

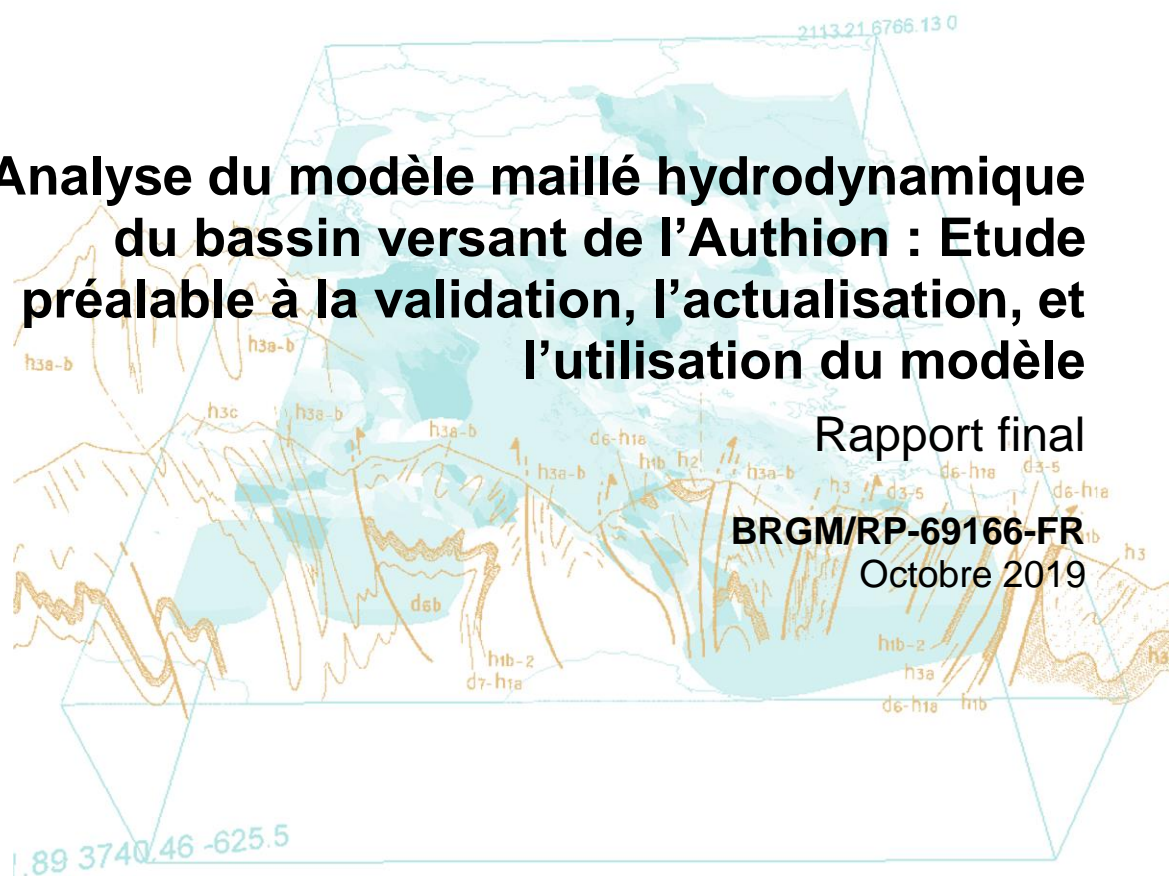


# Analyse du modèle maillé hydrodynamique du bassin versant de l'Authion : Etude préalable à la validation, l'actualisation, et l'utilisation du modèle

Rapport final

BRGM/RP-69166-FR

Octobre 2019



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Analyse du modèle maillé hydrodynamique du bassin versant de l'Authion : Etude préalable à la validation, l'actualisation, et l'utilisation du modèle

Rapport final

**BRGM/RP-69166-FR**

Octobre 2019

Étude réalisée dans le cadre du projet  
de Service public du BRGM AP17PDL063

**Pierre Chrétien et Géraldine Picot-Colbeaux**

**Vérificateur :**

Nom : Lena Abasq

Fonction : Hydrogéologue

Date : 08/08/2019

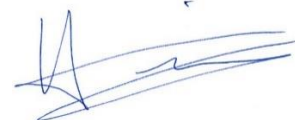


**Approbateur :**

Nom : Alexander Norie

Fonction Directeur régional Pays-de-la-Loire

Date : 10/10/2019



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

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



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots-clés** : gestion ressource eau, gestion quantitative, modélisation hydrodynamique, étude volume prélevable, Val d'Authion, Maine-et-Loire, Indre-et-Loire, Pays-de-la-Loire, Centre-Val-de-Loire.

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

**Chrétien P. et Picot-Colbeaux G.** (2019) – Analyse du modèle maillé hydrodynamique du bassin versant de l'Authion : Étude préalable à la validation, l'actualisation, et l'utilisation du modèle. Rapport final. BRGM/RP-69166-FR, 88 p., 36 ill., 7 tabl., 1 ann.

## Synthèse

La Commission Locale de l'Eau du SAGE Authion a confié en 2012 au bureau d'études ANTEA une étude visant à définir le volume d'eau maximum prélevable et sa répartition sur son territoire de manière à respecter les objectifs quantitatifs du SDAGE Loire-Bretagne. Pour ce faire, le prestataire a mis au point un modèle hydrodynamique maillé au moyen du logiciel de modélisation 3D des écoulements souterrains MARTHE.

La Commission Locale de l'Eau du SAGE Authion souhaite désormais que le BRGM poursuive l'exploitation de ce modèle hydrodynamique, avec notamment comme objectifs :

- la validation des volumes prélevables définis,
- l'actualisation des données du modèle,
- la réalisation de simulations et l'étude des relations nappe-rivière.

Cette étude a pour objectif d'analyser le contenu du modèle hydrodynamique maillé existant (modèle conceptuel, données numériques utilisées et modèle numérique) et d'en tester la robustesse en simulant divers scénarios.

Enfin un programme technique détaillant la reprise, l'actualisation et l'utilisation du modèle est alors constitué et dimensionné à la suite de ce rapport.

*BRGM s'engage à remettre à la structure porteuse du SAGE les produits suivants :*

- *Un rapport définitif sur support papier (en 3 exemplaires).*
- *Un CD-rom comportant le fichier pdf du rapport, les fichiers bruts d'exploitation du modèle et les fichiers cartographiques au format ESRI ou QGIS (shapefiles, système de coordonnées Lambert 93).*

*La Structure porteuse du SAGE s'engage à valider le rapport dans un délai de quatre semaines maximum. Au-delà, le rapport sera considéré comme définitif.*



# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>11</b>
1.1	CONTEXTE .....	11
1.2	OBJECTIFS.....	12
1.3	MÉTHODOLOGIE .....	12
<b>2</b>	<b>Critique objective du modèle maillé hydrodynamique existant .....</b>	<b>15</b>
2.1	ANALYSE DU MODÈLE CONCEPTUEL.....	15
2.1.1	Définition .....	15
2.1.2	Extension horizontale de la zone modélisée .....	15
2.1.3	Cours d'eau retenus pour décrire l'hydrosystème .....	15
2.1.4	Extension et discrétisation verticale de la série hydrogéologique.....	17
2.1.5	Conditions aux limites.....	19
2.2	ANALYSE DES DONNÉES BRUTES ET VALORISÉES UTILISÉES POUR CONCEVOIR LE MODÈLE MAILLÉ .....	21
2.2.1	Données climatiques .....	21
2.2.2	Géométrie des couches.....	22
2.2.3	Caractéristiques hydrodynamiques.....	22
2.2.4	Données hydrométriques.....	23
2.2.5	Piézométrie .....	24
2.2.6	Volumes prélevés .....	26
2.2.7	Valorisation des données – Bilans hydrologiques et recharge estimés par la modélisation globale .....	26
2.3	ANALYSE DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE MAILLÉ .....	27
2.3.1	Élaboration des données de terrain en données numériques MARTHE28	
2.3.2	Domaine modélisé et géométrie aquifère.....	29
2.3.3	Conditions climatiques : recharge .....	30
2.3.4	Conditions de surface : ruissellement et réseau hydrographique (rejets et prélèvements).....	32
2.3.5	Prélèvements en nappe.....	36
2.3.6	Conditions aux limites aquifères : charges imposées et flux extérieurs.	38
2.3.7	Paramètres et points de calibration.....	40
2.3.8	Trois Scénario-tests : évaluation du modèle hydrodynamique maillé ....	42
2.3.9	Synthèse sur l'analyse du modèle hydrodynamique maillé .....	53
<b>3</b>	<b>Proposition de programme et dimensionnement de l'étude de reprise, actualisation et utilisation du modèle maillé de l'Authion.....</b>	<b>55</b>

3.1	DISPOSITIONS DU SCHÉMA DIRECTEUR D'AMÉNAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE (SDAGE) .....	55
3.1.1	Disposition 7B-4.....	55
3.1.2	Disposition 7C-1.....	55
3.2	REPRISE DU MODÈLE AUTHION PAR LE BRGM .....	56
3.3	OBJECTIFS QUANTITATIFS DU SCHÉMA DIRECTEUR D'AMÉNAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX (SDAGE) LOIRE-BRETAGNE .....	56
3.4	ACTUALISATION DES DONNÉES EXISTANTES SUR LE BASSIN VERSANT : SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE ET BASE DE DONNÉES AUTHION ....	56
3.4.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	57
3.5	GEOMETRIE : GEOLOGIE ET AQUIFERES .....	58
3.5.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	58
3.6	GESTION DES DONNÉES DU BASSIN EN LIEN AVEC LE MODÈLE MAILLÉ : BASE DE DONNÉES/SIG .....	59
3.6.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	59
3.7	CARACTÉRISATION ET CONCEPTUALISATION DES BILANS HYDROCLIMATIQUES .....	60
3.7.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	60
3.8	CARACTÉRISATION ET CONCEPTUALISATION DES ÉCHANGES ENTRE LES EAUX DE SURFACES ET LES EAUX SOUTERRAINES (EN FONCTION DE LA DIVERSITÉ DES OUVRAGES DE SURFACES).....	61
3.8.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	61
3.9	BILAN HYDRODYNAMIQUE ET CONDITIONS AUX LIMITES EN BORDURE DE LOIRE .....	62
3.10	MODÈLE CONCEPTUEL HYDRODYNAMIQUE.....	63
3.10.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	63
3.11	ADAPTATION, MISE A JOUR DU MODÈLE MAILLÉ ET CALIBRATION .....	64
3.11.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	64
3.12	SIMULATIONS PROSPECTIVES AUX REGARDS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET/OU DES USAGES .....	65
3.12.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	65
3.13	DÉFINITION ET RÉPARTITION DES VOLUMES PRÉLEVABLES EN FONCTION DES USAGES.....	66
3.14	SOLUTIONS ALTERNATIVES POTENTIELLES FACE AUX IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (GESTION ACTIVE ET <i>RE-USE</i> ) .....	67
3.14.1	Proposition « optionnelle » non chiffrée.....	67
3.15	BUDGET .....	68



<b>4 Conclusion</b> .....	<b>69</b>
<b>5 Bibliographie</b> .....	<b>71</b>

## Liste des figures

Illustration 1 – Emprise du bassin versant de l'Authion et du modèle hydrodynamique maillé (Source ANTEA).....	11
Illustration 2 – Périmètre de la zone et des cours d'eau modélisés.....	16
Illustration 3 – Log hydrogéologique à Noyant (BDLISA 2018).....	17
Illustration 4 – Zonation des niveaux d'infiltration (conditions de recharge de la nappe du modèle).....	20
Illustration 5 – Localisation des stations climatiques dont les données ont été intégrées au modèle Authion.....	21
Illustration 6 – Piézomètres utilisés pour le calage du modèle en régime transitoire.....	25
Illustration 7 – Coupe verticale orientée Sud-Nord du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon les 12 couches géologiques identifiées.....	29
Illustration 8 – Zones climatiques définies dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	31
Illustration 9 – Zone de reprise évaporative de la nappe considérée dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (secteurs bleus limités de 1 à 2 m de profondeur, orange sans limite).....	31
Illustration 10 – Localisation des débits amont de rivière (sources) fixés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	34
Illustration 11 – Localisation des débits « extérieurs » de rivière (rejets et prélèvements) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	34
Illustration 12 – Exemple pour l'année 1999 de répartition des débits « extérieurs » de rivière (rejets et prélèvements) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	35
Illustration 13 – Dérivation de débits de rivière (rejets et prélèvements) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	35
Illustration 14 – Localisation des prélèvements d'eau souterraine (~1 000 forages activés) en août 1999 considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	37
Illustration 15 – Prélèvements d'eau souterraine (volume et nombre de forages activés) pour l'année 1999 considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	37
Illustration 16 – Prélèvements uniformisés d'eau souterraine (forages activés post 1999 en rouge) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	38
Illustration 17 – Charges imposées (mailles grisées avec valeur imposée en mNGF) au sud du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.....	39
Illustration 18 – Flux imposés (mailles roses) au nord du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion pour les couches 7-8 (à gauche) et 10-11 (à droite).....	39
Illustration 19 – Liste des charges historiques calculées par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon leur position dans le maillage (X : colonne, Y : ligne, et Z : couche).....	40
Illustration 20 – Liste des débits en rivière calculés par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon leur position dans le maillage (X : colonne, Y : ligne, par défaut les rivières sont associées à la couche 1).....	41

- Illustration 21 – Débits considérés pour les prélèvements en nappe pour l'« année sèche » (2011) calculés pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Sort\_intern\_fix : prélèvements fixés en nappe ; Denoy\_Pompage : débits prélevés non considérés par dénoyement des pompages; Global Prélèvement (Fixé-Dénoyé) : débits prélevés finalement considérés). ..... 43
- Illustration 22 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Glob\_Limites : charges imposées (Loire) dans l'aquifère ; Glob\_intern\_fix : prélèvements et flux fixés en nappe ; Glob\_stock : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob\_Riv\_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface). ..... 44
- Illustration 23 – Bilan hydrodynamique de rivière « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Par Sources : débit rivière amont fixé ; Entr\_Intern\_fix : Débits rejetés en rivière ; Sort\_intern\_fix : prélèvements en rivière ; Dérivat\_Entr : débit entrant par dérivation ; Dérivat\_Sort : débit sortant par dérivation ; Débo\_Nap\_Rivi : débit de débordement de nappe rejoignant la rivière ; Exutoires : débits à l'exutoire). ..... 44
- Illustration 24 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé par zones pour les unités de gestion UG3 (a.) et UG9 (b.) du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Glob\_Limit\_ext : débits fixés aux limites de la zone par charges imposées ; Sort\_intern\_fix : prélèvements fixés en nappe ; Stockage : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob\_Riv\_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface ; Entr\_Intern\_fix : débits fixés entrant dans l'aquifère ; Glob\_Limit\_Zon : débits échangés en limite d'UG). ..... 45
- Illustration 25 – Confrontation des cotes piézométriques observées et calculées par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion en différents points. .... 46
- Illustration 26 – Localisation du piézomètre de Brion, 04553X0023, dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (X95\_Y41\_Z11). ..... 46
- Illustration 27 – Confrontation de la cote piézométrique observée au piézomètre de Brion, 04553X0023, et calculée par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (X95\_Y41\_Z11). ..... 47
- Illustration 28 – Coupe verticale orientée Sud-Nord du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon le scénario-test 2 simplifiant la géométrie verticale en 8 couches. .... 48
- Illustration 29 – Débits considérés pour les prélèvements en nappe pour l'« année sèche » (2011) calculés pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 (Sort\_intern\_fix : prélèvements fixés en nappe ; Denoy\_Pompage : débits prélevés non considérés par dénoyement des pompages ; Global Prélèvement (Fixé-Dénoyé) : débits prélevés finalement considérés). ..... 48
- Illustration 30 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 (Glob\_Limites : charges imposées (Loire) dans l'aquifère ; Glob\_intern\_fix : prélèvements et flux fixés en nappe ; Glob\_stock : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob\_Riv\_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface). ..... 49
- Illustration 31 – Bilan hydrodynamique de rivière « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 (Par Sources : débit rivière amont fixé ; Entr\_Intern\_fix : Débits rejetés en rivière ; Sort\_intern\_fix : prélèvements en rivière ; Dérivat\_Entr : débit entrant par dérivation ; Dérivat\_Sort : débit sortant par dérivation ; Débo\_Nap\_Rivi : débit de débordement de nappe rejoignant la rivière ; Exutoires : débits à l'exutoire). .... 49

Illustration 32 – Confrontation des cotes piézométriques observées et calculées par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 en différents points. ....	50
Illustration 33 – Débits considérés pour les prélèvements en nappe pour l'« année sèche » (2011) calculés pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié selon le scénario-test 3 (Sort_intern_fix : prélèvements fixés en nappe ; Denoy_Pompage : débits prélevés non considérés par dénoyement des pompages ; Global Prélèvement (Fixé-Dénoyé) : débits prélevés finalement considérés). .	51
Illustration 34 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié selon le scénario-test 3 (Glob_Limites : charges imposées (Loire) dans l'aquifère ; Glob_intern_fix : prélèvements et flux fixés en nappe ; Glob_stock : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob_Riv_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface). ....	51
Illustration 35 – Bilan hydrodynamique de rivière « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié selon le scénario-test 3 (Par Sources : débit rivière amont fixé ; Entr_Intern_fix : Débits rejetés en rivière ; Sort_intern_fix : prélèvements en rivière ; Dérivat_Entr : débit entrant par dérivation ; Dérivat_Sort : débit sortant par dérivation ; Débo_Nap_Rivi : débit de débordement de nappe rejoignant la rivière ; Exutoires : débits à l'exutoire). ....	52
Illustration 36 : Confrontation des cotes piézométriques observées et calculées dans les alluvions par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion initial (1.) et modifié selon le scénario-test 3 (2.). ....	52

## Liste des tableaux

Tableau 1 – Couches aquifères (en bleu et en vert) et épontes (en jaune) prises en compte dans le modèle hydrodynamique maillé de l'Authion .....	18
Tableau 2 – Proposition de simplification des couches modélisées : aquifères (en bleu) et épontes (en gris).....	19
Tableau 3 – Conditions aux limites externes.....	20
Tableau 4 – Perméabilités attribuées aux couches modélisées après calage en régime permanent .....	23
Tableau 5 – Valeurs de coefficients d'emmagasinements disponibles dans la BSS.....	23
Tableau 6 – Nombre de piézomètres de référence retenus pour le calage du modèle en régime transitoire .....	25
Tableau 7 – Répartition mensuelle des volumes prélevés annuellement pour l'irrigation .....	26

## Liste des annexes

Annexe 1 Budget pour la réalisation du programme.....	72
---	----



# 1 Introduction

## 1.1 CONTEXTE

La zone d'étude est celle du bassin-versant de l'Authion en bordure de la Loire, d'une superficie de 1 491 km<sup>2</sup>, en lien avec les systèmes hydrologiques et hydrogéologiques limitrophes. Elle est située en région Centre et Pays-de-la-Loire, sur les départements Indre-et-Loire (37) et Maine-et-Loire (49) entre Angers et Saumur. Les conditions aux limites du bassin versant de l'Authion sont principalement déterminées par 4 principaux systèmes hydrologiques et hydrogéologiques :

- les nappes du bassin versant du Loir ;
- la nappe du Cénomaniens classée en Zone de Répartition des Eaux<sup>1</sup> (système aquifère de 23 000 km<sup>2</sup>) ;
- la nappe du Séno-Turonien ;
- le fleuve Loire et sa nappe d'accompagnement.

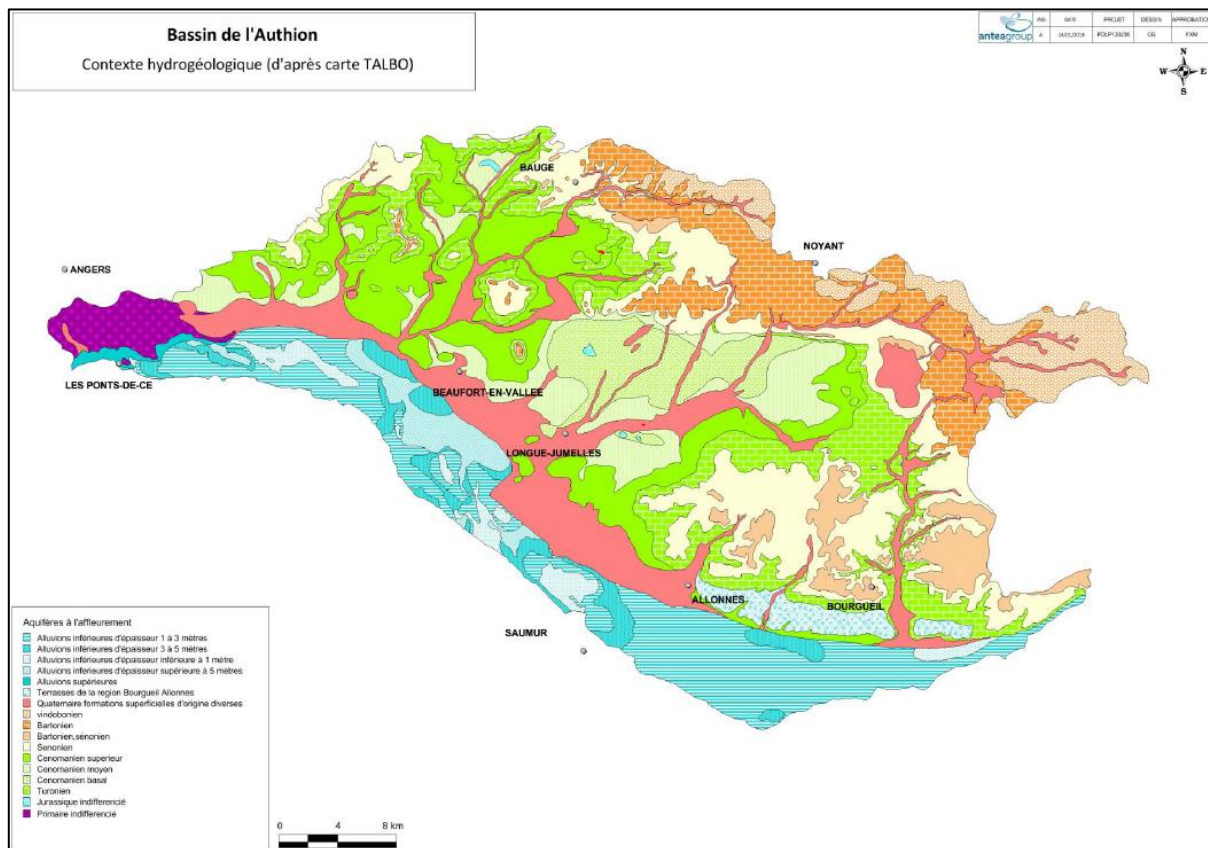


Illustration 1 – Emprise du bassin versant de l'Authion et du modèle hydrodynamique maillé (Source ANTEA).

<sup>1</sup> Les ZRE se définissent comme des secteurs caractérisés par une insuffisance autre qu'exceptionnelle des ressources en eau par rapport aux besoins (cf.art. R. 211-71 du code de l'environnement). Dit autrement, ce sont des zones en situation de déséquilibre structurel. Dans les bassins où des niveaux objectifs (en débit ou en piézométrie) ont été définis, le déséquilibre peut, entre autre, s'apprécier par le défaut de satisfaction de ces objectifs.

La Commission Locale de l'Eau du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) Authion a confié en 2012 au bureau d'études ANTEA une étude visant à définir le volume d'eau maximum prélevable et sa répartition sur son territoire de manière à respecter les objectifs quantitatifs du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Loire-Bretagne. Pour ce faire, le prestataire a mis au point un outil de calcul permettant d'évaluer ces volumes à l'aide d'un modèle hydrodynamique maillé via logiciel de modélisation 3D des écoulements souterrains MARTHE<sup>2</sup>.

La Commission Locale de l'Eau du SAGE Authion souhaite désormais que le BRGM poursuive l'exploitation de ce modèle hydrodynamique, avec notamment comme objectifs :

- la validation des volumes prélevables définis,
- l'actualisation des données du modèle,
- la réalisation de simulations et l'étude des relations nappe-rivière.

Quant au BRGM, son intérêt pour cette étude réside dans la possibilité d'analyser et de profiter d'un retour d'expérience de l'utilisation du modèle hydrodynamique maillé Authion, afin d'orienter ses développements méthodologiques dans le domaine de la modélisation hydrogéologique. En effet, le modèle Authion représente une application complexe et bien renseignée permettant d'évaluer les points forts et les limites de la modélisation.

Néanmoins, afin que le BRGM s'approprie le modèle et puisse apprécier le temps nécessaire à la réalisation de ces tâches, une analyse approfondie préliminaire du modèle est indispensable.

## 1.2 OBJECTIFS

Le modèle hydrodynamique maillé du bassin versant de l'Authion développé par ANTEA étant l'outil de gestion le plus abouti et intégrateur des processus majeurs décrivant les écoulements passés, actuels et futurs, il est important pour les acteurs ayant la gestion du cycle de l'eau et la répartition des usages de l'eau sur le territoire, de s'assurer de sa robustesse.

Cette étude a pour objectif d'analyser le contenu du modèle hydrodynamique maillé existant (modèle conceptuel, données numériques utilisées et modèle numérique), d'en faire une critique objective et d'en tester la robustesse en simulant divers scénarios.

Enfin un programme technique détaillant la reprise, l'actualisation et l'utilisation du modèle est constitué et dimensionné à la suite de ce rapport.

## 1.3 MÉTHODOLOGIE

Ce travail d'analyse s'appuie sur les rapports produits par le prestataire lors de la conception du modèle maillé de l'Authion (bureau d'étude ANTEA), les fichiers des données (brutes et valorisées), et les fichiers du modèle maillé MARTHE (tous fournis par le SAGE Authion).

L'analyse des documents a été volontairement effectué en binôme évoluant en parallèle et effectuant ponctuellement des croisements d'informations afin de discerner ce qui était décrit dans les rapports et ce qui était déclaré dans les fichiers numériques du modèle maillé. Cette approche a permis de mettre en avant les processus pris en compte et renseignés dans le

---

<sup>2</sup> <http://marthe.brgm.fr> (BRGM)

rapport, mais surtout les processus inclus dans le modèle maillé peu ou pas décrits dans les documents.

Il est important de noter que dans les rapports livrés par ANTEA au SAGE Authion ne figure pas de description explicite du modèle conceptuel (*i.e.* la représentation schématique du fonctionnement de l'hydrosystème du bassin versant de l'Authion). Du schéma conceptuel découle tous les partis pris et les hypothèses qui fondent le modèle maillé hydrodynamique (la conceptualisation consiste à choisir les hypothèses qui vont réduire le problème réel en un problème simplifié qui doit être acceptable au vu des objectifs de modélisation et des questions spécifiques auxquelles le modèle devra répondre (Dassargues, 1995).

Il s'agit donc de reconstituer le modèle conceptuel élaboré par le prestataire, en analysant les points suivants :

- aquifères et éponges retenus pour décrire le système hydrogéologique du bassin versant de l'Authion ;
- cours d'eau retenus pour décrire l'hydrosystème ;
- relations nappe-rivières prises en compte ;
- phénomènes de drainance verticale (à travers les éponges) entre aquifères ;
- conditions aux limites ;

Les données brutes et valorisées utilisées pour concevoir le modèle maillé sont analysées et comprennent :

- les données climatologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) et leur répartition spatiale ;
- les données géologiques utilisées pour élaborer la géométrie du modèle (logs stratigraphiques, coupes utilisées ...);
- les paramètres hydrodynamiques (notamment les données de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement issues des essais de pompage) ;
- les volumes prélevés en nappes et dans les cours d'eau (localisation géographique, nature de la ressource, ventilation des volumes dans le temps) ;
- les données piézométriques (relevés ponctuels, chroniques et esquisses piézométriques) ;
- les données hydrographiques ;
- les paramètres issus des modélisations globales (GARDENIA) ;

Les éléments constituant le modèle hydrodynamique maillé sont vérifiés, à savoir :

- la géométrie des couches du modèle (épaisseur, extension, affleurements) ;
- les conditions aux limites ;
- la distribution des paramètres hydrodynamiques caractérisant les couches aquifères et les éponges (perméabilité et coefficient d'emmagasinement) ;
- les caractéristiques des cours d'eau : géométrie (largeur, longueur, cote du fond des rivières, hauteur d'eau dans la rivière, perméabilité et épaisseur des berges) ;
- les zones de recharges.

