



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Bassin versant de l'Authion. Cartographie des zones propices à la recharge des aquifères

Rapport final

**BRGM/RP-74409-FR**

Version 1 du 11 juillet 2025

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

**Pierre Chrétien**

1.89 3740.46 -625.5

*Ce rapport a été vérifié le 24/06/2025 et approuvé le 03/07/2025 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.*

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

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

## Avertissement

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

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé 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 <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



**Mots clés :** Analyse multicritère, recharge, perméabilité, zone non saturée, angle pente, capacité d'infiltration, IDPR, modèle GARDENIA, soutien étiage, bilan eau, bassin versant de l'Authion, Maine-et-Loire, Pays-de-la-Loire.

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

**Pierre Chrétien** 2025. Bassin versant de l'Authion. Cartographie des zones propices à la recharge des aquifères. Rapport final V1. BRGM/RP-74409-FR, 82 p., 38 ill., 18 tab., 3 ann.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
M-P2-12 – 13/03/2025

## Synthèse

Le Syndicat Mixte du Bassin de l'Authion et ses Affluents (SMBAA) et le BRGM ont signé en 2021 une convention de partenariat public-public qui vise à améliorer la connaissance du fonctionnement de l'hydrosystème de l'Authion, en particulier pour ce qui concerne ses eaux souterraines. La convention comporte trois actions. Les résultats des actions 2 et 3 ont été restitués dans les rapports BRGM/RP-72219-FR (Schomburgk, 2022) et BRGM/RP-73908-FR (Klinka et collab., 2024), respectivement.

L'action 1, dont les résultats sont rassemblés ici, prévoit :

1. La quantification des échanges nappe-rivière de plusieurs bassins versants ;
2. La cartographie des zones propices aux échanges nappe-rivière.

Pendant le déroulement de la convention, le SMBAA et le BRGM sont convenus de réorienter les objectifs du deuxième axe de l'action 1 vers la cartographie des zones propices à la recharge des aquifères.

### Quantification des échanges nappe-rivière

Trois modèles pluies – niveaux piézométriques – débits ont été construits pour les bassins versants du Couasnon, du Lathan et du Changeon au moyen du logiciel GARDENIA®, version 8.9. Grâce à de tels modèles, il est possible d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant par l'élaboration d'un bilan hydrologique. Ils sont utilisés ici pour quantifier la contribution moyenne mensuelle des nappes au débit du cours d'eau considéré.

Cours d'eau dont les débits sont simulés	Aquifère dont les niveaux sont simulés	Contribution moyenne annuelle des eaux souterraines au débit des cours d'eau	Contribution moyenne des eaux souterraines au débit des cours d'eau pendant la période juin-juillet-août
Couasnon (Beaufort)	Tuffeau séno-turonien (le Guédeniau)	54%	88%
Lathan (Moulin Guet)	Sables cénomaniens (Vernoil-le-Fourrier)	51%	80%
Changeon (Moulin Foulon)	Tuffeau séno-turonien (Vernoil-le-Fourrier)	67%	96%

**Les résultats des modèles réalisés dans cette étude démontrent le rôle significatif des aquifères du bassin versant de l'Authion dans l'hydrométrie des bassins versants**, avec des contributions moyennes annuelles supérieures à 50%. Pendant la période juin-juillet-août, au moment où les prélèvements saisonniers sont les plus élevés dans les nappes, les nappes contribuent pour plus de 80% du débit. **De ce fait, la préservation quantitative des ressources en eau souterraine contribue également au maintien des débits dans les cours d'eau.**

### Cartographie des zones propices à la recharge des aquifères

La méthodologie s'appuie sur des travaux antérieurs destinés le plus souvent à cartographier la capacité d'infiltration des sols, notion sémantiquement proche de l'aptitude à la recharge des aquifères. Une synthèse bibliographique de méthodes employées est proposée : lorsque le travail

aboutit à une carte d'infiltrabilité, la méthode principalement employée repose sur une analyse multicritère (AMC).

En s'appuyant sur ce travail de synthèse, le BRGM et le SMBAA ont retenu comme critères pertinents pour cartographier les zones propices à la recharge des aquifères :

- L'épaisseur de la zone non saturée ;
- La perméabilité des entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement ;
- La pente des terrains ;
- La capacité d'infiltration des entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement au moyen de l'IDPR.

En tout point du bassin versant de l'Authion, on attribue une note aux terrains. Ces notes décrivent la contribution particulière du critère considéré en un point donné du bassin versant de l'Authion à l'aptitude à la recharge des aquifères. La moyenne des quatre notes ainsi obtenues détermine la classe d'aptitude finale des terrains du bassin versant. Seuls 15 % de la surface du bassin versant de l'Authion sont estimés peu favorables à recharge, et concernent principalement les secteurs où affleurent les marnes à ostracées.

Classe finale	Proportion de la surface du bassin versant de l'Authion
Défavorable	< 1 %
Peu favorable	15,2 %
Favorable	70,3 %
Très favorable	14,4 %

## Sommaire

1. Introduction .....	9
2. Objectifs de l'action 1 de la convention.....	11
3. Quantification des échanges nappe-rivière .....	13
3.1. Méthodologie : modèles hydrologiques globaux.....	13
3.1.1. <i>Présentation synthétique du modèle</i> .....	13
3.1.2. <i>Calage du modèle</i> .....	14
3.2. Modèles réalisés .....	15
3.2.1. <i>Bassin versant du Couasnon</i> .....	15
3.2.2. <i>Bassin versant du Lathan</i> .....	22
3.2.3. <i>Bassin versant du Changeon</i> .....	31
3.3. Exploitation des résultats obtenus.....	37
3.3.1. <i>Pluie efficace et recharge</i> .....	37
3.3.2. <i>Estimation de la contribution des nappes aux débits des cours d'eau</i> .....	40
4. Zones propices à la recharge des aquifères .....	45
4.1. Eléments bibliographiques .....	45
4.2. Méthodologie retenue.....	46
4.3. Description des données prises en compte .....	46
4.3.1. <i>Zone non saturée (ZNS)</i> .....	46
4.3.2. <i>Perméabilité de la formation présente à l'affleurement</i> .....	48
4.3.3. <i>Pente des terrains</i> .....	49
4.3.4. <i>Capacité d'infiltration des terrains</i> .....	51
4.4. Analyse multicritère et classe finale d'aptitude à la recharge.....	53
5. Conclusion .....	57
6. Bibliographie .....	59

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Schéma GARDENIA© à un seul réservoir souterrain (a) et deux réservoirs souterrains (b). .....	13
Illustration 2 : Situation géographique des bassins versants modélisés.....	15
Illustration 3 : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant du Couasnon (carte géologique au 1/250 000 des Pays-de-la-Loire).....	16
Illustration 4 : Débits moyens mensuels du Couasnon à Beaufort en Anjou (Hydroportail). .....	17
Illustration 5 : Niveaux piézométriques moyens mensuels enregistrés au Guédeniau (aquifère du Séno-Turonien). .....	17
Illustration 6 : Données disponibles pour le bassin versant du Couasnon.....	18
Illustration 7 : Ajustement des débits du Couasnon (période 2012-2024). .....	21
Illustration 8 : Ajustement des débits du Couasnon (détail des années 2018-2023). .....	21
Illustration 9 : Ajustement des niveaux piézométriques du tuffeau au Guédeniau (BSS001HHMJ). Période 2012-2024 .....	22
Illustration 10 : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant du Lathan (carte géologique au 1/250 000 des Pays-de-la-Loire).....	24

Illustration 11 : Débits moyens mensuels du Lathan à Moulin Guet (Vernantes).....	25
Illustration 12 : Niveaux piézométriques moyens mensuels enregistrés à Vernoil-le-Fourrier (aquifère des sables cénomaniens).....	25
Illustration 13 : Données disponibles pour le bassin versant du Lathan.....	26
Illustration 14 : Comparaison des débits moyens mensuels influencés et désinfluencés (sans lâchers d'eau).....	27
Illustration 15 : Ajustement des débits du Lathan (période 2012-2024).....	29
Illustration 16 : Ajustement des débits du Lathan (détail des années 2018-2023).....	29
Illustration 17 : Ajustement des niveaux piézométriques des sables cénomaniens à Vernoil-le-Fourrier (BSS001FFLX). Période 2012-2024.....	30
Illustration 18 : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant du Changeon (carte géologique au 1/250 000 des Pays-de-la-Loire).....	32
Illustration 19 : Débits moyens mensuels du Changeon à Moulin Foulon (Hydroportail).....	32
Illustration 20 : Niveaux piézométriques moyens mensuels à Vernoil-le-Fourrier (aquifère sénonturonien).....	33
Illustration 21 : Données disponibles pour le bassin versant du Changeon.....	34
Illustration 22 : Ajustement des débits du Changeon (période 2012-2024).....	35
Illustration 23 : Ajustement des débits du Changeon (détail des années 2018-2023).....	36
Illustration 24 : Ajustement des niveaux piézométriques du tuffeau à Vernoil-le-Fourrier (BSS001FFLW). Période 2012-2024.....	36
Illustration 25 : Pluie efficace et recharge annuelles.....	39
Illustration 26 : Recharge moyenne annuelle des nappes vs. pluie efficace moyenne annuelle, par bassin versant (adapté de Chrétien & Seguin, 2024).....	40
Illustration 27 : Histogrammes de la contribution moyenne mensuelle des eaux souterraines au débit du Couasnon, du Lathan et du Changeon.....	42
Illustration 28 : Répartition entre ruissellement et contribution des nappes dans le débit du Couasnon, annuellement et mensuellement.....	43
Illustration 29 : Répartition entre ruissellement et contribution des nappes dans le débit du Lathan, annuellement et mensuellement.....	44
Illustration 30 : Répartition entre ruissellement et contribution des nappes dans le débit du Changeon, annuellement et mensuellement.....	44
Illustration 31 : Zone non saturée d'un aquifère.....	47
Illustration 32 : Cartographie de la zone non saturée en période de hautes eaux dans le bassin versant de l'Authion.....	48
Illustration 33 : Distribution spatiale des perméabilités issues du modèle maillé conçu par SETEC HYDRATEC (2024).....	49
Illustration 34 : Schéma illustrant le passage du MNT 5 m de l'IGN vers une carte des pentes (%). .....	50
Illustration 35 : Distribution spatiale des pentes issues du MNT au pas de 5 m de l'IGN.....	50
Illustration 36 : Valeurs brutes de l'IDPR dans le bassin versant de l'Authion.....	52

