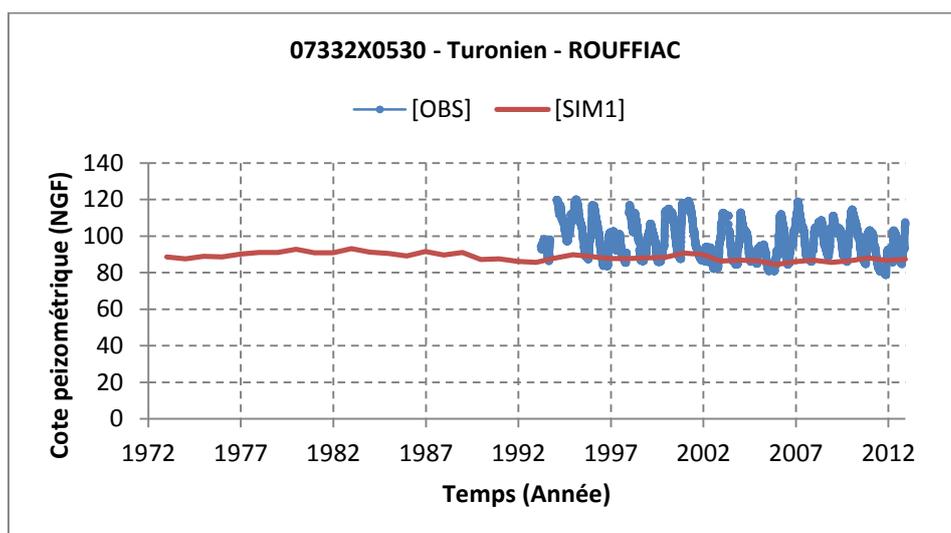
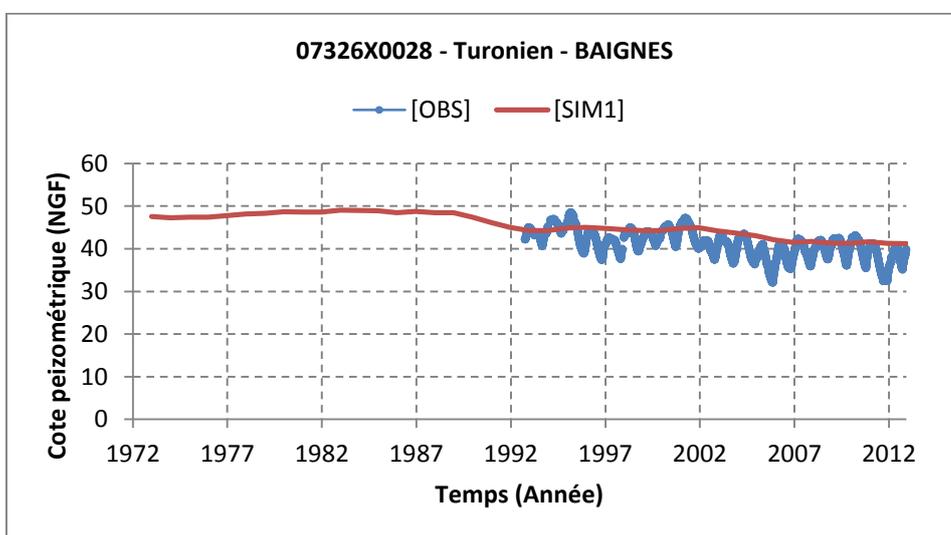
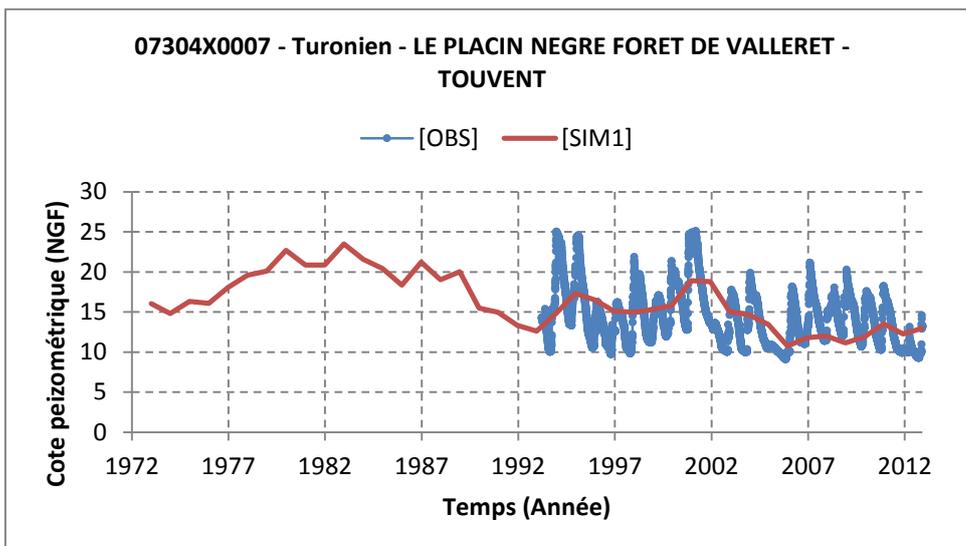


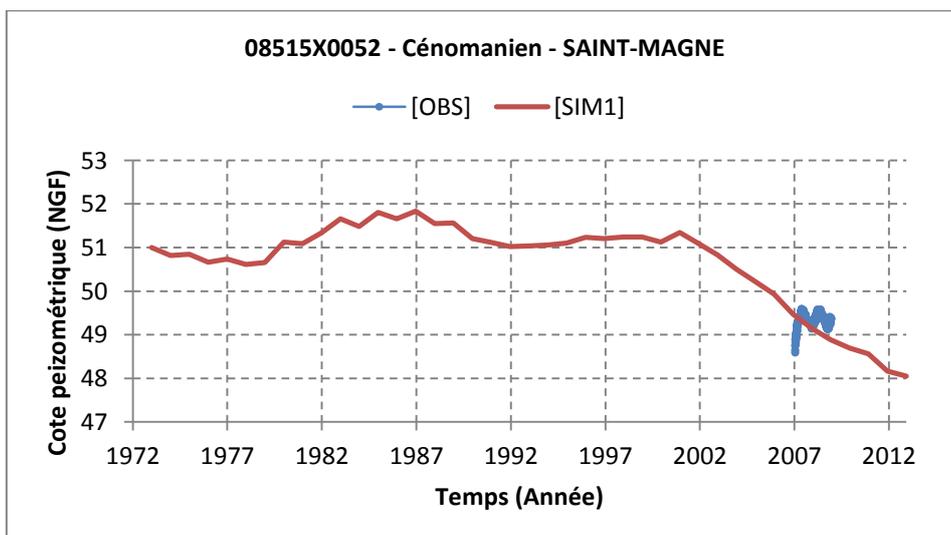
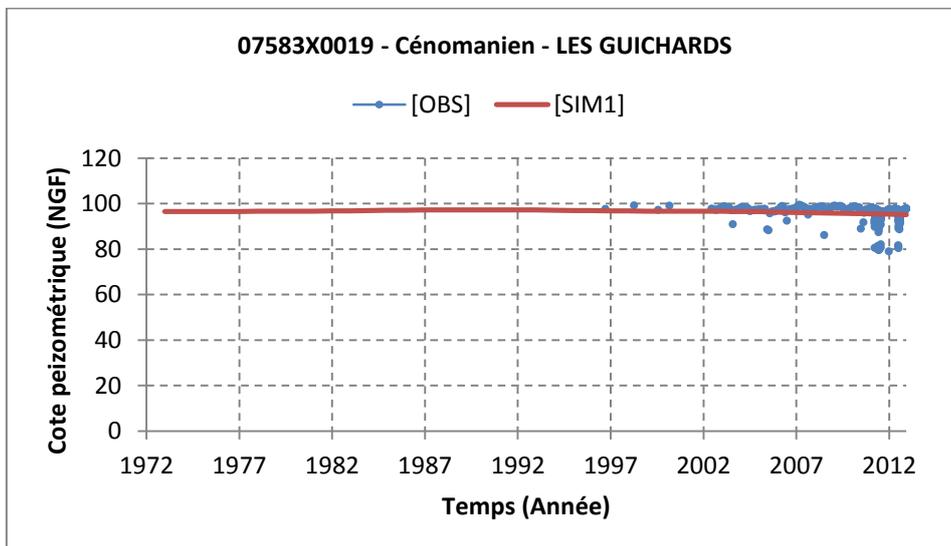
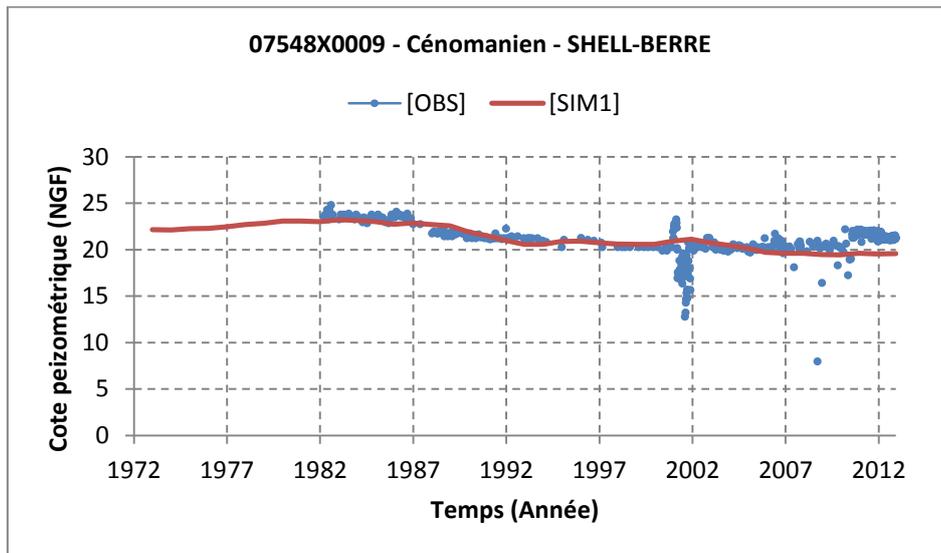


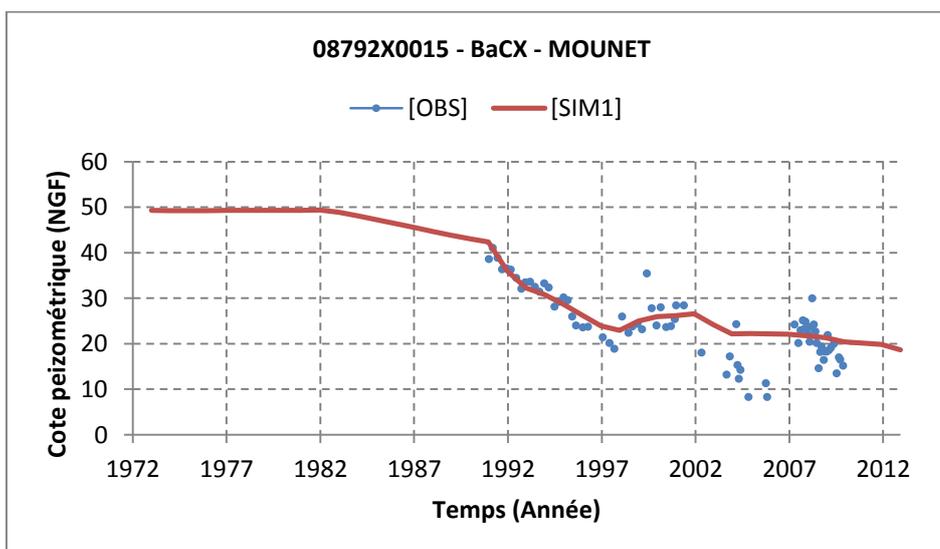
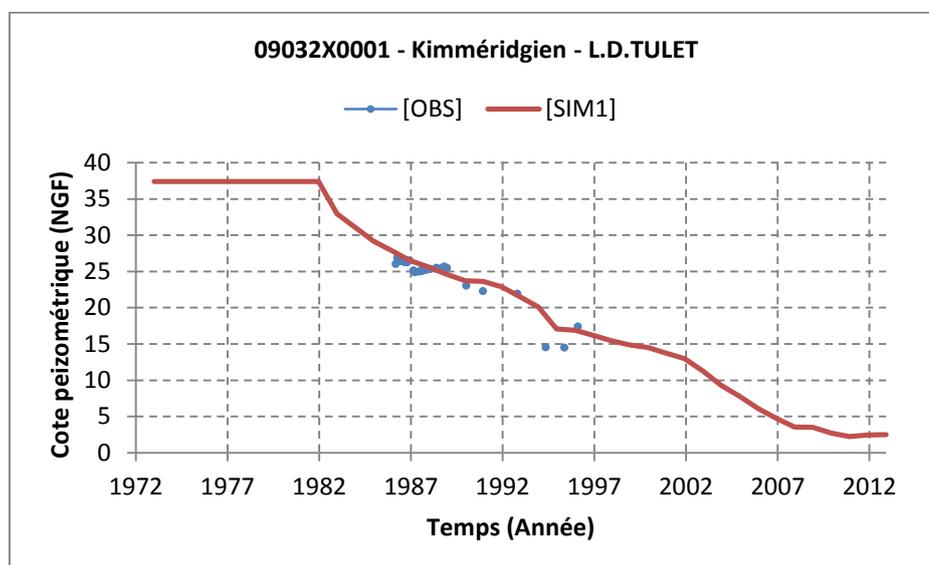
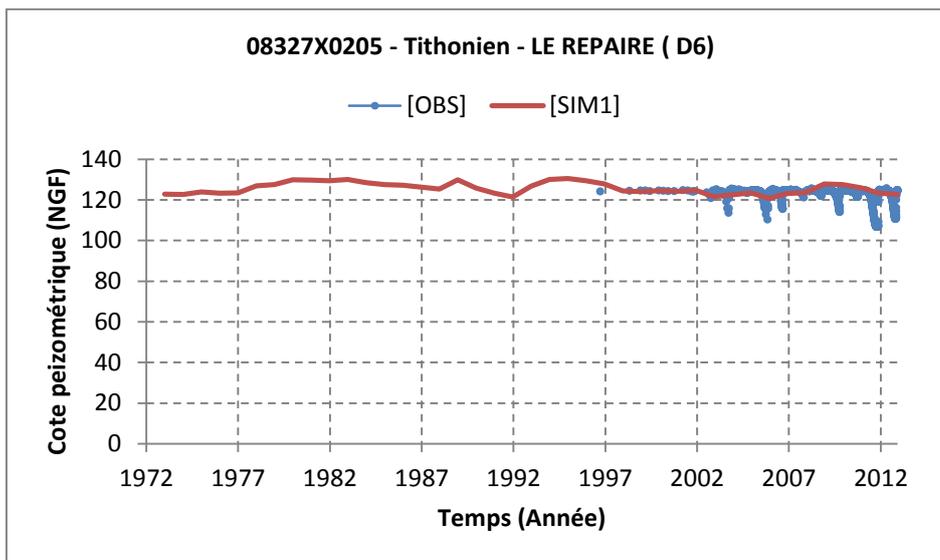


