



Égalité Fraternité

Document à accès immédiat

Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Aubance (Maine-et-Loire)

h3a-b

hac

haa-b

Rapport final

BRGM/RP-72385-FR

Version 2 du 31 mai 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

P. Chrétien

	bib-2
Vérificateur :	d7-h1a Approbateur : d6-h1a
Nom : Luc ARNAUD	Nom : Xavier RACHEZ
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur régional Pays-de-la
Date : 89 374 40 40 07/06/2023	Date : 21/09/2023
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001. Contact : <u>qualite@brgm.fr</u>

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <u>https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq</u> ou par ce code :



Mots clés : Gestion ressource eau, modèle hydrodynamique, modèle MARTHE, bilan eau, relation napperivière, Aubance, Maine-et-Loire, Pays-de-la-Loire.

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

P. Chrétien (2023) – Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Aubance (Maine-et-Loire)Rapport final V2. BRGM/RP-72385-FR, 80 p., 48 ill., 14 tab.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM. IM003-MT008-P2-22/09/2022

Synthèse

Afin de caractériser les relations nappes/rivières et évaluer la ressource en eau disponible annuellement pour les usages du bassin versant de l'Aubance en respectant un débit minimum dans l'Aubance, le BRGM conçoit un modèle hydrogéologique maillé au moyen du logiciel MARTHE développé par le BRGM. Il permettra d'identifier les relations entre nappes et cours d'eau dans ce bassin où les enjeux liés au maintien des débits d'étiage et au développement de l'activité agricole grâce à l'irrigation sont forts et parfois divergents.

Le projet, mené par le BRGM grâce au concours financier de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, reçoit l'appui de diverses structures réunies en un comité technique de suivi : le Syndicat Layon Aubance Louets, la Direction départementale des territoires du Maine-et-Loire, la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays-de-la-Loire, l'Association des irrigants Sud Loire Aubance, la Chambre régionale d'agriculture des Pays-de-la-Loire.

Deux familles de roches constituent le sous-sol du bassin versant de l'Aubance. Au nord-ouest, dans la partie aval du bassin versant, les roches rencontrées appartiennent au Massif armoricain et sont des roches métamorphiques du socle. Elles sont progressivement recouvertes vers le sud-est dans la partie amont du bassin par des roches sédimentaires appartenant au Bassin parisien. Deux aquifères principaux coexistent au sein du bassin versant de l'Aubance : le tuffeau séno-turonien et les sables cénomaniens inférieurs. Ces derniers, caractérisés par des variations de faciès notables (fraction argileuse localement significative), sont en connexion hydraulique avec les eaux souterraines contenues dans les roches du socle.

L'élaboration du modèle hydrodynamique des écoulements du bassin versant de l'Aubance repose sur un modèle géologique 3D conçu dans le cadre de l'étude. Ce modèle géologique 3D, qui poursuit le travail réalisé préalablement dans le cadre du projet MODGEAU, propose une géométrie fine de huit couches géologiques. Après adaptation pour répondre aux besoins du modèle hydrodynamique et se conformer au modèle conceptuel des écoulements, trois couches géologiques sont intégrées au modèle Aubance :

- Couche 1 : formations cénozoïques et tuffeau séno-turonien
- Couche 2 : marnes cénomaniennes à Ostracées (peu perméables)
- Couche 3 : sables cénomaniens et socle aquifère

Le maillage est uniforme sur l'ensemble du domaine modélisé. Celui-ci est constitué de 22 167 mailles carrés de 200 m de côté et couvre une surface de 500 km², plus vaste que le strict bassin de l'Aubance (210 km²). Le modèle hydrodynamique prend en compte de façon explicite les eaux superficielles : l'Aubance et plusieurs de ses affluents sont intégrés dans le modèle.

Ce rapport final fait suite au rapport intermédiaire BRGM/RP-71826-FR (Chrétien & Assy, 2022). Il détaille le processus de calage du modèle de l'Aubance en régime transitoire et présente les résultats obtenus.

La période de modélisation s'étend du 01/01/2000 au 31/12/2021. Les simulations sont réalisées en régime hydraulique transitoire au pas de temps journalier. Le modèle de l'Aubance est calé à la fois sur les niveaux piézométriques et sur les débits du cours d'eau à Charuau (Soulaines-sur-Aubance). Afin de les simuler au mieux, nous intervenons sur les paramètres de calage principaux suivants :

- les champs de perméabilité et des coefficients d'emmagasinement libre et captif des trois couches modélisées.
- les paramètres intervenant dans le calcul du bilan hydro-climatique et permettant le calcul de la recharge.

Le calage des niveaux piézométriques est imparfait sur les premières années de suivi puis s'améliore pour devenir satisfaisant. Nous parvenons ainsi à obtenir des coefficients de Nash de 0,76 à Louerre sur la période janvier 2017 – décembre 2021 et 0,72 à Chavagnes sur la période juillet 2018 – décembre 2021. Ils sont inférieurs à 0,6 sur la totalité de la période de calage.

Les débits moyens simulés par le modèle hydrodynamique à Charuau sont proches des observations, avec un coefficient de Nash satisfaisant de 0,75. Le module du cours d'eau calculé par le modèle est de 0,7 m³.s⁻¹, supérieur au module réel qui, sur la période de calage, n'est que de 0,6 m³.s⁻¹. Le modèle a donc tendance à surestimer les débits ; c'est particulièrement le cas à l'étiage, avec un QMNA5 modélisé de 187 L.s⁻¹ très éloigné du QMNA5 de l'Aubance qui n'est que de 5 L.s⁻¹.

Quatre scénarios hydroclimatiques ont été définis en concertation avec les partenaires de l'étude, puis simulés par le BRGM avec le modèle hydrodynamique de l'Aubance.

Les résultats du modèle tendent à montrer que la ressource disponible dans les sables cénomaniens est de l'ordre de 1,7 Mm³ pour l'ensemble du domaine modélisé. Elle est consommée chaque année pour satisfaire les besoins des usagers de l'eau. Le stockage moyen annuel de l'aquifère sableux cénomanien est globalement négatif sur la période 2000-2021, et atteint -0,55 Mm³/an.

Le modèle a été utilisé pour simuler les débits naturels de l'Aubance, non influencés par les prélèvements. Le gain pour le module du cours d'eau serait de l'ordre de 5% (+30 L.s⁻¹), tandis que le gain pour le débit d'étiage (QMNA5) serait de plus de 25% (proportion à considérer avec toutes les réserves nécessaires compte-tenu de la forte surestimation des débits d'étiage par le modèle).

Le stockage/déstockage moyen annuel des sables en conditions naturelles est comparable au scénario « réel » : il atteindrait -0,48 Mm³ sur la période 2000-2021. Ainsi les prélèvements dans les sables cénomaniens du bassin versant de l'Aubance, qui sont en moyenne de -0,9 Mm³ chaque année (en fonctions des conditions climatiques printanières et estivales, ils sont compris entre -0,27 et -1,7 Mm³/an sur la période 2000-2019), produiraient des effets limités sur la quantité d'eau stockée dans l'aquifère, mais impacteraient plus sensiblement les débits d'étiage de la rivière.

Les scénarios 3 et 4 visant à évaluer les effets d'une modification géographique (déplacement d'environ 150 m) ou temporelle (décalage dans le temps) des prélèvements dans les sables cénomaniens libres ne montrent pas de bénéfices significatifs.

Il est néanmoins primordial de garder à l'esprit les principales inconnues et limites du modèle maillé de l'Aubance, inhérentes à tout projet de modélisation hydrodynamique, mais ici particulièrement prégnantes compte tenu de la courte durée de plusieurs chroniques d'observations. Des incertitudes demeurent sur les données en entrée du modèle :

- débits des affluents de l'Aubance, débits à l'exutoire du bassin versant ;
- piézométrie de l'aquifère tuffeau séno-turonien et de l'aquifère des sables cénomaniens dans la partie septentrionale du bassin versant ;

- sens d'écoulement de la nappe du tuffeau ;
- temporalité des prélèvements destinés à l'irrigation dans le bassin versant de l'Aubance.

L'acquisition de données complémentaires doit donc être poursuivie dans le cadre d'une prochaine collaboration plus large entre le Syndicat Layon Aubance Louets et le BRGM. Ce futur partenariat permettra de mieux contraindre le modèle grâce à l'apport de points de calage plus nombreux (piézométrie, débits). Il vise également à améliorer le calage du modèle qui simule à ce stade encore imparfaitement les débits d'étiage de l'Aubance. En l'état, l'utilisation du modèle pour estimer l'impact des prélèvements sur les débits de l'Aubance ne peut donc s'affranchir des précautions d'usage qui s'imposent.

Sommaire

1.	Introduc	stion	11
	1.1. C	contexte et objectifs de l'étude	11
	1.2. IV	lethodologie generale	11
	1.3. P	rincipales étapes d'un projet de modelisation	12
2.	Descript	tion du modèle maillé	15
	2.1. S	tructure et emprise du modèle	15
	2.1.1.	Extension	15
	2.1.2.	Maillage	16
	2.1.3.	Géométrie	17
	2.2. C	Conditions hydrauliques aux limites du modèle	20
	2.2.1.	À charge imposée (niveau piézométrique imposé) :	21
	2.2.2.	À flux nul (aucun échange d'eau avec l'extérieur du modèle)	21
	2.2.3.	A débordement	21
	2.3. P	rise en compte des eaux superficielles	24
	2.4. C	Calcul des flux d'infiltration et de ruissellement	27
	2.4.1.	Principe de calcul du bilan hydroclimatique avec le code de calcul MAR I HE	27
	2.4.2.	Zones meteorologique et zones de sol	29
	2.4.3.	Devenir des flux de depordement et de ruissellement	31
	2.5. P	relevements	31
	2.5.1.	Prelevements dans les eaux superficielles	31
	2.3.2.	Prelevernents dans les eaux souterraines	3Z
	2.0. P	arametres nyurouynamiques	34
3.	Calage	du modèle en régime transitoire	37
	3.1. R	appel : Calage du modèle en régime permanent	37
	3.2. N	léthodologie de calage en régime transitoire	37
	3.2.1.	Démarche générale	37
	3.2.2.	Paramètres de calage	38
	3.3. D	onnées de référence pour le calage	38
	3.3.1.	Niveaux piezometriques	38
	3.3.2.	Débits de l'Aubance	41
	3.4. A	Justement des parametres de calage	42
	3.4.1.	Parametres hydrodynamiques	42
	3.4.Z.	Parametres hydro-climatiques	40
	3.3. K	Simulation des nives un piézométriques	41
	3.3.1.	Simulation des débits de l'Aubanes	41 51
	3.0.2.		51
4.	Exploita	tion du modèle hydrodynamique de l'Aubance	53
	4.1. C	Co-construction des scénarios hydroclimatiques	53
	4.2. S	cénario S1 : ressources moyennes annuelles renouvelables des sables cénomanie	ens
	5	3	
	4.2.1.	Bilans hydrauliques moyens	55
	4.2.2.	Bilans hydrauliques annuels dans le bassin versant de l'Aubance	56
	4.3. S	cenario S2 : conditions naturelles	59
	4.3.1.	Impact sur les debits de l'Aubance	59
	4.3.2.	Impact sur la plezometrie	60
	4.4. S	cenarios 53 et 54	62
	4.4.1.	Scenarios S3 (3015): deplacement de 9 Torages Impactant i Aubance	02 66
	4.4.2.	Scenario 34 (4015) : utilisation des lorages pour un stockage nivernal	00

4.5. Lir	nites et améliorations nécessaires	67
4.5.1.	Données de référence	67
4.5.2.	Calage du modèle et résultats obtenus	68
5. Conclusi	on	69
6. Bibliogra	phie	71

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des piézomètres et de la station de jaugeage instrumentés pour la surveillance en continu des niveaux piézométriques et des débits de l'Aubance
Illustration 2 : Extension du domaine modélisé 16
Illustration 3 : Maillage du modèle Aubance. La topographie provient du modèle numérique de terrain au pas de 25 m (©IGN)
Illustration 4 : Adaptation du modèle géologique pour répondre aux besoins du modèle hydrogéologique
Illustration 5 : Cartes des épaisseurs des couches modélisées. Le contour gris correspond à l'emprise du modèle, le contour noir correspond au bassin versant de l'Aubance
Illustration 6 : Coupes est-ouest du domaine modélisé (ligne 67) 20
Illustration 7 : Mailles à potentiel imposé (en rouge) de la couche 1 22
Illustration 8 : Mailles à potentiel imposé (en rouge) de la couche 2 23
Illustration 9 : Mailles à potentiel imposé (en rouge) de la couche 3 23
Illustration 10 : Réseau hydrographique modélisé (en bleu) 24
Illustration 11 : Affluents (rivières) introduits dans le modèle hydrodynamique 25
Illustration 12 : Tronçons (mailles rivières) introduits dans le modèle hydrodynamique
Illustration 13 : Bilan des débits dans un tronçon de rivière et différentes configurations d'échange modélisées par MARTHE (Thiéry, 2015) 26
Illustration 14 : Schéma de fonctionnement du calcul de la recharge et du ruissellement dans le module GARDENIA intégré à MARTHE (Thiéry, 2014)
Illustration 15 : Débits de l'Aubance observés et simulés à Charuau – Modélisation globale pluie niveaux débits (GARDÉNIA)
Illustration 16 : Niveaux des sables cénomaniens observés et simulés à Chavagnes – Modélisation globale pluie niveaux débits (GARDÉNIA) 29
Illustration 17 : Zones météo (pluies et ETP SAFRAN) introduites dans le modèle 29
Illustration 18 : Zones de sol définies dans le modèle hydrodynamique de l'Aubance
Illustration 19 : Prélèvements en eau superficielle au sein du domaine modélisé. Les étiquettes sur les histogrammes indiquent le nombre de prises d'eau actives chaque année
Illustration 20 : Localisation des prises d'eau actives en 2019 32
Illustration 21 : Prélèvements en eau souterraine au sein du domaine modélisé. Les étiquettes sur les histogrammes indiquent le nombre de forages actifs chaque année
Illustration 22 : Localisation des forages actifs en 2019