Trois « runs test » sont effectués afin de confirmer les hypothèses de dimensionnement de l'étude de reprise, d'actualisation et d'utilisation du modèle maillé de l'Authion. Les scénarios utilisés pour ces runs tests (conditions climatiques, prélèvements) sont définis par l'AELB et la structure porteuse du SAGE en lien avec le BRGM.

Il s'agit de :

- Scénario 1 : Analyser le modèle en l'état avec une attention particulière sur les années sèches connues/passées (2011-2012 // 2009-2010) et sur le secteur de Brion ;
- Scénario 2 : Analyser le modèle en modifiant certaines couches par suppression (substratum) ou association (couches alluvionnaires et/ou couches Seno-turoniennes) ;
- Scénario 3 : Analyser le modèle en modifiant l'intégration des conditions aux limites du modèle en bordure de Loire (meilleure prise en compte des variations de niveau d'eau de la Loire).

Les différents dysfonctionnements et/ou interrogations constatés et restés sans réponses sont listés par catégorie en vue de leurs traitements dans l'étude ultérieure.

Les données de base se répartissent en deux catégories : les rapports et les fichiers.

La Commission Locale de l'Eau du SAGE Authion a transmis au BRGM les divers rapports d'études en sa possession concernant aussi bien l'hydrogéologie et l'hydrologie du bassin versant, que plus spécifiquement le modèle maillé hydrodynamique. Le BRGM quant à lui exploite en tant que de besoin ses propres références bibliographiques.

La Commission Locale de l'Eau du SAGE Authion a transmis en outre au BRGM tous les fichiers en sa possession utiles à la bonne réalisation de la mission et notamment :

- les fichiers constitutifs du modèle maillé hydrodynamique MARTHE ;
- les fichiers relatifs aux prélèvements d'eau superficielle et souterraine ;
- les fichiers relatifs aux données piézométriques multi-acteurs (hors BRGM) du bassin avec renseignements de la base BSS au format SANDRE (ou tout autre format jugé utile) sur 98 points (chroniques variables : données ponctuelles jusqu'à chroniques de suivi hebdomadaire depuis 2012 [depuis 2010 sur quelques points]) ;
- les fichiers relatifs aux données d'observation des écoulements et assècs en lien avec les données piézométriques multi-acteurs et hydrométriques du bassin avec renseignements de la base sur 90 points (chroniques variables : données ponctuelles jusqu'à chroniques de suivi hebdomadaire depuis 2010) ;
- les fichiers relatifs à la géométrie du modèle géologique et à l'interprétation des logs validés ;
- les fichiers relatifs aux données climatiques (précipitations brutes et évapotranspiration potentielle) ;



## **2 Critique objective du modèle maillé hydrodynamique existant**

### **2.1 ANALYSE DU MODÈLE CONCEPTUEL**

#### **2.1.1 Définition**

Un modèle conceptuel d'écoulement définit l'extension horizontale et verticale du système aquifère à modéliser, la succession des ensembles à simuler, leur lithologie et leurs principales caractéristiques hydrogéologiques, les conditions hydrauliques aux limites du modèle, la nature des relations nappe rivière, les ordres de grandeur des principaux débits d'entrée et de sortie, etc.

Le modèle numérique consiste ensuite en la transposition numérique du modèle conceptuel.

Dans les rapports issus des travaux d'Antéa que nous avons pu consulter (transmis par le Syndicat Mixte du Bassin de l'Authion et de ses Affluents [SMBAA]), le modèle conceptuel n'est jamais explicitement décrit. Les informations utiles sont disséminées dans les différents rapports. Nous en faisons la synthèse dans les paragraphes qui suivent.

#### **2.1.2 Extension horizontale de la zone modélisée**

Elle correspond au périmètre couvert par le SAGE Authion, peu différent du bassin versant de l'Authion (secteur hydrographique BD Carthage « la Loire de l'Authion à la Maine »). Les limites de la zone modélisée s'appuient donc sur les limites naturelles de l'hydrosystème de surface.

Les mailles du modèle ont une forme carrée de 400 m de côté.

#### **2.1.3 Cours d'eau retenus pour décrire l'hydrosystème**

Le réseau hydrographique modélisé est extrêmement développé. Le rapport final A70443/F de juin 2015 (cf. références bibliographiques dans le § 4) précise (§ 2.3.1) : « Pour les besoins de construction du modèle couplé nappes - cours d'eau et les déterminations de débits de références et débits d'objectif futurs, il est nécessaire de connaître en tout point du chevelu hydrographique, le débit et la superficie drainée. »

Une telle recherche d'exhaustivité pose des difficultés car la taille des mailles du modèle (400 m de côté) ne permet pas de distinguer entre eux certains cours d'eau proches. Le modèle présente donc des mailles « rivières » qui contiennent plusieurs cours d'eau (cf. Illustration 2).

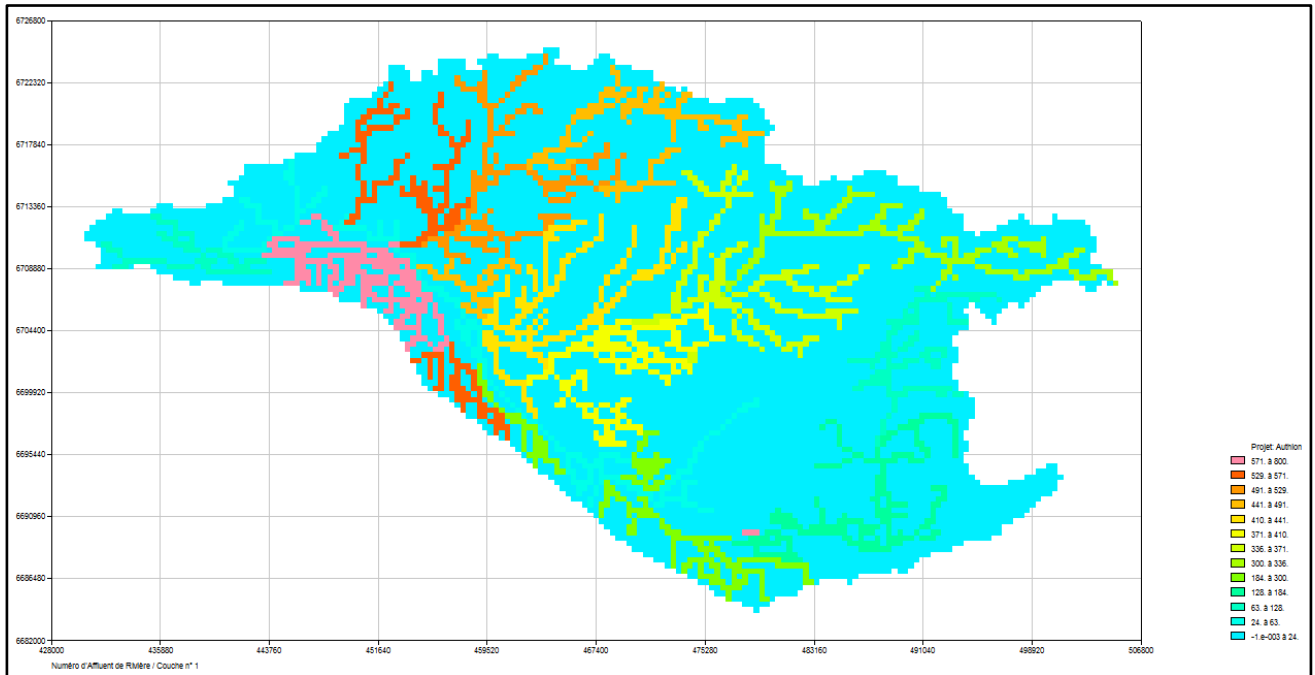


Illustration 2 – Périmètre de la zone et des cours d'eau modélisés

Les débits de la Loire ne sont pas modélisés. Les niveaux de la Loire sont utilisés comme conditions aux limites (potentiel imposé) sur le contour sud de la zone modélisée. Par interpolation linéaire entre les stations hydrométriques de Langeais, Saumur et des Ponts-de-Cé, le bureau d'études a calculé année par année la cote moyenne mensuelle de la Loire en chaque maille à potentiel imposé à partir des données de pas de temps variable (inférieur à la journée) de la période 1987-2013 (cf. § 2.3.6).

## 2.1.4 Extension et discrétisation verticale de la série hydrogéologique

### 2.1.4.1 Entités Hydrogéologiques du bassin de l'Authion

À Noyant, au sommet de la série sédimentaire du bassin de l'Authion, la BDLISA<sup>3</sup> propose le log hydrogéologique de l'illustration 3.

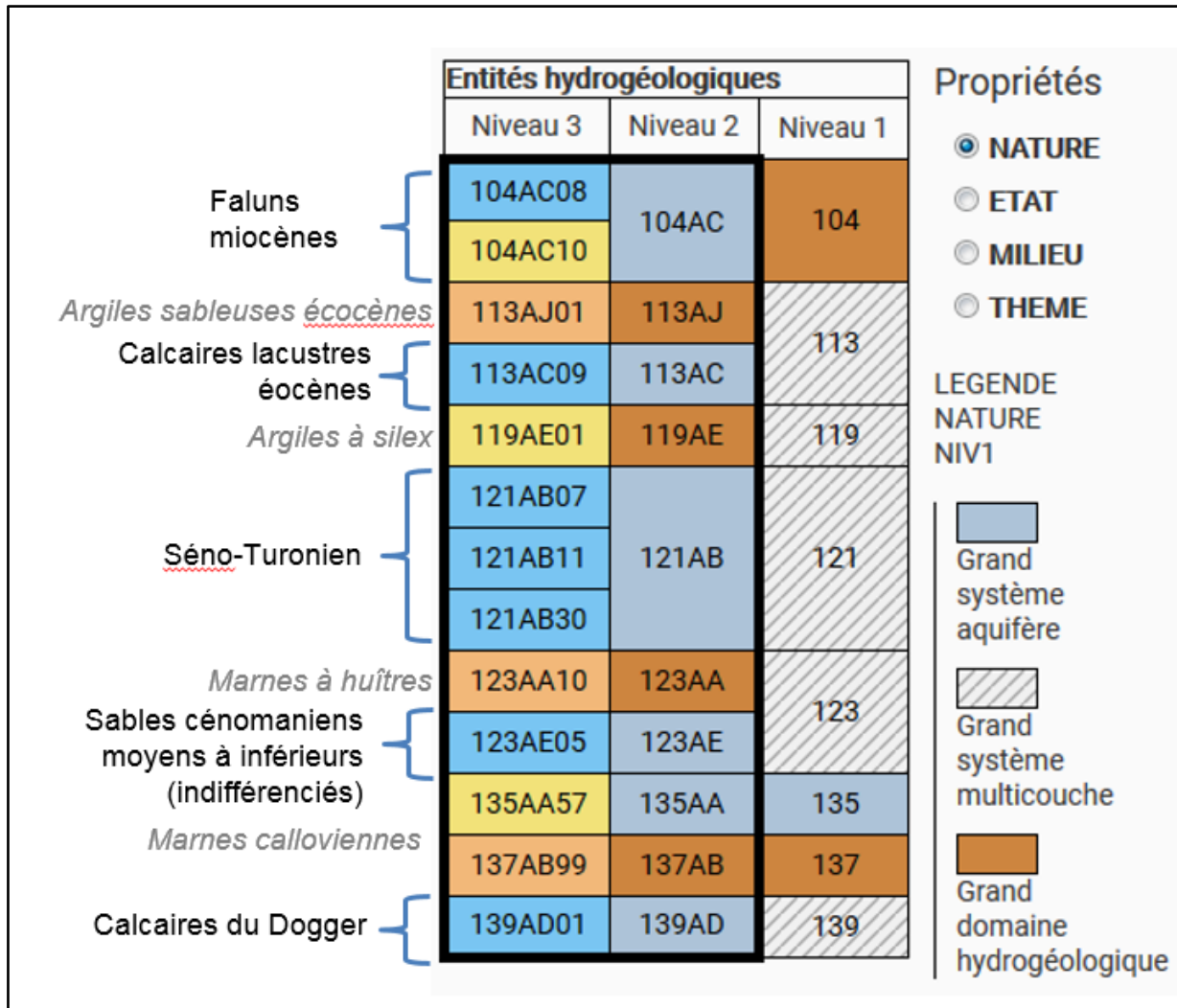


Illustration 3 – Log hydrogéologique à Noyant (BDLISA 2018)

A ces entités hydrogéologiques s'ajoutent en fond de vallée les entités alluviales suivantes :

- 930DA03 Alluvions de la Loire moyenne après Blois
- 930FA01 Alluvions de la Loire armoricaine

<sup>3</sup> Banque de données des limites des systèmes aquifères, version février 2018

### 2.1.4.2 Série hydrogéologique retenue dans le modèle

Douze couches aquifères et aquitards (épontes, couches non aquifères) sont modélisées.

Formation géologique	Perméabilité hydraulique (m/s)
1 – Alluvions récentes	$1,0 \cdot 10^{-4}$
2 – Alluvions anciennes	$3,0 \cdot 10^{-3}$
3 – Faluns miocènes	$1,0 \cdot 10^{-5}$
4 – Calcaires de l’Eocène supérieur	$4,0 \cdot 10^{-4}$
5 – Argiles sableuses de l’Eocène inférieur	$5,0 \cdot 10^{-5}$
6 – Sables argileux du Sénonien	$2,0 \cdot 10^{-4}$
7 – Tuffeau sableux du Turonien supérieur	$4,0 \cdot 10^{-4}$
8 – Tuffeau crayeux du Turonien inférieur	$1,0 \cdot 10^{-5}$
9 – Marnes sableuses du Cénomaniens supérieur	$1,0 \cdot 10^{-7}$
10 – Sables glauconieux du Cénomaniens moyen	$2,0 \cdot 10^{-4}$
11 – Sables et graviers du Cénomaniens inférieur	$1,0 \cdot 10^{-3}$
12 – Substratum marno-calcaire jurassique ou socle armoricain primaire	$1,0 \cdot 10^{-9}$

Tableau 1 – Couches aquifères (en bleu et en vert) et épontes (en jaune) prises en compte dans le modèle hydrodynamique maillé de l’Authion

Manifestement, l’équipe de modélisation n’a pas cherché à obtenir une représentation simplifiée du contexte naturel, mais semble avoir plutôt adopté pour une démarche stratigraphique.

Les formations aux propriétés hydrodynamiques similaires auraient cependant pu être regroupées pour parvenir à une succession d’entités assimilables à des aquifères ou aquitards mineurs, moyens ou majeurs.

La série hydrogéologique aurait pu être condensée en fusionnant les aquifères contigus et les aquitards contigus de façon à former une succession d’horizons alternativement aquifères et aquitards.

### 2.1.4.3 Série hydrogéologique simplifiée

La succession des entités hydrogéologiques intégrées au modèle appelle ainsi plusieurs remarques :

- Pourquoi avoir distingué les alluvions récentes et anciennes, alors qu’aucune éponte n’est intégrée entre les deux ? Leurs caractéristiques hydrodynamiques sont proches (voire identiques) et la jalle, horizon argileux discontinu qui peut rendre captive la nappe alluviale sous-jacente, n’est pas modélisée.
- Les faluns miocènes et les calcaires de l’Éocène lacustre ne constituent pas une ressource étendue dans le bassin versant de l’Authion. Leur exploitation est modeste et se limite le plus souvent à des puits destinés à l’arrosage des potagers. En l’absence d’autres éléments (absents des rapports), leur intégration au modèle de l’Authion paraît superflue.

- Le modèle distingue trois couches pour le Séno-Turonien, en s'appuyant sur leur lithologie (sables argileux, tuffeau sableux, tuffeau crayeux). Mais d'un point de vue hydrogéologique, on considère un seul réservoir multi-couches, contenant une seule nappe. La distinction en trois couches dans le modèle apporte une complexité dispensable.
- La dernière couche constitue le substratum du modèle et à ce titre, il n'est pas nécessaire de la modéliser.

D'un point de vue hydrogéologique, et dans un objectif de simplification sans dénaturer les phénomènes à représenter par le modèle, les couches modélisées auraient probablement pu se réduire à la succession suivante :

<b>Alluvions</b>
Faluns miocènes
éponte
Calcaires lacustres éocènes
éponte
<b>Craie du Séno-Turonien</b>
Marnes à huîtres du Cénomaniens supérieur
Sables argileux du Cénomaniens moyen
<b>Sables graveleux du Cénomaniens inférieur</b>

Tableau 2 – Proposition de simplification des couches modélisées : aquifères (en bleu) et épontes (en gris)

### 2.1.5 Conditions aux limites

Elles sont détaillées dans le § 3.2.4.2 du rapport de phase 2 (A70443F).

#### 2.1.5.1 Au sud : la Loire

Un potentiel est imposé par le niveau du fleuve. Il varie à chaque pas de temps (trimestriel de 1995 à 2000, mensuel de 2001 à 2012).

#### 2.1.5.2 Au niveau des affleurements

Les conditions internes au modèle sont la recharge établie par les modèles GARDENIA (moyenne interannuelle en permanent, mensuelle et discrétisée en transitoire) : flux imposé par l'infiltration.

Une condition de débordement potentiel a été appliquée à la limite supérieure du modèle, au niveau de toutes les zones affleurantes, pour représenter les zones où la nappe peut affleurer ou déborder (sources, zones humides, thalwegs et cours d'eau).

### 2.1.5.3 Sur certaines couches captives, au nord-est

Un flux est imposé pour les couches aquifères 11 (Cénomaniens inférieurs) et 7 (Turonien) pour prendre en compte les apports de l'extrémité amont des BV souterrains de ces couches qui excèdent les limites de l'Authion.

### 2.1.5.4 Autres

Les prélèvements (eau potable, irrigation, industries et élevage) et les rejets continus de stations d'épuration sont intégrés dans le modèle en régime transitoire sous forme de conditions aux limites internes.

La plupart des limites externes ont été définies comme étant à flux nul, c'est-à-dire assimilées à une limite imperméable. Pour quelques mailles, un flux ou un niveau a été imposé pour le calage du modèle, présentées dans le tableau ci-dessous.

Localisation	Type	Valeur Initiale
Surface au droit des terrains affleurant	Flux imposé	66 à 94 mm/an
Limite Sud	Charge imposée au droit de l'aquifère alluvial	16,0 à 32,5 m NGF

Tableau 3 – Conditions aux limites externes

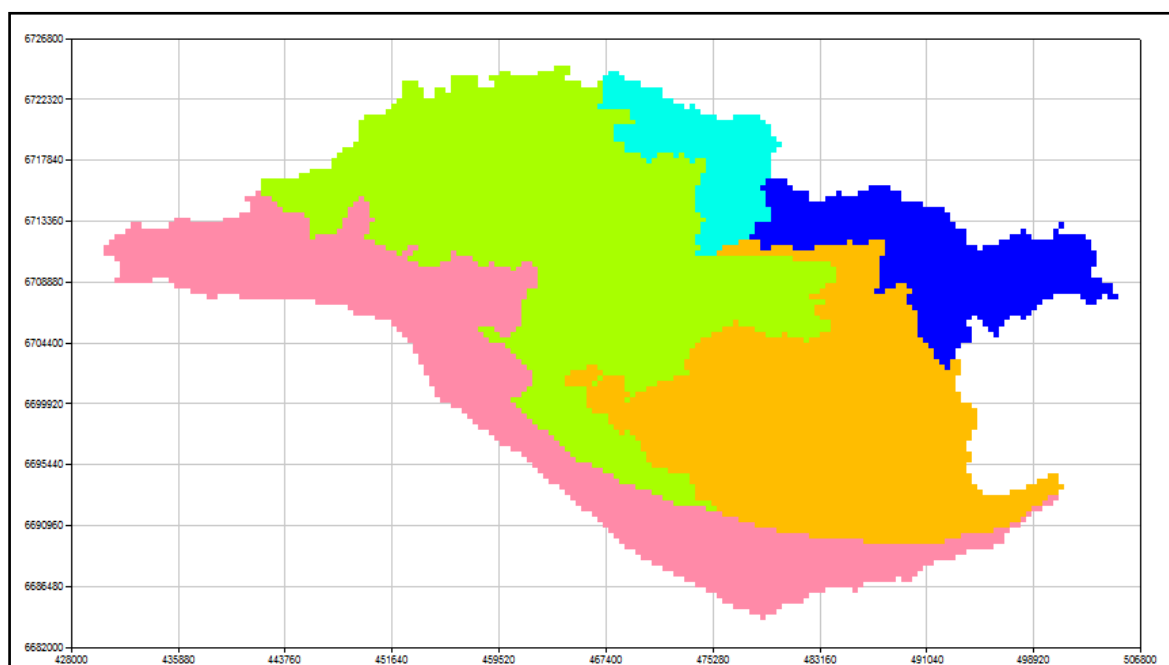


Illustration 4 – Zonation des niveaux d'infiltration (conditions de recharge de la nappe du modèle)

## 2.2 ANALYSE DES DONNÉES BRUTES ET VALORISÉES UTILISÉES POUR CONCEVOIR LE MODÈLE MAILLÉ

### 2.2.1 Données climatiques

Les stations climatiques, dont les données ont été achetées à Météo France pour constituer les données d'entrée du modèle Authion (pluies et ETP journalières), sont bien réparties au sein de la zone modélisée (cf. Illustration 5). Elles sont listées dans le § 5.4.1 du rapport A70442/B (phase 1) :

- Beaucozé ETP (1970-2000)
- Beaucozé Pluies (1967-1993)
- Baugé Pluies (1970-1983)
- Noyant Pluies (1970-1982)
- Bourgueil Pluies (1967-1982)
- Savigné-sur-Lathan Pluies (1967-1993)

Les périodes d'observation des pluies et ETP précisées dans le rapport et rappelées ci-dessus sont relativement courtes et ne correspondent pas à la période de fonctionnement du modèle (1995-2012). Elles correspondent à la période pour laquelle on dispose de données de débits des cours d'eau. Sur cette période 1967-1993, le bureau d'études suppose que le régime des cours d'eau est moins influencé par des activités anthropiques (prélèvements, aménagements hydrauliques) que la période 1994-2012.

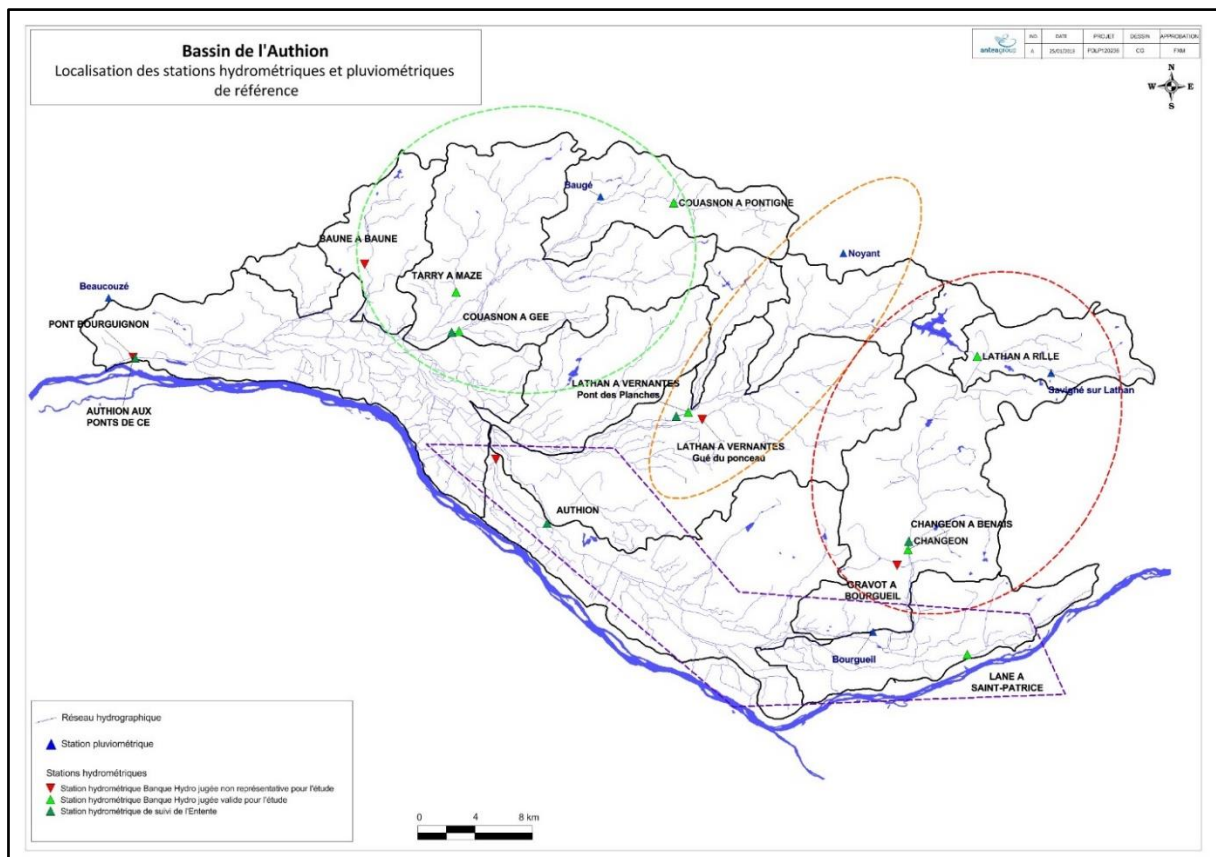


Illustration 5 – Localisation des stations climatiques dont les données ont été intégrées au modèle Authion

## 2.2.2 Géométrie des couches

La méthode employée pour représenter la géométrie des couches est peu détaillée dans les rapports d'ANTEA. On peut lire dans le rapport final A70443/F de juin 2015 (p. 55) : « La cote du mur de chaque couche géologique est établie à partir d'une interpolation des isopaques de cette couche fournis par les coupes de 167 forages (logs stratigraphiques validés en BSS), par les limites d'affleurement et par quelques ajustements ponctuels au niveau des failles connues ou supposées de forages (coupes lithologiques interprétatives validées BRGM). »

On ne trouve néanmoins dans le rapport aucune description plus avancée des 167 logs stratigraphiques utilisés pour construire la géométrie du modèle. Des intersections de surface (mur et toit) ont obligatoirement été rencontrées : comment ont-elles été traitées ? Un modèle géologique a-t-il été développé ? Quelles failles ont été prises en compte ? Quelles conséquences pour les réservoirs ?

## 2.2.3 Caractéristiques hydrodynamiques

### 2.2.3.1 Perméabilités

Le rapport A70443/F précise que : « Les caractéristiques hydrodynamiques des formations géologiques sont déterminées par des pompages d'essai en forage ou estimées à partir de synthèses bibliographiques régionales ou issues de calage de modèles précédents ».

On ne trouve néanmoins dans le rapport ni les résultats bruts ou synthétisés des essais de nappe, ni les références des synthèses bibliographiques régionales exploités dans cet objectif.

Le Tableau 1 ci-dessus donne les perméabilités ( $k$ ) attribuées aux couches modélisées avant calage. La valeur attribuée aux sables cénomaniens ( $10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ) est significativement plus élevée que la valeur moyenne que nous avons pu calculer dans le cadre d'études précédentes :

- BRGM/RP-67885-FR : transmissivité  $T = 9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ , c'est-à-dire  $k \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ .
- Rapport BRGM non encore publié : « Potentiel géothermique au sein du territoire de la Communauté de Communes Loire-Layon-Aubance » :  $T = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  sous couverture,  $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  à l'affleurement, c'est-à-dire  $k$  comprise entre  $10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$  et  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ .

Les autres valeurs de perméabilités attribuées aux couches aquifères sont conformes aux ordres de grandeur que l'on peut attendre de ces entités hydrogéologiques.