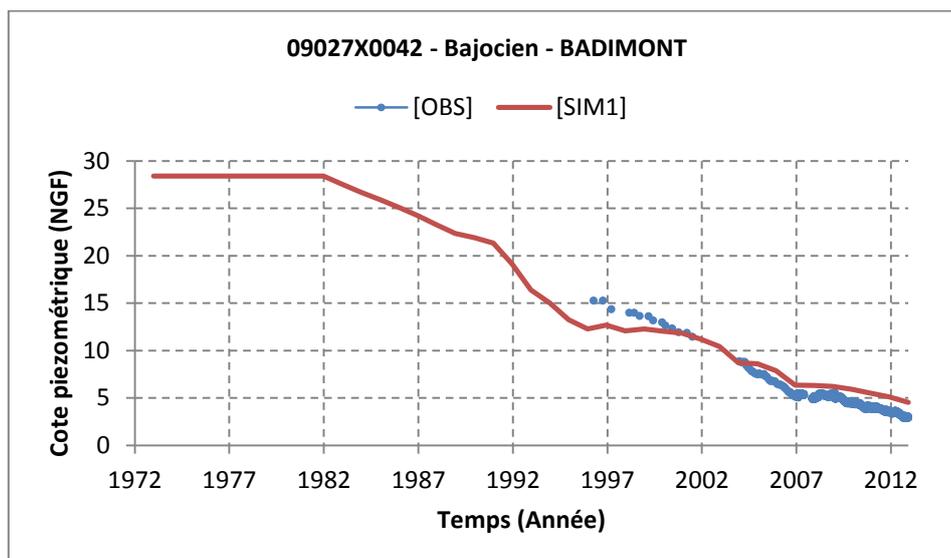
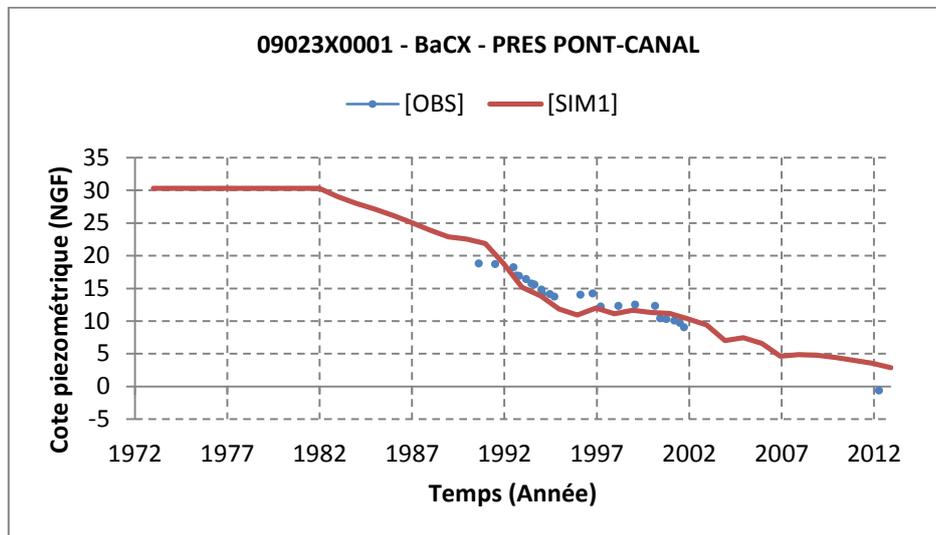
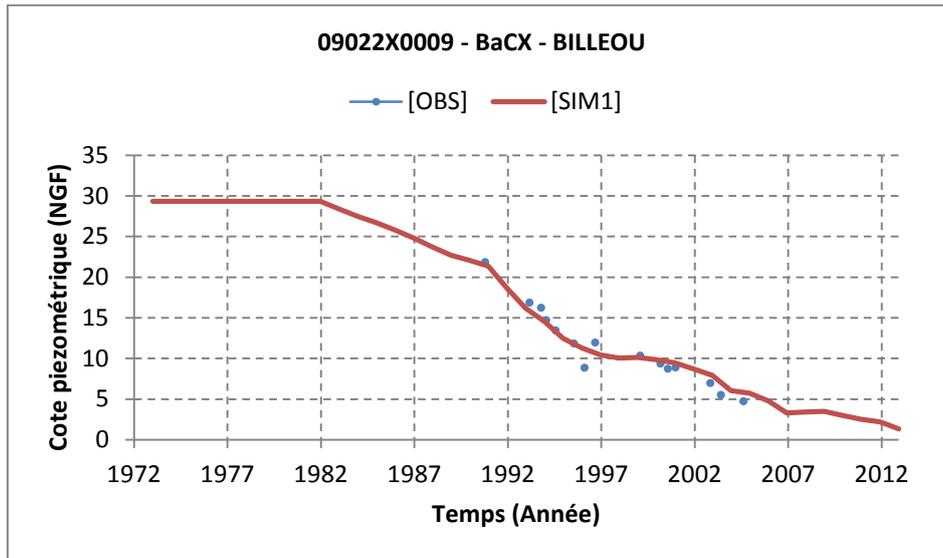






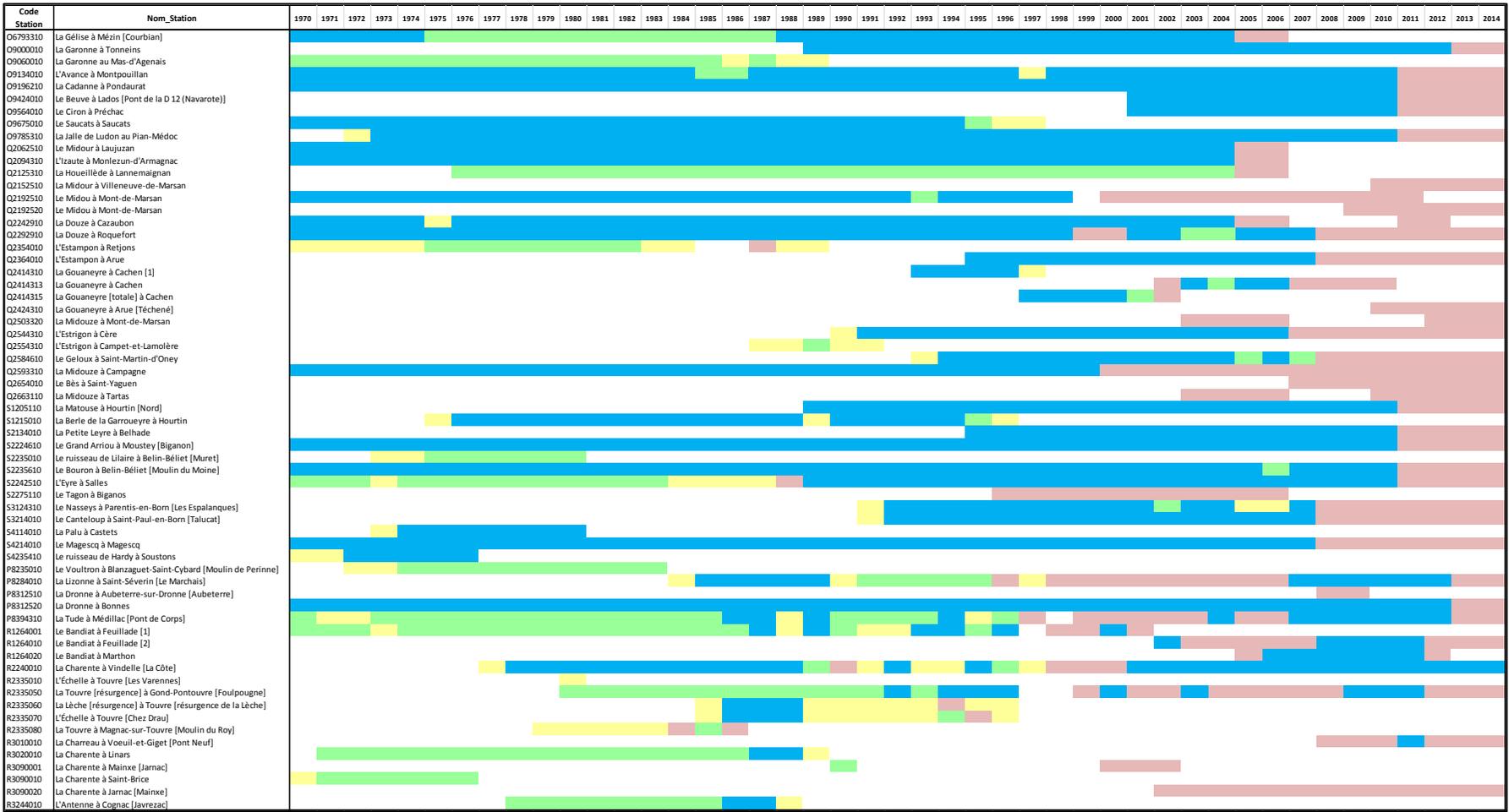






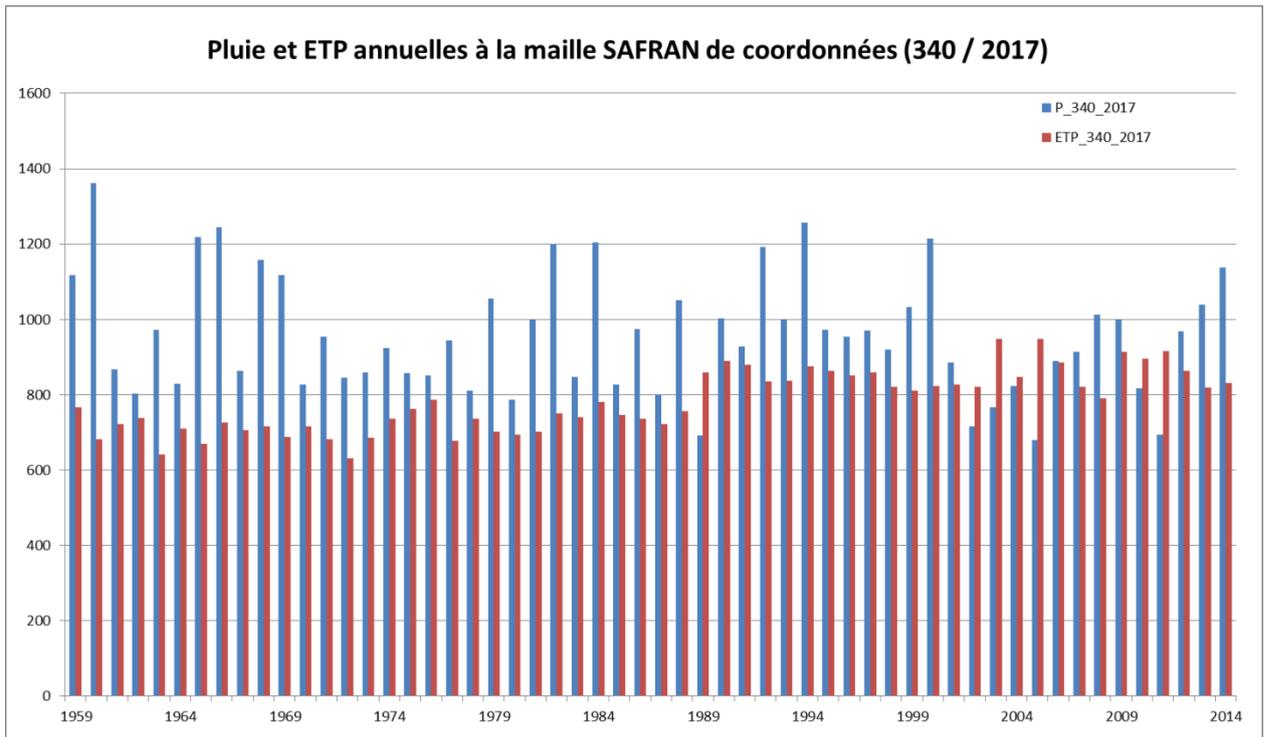
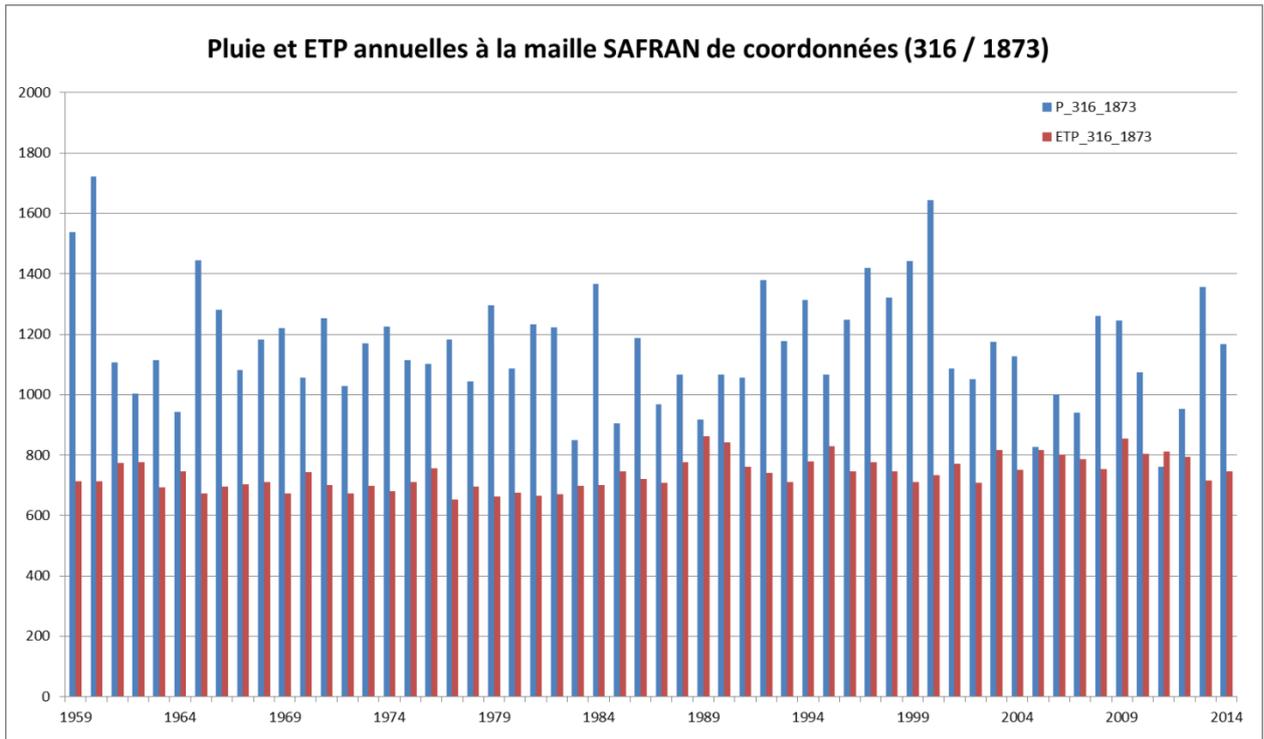
Annexe 5

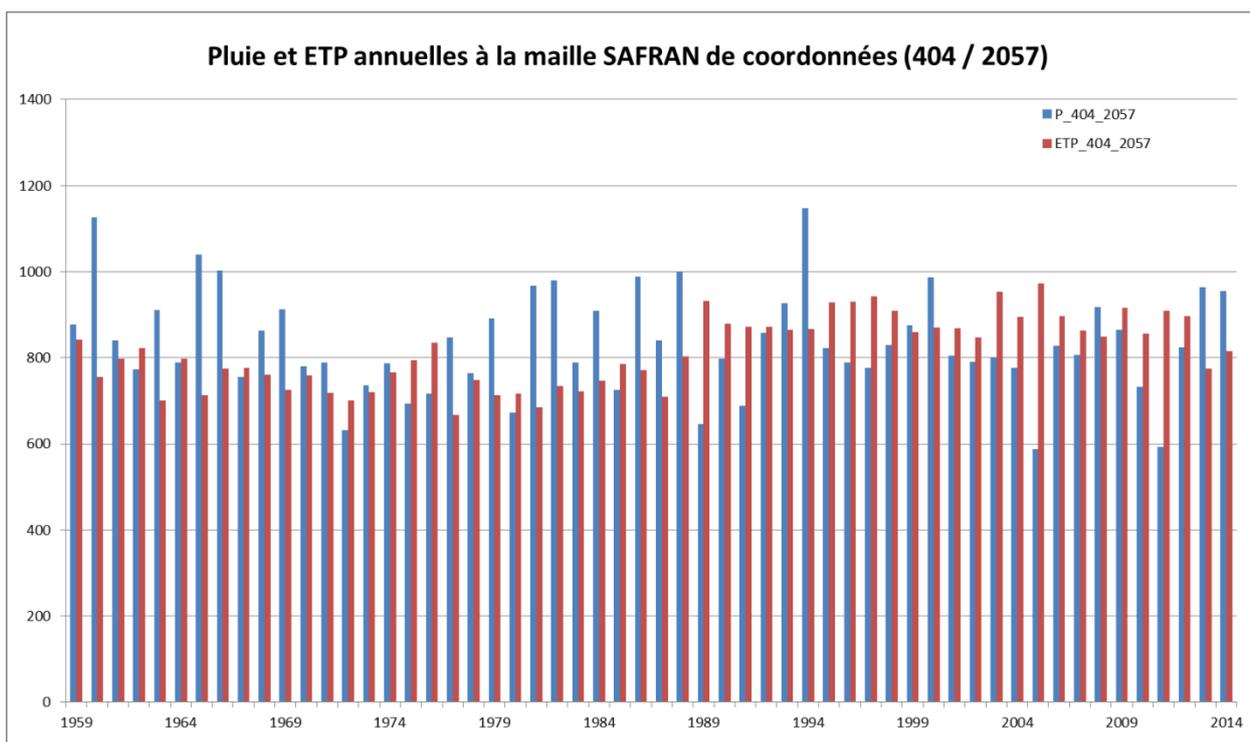
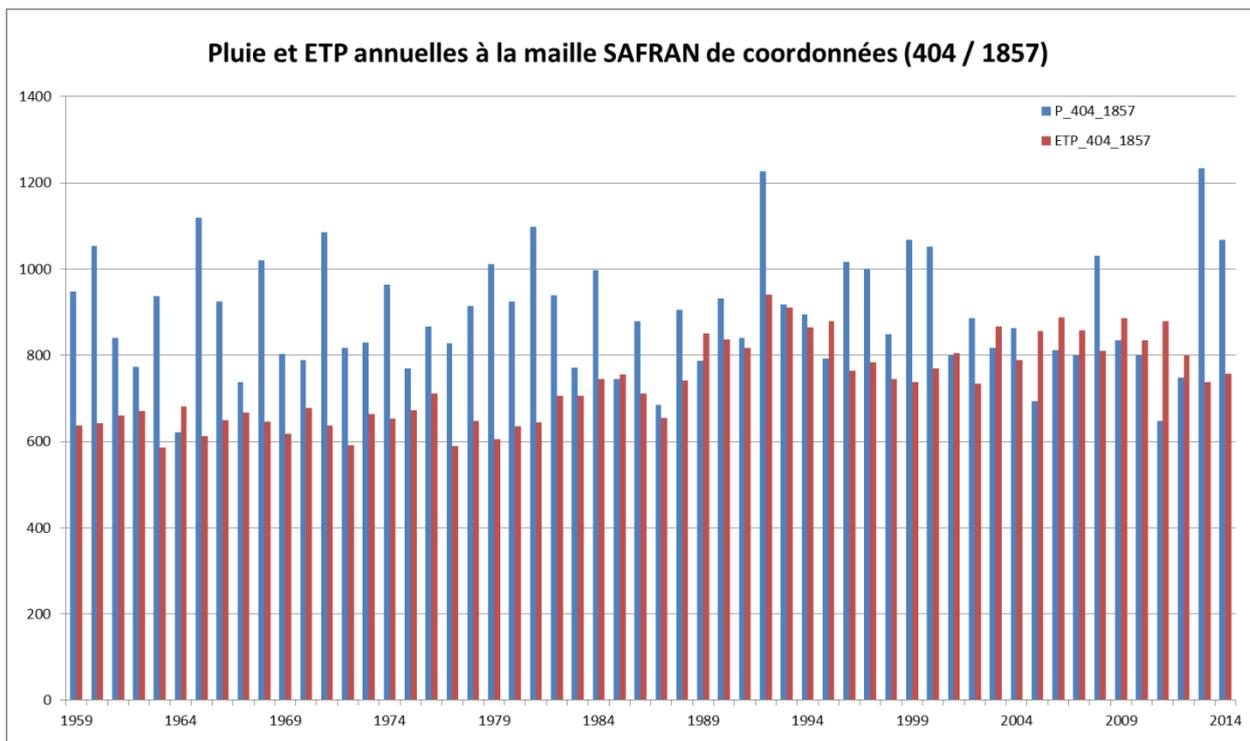
Liste des stations hydrométriques avec une mesure de débit sur le domaine d'extension du MONA