Illustration 37 : Distribution spatiale des pentes issues du MNT au pas de 5 m de l'IGN. ....	53
Illustration 38 : Zones propices à la recharge des aquifères du bassin versant de l'Authion. ....	55

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques du débit du Couasnon (Hydroportail). ....	15
Tableau 2 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle du Couasnon.....	18
Tableau 3 : Clef de ventilation mensuelle des prélèvements agricoles connus annuellement, fournie par le SMBAA. ....	19
Tableau 4 : Résultats du calage du modèle : coefficients d'ajustement obtenus.....	20
Tableau 5 : Grandeurs caractéristiques du débit du Lathan (Hydroportail). ....	23
Tableau 6 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle du Lathan.....	26
Tableau 7 : Résultats du calage du modèle : coefficients d'ajustement obtenus.....	28
Tableau 8 : Grandeurs caractéristiques du débit du Changeon (Hydroportail). ....	31
Tableau 9 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle du Changeon. ....	33
Tableau 10 : Résultats du calage du modèle : coefficients d'ajustement obtenus.....	35
Tableau 11 : Pluie efficace et recharge moyennes annuelles. ....	38
Tableau 12 : Pluie efficace et recharge moyennes annuelles calculées au moyen de modèles GARDENIA© dans plusieurs bassins versants des Pays-de-la-Loire (adapté de Chrétien & Seguin, 2024). ....	39
Tableau 13 : Contribution mensuelle de l'aquifère au débit des cours d'eau – Moyenne sur la période modélisée. ....	41
Tableau 14 : Classification du critère ZNS pour l'AMC destinée à cartographier les zones propices à la recharge des aquifères. ....	47
Tableau 15 : Classification du critère « perméabilité ». ....	48
Tableau 16 : Classification du critère « pente des terrains ». ....	50
Tableau 17 : Classification du critère « capacité d'infiltration des terrains ». ....	51
Tableau 18 : Proportion surfacique des quatre classes finales de l'aptitude à la recharge des aquifères du bassin versant de l'Authion. ....	53

## Liste des annexes

Annexe 1 Comparaison de méthodes employées pour cartographier le potentiel d'infiltration des terrains – Critères retenus pour l'analyse multicritère .....	63
Annexe 2 Description du logiciel GARDENIA© .....	67
Annexe 3 Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit de l'Hyrôme.....	73



# 1. Introduction

Le Syndicat Mixte du Bassin de l'Authion et ses Affluents (SMBAA) et le BRGM ont signé en 2021 une convention de partenariat public-public qui vise à améliorer la connaissance du fonctionnement de l'hydrosystème de l'Authion, en particulier pour ce qui concerne ses eaux souterraines. Les thèmes entrant dans le champ de la convention résultent d'une approche croisée entre les champs de compétences et les objectifs du SMBAA (Contrat Territorial Eau) et du BRGM (contrat d'objectifs et de performance État-BRGM). Ils se matérialisent par des sujets de partenariat décidés entre la Direction régionale des Pays-de-la-Loire du BRGM et le SMBAA et s'articulent autour de trois actions :

- Action 1 : Identification et cartographie des zones propices aux échanges nappe rivière et qualification de leurs fonctionnalités.
- Action 2 : Définition d'un réseau piézométrique de référence et contribution à la mise en place de seuils de gestion dans le bassin versant de l'Authion.
- Action 3 : Évaluation de la drainance entre aquifères dans le secteur du bassin des Trois Rus.

Le présent rapport BRGM/RP-74409-FR dresse le bilan des résultats techniques obtenus dans le cadre de l'action 1 de la convention SMBAA-BRGM. Il fait suite au rapport BRGM/RP-72219-FR (Schomburgk, 2022) qui présente les résultats obtenus dans le cadre de l'action 2 de la convention, et au rapport BRGM/RP-73908-FR (Klinka et collab., 2024) qui présente les résultats de l'action 3.



## 2. Objectifs de l'action 1 de la convention

Les eaux souterraines du bassin de l'Authion représentent une ressource essentielle pour l'économie du territoire. Toutefois, du fait des besoins importants à satisfaire pour les différentes catégories d'usage (en particulier l'alimentation en eau potable et l'irrigation agricole), certaines unités de gestion s'y trouvent en situation de déséquilibre structurel. La réponse des gestionnaires a consisté à définir un volume prélevable réparti par usages, puis à plafonner les prélèvements en encourageant les économies d'eau. Une solution complémentaire, encore peu mise en œuvre en France, consiste à ralentir les écoulements de surface et favoriser l'infiltration des eaux de surface au moment où elles sont disponibles, pour un bénéfice attendu pendant l'étiage.

L'action 1 de la convention SMBAA-BRGM visait donc initialement à rechercher au sein du bassin versant de l'Authion des zones propices aux échanges nappe-rivières, qui pourraient faire l'objet d'aménagements permettant de ralentir les écoulements de surface et favoriser l'infiltration des eaux de surface au moment où elles sont disponibles (hiver notamment), pour un bénéfice attendu pendant l'étiage (soutien d'étiage).

Au cours de la réalisation de cette action, le SMBAA et le BRGM ont conjointement décidé de modifier ces objectifs initiaux et de cartographier plus largement les zones propices à la recharge des eaux souterraines, au sein de l'intégralité du bassin versant de l'Authion (seuls quatre sous bassins versants de l'Authion étaient visés initialement).

En outre, l'action 1 prévoit la construction de plusieurs modèles hydrologiques globaux destinés à élaborer des bilans hydrologiques au pas de temps mensuel et annuel afin de quantifier la contribution des nappes aux débits de certains affluents de l'Authion, en appliquant une méthodologie déjà éprouvée dans des études précédentes (Chrétien 2022 et 2023, Chrétien & Seguin 2024).



### 3. Quantification des échanges nappe-rivière

Trois modèles pluies – niveaux piézométriques – débits ont été construits pour les bassins versants du Couason, du Lathan et du Changeon au moyen du logiciel GARDENIA®, version 8.9 (Thiéry, 2014). Grâce à de tels modèles, il est possible d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant par l'élaboration d'un bilan hydrologique. Ils sont utilisés ici pour quantifier la contribution moyenne mensuelle des nappes au débit du cours d'eau considéré.

#### 3.1. METHODOLOGIE : MODELES HYDROLOGIQUES GLOBAUX

##### 3.1.1. Présentation synthétique du modèle

Le logiciel [GARDENIA®](#), conçu par le BRGM, est utilisé pour bâtir des modèles globaux à réservoirs qui mettent en relation un signal d'entrée (pluies et évapotranspiration potentielle) et un signal de sortie (débit de cours d'eau et/ou niveau piézométrique). Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Celles-ci correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les prélèvements situés dans le bassin versant étudié sont pris en compte. Une description plus complète du logiciel est détaillée en Annexe 2. Les termes du bilan hydrologique que ces modèles permettent d'obtenir sont : les précipitations efficaces, la production d'un écoulement rapide que l'on pourra attribuer au ruissellement superficiel et un écoulement lent que l'on associera à l'écoulement souterrain. Il convient cependant de rappeler que la décomposition entre écoulements superficiels et souterrains doit être analysée avec précaution (Thiéry, 2014).

Le logiciel GARDENIA® permet l'utilisation d'un schéma à un seul réservoir souterrain (cf. Illustration 1, a) ou à deux réservoirs souterrains (cf. Illustration 1, b).

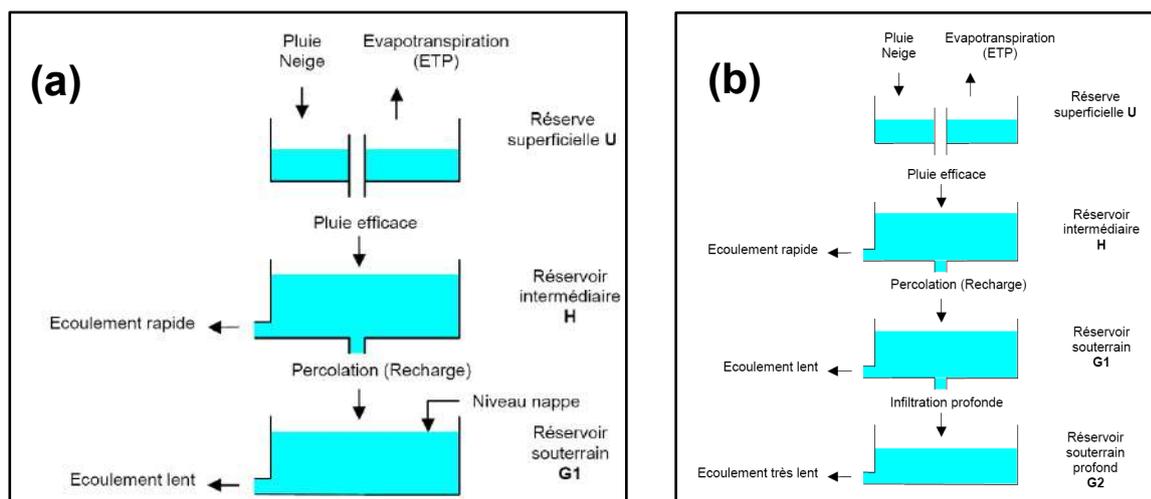


Illustration 1 : Schéma GARDENIA® à un seul réservoir souterrain (a) et deux réservoirs souterrains (b).