Illustration 23 : Répartition spatiale des paramètres hydrodynamiques au sein du domaine modélisé
Illustration 24 : Carte piézométrique basses et hautes eaux de la nappe du socle et des sables cénomaniens (Chrétien et collab., 2012)
Illustration 25 : Localisation des ouvrages de suivi destinés au calage du modèle hydrodynamique41
Illustration 26 : Champ de perméabilité issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère séno-turonien
Illustration 27 : Champ de perméabilité issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquitard des marnes à ostracées cénomaniennes
Illustration 28 : Champ de perméabilité issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère des sables cénomaniens et du socle
Illustration 29 : Champ des coefficients d'emmagasinement captifs spécifiques issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère des sables cénomaniens et du socle (couche 3). 45
Illustration 30 : Champ des coefficients d'emmagasinement en nappe libre issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère des sables cénomaniens et du socle (couche 3). 46
Illustration 31 : Comparaison des niveaux piézométriques journaliers simulés et observés à Louerre (tuffeau)
Illustration 32 : Comparaison des niveaux piézométriques journaliers simulés et observés à Chavagnes (sables cénomaniens)
Illustration 33 : Comparaison des niveaux piézométriques journaliers simulés et observés à Soulaines-sur-Aubance (socle), Luigné (sables cénomaniens libres) et Noyant-la-Plaine (sables cénomaniens captifs)
Illustration 34 : Comparaison entre les niveaux piézométriques calculés par le modèle le 12 octobre 2010 et la carte piézométrique basses eaux d'octobre 2010
Illustration 35 : Comparaison entre les niveaux piézométriques calculés par le modèle le 16 mars 2011 et la carte piézométrique hautes eaux de mars 201151
Illustration 36 : Comparaison des débits moyens journaliers de l'Aubance observés et simulés à Charuau (Soulaines-sur-Aubance) sur la période 2000-202152
Illustration 37 : Comparaison des débits simulés et observés pendant les étiages de 2011 à 2021.
Illustration 38 : Étendues géographiques des zones de géométrie
Illustration 39 : Evolution des bilans hydrauliques annuels dans les sables cénomaniens du BV de l'Aubance simulés par le modèle sur la période 2000-2021
Illustration 40 : Bilan des échanges annuels entre nappe et Aubance vs. recharge annuelle 57
Illustration 41 : Bilan annuel moyen des échanges dans le bassin versant de l'Aubance (en millions de m ³)
Illustration 42 : Comparaison des débits simulés de l'Aubance à Charuau selon les scénarios S1 et S260
Illustration 43 : Différence de charge entre deux états piézométriques simulés par le modèle (Scénarios S1 et S2)
Illustration 44 : Différence de charge entre deux états piézométriques simulés par le modèle (Scénarios S1 et S2). Détail en tête de bassin versant

Illustration 45 : Situation géographique des forages fictifs F3bis à F7bis	63
Illustration 46 : Forages dans les sables cénomaniens libres dont les volumes prélevés ont f l'objet d'une ventilation du 1 ^{er} novembre au 31 mars dans le cadre des scénarios S3 et S4	ait 64
Illustration 47 : Comparaison des débits de l'Aubance simulés selon S1 et S3 en période d'étiag	je. 65
Illustration 48 : Comparaison des débits de l'Aubance simulés selon S1 et S3 en période d'étiag	je. 66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombre de mailles par couche modélisée 17
Tableau 2 : Epaisseur des couches modélisées 19
Tableau 3 : Recharge journalière par zone de sol pour le calage du régime permanent 30
Tableau 4 : Ventilation mensuelle des volumes prélevés (nappe et eau superficielle) 34
Tableau 5 : Valeurs de transmissivité et coefficient d'emmagasinement collectées au sein dudomaine de modélisation.35
Tableau 6 : Coefficients d'emmagasinement (S) en nappe libre et en nappe captive issus ducalage pour les trois couches modélisées
Tableau 7 : Valeurs des paramètres hydro-climatiques issus du calage pour les cinq zones desol
Tableau 8 : Description des quatre scénarios d'exploitation simulés
Tableau 9 : Récapitulatif des zones de géométrie introduites dans le modèle maillé 54
Tableau 10 : Bilan hydraulique annuel moyen des sables cénomaniens (en Mm ³ /an) 55
Tableau 11 : Forages à moins de 100 m de l'Aubance concernés et impactant la nappe peuprofonde ou le cours d'eau63
Tableau 12 : Forages au cénomanien libre dont les prélèvements ont été ventilés dans le scénarioS3 du 1er novembre au 31 mars.64
Tableau 13 : Distances de recul des forages de la bande de 100 m 65
Tableau 14 : Scénario S4 - Prélèvements moyens mensuels des 9 forages impactant 66

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Dans le bassin de l'Aubance, la nappe des sables du Cénomanien inférieur constitue un enjeu important et une ressource à préserver, puisqu'elle garantit une activité économique minimale à un nombre important d'exploitations agricoles s'appuyant sur l'irrigation. Par ailleurs, les eaux souterraines des alluvions et des sables du Cénomanien inférieur libre contribuent à maintenir un débit minimum dans les cours d'eau en période d'étiage (Chrétien et al., 2012).

La pérennité de l'activité agricole basée sur l'irrigation pourrait donc être contrariée par les étiages sévères que connaît chaque année la rivière Aubance au moment où la demande en eau est la plus forte. Ces dernières années, le Préfet a en effet été amené à prendre chaque été des arrêtés de restriction des usages de l'eau pour limiter la pression sur les milieux et maintenir un débit minimum dans le cours d'eau.

Afin de caractériser les relations nappes/rivières et évaluer la ressource en eau disponible annuellement pour les usages du bassin versant en respectant un débit minimum dans l'Aubance, le BRGM a conçu un modèle hydrogéologique maillé. Son utilisation répond à deux enjeux majeurs pour le bassin versant :

- 1. Quantifier les échanges entre les nappes et les cours d'eau du bassin versant ;
- 2. Concourir à l'élaboration des règles de gestion garantissant l'équilibre quantitatif de l'hydrosystème.

1.2. METHODOLOGIE GENERALE

Pour atteindre les objectifs précités, l'étude menée par le BRGM a tout d'abord consisté à collecter et établir la synthèse de l'ensemble des données nécessaires, y compris faire l'acquisition de données nouvelles sur la structure des aquifères du bassin versant de l'Aubance et sur leur fonctionnement hydrogéologique. Les nouvelles connaissances acquises concernent principalement :

- la structure géologique de l'aquifère par la réalisation de nouveaux forages (Chrétien, 2021 a, b et c) et la collecte de nouveaux logs géologiques (non pris en compte précédemment (Rouxel et al., 2020)), pour ainsi pouvoir modéliser la géométrie de l'aquifère en 3D ;
- les fluctuations piézométriques de l'aquifère principal du bassin versant, par l'instrumentation de nouveaux ouvrages de surveillance quantitative (sables cénomaniens inférieurs libres, sables cénomaniens inférieurs captifs, et socle en connexion hydraulique avec les sables) ;
- l'hydrométrie du bassin versant, par l'instrumentation d'une station de jaugeage et la réalisation d'une campagne de jaugeages dans le sous-bassin du Montayer (affluent de l'Aubance en rive gauche) ;
- les relations nappe rivière et l'impact des prélèvements sur la nappe. Pour y parvenir, le diagnostic des forages proches de l'Aubance et l'interprétation des nouveaux essais de nappe pilotés par le Syndicat Layon Aubance Louets (SLAL) en 2020-21 ont été exploités.



Illustration 1 : Localisation des piézomètres et de la station de jaugeage instrumentés pour la surveillance en continu des niveaux piézométriques et des débits de l'Aubance.

Dans la seconde phase de l'étude, un modèle hydrodynamique maillé a été développé par le BRGM et exploité pour simuler différents scénarios d'exploitation.

1.3. PRINCIPALES ETAPES D'UN PROJET DE MODELISATION

Une fois le cadre et l'objectif d'une modélisation hydrogéologique posés, un projet de modélisation comporte plusieurs phases distinctes, décrites ci-après (Barthélémy et Seguin, 2016) :

- 1) <u>Collecte, analyse et synthèse des données</u>. Les données à acquérir et à traiter pour un modèle maillé sont nombreuses et variées. Elles concernent la structure géologique du/des réservoir(s) et des encaissants, les propriétés hydrogéologiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement) de toutes ces formations, les mesures hydrauliques (niveaux piézométriques, débits des sources et des cours d'eau, les données climatiques (pluies et évapotranspiration « ETP » pour calculer la recharge naturelle des nappes), les paramètres caractérisant les sols, les volumes d'eau prélevés et ou injectés en nappe et dans les cours d'eau (localisation et chroniques des pompages pour l'eau potable, l'agriculture et l'industrie) et la caractérisation du réseau hydrographique pour estimer les échanges nappe-rivière. Cette phase est décrite dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-71826-FR (Chrétien & Assy, 2022).
- <u>Construction d'un modèle géologique 3D</u>. Pour un modèle spatialisé complexe, couvrant par exemple un système aquifère multicouche comme dans notre cas, il est fortement recommandé d'utiliser un modeleur géologique 3D pour valoriser toutes les données structurales disponibles et construire une structure géologique cohérente et actualisable,

qui servira ensuite d'ossature au modèle d'écoulement. Cette phase est décrite dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-71826-FR (Chrétien & Assy, 2022).

- 3) <u>Elaboration du schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique.</u> Sur la base de la synthèse hydrogéologique et des données précédemment compilées, le schéma 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. Cette phase est décrite dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-71826-FR (Chrétien & Assy, 2022).
- 4) <u>Construction d'un modèle d'écoulement</u>: traduction numérique du schéma conceptuel d'écoulement. La construction d'un modèle maillé consiste à découper l'espace selon une grille plus ou moins régulière en 3 dimensions, puis à renseigner chacune des mailles ainsi créées avec des données chiffrées décrivant la géométrie du système aquifère, les propriétés hydrogéologiques du milieu, les conditions aux limites et les entrées/sorties hydrauliques. Le chapitre 2 du présent rapport reviennent sur l'ensemble des étapes de construction du modèle et sur les hypothèses prises pour les aspects hydrodynamiques.
- 5) <u>Calage du modèle</u>. Durant cette phase, on recherche l'ensemble des valeurs des paramètres permettant la meilleure adéquation possible entre les observations disponibles et les valeurs calculées par le modèle : niveaux piézométriques et débits des cours d'eau. Sont principalement concernés par le calage :
 - les champs de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement qui ne sont pas connus a priori,
 - les coefficients de partage ruissellement/infiltration et la conductance des lits des cours d'eau.
- 6) Le calage en régime transitoire fait l'objet du chapitre 2.5. Le calage du modèle hydrodynamique en régime permanent et les résultats associés sont présentés dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-71826-FR (Chrétien & Assy, 2022).
- 7) <u>Validation du modèle (facultatif)</u>. Elle consiste à simuler, avec le modèle calé, une période volontairement mise de côté pendant le calage. L'objectif est de vérifier que le modèle restitue correctement les évolutions du système aquifère lorsqu'il est soumis à des sollicitations (principalement des chroniques de recharge et de pompage) différentes de celles qui ont été utilisées pour le calage. La validation n'est pas toujours possible dans les faits, notamment quand les chroniques d'observations sont de relativement courtes durées comme dans le cas du bassin versant de l'Aubance. Ce travail n'a donc pas été mené ici, mais devra être réalisé dans le futur avec l'allongement des chroniques (sur quelques cycles annuels).
- 8) <u>Exploitation du modèle</u>. Une fois calé, le modèle est utilisé pour simuler différents scénarios prévisionnels. Ceux-ci peuvent être définis en fonction d'objectifs assignés au départ de l'étude : prévision d'un état piézométrique résultant de nouvelles sollicitations de l'hydrosystème, recherche d'une configuration de pompage permettant de respecter un jeu de contraintes, détermination de « volumes exploitables », etc. Dans le cadre de l'étude Aubance, ces scénarios ont été définis en concertation avec nos partenaires lors de plusieurs réunions techniques animées par le BRGM (cf. § 4.1).