Après calage en régime permanent, les perméabilités attribuées à chaque couche sont les suivantes :

Formation géologique	Perméabilité (m/s)
1 – Alluvions de Loire récentes	1.00E-04
2 – Alluvions de Loire anciennes	3.00E-03
3 – Faluns miocènes	1.00E-05
4 – Calcaires de l'Eocène supérieur	1.00E-04
5 – Argiles sableuses de l'Eocène inférieur	5.00E-06
6 – Sables argileux du Sénonien	1.00E-05
7 – Tuffeau sableux du Turonien supérieur	1.00E-04
8 – Tuffeau marno-crayeux du Turonien inférieur	1.00E-05
9 – Marnes sableuses du Cénomaniens supérieur	1.00E-07
10 – Sables argileux du Cénomaniens moyen	2.00E-04
11 – Sables graveleux du Cénomaniens inférieur	1.00E-03
12 – Substratum jurassique ou primaire	1.00E-09

Tableau 4 – Perméabilités attribuées aux couches modélisées après calage en régime permanent

### 2.2.3.2 Coefficients d'emmagasinement

Le rapport de phase 2 (§ 3.1.3) mentionne les valeurs de coefficients d'emmagasinement disponibles dans la BSS (cf. Tableau 5).

Aquifère	Coefficient d'emmagasinement (valeurs bibliographiques BSS)
Alluvions inférieures	3.00E-05 - 2.30E-04
Alluvions supérieures	3.00E-03 - 1.10E-01
Sables sénoniens	1,20E-02
Sables graveleux (Cénomaniens basal)	3.00E-04 - 4.40E-03

Tableau 5 – Valeurs de coefficients d'emmagasinement disponibles dans la BSS

Les valeurs attribuées aux autres couches du modèle ne sont pas précisées. Les résultats du calage du modèle hydrodynamique maillé en régime transitoire sur les coefficients d'emmagasinement ne figurent pas dans le rapport de phase 2.

### 2.2.4 Données hydrométriques

La Banque Hydro recense 12 stations hydrométriques au sein de la zone modélisée, pour lesquelles les hauteurs d'eau et les débits journaliers sont disponibles (cf. Illustration 5). Les périodes de mesure sont variables d'une station à l'autre, mais toutes antérieures à 1993. Les producteurs de ces données étaient le Service Régionale d'Aménagement des EAUX (SRAE) et l'Entente interdépartementale pour l'aménagement de l'Authion.

Les données de ces stations sont fortement influencées par les aménagements hydrauliques du bassin versant (barrages, lâchers d'eau, etc.).

Seules sept stations ont été jugées pertinentes et représentatives d'un écoulement relativement naturel par le bureau d'études.

Depuis 2007, l'Entente a mis en place cinq stations hydrométriques (dont deux remises en service de stations abandonnées).

Le modèle hydrodynamique maillé en régime transitoire n'est pas calé sur les débits des cours d'eau.

## **2.2.5 Piézométrie**

### **2.2.5.1 Cartes piézométriques de référence**

Le rapport final A70443/F de juin 2015 précise : « La piézométrie des masses d'eau souterraines identifiées sur le bassin versant de l'Authion (...) peut être déterminée à partir des données bibliographiques, de niveaux ponctuels dans la BSS et des réseaux de mesures piézométriques. En effet, une sélection de piézomètres de référence a permis d'interpoler la surface piézométrique de chaque formation aquifère en hautes eaux et basses eaux. L'interpolation a été effectuée manuellement puis digitalisée sous Mapinfo. Les piézométries de référence sont présentées en phase 1. »

Différentes cartes piézométriques sont présentées en annexe du rapport de phase 1 A70442/B :

- issues de l'interpolation de données des années 1970-1980 (antérieures au développement de l'irrigation),
- produites semble-t-il à partir du modèle Authion, pour l'année 2011.

La carte piézométrique du tuffeau Séno-Turonien du bassin versant de Neuillé établie par le BRGM en 2011 n'apparaît pas.

Ces cartes piézométriques sont utiles au moment du calage du modèle en régime permanent : cette étape consiste à reproduire le mieux possible l'allure des cartes piézométriques en ajustant certains paramètres du modèle (paramètres de calage, comme la perméabilité).

La comparaison des cartes piézométriques issues de la simulation et des cartes piézométriques élaborées par interpolation de données collectées sur le terrain ne figure pas dans les documents ANTEA.

### **2.2.5.2 Chroniques piézométriques de référence**

Par ailleurs, 21 piézomètres de référence sont retenus pour le calage en régime transitoire :

- 7 piézomètres ont une chronique longue (antérieure à 2005),
- 2 piézomètres ont une chronique qui débute en 2005,
- 3 piézomètres ont une chronique qui débute en 2010,
- 9 piézomètres ont une chronique qui débute en 2012.

Ces chroniques sont souvent influencées par un ou plusieurs pompages proches. Tous les piézomètres suivis par le BRGM dans le bassin versant de l'Aauthion (réseau 0400000019 – Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du Maine-et-Loire et réseau 0400000202 – Réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines de la région Centre-Val de Loire) ont été retenus comme piézomètre de référence, à l'exception de celui de Vivy dans les alluvions de la Loire (cf. Illustration 6).

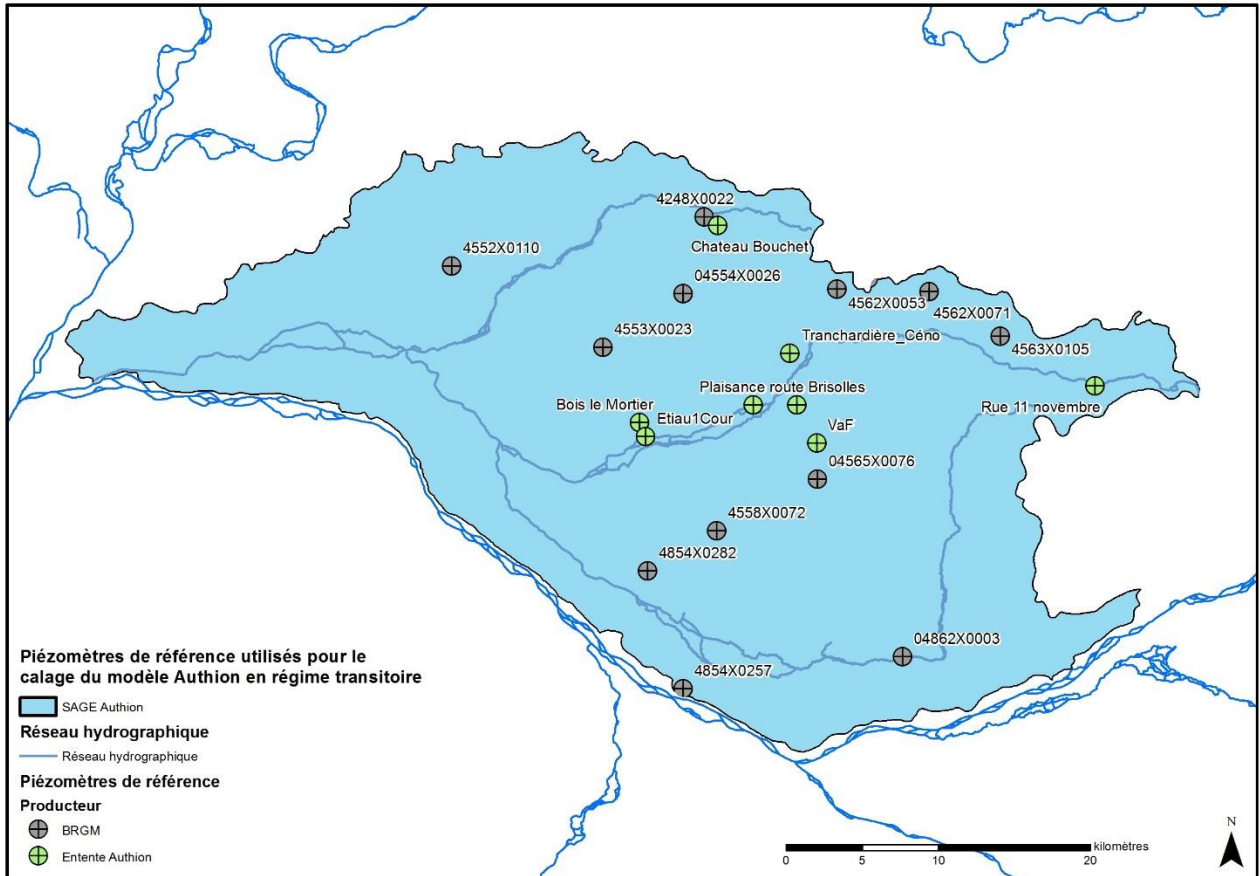


Illustration 6 – Piézomètres utilisés pour le calage du modèle en régime transitoire

Aquifères	Nombre de piézomètres de référence
Alluvions	1
Miocène	1
Eocène	1
Séno-Turonien	7
Cénomanién	11

Tableau 6 – Nombre de piézomètres de référence retenus pour le calage du modèle en régime transitoire

## 2.2.6 Volumes prélevés

Les volumes prélevés qui ont été intégrés dans le modèle lors de sa conception ont plusieurs origines :

- la base « redevance » de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne,
- la base « déclaration police de l'eau » des DDT 37 et 49,
- la base « recensement » de l'Observatoire de l'eau sur le Bassin de l'Authion (Entente Authion + Chambre d'agriculture),
- la base « redevance » de l'Entente Authion (relative uniquement aux prélèvements sur le réseau d'irrigation sous pression),
- la « banque de données du sous-sol (BSS) » qui donne la localisation des ouvrages de plus de 10 m de profondeur déclarés au titre du Code minier, mais qui ne contient pas d'informations sur les volumes prélevés.

Afin de répartir les prélèvements annuels destinés à l'irrigation sur les 6 mois d'irrigation s'étalant d'avril à septembre, des données de relèves mensuelles des compteurs effectuées par la DDT 37 ont été utilisées. La ventilation mensuelle des prélèvements annuels qui en résultent est détaillée dans le Tableau 7.

	avril	mai	juin	juillet	août	septembre
<b>Répartition moyenne des volumes (en %)</b>	4	11	14	31	33	7

Tableau 7 – Répartition mensuelle des volumes prélevés annuellement pour l'irrigation

Depuis la construction du modèle maillé en 2012, la Chambre d'agriculture des Pays-de-la-Loire a mené un travail considérable de recensement des prélèvements et de l'historique des volumes prélevés, qu'il conviendra d'intégrer lors de l'actualisation du modèle.

## 2.2.7 Valorisation des données – Bilans hydrologiques et recharge estimés par la modélisation globale

Les données climatiques, hydrométriques et piézométriques ont été utilisées pour concevoir des modèles globaux au moyen du logiciel GARDENIA, qui permet de calculer la recharge des nappes en régime transitoire. Cette recharge (calculée au pas de temps mensuel) est ensuite intégrée au modèle Authion comme condition aux limites (flux imposé) au niveau des zones d'affleurement des couches aquifères.

Les volumes prélevés ne semblent pas avoir été intégrés aux modèles.

Les modèles construits sont soit des modèles pluies-débits, soit des modèles pluies-niveaux piézométriques. Aucun modèle pluies-débits-niveaux piézométriques n'a été élaboré.

### 2.2.7.1 Calage sur les débits

La période de calage est celle pour laquelle on dispose de débits de cours d'eau, toujours antérieure à 1993.

Le rapport de phase 2 (§ 2.4.3.2) donne des informations sur la conception des modèles et la qualité de leur calage. Les calages sont mauvais à médiocres, avec des coefficients d'ajustement compris entre 0,63 et 0,86 selon les sous bassins versants. Le bureau d'études avance comme explication que le régime hydraulique des rivières du bassin versant sont plus influencés par les aménagements hydrauliques, les prélèvements et les lâchers d'eau que par les pluies et l'ETP.

### **2.2.7.2 Calage sur les niveaux piézométriques**

Seules les données des piézomètres de Brion, Pontigné, Villebernier, Noyant et Channay-sur-Lathan ont été utilisées. Les calages sont médiocres à bons, avec des coefficients d'ajustement compris entre 0,81 et 0,92 selon les sous bassins versants.

### **2.2.7.3 Recharge**

Le bureau d'études explique que les résultats des calculs en pluies/débits sont en principe plus représentatifs de l'ensemble d'un bassin versant que ceux obtenus pour les calculs en pluies/niveaux, car les niveaux piézométriques peuvent être influencés par des apports souterrains (drainance entre aquifères) en plus des infiltrations directes depuis la surface.

En définitive, les valeurs de recharge obtenues par les calculs pluies-débit des cours d'eau sont donc considérées par le bureau d'études comme les plus représentatives de la zone d'étude, en dépit de corrélations parfois mauvaises.

Le bureau d'études retient comme valeurs issues de la modélisation globale :

- moyennes interannuelles de pluies efficaces comprises entre 129 et 211 mm/an,
- moyennes interannuelles de recharge des nappes comprises entre 66 et 94 mm/an.

## **2.3 ANALYSE DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE MAILLÉ**

Les éléments constituant le modèle hydrodynamique maillé sont vérifiés sur la période de calibration de 1995 à 2012, à savoir :

- la géométrie des couches du modèle (épaisseur, extension, affleurements) ;
- les conditions aux limites ;
- les conditions initiales ;
- la distribution des paramètres hydrodynamiques caractérisant les couches aquifères et les épontes (perméabilité et coefficient d'emmagasinement) ;
- les caractéristiques des cours d'eau : géométrie (largeur, longueur, cote du fond des rivières, hauteur d'eau dans la rivière, perméabilité et épaisseur des berges) ;
- les zones de recharges.

Trois « runs test » sont effectués afin de confirmer les hypothèses de dimensionnement de l'étude de reprise, d'actualisation et d'utilisation du modèle maillé de l'Authion. Les scénarios utilisés pour ces runs tests (conditions climatiques, prélèvements) sont définis par l'AELB et la structure porteuse du SAGE en lien avec le BRGM. Il s'agit de :

- Scénario 1 : Analyser le modèle en l'état avec une attention particulière sur les années sèches connues/passées (2011-2012 // 2009-2010) et sur le secteur de Brion ;
- Scénario 2 : Analyser le modèle en modifiant certaines couches par suppression (substratum) ou association (couches alluvionnaires et/ou couches Seno-turonniennes) ;
- Scénario 3 : Analyser le modèle en modifiant l'intégration des conditions aux limites du modèle en bordure de Loire (meilleure prise en compte des variations de Niveau d'eau de Loire).

Les différents dysfonctionnements et/ou interrogations restés sans réponses sont listés par catégories en vue de leurs résolutions lors d'une étude ultérieure.

### **2.3.1 Élaboration des données de terrain en données numériques MARTHE**

Le modèle numérique a été conceptualisé sur l'analyse des données géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques, climatiques et des usages de l'eau disponibles sur le domaine étudié. La transformation ou l'élaboration de ces données brutes n'est pas décrite précisément dans les rapports à disposition. Les données brutes sont issues la plupart du temps de bases de données nationales, régionales ou locales, puis elles sont triées, centralisées et élaborées pour le modèle dans des fichiers Excel. Cette étape permet d'identifier les erreurs issues des bases de données, de les corriger, d'établir des hypothèses de calculs pour les données manquantes et d'identifier les plus pertinentes nécessaires à la conception et à la calibration du modèle. Au-delà de la définition spatiale et temporelle du domaine modélisé, cette première analyse est primordiale pour définir les états initiaux et les conditions hydrodynamiques aux limites du modèle.

Les données ainsi élaborées sont:

- Les données climatiques : précipitations et évapotranspiration potentielle sur plusieurs stations (mm/décade et mm/mois) de 1990 à 2012 (synthèse données météo.xls), localisation des stations ;
- Les données piézométriques : multiples points identifiés (plus de 100) avec ou sans mesures niveau d'eau ou profondeurs classées par unité de gestion (ChroniquesAuthion\_DonneeBase\_2018\_05\_27.xls et EnsemblesDesPuitsBassinVersantAuthion.xls) de 2012 à 2019, localisation des piézomètres;
- Les données hydrologiques : débits (m<sup>3</sup>/s) de 2008 à 2017 pour 1 station (exutoire), de 2010 à 2017 pour 2 stations et d'année variable sur 4 autres stations, localisation des stations, réseau hydrologique ;
- Les prélèvements et les rejets : en surface (en rapport avec le réseau hydrologique) et souterrains (nombreuses sources variées sans unités).

D'autres données brutes ont été élaborées pour le modèle mais n'ont pas été partagées dans le cadre de cette étude (données géologiques et paramètres hydrodynamiques par exemple). Le nombre important de données à analyser et la multitude de fichiers disponibles rend le travail

d'analyse impossible sans formation préalable à l'utilisation des fichiers existants ou sans reprendre l'analyse des données depuis la collecte des données brutes.

### 2.3.2 Domaine modélisé et géométrie aquifère

Le domaine modélisé reprend les conditions aux limites du bassin versant de l'Authion sur 263 km<sup>2</sup>.

Il est discrétisé horizontalement selon 47 081 mailles carrées actives (400m x 400m) et verticalement selon 12 couches.

La série géologique décrites précédemment est incluse dans le modèle. Depuis la surface dont l'altitude est définie en chaque maille (de 16 à 120 mNGF), les altitudes du substratum de chaque couche sont identifiées permettant alors d'établir la configuration en 3D du domaine modélisé. Chaque couche possède une épaisseur pouvant varier spatialement et être biseauté jusqu'à disparition (Illustration 7). La base du substratum (couche 12) est fixée artificiellement de façon homogène à l'altitude -120 mNGF. Les épaisseurs des couches varient de 0.013 m à 179 m avec une moyenne de 35 m.

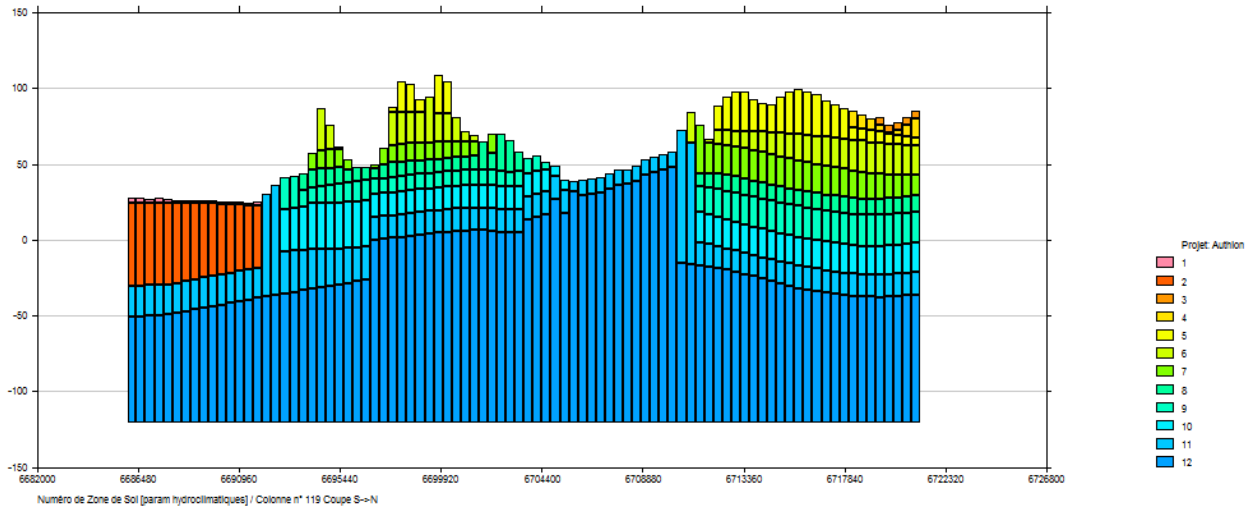


Illustration 7 – Coupe verticale orientée Sud-Nord du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon les 12 couches géologiques identifiées.

La représentation verticale des couches et leur épaisseur, parfois excessivement faible, n'est pas favorable au bon déroulement numérique des calculs.

En effet en surface il est fort probable que de nombreuses mailles « affleurantes » soient entièrement dénoyées demandant un effort numérique nécessaire à la convergence des calculs (et donc de long temps de calculs).

Un allègement du modèle pourrait être apporté en désactivant les mailles d'épaisseurs faibles (inférieures à 1 m ou 0.5 m par exemple). La 12<sup>ème</sup> couche représentant le substratum ne participe pas aux écoulements et pourrait également être désactivée afin d'alléger les calculs.

Toutes les couches aquifères se juxtaposant et ne présentant pas de différence dans les écoulements ou dans les observations piézométriques pourraient être associées en une seule couche. Il en est de même pour les couches aquicludes.

Ainsi, les couches aquifères 6, 7, 8 (sables argileux sénonien, tuffeau sableux du turonien supérieur, Tuffeau crayeux du turonien inférieur) pourraient être unies ainsi que les couches aquifères 10 et 11 (sables glauconieux du cénomaniens moyen, sables et graviers du cénomaniens inférieur).

Les couches alluvionnaires 1 et 2 pourraient être également associées à moins que la couche argileuse métrique désignée « la Jalle » ait un effet non négligeable sur les écoulements entre les eaux de surface et les alluvions productives profondes (couche 2).

Enfin les couches moins perméables 3, 4 et 5 (faluns miocènes, calcaires éocène supérieur, argiles sableuses éocène inférieur) pourraient être assemblées.

Le nombre de mailles pourrait être aisément diminué sans pour autant altérer les résultats. Les temps de calculs seraient alors nettement diminués ce qui permettrait de réaliser plus de simulations nécessaires à la calibration et à l'étude de sensibilité du modèle, mais qui faciliterait également l'ajout de processus supplémentaires non négligeables, actuellement non pris en charge par le modèle.

Enfin l'analyse spatiale du substratum des différentes couches ne fait apparaître aucun accident géologique. Aucune faille, facilitant ou faisant écran aux écoulements souterrains, n'est donc identifiée dans le modèle.

La définition des altitudes des différents substratums est issue d'une interpolation des données géologiques ponctuelles sans considération de la dynamique géologique de mise en place des couches.

Une analyse géologique plus fine des données du sous-sol permettrait d'établir, via un modèle géologique 3D, un modèle hydrogéologique plus pertinent, notamment en précisant les épaisseurs des couches aquifères et leur variation spatiale ainsi que la présence de failles et leur extension spatiale.

### **2.3.3 Conditions climatiques : recharge**

Le modèle hydrogéologique est établi de 1995 à 2012 avec un pas de temps variable allant du pas de temps trimestriel (1995 à 2000) à mensuel (2001 à 2012).

Sur cette période, la recharge et le ruissellement sont calculés préalablement par bassin et/ou sous-bassin à l'aide du code de calcul GARDENIA, à l'aide des données climatiques (précipitations et ETP) et hydrologique (débit de rivière).

Sur les nombreuses stations climatiques analysées, 5 sont utilisées pour le modèle (Beaucouzé pour l'ETP et les précipitations ; Baugé, Noyant, Bourgueil et Savigné-sur-Lathan pour les précipitations).

L'analyse des modèles GARDENIA n'a pas fait l'objet de cette expertise mais les résultats issus de ce prétraitement sont retranscrits dans le modèle maillé hydrogéologique MARTHE.

En ce qui concerne la recharge dans le modèle hydrogéologique MARTHE, 5 zones climatiques sont définies (Illustration 8) pour lesquelles chaque chronique temporelle de flux d'infiltration et d'évapotranspiration potentielle est associée en adéquation avec les pas de temps trimestriels et mensuels du modèle.

Le flux d'infiltration (c'est-à-dire la pluie « nette ») moyen fixé pour l'ensemble du modèle est de 470 mm/an, allant de 220 à 600 mm/an en adéquation avec les ordres de grandeurs climatiques pour cette région.

Une recharge « négative » permettant l'évapotranspiration potentielle de l'eau infiltrée dans le sous-sol est appliqué au modèle avec une valeur moyenne de 286 mm/an, avec des minimums et maximums indiqués de 100 et 470 mm/an respectivement. Les valeurs fixées dans le modèle ne sont pas les valeurs d'ETP capitalisées dans les données climatiques mais proviennent d'un traitement préalable.



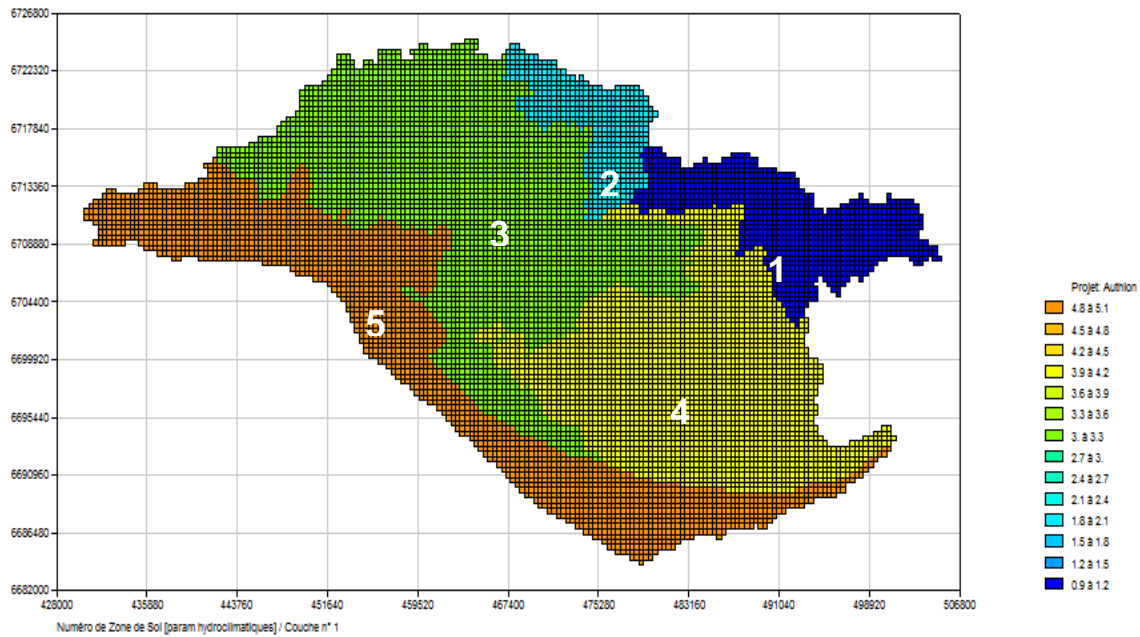


Illustration 8 – Zones climatiques définies dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.

Un processus de « reprise à la nappe » est pris en compte dans le modèle en limitant spatialement le phénomène selon la profondeur de la nappe. Ainsi dans une zone centrale du modèle l'évaporation de l'eau de la nappe est limitée entre 1 à 2 m de profondeur puis stoppée au-delà. Sur le reste du modèle l'évaporation de la nappe n'est pas limitée.

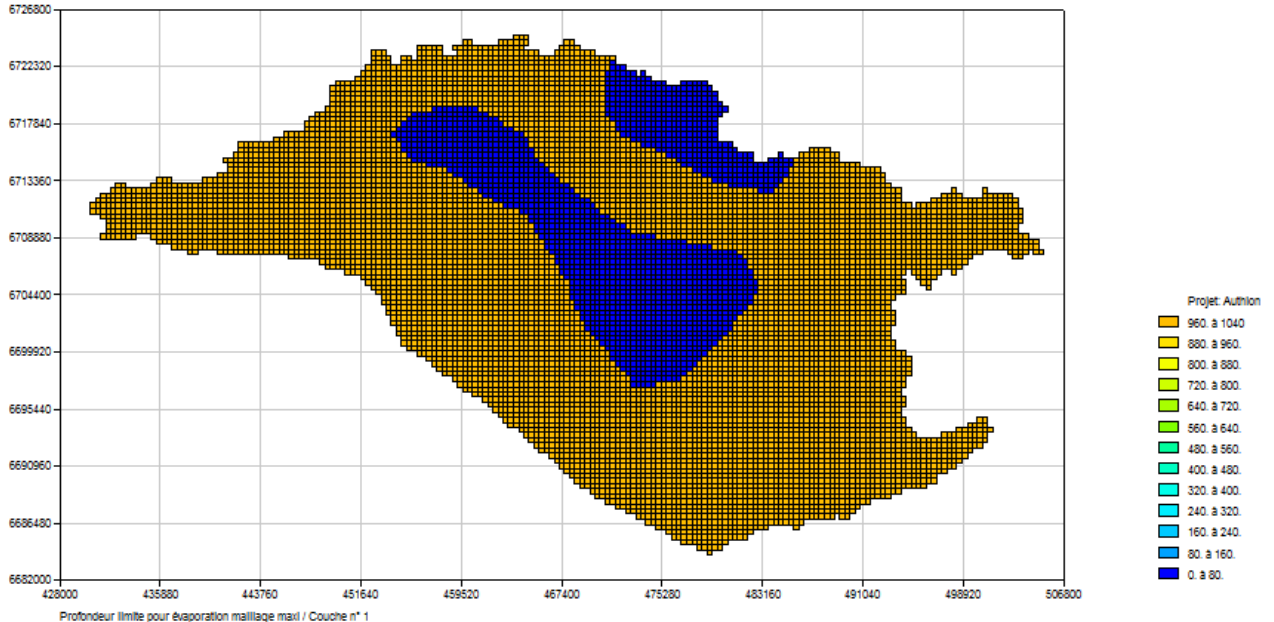


Illustration 9 – Zone de reprise évaporative de la nappe considérée dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (secteurs bleus limités de 1 à 2 m de profondeur, orange sans limite).