### 3.1.2. Calage du modèle

La calibration (ou calage) consiste à ajuster les valeurs des paramètres du modèle, de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits et/ou des niveaux piézométriques aussi proches que possible des débits et/ou des niveaux piézométriques observés (Thierry, 2014). Les données nécessaires à la calibration des paramètres sont :

- Des séries temporelles ininterrompues « d'entrées » du modèle : pluies et évapotranspiration ;
- Éventuellement une série temporelle de débits de prélèvements dans le bassin (c'est le cas ici), qui peuvent avoir pour origine les nappes et/ou les rivières ;
- Une ou deux séries temporelles d'observations (débits à l'exutoire et / ou niveaux piézométriques), non nécessairement continues, mais pour une période concomitante aux séries précédentes. Cette série, ou ces deux séries, seront comparées avec les « sorties » du modèle.

Trois cas sont possibles. On peut disposer au choix de :

- Une série d'observations des débits à l'exutoire du bassin ;
- ou
- Une série d'observations des niveaux piézométriques représentatifs en un point du bassin ;
- ou
- Une série d'observations des débits à l'exutoire **et** une série d'observations des niveaux piézométriques représentatifs en un point du bassin. C'est cette configuration qui permet le maximum de fiabilité, et **c'est celle que nous avons employée dans les modèles décrits ci-dessous.**

La calibration se fait par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux et indique les paramètres qui seront à optimiser. À partir de ceux-ci, le modèle fait varier les paramètres (dans une gamme de valeurs définie par l'utilisateur) et recherche, par un algorithme d'optimisation non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960), un jeu de paramètres fournissant les résultats les plus proches possibles de la série d'observations.

### 3.2. MODELES REALISES

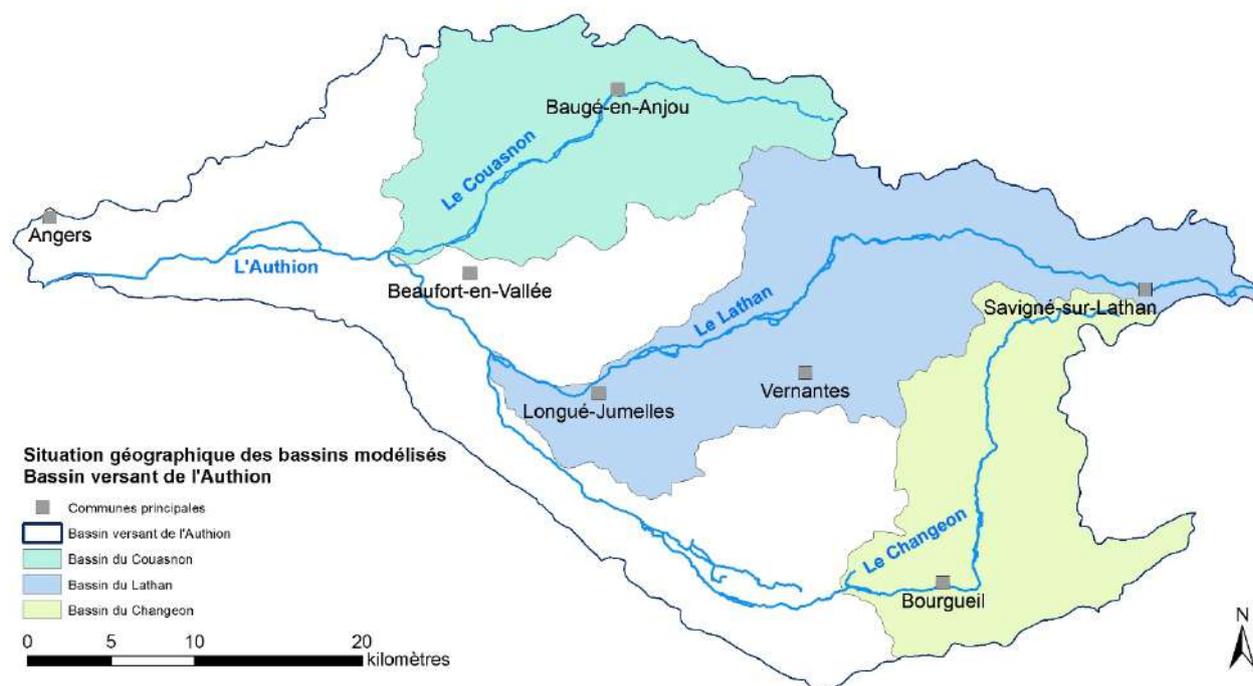


Illustration 2 : Situation géographique des bassins versants modélisés.

#### 3.2.1. Bassin versant du Couasnon

##### a) Contexte hydrogéologique du bassin versant du Couasnon

- **Hydrographie**

Le Couasnon prend sa source à Noyant-Villages dans le Maine-et-Loire, à une altitude de 82 m NGF. Son cours suit une direction est-ouest pendant une quinzaine de kilomètres, avant de s'orienter vers le sud-ouest jusqu'à sa confluence avec l'Authion à Mazé-Milon, à une altitude de 21 m NGF. Le linéaire total du Couasnon est de 35,4 km, et la superficie de son bassin versant atteint 265 km<sup>2</sup> (Illustration 2).

Ses débits journaliers sont connus depuis le 2 janvier 2010 grâce à la station hydrométrique située au lieu-dit Gée à Beaufort en Anjou (suivi réalisé par le SYDEVA<sup>1</sup>). La superficie du bassin versant en amont de la station hydrométrique est de 221 km<sup>2</sup>. Le Tableau 1 donne quelques grandeurs significatives décrivant le régime hydrométrique du Couasnon.

Débit moyen journalier (L/s)				Débit moyen mensuel - Etiage (L/s)	
Minimum	Maximum	Médian	Moyen	QMNA5	QMNA10
24 (05/07/2011)	16 700 (02/02/2013)	724	867	114	89,4

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques du débit du Couasnon (Hydroportail).

<sup>1</sup> Syndicat Mixte pour le Développement Agricole de la Vallée de l'Authion

- **Hydrogéologie**

Les formations géologiques du bassin versant du Couason appartiennent au domaine sédimentaire du Bassin Parisien. A l’affleurement, les formations du Crétacé sont majoritaires, représentées principalement par le tuffeau séno-turonien et les marnes à ostracées cénomaniennes. En amont du bassin néanmoins, les formations du Séno-Turonien sont recouvertes par les calcaires lacustres paléogènes. Par ailleurs, les calcaires jurassiques du Dogger sont modestement présents à l’affleurement dans le nord-ouest du bassin (Illustration 3).

Plus précisément, concernant les eaux souterraines et leur rôle dans l’hydrosystème :

- Dans le bassin de l’Authion, les calcaires lacustres éocènes (paléogènes) ne constituent pas une ressource aquifère significative, et sont considérés comme formant un ensemble avec les sables sénoniens et le tuffeau turonien sous-jacent (Chrétien & Lucassou, 2011).
- Les marnes à ostracées ne constituent pas un aquifère, et forment un horizon semi-perméable entre le tuffeau et les sables cénomaniens inférieurs (Klinka, Chrétien & Sebai, 2024).
- L’aquifère d’importance régionale des sables cénomaniens inférieurs est présent dans le bassin du Couason presque exclusivement sous couverture. Un rôle *a priori* **secondaire dans le soutien d’étiage du cours d’eau par rapport à l’ensemble tuffeau/calcaires lacustres (aquifère du Séno-Turonien)**, qui est quant à lui en contact avec le cours d’eau depuis sa source jusqu’à la moitié de son linéaire.

Ainsi, seul l’aquifère du Séno-Turonien est pris en compte dans le modèle réalisé pour ce bassin versant.