2. Description du modèle maillé

Les caractéristiques et hypothèses de construction du modèle maillé de l'Aubance sont décrites dans le rapport BRGM/RP-71826-FR (Chrétien & Assy, 2022). Les paragraphes qui suivent sont extraits de ce rapport.

2.1. STRUCTURE ET EMPRISE DU MODELE

2.1.1. Extension

Dans le bassin versant de l'Aubance :

- Les limites de l'aquifère séno-turonien (et sa couverture cénozoïque) sont bien connues car elles correspondent aux limites d'affleurement du tuffeau (carte géologique harmonisée au 1/50 000). Cet aquifère n'est présent que dans les zones où la topographie est la plus élevée, et vient donc « coiffer » le domaine modélisé dans sa partie orientale.
- Les limites des marnes à ostracées sont bien connues car elles correspondent à leurs limites d'affleurement (carte géologique harmonisée au 1/50 000).
- L'aquifère des sables cénomaniens inférieurs (en connexion avec le socle dans la partie occidentale du bassin versant) s'enfonce sous la pile sédimentaire vers l'est, et ses limites ne correspondent pas à des limites d'affleurement. Pour la modélisation de cet aquifère, il convient donc de définir des limites fictives.

Ces limites fictives représentent des lignes particulières (cours d'eau, ligne de partage des eaux, etc.) où le régime d'écoulement est simple et facilement intégré dans le code de calcul numérique :

- la Loire et le Louet au nord et au nord-est du domaine modélisé ;
- le Layon au sud et sud-ouest ;
- la Besnarderie¹ (ruisseau) à l'ouest ;
- la Fontaine de l'Enfer (ruisseau) à l'est ;
- le Douet² (ruisseau) au sud-est ;
- ailleurs, la crête piézométrique déterminée au moyen des cartes piézométriques.

L'Illustration 2 représente le domaine de modélisation ainsi délimité. Il couvre une surface de 500 km² (le bassin versant souterrain de l'Aubance occupe quant à lui une surface de 210 km²).

¹ Egalement appelé ruisseau de la Boucharderie

² Egalement appelé ruisseau de Blanchet



Illustration 2 : Extension du domaine modélisé

2.1.2. Maillage

D'une manière générale, les dimensions affectées aux mailles d'un modèle sont le fruit d'un compromis entre (Barthélémy et al., 2016) :

- la précision de calcul recherchée ;
- le pas et la variabilité spatiale des données de terrain disponibles ;
- la taille et la complexité géométrique / hydrogéologique des aménagements à simuler ;
- le respect des critères numériques assurant la représentativité des calculs ;
- un nombre de mailles compatibles avec une durée de calcul « raisonnable » sur un micro-ordinateur courant.

Dans le cas du modèle des eaux souterraines du bassin versant de l'Aubance, le maillage est uniforme sur l'ensemble du domaine modélisé. Il est constitué de **mailles carrées de 200** m de côté (cf. Illustration 3). Compte-tenu des données disponibles, un maillage de 200 m permet de bien différencier les forages d'exploitation entre eux (pas plus d'un forage par maille à l'exception de 16 mailles sur 217 mailles concernées) et de caractériser de façon suffisamment précise les échanges nappe-rivière tout en respectant un temps de calcul acceptable. Au droit d'une verticale, les mailles ont les mêmes dimensions horizontales. La hauteur des mailles est déterminée par la différence entre les murs (bases) des couches modélisées ; par exemple, si le mur de la couche 2 dans une maille s'établit à 53 m NGF et le mur de la couche 3 dans la même maille s'établit à 41,5 m NGF, la hauteur de cette maille est de 11,5 m. Dans la première couche rencontrée à l'affleurement, la hauteur de chaque maille est déterminée par la différence entre les mur de la couche.



Illustration 3 : Maillage du modèle Aubance. La topographie provient du modèle numérique de terrain au pas de 25 m (©IGN).

Le modèle est constitué de trois couches avec pour chacune le nombre de mailles suivant :

Couche	Désignation	Nombre de mailles
1	Tuffeau séno-turonien et	3 883
I	couverture cénozoïque	5 005
n	Marnes cénomaniennes à	5 700
Z	ostracées	5799
2	Sables cénomaniens inférieurs et	12 /95
3	socle métamorphique	12 400
Total		22 167

Tableau 1 : Nombre de mailles par couche modélisée

2.1.3. Géométrie

La topographie du modèle hydrogéologique a été importée du modèle géologique, qui avait lui-même utilisé le MNT au pas de 25 m.

Après différents tests, et pour qu'il soit conforme au schéma hydrogéologique conceptuel, le modèle géologique importé initialement a finalement été adapté pour répondre aux besoins du modèle hydrogéologique. L'Illustration 4 dresse un récapitulatif des modifications apportées.



Illustration 4 : Adaptation du modèle géologique pour répondre aux besoins du modèle hydrogéologique

Des cartes d'épaisseur par couche ainsi que quelques valeurs caractéristiques sont respectivement présentées par l'Illustration 5 et le Tableau 2. Deux vues en coupe est-ouest figurent sur l'Illustration 6.



Illustration 5 : Cartes des épaisseurs des couches modélisées. Le contour gris correspond à l'emprise du modèle, le contour noir correspond au bassin versant de l'Aubance.

	Couches							
Epaisseur (m)	1 - Tuffeau séno- turonien et couverture cénozoïque	2 - Marnes à ostracées	3 - Sables cénomaniens et socle métamorphique					
Min.	< 0,1	< 0,1	0,7					
Max.	75	51	66					
Moy.	35	17	30					

Tableau 2 : Epaisseur des couches modélisées



Illustration 6 : Coupes est-ouest du domaine modélisé (ligne 67). Conditions hydrauliques aux limites du modèle

Il est impératif de fournir au logiciel de modélisation les conditions hydrauliques aux limites du modèle, de façon à ce que celui-ci puisse correctement intégrer l'influence du « milieu extérieur » (règles d'échange entre le domaine modélisé et le milieu extérieur).

Après plusieurs tests réalisés au début de l'opération de calage du modèle en régime permanent puis ajusté en transitoire, les conditions aux limites introduites dans le modèle sont de trois types :

2.1.4. À charge imposée (niveau piézométrique imposé) :

- pour la couche 1 (tuffeau séno-turonien et couverture cénozoïque), le long de la Loire de Chênehutte à Gennes (cf. Illustration 7);
- pour la couche 2 (marnes à ostracées, peu perméables), le long de la Loire entre le pont de Saint-Mathurin et Gohier (cf. Illustration 8);
- pour la couche 3 (sables cénomaniens inférieurs et socle, aquifère principal), le long de la Loire de Gennes à la confluence avec le ruisseau de la Besnarderie (y compris le Louet), le long du ruisseau de la Besnarderie, le long du Layon, le long du ruisseau du Douet (cf. Illustration 9).

Les conditions aux limites à charge imposée ont des implications fortes pour le modèle : au droit des mailles à charge imposée (= potentiel imposé), les charges hydrauliques restent constantes. Les charges initiales ne varient plus. Le niveau de la nappe aux abords des cours d'eau concernés par ces mailles ne peut pas décrocher sous le lit de la rivière. C'est la raison pour laquelle ce type de conditions aux milites est réservé aux mailles situées à une distance importante des enjeux (rivière Aubance et ses affluents, forages du bassin de l'Aubance), pour que le biais potentiellement introduit n'impacte pas les résultats du modèle à l'intérieur du bassin versant de l'Aubance.

- Au droit des mailles limites latérales correspondant à un cours d'eau, nous ne disposons pas de carte piézométrique permettant d'estimer la cote piézométrique des aquifères. Les charges initiales sont fixées à la cote topographique du modèle abaissée d'un mètre.
- Au droit des sources (couche 1 du tuffeau), les charges initiales sont fixées à la cote topographique de la carte IGN au 1/25 000.

2.1.5. À flux nul (aucun échange d'eau avec l'extérieur du modèle)

Elles sont définies comme tel sur toutes les autres limites latérales qui correspondent à des lignes de courant (par définition, aucun flux ne traverse une ligne de courant) et des limites d'affleurement. Les lignes de courant correspondent aux trajectoires de l'eau et sont donc perpendiculaires aux courbes isopièzes.

Il s'agit également de conditions aux limites pouvant introduire un biais dans les résultats du modèle et elles sont réservées aux mailles situées à une distance importante des enjeux.

2.1.6. À débordement

 pour la couche 1 : sur toute l'emprise de la couche. Si la charge calculée dans une maille est supérieure à la cote de débordement assignée à cette maille (topographie dans notre cas), il y a débordement et la charge effective est ramenée à la cote du sol, l'excès de charge étant converti en débit de débordement qui rejoint la maille rivière la plus proche (selon les directions de ruissellement calculées à partir de la surface topographique).



o pour les couches 2 et 3 : sur l'emprise libre (sans couverture) de ces couches.

Illustration 7 : Mailles à potentiel imposé (en rouge) de la couche 1.



Illustration 8 : Mailles à potentiel imposé (en rouge) de la couche 2.



Illustration 9 : Mailles à potentiel imposé (en rouge) de la couche 3.

2.2. PRISE EN COMPTE DES EAUX SUPERFICIELLES

Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents. Un tronçon constitue en fait une « maille rivière » en relation avec une maille du modèle d'écoulement souterrain. Dans notre cas, nous avons intégré au modèle hydrodynamique l'Aubance et ses affluents dont la classe est inférieure ou égale à 5. La classe d'un cours d'eau est une donnée de la BD TOPAGE (de 0 à 7, en ordre décroissant de taille) et permet de hiérarchiser les cours d'eau selon leur taille.



Illustration 10 : Réseau hydrographique modélisé (en bleu).

Les tronçons (mailles) des rivières sont numérotés de façon croissante de l'amont vers l'aval pour chaque affluent (cf. Illustration 11 & Illustration 12). Ils sont décrits par leur géométrie (longueur, largeur, et altitude du lit), par leurs propriétés physiques (épaisseur et perméabilité du lit et des berges), et par leur état initial (hauteur d'eau dans la rivière). Selon la position relative de la ligne d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière (cf. Illustration 13). Le débit d'échange est par ailleurs contrôlé par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité.

La largeur des cours d'eau a été obtenue d'une part au moyen de relevés topographiques réalisés par le BRGM en mai 2020 à l'aide d'un GPS différentiel, et d'autre part par mesures sur les orthophotographies de l'IGN. Elle s'échelonne de 1 à 14 m de l'amont à l'aval.

Les longueurs des tronçons ont été calculées à l'aide d'un géotraitement sous ArcMap® par intersection entre le cours d'eau et chaque maille carrée 200 x 200 m du modèle.

L'épaisseur de colmatage du lit des rivières a été fixée à 1 m partout. Des valeurs bibliographiques de perméabilité de colmatage du lit des rivières (Chrétien, 2012) ont d'abord été affectées aux berges des cours d'eau puis ajustées lors du calage du modèle (cf. § 2.5).

Le niveau absolu de l'eau dans les rivières modélisées a été fixé à la valeur minimale de la cote topographique de la maille considérée, issue du MNT au pas de 5 m. L'altitude du fond de la rivière a été déterminée à partir de ce niveau d'eau :

- Pour les affluents 1, 2, 4 et 5 : -0,2 m par rapport au niveau d'eau absolu ;
- Pour l'affluent 8 : -0,3 m par rapport au niveau d'eau absolu ;
- Pour les affluents 3 et 6 : -0,5 m par rapport au niveau d'eau absolu ;
- Pour l'affluent 7 : -0,8 m par rapport au niveau d'eau absolu ;
- Pour l'affluent 9 : -1 m par rapport au niveau d'eau absolu.



Illustration 11 : Affluents (rivières) introduits dans le modèle hydrodynamique.



Illustration 12 : Tronçons (mailles rivières) introduits dans le modèle hydrodynamique.



Illustration 13 : Bilan des débits dans un tronçon de rivière et différentes configurations d'échange modélisées par MARTHE (Thiéry, 2015).

2.3. CALCUL DES FLUX D'INFILTRATION ET DE RUISSELLEMENT

2.3.1. Principe de calcul du bilan hydroclimatique avec le code de calcul MARTHE

Avec MARTHE, les calculs du bilan hydroclimatique (Pluie, ETP, fonte de neige, ruissellement vers les cours d'eau, infiltration) peuvent être totalement couplés avec les écoulements souterrains. Ils suivent la même logique que celle qui est mise en œuvre dans GARDENIA³ (Thiéry, 2014), avec deux réservoirs : « sol » et « zone non saturée ». En revanche, il n'y a pas de réservoir « profond » puisque les écoulements souterrains sont directement simulés dans les différentes couches du modèle.