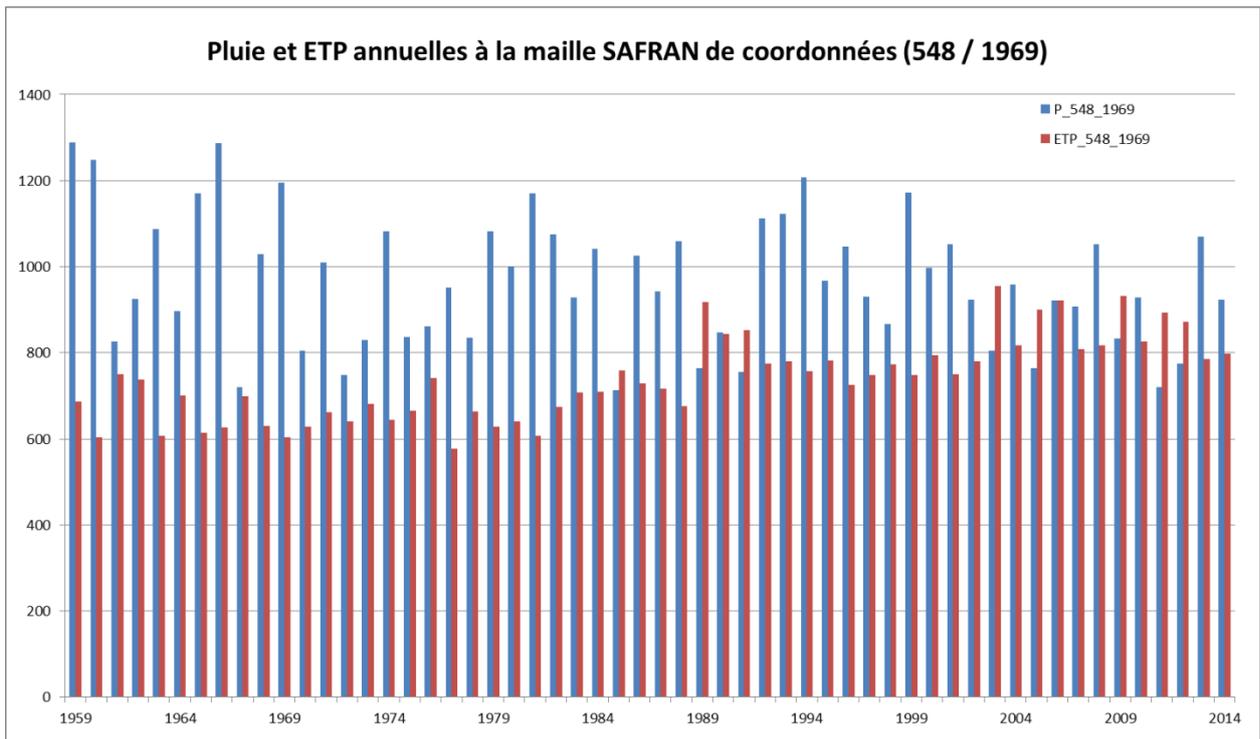
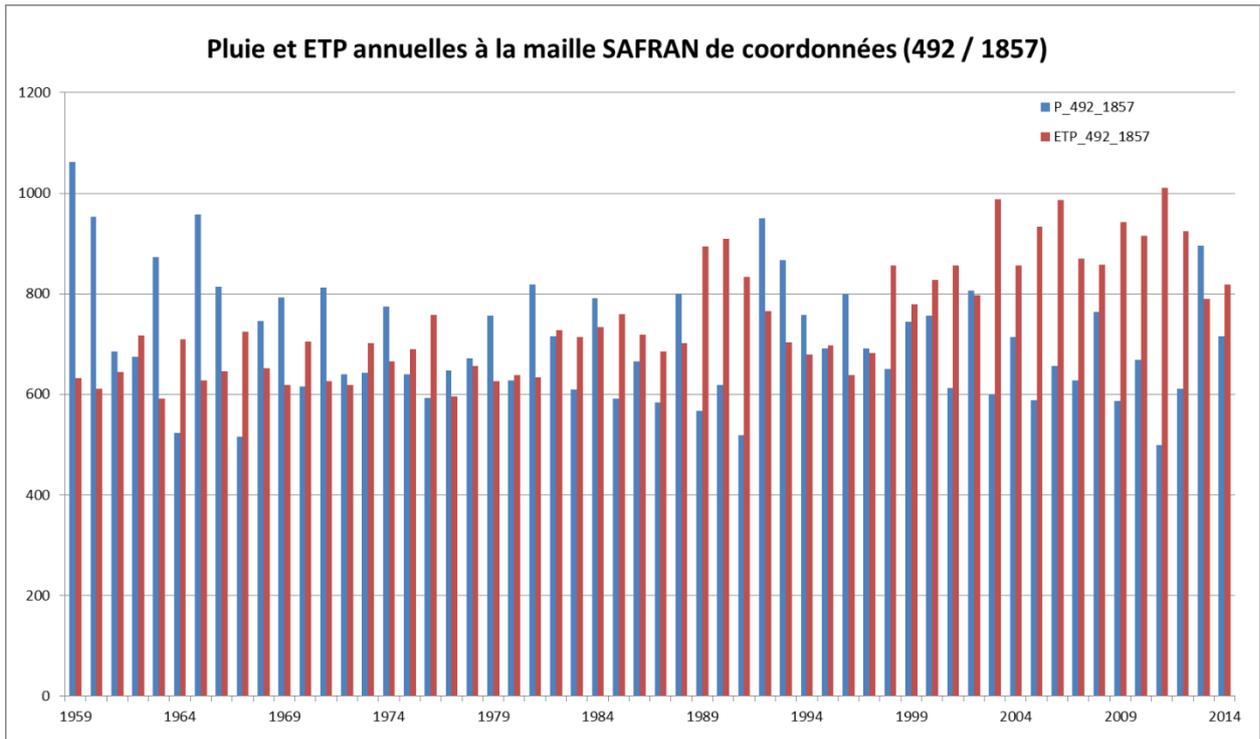


Annexe 6

Chroniques de données pluviométriques et d'évapotranspiration en six mailles de la grille SAFRAN de Météo-France







Annexe 7

Entités hydrogéologiques du MONA V4

	Code	Description
Modèle tertiaire	RECO	Formations de recouvrement et alluvions flandriennes
	QUAT	Formations du Quaternaires
	EPLS	Éponte au sommet du Langhien-Serravallien
	LASE	Aquifère du Langhien-Serravallien
	EPAQ	Éponte au sommet de l'Aquitainien
	AQUI	Aquifère de l'Aquitainien
	EPCM	Éponte Chattien-Miocène
	OLNP	Aquifère de l'Oligocène
	EPOL	Éponte à la base de l'Oligocène
	EOCS	Réservoir supérieur de l'Éocène
	EPES	Éponte à la base de l'Éocène supérieur
	EOCM	Aquifère de l'Éocène moyen
	EPEO	Éponte à la base de l'Éocène moyen
	EOCI	Réservoir inférieur de l'Éocène
	EPCA	Éponte au sommet du Campanien
Modèle crétacé	CAMP	Aquifère du Campanien
	EPCS	Éponte au sommet du Coniacien Santonien
	COST	Aquifère du Coniacien-Santonien
	EPTU	Éponte au sommet du Turonien
	TURO	Aquifère du Turonien
	EPCE	Éponte au sommet du Cénomaniens
	CENO	Cénomaniens
Modèle Jurassique	EPTI	Éponte au sommet du Tithonien
	TITH	Aquifère du Tithonien
	EPKI	Éponte au sommet du Kimméridgien
	KIMM	Aquifère du Kimméridgien
	EPCX	Éponte au sommet du réservoir du Bathonien-Callovio-Oxfordien
	BACX	Aquifère du Bathonien-Callovio-Oxfordien
	EPBJ	Éponte au sommet du Bajocien
	BAJO	Réservoir du Bajocien

Annexe 8

Fonctionnement du logiciel GARDENIA et principes de calage

Fonctionnement du logiciel GARDÉNIA

GARDÉNIA (modèle Global À Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des Niveaux Aquifères) est un modèle hydrologique global de bassins versants (Thiéry, 2003). Il en réalise le bilan hydrologique à partir de chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP), représentatives à l'échelle du bassin. Une fois calé sur les observations disponibles, le modèle permet de simuler l'évolution du débit à l'exutoire et/ou du niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente pour différentes chroniques de pluie et ETP.

Comme explicité sur l'illustration suivante, GARDÉNIA simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement) par une succession de trois⁴ réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premières dizaines de centimètres du sol (zone racinaire) dans lesquelles se produit l'évapotranspiration ;
- une zone intermédiaire qui répartit en deux composantes la pluie efficace provenant du réservoir sus-jacent : ruissellement et infiltration de l'eau dans la ZNS ;
- une ou deux zones aquifères qui correspondent aux écoulements lents.

Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (évapotranspiration ou écoulements) à chaque pas de temps.

Des prélèvements, injections, pertes ou apports de débits peuvent être introduits comme données d'entrée, sous forme de chroniques similaires à celles de la pluie et de l'ETP.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples, spécifiques à chaque réservoir (le tarissement des rivières et la baisse des niveaux de nappe sont rendus par des lois exponentielles décroissantes). Ces lois sont contrôlées par des paramètres (capacité de stockage du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc.) qui sont ajustés au cours d'une phase de calage semi-automatique (Rosenbrock, 1960) afin d'assurer une bonne adéquation entre débits et/ou niveaux simulés et mesurés.

Les données nécessaires sont :

- des séries temporelles de données « d'entrée » du modèle : pluie et évapotranspiration ;
- une ou deux série(s) temporelle(s) de données d'observation - chroniques piézométriques et/ou chroniques de débit - non nécessairement continues, mais couvrant une période concomitante aux données d'entrée. La comparaison des « sorties » simulées par le modèle et des séries observées sur le terrain permet d'orienter et d'ajuster la phase de calage

⁴ Un quatrième réservoir souterrain peut être utilisé lorsque deux dynamiques distinctes d'écoulement des eaux souterraines coexistent dans le bassin versant étudié.

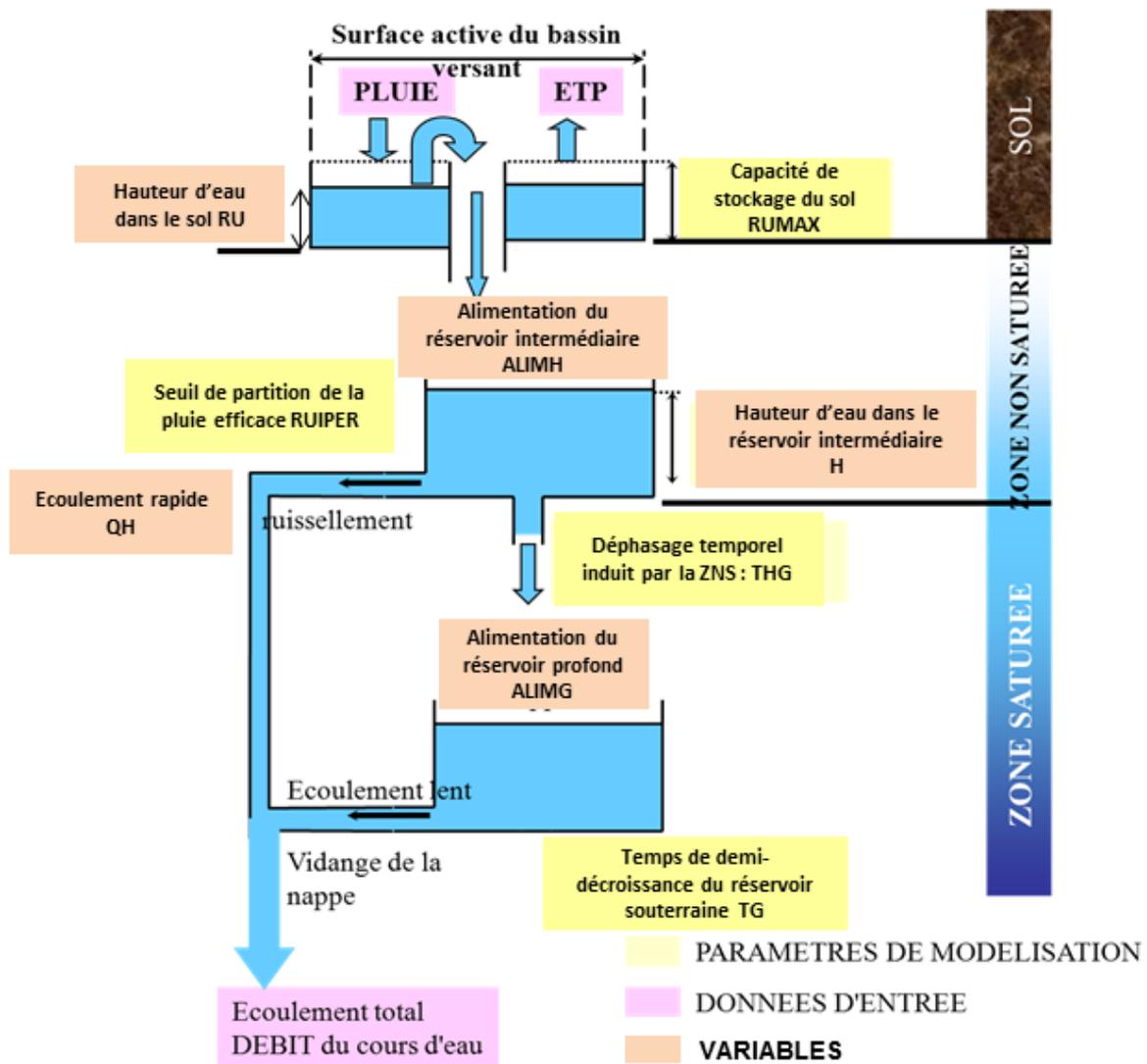


Schéma fonctionnel du modèle GARDENIA

- Vidange du réservoir superficiel

Si la hauteur d'eau du réservoir superficiel (RU) dépasse la valeur de rétention maximale (RUMAX) : $ALIMH = RU - RUMAX$, sinon $ALIMH = 0$

- Vidange du réservoir intermédiaire

Percolation dans le réservoir profond : $ALIMG = H \cdot dt / THG$

Écoulement à l'extérieur sous forme de composante rapide : $QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER \cdot H)$

- Vidange du réservoir profond

Écoulement vers l'exutoire : $QG = G \cdot dt / TG$

Limites et incertitudes des modélisations GARDENIA

Incertitudes liées à l'appréciation de la validité du calage

Comment décider qu'une simulation est « satisfaisante » ?