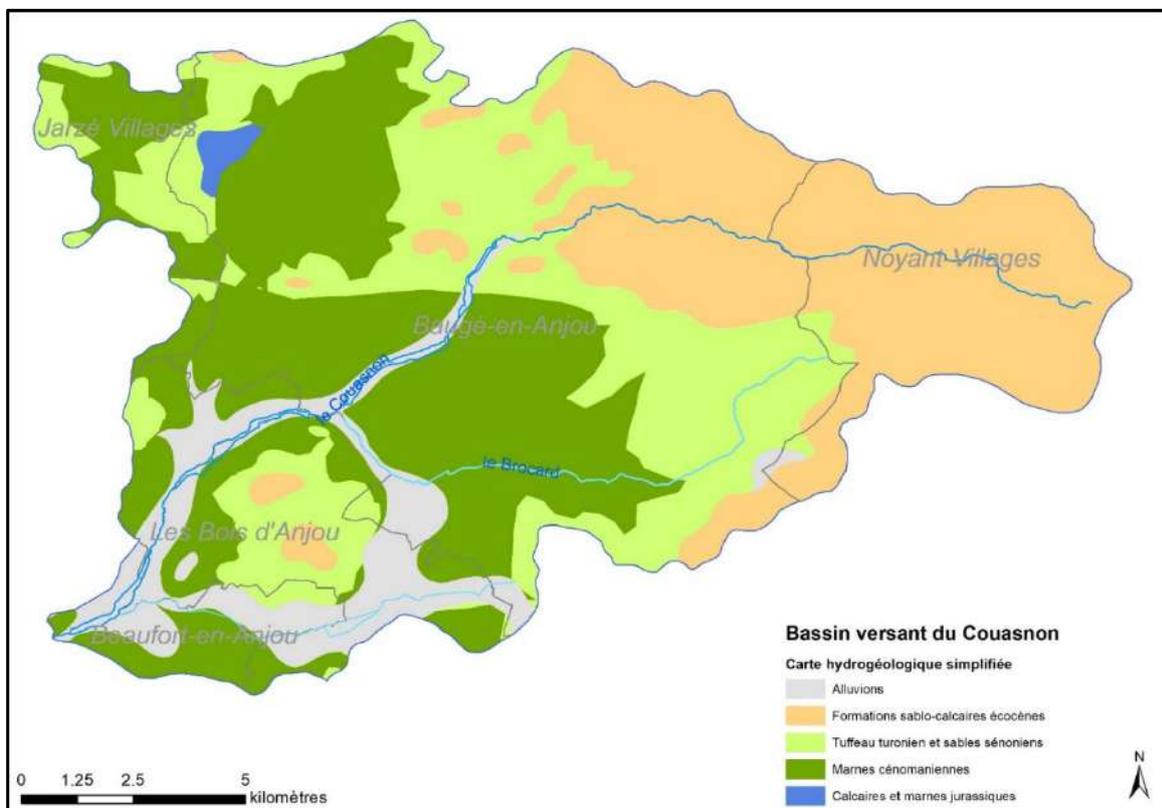
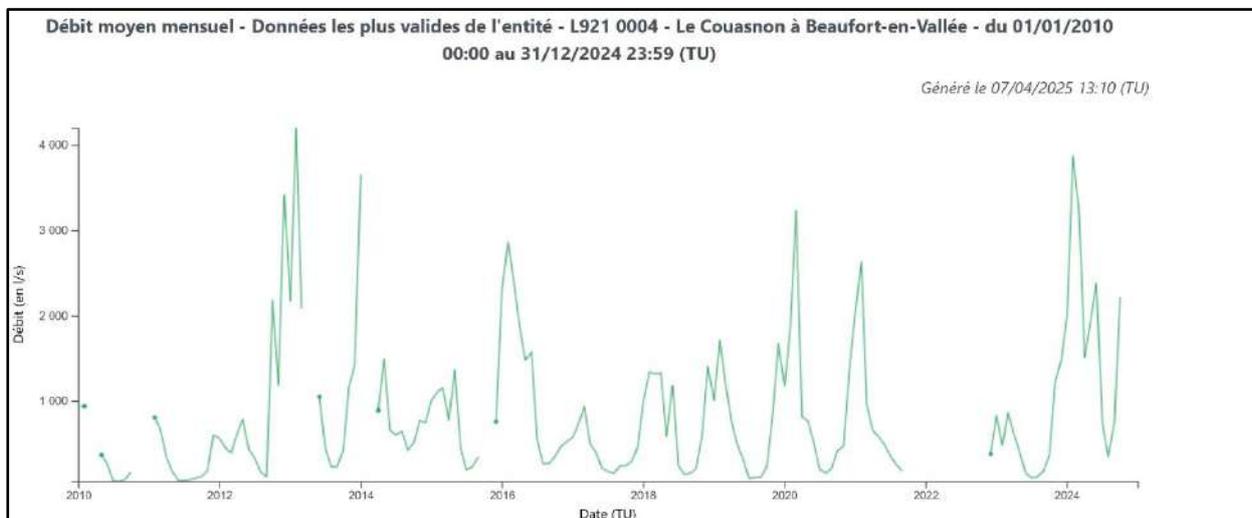


Illustration 3 : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant du Couason (carte géologique au 1/250 000 des Pays-de-la-Loire).

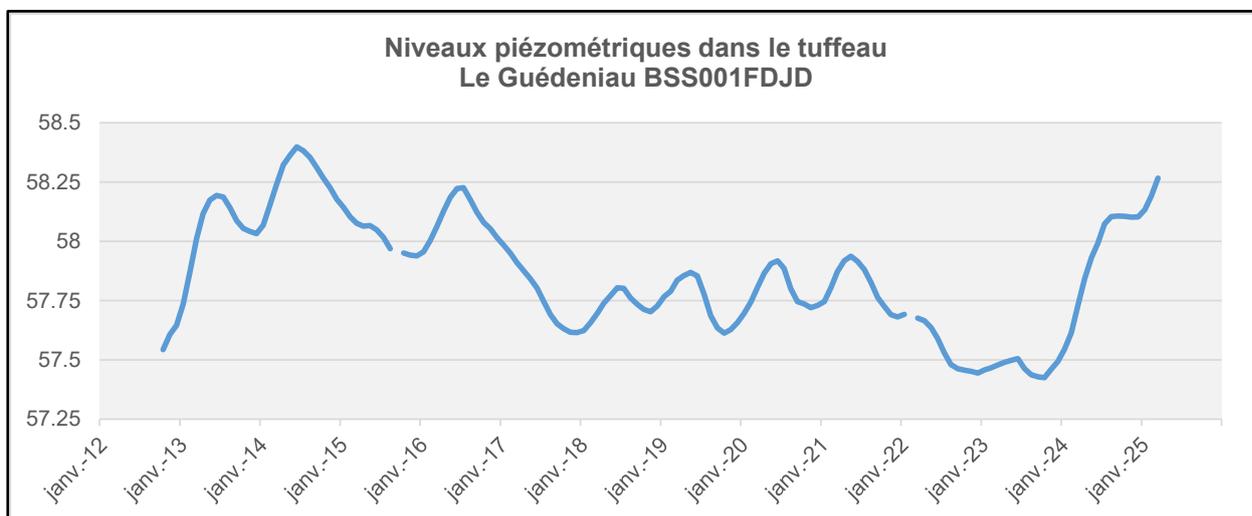
*b) Stations modélisées (BV du Couasnon)*

Les débits moyens journaliers du Couasnon à la station hydrométrique L921000401 de Beaufort en Anjou maintenue par le SYDEVA du 02/01/2010 au 08/06/2024 ont été collectés par le biais de l'Hydroportail (Illustration 4).



*Illustration 4 : Débits moyens mensuels du Couasnon à Beaufort en Anjou (Hydroportail).*

Les niveaux piézométriques journaliers du tuffeau dans le bassin versant du Couasnon sont enregistrés par le piézomètre du Guédeniau ([BSS001FDJD](#)) depuis 2012. Cet ouvrage appartient au Réseau patrimonial national de suivi quantitatif des eaux souterraines (réseau 0400000201) et est maintenu par la Direction régionale des Pays-de-la-Loire du BRGM (Illustration 5).



*Illustration 5 : Niveaux piézométriques moyens mensuels enregistrés au Guédeniau (aquifère du SENO-Turonien).*

c) Données utilisées (BV du Couasnon)

Données	Station		Fréquence	Début	Fin
Pluies (hauteur de précipitation, mm)	Fontaine-Guérin	49138001	journalière	01/01/2012	19/05/2024
Evapotranspiration potentielle (ETP, mm)	Fontaine-Guérin	49138001	journalière	01/01/2012	19/05/2024
Débits (m3/s)	Gée (Beaufort)	L921000401	moyenne journalière	01/01/2012	19/05/2024
Niveaux piézométriques(m NGF)	Le Guédeniau	BSS001HH MJ	maximum journalier	13/09/2012	19/05/2024
Volumes prélevés dans le bassin versant (dans les rivières, plans d'eau, et nappes)	données fournies par le SMBAA, à partir de données de l'OUGC			01/01/2012	31/12/2021

Tableau 2 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle du Couasnon.

Les données introduites dans le modèle sont récapitulées dans le Tableau 2 et sur l'illustration 6.

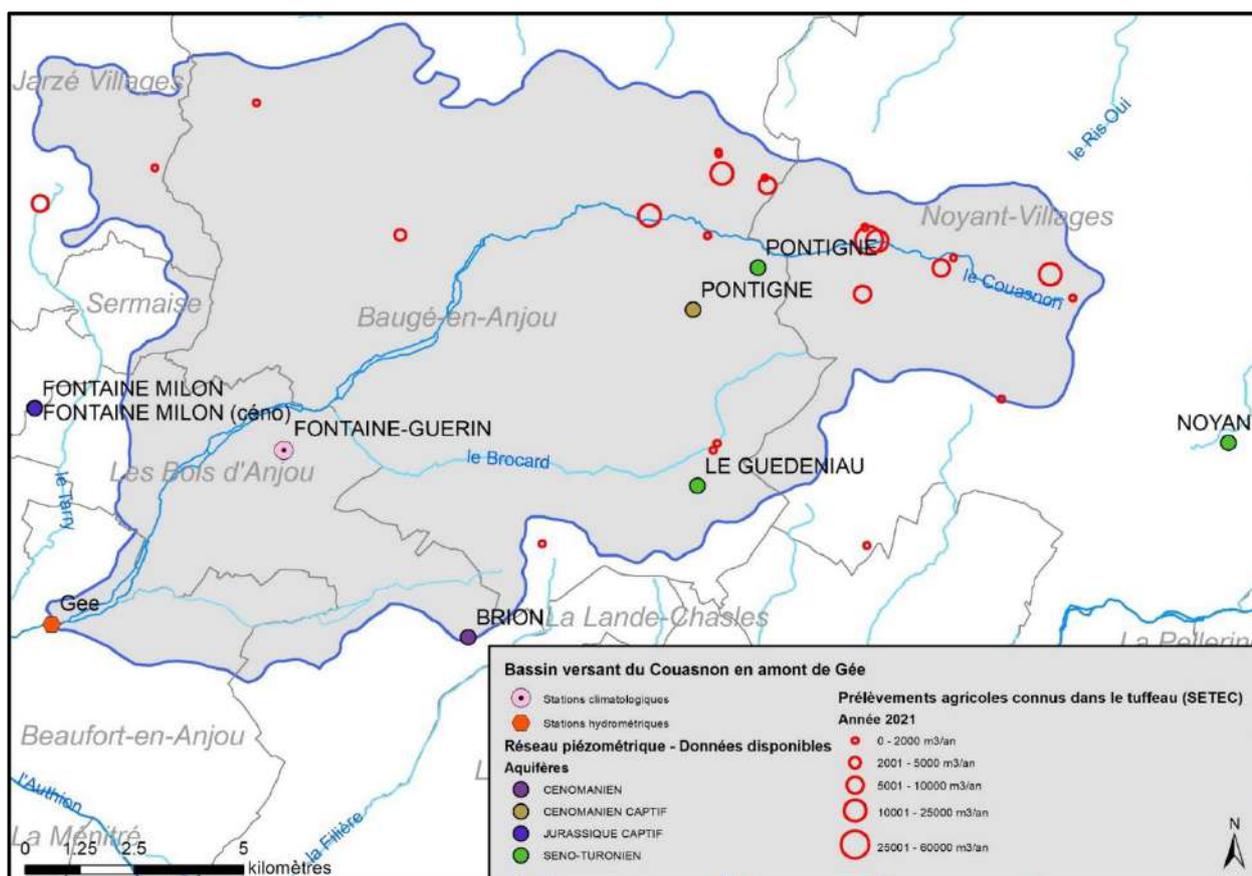


Illustration 6 : Données disponibles pour le bassin versant du Couasnon.