La recharge de la nappe « affleurante » sera finalement calculée par le code MARTHE pour chaque pas de temps en considérant le flux d'infiltration, la recharge négative et la reprise à la nappe. La recharge de la nappe serait en moyenne de 180 mm /an ce qui est un ordre de grandeur acceptable pour cette région.

Cependant par cette façon de procéder, il est assez complexe de juger de la pertinence des chroniques temporelles de précipitations et d'ETP fixées dans le modèle sans connaître le prétraitement préalable des données climatiques utilisés.

Le code GARDENIA étant inclus dans le code MARTHE pour le calcul des bilans hydroclimatiques s'effectuant au niveau du sol en chaque maille, il paraîtrait évident d'intégrer directement les chroniques de précipitations et d'ETP ainsi que les paramètres de sol GARDENIA utilisés, sans passer par l'outil de prétraitement.

Les bilans hydroclimatiques seraient plus pertinent, évitant ainsi des erreurs de manipulation entre les résultats issus des outils de prétraitement et les fichiers temporels MARTHE pour les processus associés (flux d'infiltration, recharge « négative », ruissellement, débit des sources de rivière, ...) et évitant l'utilisation des processus de reprise à la nappe pris en compte dans le modèle.

En l'absence de connaissance du traitement préalable des données utilisé pour construire les chroniques temporelles d'infiltration, il n'est pas possible d'affirmer la prise en compte des flux liés à l'irrigation dans la recharge.

Par ailleurs, les modèles hydrogéologiques sont utilisés à titre prédictif et souvent sur le long terme pour connaître l'impact des changements climatiques sur la gestion des ressources en eau. Dans cette perspective, il conviendrait de travailler directement sur la base des chroniques climatiques établies par MétéoFrance pour analyser plus aisément dans MARTHE les événements extrêmes que l'on souhaite modéliser et leurs conséquences sur les bilans hydroclimatiques.

De plus les données climatiques pourraient être issues des modèles via les grilles SAFRAN (développées par le Centre National de Recherches Météorologiques, Durand et al, 1993<sup>4</sup>).

Il s'agit d'une application particulièrement bien adaptée pour alimenter les modèles de surface à base physique nécessitant des données météorologiques complètes.

La synthèse, l'analyse et l'interprétation des données climatiques d'un territoire ne seraient plus nécessairement effectuées au préalable puisque déjà réalisées par SAFRAN.

Cette association entre modèle climatique et hydrogéologique est le fruit du développement d'une plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR<sup>5</sup> qui permet un suivi et une prévision de la ressource en eau souterraine en France, et qui facilite les études d'impact du changement climatique sur la base d'applications hydrogéologiques existantes, dont celles réalisées à l'aide du code MARTHE.

#### **2.3.4 Conditions de surface : ruissellement et réseau hydrographique (rejets et prélèvements)**

Le réseau hydrographique est décrit en 800 affluents décomposés en 2 800 tronçons avec un exutoire. Il est extrêmement développé/détaillé malgré le manque de précision opté pour la définition du maillage du modèle hydrogéologique (400 x 400 m). En effet les largeurs de tronçons fixés dans le modèles sont en moyenne de 4.7m, et varient de 0.4 à 370 m (370m pour la retenue de « Pincemaille ») indiquant la prise en compte de petits à très petits cours d'eau.

---

<sup>4</sup> Durand Yves, Brun Eric, Mérindol Laurent, Guyomarc'h Gilbert, Lesaffre Bernard and Eric Martin. 1993 : A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, A. of Glaciol., 18, 65-71

<sup>5</sup> AQUI-FR, un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale. (2015) Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Augeard, B., Besson, F., Caballero, Y., J-R de Dreuzy, P. Le Moigne, L. Longuevergne, E. Martin, T. Morel, F. Regimbeau, M. Rousseau, P. Rousseau-Gueutin, D. Thiéry, J.-M. Soubeyroux, J.-P. Vergnes et P. Viennot *Géologues*, (187), 105-109

<https://www.metis.upmc.fr/~aqui-fr/>

Si ces cours d'eau s'avèrent non négligeables dans la gestion des ressources en eau du territoire, il serait alors pertinent d'affiner le maillage du modèle sur sa totalité en réduisant la taille des mailles, ou uniquement sur certains secteurs en utilisant la technique des gigognes (affinement du maillage par boîte).

Toujours en lien avec la précision du réseau hydrographique et les éléments du modèle, la définition géométrique des cours d'eau (fond de rivière, cote de l'eau dans la rivière) n'est pas en adéquation avec la précision topographique. Le modèle numérique de terrain (MNT) moyenne certaines altitudes topographiques provoquant des incohérences dans la définition des altitudes du réseau hydrographique, et dans sa position par rapport aux creux topographiques. Certaines mailles « rivières » ont des altitudes (fond et niveau d'eau) parfois au-dessus de la topographie ou très en-dessous.

Une meilleure adéquation du réseau hydrographique avec le modèle hydrogéologique pourrait être réalisée selon la pertinence des processus en jeu et de leur échelle à savoir :

- Soit une simplification du réseau hydrographique en ne considérant que les principaux cours d'eau et retenues d'eau ;
- Soit un affinement du maillage total ou local en précisant la topographie par utilisation du MNT LIDAR<sup>6</sup>.

Seule une synthèse et une analyse détaillée du réseau hydrographique permettra de sélectionner l'option la plus appropriée.

Dans le modèle MARTHE un débit de rivière est fixé en amont de chaque cours d'eau (Illustration 10, 248 sources identifiées dans le modèle).

Les débits mensuels sont fixés et varient en fonction des saisons de 0.37 m<sup>3</sup>/h à 874.28 m<sup>3</sup>/h (avec une très forte valeur de 1741.32 m<sup>3</sup>/h) en fonction des pas de temps du modèle. Ces débits « source » représentent probablement les ruissellements rejoignant les cours d'eau calculés préalablement par GARDENIA pour chaque bassin/sous-bassin à l'aide des chroniques temporelles de données climatiques de précipitation et d'ETP discutées précédemment.

Chaque bassin/sous-bassin étant entièrement inclus dans le domaine modélisé, il paraît d'autant plus pertinent de considérer les calculs de bilan hydroclimatique dans le modèle MARTHE.

Le ruissellement calculé en chaque maille serait en adéquation avec le calcul de la recharge et les débits ainsi calculés, et serait basé sur les mêmes paramètres de sol et les mêmes chroniques temporelles de précipitations et d'ETP. Les débits de ruissellement rejoindraient les mailles rivières selon un schéma d'écoulement de surface dépendant de la topographie.

En plus des débits amonts de rivière, le modèle considère des débits « extérieurs » de rivière, représentant l'eau injectée ou pompée dans les cours d'eau.

Les débits en jeu varient temporellement en fonction du pas de temps du modèle et sont localisés précisément selon leur coordonnées spatiales (Illustration 11).

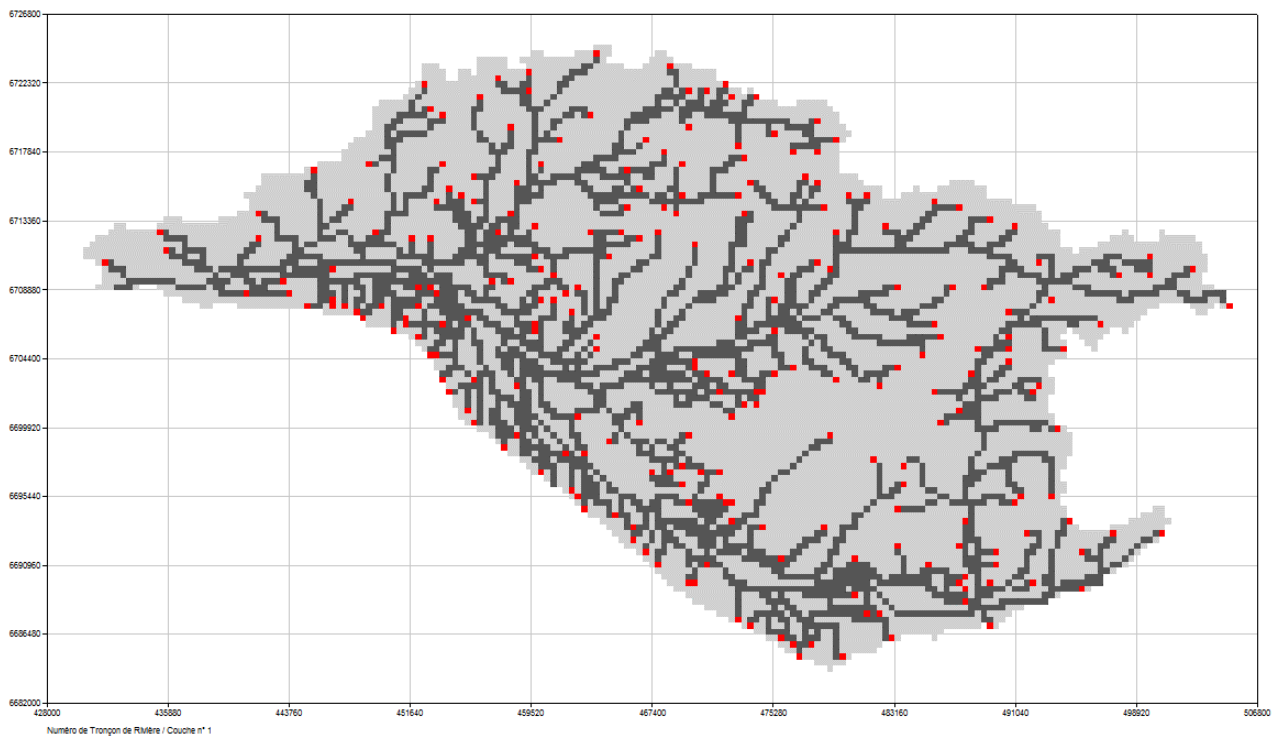
Les débits rejetés dans les cours d'eau (positifs dans le modèle) sont répartis de façon homogène et continue sur l'année. Ceux-ci pourraient être assimilés aux rejets de stations d'épuration.

Les débits prélevés dans les cours d'eau (négatifs dans le modèle) sont quant à eux temporaires et répartis de façon hétérogène sur la période estivale (avril à septembre). Ceux-ci pourraient être assimilés à des prises d'eau nécessaires à l'irrigation.

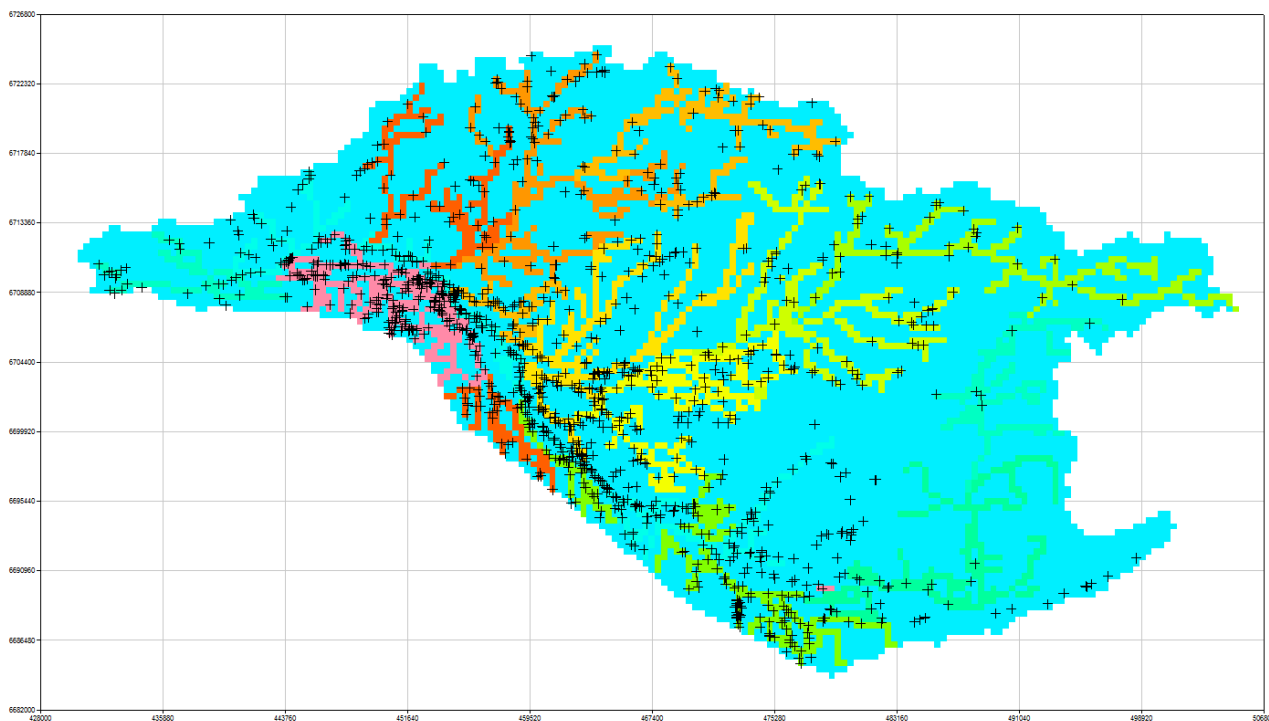
Un exemple de l'évolution de ces débits « extérieurs » de rivière fixés est représenté sur l'illustration 12 pour l'année 1999 (débits moyens sur l'ensemble du réseau hydrographique), et sont de l'ordre de 6.8 Mm<sup>3</sup> pour les prélèvements sur 981 à 1019 points, 5.5 Mm<sup>3</sup> pour les rejets sur 64 points.

---

<sup>6</sup> Light Detection And Ranging



*Illustration 10 – Localisation des débits amont de rivière (sources) fixés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.*



*Illustration 11 – Localisation des débits « extérieurs » de rivière (rejets et prélèvements) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.*

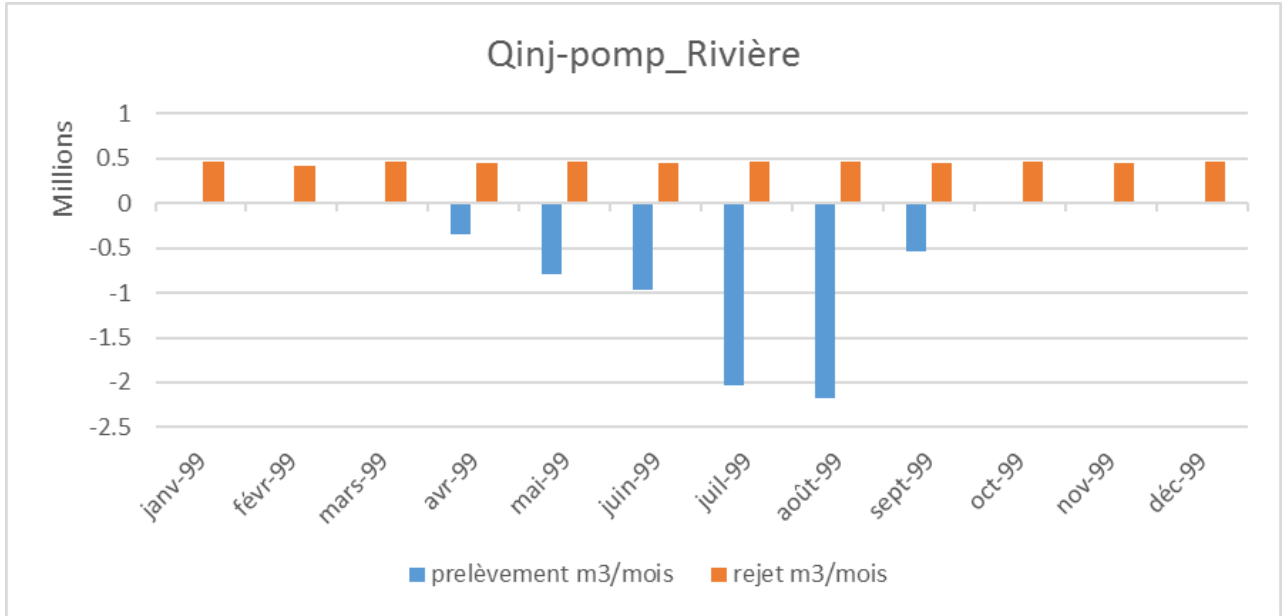


Illustration 12 – Exemple pour l'année 1999 de répartition des débits « extérieurs » de rivière (rejets et prélèvements) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.

Dans le modèle une dérivation des débits de rivières est considérée au sud-ouest comme indiqué sur Illustration 13. Les débits sont déviés de l'affluent 39 vers l'affluent 223 à 30%, et vers l'affluent 411 à 48%.

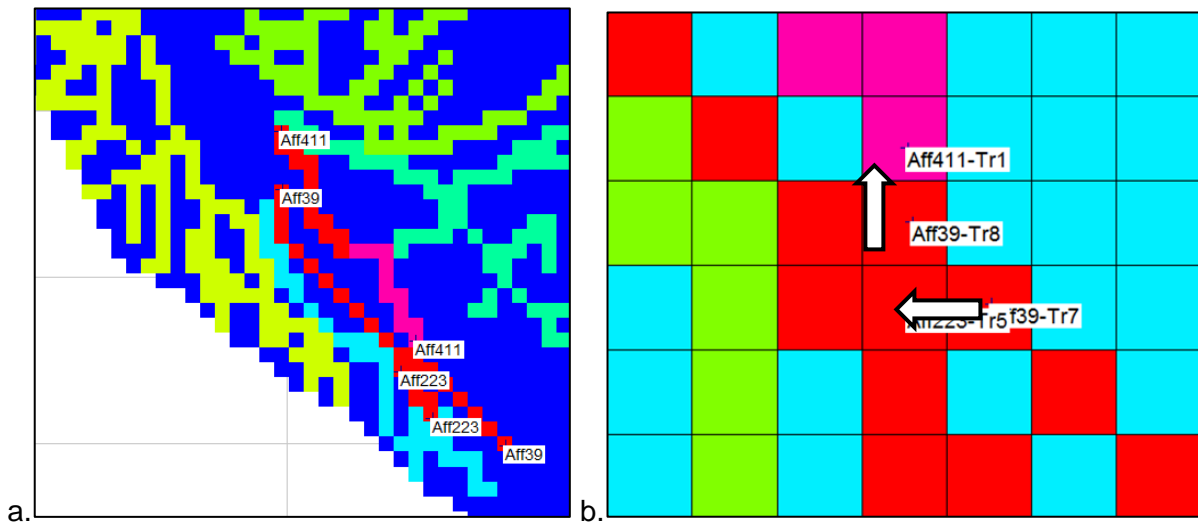


Illustration 13 – Dérivation de débits de rivière (rejets et prélèvements) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.

Dans le modèle les niveaux d'eau de rivière sont fixés en chaque maille en considérant des variations mensuelles qui sont répétées de manière cyclique d'année en année. Les niveaux concernant la Loire ne sont pas considérés dans le réseau hydrographique en tant que tels, mais plutôt comme condition aux limites du modèle, imposée à la nappe en bordure sud du domaine.

Le réseau hydrographique repose sur les différentes couches affleurantes parmi les 12 définies dans le modèle. Des débits peuvent être échangés entre le cours d'eau et la nappe sous-jacente, calculés par le code MARTHE selon les caractéristiques des cours d'eau (perméabilités et épaisseurs de colmatage de fond de rivière), et les niveaux d'eau fixés dans le cours d'eau et ceux calculés de la nappe.

Un bilan hydrologique est réalisé en chaque pas de temps permettant de calculer le débit du cours d'eau en chaque maille en fonction des sources, des rejets, des prélèvements, des dérivations et des échanges nappe vers rivière et rivière vers nappe.

Afin que les bilans hydrologiques soient les plus pertinents, il faut s'assurer autant que possible du traitement préalable des données hydrologiques, mais aussi garantir la cohérence des données climatologiques également associées au calcul de la recharge et du ruissellement.

En effet, en l'absence de connaissance du traitement préalable des données hydrologiques, il n'est pas possible d'estimer la prise en compte dans le modèle (dans les débits de sources ou de rejets) :

- ni des débits hivernaux utilisés pour le remplissage des retenues collinaires, de substitution ou autres réserves d'eau ;
- ni des débits de réalimentation, soutien d'étiage ou évacuation de crue de cours d'eau (Authion/Lane, Lathan).

Une analyse fine par affluent pourrait être réalisée, sur la base des résultats de modélisation, pour les déduire, ce qui n'a pas fait l'objet de cette expertise.

Les plans d'eau (retenue collinaire ou de substitution, étangs, lacs, ...) sont conceptualisés dans le modèle de la même façon que les cours d'eau, avec des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques différentes (taille, perméabilité, profondeur et épaisseur de fond de rivière). Des échanges nappe-rivière pourraient être configurés selon les valeurs définies dans le modèle de ces paramètres.

### **2.3.5 Prélèvements en nappe**

Environ 10 000 points de prélèvements d'eau souterraine par forage sont considérés dans le modèle, et sont localisés précisément selon leurs coordonnées spatiales et selon la couche aquifère à laquelle ils se réfèrent.

Certaines coordonnées sont définies en dehors du domaine modélisé, les prélèvements associés à ces points sont alors non considérés dans les calculs des écoulements et des bilans hydrodynamiques de l'hydrosystème.

Pour chaque point de prélèvement, une chronique temporelle des débits prélevés ou injectés est fixée de façon mensuelle pour chaque pas de temps du modèle.

Aucun forage n'injecte d'eau dans les couches aquifères du modèle, par contre tous ne prélèvent pas d'eau souterraine.

Il s'avère que sur les 10 000 points identifiés, seuls environ 50 à 1 000 points ont un débit fixé, parfois de façon continue sur l'année, ou temporaire pendant la période estivale (avril à septembre) comme le montre l'illustration 14 et l'illustration 15 pour l'année 1999.

Pour l'année 1999 par exemple, les débits continus sont de l'ordre de 0.5 Mm<sup>3</sup>/mois répartis sur une cinquantaine de forages, alors qu'ils augmentent à ~3 Mm<sup>3</sup>/mois en juillet et août, répartis alors sur 1 000 forages faisant un total d'eau souterraine annuel prélevé de -14 Mm<sup>3</sup>.

L'augmentation des débits en période estivale est liée aux prélèvements agricoles qui sembleraient être distribués selon une clé de répartition des volumes annuels déclarés ou estimés d'avril à septembre.

Par ailleurs, il n'est pas possible à partir des fichiers numériques MARTHE à disposition de distinguer le type de prélèvements (Agricultores, Domestiques, Industriels, ...), et d'identifier la prise en compte des prélèvements hivernaux dédiés aux remplissages des retenues collinaires ou de substitution.

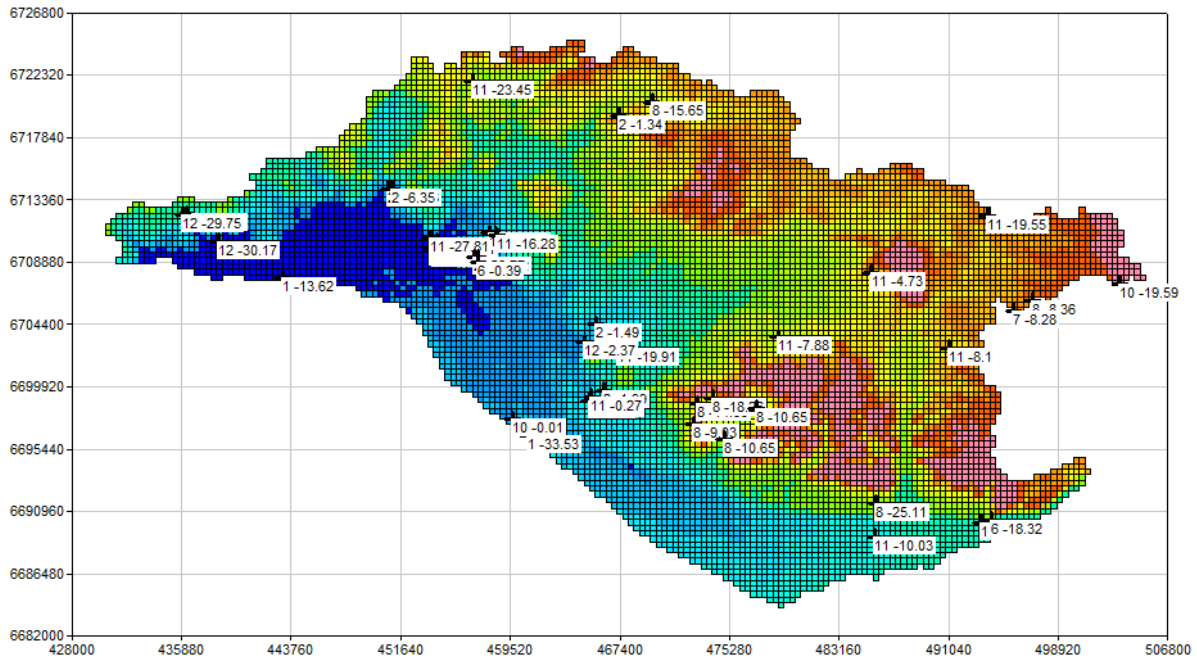


Illustration 14 – Localisation des prélèvements d'eau souterraine (~1 000 forages actifs) en août 1999 considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.

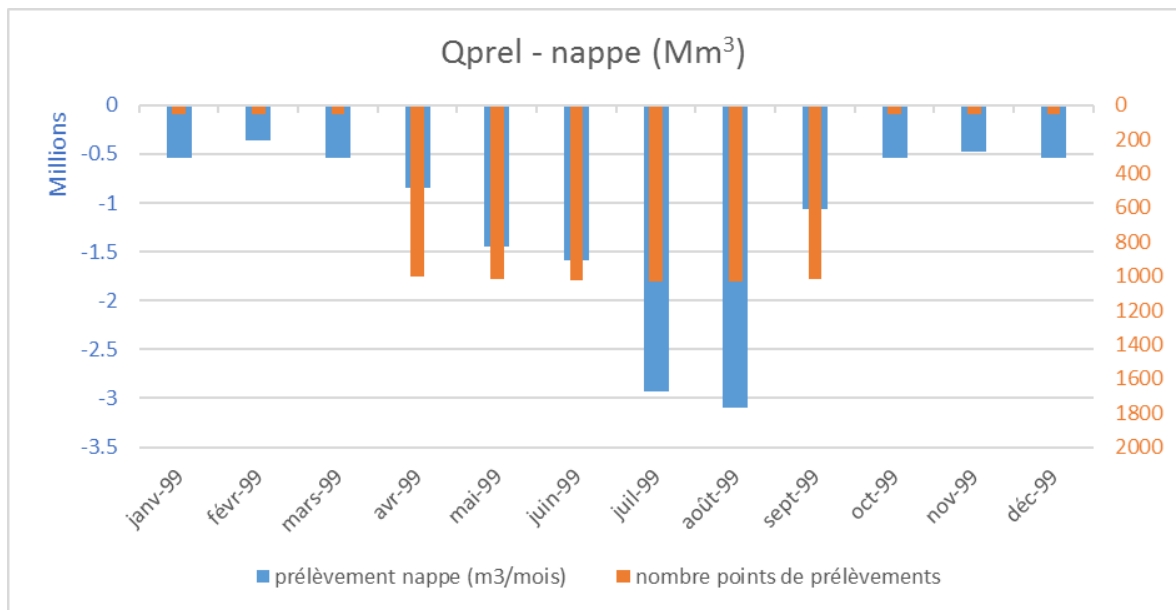


Illustration 15 – Prélèvements d'eau souterraine (volume et nombre de forages actifs) pour l'année 1999 considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.