Une telle approche nécessite d'intégrer au modèle :

- des zones météorologiques associées à des chroniques de pluie et d'ETP ;
- des zones de sol pour lesquelles sont définies les paramètres hydro-climatiques utilisés dans GARDENIA : la Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (RDE) pour les premiers mètres du sol (autrement appelée réserve utile) et deux paramètres qui permettent la répartition des pluies efficaces entre écoulement rapide (ruissellement) et écoulement lent (infiltration ou percolation) : la hauteur d'équi-répartition entre écoulement rapide et percolation (NRUIP) et le temps de demi-percolation du réservoir représentant la zone non saturée (TPERC).

Le module GARDÉNIA intégré à Marthe utilise le principe des modèles réservoirs (Illustration 14) :

- un premier réservoir U (cf. Illustration 14) modélise la partie supérieure du sol, sa hauteur maximale est fixée par la RDE. Il se vidange ou se remplit suivant les précipitations et l'ETP. L'alimentation du réservoir H sous-jacent est possible lorsque la capacité de rétention en eau du sol est atteinte ;
- un second réservoir H modélise la zone non saturée au-dessus du niveau de la nappe. Il est alimenté par le réservoir U et se vidange par percolation dans le réservoir souterrain (aquifère) suivant une loi exponentielle de constante de temps TPERC (alimentation de l'aquifère = H.dt/TPERC) et par ruissellement suivant le paramètre NRUIP. Ce dernier permet de rendre compte du déphasage entre la pluie et la recharge effective de la nappe, associé à la traversée de la zone non saturée.

Les trois paramètres (RDE, TPERC et NRUIP) vont être ajustés lors du calage du modèle maillé en régime transitoire (cf. § 3.4.2). Un premier jeu de données a cependant été introduit à partir de modélisations globales pluie-niveau réalisées de façon préliminaire avec le code de calcul GARDÉNIA, modélisant la piézométrie à Chavagnes (Sables cénomaniens) et les débits de l'Aubance à Charuau (Soulaines-sur-Aubance) avec un coefficient d'ajustement global de 0,92 :

- Recharge = 0,14 mm/j
- RDE = 216 mm
- NRUIP = 3 mm
- TPERC = 0,2 mois

³ Le logiciel GARDÉNIA (Modèle Global À Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de NIveaux Aquifères, développé par le BRGM) est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.



Illustration 14 : Schéma de fonctionnement du calcul de la recharge et du ruissellement dans le module GARDENIA intégré à MARTHE (Thiéry, 2014)



Illustration 15 : Débits de l'Aubance observés et simulés à Charuau – Modélisation globale pluie niveaux débits (GARDÉNIA).



Illustration 16 : Niveaux des sables cénomaniens observés et simulés à Chavagnes – Modélisation globale pluie niveaux débits (GARDÉNIA).

2.3.2. Zones météorologique et zones de sol

La pluie et l'ETP journalières ont été introduites dans le modèle à partir des données de grille SAFRAN-ISBA sur la période 2000-2019. 18 mailles SAFRAN permettent de couvrir l'intégralité du domaine modélisé. Ces pluies et ETP n'interviennent que pour l'utilisation du modèle en régime transitoire.



Illustration 17 : Zones météo (pluies et ETP SAFRAN) introduites dans le modèle.

Cinq zones de sol, délimitées sur la base des affleurements géologiques et de la nature libre ou captive des aquifères, ont par ailleurs été délimitées :



Illustration 18 : Zones de sol définies dans le modèle hydrodynamique de l'Aubance.

Pour améliorer le calage en régime permanent, la recharge a été modifiée selon ces zones de sol :

Recharge					
Zone de sol 1	0.49 mm/j				
Zone de sol 2	0.30 mm/j				
Zone de sol 3	0.45 mm/j				
Zone de sol 4	0.23 mm/j				
Zone de sol 5	0.23 mm/j				

Tableau 3 : Recharge journalière par zone de sol pour le calage du régime permanent

Les paramètres hydro-climatiques sont tous les mêmes au sein des cinq zones de sol, et ont en définitive été modifiés pour améliorer le calage en régime permanent :

- RDE = 216 mm
- NRUIP = 10 mm
- TPERC = 6 mois

2.3.3. Devenir des flux de débordement et de ruissellement

Les flux de débordement et de ruissellement cheminent selon la surface topographique. En effet, MARTHE permet de générer des directions de ruissellement à partir des altitudes topographiques. Chaque maille se voit affectée d'un code décrivant la direction aval de ruissellement. Les flux de débordement et de ruissellement peuvent soit être dirigés vers l'Aubance ou un de ses affluents, soit être évacués du système quand ils sont dirigés vers l'exutoire du réseau hydrographique (ils ne participent alors pas aux débits simulés dans les rivières).

2.4. **PRELEVEMENTS**

Lorsque nous avons débuté la construction du modèle, les prélèvements des années 2020 et 2021 n'étaient pas encore disponibles sur le site de la BNPE. Dans le modèle, les prélèvements de l'année 2019 sont répétés à l'identique en 2020 et 2021.

2.4.1. Prélèvements dans les eaux superficielles

Au sein du domaine modélisé, les prélèvements dans les eaux superficielles sont minoritaires en nombre et en volume par rapport aux prélèvements en nappe. En 2019, la BNPE recense 14 prises d'eau actives, pour un volume annuel total de 300 000 m³. Pour le strict bassin versant de l'Aubance, ce nombre se limite à 3 prises d'eau pour un volume annuel de 72 000 m³ (cf. Illustration 19 & Illustration 20).



Illustration 19 : Prélèvements en eau superficielle au sein du domaine modélisé. Les étiquettes sur les histogrammes indiquent le nombre de prises d'eau actives chaque année.



Illustration 20 : Localisation des prises d'eau actives en 2019.

2.4.2. Prélèvements dans les eaux souterraines

En 2019, la BNPE recense 115 forages actifs, pour un volume annuel total de 4 700 000 m³ (ce volume inclut les prélèvements d'eau potable du champ captant de Saint-Rémy-la-Varenne dans les alluvions de la Loire, qui représentent près d'un tiers du total annuel du domaine modélisé). Pour le strict bassin versant souterrain de l'Aubance, ce nombre se limite à 56 forages actifs en 2019 pour un volume annuel de 1 500 000 m³ (cf. Illustration 21 & Illustration 22).



Illustration 21 : Prélèvements en eau souterraine au sein du domaine modélisé. Les étiquettes sur les histogrammes indiquent le nombre de forages actifs chaque année.



Illustration 22 : Localisation des forages actifs en 2019.

Les prélèvements (en rivière ou en nappe) ne sont connus qu'annuellement. À partir du registre mensuel des compteurs de deux forages d'un irrigant de l'Aubance sur la période 2012-2021, nous avons proposé une ventilation mensuelle de l'ensemble des volumes prélevés du domaine modélisé (cf. Tableau 4) :

Année	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1999	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2000	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2001	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2002	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2003	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2004	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2005	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2006	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2007	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2008	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2009	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2010	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2011	0%	0%	0%	2%	3%	10%	44%	40%	1%	0%	0%	0%
2012	0%	0%	0%	0%	0%	0%	29%	71%	0%	0%	0%	0%
2013	0%	0%	0%	0%	0%	0%	37%	63%	0%	0%	0%	0%
2014	0%	0%	0%	39%	0%	31%	30%	0%	0%	0%	0%	0%
2015	0%	0%	0%	0%	0%	24%	49%	27%	0%	0%	0%	0%
2016	0%	0%	0%	0%	0%	0%	34%	51%	15%	0%	0%	0%
2017	0%	0%	0%	0%	10%	19%	51%	20%	0%	0%	0%	0%
2018	0%	0%	0%	0%	0%	0%	63%	37%	0%	0%	0%	0%
2019	0%	0%	0%	0%	0%	0%	54%	46%	0%	0%	0%	0%
2020	0%	0%	0%	0%	0%	0%	47%	53%	0%	0%	0%	0%
2021	0%	0%	0%	0%	0%	25%	45%	30%	0%	0%	0%	0%

Tableau 4 : Ventilation mensuelle des volumes prélevés (nappe et eau superficielle)

Pour la période 1999-2011, la ventilation s'est effectuée ainsi :

- Prélèvements nuls d'octobre à mars
- Moyenne de la période 2012-2021 pour les trois mois où les prélèvements sont les plus élevés (juin juillet août), soit respectivement 10%, 44%, 40%
- Les 6% restant ventilés somme suit : 2% en avril, 3 % en mai, 1% en septembre

La meilleure connaissance de la temporalité des prélèvements du bassin versant constitue assurément une piste d'amélioration du modèle maillé de l'Aubance et de la fiabilité des résultats qu'il procure (cf. § 4.5.1).

2.5. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

La plupart des paramètres hydrodynamiques a été collectée à partir de la Banque du sous-sol. D'autres données ont été communiquées par la Direction départementale des territoires du Maine-et-Loire (Service eau environnement biodiversité / Unité Protection et Police de l'eau). Enfin, pour compléter ces informations, des essais de pompages ont été réinterprétés lorsque c'était possible (données d'essais de pompages disponibles et suffisamment fiables). En dépit de ces efforts, la quantité de données demeure faible au sein du domaine de modélisation : une vingtaine de valeurs de transmissivité (T) et seulement quelques valeurs de coefficient d'emmagasinement.

Les sables cénomaniens, ressource aquifère principale du bassin versant de l'Aubance, ont une transmissivité moyenne de 4 10⁻³ m².s⁻¹ et un coefficient d'emmagasinement moyen de 8 10⁻⁴ (cf. Tableau 5). L'Illustration 23 montre la répartition des paramètres disponibles au sein du domaine de modélisation.

Identifiant national BSS	Désignation	Profondeur (m)	Transmissivité (m2/s)	Coefficient d'emmagasinement	Formation géologique
BSS003KYJE	F3	20	0.00006	-	MARNES CENOMANIENNES
BSS003KYUS	F8		0.000006	-	MARNES CENOMANIENNES
04844X0078	F	50	0.009	0.0005	SABLES CENOMANIENS
BSS003RKHI	}	48	0.002	-	SABLES CENOMANIENS
BSS003RMSA		81	0.0007	-	SABLES CENOMANIENS
04844X0080	F	43	0.005	0.0005	SABLES CENOMANIENS
BSS003DLGC	P	6	0.0008	-	SABLES CENOMANIENS
BSS003CKKW	F	112	0.0014	-	SABLES CENOMANIENS
BSS003CKKK	F	104	0.00036	-	SABLES CENOMANIENS
04851X0099	F	41	0.003	-	SABLES CENOMANIENS
Inconnu1		42	0.019	0.0007	SABLES CENOMANIENS
Inconnu2	}	46	0.0056	0.0002	SABLES CENOMANIENS
Inconnu3		42	0.00063	-	SABLES CENOMANIENS
BSS003KYJE	F3	20	0.001	0.004	SABLES CENOMANIENS
BSS003KYUS	F8		0.0018	0.004	SABLES CENOMANIENS
04852X0012	F	48	0.001	-	TUFFEAU SENO-TURONIEN
BSS004ARQD	F2	17	0.0021	0.1	TUFFEAU SENO-TURONIEN

 Tableau 5 : Valeurs de transmissivité et coefficient d'emmagasinement collectées au sein du domaine de modélisation.



Illustration 23 : Répartition spatiale des paramètres hydrodynamiques au sein du domaine modélisé.
3. Calage du modèle en régime transitoire

3.1. RAPPEL : CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT

En régime permanent, le temps n'est pas une variable du système. L'objectif de cette phase préalable de calage (phase 1 de l'étude) est d'obtenir une première ébauche de la carte des perméabilités (qui vont être reprises plus précisément lors du calage en régime transitoire) et de la recharge par comparaison des charges hydrauliques calculées à la piézométrie de référence, en l'occurrence la piézométrie de la nappe des sables cénomaniens et du socle. Les paramètres à ajuster sont le champ des perméabilités des aquifères, les perméabilités des lits des rivières, et la recharge (qui correspond à la quantité d'eau météorique qu'on introduit dans le système).

Le calage du modèle maillé de l'Aubance en régime permanent est décrit dans le rapport BRGM/RP-71826-FR (Chrétien & Assy, 2022).

3.2. METHODOLOGIE DE CALAGE EN REGIME TRANSITOIRE

3.2.1. Démarche générale

La période de modélisation s'étend du 01/01/2000 au 31/12/2021. Les simulations sont réalisées en régime hydraulique transitoire au pas de temps journalier. Du point de vue hydrodynamique, le modèle de l'Aubance est calé à la fois sur les niveaux piézométriques et sur les débits du cours d'eau à Charuau (Soulaines-sur-Aubance).