**Compte tenu du contexte, seuls les prélèvements souterrains dans le tuffeau ont été intégrés au modèle.**

Les prélèvements en nappe destinés aux usages AEP et industriels ont été collectés à partir de la Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE). Ces données, fournies annuellement, ont été transformées au pas de temps journalier pour les besoins du modèle global en effectuant une simple moyenne journalière. Ainsi, les prélèvements AEP et industriels journaliers introduits dans le modèle sont constants au cours de l'année.

Les prélèvements en nappe pour les usages irrigation ont été fournis par le SMBAA, à partir de données de l'OUGC<sup>2</sup> de l'Authion retravaillées par le bureau d'études SETEC HYDRATEC pour les besoins du modèle maillé de l'Authion. Ces prélèvements annuels ont été ventilés mensuellement par une clef de répartition élaborée dans le cadre de l'étude de révision des volumes prélevables (Tableau 3).

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total annuel
0.50%	0.50%	2%	4%	6%	13%	31%	31%	9%	2%	0.50%	0.50%	100.00%

Tableau 3 : Clef de ventilation mensuelle des prélèvements agricoles connus annuellement, fournie par le SMBAA.

Il n'existe pas de prélèvements connus en rivière pour les usages AEP et industriels au sein du bassin versant du Couasnon. Les prélèvements en rivière pour l'irrigation ont été fournis par le SMBAA au pas de temps journalier, et ont été introduits tels quels dans le modèle du Couasnon.

Les prélèvements des années 2022, 2023 et 2024 n'étaient pas connus au moment de la conception du modèle. La règle suivante a été adoptée :

- Pour l'AEP, la moyenne des prélèvements annuels des vingt dernières années a été introduite chaque année ;
- Pour les usages industriels, la moyenne des années 2011-2021 a été introduite chaque année (les prélèvements ont augmenté fortement depuis 2011, ce qui justifie de ne pas tenir compte de la période antérieure) ;
- Pour l'irrigation :
  - L'année 2022 ayant été particulièrement chaude et sèche de juin à août, nous reproduisons en 2022 l'année où les prélèvements en nappe ont été maximaux : 2010 pour le Couasnon ;
  - En 2023, nous appliquons la moyenne des prélèvements annuels souterrains destinés à l'irrigation des 20 dernières années, 2002-2021 ;
  - En 2024, année qui figure parmi celles où les mois de juin à août ont été les plus arrosés depuis 20 ans, nous reproduisons en 2024 l'année où les prélèvements en nappe ont été minimaux : 2014 pour le Couasnon ;

d) Résultats du calage réalisé

- **Coefficient de Nash**

Pour caractériser la performance du calage des modèles, nous donnons dans le Tableau 4 :

<sup>2</sup> Organisme Unique de Gestion Collective

- Le coefficient de Nash entre la série temporelle de la racine carrée des débits simulés et la série temporelle des débits observés,
- Le coefficient de Nash entre la série temporelle des niveaux piézométriques simulés et la série temporelle des niveaux piézométriques observés,
- Le coefficient de Nash global, qui correspond à une moyenne pondérée des deux précédents.

Pour modéliser au mieux les niveaux piézométriques de la nappe du tuffeau au Guédeniau (BSS001HHMJ) et les débits du Couasnon à Gée, et afin de prendre en compte la présence d'un second réservoir profond constitué par les sables cénomaniens (cf. § a)), nous avons adopté le schéma de modélisation à deux réservoirs proposé par GARDENIA© (cf. Illustration 1). Il donne par ailleurs de meilleurs résultats de calage que le schéma à un seul réservoir.

Désignation du modèle	Cours d'eau modélisé	Aquifère dont les niveaux piézométriques sont modélisés	Période de modélisation	Coefficient de Nash sur la racine carrée des débits	Coefficient de Nash des niveaux piézométriques	Coefficient de Nash global du modèle
BV Couasnon	Couasnon	Tuffeau sénonturonien	2012-2024 avec 2 années de démarrage (2012-2013 non prises en compte dans le calcul du coefficient de Nash)	0.87	0.91	0.88

Tableau 4 : Résultats du calage du modèle : coefficients d'ajustement obtenus.

Plus le coefficient de Nash s'approche de la valeur 1, meilleur est le calage du modèle. Un modèle GARDENIA© est considéré comme « bien calé » lorsque le coefficient de Nash global est supérieur à 0,75. Dans le cas présent, avec un coefficient de Nash global de 0,88<sup>3</sup>, nous considérons que le calage du modèle est satisfaisant (Tableau 4).

#### • **Résultat graphique**

Le résultat graphique du calage figure sur les illustrations 7 à 9 ci-dessous.

Le modèle restitue de manière fidèle les débits journaliers du Couasnon, notamment à l'étiage. Les chroniques observées et simulées s'avèrent très similaires à l'exception de l'étiage des années 2012 et 2013. Il restitue également de façon très satisfaisante les cycles annuels et pluriannuels des niveaux journaliers de la nappe du tuffeau, en dépit d'un démarrage approximatif (2012 et 2013).

<sup>3</sup> le coefficient de Nash global avec prise en compte des débits naturels (et pas leur racine carrée) est de 0,84 dans cet exemple, mais il est conseillé de calibrer le modèle en transformant les débits de rivière par leur racine carrée (Thiery, 2014).

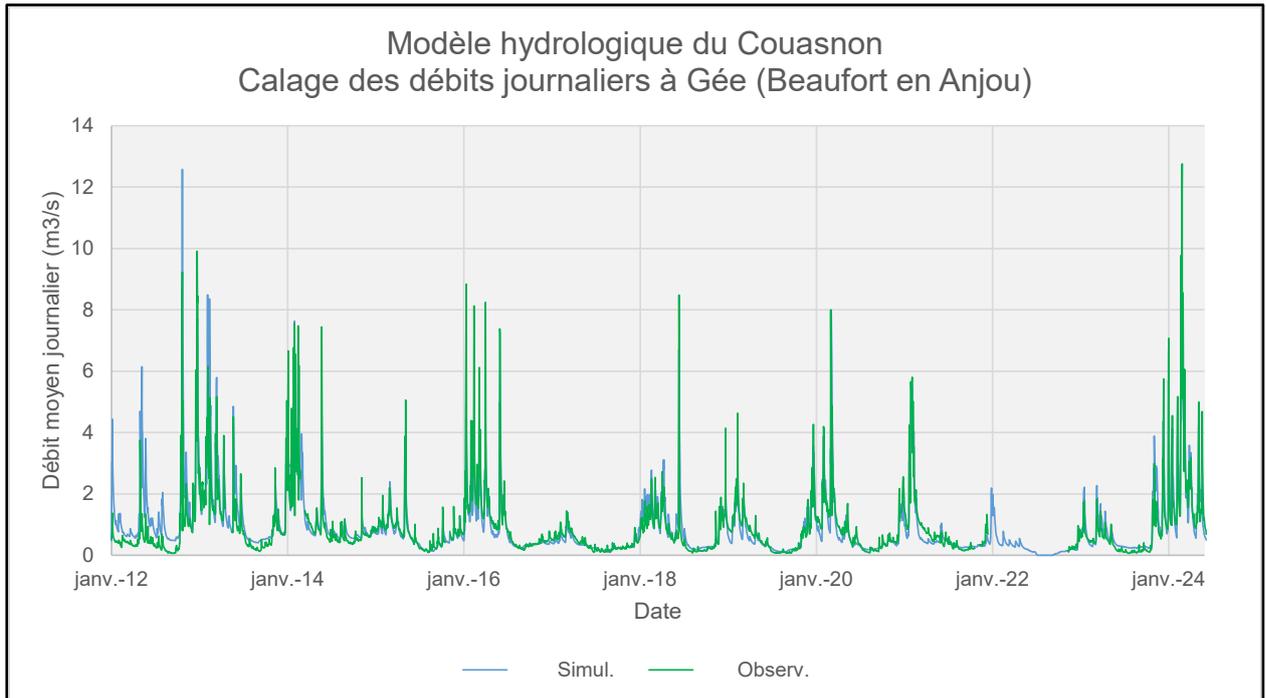


Illustration 7 : Ajustement des débits du Couasnon (période 2012-2024).