En 1999, environ 9 000 forages ne sont pas activés ; sur les années 2000 à 2012, ils le sont à des débits relativement faibles par rapport aux 1 000 décrits précédemment.

Ces 9000 points sont répartis uniformément au centre des mailles, comme le montre l'illustration 16, avec des débits uniformisés répartis par zone.

En l'absence de description du prétraitement des données de prélèvements d'eau souterraine il est difficile de juger de la pertinence de ces points, de leur nature et de leurs débits associés.



Illustration 16 – Prélèvements uniformisés d'eau souterraine (forages activés post 1999 en rouge) considérés dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.

### 2.3.6 Conditions aux limites aquifères : charges imposées et flux extérieurs

Les conditions aux limites fixées en bordure du domaine modélisé concernent, sur la bordure sud, des niveaux d'eau imposés (charges imposées) en lien avec le niveau d'eau de la Loire et, sur une partie de la bordure nord, des flux imposés d'eaux entrant dans les couches 7 et 8 (couche aquifère du Turonien) et les couches 10 et 11 (couche aquifère du Cénomanién).

Les valeurs de charges imposées en bordure sud du domaine sont indiquées par maille sur la couche 1 des alluvions de Loire récentes (environ 250 mailles, Illustration 17) et varient en fonction du pas de temps du modèle de façon trimestrielle puis mensuelle.



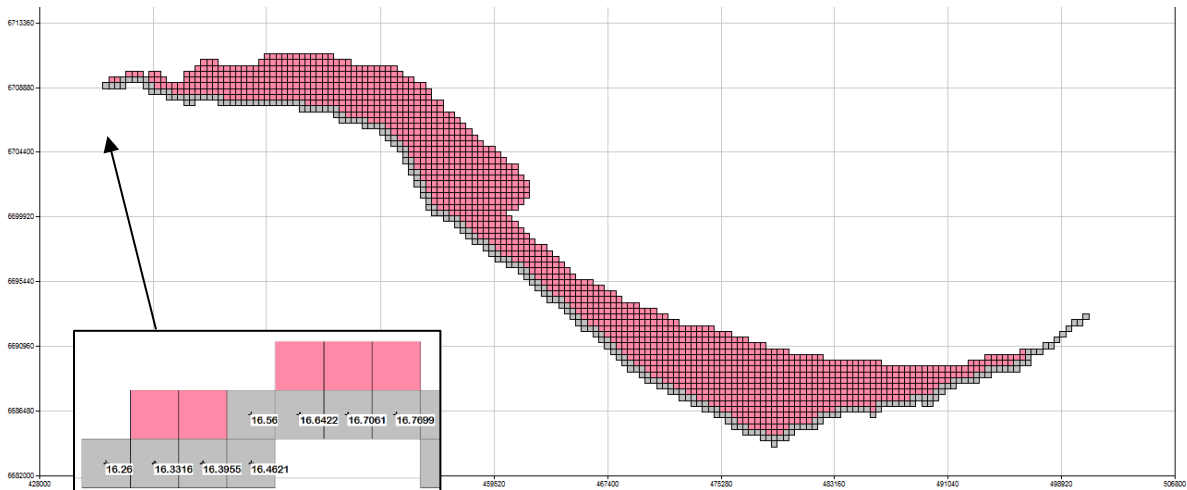


Illustration 17 – Charges imposées (mailles grisées avec valeur imposée en mNGF) au sud du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion.

Les valeurs étant harmonisées temporellement et spatialement selon la définition du modèle, un prétraitement a été certainement réalisé sur la base des niveaux d'eau enregistrés pour la Loire (données de la banque hydro moyennées, interpolées, etc.).

De nombreuses mailles ont une charge fixée au-dessus de la topographie renseignée dans le modèle, ce qui interroge sur les conditions de calculs des débordements locaux. En effet, sur ces mailles, les débordements ne pourront pas être considérés par le calcul. Au niveau des mailles voisines de même altitude, il est probable de calculer un débordement artificiel dû à ces charges imposées trop élevées ou à une configuration peu adaptée de la prise en compte des variations des niveaux de Loire. Les entrées d'eau « indirectes » de la Loire dans le Val d'Authion via la nappe alluviale devraient alors être identifiées dans les débits des cours d'eau à proximité. Il faudrait s'assurer que les débits de débordements de ces mailles rejoignent les cours d'eau et participent aux calculs du bilan hydrodynamique, mais surtout s'assurer de leur cohérence avec la réalité du terrain.

Une analyse plus poussée des échanges nappe-rivière et rivière-nappe à l'échelle de la Loire sur ce secteur permettrait d'évaluer les débits en jeu et de vérifier la pertinence de ces conditions aux limites considérées pour le Val de l'Authion.

Les flux entrants imposés en bordure nord du modèle (Illustration 18) sur les couches 7-8 (sur 33 mailles chacune) et 10-11 (sur 22 mailles chacune) sont continus et de valeurs constantes de  $3 \cdot 10^{-6} \text{m}^3/\text{h.m}^2$  (couche 7),  $2 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{h.m}^2$  (couche 8),  $1.4 \cdot 10^{-5} \text{m}^3/\text{h.m}^2$  (couche 10) et  $5.2 \cdot 10^{-4} \text{m}^3/\text{h.m}^2$  (couche 11). Ces valeurs ont certainement dû être estimées à l'aide de traitement ou de modélisation préalable de type GARDENIA.

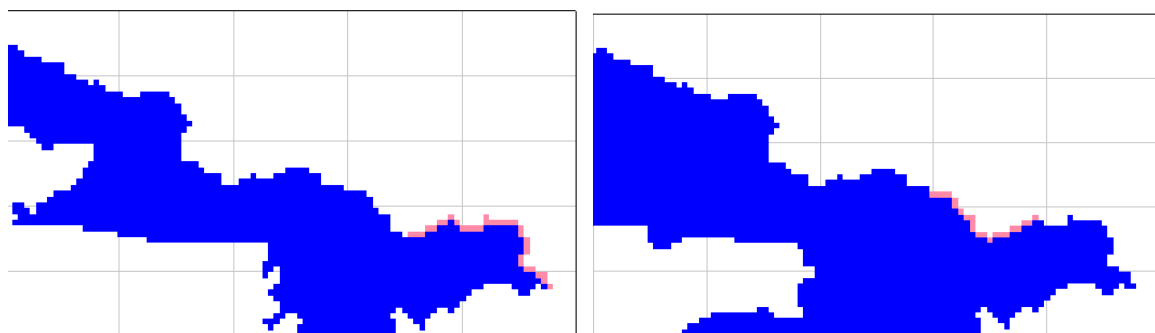


Illustration 18 – Flux imposés (mailles roses) au nord du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion pour les couches 7-8 (à gauche) et 10-11 (à droite).

### 2.3.7 Paramètres et points de calibration

La calibration est réalisée par la comparaison des chroniques temporelles observées et de celles calculées par le modèle. Les fichiers historiques renseignés dans le modèle concernent :

- les charges calculées dans les mailles pour lesquelles une observation piézométrique a été jugée pertinente. La liste des 21 points retenus est indiquée sur l'illustration 19.
- les débits de rivières pour les mailles dans lesquelles des mesures de débit de rivière sont disponibles ou nécessaires à la calibration des bilans hydrologiques du bassin. La liste des 30 points retenus (existants ou fictifs) est indiquée sur l'illustration 20.

Les charges historiques sont calculées par maille et donc pour une couche particulière. Comme le modèle discrétise verticalement des couches aquifères juxtaposées et que les crépines des piézomètres sont en contact avec ces différentes couches, il paraît donc normal que le modèle distingue plusieurs points au même code BSS ou même nom de piézomètre. Par contre, il est possible que, selon les caractéristiques hydrodynamiques choisies lors de la calibration (perméabilité, etc), le modèle calcule des niveaux piézométriques différents d'une couche à l'autre pour un même point (et donc une même maille).

La considération d'une unique couche aquifère serait plus pertinente dans ces cas.

Position maillage	Nom / code BSS	Position maillage	Nom / code BSS
X112_Y19_Z7	4248X0022	X127_Y50_Z11	Brisolles
X112_Y19_Z8	4248X0022	X120_Y50_Z11	Plaisance
X112_Y19_Z10	4248X0022	X102_Y55_Z11	Etiau2Pré
X70_Y27_Z10	4552X0110	X101_Y53_Z11	Bois le Mortier
X70_Y27_Z11	4552X0110	X144_Y91_Z11	04862X0003
X95_Y41_Z11	4553X0023	X108_Y32_Z7	04554X0026
X133_Y31_Z10	4562X0053	X115_Y20_Z4	Chateau Bouchet
X133_Y31_Z7	4562X0053_T	X114_Y20_Z5	Chateau Bouchet
X148_Y31_Z7	4562X0071	X140_Y30_Z6	4562X0074
X148_Y31_Z8	4562X0071	X140_Y30_Z7	4562X0074
X148_Y31_Z10	4562X0071	X140_Y30_Z8	4562X0074
X176_Y46_Z3	Rue 11 novembre	X140_Y30_Z10	4562X0074
X176_Y46_Z6	Rue 11 novembre	X114_Y71_Z7	4558X0072
X109_Y96_Z1	4854X0257	X114_Y71_Z8	4558X0072
X109_Y96_Z2	4854X0257	X114_Y71_Z10	4558X0072
X104_Y76_Z10	4854X0282	X114_Y71_Z11	4558X0072
X104_Y76_Z11	4854X0282	X130_Y62_Z6	04565X0076
X160_Y39_Z7	4563X0105	X130_Y62_Z7	04565X0076
X160_Y39_Z8	4563X0105	X130_Y62_Z8	04565X0076
X131_Y56_Z10	VaF		
X131_Y56_Z11	VaF		
X126_Y42_Z11	Tranchardière_C		

Illustration 19 – Liste des charges historiques calculées par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon leur position dans le maillage (X : colonne, Y : ligne, et Z : couche).

<b>Position maillage</b>	<b>Nom station</b>	<b>Position maillage</b>	<b>Nom station</b>
X162_Y44_Z1	Lathan à Rillé	X123_Y94_Z1	N_Lane_Pt_Malhe
X110_Y54_Z1	Lathan au Mouli	X151_Y83_Z1	N_Changeon
X150_Y76_Z1	Changeon Paluau	X126_Y92_Z1	N_Loges
X150_Y78_Z1	Changeon Benais	X119_Y90_Z1	N_Anguillere
X150_Y80_Z1	Gravot à Bourgu	X111_Y87_Z1	N_Automne_Est
X71_Y40_Z1	Couasnon à Gée	X109_Y85_Z1	N_Automne_Ouest
X67_Y40_Z1	Tarry à Mazé	X17_Y44_Z1	N_Av_Pt_Bourgui
X56_Y28_Z1	Baune à baune	X151_Y77_Z1	N_Saint_Gilles
X56_Y34_Z1	Aulnaies	X152_Y80_Z1	N_Paquerie
X80_Y57_Z1	Bois_long	X129_Y98_Z1	N_aff_Lane
X79_Y55_Z1	Curee	X155_Y54_Z1	Changeon Gravot
X87_Y73_Z1	Authion_gue_de_	X113_Y50_Z1	Riverolles_Pont
X90_Y75_Z1	Amont_100	X100_Y15_Z1	Vieille Atrée m
X89_Y74_Z1	Amont_900	X84_Y13_Z1	Moulin Echemiré
X157_Y41_Z1	N_Lathan_am_Ril	X80_Y20_Z1	Moulinet Guéjoi

*Illustration 20 – Liste des débits en rivière calculés par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon leur position dans le maillage (X : colonne, Y : ligne, par défaut les rivières sont associées à la couche 1).*

La phase de calibration est une phase itérative lors de laquelle les valeurs des paramètres hydrodynamiques sont testées de façon à respecter autant que possibles les variations de piézométries et de débits observées.

Les valeurs des paramètres sont sélectionnées par le modélisateur hydrogéologue dans un intervalle de valeur adapté à l'environnement étudié.

Elles sont réparties spatialement de façon homogène ou non, et concernent les paramètres suivants :

- les perméabilités des couches et du fond des rivières,
- les anisotropies verticales,
- les coefficients d'emménagement libre et captif des couches.

Les valeurs des paramètres influençant l'infiltration et l'évapotranspiration pourraient également faire l'objet de cette étape de calibration.

Pour chaque simulation réalisée dans cette phase de calibration, il est nécessaire d'analyser les résultats du calcul et, en premier lieu, de s'assurer de la convergence des calculs numériques. Dans un second temps l'analyse du bilan hydrodynamique permet de savoir si les conditions aux limites sont respectées par le modèle et notamment de savoir si les volumes prélevés fixés sont entièrement pris en compte.

Enfin les calculs de piézométrie et de débits sont confrontés aux chroniques temporelles mesurées, finalisant alors le jugement de la pertinence des valeurs sélectionnées pour la calibration du modèle.

Une analyse plus fine des résultats de modélisation est nécessaire pour juger de la pertinence du modèle sous sa forme actuelle. C'est l'objet des 3 simulations « scénario-tests » réalisées dans cette expertise et présentées au paragraphe suivant.

### 2.3.8 Trois Scénario-tests : évaluation du modèle hydrodynamique maillé

Dans le but de juger de la pertinence du modèle pour répondre aux problématiques de gestion des ressources en eau du Val de l'Authion, trois simulations « scénario-tests » sont réalisées. Il ne s'agit pas ici d'utiliser le modèle pour définir de nouveaux usages ou nouveaux modes de gestion, mais plutôt de modifier le modèle pour en proposer une amélioration.

En aucun cas les résultats issus de ces simulations « tests » ne devront être utilisés pour l'appui à la gestion de la ressource en eau.

Dans la mesure où il s'agit de tester la robustesse et la fiabilité du modèle, il paraît pertinent de confronter le modèle aux configurations conceptuelles qui ont été identifiées précédemment. Il s'agit alors d'analyser le modèle selon les 3 scénarios suivants :

- **Scénario 1** : modèle en l'état avec une attention particulière sur les années sèches passées (2011-2012 et/ou 2009-2010) notamment sur le secteur de Brion ;
- **Scénario 2** en modifiant certaines couches par suppression (substratum) ou association (couches alluvionnaires et/ou couches Seno-turonniennes) dans un but de cohérence avec les observations piézométriques et d'allègement des calculs ;
- **Scénario 3** en modifiant l'intégration des conditions aux limites du modèle en bordure de Loire afin d'identifier l'impact de conceptualisation des variations de Niveau d'eau de Loire sur le bilan hydrodynamique du bassin.

D'autres scénarios discutés avec le SAGE, non prioritaires, permettraient de compléter l'analyse du modèle, par exemple :

- Analyser le modèle en cumulant plusieurs années sèches et en travaillant sur les unités de gestion à enjeux :
  - unités non réalimentées via le réseau hydrographique et jugées déficitaires en eau comme l'UG9 et l'UG5 ;
  - ou sur les prélèvements agricoles en nappe à l'Est du territoire où de plus en plus de demande en eau d'aspersion hivernale est faite pour lutter contre le gel.
- Analyser le modèle sous une version simplifiée, en retirant les paramètres ne répondant pas à une réalité physique descriptible et observable sur le territoire, comme par exemple :
  - la reprise évaporative de la nappe limitée pour certains secteurs du territoire ;
  - les débits prélevés en nappe de façon homogénéisée par secteur géographique ;
  - ou encore les débits « sources » imposés en amont de chaque cours d'eau.

#### 2.3.8.1 Scénario test 1 : analyse du modèle en l'état

Le modèle sous sa forme actuelle de 1995 à 2012 nécessite un temps de calcul d'environ 4h (Temps CPU de 15 300) et converge avec une erreur maximale de l'ordre de 10%.

Un certain nombre d'erreurs facilement corrigibles sont listées et, concernent notamment des coordonnées et des altitudes non cohérentes avec la définition géométrique du domaine modélisé.

Environ 20% des volumes prélevés fixés dans le modèle ne sont pas satisfaits par le calcul, par manque d'eau dans les mailles (Illustration 21).

Cependant, localement (par unité de gestion), les écarts des débits non considérés par le modèle peuvent être beaucoup plus faibles comme pour l'UG3 « Le Lane et Changeon aval » de l'ordre de 9%, mais aussi beaucoup plus importants comme pour l'UG9 « bassin des trois-Rys » à 40% et pour l'UG7 « le Lathan et ses affluents moyens » à 50%.

Il paraît alors nécessaire d'ajuster la calibration ou revoir le modèle conceptuel sur ces secteurs avant d'utiliser les résultats de simulation.

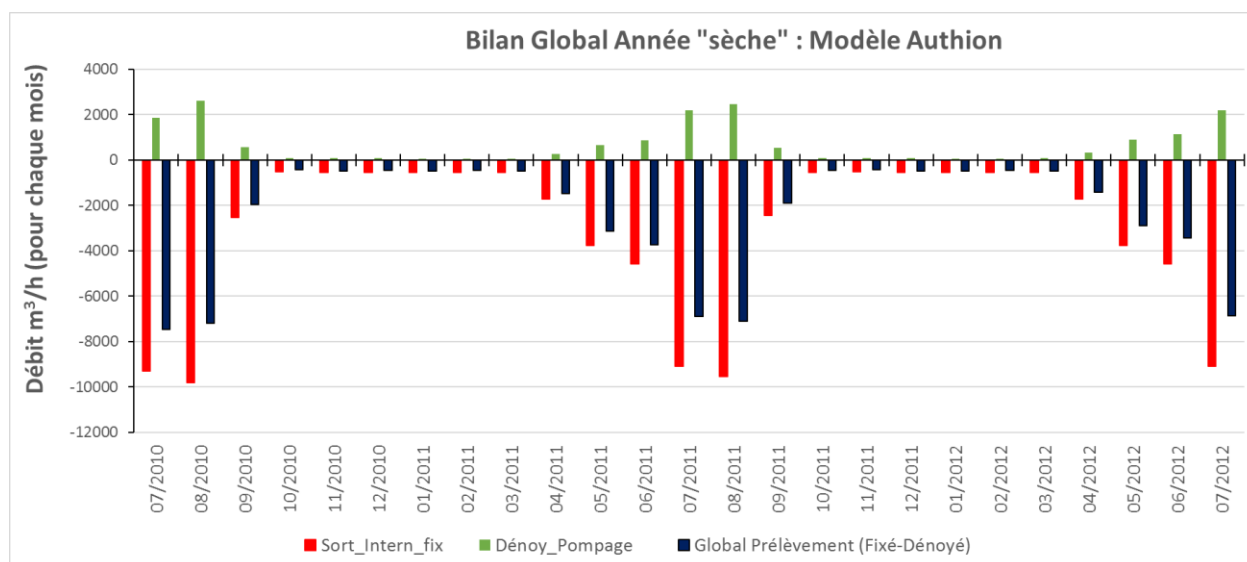


Illustration 21 – Débits considérés pour les prélèvements en nappe pour l'« année sèche » (2011) calculés pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Sort\_intern\_fix : prélèvements fixés en nappe ; Denoy\_Pompage : débits prélevés non considérés par dénoyement des pompages ; Global Prélèvement (Fixé-Dénoyé) : débits prélevés finalement considérés).

Ciblé sur une période « sèche » (2011), le bilan hydrodynamique calculé à l'échelle du bassin est présenté en indiquant toutes les entrées d'eau (valeurs positives) et toutes les sorties d'eau (valeurs négatives) prises en compte par le modèle pour les eaux souterraines, « nappe » (Illustration 22), et les eaux de surfaces, « rivière » (Illustration 23).

L'apport d'eau majeur dans le modèle provient des charges imposées aux limites sud (Loire) et les principales sorties calculées sont situées au niveau des débordements de nappe (le niveau piézométrique dépasse l'altitude topographique) et des échanges de nappes vers les rivières.

Le modèle actuel calcule un débit à l'exutoire du Val d'Authion situé dans les ordres de grandeur observés.

80-85% du débit calculé à l'exutoire provient du débordement de la nappe et des échanges nappe-rivière. Ce constat « numérique » reste à confirmer en sachant que la majeure partie des eaux entrantes repose sur les conditions aux limites fixées au sud du domaine au niveau de la Loire, qui sont elles-mêmes discutables.

Une analyse de sensibilité des processus et des paramètres de calibration aiderait à confronter les différentes possibilités et à affiner la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème.

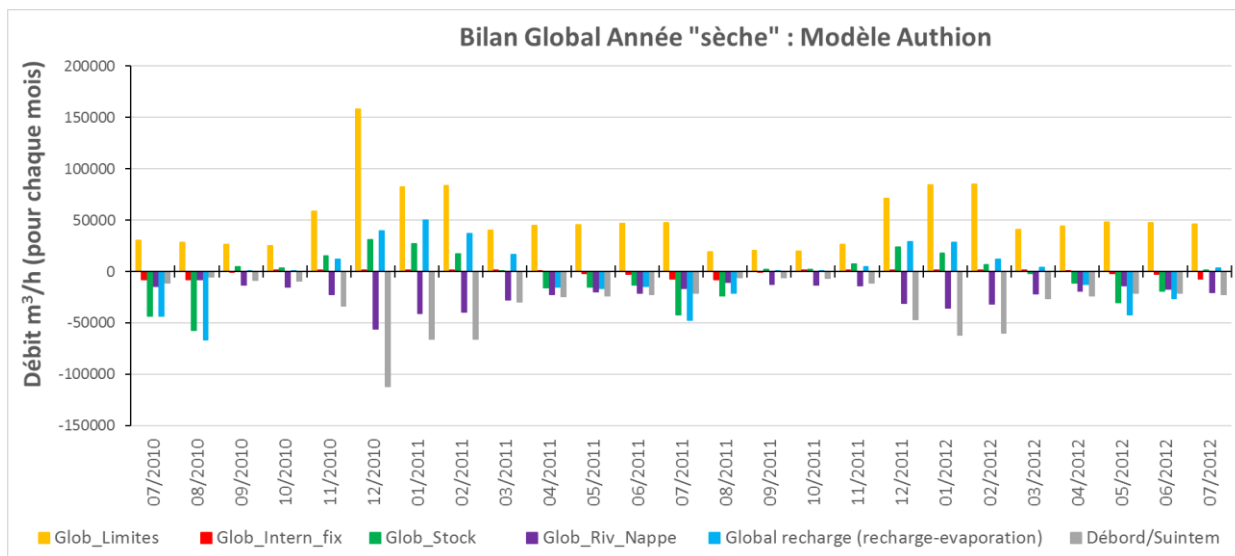


Illustration 22 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Glob\_Limites : charges imposées (Loire) dans l'aquifère ; Glob\_intern\_fix : prélèvements et flux fixés en nappe ; Glob\_stock : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob\_Riv\_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface).

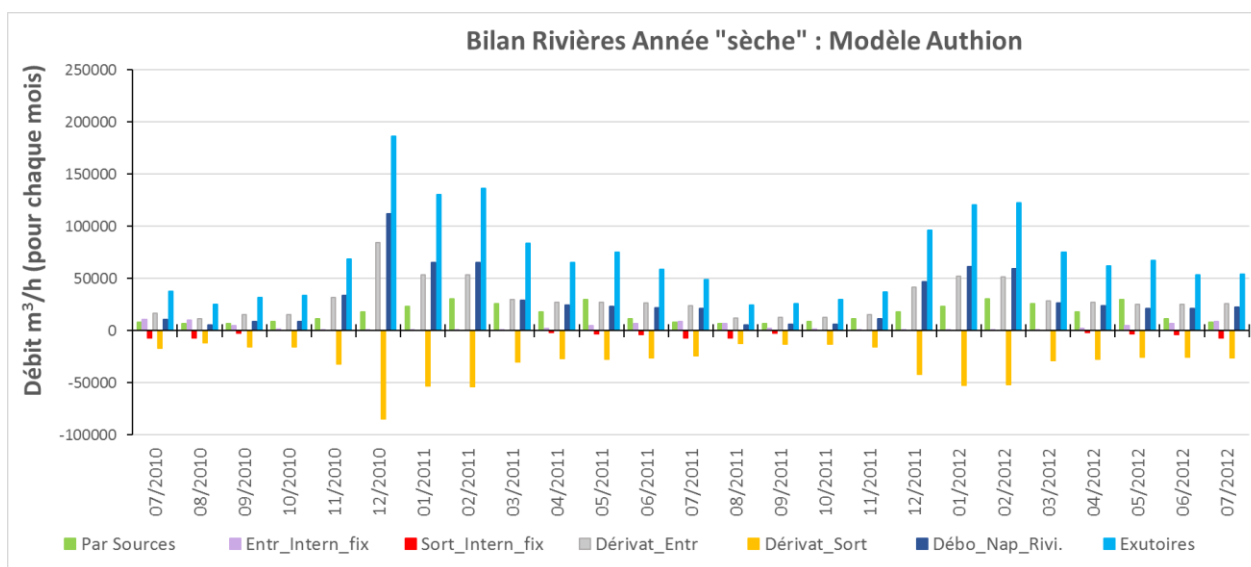
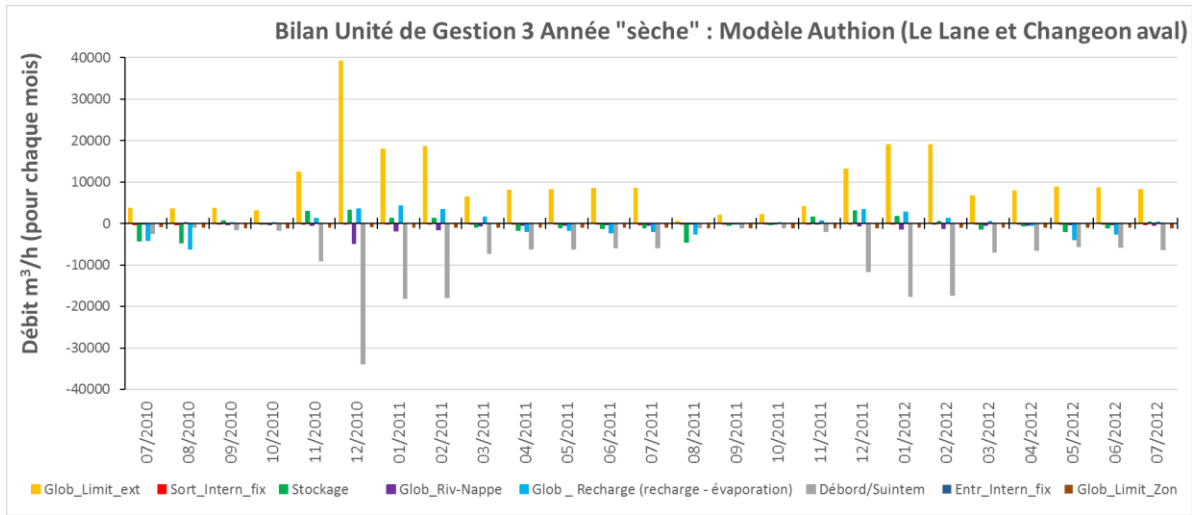
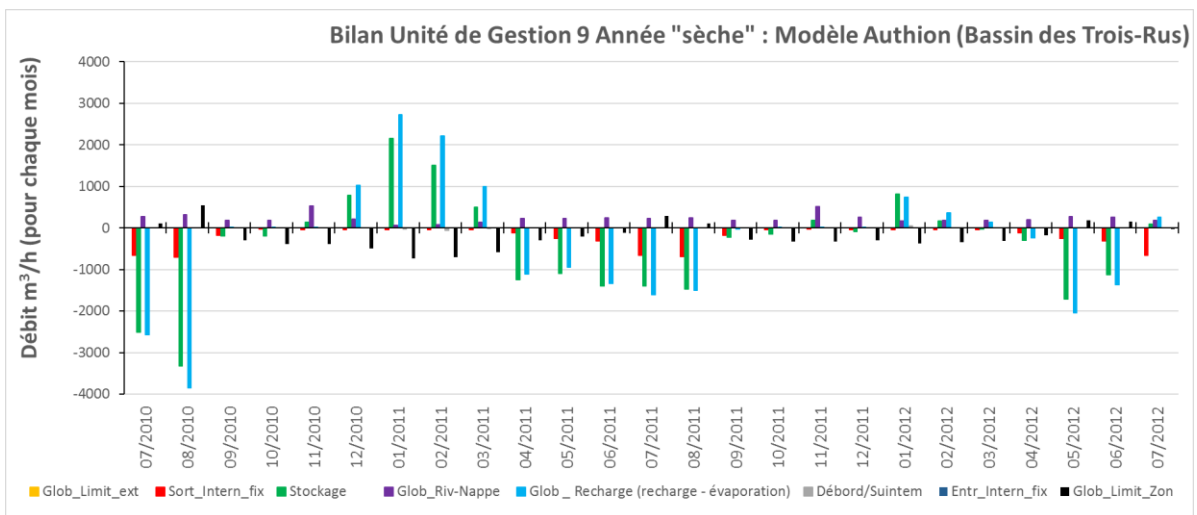


Illustration 23 – Bilan hydrodynamique de rivière « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Par Sources : débit rivière amont fixé ; Entr\_Intern\_fix : Débits rejetés en rivière ; Sort\_intern\_fix : prélèvements en rivière ; Dérvat\_Entr : débit entrant par dérivation ; Dérvat\_Sort : débit sortant par dérivation ; Débo\_Nap\_Rivi : débit de débordement de nappe rejoignant la rivière ; Exutoires : débits à l'exutoire).