Cependant, seuls les débits moyens journaliers de l'Aubance sont bel et bien disponibles sur la totalité de la période de modélisation. Le modèle a été calé sur une courte période, car comme nous le verrons plus loin (cf. § 3.3), les chroniques piézométriques journalières ne sont disponibles dans le bassin versant qu'à partir de 2008 pour le tuffeau séno-turonien (Louerre) et 2014 pour les sables cénomaniens (Chavagnes). Ces observations sont complétées depuis 2021 par les trois piézomètres que nous avons mis en service (Soulaines-sur-Aubance dans le socle, Luigné et Noyant-la-Plaine dans les sables cénomaniens). Il faut donc d'ores et déjà souligner que la période de calage du modèle apparaît relativement courte.

Dans le même ordre d'idée, les prélèvements du bassin versant de l'Aubance ne sont pas suivis à fréquence journalière (cf. § 2.4).

Le calage du modèle hydrodynamique a été initié en régime permanent, puis il a rapidement été mené en régime transitoire. Cette première étape du processus de calage permet cependant de traiter les premières difficultés de convergence des calculs et de proposer les premières conditions initiales au régime transitoire.

3.2.2. Paramètres de calage

Plusieurs paramètres de calage sont à considérer dans le but de reproduire au mieux :

- les niveaux piézométriques journaliers de la nappe du tuffeau séno-turonien (libre) ;
- les niveaux piézométriques journaliers de la nappe des sables cénomaniens en connexion avec le socle (libre dans la partie occidentale du bassin versant et captive sous les marnes à ostracées dans la partie orientale du bassin versant) ;
- les débits moyens journaliers de l'Aubance.

À cette fin, les principaux paramètres de calage à retenir sont :

- les champs de perméabilité et des coefficients d'emmagasinement libre et captif des trois couches modélisées. Les valeurs retenues sont présentées et discutées au § 3.4.1.
- les paramètres intervenant dans le calcul du bilan hydro-climatique et permettant le calcul de la recharge (RDE, TPERC et NRUIP, cf. § 3.4.2).
- l'épaisseur et la perméabilité du colmatage associées au lit des cours d'eau.

Le processus de calage est itératif selon une approche par « essais et erreurs ». Au regard du nombre de paramètres de calage et des trois couches modélisées, un grand nombre de simulations a été nécessaire avant de parvenir aux résultats présentés ci-après.

3.3. DONNEES DE REFERENCE POUR LE CALAGE

Pour s'assurer que le modèle reproduit correctement le fonctionnement du système aquifère, il faut disposer de mesures de terrain permettant de comparer les résultats des simulations aux relevés effectués dans un réseau d'observation. Dans le cas du bassin versant de l'Aubance, ces données de référence concernent les niveaux piézométriques du tuffeau séno-turonien et des sables cénomaniens, et les débits de l'Aubance.

3.3.1. Niveaux piézométriques

a) Cartes piézométriques de la nappe du socle et des sables cénomaniens

Nous disposons des cartes piézométriques basses et hautes eaux de la nappe du socle et des sables cénomaniens dans le bassin versant de l'Aubance (cf. Illustration 24). On en tire les enseignements suivants :

- Les isopièzes confirment que la nappe est drainée par les cours d'eau et les vallées sèches (et donc les lignes de courant convergent vers les vallées) dans la partie aval du bassin, là où la nappe est libre.
- Les variations des sens d'écoulement de la nappe entre l'automne 2010 et le printemps 2011 ne sont pas significatives.
- On observe un net contraste de gradient hydraulique entre l'aval (socle peu transmissif) et l'amont (sables cénomaniens) du bassin de l'Aubance.



Illustration 24 : Carte piézométrique basses et hautes eaux de la nappe du socle et des sables cénomaniens (Chrétien et collab., 2012).

b) Chroniques journalières

Le suivi existant sur les piézomètres DCE⁴ a été complété par l'instrumentation de trois ouvrages supplémentaires, tous créés dans le cadre de l'étude (Chrétien, 2021abc). En 2022 lors du calage du modèle nous disposons donc de cinq piézomètres (cf. Illustration 25) :

- <u>BSS001HKFY</u> enregistrant depuis 2008 les niveaux piézométriques journaliers du tuffeau séno-turonien à **Louerre** (commune déléguée de la commune nouvelle Tuffalun) ;
- <u>BSS001HJKH</u> enregistrant depuis 2014 les niveaux piézométriques journaliers des sables cénomaniens libres à **Chavagnes** (commune déléguée de la commune nouvelle Terranjou);
- <u>BSS004BXXQ</u> enregistrant depuis 2021 les niveaux piézométriques journaliers des sables cénomaniens libres à Luigné (commune déléguée de la commune nouvelle Brissac Loire Aubance);
- <u>BSS004BXXN</u> enregistrant depuis 2021 les niveaux piézométriques journaliers des sables cénomaniens captifs à **Noyant-la-Plaine** (commune déléguée de la commune nouvelle Tuffalun);
- <u>BSS004BXXR</u> enregistrant depuis 2021 les niveaux piézométriques journaliers des formations métamorphiques du socle à **Soulaines-sur-Aubance**.

Compte-tenu de leur récente mise en service, ces trois derniers piézomètres ne permettent pas encore de caler *stricto sensu* les résultats des simulations, mais donnent un ordre de grandeur des niveaux piézométriques que le modèle doit calculer dans la maille où ils sont implantés.

⁴ Directive Cadre sur l'Eau : piézomètres patrimoniaux destinés à caractériser l'état quantitatif des masses d'eau souterraine françaises



Illustration 25 : Localisation des ouvrages de suivi destinés au calage du modèle hydrodynamique.

3.3.2. Débits de l'Aubance

Les informations les plus utiles concernant les débits de l'Aubance proviennent de la station hydrométrique suivie par la DREAL au lieu-dit Charuau (Soulaines-sur-Aubance, cf. Illustration 25). Les débits moyens journaliers y sont calculés depuis 1982.

En complément, nous avons mis en place une sonde de mesure de la cote d'eau dans le Montayer (affluent de l'Aubance) en 2019 au lieu-dit Pont Rouge. Nous effectuons régulièrement depuis des mesures de débits ponctuels afin de pouvoir tracer la courbe de tarage. Ce tronçon du cours d'eau étant à la fois très influencé par les seuils mis en place en aval au niveau du château de Brissac et/ou par les vannages amont au niveau de la Fédération de pêche, nos efforts n'ont pas encore porté leurs fruits.

Par ailleurs, nous avons mené une campagne de mesures de débits ponctuels en mai 2020 :

- sur le sous bassin du Montayer, les débits mesurés étaient alors très faibles, et s'échelonnaient de 0 L/s à 22 L/s;
- sur l'Aubance en amont du château de Brissac, ils s'échelonnaient de 33 à 132 L/s.

3.4. AJUSTEMENT DES PARAMETRES DE CALAGE

3.4.1. Paramètres hydrodynamiques

a) Perméabilités

Avec le logiciel MARTHE, c'est la perméabilité qui est ajustée lors du processus de calage et non la transmissivité (= perméabilité x épaisseur saturée de l'aquifère) comme dans certains codes de calcul. Les illustrations qui suivent présentent les champs de perméabilité retenus à l'issue du processus de calage pour les trois couches modélisées. Les plus fortes perméabilités sont rencontrées dans la couche 1 du modèle (tuffeau), tandis que les plus faibles se retrouvent dans les marnes à ostracées (non aquifères).



Illustration 26 : Champ de perméabilité issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère séno-turonien.

Un minimum de plages de valeur uniforme a été privilégié plutôt que des mosaïques contrastées de valeurs qui chercheraient, sans argumentation hydrogéologique, à reproduire au plus près les chroniques piézométriques observées.

- deux valeurs de perméabilité sont attribuées à l'aquifère séno-turonien (couche 1) : 3,3 10⁻⁴ m.s⁻¹ là où ils affleurent et 10⁻⁴ m.s⁻¹ dans sa partie son couverture éocène.
- deux valeurs de perméabilité sont attribuées aux marnes à ostracées (couche 2) : 10⁻⁶ m.s⁻¹ là où elles affleurent et 2,5 10⁻⁸ m.s⁻¹ sous couverture turonienne.
- Les perméabilités des sables cénomaniens (couche 3) s'échelonnent de 6 10⁻⁶ m.s⁻¹ à 1,05 10⁻⁴ m.s⁻¹. Les valeurs les plus élevées concernent la partie captive de l'aquifère.

 La perméabilité des roches métamorphiques du socle (partie occidentale de la couche 3) est ajustée à 1,1 10⁻⁶ m.s⁻¹.

Pour une épaisseur saturée d'une dizaine de mètres, comme c'est le cas dans le tuffeau, les perméabilités du tuffeau dans le modèle (~10⁻⁴ m.s⁻¹) sont du même ordre de grandeur que celles dont nous disposons dans la bibliographie (cf. Tableau 5, dans lesquelles figurent les <u>transmissivités</u>). Mais avec seulement deux valeurs, les valeurs recensées ne revêtent pas de représentativité statistique.

Les perméabilités des marnes à ostracées dans le modèle (entre 10⁻⁸ et 10⁻⁶ m.s⁻¹) sont du même ordre de grandeur que celles dont nous disposons dans la bibliographie (cf. Tableau 5). Mais là encore, avec seulement deux valeurs, les valeurs recensées ne revêtent pas de représentativité statistique.



Illustration 27 : Champ de perméabilité issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquitard des marnes à ostracées cénomaniennes.



Illustration 28 : Champ de perméabilité issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère des sables cénomaniens et du socle.

Pour une épaisseur saturée d'une dizaine de mètres, comme c'est le cas pour l'aquifère du Cénomanien inférieur, les perméabilités des sables dans le modèle (entre 6.10⁻⁶ et 10⁻⁴ m.s⁻¹) sont du même ordre de grandeur que celles dont nous disposons dans la bibliographie (cf. Tableau 5).

Les perméabilités des schistes dans la partie aval du bassin versant ne sont pas connues précisément. La synthèse des données disponibles dans la région Pays-de-la-Loire montre que leur perméabilité s'échelonne entre 9.10⁻⁶ m/s et 10⁻² m/s. La valeur retenue lors du calage du modèle (1,1.10⁻⁶ m.s⁻¹) est du même ordre de grandeur que la borne basse des valeurs disponibles.

b) Coefficient d'emmagasinement

En régime transitoire, la modélisation fait intervenir deux coefficients d'emmagasinement : le coefficient d'emmagasinement en nappe libre (équivalent à la porosité efficace) lorsque la maille n'est pas entièrement saturée en eau, et le coefficient d'emmagasinement captif lorsque la maille est saturée en eau.

Dans un aquifère captif, le coefficient d'emmagasinement est lié à la compressibilité et à l'expansibilité de l'eau et du milieu aquifère, ainsi qu'à l'épaisseur de la couche aquifère. Pour cette raison, il ne faut utiliser que la notion de coefficient d'emmagasinement captif spécifique (noté Ss, de dimension m⁻¹), paramètre intrinsèque de la formation égal au rapport entre le coefficient d'emmagasinement et la hauteur aquifère saturée (Ss=S/e, où e désigne l'épaisseur de la formation saturée – Barthélémy et al., 2016). Le recours à l'emmagasinement spécifique

permet ainsi de s'affranchir des variations d'épaisseur de la formation et d'appliquer des valeurs uniquement fonction du matériau géologique.

Ces valeurs d'emmagasinement captif spécifique ne sont prises en compte par le modèle que si la nappe est captive. On introduit également un coefficient d'emmagasinement libre qui, lui, n'est utilisé par le modèle que si la nappe est libre. Le tableau suivant renseigne les valeurs des coefficients d'emmagasinement ajustées dans le modèle. Les Illustration 29 et Illustration 30 montrent la répartition spatiale de ces coefficients au sein de la couche 3 du modèle (sables cénomaniens et formations aquifères du socle).

Couche	S en nappe libre (-)	S en nappe captive (m ⁻¹)
1 - Tuffeau	0,2	10 ⁻⁵
2 – Marnes à ostracées	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶
3 – Sables cénomaniens sous couverture	2.10 ⁻²	1,5.10 ⁻³
3 – Sables cénomaniens à l'affleurement	4,5.10 ⁻²	2.10 ⁻⁴
3 – Socle	10 ⁻²	2.10-4

Tableau 6 : Coefficients d'emmagasinement (S) en nappe libre et en nappe captive issus du calage pour les trois couches modélisées.



Illustration 29 : Champ des coefficients d'emmagasinement captifs spécifiques issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère des sables cénomaniens et du socle (couche 3).



Illustration 30 : Champ des coefficients d'emmagasinement en nappe libre issu du calage du modèle en régime transitoire pour l'aquifère des sables cénomaniens et du socle (couche 3).

3.4.2. Paramètres hydro-climatiques

Le domaine modélisé est découpé en cinq zones de sol correspondant aux différents types de roches présentes à l'affleurement (cf. Illustration 18). Le calage des paramètres hydro-climatiques (RDE, NRUIP et T1/2PERCO, cf. 2.3.1) a été réalisé en partant des valeurs de calage du régime permanent (cf. 2.3.2).