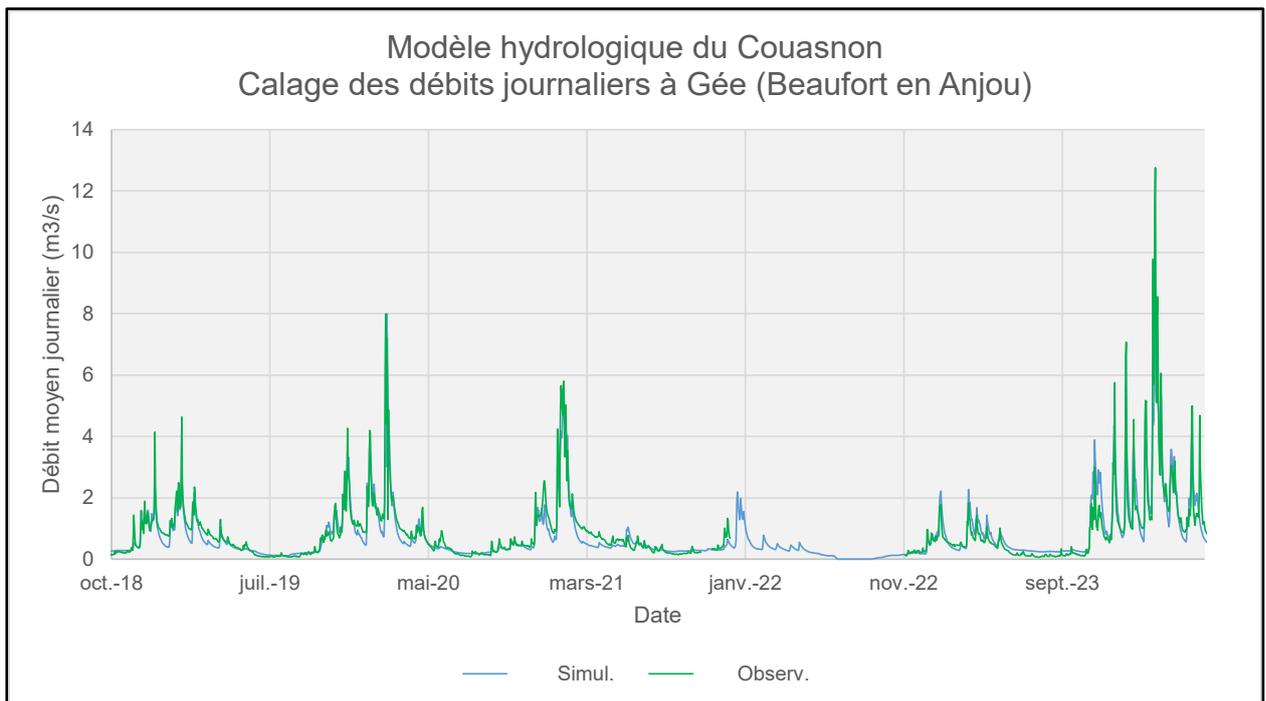


Illustration 8 : Ajustement des débits du Couasnon (détail des années 2018-2023).

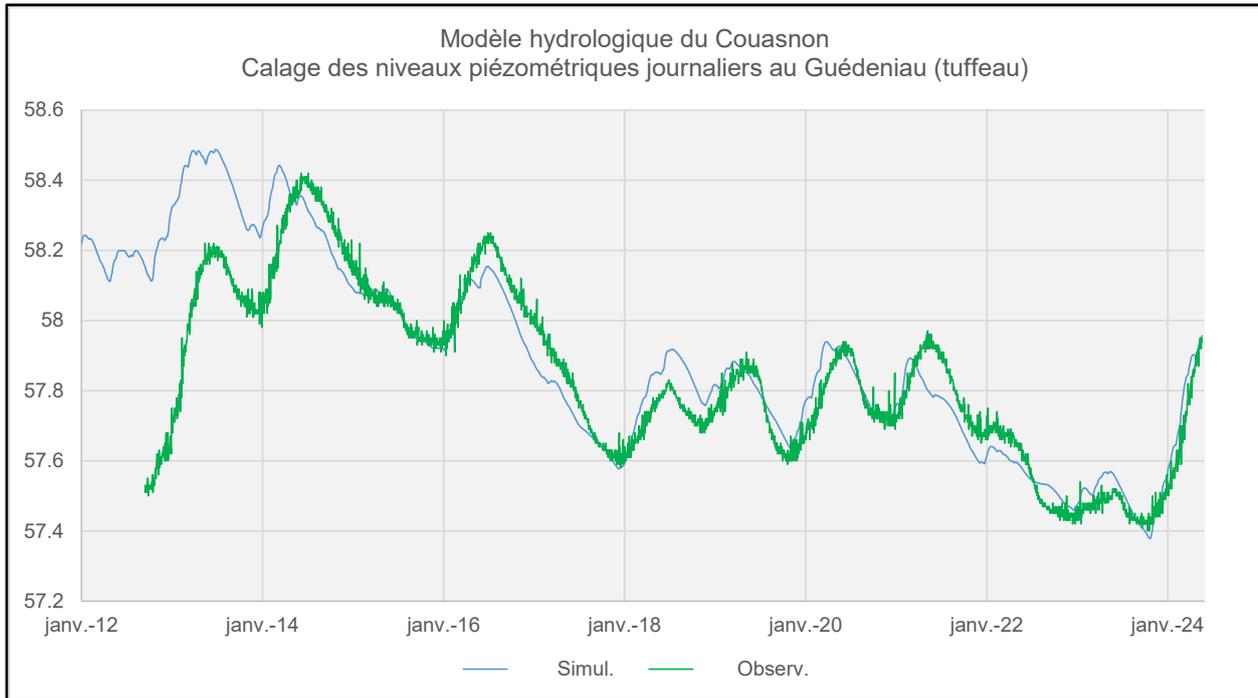


Illustration 9 : Ajustement des niveaux piézométriques du tuffeau au Guédeniau (BSS001HMMJ). Période 2012-2024

- **Résultats de calage**

Les paramètres de calage principaux obtenus sont les suivants :

- Superficie du bassin versant jaugé : 221,7 km<sup>2</sup> (donnée Hydroportail)
- Débit extérieur (entrant ou sortant) : nul
- Transformation du débit par sa racine carrée pour la calibration
- Coefficient d'emmagasinement : 6,6 %, conforme aux valeurs attendues pour le tuffeau
- Niveau piézométrique de base de l'aquifère modélisé : 56,62 m NGF
- Coefficient de correction des pluies : nul
- Coefficient de correction de l'ETP : -1,9 %
- Capacité du réservoir sol progressif : 276 mm
- Hauteur d'équi-Ruissellement-Percolation du réservoir hypodermique H (Rui\_Perco) : 5,7 mm
- Temps de 1/2 percolation vers la nappe (T1/2\_Perco) : 0,87 mois
- Temps de 1/2 tarissement souterrain (rapide) [Réservoir G1] : 15 mois
- Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (T1/2\_Perco2) : 50 mois
- Temps de 1/2 tarissement souterrain lent [Réservoir G2] : 15 mois
- Prise en compte des prélèvements influençant les débits du Couasnon et les niveaux de la nappe du tuffeau séno-turonien.

### 3.2.2. Bassin versant du Lathan

#### a) Contexte hydrogéologique du bassin versant du Lathan

- **Hydrographie**

Le Lathan prend sa source à Ambillou dans l'Indre-et-Loire, à une altitude de 100 m NGF. Son cours suit une direction générale est-ouest jusqu'à sa confluence avec l'Authion à Longué-

Jumelles, à une altitude de 20 m NGF. Le linéaire total du Lathan est de 57,9 km, et la superficie de son bassin versant atteint 379,5 km<sup>2</sup> (Illustration 2).

Ses débits journaliers sont connus depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2012 grâce à la station hydrométrique située au lieu-dit Moulin Guet à Vernantes (suivi réalisé par le SYDEVA). La superficie du bassin versant en amont de la station hydrométrique est de 272,6 km<sup>2</sup>. Le Tableau 5 donne quelques grandeurs significatives décrivant le régime hydrométrique du Lathan.

Débit moyen journalier du Lathan (L/s)				Débit moyen mensuel - Etiage (L/s)	
Minimum	Maximum	Médian	Moyen	QMNA5	QMNA10
56 (16/07/2017)	23 600 (02/02/2013)	641	1110	186	147

Tableau 5 : Grandeurs caractéristiques du débit du Lathan (Hydroportail).

Ces valeurs concernent les débits du Lathan soutenus par les lâchers d'eau provenant du barrage de la retenue de Pincemaille. Ces lâchers d'eau influencent fortement le régime hydrométrique du Lathan en période d'étiage.

- **Hydrogéologie**

Les formations géologiques du bassin versant du Lathan appartiennent au domaine sédimentaire du Bassin Parisien. Les formations du Crétacé sont présentes à l'affleurement dans la partie aval du bassin versant, et disparaissent sous les calcaires lacustres paléogènes à l'amont du bassin versant (Illustration 10).

Plus précisément, concernant les eaux souterraines et leur rôle dans l'hydrosystème :

- L'ensemble calcaires lacustres éocènes/tuffeau séno-turonien est au contact du Lathan dans la moitié amont du bassin versant, de sa source jusqu'à Linières-Bouton ;
- Les sables cénomaniens prennent ensuite le relais, quasiment jusqu'à la confluence du Lathan et de l'Authion à Beaufort ;
- Les alluvions du Lathan puis de l'Authion se développent progressivement à partir de Vernantes et Mouliherne, en placage au-dessus des sables cénomaniens ;
- Enfin à l'exutoire du bassin versant, le Lathan coule sur les marnes à ostracées.

Les deux aquifères du Crétacé (tuffeau séno-turonien et sables cénomaniens) sont susceptibles de jouer un rôle dans le soutien d'étiage du Lathan. Les sables du Cénomaniens jouent sans doute un rôle prépondérant par rapport au tuffeau du Turonien qui est présent sous couverture éocène, et donc déconnecté dans une certaine mesure du Lathan.

Ainsi, ce sont les niveaux piézométriques du Cénomaniens qui seront simulés par le modèle hydrologique de ce bassin versant.