Bien que le modèle puisse être perfectible, il montre nettement des différences de fonctionnement hydrodynamique en fonction des unités de gestion considérées, et donc son fort potentiel à raisonner par unité de gestion. On remarque en particulier que les bilans hydrodynamiques calculés pour les UG3 et UG9 (Illustration 24) sont complètement différents en raison de leur configuration hydrodynamique propre (conditions aux limites, recharge, prélèvements, ...).



a.



b.

Illustration 24 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé par zones pour les unités de gestion UG3 (a.) et UG9 (b.) du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (Glob\_Limit\_ext : débits fixés aux limites de la zone par charges imposées ; Sort\_intern\_fix : prélèvements fixés en nappe ; Stockage : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob\_Riv\_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface ; Entr\_Intern\_fix : débits fixés entrant dans l'aquifère ; Glob\_Limit\_Zon : débits échangés en limite d'UG).

D'un point de vue piézométrique, les 21 niveaux simulés en différents points du modèle sont comparés aux niveaux observés.

Les 4 piézomètres pris comme exemples sur l'illustration 25 montrent que les niveaux simulés en un même point peuvent être uniformes (b. et d.) ou complètement différents (a. et c.) selon la couche considérée.

La discrétisation verticale en 12 couches semble alors peu pertinente pour certains secteurs.

Les variations piézométriques simulées montrent des évolutions comparables aux variations observées, avec des différences de niveaux plus ou moins variables selon les secteurs.

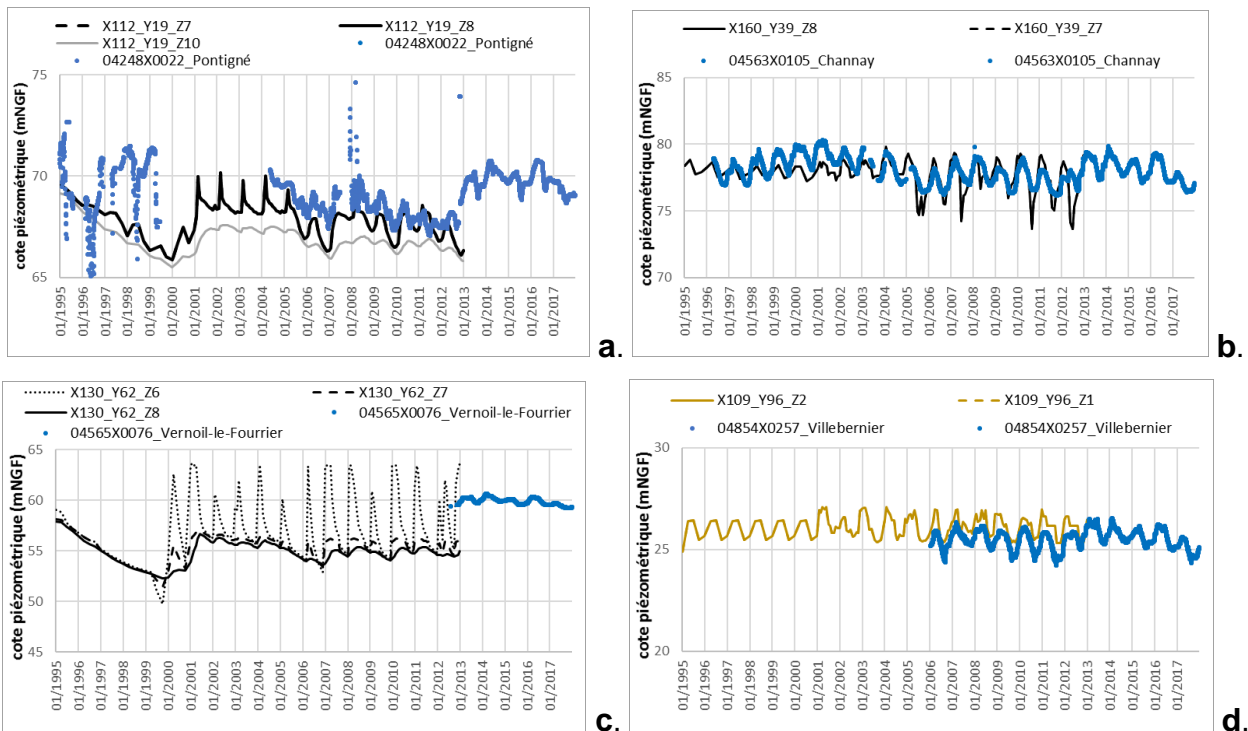


Illustration 25 – Confrontation des cotes piézométriques observées et calculées par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion en différents points.

Le suivi piézométrique sur le secteur de Brion [ (04553X0023/F ; X (L93) 465782m ; Y(L93) 6710766m ; Z(mNGF) 46 ; Profondeur 15 m ; couche 11 de l'aquifère des sables et grès du Cénomaniens ) ] est simulé en utilisant le modèle existant sous sa forme actuelle. La localisation du piézomètre est indiquée sur l'illustration 26. La confrontation des niveaux piézométriques observés et calculés en ce point (Illustration 27) montre que les évolutions de niveau d'eau sont semblables, avec cependant une sous-estimation générale des niveaux d'eau simulés par le modèle (0.5 m à 1.5 m de différence).

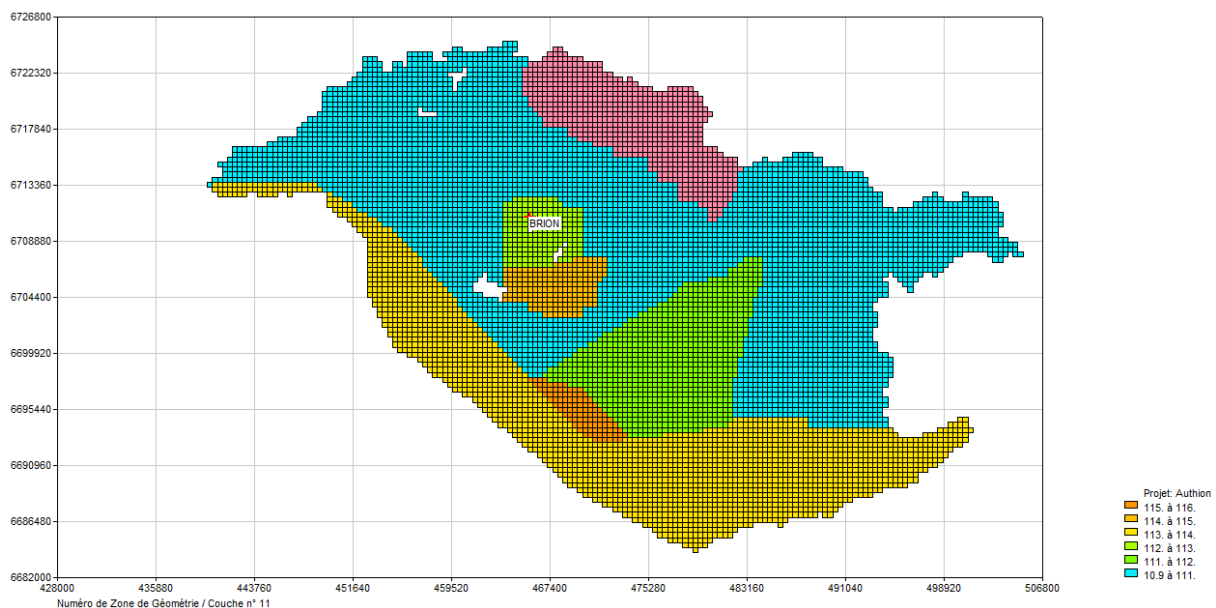


Illustration 26 – Localisation du piézomètre de Brion, 04553X0023, dans le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (X95\_Y41\_Z11).



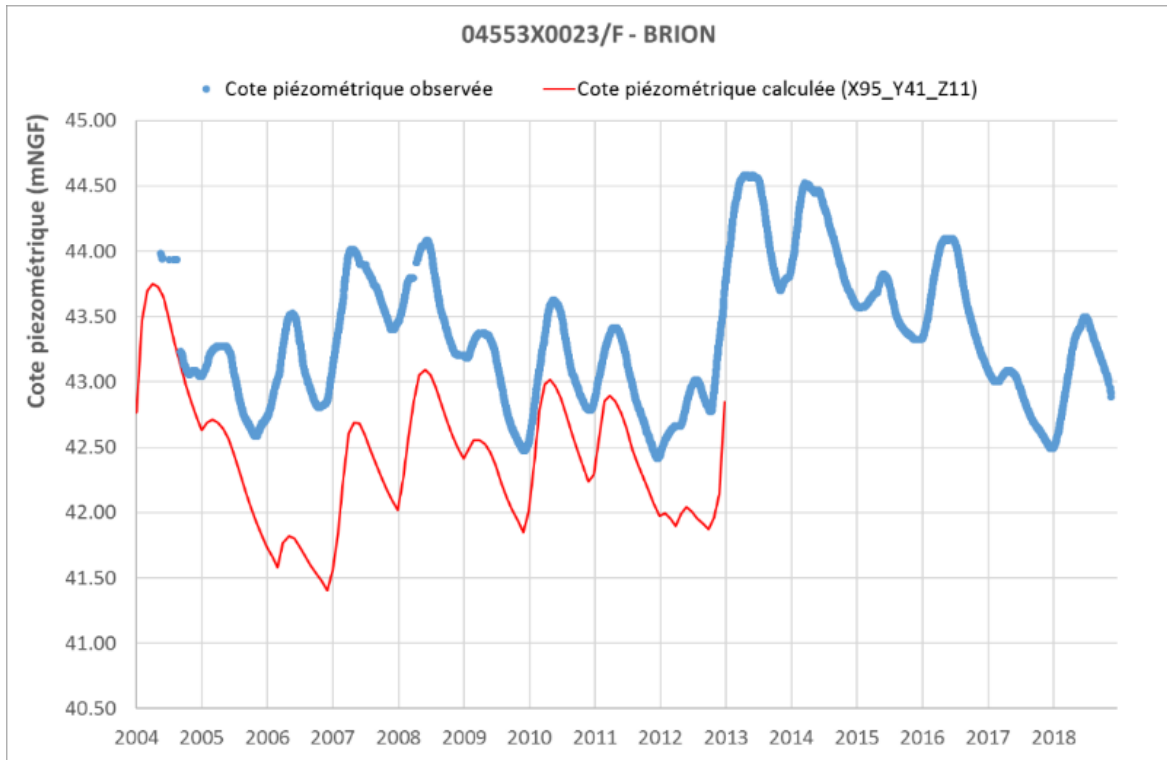


Illustration 27 – Confrontation de la cote piézométrique observée au piézomètre de Brion, 04553X0023, et calculée par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion (X95\_Y41\_Z11).

### 2.3.8.2 Scénario test 2 : Analyse du modèle en associant des couches aquifères

Le modèle sous sa forme actuelle de 1995 à 2012 est testé en modifiant la géométrie des couches géologiques du modèle, c'est-à-dire, en associant les couches aquifères juxtaposées représentant une nappe unique et en désactivant la couche composant le substratum imperméable, qui n'intervient pas dans les écoulements d'eau souterraine. Ainsi :

- les couches alluvionnaires 1 et 2 sont associées en une unique couche alluvionnaire réduisant de fait le nombre de mailles de très faibles épaisseurs ;
- les couches aquifères 6, 7, 8 (sables argileux sénonien, tuffeau sableux du turonien supérieur, tuffeau crayeux du turonien inférieur) sont associées en une unique couche aquifère
- et enfin, la couche du substratum 12 est désactivée.

Dans cette configuration, le nombre de couche est alors réduit à 8 (Illustration 28) et le nombre de mailles actives du modèle à 30 004 (47 081 dans le modèle originel).

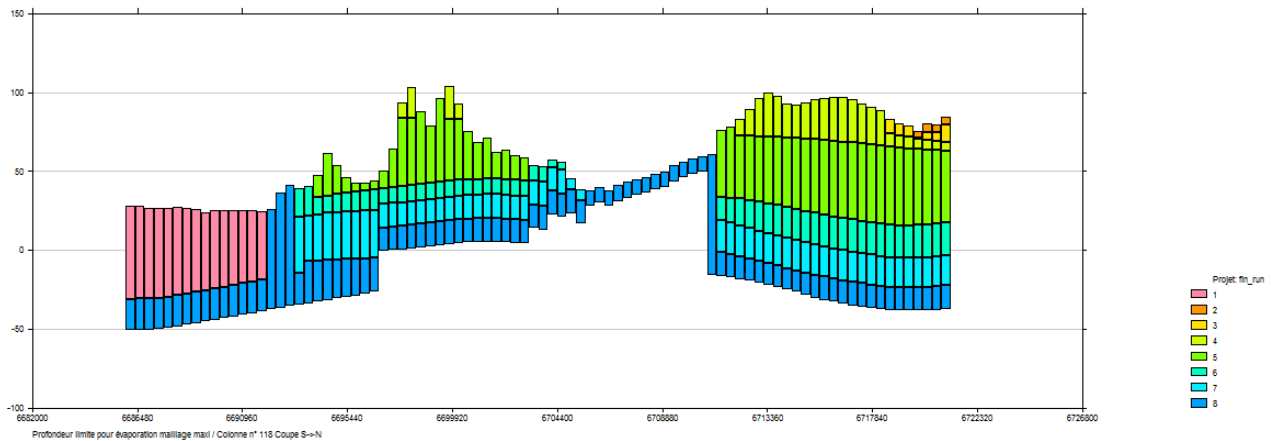


Illustration 28 – Coupe verticale orientée Sud-Nord du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion selon le scénario-test 2 simplifiant la géométrie verticale en 8 couches.

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, coefficients d'emmagasinement, ...) sont attribuées pour les nouvelles couches ainsi formées. Ces valeurs sont les moyennes géométriques des valeurs considérées dans le modèle original afin de ne pas détériorer, autant que possible, la calibration du modèle.

Ce modèle modifié nécessite un temps de calcul d'environ 2h30 (Temps CPU de 9 130) pour simuler la période 1995- 2012 et converge avec une erreur maximale de l'ordre de 9% sans aucune modification.

Globalement les débits manquants représentent toujours environ 20% des volumes prélevés fixés à la nappe (Illustration 29) et les débits du bilan hydrodynamique de nappe (Illustration 30) et de rivière (Illustration 31) restent dans les mêmes ordre de grandeur.

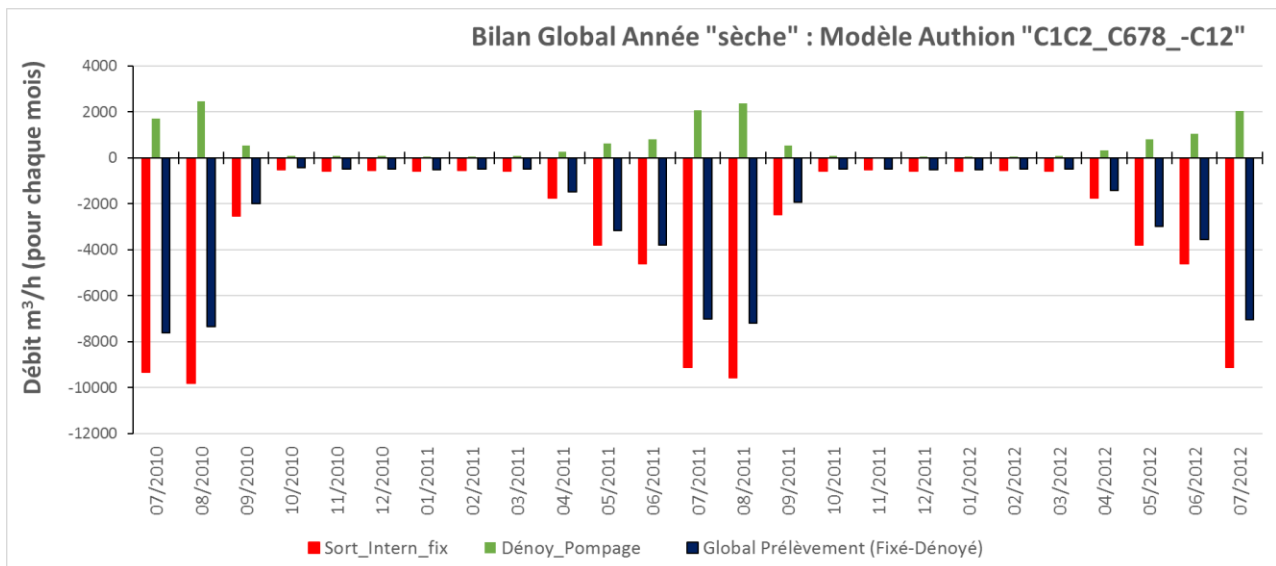


Illustration 29 – Débits considérés pour les prélèvements en nappe pour l'« année sèche » (2011) calculés pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 (Sort\_intern\_fix : prélèvements fixés en nappe ; Dénoy\_Pompage : débits prélevés non considérés par dénoyement des pompages ; Global Prélèvement (Fixé-Dénoyé) : débits prélevés finalement considérés).

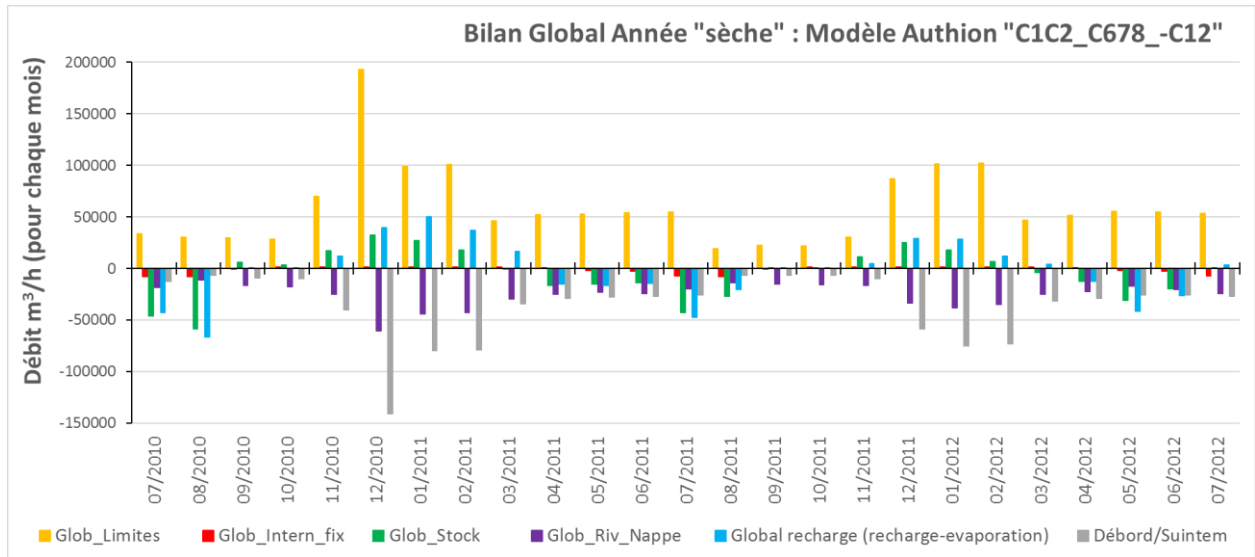


Illustration 30 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 (Glob\_Limites : charges imposées (Loire) dans l'aquifère ; Glob\_intern\_fix : prélèvements et flux fixés en nappe ; Glob\_stock : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob\_Riv\_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface).

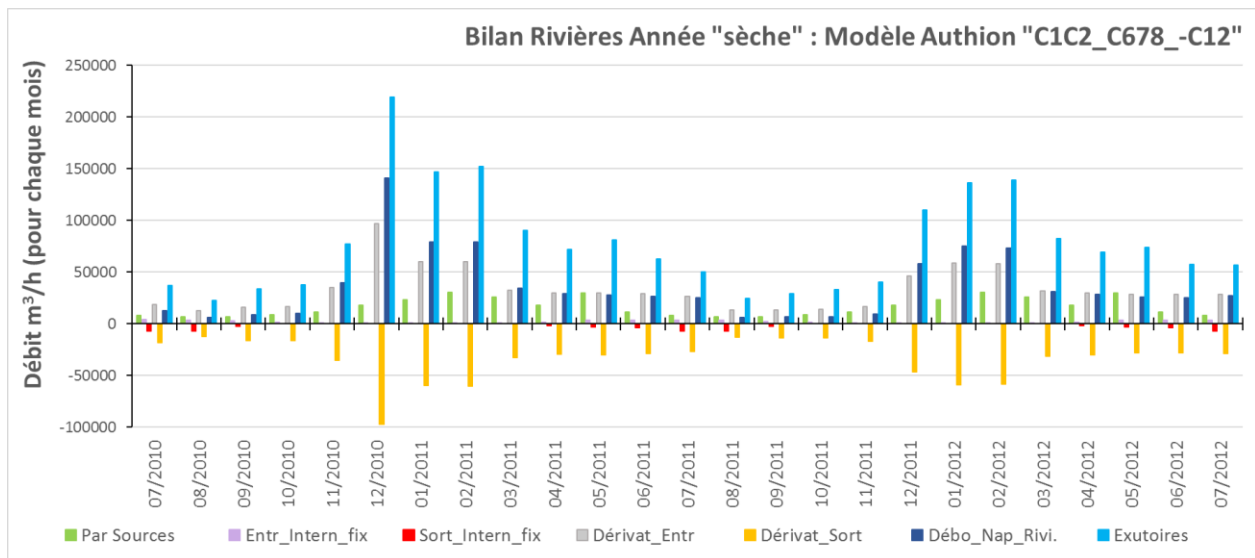


Illustration 31 – Bilan hydrodynamique de rivière « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 (Par Sources : débit rivière amont fixé ; Entr\_Intern\_fix : Débits rejetés en rivière ; Sort\_intern\_fix : prélèvements en rivière ; Dérvat\_Entr : débit entrant par dérivation ; Dérvat\_Sort : débit sortant par dérivation ; Débo\_Nap\_Rivi. : débit de débordement de nappe rejoignant la rivière ; Exutoires : débits à l'exutoire).

Les piézométries simulées par ce modèle modifié géométriquement selon le scénario-test 2 montrent peu de variations par rapport au modèle initial. Les chroniques simulées sont parfois même plus pertinentes car elles ne présentent plus de multi-niveaux et sont beaucoup plus représentatives des évolutions observées, sans avoir à fournir un effort de calibration (4 piézomètres pour exemples en Illustration 32, à comparer à l'illustration 25).

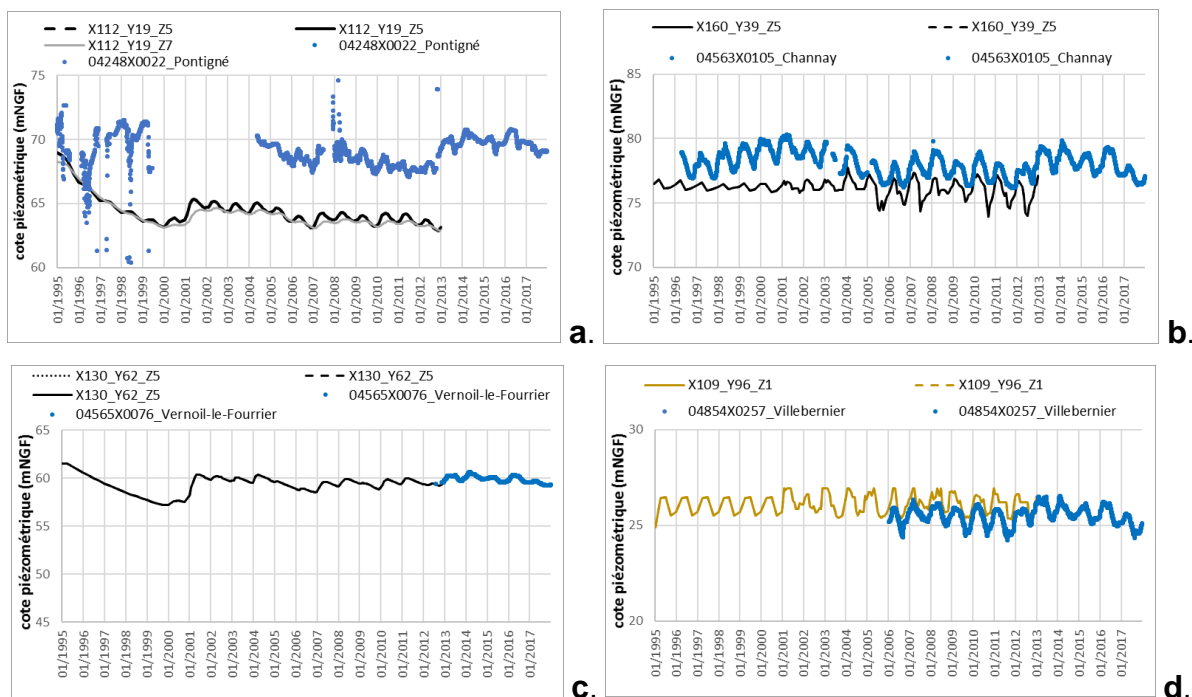


Illustration 32 – Confrontation des cotes piézométriques observées et calculées par le modèle hydrogéologique maillé de l’Authion modifié géométriquement selon le scénario-test 2 en différents points.

### 2.3.8.3 Scénario test 3 : Analyse du modèle en modifiant la prise en compte des conditions aux limites au sud (Loire)

Une modification géométrique des mailles (et de leurs voisines) pour lesquelles des charges imposées sont fixées en bordure sud du modèle en contact avec la Loire est réalisée afin de :

- Considérer les variations temporelles d’amplitude identifiées des niveaux de la Loire ;
- Réduire le débordement artificiel lié au niveau imposé au-dessus de la topographie des mailles.

Pour ce faire l’altitude topographique est élevée à +4 m sur les mailles à charges imposées et à +2m sur leurs mailles voisines.

Cette modification ne change pas le temps de calcul du modèle initial et n’améliore pas la convergence du modèle. Par ailleurs les débits manquants sont toujours d’environ 20% (Illustration 33).