Zone de sol	Nature	RDE (mm)	NRUIP (mm)	T1/2 PERCO (mois)	
1	Socle	195	10	6	
2	Sables cénomaniens libres	216	10	6	
3	Marnes cénomaniennes à l'affleurement	216	10	6	
4	Eocène à l'affleurement	85	10	6	
5	Tuffeau à l'affleurement	110	10	6	

Tableau 7 : Valeurs des paramètres hydro-climatiques issus du calage pour les cinq zones de sol.

3.5. RESULTATS OBTENUS

3.5.1. Simulation des niveaux piézométriques

Les Illustration 31 et Illustration 32 permettent de confronter les chroniques piézométriques simulées aux chroniques observées pour les ouvrages DCE implantés dans le tuffeau sénoturonien (Louerre) et les sables cénomaniens (Chavagnes). Pour chaque graphique ci-dessous, une graduation de l'axe des ordonnées correspond à 0,5 m.

Le calage est imparfait sur les premières années de suivi (2008-2017 pour Louerre, 2014-2018 pour Chavagnes) puis s'améliore pour devenir satisfaisant. Nous parvenons ainsi à obtenir des coefficients de Nash de 0,76 à Louerre sur la période janvier 2017 – décembre 2021 et 0,72 à Chavagnes sur la période juillet 2018 – décembre 2021. Ils sont inférieurs à 0,6 sur la totalité de la période de calage. De très nombreux tests ont été menés lors du calage du modèle pour améliorer le calage de ces deux piézomètres, mais sans plus de succès.

À Chavagnes dans les sables cénomaniens, le modèle est modérément pessimiste et a tendance à surestimer les basses eaux.



Illustration 31 : Comparaison des niveaux piézométriques journaliers simulés et observés à Louerre (tuffeau).



Illustration 32 : Comparaison des niveaux piézométriques journaliers simulés et observés à Chavagnes (sables cénomaniens).

Au niveau des trois piézomètres mis en service en 2021, les niveaux simulés sont du même ordre de grandeur que les niveaux observés, bien que la dynamique des nappes dans les sables cénomaniens reste à améliorer.



Illustration 33 : Comparaison des niveaux piézométriques journaliers simulés et observés à Soulainessur-Aubance (socle), Luigné (sables cénomaniens libres) et Noyant-la-Plaine (sables cénomaniens captifs).

Il est par ailleurs intéressant de comparer les cartes piézométriques dressées grâce à l'interpolation de données collectées sur le terrain à celles simulées par le modèle à la même

date. Nous disposons pour cela d'une carte piézométrique basses eaux d'octobre 2010, et une carte piézométrique hautes eaux de mars 2011 (Chrétien et collab., 2012) de l'aquifère du socle et des sables cénomaniens.

<u>En période de basses eaux</u>, les niveaux simulés sont parfois très supérieurs aux niveaux observés dans les vallées. Au sommet des coteaux, ils peuvent également atteindre des niveaux supérieurs à ceux interpolés grâce aux données de terrain. Néanmoins, dans la partie libre de l'aquifère, c'est-à-dire en aval de Brissac-Quincé et dans le sous bassin versant du Montayer, le modèle reproduit fidèlement l'allure des isopièzes, et donc les sens d'écoulement de la nappe et les axes de drainage (cf. Illustration 34). Dans la partie captive de l'aquifère, les différences entre les deux cartes sont plus marquées, et soulignent le fait que par manque de données de terrain dans ce secteur l'interpolation d'octobre 2010 est moins fiable.



Illustration 34 : Comparaison entre les niveaux piézométriques calculés par le modèle le 12 octobre 2010 et la carte piézométrique basses eaux d'octobre 2010.

En revanche, <u>en période de hautes eaux</u>, les niveaux simulés le 16 mars 2011 sont très proches des niveaux mesurés sur le terrain entre le 14 et le 17 mars 2011. Sur la base de ces deux constats, il semblerait que le modèle donne de meilleurs résultats en hautes eaux qu'en basses eaux.



Illustration 35 : Comparaison entre les niveaux piézométriques calculés par le modèle le 16 mars 2011 et la carte piézométrique hautes eaux de mars 2011.

3.5.2. Simulation des débits de l'Aubance

Les débits moyens simulés par le modèle hydrodynamique à Charuau sont proches des observations, avec un coefficient de Nash satisfaisant de 0,75 (cf. Illustration 36). Le module du cours d'eau calculé par le modèle est de 0,7 m³.s⁻¹, supérieur au module réel qui, sur la période de calage, n'est que de 0,6 m³.s⁻¹. Le modèle a donc tendance à surestimer les débits ; c'est particulièrement le cas à l'étiage, où le calage devra être amélioré, comme le montre l'Illustration 37. Le QMNA5 de l'Aubance à Charuau calculé par le modèle est de 0,187 m³.s⁻¹, sans commune mesure avec le QMNA5 réellement observé qui n'est que de 0,005 m³.s⁻¹.

Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Aubance (Maine-et-Loire)



Illustration 36 : Comparaison des débits moyens journaliers de l'Aubance observés et simulés à Charuau (Soulaines-sur-Aubance) sur la période 2000-2021.



Illustration 37 : Comparaison des débits simulés et observés pendant les étiages de 2011 à 2021.

4. Exploitation du modèle hydrodynamique de l'Aubance

Le modèles est conçu comme un outil d'aide à la gestion des ressources en eaux souterraine du bassin versant de l'Aubance. À ce titre, il peut être utilisé pour simuler des scénarios d'exploitation (d'une certaine ampleur) de ces ressources et des tendances à long terme. Il convient néanmoins de garder à l'esprit les incertitudes et limites de cet outil numérique, qui ne peut donner des résultats plus précis que les données qui lui ont été soumises en entrée. Pour en savoir plus sur les limites du modèle, voir le § 4.5.

4.1. CO-CONSTRUCTION DES SCENARIOS HYDROCLIMATIQUES

La première version du modèle est utilisée pour simuler différents scénarios prévisionnels. Ceuxci ont été définis en concertation étroite avec les partenaires de l'étude (Agence de l'eau Loire-Bretagne, DDT du Maine-et-Loire, Syndicat Layon Aubance Louets, Chambre d'agriculture, association des irrigants) lors de plusieurs réunions techniques dédiées animées par le BRGM au printemps 2022.

Scénarios		Période simulée	Prélèvements irrigation dans les cours d'eau (peu significatifs sur BV	Prélèvements irrigation en nappe	Pluie/ETP	
N°	Intitulé	Description		Aubance)		
1	Ressource moyenne en nappe	Estimation de la ressource moyenne annuelle renouvelable en nappe	2000-2021	Prélèvements réels 2000- 2019	Prélèvements réels 2000-2019	observées (réelles)
2	Conditions naturelles	La période 2000-2021 est "rejouée" sans aucun prélèvement sur l'hydrosystème modélisé	2000-2021	nuls sur toute la période	nuls sur toute la période	observées (réelles)
3bis	Zone des 100 m - Déplacement	Les 9 forages de la bande des 100 m impactant les eaux superficielles sont supprimés et leurs prélèvements reportés sur d'autres forages fictifs + tous les prélèvements captant les sables cénomaniens libres sont ventilés du 1er nov au 31 mars	2000-2021	Ventilés du 1/11 au 31/03 chaque année	Forages bande des 100 m déplacés (cf mail du 08/04/22) + Prélèvements dans Céno libre ventilés entre 1/11 et 31/03. Prélèvements réels 2000-2019 ailleurs.	observées (réelles)
4bis	Zone des 100 m - Stockage	Les prélèvements des 9 forages de la bande des 100 m impactant les eaux superficielles et les prélèvements captant les sables cénomaniens libres sont ventilés du 1er nov au 31 mars	2000-2021	Ventilés du 1/11 au 31/03 chaque année	Prélèvements dans bande des 100 m + dans Céno libre ventilés entre 1/11 et 31/03. Prélèvements réels 2000-2019 ailleurs.	observées (réelles)

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques de chacun des scénarios retenus.

Tableau 8 : Description des quatre scénarios d'exploitation simulés.

4.2. SCENARIO S1 : RESSOURCES MOYENNES ANNUELLES RENOUVELABLES DES SABLES CENOMANIENS

Ce scénario de base correspond aux conditions hydroclimatiques observées entre 2000 et 2021. Ce sont les conditions de calage du modèle (rappel : dans le modèle, les prélèvements de l'année 2019 sont répétés à l'identique en 2020 et 2021). Nous présentons ici les bilans hydrauliques du système aquifère de l'Aubance tels que calculés par le modèle hydrodynamique, au pas de temps annuel. Par convention, les flux alimentant le système aquifère sont positifs. Pour estimer les ressources moyennes annuelles des sables cénomaniens, nous calculons la moyenne des flux annuels sur la période simulée 2000-2021, soit 22 années.

Nous avons introduit dans les couches du modèle Aubance des zones de géométrie qui correspondent à des secteurs distincts de chaque aquifère. En particulier, nous avons cherché à différencier le bassin versant de l'Aubance du reste du domaine modélisé. Le modèle calcule les échanges qui ont lieu entre chaque zone de géométrie, ce qui permet de préciser les volumes en jeu dans le bassin versant de l'Aubance pour chaque couche modélisée.

Zone de géométrie	Couche	Aquifère	BV souterrain	Superficie (km²)
1	1	Tuffeau	Hors BV Aubance	127
2	1	Tuffeau	Aubance	28
3	2	Marnes cénomaniennes	Aubance	77
4	2	Marnes cénomaniennes	Hors BV Aubance	155
7	3	Sables cénomaniens	Hors Aubance	181
8	3	Socle métamorphique	Hors Aubance	108
9	3	Sables cénomaniens	Aubance	116
10	3	Socle métamorphique	Aubance	94

Tableau 9 : Récapitulatif des zones de géométrie introduites dans le modèle maillé.



Illustration 38 : Étendues géographiques des zones de géométrie.

4.2.1. Bilans hydrauliques moyens

L'Illustration 41 dresse le bilan hydraulique moyen annuel du domaine modélisé et schématise l'ensemble des échanges qui se jouent dans le bassin versant de l'Aubance. Nous nous intéressons principalement aux sables cénomaniens (zones de géométrie 7 et 9) qui représentent la ressource en souterraine principale dans le secteur. Le Tableau 10 synthétise les informations relatives aux sables cénomaniens. Il montre que le bilan est légèrement déficitaire sur la période 2000-2021 dans le bassin de l'Aubance.

ordre de grandeur des volumes moyens annuels en millions de m3	9 - Sables cénomaniens du BV Aubance	7 - Sables cénomaniens hors BV Aubance	7+9 - Totalité des sables cénomaniens du domaine modélisé
Recharge	3.5	2	5.5
Contribution des nappes aux cours d'eau	-2.6	-7.4	-10
Echanges entre aquifères	-0.6	6.8	6.2
Ressource annuelle renouvelable	0.3	1.4	1.7
Prélèvements	-0.9	-1.2	-2.1
BILAN	-0.6	0.2	-0.4

Tableau 10 : Bilan hydraulique annuel moyen des sables cénomaniens (en Mm³/an).

L'Illustration 41 illustre schématiquement les échanges de volumes moyens annuels entre les différents compartiments de l'hydrosystème. L'alimentation des sables cénomaniens se fait

majoritairement par drainance verticale du tuffeau séno-turonien à travers les marnes à ostracées : cet apport représente à lui-seul en moyenne 10,4 Mm³/an, contre seulement 5,5 Mm³ par les précipitations directes. Mais cet apport, principalement concentré dans la partie est du domaine modélisé, profite peu au bassin versant de l'Aubance.

On note qu'il existe une alimentation par drainance ascendante des sables cénomaniens vers le tuffeau, d'un million de m³ en moyenne sur les vingt dernières années, dans la zone modélisée qui n'est pas située dans le bassin de l'Aubance. Ces échanges entre sables et tuffeau ont principalement lieu là où les couches 1 et 3 du modèle sont au contact l'une de l'autre (car absence de marnes à ostracées), dans un secteur d'environ 3,5 km² sur la rive gauche de la Loire, au nord de Gennes.

Annuellement, les contributions les plus importantes au débit de l'Aubance proviennent des marnes à ostracées et des formations cristallines du socle. On aurait pu s'attendre à un rôle prépondérant des aquifères les plus transmissifs, et notamment du tuffeau d'où part la source de l'Aubance (mais les sens d'écoulement de la nappe du tuffeau étant majoritairement orientés vers la Loire à l'est, les volumes qu'elle renferme sont principalement évacués vers la Loire). Comme nous le détaillons ci-dessous, les marnes n'ont pas de capacité de stockage et les pluies directes qui les « rechargent » sont aussitôt restituées à l'Aubance. Cela s'apparente à un écoulement de sub-surface proche du ruissellement.

4.2.2. Bilans hydrauliques annuels dans le bassin versant de l'Aubance



Au sein des sables cénomaniens inférieurs du bassin de l'Aubance, on observe une alternance d'années où les entrées sont déficitaires et de périodes où elles sont excédentaires.

Illustration 39 : Evolution des bilans hydrauliques annuels dans les sables cénomaniens du BV de l'Aubance simulés par le modèle sur la période 2000-2021.