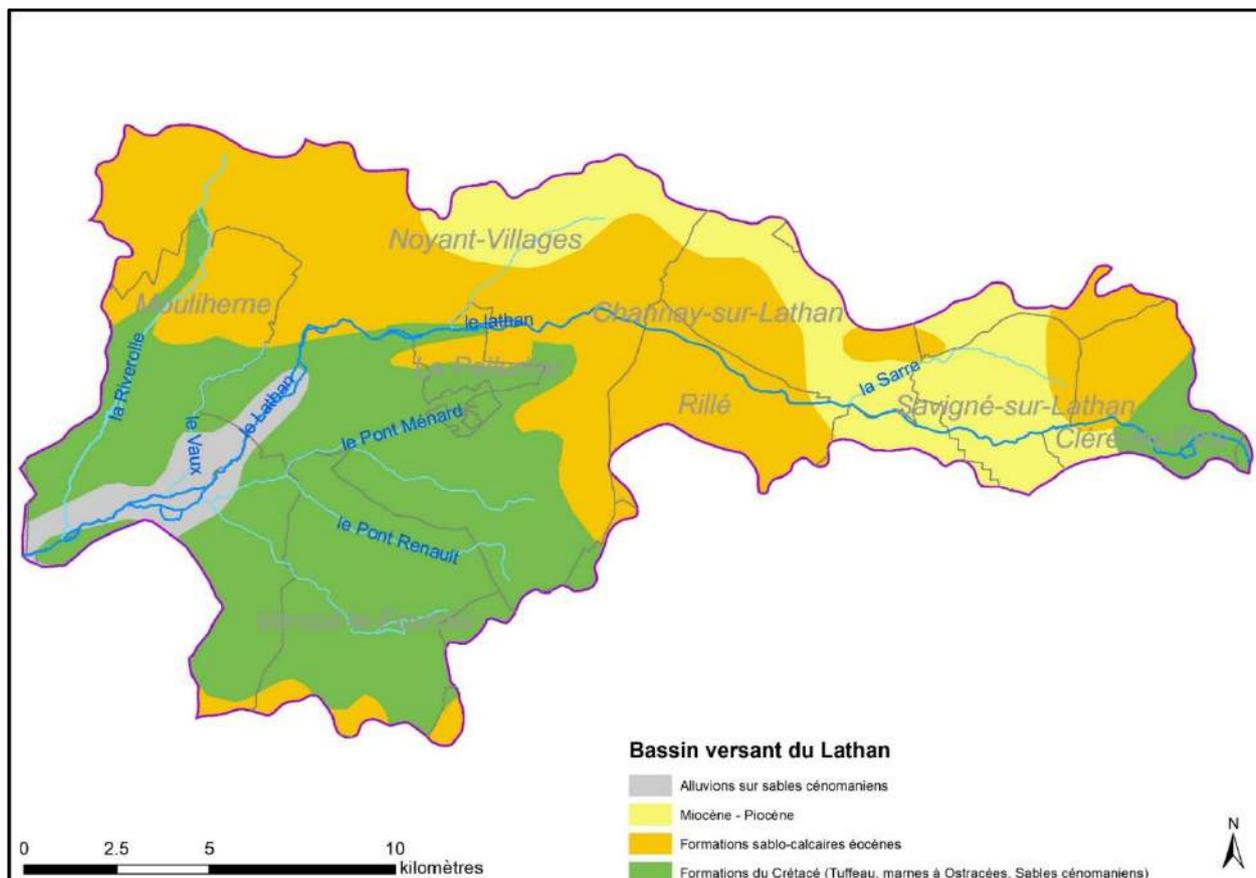


Illustration 10 : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant du Lathan (carte géologique au 1/250 000 des Pays-de-la-Loire).

*b) Stations modélisées (bassin versant du Lathan)*

Les débits moyens journaliers du Lathan à la station hydrométrique L911000602 de Vernantes maintenue par le SYDEVA du 01/01/2012 au 12/05/2024 ont été collectés par le biais de l'Hydroportail. La chronique comporte de nombreuses et longues lacunes (Illustration 11).

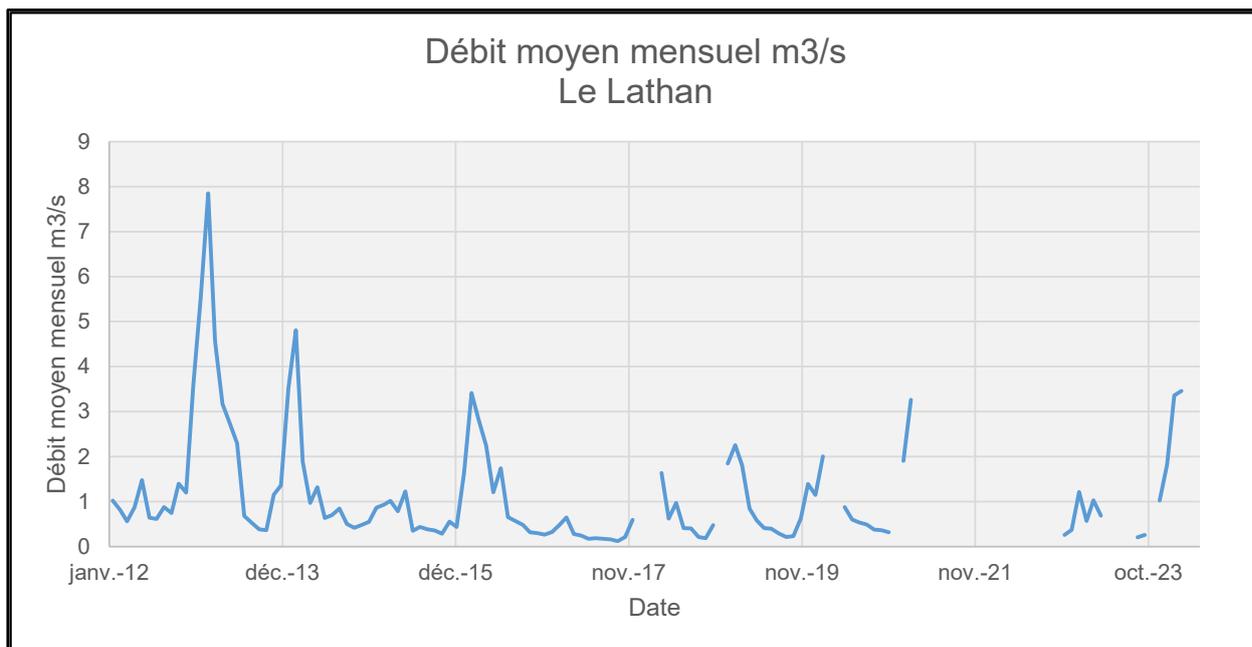


Illustration 11 : Débits moyens mensuels du Lathan à Moulin Guet (Vernantes).

Les niveaux piézométriques journaliers des sables cénomaniens dans le bassin versant du Lathan sont enregistrés par le piézomètre de Vernoi-le-Fourrier ([BSS001FFLX](#)) depuis 2012 (Illustration 12). Les niveaux piézométriques journaliers du tuffeau dans le bassin versant du Lathan sont enregistrés par le piézomètre de Vernoi-le-Fourrier ([BSS001FFLW](#)) également depuis 2012. Ces deux ouvrages appartiennent au Réseau patrimonial national de suivi quantitatif des eaux souterraines (réseau 0400000201) et sont maintenus par la Direction régionale des Pays-de-la-Loire du BRGM.

Compte-tenu du rôle prépondérant supposé des sables cénomaniens dans le fonctionnement du Lathan (cf. § a)), le piézomètre de Vernoi-le-Fourrier BSS001FFLX est utilisé comme piézomètre représentatif des eaux souterraines du bassin.

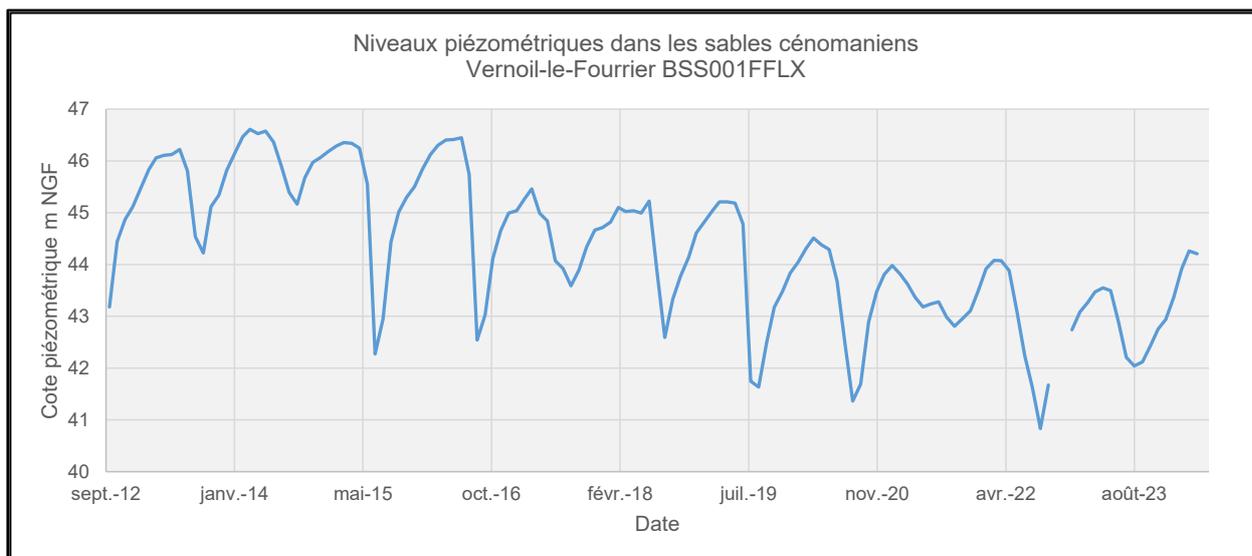


Illustration 12 : Niveaux piézométriques moyens mensuels enregistrés à Vernoi-le-Fourrier (aquifère des sables cénomaniens).

c) Données utilisées (bassin versant du Lathan)

Données	Station		Fréquence	Début	Fin
Pluies (hauteur de précipitation, mm)	Vernantes	49368001	journalière	01/01/2012	19/05/2024
Evapotranspiration potentielle (ETP, mm)	Fontaine-Guérin	49138001	journalière	01/01/2012	19/05/2024
Débits (m3/s)	Moulin Guet (Vernantes)	L911000602	moyenne journalière	01/01/2012	12/05/2024
Lâchers de la retenue de Pincemaille (barrage de Rillé)	données fournies par le SMBAA, à partir de données du SYDEVA		journalières	01/01/2012	08/03/2024
Niveaux piézométriques (m NGF)	Vernoil-le-Fourrier (Cénomaniens)	BSS001FFLX	maximum journalier	01/09/2012	19/05/2024
Volumes prélevés dans le bassin versant (dans les rivières, plans d'eau, et nappes)	données fournies par le SMBAA, à partir de données de l'OUGC			01/01/2012	31/12/2021

Tableau 6 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle du Lathan.