Il est difficile de répondre à cette question de façon générale. Rappelons tout d'abord qu'un modèle n'est, au mieux, qu'une représentation acceptable de la relation entre ses entrées et ses sorties.

La qualité d'une simulation est essentiellement basée sur des appréciations visuelles, et son évaluation dépend à la fois du but qu'on s'est fixé, de l'appréciation de la fiabilité des données, du bilan des différents flux et de la vraisemblance des paramètres de calage.

Il est illusoire de rechercher un très bon calage si la qualité des données est douteuse.

Le calage est optimisé par le modèle, mais ce dernier ne peut pas prendre en compte l'ensemble des informations dont dispose l'hydrogéologue. En pratique, le calage dépend du modélisateur et de sa capacité à exploiter les performances numériques de l'ordinateur.

Incertitudes liées au choix de la durée de modélisation

Pour identifier le fonctionnement d'un système, il faut en avoir observé plusieurs cycles hydrologiques. Si cinq ou six ans sont amplement suffisants pour un petit bassin à fort ruissellement, il faut souvent dix à quinze années de mesure, voire quelquefois plus, pour identifier des fluctuations piézométriques pluriannuelles dans un bassin à forte inertie.

Il est en outre très souhaitable de disposer de chroniques de données contrastées, associées à de situations hydroclimatologiques et hydrauliques variées (hautes eaux, basses eaux).

La règle d'usage veut qu'un modèle ne puisse être considéré comme correctement calé avant que toutes ses composantes aient fonctionné plusieurs fois et produit des contributions significatives, conformes aux observations de terrain.

Les 15 modèles de recharge ont été calés sur une période allant jusqu'à une quarantaine d'années et couvrant des conditions climatiques variées. Des calages sur des périodes plus courtes peuvent conduire à de meilleurs coefficients d'ajustement mais ils se révèlent en général moins robustes sur de longues périodes.

Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux

Malgré les performances des méthodes d'optimisation utilisées par GARDÉNIA, le choix des valeurs initiales des paramètres de calage est essentiel. Il peut parfois arriver que plusieurs jeux de paramètres produisent des simulations quasi-équivalentes (non-unicité du calage). C'est alors la connaissance hydrogéologique du terrain qui guide le choix du jeu de paramètres le plus pertinent. En tout état de cause, le résultat d'une modélisation ne peut être dissocié du contexte hydrogéologique du bassin étudié.

Annexe 9

Modélisations GARDENIA : tableau récapitulatif des résultats par bassin versant

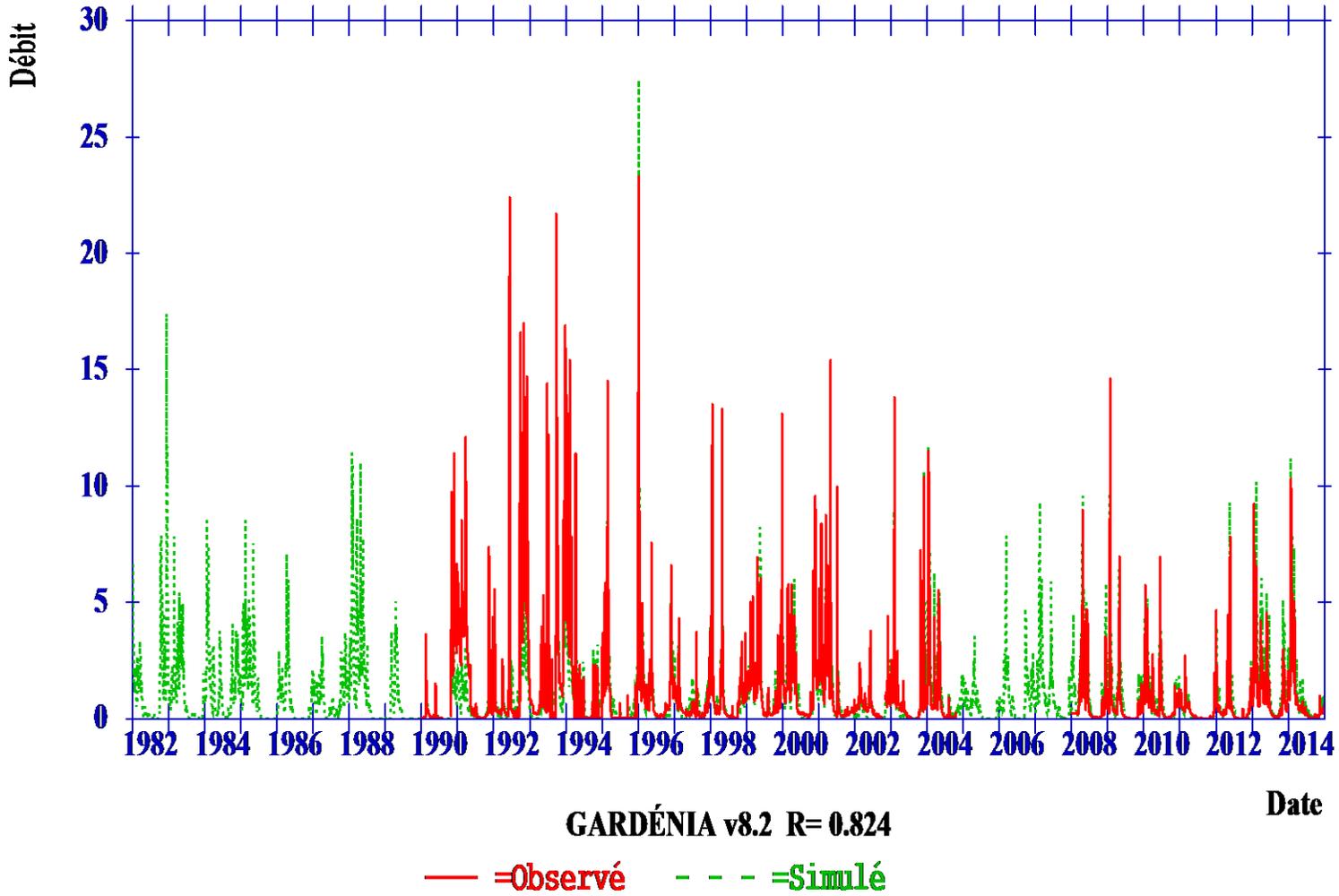
Station débit	Bassin versant	Géologie du Bassin Versant	Période P/ETP	Superficie	Nash Q	Nash H	Rsup_Progr	RUIPER	T1/2_perco	T1/2_decr	Pluie	ETR	Pluie_Effic	Q_rapide	Q_souterr1	Q_souterr2	Dif_Stock	%Q_souterr	%Q_rapide	Alim_sout1	QMoy Obser	Qmoy Simul	Ecart Qmoy	Débit extérieur	Débit extérieur
Code HYDRO	-	Codes MONA V4	-	km ²	-	-	mm	mm	mois	mois	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	%	%	mm	m3/s	m3/s	% Qmoy obs	m3/s	% Qmoy obs
P2454310	L'Oujoux	60% TITH, 20% épones, 20% RECO	1981-2014	126	0.68	0.62	212.7	8.1	1.03	0.14	894.2	575.6	320.3	223.7	97.1	0	-2.2	30.3	69.8	97.1	1.09	1.12	3.0%	-0.25	22%
Q2094310	L'izaute	EPHE (75%) + EPAQ (25%)	1965-2014	111	0.72	0.62	200.3	6.9	0.45	15.0	855.1	538.6	317.6	200.6	119.1	0	-3.2	37.3	63.2	117.2	0.85	0.85	0.0%	-0.31	36%
O6445010	La Masse de Prayssas	EPCM 100%	1971-2014	56.5	0.69	-		4.7	2.20	0.05	789.2	583.7	206.7	160.6	46.2	0	-1.3	22.3	77.7	46.2	0.29	0.30	3.1%	-0.06	21%
P9414010	Le Moron	EPES 93.4% + EPOL 6.6%	1959-2014	31.4	0.77	-	280.1	1.1	5.62	0.05	848.6	572.3	278.0	261.7	16.8	0	-2.1	6.0	94.1	16.8	0.29	0.29	1.3%	-0.02	7%
P5404010	L'Eyraud	EPOL (73,5%), EPES (7%), EOC-INF (15%), CAMP (3%)	1959-2014	73.5	0.73	-	278.9	6.3	0.74	15.0	866.0	586.7	281.1	191.9	91.0	0	-3.5	32.2	68.3	89.7	0.50	0.50	0.0%	-0.15	30%
S2134010	La Petite Leyre	QUAT 100%	1995-2014	403	0.89	-	294.6	47.6	1.40	15.0	989.9	618.6	371.5	182.4	188.3	0	0.6	50.8	49.1	189.0	3.36	3.39	0.9%	-1.10	32%
S4214010	Le Magescq	QUAT 100%	1967-2014	60	0.72	-	340.4	157.9	0.90	15.0	1145.0	622.3	523.9	147.8	378.9	0	-4.0	71.9	28.2	377.4	1.06	1.07	0.5%	0.07	6%
S3214010	Le Canteloup	QUAT 100%	1986-2014	155	0.87	-	290.1	31.3	2.67	15.0	1058.0	630.7	427.6	284.5	142.7	0	0.0	33.4	66.5	142.7	2.22	2.19	1.4%	0.05	2%
P4254010	La Beune	COST (100%)	2001-2014	51	0.91	0.65	163.1	86.5	2.33	12.7	836.0	555.9	280.1	115.4	169.2	0	-4.5	59.4	41.2	164.9	0.19	0.19	0.6%	-0.24	128%
O2825010	Le Pest	EPAQ (100%)	1965-2014	19.8	0.62	-	232.3	1.0	4.57	15.0	695.4	595.4	100.9	92.0	9.0	0	-0.8	8.9	91.1	9.0	0.07	0.06	10.7%	-0.002	3%
R3010010	La Charreau	CONIACIEN-TURONIEN (69.7%)	1993-2014	48.7	0.80	-		18.1	1.16	14.4	884.1	700.2	190.9	98.5	95.6	0	-10.2	49.2	51.6	94.6	0.27	0.26	3.5%	-0.01	5%
P2315020	La Borrière	BACX (80.2%)	1996-2014	121.8	0.78	0.67	150.9	40.7	0.52	0.05	886.2	555.6	332.7	121.4	111.0	102.0	-3.7	63.7	36.5	212.9	1.33	1.30	2.7%	0.10	8%
O8190630	Le Girou	DOGGER (100%)	1991-2014	22.6	0.62	-	97.0	10.0	0.46	0.05	849.1	520.7	328.6	193.4	135.0	0	0.0	41.1	58.9	135.0	0.36	0.20	45.1%	-0.01	3%
O8190630	Le Girou	DOGGER (100%)	1991-2014	41.95	0.75	-	181.0	998.0	0.05	0.06	849.1	520.7	284.3	2.1	91.6	190.5	-0.7	99.3	0.7	282.1	0.36	0.32	11.3%	0.001	0%
R4122523	Le Né	EPES (77.8%) - CAMP (14.4%)	1996-2014	602	0.89	-	222.6	5.0	5.38	0.07	817.5	589.1	229.7	197.0	33.0	0	-1.6	14.3	85.8	33.0	3.95	3.75	5.0%	-0.59	16%
O8584010	La Lède	EPOL (61%) EOC et COST à l'amont	1966-2014	411	0.73		318.9	1.8	2.12	13.0	802.2	577.7	225.5	194.7	31.1	0	-1.2	13.8	86.3	31.0	2.27	2.59	14.2%	-0.30	12%

Annexe 10

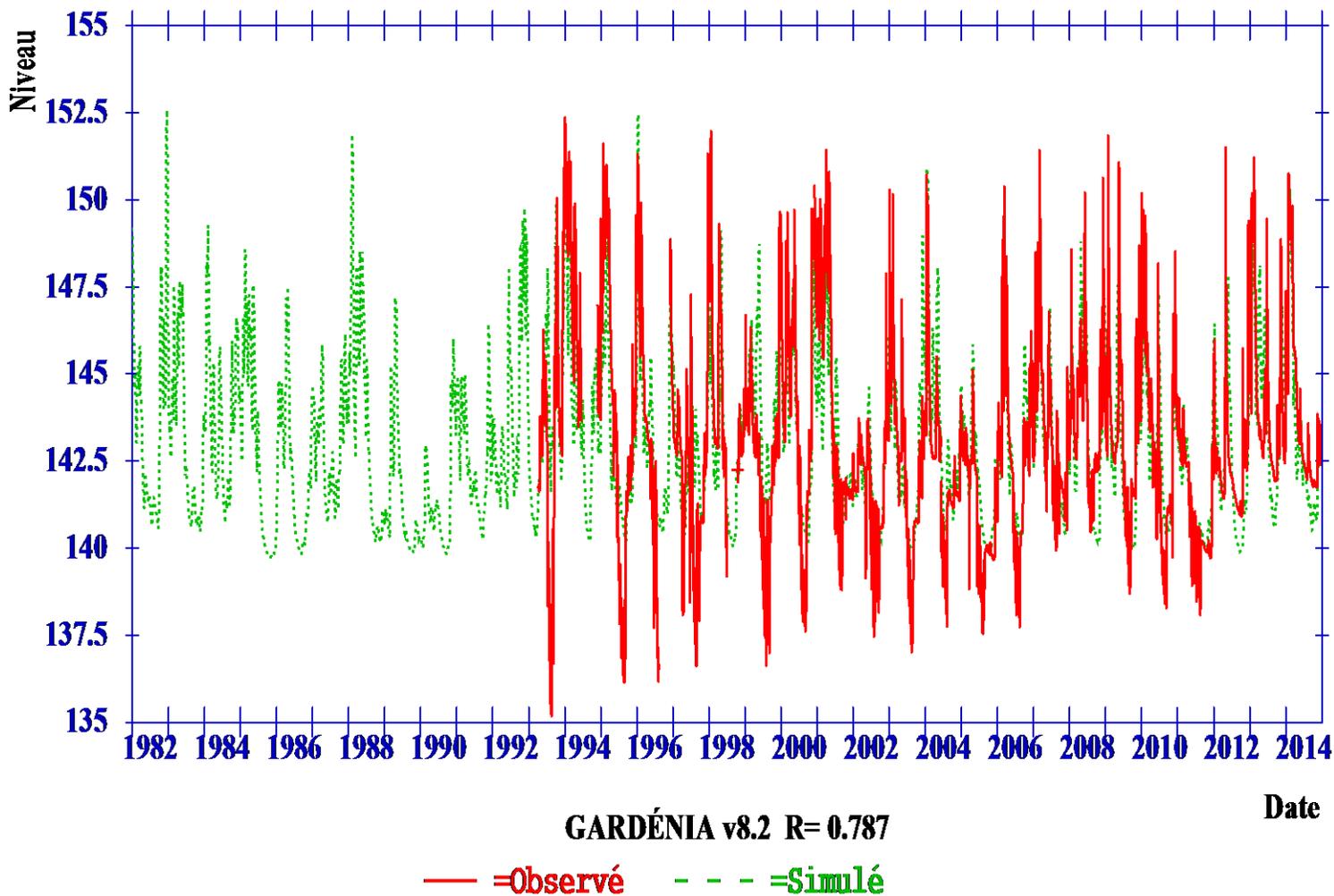
Modélisations GARDENIA : chroniques de calage