L'alimentation nette des sables cénomaniens du bassin versant de l'Aubance (zone Z9) se fait majoritairement par <u>recharge directe</u> des précipitations (là où les sables affleurent). Celle-ci est comprise entre 1,5 et 5,5 Mm³ (respectivement en 2017 et 2018).

L'alimentation de la nappe des sables provient également <u>des couches supérieures</u>. Les marnes à ostracées (Z4) sont peu aquifères et stockent (ou déstockent) annuellement un volume d'eau net négligeable (au maximum de l'ordre de 4 000 m³). Elles constituent donc uniquement une interface de transition entre le tuffeau (Z2) d'une part, qui libère entre 1,9 Mm³ (2017) et 3 Mm³ (2013) par drainance descendante, et les sables cénomaniens (Z9) d'autre part. Les marnes évacuent également rapidement les précipitations directes qu'elles reçoivent (comprises entre 1,8 Mm³ en 2017 et 6,8 Mm³ en 2018) en les restituant à l'Aubance.



Illustration 40 : Bilan des échanges annuels entre nappe et Aubance vs. recharge annuelle

Les <u>échanges entre les sables cénomaniens et l'Aubance</u> sont très majoritairement dirigés de la nappe vers la rivière. Par ailleurs, plus la recharge annuelle est élevée, plus la contribution des sables au débit de l'Aubance est forte (cf. Illustration 40).

De 2000 à 2021, les sables cénomaniens ont déstocké en moyenne -0,5 Mm³ annuellement (cf. courbe bleue sur Illustration 39). Mais cette moyenne masque la variabilité temporelle du stockage/déstockage, qui sur cette période est compris annuellement entre -4,2 Mm³ (déstockage maximal) et +4,4 Mm³ (stockage maximal).

En somme :

- Le tuffeau (Z2) alimente les sables cénomaniens via les marnes à ostracées (Z4), pour un volume annuel compris entre 1,9 Mm³ (2017) et 3,5 Mm³ (2001).
- Les sables cénomaniens de l'Aubance (Z9) sont également alimentés par recharge directe provenant des précipitations (min. 1,4 Mm³ en 2017, max. 5,5 Mm³ en 2018).
- Les sables cénomaniens restituent de l'eau :
 - o latéralement hors du bassin versant de l'Aubance,
 - à l'Aubance directement (entre 1,6 Mm³ en 2011 et 4,8 Mm³ en 2000).
- Une année sur trois au cours des deux dernières décennies (2006, 2007, 2010, 2012, 2013, 2014 et 2018), les entrées sont excédentaires et les sables stockent une partie de cette eau.



Illustration 41 : Bilan annuel moyen des échanges dans le bassin versant de l'Aubance (en millions de m³).

4.3. SCENARIO S2 : CONDITIONS NATURELLES

Dans ce deuxième scénario, la période 2000-2021 est simulée sans aucun prélèvement sur l'hydrosystème, que ce soit en nappe ou sur les eaux superficielles. L'objectif est ici de reconstituer les conditions naturelles et d'évaluer ainsi l'impact de l'exploitation actuelle sur les débits de l'Aubance et les niveaux (des sables cénomaniens en particulier). Le scénario 2 illustre la sensibilité des milieux nappes et rivières aux prélèvements (principalement souterrains dans le BV de l'Aubance).

4.3.1. Impact sur les débits de l'Aubance

Comme nous l'avons dit, le modèle surestime les débits de l'Aubance, en particulier à l'étiage. Pour atténuer les effets de ce biais et évaluer les impacts du scénario S2, nous en comparons les résultats au scénario S1.

Le module de l'Aubance à Charuau dans le scénario S2 atteint 0,73 m³.s⁻¹ et gagne 30 L.s⁻¹ par rapport au scénario S1 (ce qui représente 5% du module). Le QMNA5 de l'Aubance à Charuau dans le scénario S2 atteint 0,237 m³.s⁻¹ et gagne donc 50 L.s⁻¹ (+27%). Pour rappel, le QMNA5 observé de l'Aubance à Charuau n'est que de 5 L.s⁻¹ et ces résultats <u>simulés sont donc très largement surestimés.</u>

Le stockage/déstockage moyen annuel des sables est du même ordre de grandeur que celui du scénario S1 : il atteindrait -0,48 Mm³ sur la période 2000-2021. Ainsi les prélèvements dans les sables cénomaniens du bassin versant de l'Aubance, qui sont en moyenne de -0,9 Mm³ chaque année (en fonctions des conditions climatiques printanières et estivales, ils sont compris entre - 0,27 et -1,7 Mm³/an sur la période 2000-2019), produiraient des effets limités sur la quantité d'eau stockée dans l'aquifère, mais impacteraient plus sensiblement les débits d'étiage de la rivière.

À certaines dates, pendant l'étiage, on relève des débits supérieurs de 80 L.s⁻¹ à ceux du scénario de référence S1. Ce résultat est sujet à caution puisque le modèle surestime significativement les débits d'étiage.



Illustration 42 : Comparaison des débits simulés de l'Aubance à Charuau selon les scénarios S1 et S2.

4.3.2. Impact sur la piézométrie

Comme on peut s'y attendre, les effets d'un arrêt total des prélèvements sur la piézométrie s'estompent à mesure que l'on s'éloigne des forages, et sont d'autant plus marqués que les débits de pompage sont élevés. A titre d'illustration, nous présentons la différence de piézométrie entre les deux états simulés par le modèle en période d'étiage, le 1^{er} septembre 2019, selon les scénarios S1 et S2 (Illustration 43).



Illustration 43 : Différence de charge entre deux états piézométriques simulés par le modèle (Scénarios S1 et S2).

La moyenne de la différence de charge sur l'ensemble du domaine modélisé est de 20 cm, mais si l'on s'intéresse par exemple à la tête du bassin de l'Aubance où les prélèvements sont les plus nombreux, l'impact des forages par rapport à la situation naturelle est en moyenne de 40 cm (cf. Illustration 44).

D'après le modèle, l'impact des prélèvements dans le bassin de l'Aubance (dans les conditions observées entre 1999 et 2021) est en moyenne de :

- -0,12 cm sur le niveau de la nappe séno-turonienne à Louerre ;
- Quelques cm (-4 cm) sur le niveau de la nappe cénomanienne à Chavagnes.



Illustration 44 : Différence de charge entre deux états piézométriques simulés par le modèle (Scénarios S1 et S2). Détail en tête de bassin versant.

Les impacts maximums au droit des forages les plus productifs atteignent jusqu'à 6,5 m comme au lieu-dit le Hillier à Luigné.

4.4. SCENARIOS S3 ET S4

4.4.1. Scénarios S3 (3bis) : déplacement de 9 forages impactant l'Aubance

Le Syndicat Layon Aubance Louets a conduit une étude en 2019-2020 visant à diagnostiquer une douzaine de forages identifiés par la DDT du Maine-et-Loire comme potentiellement impactant du fait de leur proximité avec l'Aubance : ils étaient tous situés à moins de 100 m du cours d'eau.

Les investigations menées par le bureau d'études ANTEA Group (diagraphies gamma-ray, passage caméra, essai de nappe avec suivi sur le cours d'eau et sur la nappe superficielle connectée à l'Aubance) ont permis de confirmer que neuf ouvrages (cf. Tableau 11) parmi ceux

diagnostiqués avaient un impact sur la ressource superficielle (Aubance et/ou nappe contribuant à son alimentation). La réglementation en vigueur (SDAGE, 7B3) interdit donc l'utilisation de ces forages en période d'étiage.

Désignation	Indice national	Référence forage modèle	Commune	Lieu-dit	Volume annuel moyen prélevé (1999-2019) en m3 (source BNPE)
F1	BSS001HKDN	SOUT125	Tuffalun	le Crassé	17 520
F2	BSS003QEWA	SOUT92	Luigné	La Pièce du Mille	11 863
F3	BSS003KYJE	SOUT69	Chemellier	La Grange Héry	29 965
F5	BSS003KYOO	SOUT216	Charcé-Saint-Ellier	Soixante Boisselées	33 345
F6	BSS003KYRU	SOUT175	Charcé-Saint-Ellier	Les repares	22 686
F7	BSS003KYTY	SOUT167	Charcé-Saint-Ellier	Les marais	9 829
F8	BSS003KYUS	SOUT90	Charcé-Saint-Ellier	la Pichonnière	10 323
F10	BSS003KYWG	SOUT102	Brissac-Quincé	La Saulaie 2	18 379
F11	BSS003KYWA	SOUT179	Brissac-Quincé	L'étang retenue	25 188
				TOTAL (moyenne annuelle 1999- 2019)	179 100

Tableau 11 : Forages à moins de 100 m de l'Aubance concernés et impactant la nappe peu profonde oule cours d'eau.

Le scénario 3bis vise à évaluer les bénéfices attendus d'un déplacement de ces neuf forages à une distance plus grande du cours d'eau, afin qu'ils impactent moins la rivière. Pour cela, ils sont supprimés du modèle hydrodynamique, et remplacés par des forages fictifs prélevant dans les mêmes conditions, à des endroits différents. Par ailleurs, tous les prélèvements captant les sables cénomaniens libres (cf. Tableau 12 et Illustration 46) sont ventilés du 1er novembre au 31 mars.



Illustration 45 : Situation géographique des forages fictifs F3bis à F7bis

Référence forage modèle	Lieu-dit	Volume annuel moyen prélevé (1999-2019) en m3 (source BNPE)
SOUT7	BOIS BONNESSE	10 397
SOUT12	BOUREAU	14 663
SOUT30	FONTAINE DE PASCALETTE	5 467
SOUT32	FORAGE + RESERVE	9 814
SOUT35	FORAGE LE HILLIER	20 884
SOUT42	JUBERT	4 920
SOUT50	LA CHAUMERE	10 504
SOUT53	LA DENORDERIE	4 040
SOUT65	LA GRANDE BROSSE	7 800
SOUT74	LA GRIMAUDERIE RETENUE	5 613
SOUT97	LA RIGAUDIERE	3 975
SOUT98	LA RIGAUDIERE 2	10 705
SOUT105	LA TAUPINERIE	11 362
SOUT113	LAUNAY	10 292
SOUT123	LE BREIL	2 870
SOUT133	LE LAUNAY	7 444
SOUT139	LE PATIS	8 116
SOUT145	LE RANGEARD	11 968
SOUT161	LES GRILLERES	17 683
SOUT168	LES MARTINIERES	18 880
SOUT196	POMPE DIESEL	9 673
SOUT198	PORT DE VALLEE	32 544
SOUT212	RUETTES	13 416
SOUT223	TOUCHEBOEUF	29 328
SOUT230	VAUZELLE	5 580
TOTAL	26 forages	331 344

 Tableau 12 : Forages au cénomanien libre dont les prélèvements ont été ventilés dans le scénario S3 du

 1^{er} novembre au 31 mars.



Illustration 46 : Forages dans les sables cénomaniens libres dont les volumes prélevés ont fait l'objet d'une ventilation du 1^{er} novembre au 31 mars dans le cadre des scénarios S3 et S4.

Les forages fictifs sont toujours déplacés dans la maille du modèle adjacente à la maille initiale, en s'éloignant de l'Aubance (cf. Illustration 45 : Situation géographique des forages fictifs F3bis à F7bis). Les distances entre les emplacements rééls et les emplacements fictifs sont rappelés dans le Tableau 13.

Désignation	Distance du forage initial (m)
F1BIS	200
F2BIS	140
F3BIS	100
F5BIS	150
F6BIS	160
F7BIS	110
F8BIS	110
F10BIS	130
F11BIS	100

Tableau 13 : Distances de recul des forages de la bande de 100 m.

En définitive, le modèle hydrodynamique conclut que le scénario 3 n'apporte pas de bénéfice perceptible sur les milieux eau souterraine et rivières par rapport au scénario 1. Le module de l'Aubance n'évolue pas : il reste égal à 0,7 m³.s⁻¹. Le QMNA5 atteint 0,19 m³.s⁻¹. Même en période d'étiage, les différences entre les débits de l'Aubance simulés selon S1 et S3 sont négligeables (Illustration 47).



Illustration 47 : Comparaison des débits de l'Aubance simulés selon S1 et S3 en période d'étiage.

4.4.2. Scénario S4 (4bis) : utilisation des forages pour un stockage hivernal

Dans ce scénario, les prélèvements des 9 forages de la bande des 100 m (cf. Tableau 11) impactant les eaux superficielles et les prélèvements captant les sables cénomaniens libres (cf. Tableau 12 et Illustration 46) sont ventilés du 1er novembre au 31 mars (cf. Tableau 14). On cherche ici à tester l'éventualité où les forages seraient utilisés pendant l'hiver (en dehors de la période d'étiage) pour remplir des plans d'eau.