Par contre les débits du bilan hydrodynamique de nappe (Illustration 34) et de rivière (Illustration 35) sont largement influencés par cette modification diminuant les entrées d’eau issues de la Loire (charges imposées) mais aussi les sorties d’eau par débordements, et de ce fait les débits calculés à l’exutoire du bassin.

Seul le piézomètre situé dans les alluvions (Illustration 36) montre une modification des niveaux simulés permettant alors la prise en compte des amplitudes fixées de variations des niveaux de Loire (charges imposées).

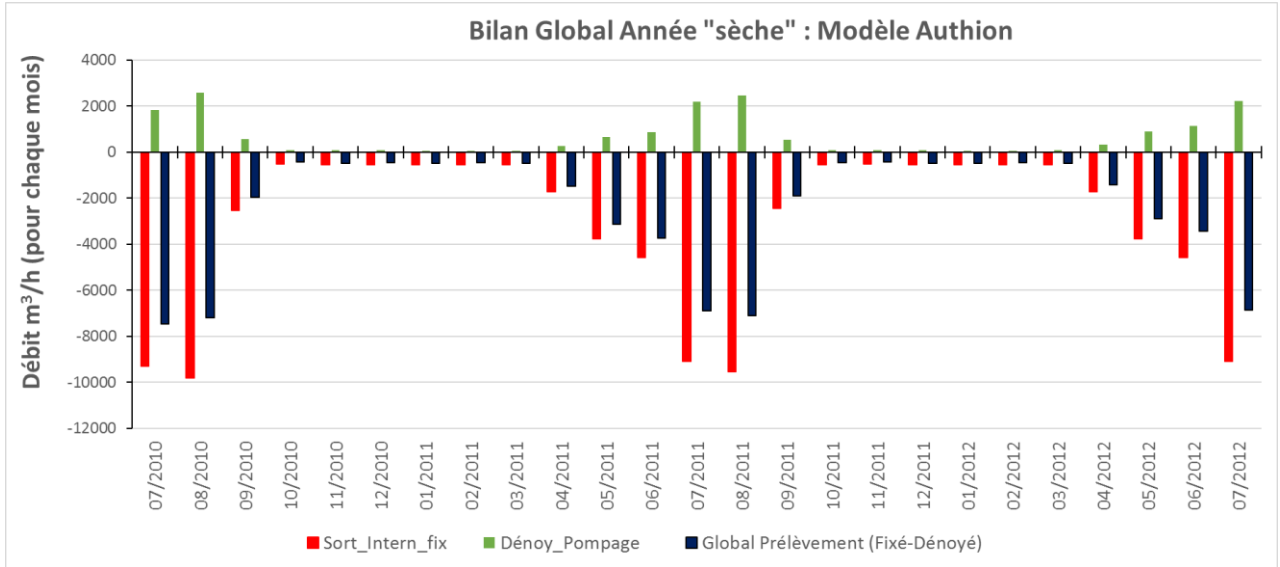


Illustration 33 – Débits considérés pour les prélèvements en nappe pour l'« année sèche » (2011) calculés pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié selon le scénario-test 3 (Sort\_intern\_fix : prélèvements fixés en nappe ; Denoy\_Pompage : débits prélevés non considérés par dénoyement des pompages ; Global Prélèvement (Fixé-Dénoyé) : débits prélevés finalement considérés).

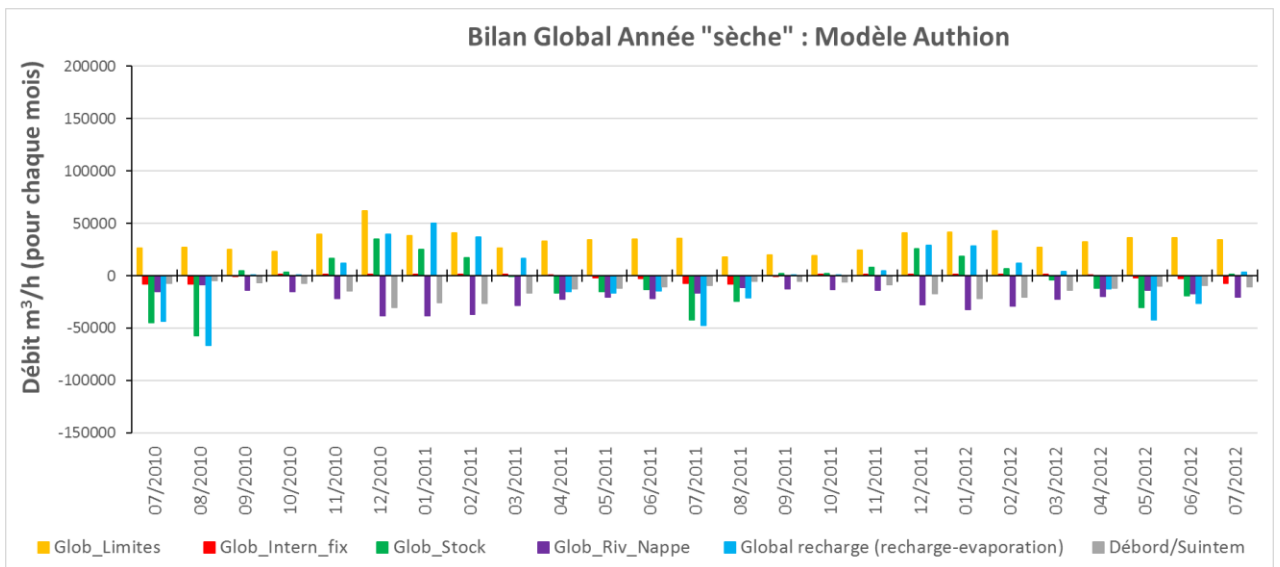


Illustration 34 – Bilan hydrodynamique « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié selon le scénario-test 3 (Glob\_Limites : charges imposées (Loire) dans l'aquifère ; Glob\_intern\_fix : prélèvements et flux fixés en nappe ; Glob\_stock : stockage-déstockage d'eau dans l'aquifère ; Glob\_Riv\_Nappe : échanges rivière-nappe ; Global recharge : recharge de la nappe ; Débord/suintement : débordement de la nappe en surface).

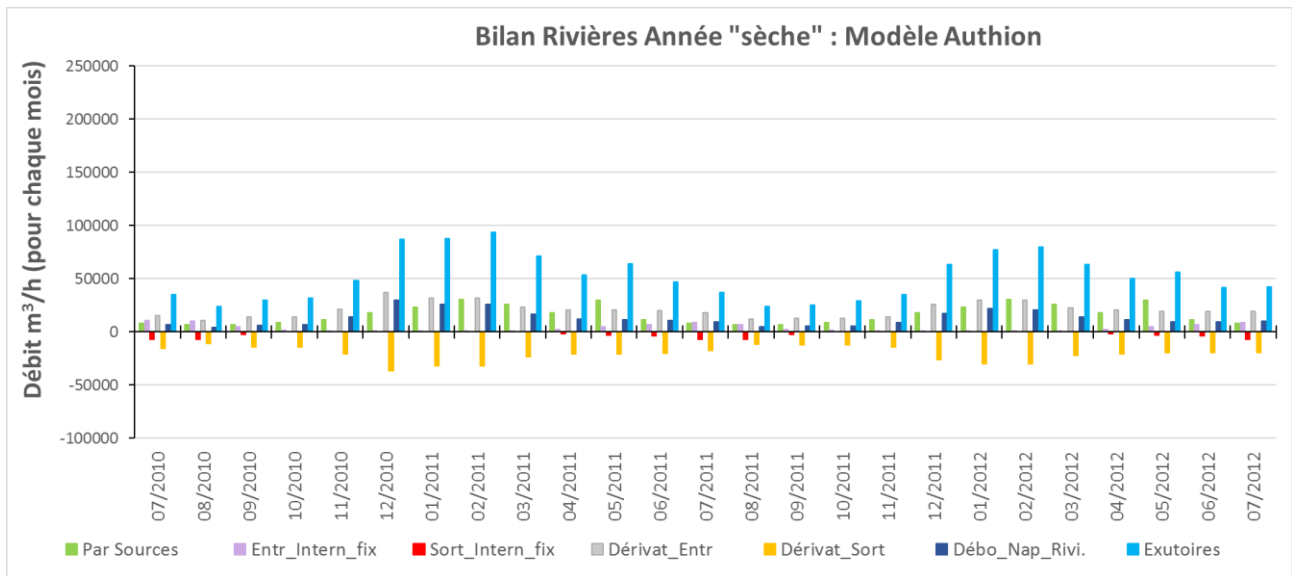


Illustration 35 – Bilan hydrodynamique de rivière « année sèche » (2011) calculé pour l'ensemble du modèle hydrogéologique maillé de l'Authion modifié selon le scénario-test 3 (Par Sources : débit rivière amont fixé ; Entr\_Intern\_fix : Débits rejetés en rivière ; Sort\_intern\_fix : prélèvements en rivière ; Dérivat\_Entr : débit entrant par dérivation ; Dérivat\_Sort : débit sortant par dérivation ; Débo\_Nap\_Rivi : débit de débordement de nappe rejoignant la rivière ; Exutoires : débits à l'exutoire).

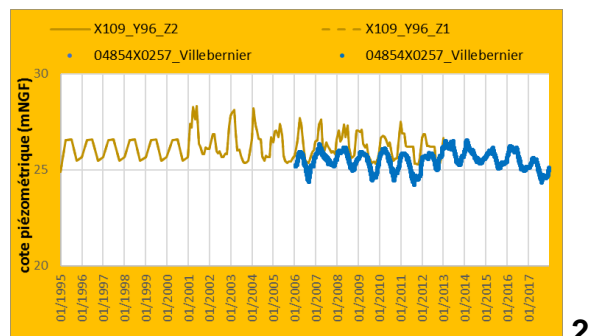
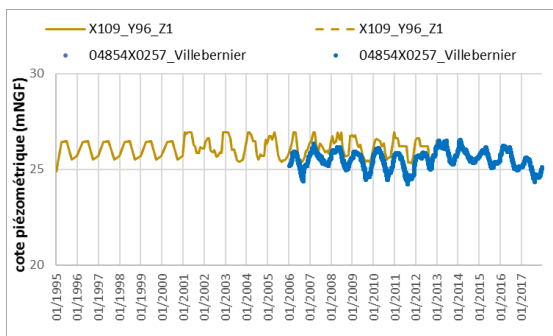


Illustration 36 : Confrontation des cotes piézométriques observées et calculées dans les alluvions par le modèle hydrogéologique maillé de l'Authion initial (1.) et modifié selon le scénario-test 3 (2.).

### **2.3.9 Synthèse sur l'analyse du modèle hydrodynamique maillé**

L'expertise de ce modèle a pu être réalisée en analysant les fichiers numériques utilisés dans le modèle et en testant les limites du modèle par trois scénario-tests ciblés.

L'analyse des fichiers a montré qu'il était parfois difficile de juger de la pertinence du modèle conceptuel et des données contraignant les simulations, ceci par un manque de connaissance quant à la transformation ou l'élaboration des données brutes, en données numériques adaptées au modèle.

Une reprise des données et la mise en place d'un système de gestion et d'interprétation des données permettraient de mieux juger de la pertinence de certains partis pris par le modélisateur hydrogéologue.

L'amélioration principale du modèle en terme de configuration géométrique aquifère semble primordiale tant dans la simplification du modèle que dans son utilisation future vis-à-vis de la réduction des temps de calcul qu'elle engendrerait (divisés quasiment par deux par regroupement des couches aquifères par exemple).

Des nombreuses erreurs de définition de certaines conditions aux limites peuvent être aisément corrigées et la mise à jour du modèle avec les données acquises depuis 2012 est aussi une priorité quant à son amélioration.

Le modèle peut prendre en compte de façon intégrée les calculs des bilans hydroclimatiques et donc mieux prendre en compte les processus liés au calcul de la recharge et du ruissellement sans utilisation d'outils de prétraitement.

Une configuration différente de la prise en compte des échanges d'eau avec la Loire via la nappe alluviale est envisageable, mais reste plus difficile à appréhender. Cependant, les effets sont notables sur le secteur Sud du modèle, et il semble important de mieux définir ces échanges.

Enfin, l'adaptation du modèle est nécessaire aux enjeux spécifiques du bassin qui peuvent être davantage focalisés sur les eaux de surface. Le modèle pourrait donc être plus finement discrétisé spatialement, permettant une prise en compte détaillée du réseau hydrographique.





### 3 Proposition de programme et dimensionnement de l'étude de reprise, actualisation et utilisation du modèle maillé de l'Authion

Le modèle hydrodynamique maillé de l'Authion conçu par ANTEA a pour finalité de définir le volume d'eau maximum prélevable et sa répartition sur son territoire de manière à respecter les objectifs quantitatifs du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Loire-Bretagne.

#### 3.1 DISPOSITIONS DU SCHÉMA DIRECTEUR D'AMÉNAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX DU BASSIN LOIRE-BRETAGNE (SDAGE)

##### 3.1.1 Disposition 7B-4

Le bassin versant de l'Authion est concerné par la disposition 7B-4 du SDAGE qui précise : « *Afin de prévenir l'apparition d'un déséquilibre entre la ressource et les besoins en eau, dans les secteurs de prélèvements importants où l'étiage des cours d'eau est néanmoins suffisamment soutenu par une réalimentation extérieure pour qu'un classement en zone de répartition des eaux ne soit pas justifié, les prélèvements autres que ceux destinés à l'alimentation en eau potable ou à la sécurité civile sont, en l'absence d'une gestion collective des prélèvements d'eau, plafonnés à leur niveau actuel (maximum antérieurement prélevé). Ce plafond ne pourra être révisé que si une gestion collective est mise en place, comprenant la mise en œuvre de la disposition 7C-1. La création d'un organisme unique de gestion collective des prélèvements d'eau pour l'irrigation peut y contribuer. Sont concernés les prélèvements dans les cours d'eau et leurs annexes, dans les sources et dans les nappes souterraines* ».

##### 3.1.2 Disposition 7C-1

La disposition 7C-1 prévoit quant à elle que : « *Dans les zones de répartition des eaux (ZRE) et dans les bassins concernés par la disposition 7B-4, la commission locale de l'eau réalise une synthèse des connaissances à partir des données relatives aux prélèvements d'eau disponibles auprès des services de police de l'eau et des caractéristiques des milieux aquatiques. Elle engage, si nécessaire, des études complémentaires pour définir le volume d'eau maximum prélevable en période d'étiage, de manière à respecter les objectifs quantitatifs du SDAGE. Ce volume prélevable est décliné, en tant que de besoin, en fonction de la ressource exploitée, de la localisation des prélèvements et de leur période. L'encadrement des prélèvements hivernaux de surface est traité dans les dispositions 7D-5 à 7D-7 et peut faire l'objet d'adaptation par la CLE dans les conditions prévues par ces dispositions. Un encadrement des prélèvements hivernaux en nappe est défini, notamment par des niveaux piézométriques minimum au-dessus desquels le pompage est possible.*

*Le SAGE précise la manière dont ce volume peut être modulé chaque année de manière à prévenir et préparer la gestion de crise. Dans les ZRE et les bassins concernés par la disposition 7B-4, dans le cadre des priorités définies par l'article L.211-1 du code de l'environnement, le règlement du SAGE prévu à l'article L.212-5-1 du même code comprend systématiquement la définition des priorités d'usage de la ressource en eau, la définition du volume prélevable et sa répartition par usage. Le SAGE définit également les règles particulières d'utilisation de la ressource en eau nécessaires à la restauration et à la préservation de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. En l'absence de Sage approuvé, le préfet définit le volume maximum prélevable et établit la répartition par usage* ».

### 3.2 REPRISE DU MODÈLE AUTHION PAR LE BRGM

Pour parvenir à évaluer ces volumes prélevables, ANTEA a utilisé le logiciel de modélisation 3D des écoulements souterrains MARTHE. Il en résulte un outil de calcul dédié : le modèle hydrodynamique maillé de l'Authion.

La structure porteuse du SAGE souhaite que le BRGM poursuive l'exploitation de ce modèle hydrodynamique, avec notamment comme objectifs :

- la validation des volumes prélevables définis,
- l'actualisation des données du modèle,
- la réalisation de simulations et l'étude des relations nappe-rivière.

Dans les paragraphes qui suivent, nous détaillons le programme à réaliser pour améliorer le modèle et atteindre ces objectifs. Une unité d'œuvre (UO) correspond à une journée de travail. Les propositions optionnelles ne sont pas chiffrées et feront l'objet de précisions ultérieures le cas échéant.

### 3.3 OBJECTIFS QUANTITATIFS DU SCHÉMA DIRECTEUR D'AMÉNAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX (SDAGE) LOIRE-BRETAGNE

Dans un premier temps un travail collaboratif avec la structure porteuse du SAGE permettra de synthétiser les objectifs quantitatifs du SDAGE, leur mise à jour, mais également mettre en place un système de calcul dans le modèle et de représentation des résultats adapté à la gestion du territoire et ses enjeux (répartition, unité gestion, ...).

**Livrable** : base de données rappelant les objectifs quantitatifs du SDAGE associés aux enjeux du Val d'Authion, fichiers numériques MARTHE de calcul (rapport).

**Budget** : 3 UO hydrogéologue expert + 5 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE + 2 réunions-échanges en visioconférence.

### 3.4 ACTUALISATION DES DONNÉES EXISTANTES SUR LE BASSIN VERSANT : SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE ET BASE DE DONNÉES AUTHION

Toutes les données disponibles sur le secteur d'étude seront complétées, notamment celles déjà acquises pour la construction et la calibration du modèle initial (piézométrie, prélèvements en eaux souterraines, prélèvements en eaux de surface, débit des rivières, pluies, ETP, géologie, ...) ainsi que toutes les mises à jour de position spatiale des points de mesures s'y référant.

Une attention particulière sera portée à la distribution des prélèvements agricoles en forte connexion avec l'usage des eaux de surface (prélèvements hivernaux en nappe, stockage en surface et utilisation estivale).

Par ailleurs, il est important de garder la distinction du type de prélèvements (Agricultures, Domestiques, Industriels, ...) et d'identifier ceux dédiés aux prélèvements hivernaux à des fins de remplissage des retenues collinaires ou de substitution.

Il s'agira de synthétiser les informations et données relatives au fonctionnement hydrogéologique, dans son état actuel et passé (à minima depuis 2010).

La synthèse bibliographique des documents disponibles (rapports, publications, cartes) et l'analyse des données hydrologiques disponibles sur le secteur mèneront à :

- compléter le modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique;
- lister les différentes hypothèses de fonctionnements hydrodynamiques ;
- identifier les secteurs aux fonctionnements incertains ou méconnus.

Une première estimation des volumes d'eau transitant dans l'hydrosystème (entrant, sortant et stockés) sera réalisée et accompagnée des données sources, organisées sous forme d'une base de données.

**Livrable** : actualisation et analyses des données de l'hydrosystème (tables Excel et Shape files), synthèse hydrogéologique de fonctionnement (rapport).

**Budget** : 10 UO hydrogéologue expert + 30 UO ingénieur hydrogéologue SIG + 5 UO ingénieur géologue + 10 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE + achat de données Météo France.

### 3.4.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée

Le recensement des piézomètres exploitables sera actualisé (cartes et chroniques). Lorsque la liste des points sera définitivement arrêtée une visite de site systématique sera organisée pour rechercher les caractéristiques de chaque point (coordonnées X, Y relevés par GPS, profondeur de l'ouvrage ...).

- Recensement et géoréférencement des piézomètres ;
- Chroniques piézométriques ;
- Paramètres hydrodynamiques.

Des campagnes de mesures piézométriques, ponctuelles et synchrones, sur des ouvrages non ou peu influencés permettront d'établir des cartes piézométriques pour chaque nappe d'eau souterraine identifiée sur le secteur d'étude. Celles-ci seront effectuées en période de basses eaux et en période de hautes eaux.

Les directions d'écoulements et gradients hydrauliques déduits de ces cartes piézométriques seront comparés aux cartes piézométriques existantes, et seront des éléments importants de compréhension et de gestion des eaux souterraines. Elles permettront également un meilleur ajustement du modèle hydrodynamique lors de sa mise à jour.

**Livrable** : carte piézométrique de référence hautes eaux – basses eaux.

### 3.5 GEOMETRIE : GEOLOGIE ET AQUIFERES

Dans un objectif de simplification sans dénaturer les phénomènes à représenter par le modèle, les couches initialement modélisées au nombre de 12 seront réduites au nombre maximum de 9 selon la succession suivante :

<b>Alluvions</b>
Faluns miocènes
éponge
Calcaires lacustres éocènes
éponge
<b>Craie du Séno-Turonien</b>
Marnes à huîtres du Cénomaniens supérieur
Sables argileux du Cénomaniens moyen
<b>Sables graveleux du Cénomaniens inférieur</b>

Tableau 2 – Proposition de simplification des couches modélisées : aquifères (en bleu) et éponges (en gris).

Les modifications seront réalisées sur la base du modèle actuel sans redéfinir les altitudes des toits et des murs des couches représentées. Il s'agira alors d'unir les couches aquifères continues d'un point de vue hydrodynamique, et de désactiver les couches ne participant pas à l'écoulement.

Enfin, des couches isolées présentant une faible épaisseur dans le modèle initial seront unies aux couches su- ou sous-jacentes afin de rendre le modèle numériquement plus performant. Au préalable une comparaison des résultats de modélisation avec et sans ses mailles sera réalisée pour apprécier l'incidence de cette modification sur les écoulements.

Une synthèse bibliographique géologique permettra de mettre en avant les différentes hypothèses de configuration géologique du secteur ainsi que de sa structuration (failles). Les hypothèses mises en avant auront un impact probable sur le fonctionnement hydrodynamique de l'hydrosystème. C'est pourquoi elles seront simulées afin d'évaluer la sensibilité du modèle et mettre en avant les caractéristiques géologiques majeures.

**Livrable** : ajustement de la géométrie du modèle de l'Authion (fichier numérique MARTHE) et synthèse des résultats des tests de sensibilité (rapport/ chapitre).

**Budget** : 5 UO ingénieur géologue + 5 UO hydrogéologue expert + 12 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE

#### 3.5.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée

Le modèle géométrique actuel repose sur un modèle géologique dont « La cote du mur de chaque couche géologique est établie à partir d'une interpolation des isopaques de cette couche fournis par les coupes de 167 forages (logs stratigraphiques validés en BSS), par les limites d'affleurement et par quelques ajustements ponctuels au niveau des failles connues ou supposées de forages (coupes lithologiques interprétatives validées BRGM). ».

Des intersections de surface (mur et toit) ont obligatoirement été rencontrées : comment ont-elles été traitées ? Un modèle géologique a-t-il été développé? Quelles failles ont été prises en compte ? Quelles conséquences pour les réservoirs ?

Une description plus avancée des données géologiques disponibles sur le secteur modélisé (dont les 167 logs stratigraphiques utilisés pour construire la géométrie du modèle), leur analyse et leur interprétation permettra d'ajuster la géométrie des aquifères et de mieux évaluer les caractéristiques hydrodynamiques des différents faciès et leur communication (couches biseautées, failles conductrices ou non, ...).

À partir des études et rapports disponibles au BRGM et par des recherches auprès d'autres partenaires, les documents susceptibles de présenter des informations pertinentes en matière de géologie à l'échelle du secteur d'études seront collectés. On recherchera notamment à compléter les informations par :

- logs litho-stratigraphiques ;
- profils de géophysique électrique ;
- profils sismiques.

Un modèle géologique 3D sera développé avec pour objectif l'amélioration du modèle hydrogéologique, notamment dans la définition des volumes stockés-déstockés par les parties aquifères de l'hydrosystème.

Il s'agira ensuite d'éditer pour le modèle hydrogéologique les cartes isohypses des toits et murs des formations hydrogéologiques ainsi que les grandes coupes hydrogéologiques au travers des structures.

**Livrable** : modèle 3D géologique et ajustement de la géométrie du modèle de l'Authion (fichiers numériques GDM, MARTHE, rapport).

### 3.6 GESTION DES DONNÉES DU BASSIN EN LIEN AVEC LE MODÈLE MAILLÉ : BASE DE DONNÉES/SIG

Il s'agit de mettre au point une méthodologie de gestion et d'échange des données circulant entre la base de données hydrogéologique et le modèle MARTHE, amenant à automatiser la création de certains fichiers MARTHE pour fixer les conditions aux limites, variant dans le temps et l'espace (outil de prétraitement), mais aussi amenant à visualiser spatialement les résultats de simulations via une interface SIG (outil de post-traitement). Cette gestion de la donnée observée-simulée augmente nettement l'efficacité de la phase de calibration du modèle MARTHE et la perte de données numériques.

**Livrable** : pas forcément de livrable mais l'adaptation des outils internes BRGM.

**Budget** : 15 UO hydrogéologue expert + 5 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE.

#### 3.6.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée

Il s'agit ici de créer un outil de **mise en commun et d'actualisation des données disponibles**, mais aussi un outil de gestion visant à améliorer la cohérence et l'efficacité des actions des partenaires pour une **utilisation pérenne des ressources** en eau et la préservation des aquifères.

### 3.7 CARACTÉRISATION ET CONCEPTUALISATION DES BILANS HYDROCLIMATIQUES

Sur la base de la synthèse des données hydrogéologiques et l'analyse des modèles GARDENIA préalablement établis par ANTEA, seront produits des modèles GARDENIA à l'échelle du bassin et des sous-bassins afin d'estimer les bilans hydroclimatiques spatialisés, et particulièrement la part de recharge et la part de ruissèlement.

Les paramètres de sol seront calibrés en s'appuyant sur diverses observations : piézométrie, débits de rivières, pluies et ETP.

Les paramètres de sol seront intégrés spatialement dans le modèle MARTHE via la définition de zone de sol.

Une analyse des variations spatiales des pluies et de l'ETP permettra d'une part de reconstituer les chroniques temporelles lacunaires, et d'autre part de spatialiser les flux de pluies et d'ETP dans le modèle MARTHE via la définition de zone climatique.

Les bilans hydroclimatiques seront alors calculés par MARTHE en chacune des mailles du modèle, mais aussi par zone croisées climatique-sol, et bien sûr à l'échelle du domaine modélisé afin d'évaluer la représentation correcte des phénomènes hydroclimatiques dans le modèle MARTHE.

Une attention particulière sera attendue concernant de la prise en compte des flux liés à l'irrigation, mais aussi la pertinence des processus de « reprise à la nappe » considéré dans le modèle initial.

Par ailleurs cette approche permettra d'évaluer les flux d'eau souterrains de la bordure nord (couche aquifère du Turonien et couche aquifère du Cénomanién), ainsi que ceux de la bordure sud (couche alluviale de la Loire).

Cette approche nécessite autant de simulations GARDENIA qu'il y a de bassins versants, une adaptation des fichiers numériques au modèle MARTHE, également une simulation MARTHE.

**Livrable** : création des fichiers climatiques MARTHE (fichiers numériques MARTHE) et synthèse des résultats GARDENIA par BV (rapport/ chapitre).

**Budget** : 5 UO hydrogéologue expert + 15 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur GARDENIA + 5 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE.

#### 3.7.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée

Une approche différente pourrait être réalisée en utilisant les données de pluies (et d'ET, à confirmer) issues des modèles de Météofrance : les grilles « SAFRAN ».

Dans ce cas, les données sont attribuées pour une maille de 8 km x 8 km, contrairement aux stations pluviométriques, attribuant une données ponctuelle locale.

Le travail de modélisation GARDENIA et MARTHE reste le même mais la synthèse, l'analyse et l'interprétation des données climatiques d'un territoire ne seraient plus nécessairement effectuées au préalable puisque déjà sous-entendues dans les données issues des grilles SAFRAN.

Cette approche représente un intérêt particulier dans le cadre des **simulations prospectives au regard des changements climatiques** attendus et facilement intégrable dans le modèle MARTHE via ces grilles SAFRAN.

### 3.8 CARACTÉRISATION ET CONCEPTUALISATION DES ÉCHANGES ENTRE LES EAUX DE SURFACES ET LES EAUX SOUTERRAINES (EN FONCTION DE LA DIVERSITÉ DES OUVRAGES DE SURFACES)

Une meilleure adéquation du réseau hydrographique avec le modèle hydrogéologique pourra être réalisée selon la pertinence des processus en jeux et de leur échelle.