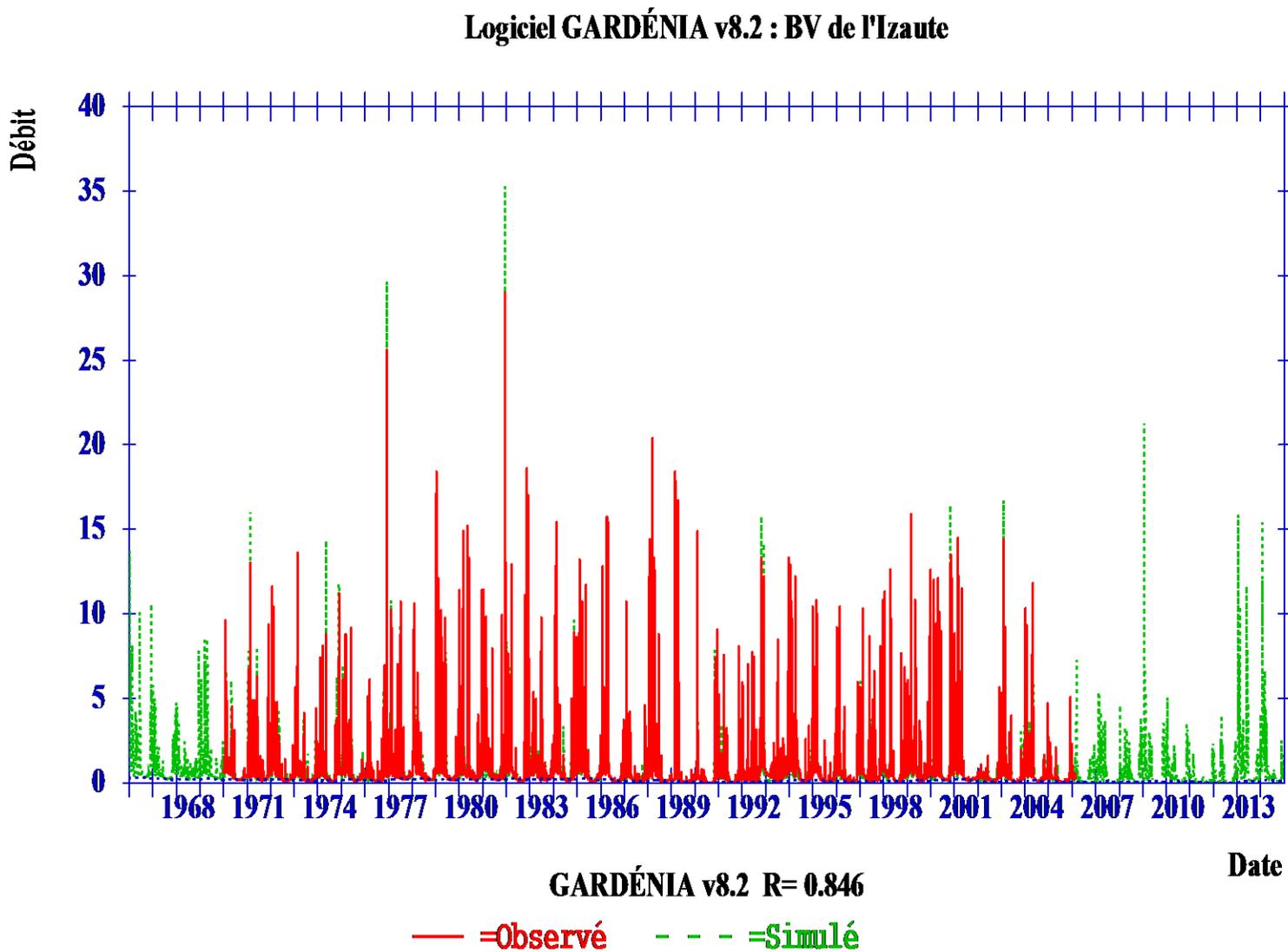
Dans les figures qui suivent, les débits des cours d'eau sont systématiquement exprimés en m^3/s et les niveaux piézométriques en m NGF.

Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de l'Ourajoux

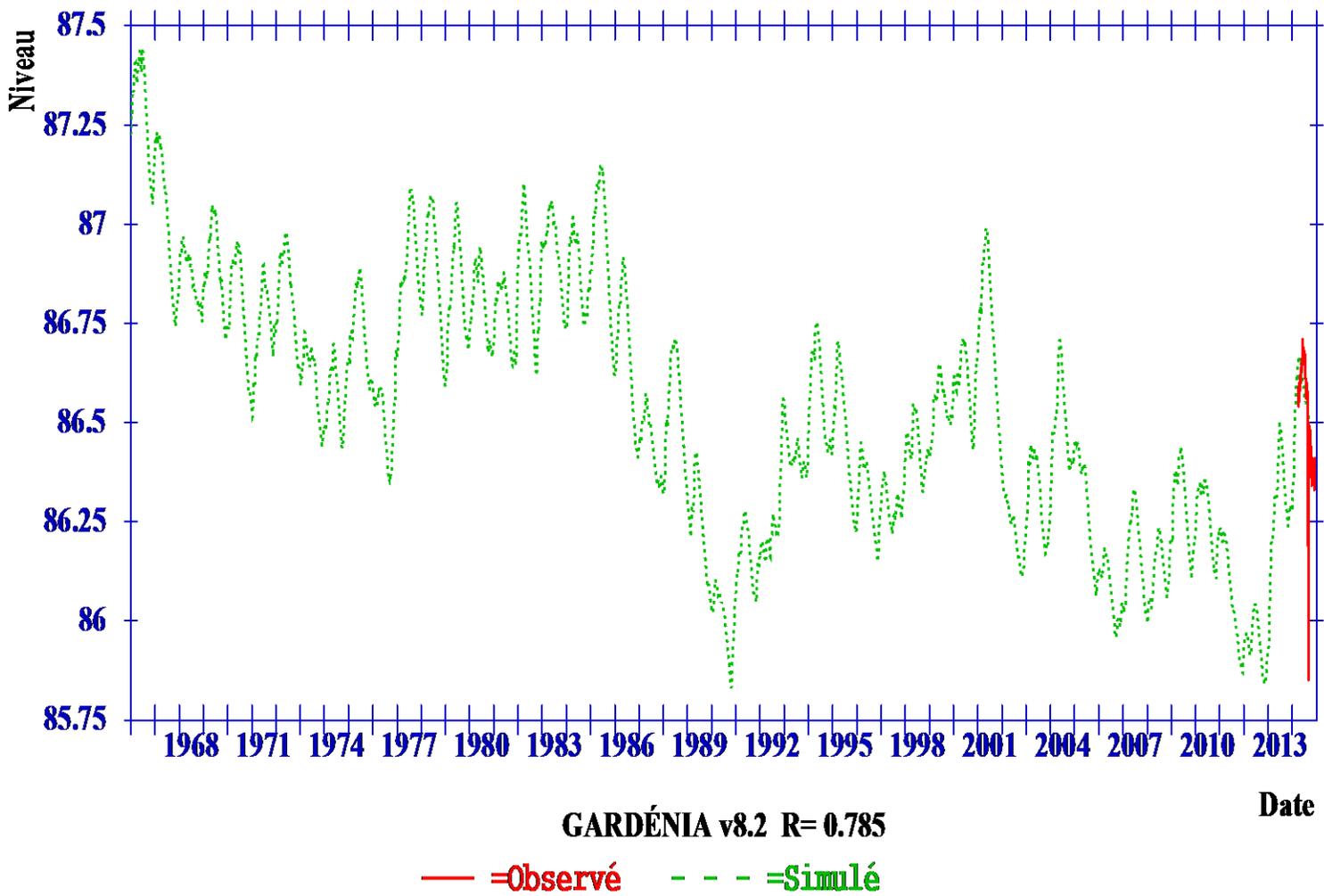


Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de l'Ourajoux

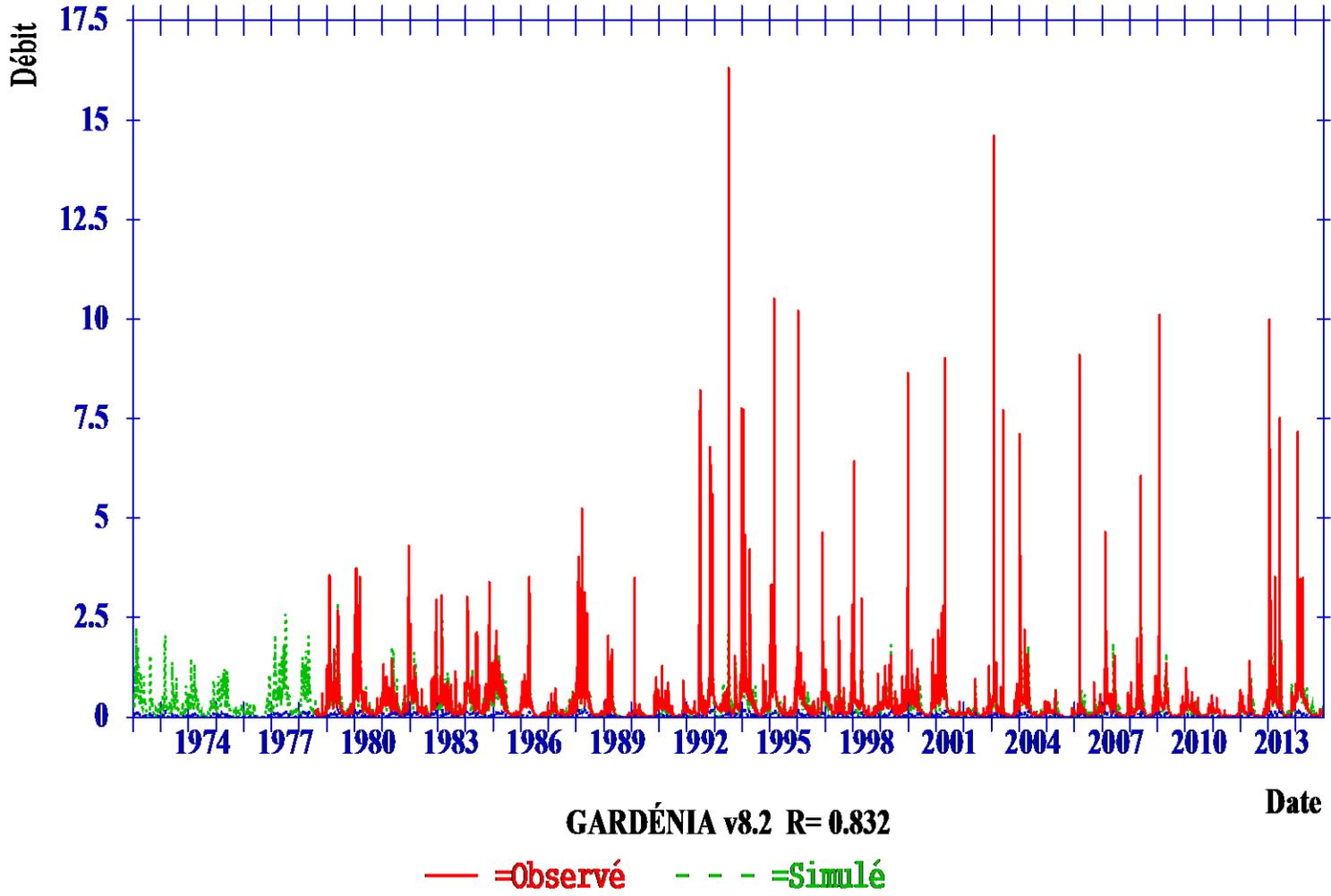




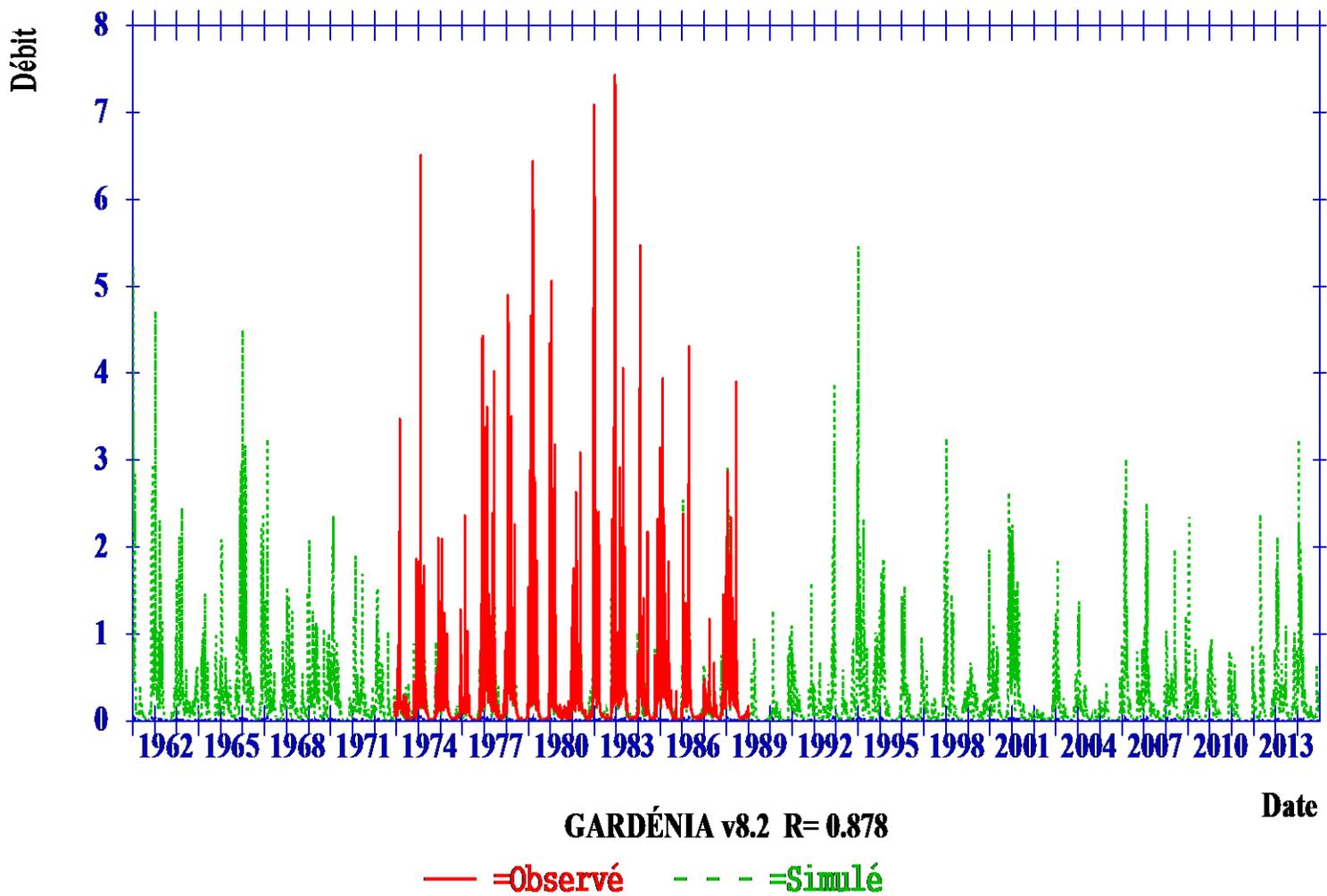
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de l'Isaute



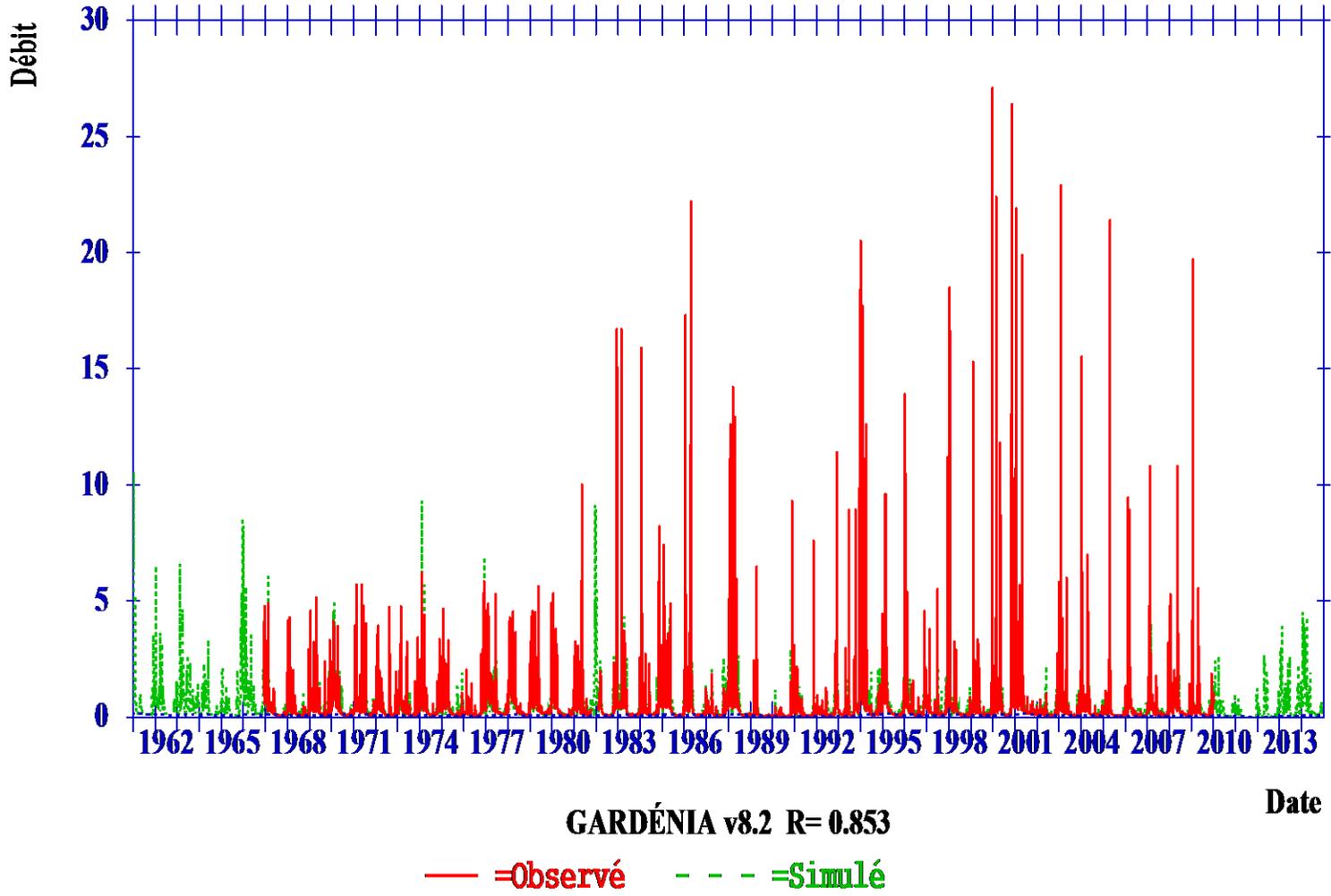
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Masse de Prayssas