Désignation	Scénarios S1 à S3 : Prélèvements moyens mensuels entre avril et septembre (m3)						Scénarios mensuels e	S4 : Prélèveme entre novembre e	nts moyens et mars (m3)	
	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total	Avril- Octobre	Novembre- Mars	Total annuel
F1	526	350	1 752	7 709	7 008	175	17 520	0	3 504	17 520
F2	356	237	1 186	5 220	4 745	119	11 863	0	2 373	11 863
F3	899	599	2 997	13 185	11 986	300	29 965	0	5 993	29 965
F5	1 000	667	3 334	14 672	13 338	333	33 345	0	6 669	33 345
F6	681	454	2 269	9 982	9 074	227	22 686	0	4 537	22 686
F7	295	197	983	4 325	3 932	98	9 829	0	1 966	9 829
F8	310	206	1 032	4 542	4 129	103	10 323	0	2 065	10 323
F10	551	368	1 838	8 087	7 352	184	18 379	0	3 676	18 379
F11	756	504	2 519	11 083	10 075	252	25 188	0	5 038	25 188

Tableau 14 : Scénario S4 - Prélèvements moyens mensuels des 9 forages impactant.

Ici aussi, d'après le modèle hydrodynamique le scénario 4 n'apporte pas de bénéfice perceptible sur les milieux eau souterraine et rivières par rapport au scénario 1. Le module de l'Aubance n'évolue pas : il reste égal à 0,7 m³.s⁻¹. Même en période d'étiage, les différences entre les débits de l'Aubance simulés selon S1 et S4 sont négligeables (cf. Illustration 48).



Illustration 48 : Comparaison des débits de l'Aubance simulés selon S1 et S3 en période d'étiage.

4.5. LIMITES ET AMELIORATIONS NECESSAIRES

Le modèle hydrodynamique de l'Aubance présente des résultats satisfaisants et apporte un éclairage nouveau sur le fonctionnement de l'hydrosystème du bassin versant. Ceci étant dit, il est important de garder à l'esprit les principales sources d'incertitude et limites, inhérentes à tout projet de modélisation hydrodynamique.

4.5.1. Données de référence

Tout d'abord, du point de vue des données d'entrée et des données de référence, plusieurs inconnues demeurent :

- Un horizon argileux au sein des sables cénomaniens a été identifié lors de l'interprétation des logs géologiques préalable à la conception du modèle géologique 3D (Chrétien & Assy, 2022). Cet horizon représente-t-il une barrière hydraulique sub-horizontale pour l'aquifère, constituant de fait deux compartiments distincts dans les sables ? Joue-t-elle un rôle significatif dans les écoulements souterrains du bassin versant ? Des investigations complémentaires devront être menées pour le confirmer, et le cas échéant parfaire la finesse des résultats apportés par le modèle.
- Les débits du bassin versant demeurent mal connus, avec une seule station hydrométrique en partie médiane du cours de l'Aubance. En outre, la mesure des débits du Montayer est complexe, et la station de mesure que nous avons mise en place ne donne pas entièrement satisfaction – des perturbations anthropiques du cours d'eau expliquent ces deux éléments. Le déplacement de nos appareils de mesure est donc à l'étude afin d'améliorer la connaissance de l'hydrométrie du bassin versant. Plusieurs campagnes de jaugeages ponctuels permettront par ailleurs un meilleur calage des débits des affluents de l'Aubance.
- Il n'existe pas à ce jour de suivi piézométrique dans le tuffeau et dans les sables de la partie nord du bassin versant de l'Aubance. Pour espérer améliorer le calage du modèle, le renforcement du réseau de surveillance quantitative doit être envisagé.
- Les sens d'écoulement de la nappe séno-turonienne (tuffeau) sont principalement dirigés vers la Loire. Ce résultat du modèle mériterait d'être confronté à des observations de terrain. Cela passerait par une campagne piézométrique avec élaboration d'une carte piézométrique basses et hautes eaux.
- La connaissance de la temporalité des prélèvements du domaine modélisé est très imparfaite et doit être améliorée :
 - il serait utile qu'un travail soit mené pour estimer les prélèvements mensuels des deux dernières décennies, par exemple en examinant les types de cultures irriguées de la période 2000-2021, et en les croisant avec les conditions météorologiques passées.
 - dès aujourd'hui, nous encourageons les irrigants à tenir à jour leur registre de relevés de compteur mensuels. L'arrêté préfectoral qui les autorise à utiliser leur forage prévoit déjà qu'un tel registre soit renseigné, mais force est de constater que ce n'est qu'exceptionnellement le cas. Nous plaidons même pour qu'un groupe d'irrigants volontaires relèvent hebdomadairement leur compteur. Ces informations plus fines seront mises à profit pour extrapoler les données mensuelles.

 en outre, les prélèvements n'étant disponibles dans la BNPE que jusqu'à 2019 au moment de la réalisation de l'étude, les prélèvements des années 2020 et 2021 dans le modèle sont ceux de 2019 répétés deux années.

4.5.2. Calage du modèle et résultats obtenus

À ce stade, le calage du modèle hydrodynamique de l'Aubance n'est pas suffisamment contraint (peu de chroniques de longue durée) et mérite impérativement d'être validé avec l'allongement et la densification des chroniques d'observation. Cela garantira encore davantage la robustesse des résultats qu'il procure. Il est néanmoins d'ores et déjà possible de l'utiliser pour élaborer des bilans hydrologiques, estimer les flux moyens d'eau qui s'échangent entre les différents réservoirs de l'hydrosystème, et approcher l'impact général des prélèvements sur la ressource. Cependant, le calage est perfectible : comme nous l'avons expliqué, le modèle surestime les débits d'étiage de l'Aubance et les niveaux piézométriques en période de basses eaux. De ce fait, l'impact des prélèvements en nappe est probablement minoré par le modèle. En l'attente d'une révision du calage, l'utilisation du modèle pour estimer l'impact des prélèvements sur les débits de l'Aubance ne peut donc s'affranchir des précautions d'usage qui s'imposent.

5. Conclusion

Le modèle hydrogéologique des aquifères du bassin versant de l'Aubance, construit avec l'outillogiciel MARTHE, développé par le BRGM, est un modèle maillé à trois couches intégrant le réseau hydrographique de surface et les échanges nappe-rivières. Ce modèle numérique permet de bien reproduire les débits moyens de l'Aubance et les niveaux piézométriques journaliers de la nappe du tuffeau séno-turonien et des sables cénomaniens. Les débits de l'Aubance à l'étiage sont en revanche surestimés par le modèle. De ce fait, l'impact des prélèvements en nappe est probablement minoré par le modèle.

En complément de l'élaboration d'un modèle géologique en 3 dimensions (phase 1 de l'étude), le modèle hydrodynamique de l'Aubance a permis de bâtir un bilan hydraulique de l'hydrosystème, et ainsi de quantifier les différents échanges qui s'opèrent entre compartiments de l'hydrosystème.

Quatre scénarios hydroclimatiques ont été définis en concertation avec les partenaires de l'étude, puis simulés par le BRGM avec le modèle hydrodynamique de l'Aubance.

Le premier scénario avait pour objectif d'estimer la ressource moyenne annuelle renouvelable disponible dans les sables cénomaniens, qui constituent la ressource en eau principale du bassin versant de l'Aubance. Les résultats du modèle tendent à montrer que cette ressource disponible (1,7 Mm³/an en moyenne) est consommée chaque année pour satisfaire les besoins des usagers de l'eau. De 2000 à 2021, en conditions réelles, les sables cénomaniens ont déstocké en moyenne -0,55 Mm³ annuellement. Mais cette moyenne masque la variabilité temporelle du stockage/déstockage, qui sur cette période est compris annuellement entre -4,2 Mm³ et 4,4 Mm³.

Le deuxième scénario avait pour objectif de simuler les débits naturels de l'Aubance, non influencés par les prélèvements. Sous ces conditions, le gain pour le module du cours d'eau serait de l'ordre de 30 L.s⁻¹. Le bénéfice pour le débit d'étiage (QMNA5) serait de plus de 25% (proportion à considérer avec toutes les réserves nécessaires compte-tenu de la forte surestimation des débits d'étiage par le modèle). Le stockage/déstockage moyen annuel des sables est comparable au scénario « réel » : il atteindrait -0,48 Mm³ sur la période 2000-2021. Ainsi les prélèvements dans les sables cénomaniens du bassin versant de l'Aubance, qui sont en moyenne de -0,9 Mm³ chaque année (en fonctions des conditions climatiques printanières et estivales, ils sont compris entre -0,27 et -1,7 Mm³/an sur la période 2000-2019), produiraient des effets limités sur la quantité d'eau stockée dans l'aquifère, mais impacteraient plus sensiblement les débits d'étiage de la rivière.

Les scénarios 3 et 4 visant à évaluer les effets sur les débits d'étiage de l'Aubance consécutifs à une modification géographique (déplacement) ou temporelle (décalage dans le temps) des prélèvements des sables cénomaniens libres n'ont pas montré de bénéfices significatifs. Neuf forages étaient concernés par un déplacement géographique fictif, compris selon les cas entre 100 et 200 m de leur position réelle.

Les limites et les incertitudes autour des résultats apportés par le modèle sont liées à un défaut de connaissance de certaines données en entrée, et à un calage des débits de l'Aubance à l'étiage qui, bien qu'étant aussi précis que possible compte-tenu des données à notre disposition à ce jour, reste perfectible.

Pour cela, les principales pistes de travaux complémentaires et d'amélioration sont :

- Le renforcement du dispositif de surveillance quantitative des eaux souterraines au nord du bassin versant de l'Aubance, dans le tuffeau et dans les sables cénomaniens ;
- Une meilleure connaissance des débits des affluents de l'Aubance (jaugeages ponctuels) et la mise en service d'une station de mesure de débit à l'exutoire du bassin versant ;
- La réalisation d'une carte piézométrique du tuffeau, afin de confirmer les sens d'écoulement de la nappe simulés par le modèle dans ce secteur ;
- L'intégration d'un maillage plus fin en fond de vallée et aux abords des cours d'eau modélisés (maillage gigogne) ;
- L'engagement des irrigants à tenir des registres mensuels de relevés de compteur, avec en outre quelques volontaires pour effectuer ces relevés hebdomadairement.

Enfin, grâce à ces données complémentaires, le calage du modèle devra être poursuivi, s'agissant notamment des débits d'étiage de l'Aubance. À ce stade, et en l'attente d'une révision du calage, l'utilisation du modèle pour estimer l'impact des prélèvements sur les débits de l'Aubance ne peut donc s'affranchir des précautions d'usage qui s'imposent. Les résultats du modèle ne sont que la traduction numérique des hypothèses de bases et données de référence. Les limites ou défauts que ces données comportent se retrouvent dans les résultats du modèle.

6. Bibliographie

Barthélémy Y., Seguin J.-J. (2016) – Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations. Rapport final. BRGM/RP-62549-FR., 140 p, 50 ill., 2 tabl., 3 ann.

Chrétien P. avec la collaboration de M.J. Féret, J.P. Jégou & F. Lucassou (2012) – Fonctionnement hydrogéologique du bassin versant de l'Aubance (49). Recommandations pour l'élaboration de règles de gestion quantitative. Rapport final – BRGM/RP-61082-FR, 93 p., 19 ill., 3 tab., 3 ann.

Chrétien P. (2021a) – Dossier de déclaration d'un piézomètre à Soulaines-sur-Aubance (49). Rubrique 1.1.1.0 de l'article R 214-1 du Code de l'Environnement. Rapport final. BRGM/RP-71136-FR, 30 p., 6 ill, 1 ann.

Chrétien P. (2021b) – Dossier de déclaration d'un piézomètre à Brissac-Loire-Aubance (49). Rubrique 1.1.1.0 de l'article R 214-1 du Code de l'Environnement. Rapport final. BRGM/RP-71137-FR, 30 p., 5 ill, 1 ann.

Chrétien P. (2021c) – Dossier de déclaration d'un piézomètre à Tuffalun (49). Rubrique 1.1.1.0 de l'article R 214-1 du Code de l'Environnement. Rapport final. BRGM/RP-71138-FR, 28 p., 5 ill., 1 ann.

Chrétien P. et Assy Y.-O. (2022) – Modélisation hydrodynamique des eaux souterraines du bassin versant de l'Aubance (Maine-et-Loire). Rapport intermédiaire V1. BRGM/RP-71826-FR, 64 p., 38 ill., 7 tab., 2 ann.

Rouxel E., Lasseur E. Baudouin V., et al. (2020) – ModGeau : Synthèse et Modélisation géologique du mésozoïque de Sarthe et de Maine-et-Loire, pour une gestion améliorée des ressources en eau. Rapport final. BRGM/RP-70301-FR, 129 p., 88 fig. 1 ann.

Thiéry D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 128 p., 65 fig., 2 ann.

Thiéry D. (2015) – Code de calcul MARTHE - Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 320 p., 154 fig.





Liberté Égalité Fraternité Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Direction régionale Pays-de-la-Loire 1 rue des Saumonières – BP 92342 44323 Nantes cedex 3 Tél. : 02 51 86 01 51 www.brgm.fr