Au préalable, une synthèse et une analyse détaillée du réseau hydrographique permettra d'évaluer la nécessité de simplifier le réseau hydrographique définie dans le modèle initial.

Un schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique sera proposé ainsi qu'une estimation des volumes transitant via les eaux de surface.

Une vérification des données existantes sera réalisée auprès d'autres organismes (afin d'estimer s'il n'y a pas d'autres mesures de débit en complément de la banque hydro, assecs du réseau ONDE : <https://onde.eaufrance.fr/> ou autres témoignages).

En lien direct avec l'approche proposée par la phase 3.5. (CARACTERISATION ET CONCEPTUALISATION DES BILANS HYDROCLIMATIQUES) il s'agira ici de caractériser plus finement l'anthropisation et les modes de gestion des eaux de surface connus à ce jour sur le territoire.

Il conviendra de faire l'état des pratiques d'échanges et de retenue d'eau en surface (barrage, étang, prélèvements, rejets, alimentation hivernal par pompage, dérivation des débits de rivières, ...).

Des bilans hydrodynamiques des eaux de surface par sous bassin, affluent ou par tronçon de rivière, permettra d'évaluer les processus non négligeables à prendre en compte dans la modélisation de l'hydrosystème, et de les représenter dans le temps et l'espace. Ceux-ci permettront également d'estimer la part d'eau échangée avec la nappe sous-jacente.

Le réseau hydrographique du modèle initial MARTHE et son fonctionnement seront adaptés (certaines mailles « rivières » ont des altitudes (fond et niveau d'eau) parfois au-dessus de la topographie ou très en-dessous), et les bilans hydrologiques seront alors calculés par MARTHE en chacune des mailles rivière du modèle. Les bilans seront également exprimés par affluent et bien sûr à l'échelle du domaine modélisé afin d'évaluer la représentation correcte par le modèle MARTHE des phénomènes hydrologiques identifiés.

Cette approche nécessitera l'adaptation des fichiers numériques au modèle MARTHE ainsi que des simulations MARTHE testant les conditions et hypothèses de fonctionnement retenues.

**Livrable** : adaptation des fichiers MARTHE (fichiers numériques MARTHE) et synthèse des résultats et hypothèses (rapport/ chapitre).

**Budget** : 5 UO hydrogéologue expert + 15 UO ingénieur hydrologue / modélisateur GARDENIA + 5 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE.

#### 3.8.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée

Pour répondre correctement aux enjeux de la **gestion des ressources en eau souterraine en forte connexion avec les eaux de surface**, il serait pertinent d'affiner la description topographique dans le modèle en affinant la taille des mailles et en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) plus précis (BD alti 25m, Lidar).

L'utilisation de maillage affiné au niveau des rivières pourrait améliorer la représentation de leurs bilans hydrodynamiques, en particulier leurs échanges avec la(les) nappe(s) sous-jacente(s), surtout lorsque des pompages d'eau souterraine sont situés à proximité des cours d'eau.

Un changement de géométrie et un affinement du maillage sera réalisé en réattribuant l'ensemble des paramètres et des valeurs de conditions initiales et aux limites à chacune des nouvelles mailles.

Afin d'alléger les calculs, les maillages affinés seront utilisés préférentiellement au niveau des cours d'eau en utilisant des maillages gigognes. Les directions de ruissellement devront être adaptés sur cette nouvelle base dans MARTHE.

Le tracé des cours d'eau issu de la BD Carthage (OIEAU-IGN) sera complété par des mesures GPS sur le terrain sur les secteurs à fort enjeux et aux connaissances méconnues.

Les niveaux limnimétriques des différents cours d'eau seront mesurés au niveau des stations de mesure existantes et sur des tronçons jugés pertinents. Les mesures de niveaux d'eaux seront réalisées en période d'étiage mais aussi de hautes eaux.

Des profils en travers sur le cours d'eau seront réalisés à partir d'un GPS différentiel afin de découvrir pleinement le terrain (seuils, bras de dérivation, remonter jusqu'à la source...).

Les données, largeur, cote de l'eau, hauteur d'eau, profils en amont et aval des principaux ouvrages / seuils, seront alors observés et interprétés. Une caractérisation de la nature du lit et des berges sera également nécessaire pour appréhender le colmatage.

Enfin, des campagnes de jaugeages différentiels à l'étiage seront réalisées pour affiner les secteurs à enjeux.

### **3.9 BILAN HYDRODYNAMIQUE ET CONDITIONS AUX LIMITES EN BORDURE DE LOIRE**

Les conditions aux limites fixées en bordure sud du domaine modélisé (niveaux d'eau imposés, charges imposées en lien avec le niveau d'eau de la Loire) devront être réexaminé afin de dimensionner par une méthode robuste les débits transitant entre la nappe alluviale de la Loire et le Val d'Authion. Ceci nécessite la définition d'une méthodologie s'appuyant sur les résultats des calculs réalisés à l'échelle de la Loire afin d'estimer la part d'eau échangée avec le milieu souterrain.

L'analyse des données hydrologiques, hydrogéologiques et climatiques spécifiques à ce secteur sud sera réalisée pour identifier les processus majeurs ayant cours au niveau de la nappe alluviale de Loire, notamment connaître l'importance de la couche « Jalle » dans le fonctionnement hydrodynamique.

Fortement liée aux résultats issus de la phase 3.5 et 3.6, et des travaux réalisés dans le cadre de l'étude ICC-HYDROQUAL (2010), cette étape évaluera à l'aide du modèle EROS la part d'eau échangée par la Loire avec le milieu souterrain, plus spécifiquement sur le tronçon Angers-Saumur. Les volumes ainsi estimés viendront alimenter la partie sud du modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique, mais aussi permettront de mieux définir les conditions aux limites définies dans le modèle MARTHE en imposant des flux d'échange Loire-nappe plus pertinents.

Les variations de niveau de Loire et leur impact sur les échanges nappe-rivière seront également identifiés.

Il est possible que les conditions aux limites représentées dans le modèle initial (charges imposées) ne soient pas remises en question, mais qu'elles soient modifiées pour éviter les artefacts de débordement locaux, à moins qu'ils soient déterminés comme une réalité du terrain.

Un prétraitement des niveaux d'eau enregistrés pour la Loire sera nécessaire (données de la banque hydro moyennées, interpolées, etc...).



**Livrable** : estimation de la part d'eau échangée entre la Loire et le milieu souterrain (rapport).

**Budget** : 5 UO hydrogéologue expert + 15 UO ingénieur hydrologue / modélisateur EROS + 5 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE.

### 3.10 MODÈLE CONCEPTUEL HYDRODYNAMIQUE

L'organisation des écoulements superficiels et souterrains dans la zone d'étude dépend du contexte climatique, du contexte géologique et structural, des conditions aux limites et des paramètres hydrodynamiques des aquifères.

Sur la base des résultats et réflexions des phases précédentes, le schéma conceptuel consistera à identifier les processus majeurs dans le fonctionnement de l'hydrosystème et à synthétiser les différents paramètres de façon à représenter de manière schématique son fonctionnement réel.

Le schéma conceptuel constitue la base du modèle numérique : extension et structure du domaine, caractéristiques hydrodynamiques, conditions aux limites etc...

Le modèle conceptuel sera à l'image de la connaissance du val d'Authion, c'est-à-dire à la fois complexe (eaux de surface anthropisées, échanges nappe-rivière, ...) et incomplet, car ce projet ne permettra pas de lever certaines incertitudes comme sur les volumes d'échanges d'eau avec la Loire qui borde le Val d'Authion sur toute sa partie sud.

**Livrable** : Schéma conceptuel fonctionnement de l'hydrosystème, processus majeurs et principaux volumes d'eau associés transitant dans l'hydrosystème (rapport).

**Budget** : 3 UO hydrogéologue expert + 3 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur GARDENIA + 3 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE + 3 UO ingénieur hydrogéologue.

#### 3.10.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée

Pour préciser le schéma conceptuel de fonctionnement du système aquifère, une étude hydrogéochimique sera réalisée sur la base des connaissances existantes. Il s'agit ici d'exploiter les résultats d'analyses existantes (DDASS, Conseil Général, sociétés fermières et fontainiers communaux, thèses, base de données ADES, fonds géochimiques BRGM pour la France, ...) permettant d'établir un état des connaissances et, sur cette base, de caractériser la situation actuelle et son évolution depuis le début des chroniques.

**Les études hydrogéochimiques permettent d'une manière générale de caractériser, ou de compléter la connaissance de la structure des aquifères et de leur fonctionnement.**

Les traceurs chimiques naturellement présents dans les eaux permettent d'identifier et de caractériser ces diverses composantes et donc d'informer sur la structure des aquifères.

Parmi les traceurs chimiques, ceux qui caractérisent les écoulements (vitesse, condition d'écoulement, mélanges d'eau d'origine différente, inertie par rapport à un signal d'entrée...) informent sur le fonctionnement hydraulique, notamment en terme de flux réel (et non en transfert de pression).

Le décodage des informations est généralement réalisé sur la base des éléments majeurs et de quelques éléments traces ainsi que par l'utilisation des mesures isotopiques couramment utilisées en sciences de la terre.

Des campagnes de mesures complémentaires seront réalisées pour préciser la caractérisation chimique et isotopique des aquifères, et pour approfondir les hypothèses de fonctionnement de l'hydrosystème (recharge, drainance, échanges nappe-rivière, failles conductrice ou non, ...).

### 3.11 ADAPTATION, MISE A JOUR DU MODÈLE MAILLÉ ET CALIBRATION

Le modèle numérique MARTHE sera adapté sur la base du modèle conceptuel et des données mises à jour.

Les processus majeurs d'écoulement seront sélectionnés et paramétrés sur la base du maillage adapté à la suite de la phase 3.3. (GEOMETRIE : GEOLOGIE ET AQUIFERES).

L'extension temporelle du modèle MARTHE s'étendra de 1995 à 2019 voire au-delà si les données mise à jour le permettent.

Le pas de temps initialement trimestriel puis mensuel sera repris et pourra être modifié en fonction de la représentation des processus majeurs mais aussi des enjeux territoriaux.

Les processus hydroclimatiques seront pris en compte directement dans le modèle MARTHE suite à leur définition étudiée en phase 3.5. (CARACTERISATION ET CONCEPTUALISATION DES BILANS HYDROCLIMATIQUES).

Les bilans hydroclimatiques et les échanges de flux de surface (ruissellement et recharge) seront complètement intégrés et calculés par MARTHE et non plus pré-traités en amont comme c'était le cas dans le modèle initial. Cette modification simplifiera la gestion des données d'entrées du modèle, qui seront alors limitées aux chroniques de pluies et d'ETP.

Par ailleurs les flux de ruissellement et de recharge seront directement calculés et gérés par le code MARTHE, et ils seront liés aux calculs des bilans hydrodynamiques de nappe et surtout à ceux du réseau hydrographique.

Les erreurs seront ainsi limitées et la représentation des résultats rendue plus efficace.

Les données nécessaires préalablement mises en forme via les outils de pré-traitement (base de données, SIG) seront intégrées dans le maillage du modèle, au travers de fichiers définissant les conditions initiales et aux limites du modèle, et définissant les paramètres des processus.

Par une approche itérative, le modèle sera calibré, en ajustant les valeurs des paramètres, de sorte que les résultats de simulations représentent correctement les valeurs observées sur le terrain.

Les données observées préalablement mises en forme via les outils de post-traitement (base de données, SIG) seront alors comparées aux résultats de simulation en ces mêmes points.

La calibration s'effectuera aussi bien en régime permanent (état de hautes eaux et de basses eaux) qu'en régime transitoire sur la période de simulation 1995-2019.

Les bilans hydrodynamiques (hydroclimatique, aquifères, rivières et global) seront examinés pour évaluer la justesse de la calibration et la robustesse du modèle.

La représentation des résultats de modélisation sera effectuée à l'échelle globale de l'hydrosystème, par aquifère distinct et par zone géographique ciblée.

**Livrable** : adaptation et créations des fichiers numériques MARTHE, exportation des données et résultats de simulations (fichiers numériques MARTHE, Excel et ASCII) et descriptions du modèle mis à jour (rapport/ chapitre).

**Budget** : 10 UO hydrogéologue expert + 40 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE.

#### 3.11.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée

Une étude de sensibilité des paramètres calibrés et des hypothèses retenues sur les résultats de simulations permettra **d'affiner la robustesse du modèle, et d'évaluer de manière plus approfondie ses limites.**

Il s'agira de réaliser plusieurs simulations en faisant varier les paramètres ou en changeant les conditions de simulations et de comparer les résultats de simulations entre eux.

### **3.12 SIMULATIONS PROSPECTIVES AUX REGARDS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET/OU DES USAGES**

#### **3.12.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée**

Afin de permettre l'évaluation des volumes prélevables du Val d'Authion, il serait pertinent d'utiliser le modèle mis à jour pour simuler l'évolution du niveau des nappes et des débits de rivières en fonction des divers prélèvements et/ou événements climatiques.

Les projections pourront être réalisées sur l'espace de quelques années à plusieurs décennies selon les besoins de vision à court ou long terme.

À ce stade, plusieurs scénarios pourraient être simulés afin de borner les évolutions de l'hydrosystème face à diverses contraintes (prélèvements et/ou événements climatiques), par exemple :

- Scénario 1 : qualifié de « business as usual », obtenu en supposant un maintien de la situation actuelle (à minima pour l'aspect « prélèvements »).  
La situation actuelle peut être définie par une situation moyenne sur une période passée ;

- Scénario 2 : supposition d'un arrêt complet de tous les prélèvements dans la nappe, pour évaluer les niveaux d'eau et débits optimaux ;

- Scénario 3 : supposant l'augmentation très importante des prélèvements, en considérant notamment l'utilisation par les producteurs d'eau potable, les irrigants et les industriels de l'intégralité des volumes annuels autorisés par les arrêtés relatifs à leurs prélèvements ;

- Scénario 4 : confrontation du scénario 1 à des variations climatiques attendues (situations « années sèches » ou « années pluvieuses », moyennes ou extrêmes, etc...)  
Différentes méthodologies peuvent être appliquées concernant la prise en compte des phénomènes climatiques : utilisation/reproduction des données climatiques passées pour des périodes « sèches », « moyenne », « pluvieuses », ou utilisation des modèles de changements climatiques.

Les évolutions climatiques seraient alors associées aux divers scénarios de changements climatiques élaborés par les climatologues et équipe de recherche associé (réf. projet interne au BRGM AQUI-FR).

- Scénario 5 : supposant une analyse prospective préalable de l'évolution de la population et des usages de l'eau, en partenariat avec des acteurs locaux, l'INSEE, les chambres d'agriculture, les producteurs d'eau, etc...

Ces scénarios font office de proposition. Ils peuvent être modifiés pour répondre au mieux aux questions posées.

Des scénarios non évoqués ci-dessus pourraient être proposés, tant que le nombre total de scénarios considérés reste adapté au cadre défini (en particulier en terme de délais et budget).

Ces simulations à moyen-long terme, selon différentes hypothèses, permettront de fournir **aux acteurs du bassin des éléments de réflexion en vue de la révision des volumes prélevables, de leur répartition spatiale et/ou temporelle.**

**Livrable** : adaptation et créations des fichiers numériques MARTHE, exportation des données et résultats de simulations (fichiers numériques MARTHE, Excel et ASCII) et descriptions des simulations prospectives (rapport).

### 3.13 DÉFINITION ET RÉPARTITION DES VOLUMES PRÉLEVABLES EN FONCTION DES USAGES

Sur la base des résultats de modélisation de l'hydrosystème, il sera proposé une gestion quantitative équilibrée des ressources en eaux souterraines<sup>7</sup>.

La question du volume prélevable dans le bassin versant qui en découle est indissociable des considérations temporelles – conjoncturelles – et spatiales associées. Les volumes prélevables doivent être associés à une configuration de prélèvement donnée. Le concept de volumes prélevables n'a pas fait l'objet d'une définition univoque, assortie d'une méthodologie de calcul officielle, et leur détermination s'appuie sur des approches méthodologiques en cours d'évolution.

Il est alors proposé dans un premier temps de réaliser un diagnostic sur la méthode de calcul et les résultats issus de l'étude initiale ANTEA sur la définition des volumes prélevables appliquée au Val de l'Authion.

Une synthèse bibliographique des méthodes existantes de calcul de ces volumes et de leur application à différentes situations hydrogéologique<sup>8</sup> sera réalisée afin de proposer une mise à jour, et si besoin, une adaptation complémentaire de la méthode de calcul initiée par ANTEA. La méthode de calcul intégrera les objectifs quantitatifs élaborés initialement pour le Val de l'Authion (c.f. paragraphe 3.1.) et sera appliquée sur la base des résultats du modèle hydrodynamique MARTHE mis à jour.

L'estimation de ces volumes devra prendre en compte les représentations spatiales pertinentes en unité de gestion et la(les) période(s) retenue(s) tenant compte des variations climatiques passées comme par exemple les années sèches 2009-2010, 2011-2012 et/ou 2017-2019.

Il s'agira d'exploiter les résultats du modèle hydrodynamique par le calcul des bilans hydrodynamiques<sup>9</sup> organisés par unité de gestion et d'en déduire l'état déficitaire, excédentaire ou équilibré.

---

<sup>7</sup> Circulaire du 30 juin 2008 : « [...], une ressource en eau fait l'objet d'une gestion quantitative équilibrée lorsque, statistiquement, 8 années sur 10 en moyenne, les volumes et débits maximums autorisés ou déclarés dans cette ressource, quels qu'en soit leurs usages, peuvent en totalité être prélevés dans celle-ci tout en garantissant le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants. [...] par le respect des débits ou niveaux piézométriques d'objectifs, le cas échéants inscrits sous forme de DOE ou de POE dans les SDAGE ou les SAGE »

<sup>8</sup> ARNAUD.L. (2016) - Estimation des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre : retour d'expériences sur les méthodes utilisées, identification des problèmes rencontrés, recommandations. Rapport BRGM/RP-64615-FR, 107p.

WUILLEUMIER.A., CROISSET.N., SEGUIN.J.J. (2014) - Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 3 : Utilisation du modèle hydrogéologique pour la mise à jour de la ZRE et le calcul des volumes prélevables. BRGM/RP-62863-FR, 53 p.

VAUTE L. (2013) – Etat initial et diagnostic du SAGE GTI : Calcul des volumes maximums prélevables et simulation prévisionnelle. Rapport BRGM/RP-62392-FR, 27 p.

GOMEZ.E., PEDRON.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. Rapport BRGM/RP-57878-FR, 61 p.

SEGUIN J.-J. (2009) Rapport BRGM RP-58139-FR

<sup>9</sup> Un bilan de la nappe consiste à comparer les entrées d'eau dans la nappe (infiltration, drainance, ...) et les sorties d'eau (pompages, drainance, ...) en tenant compte de l'éventuel stockage ou déstockage d'eau (ce qui se traduit par

L'évolution des bilans par unité permettra d'en déduire les volumes maximums prélevables (volume qu'il est possible de prélever sans diminuer la réserve constituée par la nappe) et, en corrélation avec les prélèvements, de mettre en avant les phénomènes ponctuels naturels climatiques ou les phénomènes ponctuels de surexploitation du système.

L'évaluation des volumes prélevables pourra porter sur deux échelles distinctes :

- sectorielle pour chaque unité, consistant à évaluer celles pour lesquelles l'impact des prélèvements se traduit par une baisse des niveaux et des débits au-delà de seuils définis par la méthodologie et d'en déterminer les volumes prélevables maximums ;
- globale, menée à l'exutoire des sous-bassins versants composant le domaine de l'étude en estimant les volumes exploitables respectant l'équilibre 8 années sur 10, et sur deux mois consécutifs durant la période d'étiage.

L'analyse des prélèvements par ressource (surface et nappe) et par usage (c.f. paragraphe 3.4.) permettra une comparaison des volumes prélevables estimés au regard des besoins actuels et futurs si ces derniers sont connus.

Une simulation prospective moyen-long terme permettra d'évaluer l'effet des volumes prélevables calculés sur la pérennité de l'état d'équilibre, les effets localisés de répartition spatial et temporel sur le maintien des niveaux piézométriques et des débits de rivières.

Une attention particulière sera attendue sur les secteurs à proximité des conditions aux limites et aux charges imposées dans le modèle.

**Livrable** : répartition des volumes prélevables par zones géographiques, ressources et usages (fichiers numériques SIG et Excel) et description méthodologique (rapport/ chapitre).

**Budget** : 10 UO hydrogéologue expert + 15 UO ingénieur hydrogéologue modélisateur MARTHE + 15 UO ingénieur hydrogéologue.

### **3.14 SOLUTIONS ALTERNATIVES POTENTIELLES FACE AUX IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (GESTION ACTIVE ET RE-USE)**

#### **3.14.1 Proposition « optionnelle » non chiffrée**

Dans le but **d'anticiper et prévenir les surexploitations globales ou locales des ressources en eaux souterraines**, des solutions adaptatives permettant d'équilibrer les secteurs déficitaires et à enjeux seront discutées.

Il s'agira de faire une synthèse des solutions potentielles au regard des volumes concernés et de leur faisabilité sur les secteurs géographiques ciblés.

L'utilisation du modèle hydrogéologique mis à jour sera utilisé pour **quantifier les risques associés aux propositions de gestion envisagées** sur le secteur d'étude, et servir ainsi **d'outil d'aide à la décision pour les projets d'exploitation et d'aménagement** en cours et à venir.

Différentes approches pourront être évaluées comme :

---

une montée ou une baisse des niveaux piézométriques sur tout ou partie de la nappe). L'évolution des soldes entrées/sorties calculés par le modèle pour chaque secteur seront jugés déficitaires, excédentaires ou nuls (équilibrés)

- l'évaluation de mise en œuvre de gestion collective des ressources en eau par des scénarios de **modifications dans la répartition des prélèvements** en fonction des ressources en eau disponible, et de leur impact sur l'état des ressources en eau à l'aide du modèle maillé ;
- la faisabilité de mise en œuvre **d'exploitation de nouvelles ressources comme la re-use** (irrigation, process industriels, ...) et l'estimation des impacts sur l'hydrosystème à l'aide du modèle maillé ;
- l'évaluation de mise en œuvre de systèmes de **réalimentation de nappe/recharge artificielle/gestion active** et de leur impact sur l'hydrosystème à l'aide du modèle maillé.

Une **approche économique coût-bénéfice** sera réalisée au regard des solutions possibles.

**Livrable** : zones géographiques préférentielles à la mise en place de système de gestion active/re-use/recharge artificielle (fichiers numériques SIG) et description méthodologique (rapport).

### 3.15 BUDGET

Le budget nécessaire à la réalisation des différentes tâches détaillées ci-dessus (à l'exception des propositions optionnelles) figure en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

## 4 Conclusion

Afin de préparer l'étude visant à valider les volumes prélevables définis pour le bassin de l'Authion, actualiser les données du modèle, et mieux caractériser les relations nappe-rivières, le BRGM a analysé finement le modèle maillé Authion conçu en 2012 et élaboré un programme technique pour sa prise en main et son amélioration.

L'analyse des fichiers a montré qu'il était parfois difficile de juger de la pertinence du modèle conceptuel et des données contraignant les simulations, par manque de connaissance quant à la transformation ou l'élaboration des données numériques adaptées au modèle à partir des données brutes.

Une reprise de ces données et leur intégration à un système de gestion et d'interprétation permettraient de mieux juger de la pertinence de certains choix du modélisateur hydrogéologue.

Des erreurs dans la définition de certaines conditions aux limites ont été mises en évidence. Elles pourront être corrigées aisément lors de la mise à jour du modèle avec les données acquises depuis 2012.

Par ailleurs, une simplification de la géométrie des couches aquifères permettrait une réduction notable des temps des calculs, sans porter préjudice à la qualité des résultats obtenus par le modèle.

Celui-ci peut en outre prendre en compte de façon intégrée les calculs des bilans hydroclimatiques, et donc mieux prendre en compte les processus liés au calcul de la recharge et du ruissellement sans utilisation d'outils de prétraitement.

Le détail des différentes tâches à mener pour améliorer l'outil et poursuivre son utilisation est présenté dans le rapport, ainsi que le budget nécessaire pour la réalisation d'un tel programme.





## 5 Bibliographie

Barthélemy Y. et Seguin J-J. (2013) – Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarches et recommandations. Rapport final. BRGM/RP-62549-FR, 146 p., 55 ill., 5 ann.

Baudouin V. et collab. (2019) – Potentiel géothermique au sein du territoire de la Communauté de Communes Loire-Layon-Aubance. Rapport provisoire. BRGM/RP-XXXXX-FR (publication fin d'année 2019).

Chrétien P. (2018) – Définition d'une zone au sein de laquelle un forage est susceptible d'engendrer un impact significatif sur le débit d'un cours d'eau (le Montayer – Bassin de l'Aubance). Rapport final. BRGM/RP-67885-FR, 22 p., 10 ill.

Entente interdépartementale pour l'aménagement du Bassin de l'Authion et la mise en valeur de la Vallée de l'Authion (Juin 2015) – Détermination des volumes prélevables sur le périmètre du SAGE Authion (49). Phase 1 : Collecte et vérification des données. Rapport final A70442/B, AnteaGroup.

Entente interdépartementale pour l'aménagement du Bassin de l'Authion et la mise en valeur de la Vallée de l'Authion (Juin 2015) – Détermination des volumes prélevables sur le périmètre du SAGE Authion (49). Phase 2 : Analyse des données et définition des unités de gestion. Rapport final A70443/F, AnteaGroup.

Entente interdépartementale pour l'aménagement du Bassin de l'Authion et la mise en valeur de la Vallée de l'Authion (Juin 2015) – Détermination des volumes prélevables sur le périmètre du SAGE Authion (49). Phase 3 : Détermination des seuils d'objectif d'étiage et de crise des cours d'eau et des nappes. Rapport final A71213/F, AnteaGroup.

Entente interdépartementale pour l'aménagement du Bassin de l'Authion et la mise en valeur de la Vallée de l'Authion (Juin 2015) – Détermination des volumes prélevables sur le périmètre du SAGE Authion (49). Atlas cartographique. AnteaGroup.

**Annexe 1**  
**Budget pour la réalisation du programme**

<b>Programme de l'étude de reprise, actualisation et utilisation du modèle maillé de l'Authion</b>	
<i>Descripton de la tâche</i>	<b>Coût (€ HT)</b>
<i>Objectifs quantitatifs du schéma Directeur d'aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Loire-Bretagne</i>	17 113
<i>Actualisation des données existantes sur le bassin versant : synthèse hydrogéologique et base de données Authion</i>	49 822
<i>Géométrie : Géologie et AQUIFERES</i>	21 810
<i>Gestion des données du bassin en lien avec le modèle maille : ICT/base de données/SIG</i>	22 888
<i>Caractérisation et conceptualisation des bilans hydroclimatiques</i>	25 431
<i>Caractérisation et conceptualisation des échanges entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines (en fonction de la diversité des ouvrages de surfaces)</i>	25 520
<i>Bilan hydrodynamique et conditions aux limites en bordure de Loire</i>	25 431
<i>Modèle conceptuel hydrodynamique</i>	11 761
<i>Adaptation, mise à jour du modèle maillé et calibration</i>	51 347
<i>Définition et répartition des volumes prélevables (en fonction des usages)</i>	38 823
<b>Frais divers</b>	
<i>Missions et déplacements</i>	1 500
<i>Secrétariat</i>	2 008
<i>Achats de données hydroclimatiques (MétéoFrance)</i>	8 000
<b>TOTAL (€ HT)</b>	<b>301 453</b>

Les montants ci-dessus sont donnés Hors Taxes, la TVA au taux légal en vigueur au moment de la facturation étant en sus du prix.

Le budget total du programme s'élève donc à 301 453 € HT. Le BRGM prend à sa charge, au titre de sa Subvention pour Charge de Service Public, 20 % du montant de l'étude.



**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Pays-de-la-Loire**  
1 rue des Saumonières  
BP 92342  
44323 – Nantes Cedex 3– France  
Tél. : 02 51 86 01 51