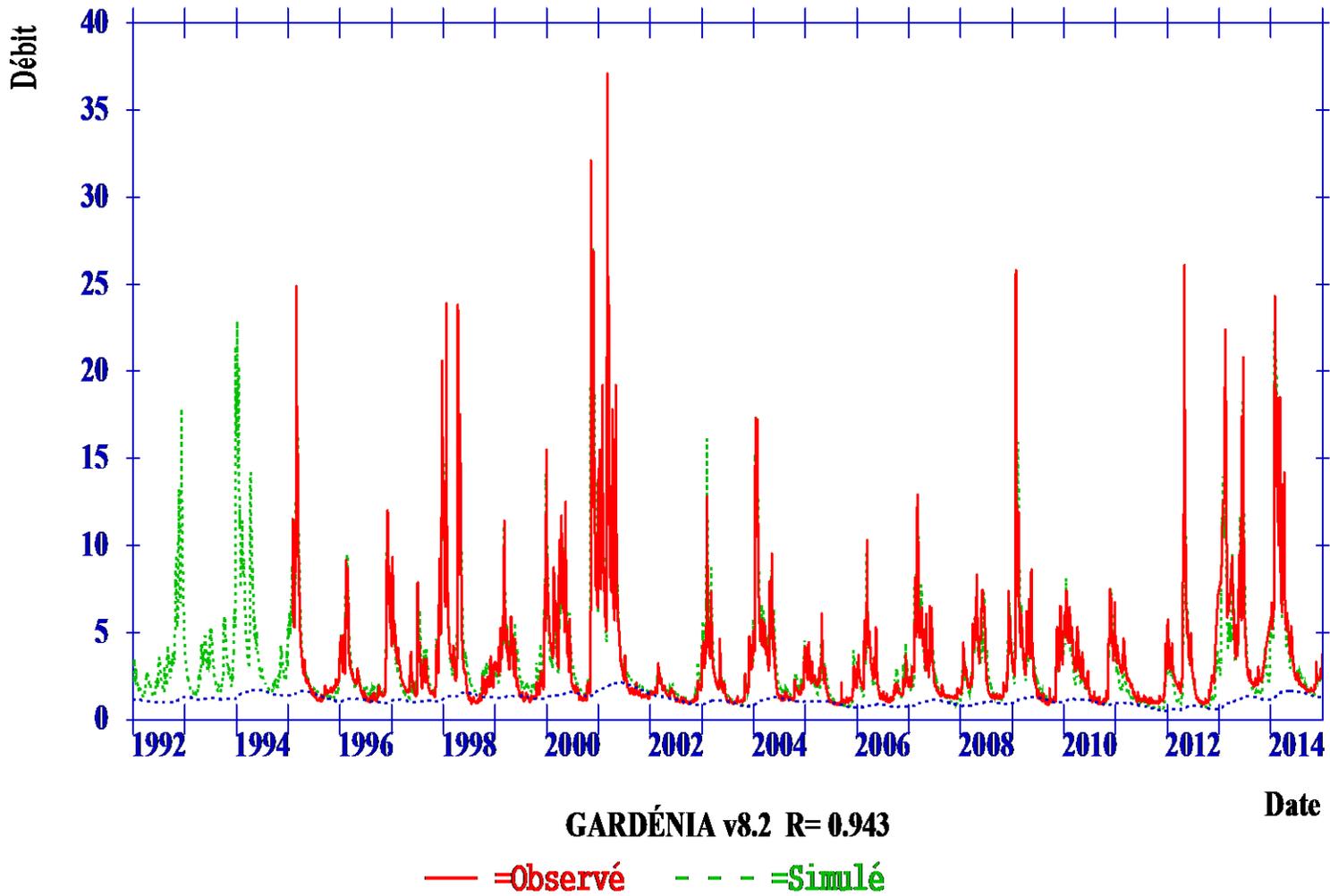
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Moron



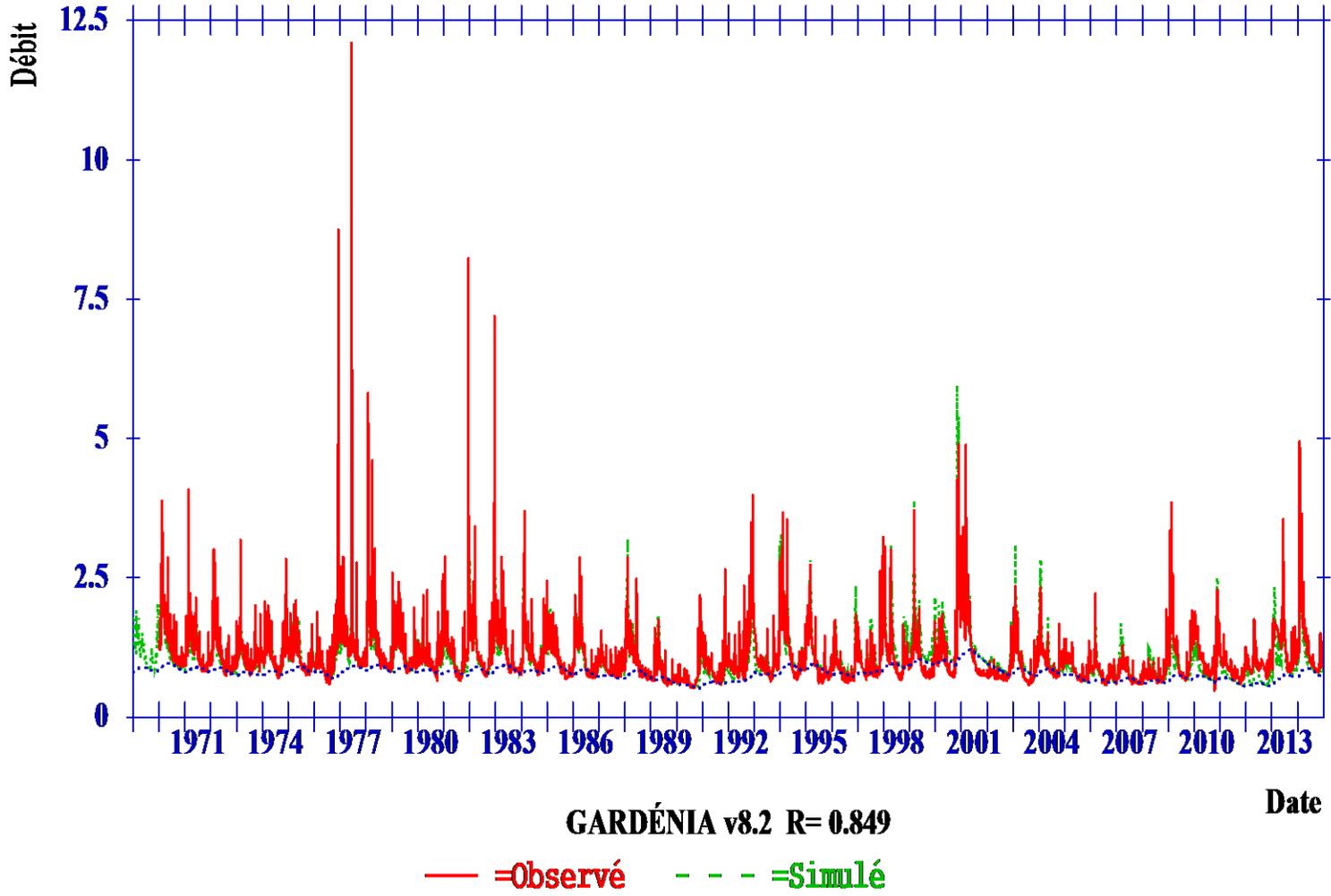
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de l'Eyraud



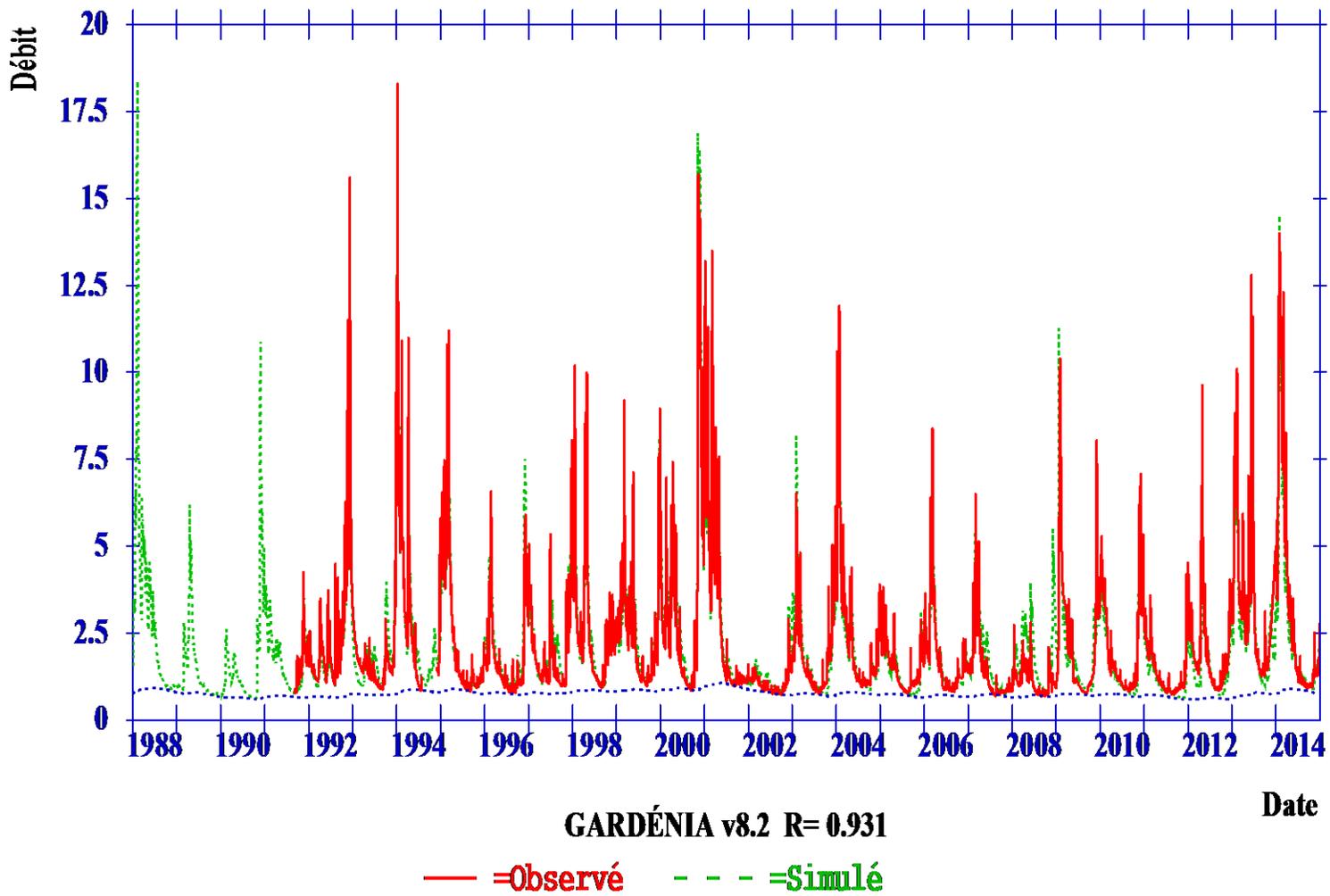
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de la Petite Leyre



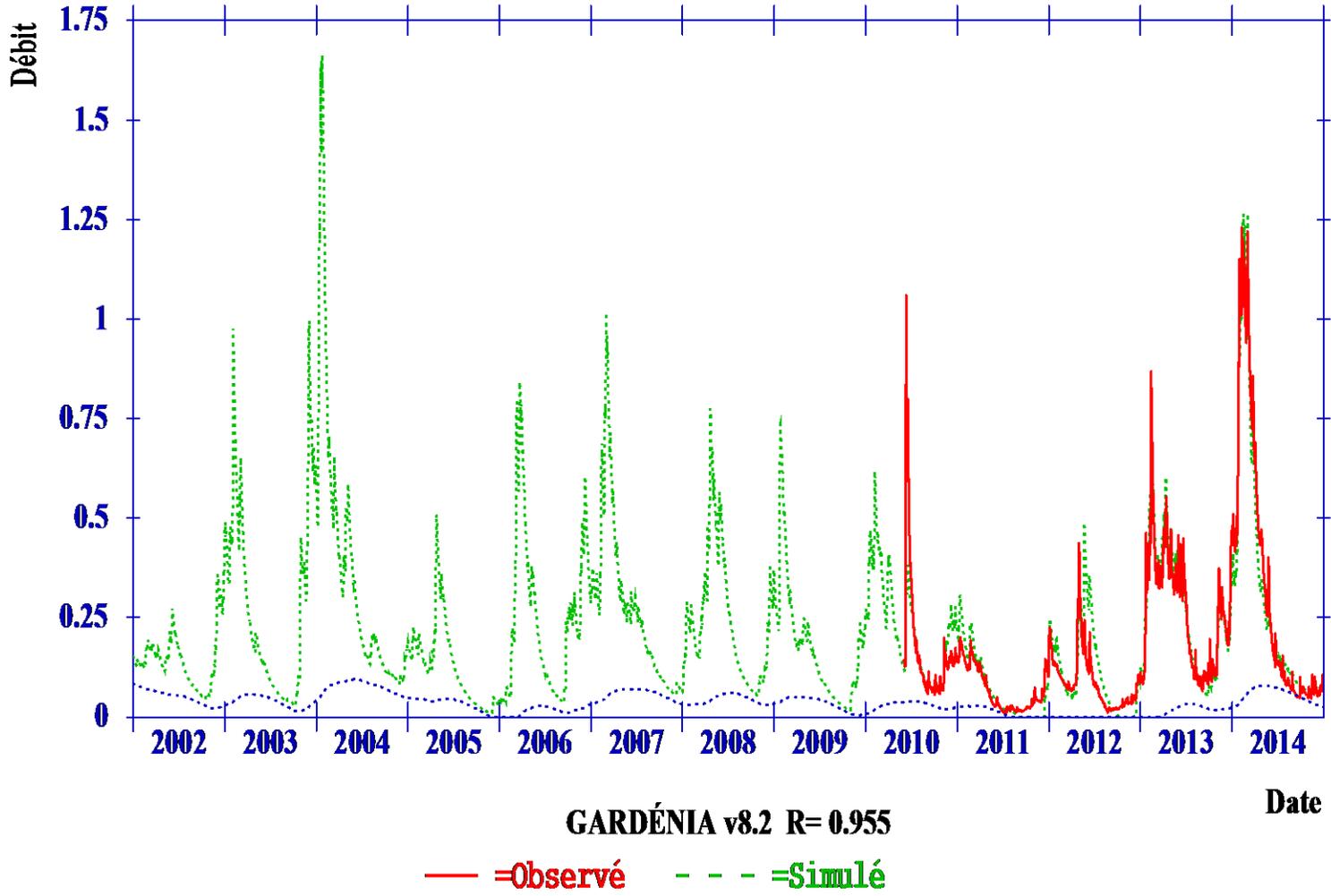
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Magescq



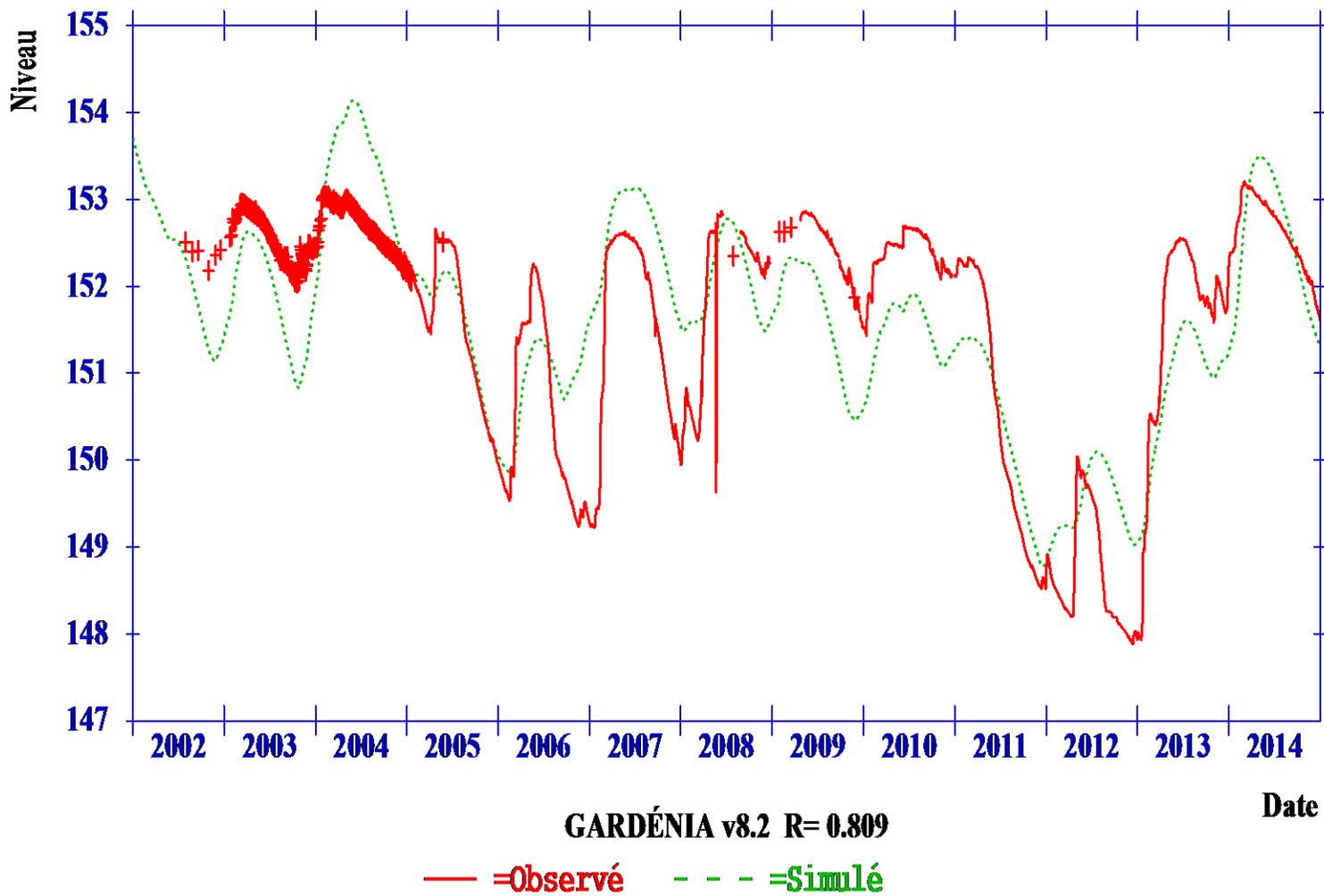
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Canteloup



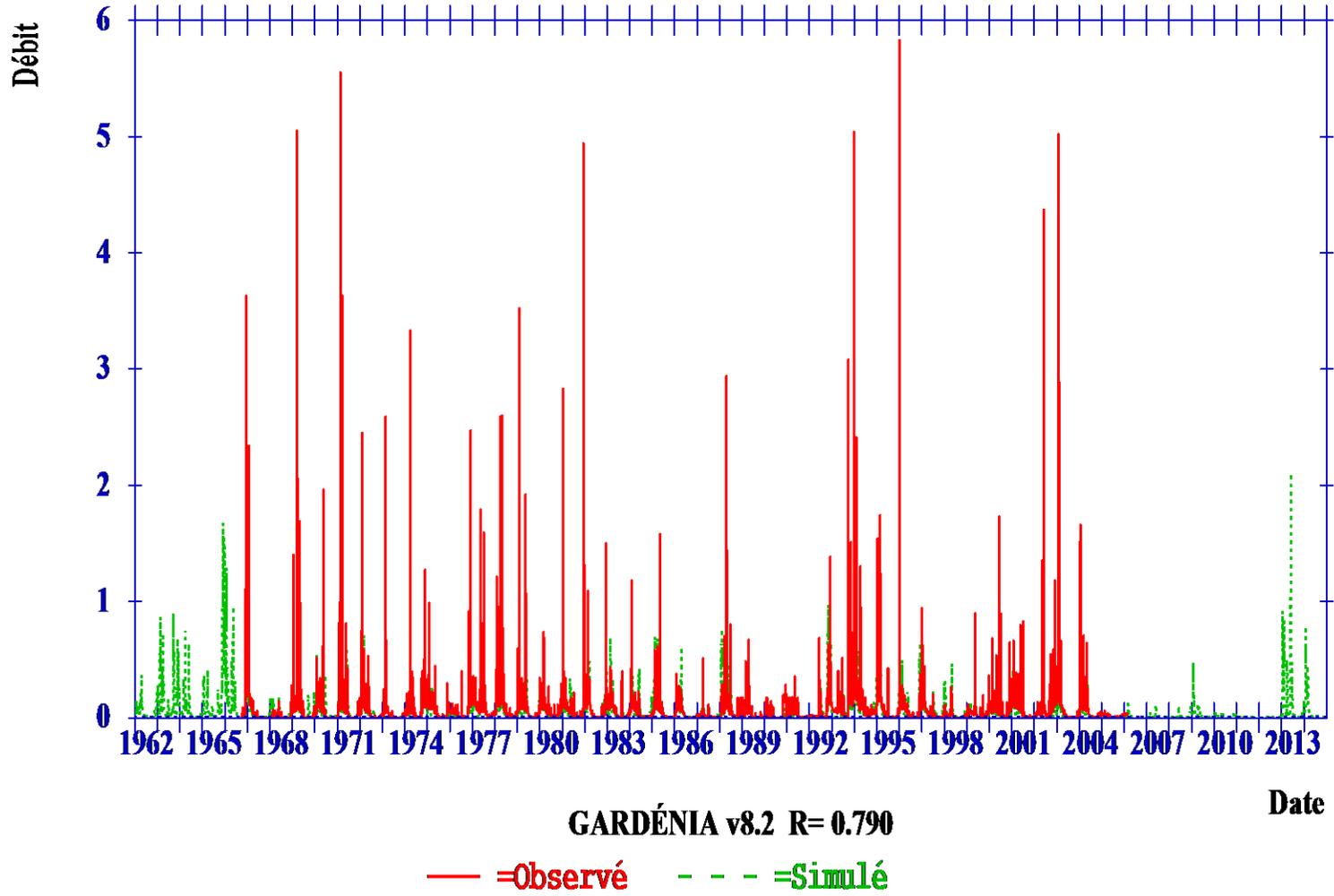
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de la Beune



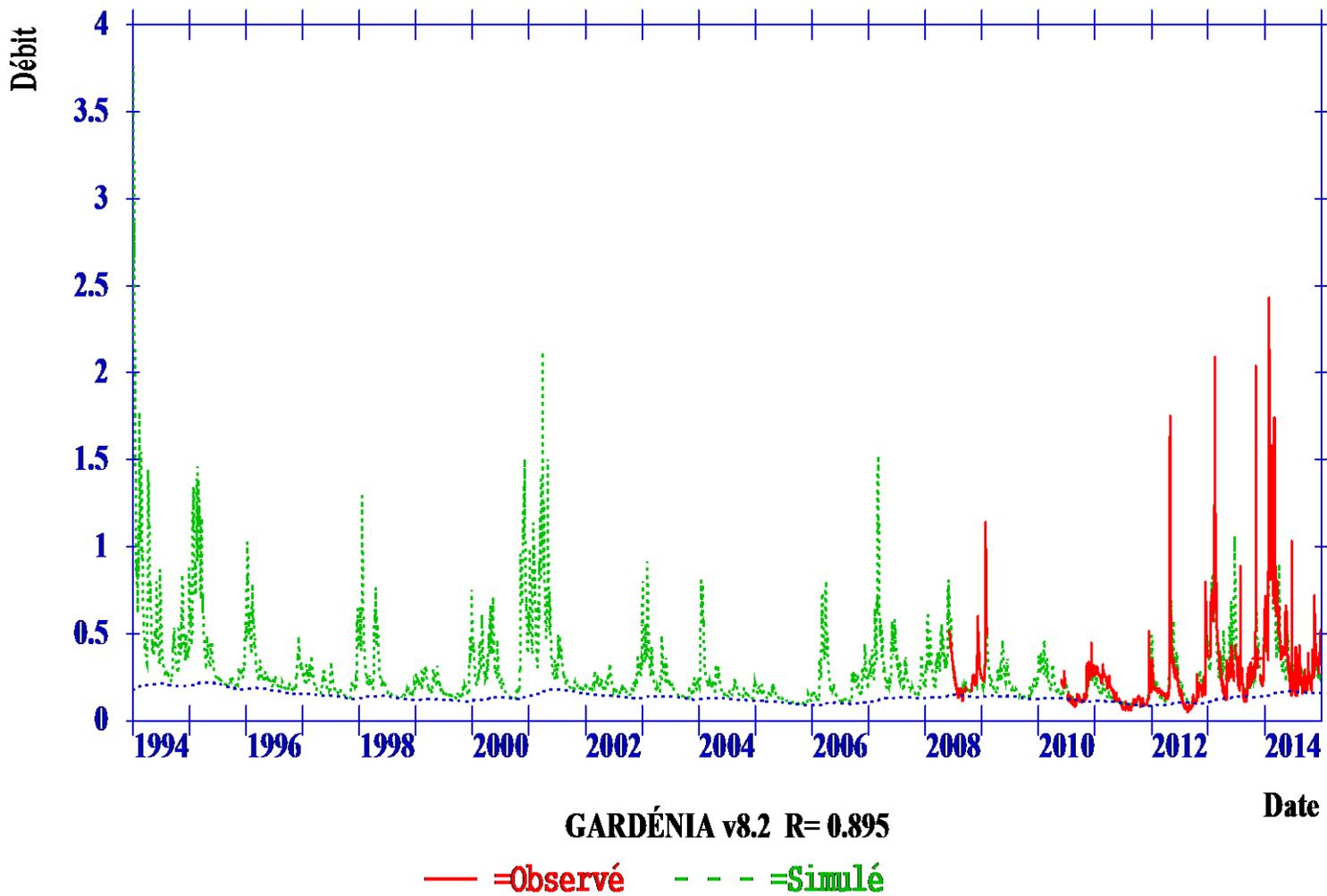
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de la Beune



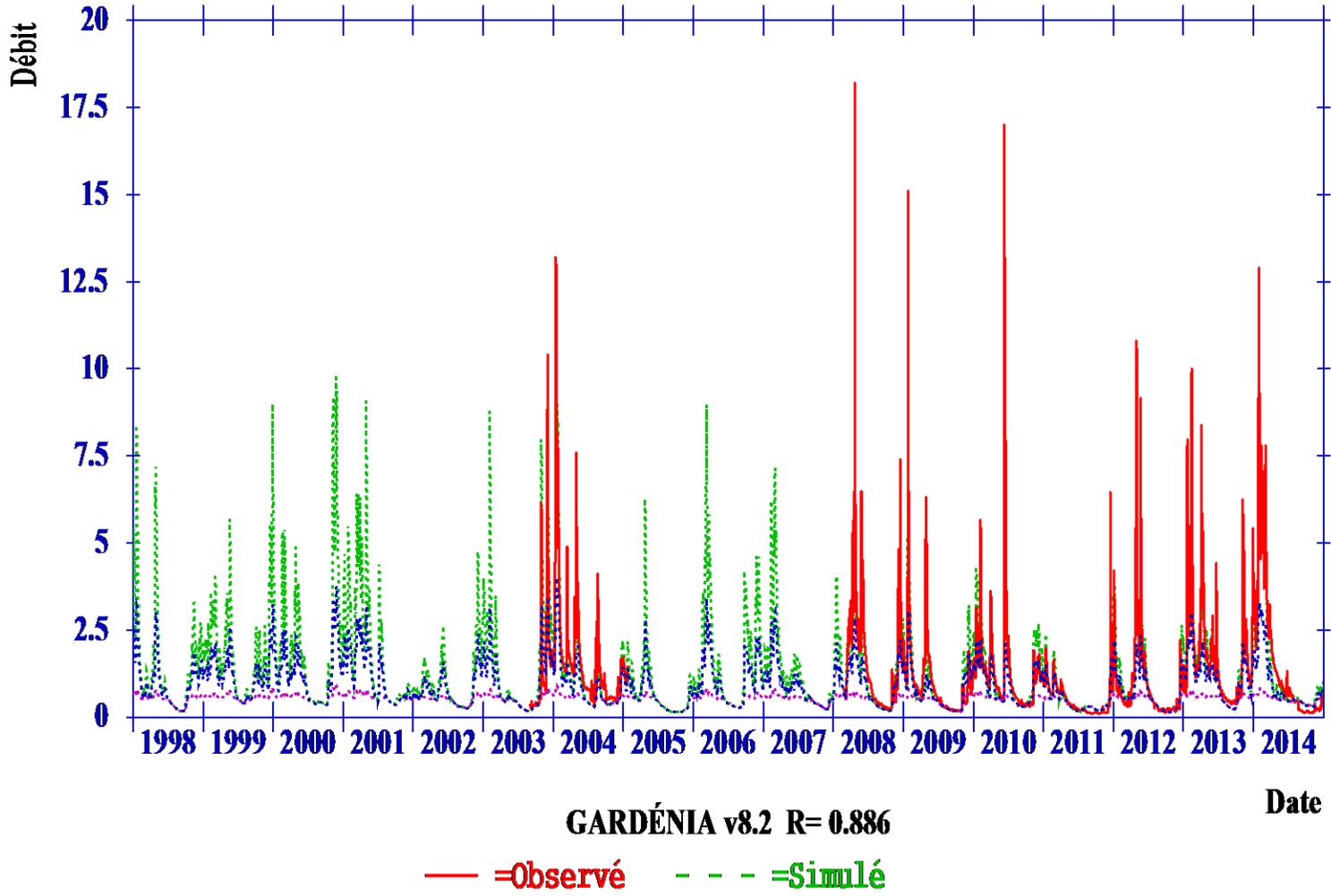
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Pest



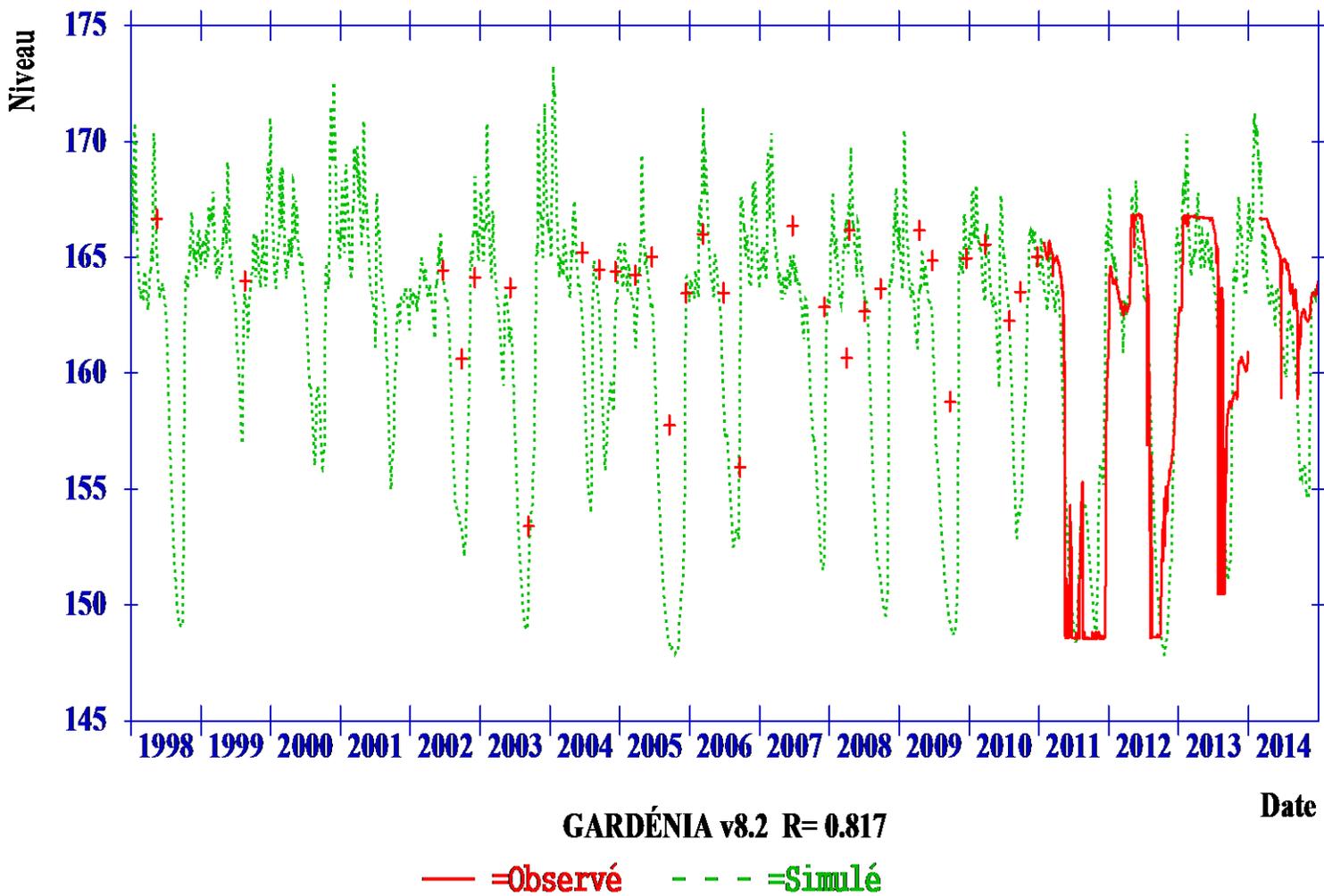
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de la Charreau



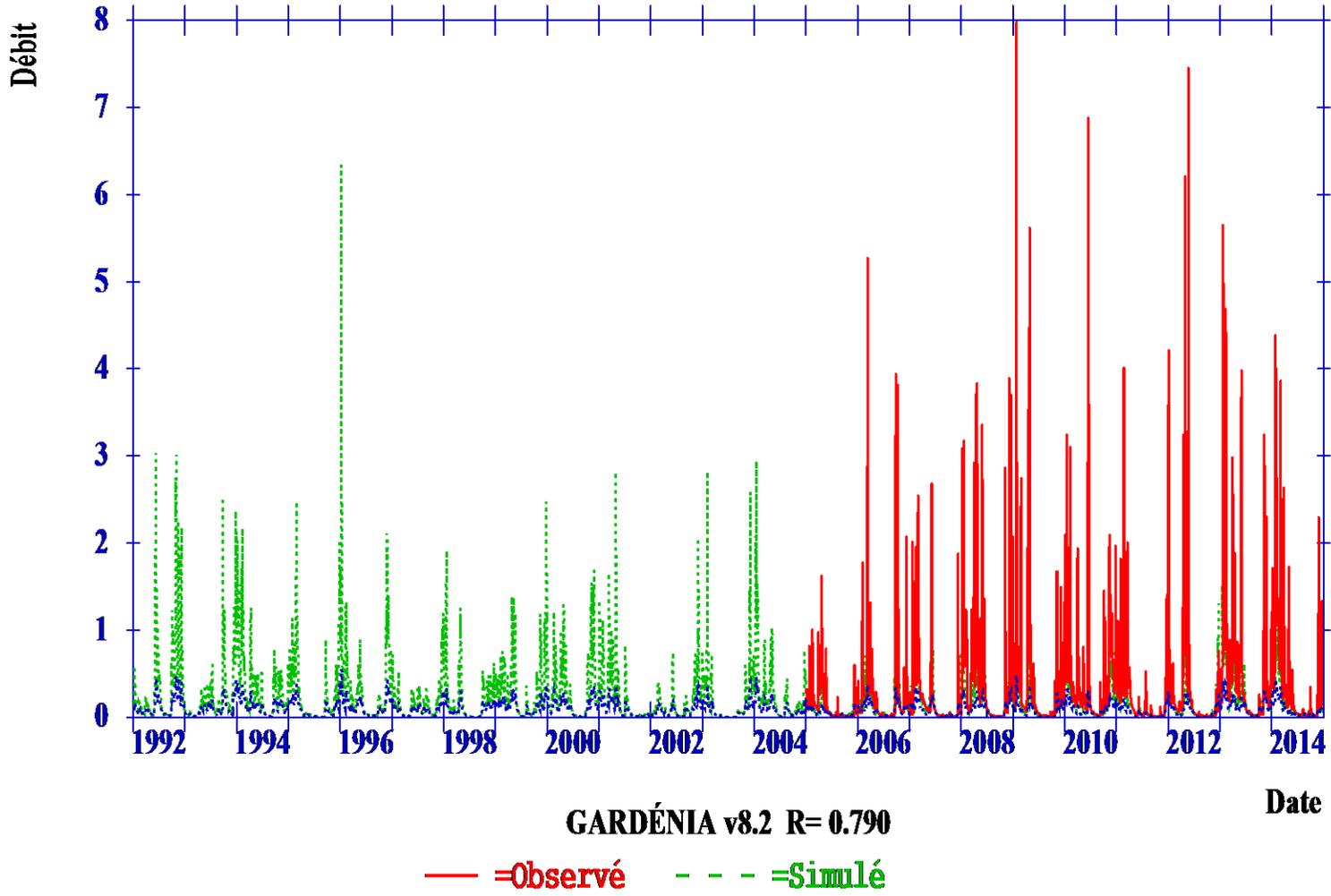
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de la Borreze



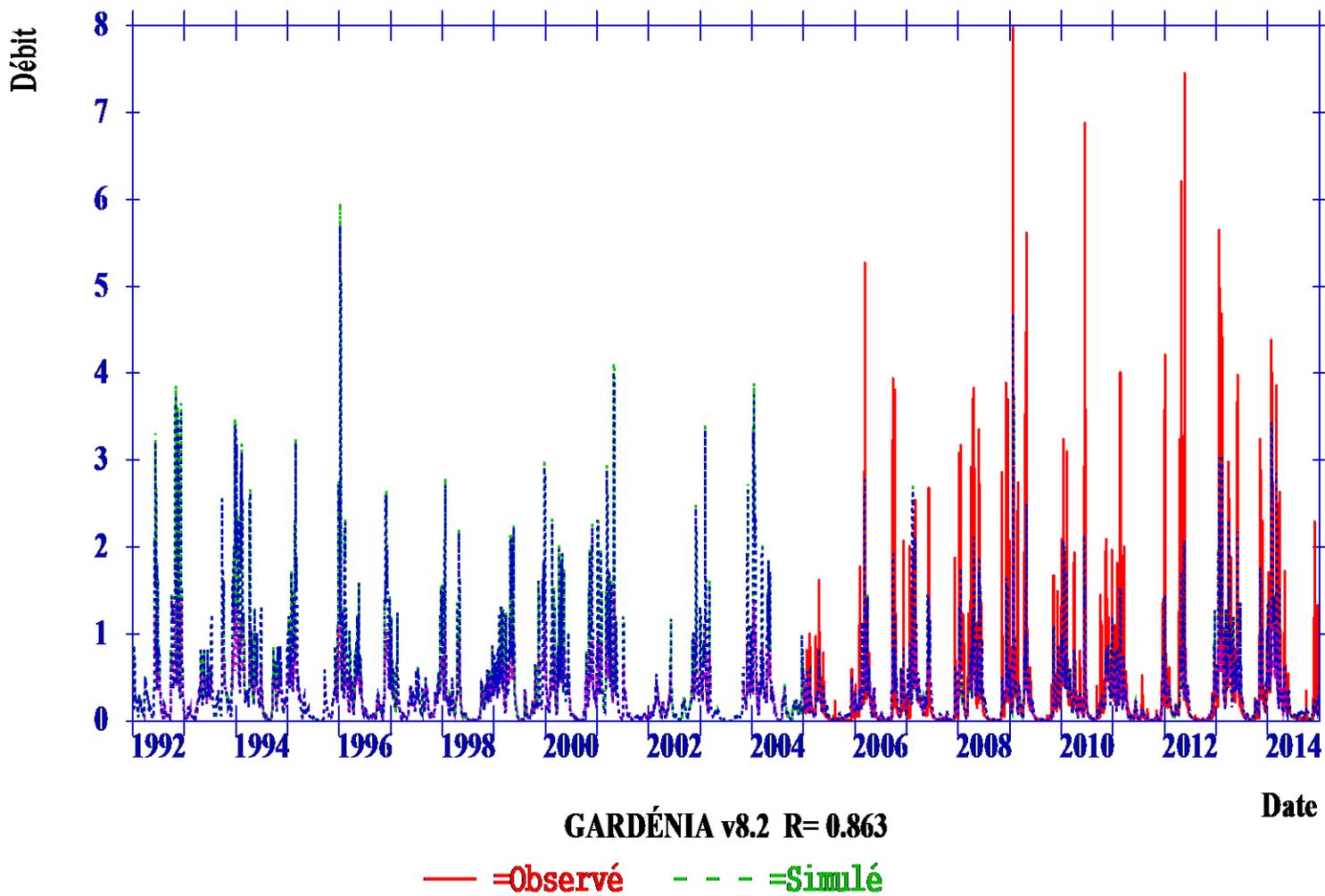
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de la Borreze



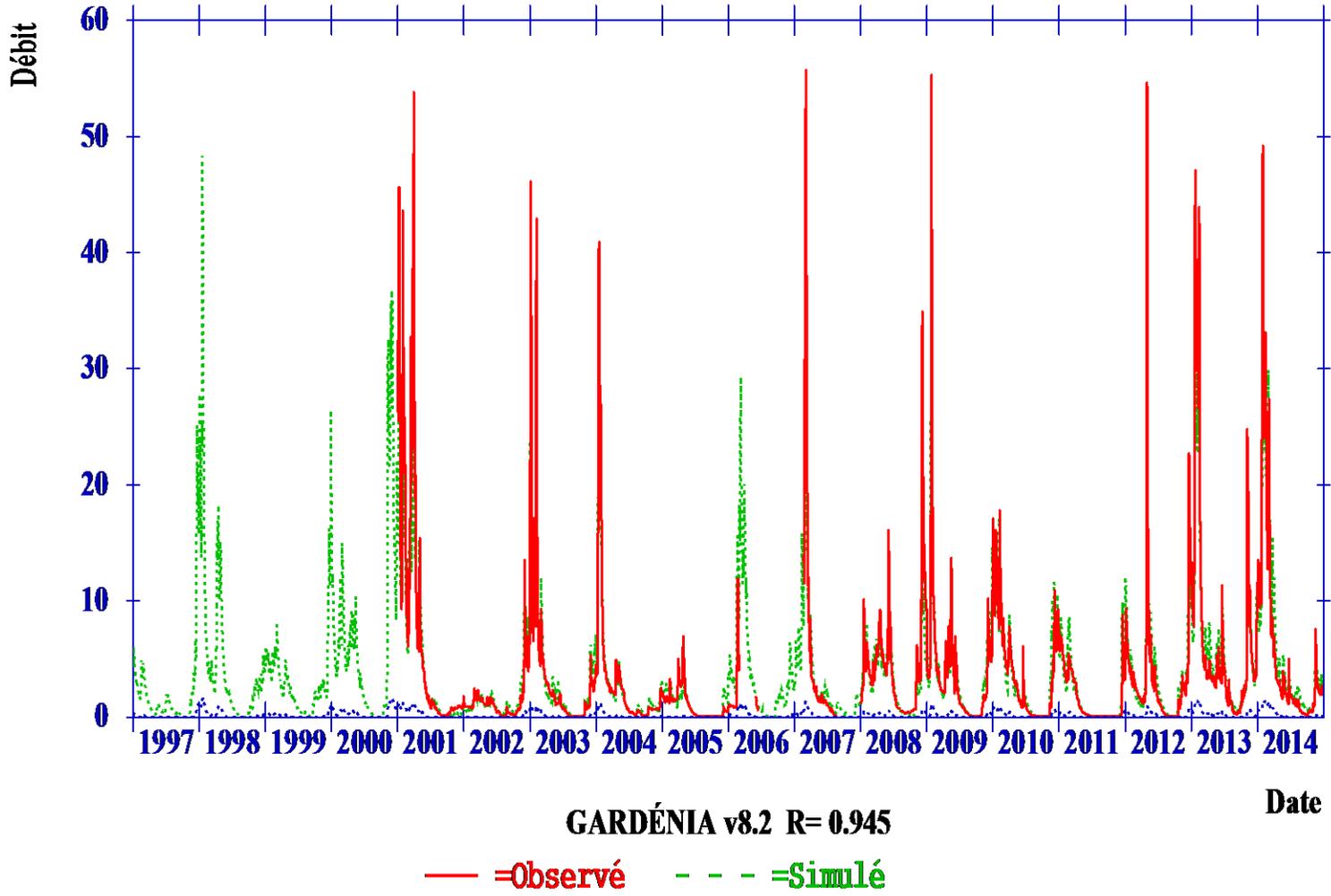
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Girou (superficie inchangée)



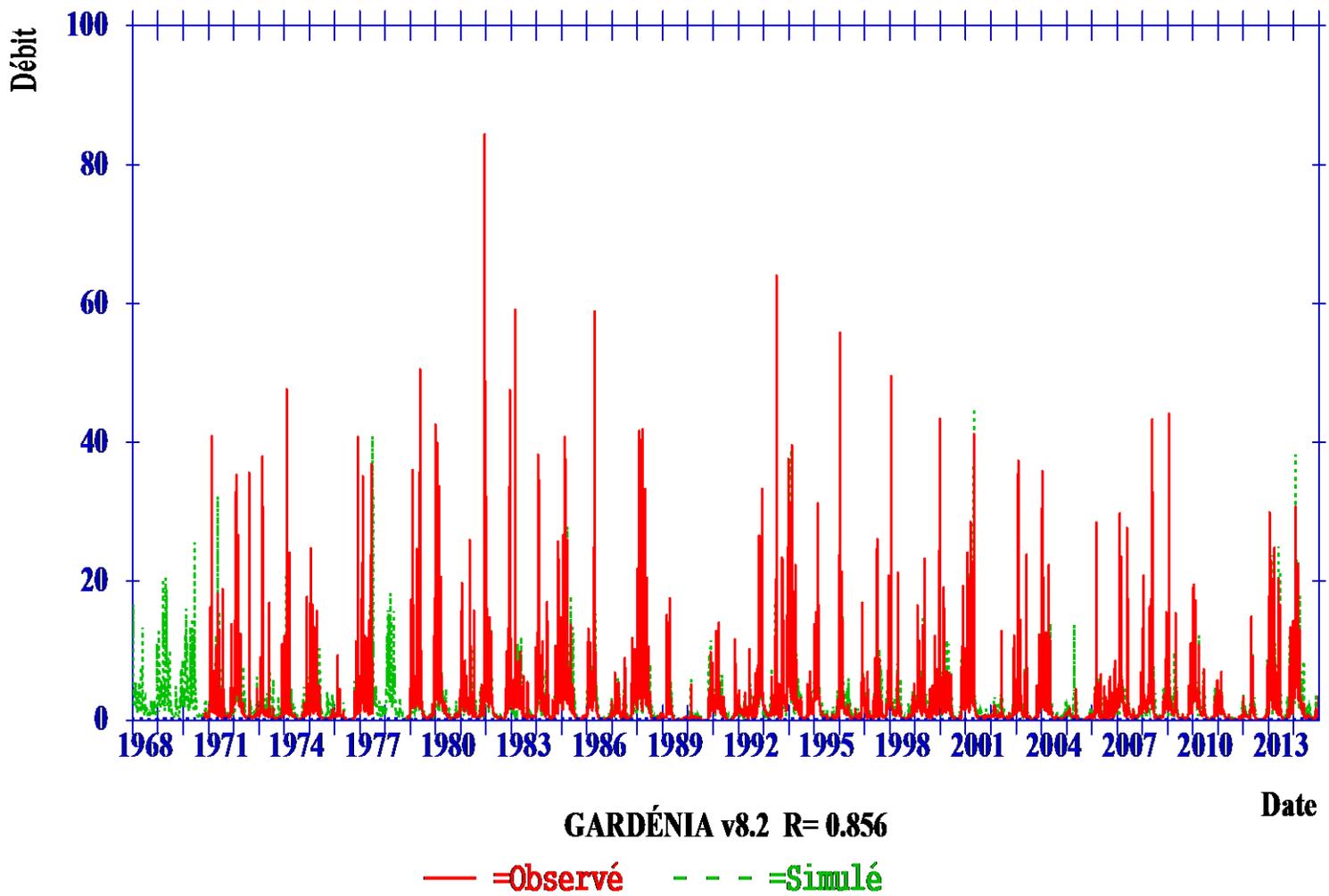
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Girou (superficie modifiée)



Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV du Né total



Logiciel GARDÉNIA v8.2 : BV de la Lède





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 Aquitaine – Limousin - Poitou-Charentes
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 70