Les données introduites dans le modèle du Lathan sont récapitulées dans le Tableau 6 et sur l'illustration 13.

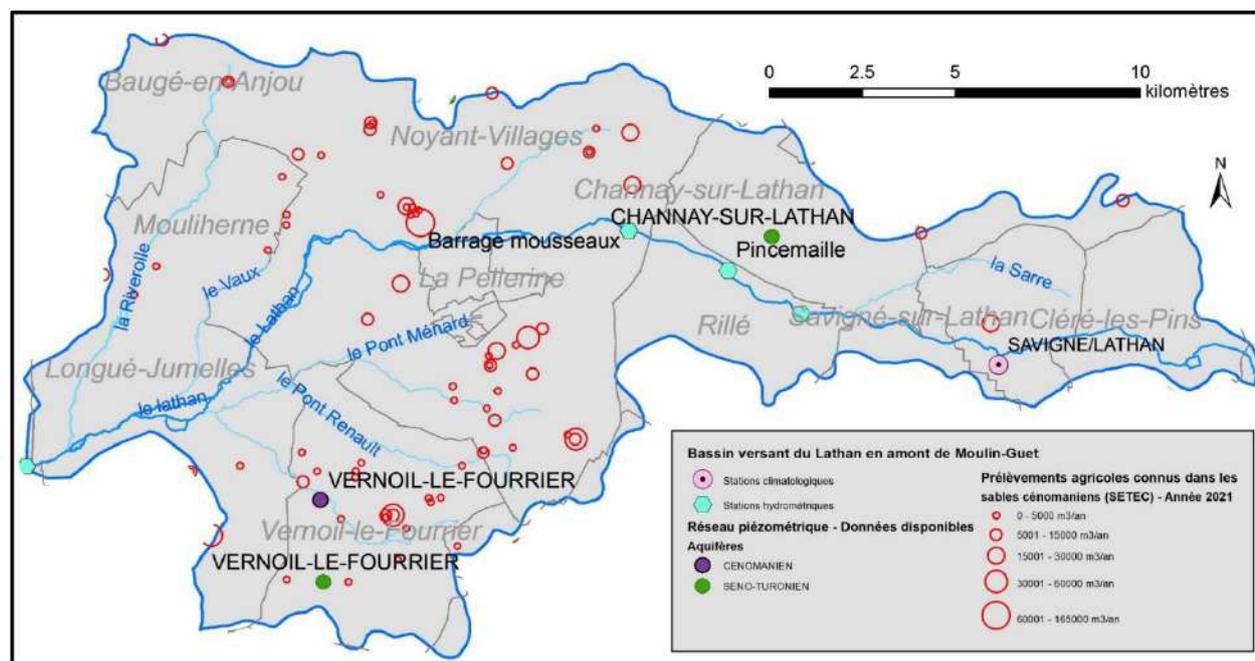


Illustration 13 : Données disponibles pour le bassin versant du Lathan.

Le débit du Lathan à Moulin Guet étant fortement influencé par les lâchers d'eau provenant de la retenue de Pincemaille, il convenait pour la modélisation d'approcher les débits naturels désinfluencés du Lathan. Pour cela, les lâchers journaliers ont été soustraits au débit journalier du Lathan à Moulin Guet (Illustration 14).

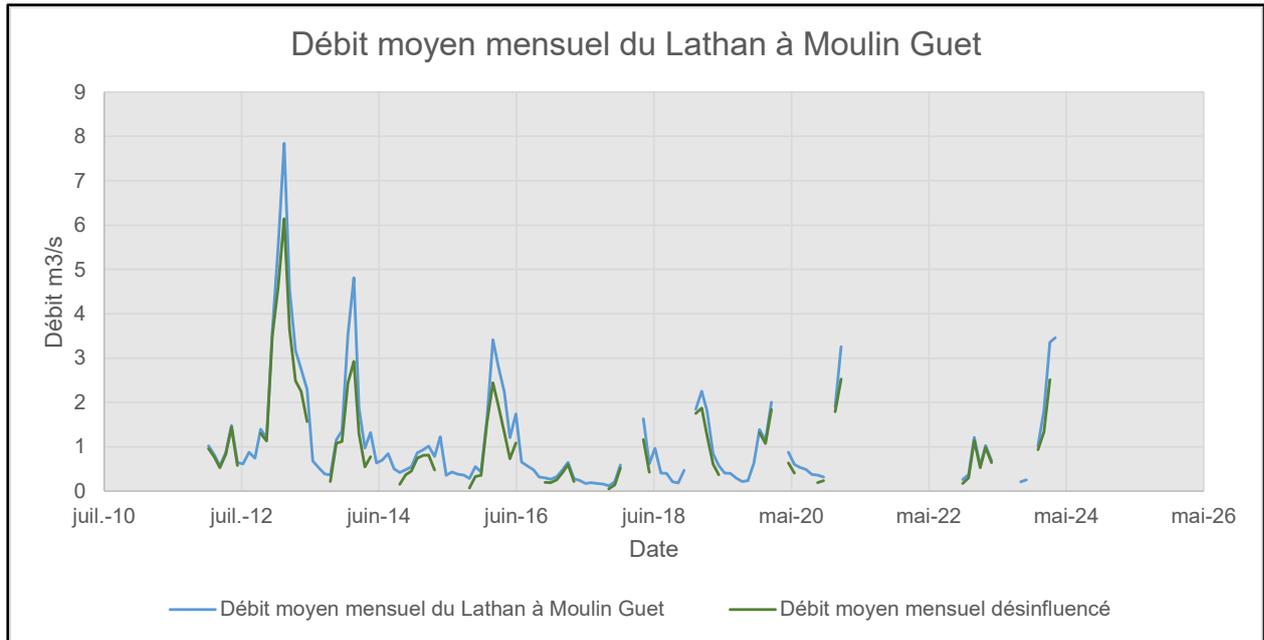


Illustration 14 : Comparaison des débits moyens mensuels influencés et désinfluentés (sans lâchers d'eau).

Seuls les prélèvements souterrains provenant des sables cénomaniens ont été intégrés au modèle. Le § 3.2.1 c) ci-dessus décrit la manière dont les prélèvements fournis par le SMBAA à partir des données de l'OUGC retravaillées par SETEC HYDRATEC ont été introduites dans le modèle du Lathan (méthode identique au Couasnon).

Il n'existe pas de prélèvements connus en rivière pour les usages AEP et industriels au sein du bassin versant du Lathan.

d) *Résultats du calage réalisé*

- **Coefficient de Nash**

Pour caractériser la performance du calage des modèles, nous donnons dans le Tableau 7 :

- Le coefficient de Nash entre la série temporelle de la racine carrée des débits simulés et la série temporelle des débits observés,
- Le coefficient de Nash entre la série temporelle des niveaux piézométriques simulés et la série temporelle des niveaux piézométriques observés,
- Le coefficient de Nash global, qui correspond à une moyenne pondérée des deux précédents.

Pour modéliser au mieux les niveaux piézométriques de la nappe des sables cénomaniens à Vernueil-le-Fourrier (BSS001FFLX) et les débits du Lathan désinfluentés à Moulin Guet, et afin de prendre en compte la présence des deux aquifères cénomanien et séno-turonien (cf. § a)), nous avons adopté le schéma de modélisation à deux réservoirs proposé par GARDENIA© (cf. Illustration 1). Il donne par ailleurs de meilleurs résultats de calage que le schéma à un seul réservoir.

Désignation du modèle	Cours d'eau modélisé	Aquifère dont les niveaux piézométriques sont modélisés	Période de modélisation	Coefficient de Nash sur la racine carrée des débits	Coefficient de Nash des niveaux piézométriques	Coefficient de Nash global du modèle
BV Lathan	Lathan	Sables cénomaniens inférieurs	2012-2024 avec 2 années de démarrage (2012-2013 non prises en compte dans le calcul du coefficient de Nash)	0.78	0.81	0.79

Tableau 7 : Résultats du calage du modèle : coefficients d'ajustement obtenus.

Plus le coefficient de Nash s'approche de la valeur 1, meilleur est le calage du modèle. Un modèle GARDENIA© est considéré comme « bien calé » lorsque le coefficient de Nash global est supérieur à 0,75. Dans le cas présent, avec un coefficient de Nash global de 0,79<sup>4</sup>, nous considérons que le calage du modèle est satisfaisant (Tableau 7).

- **Résultat graphique**

Le résultat graphique du calage figure sur les illustrations 15 à 17 ci-dessous.

Le modèle restitue de manière fidèle les débits journaliers du Lathan, notamment à l'étiage. Les chroniques observées et simulées s'avèrent très proches.

Il restitue également de façon très satisfaisante les cycles annuels des niveaux journaliers de la nappe des sables cénomaniens inférieurs, bien qu'il ne parvienne pas toujours à reproduire les niveaux les plus bas observés en période de basses eaux (notamment en 2015, 2016 et 2019), qui sont manifestement la conséquence de prélèvements saisonniers. Cela s'explique par la difficulté pour un modèle global à prendre en compte des pompages dispersés géographiquement dans le bassin versant.

<sup>4</sup> le coefficient de Nash global avec prise en compte des débits naturels (et pas leur racine carrée) est de 0,77 dans cet exemple, mais il est conseillé de calibrer le modèle en transformant les débits de rivière par leur racine carrée (Thiery, 2014).

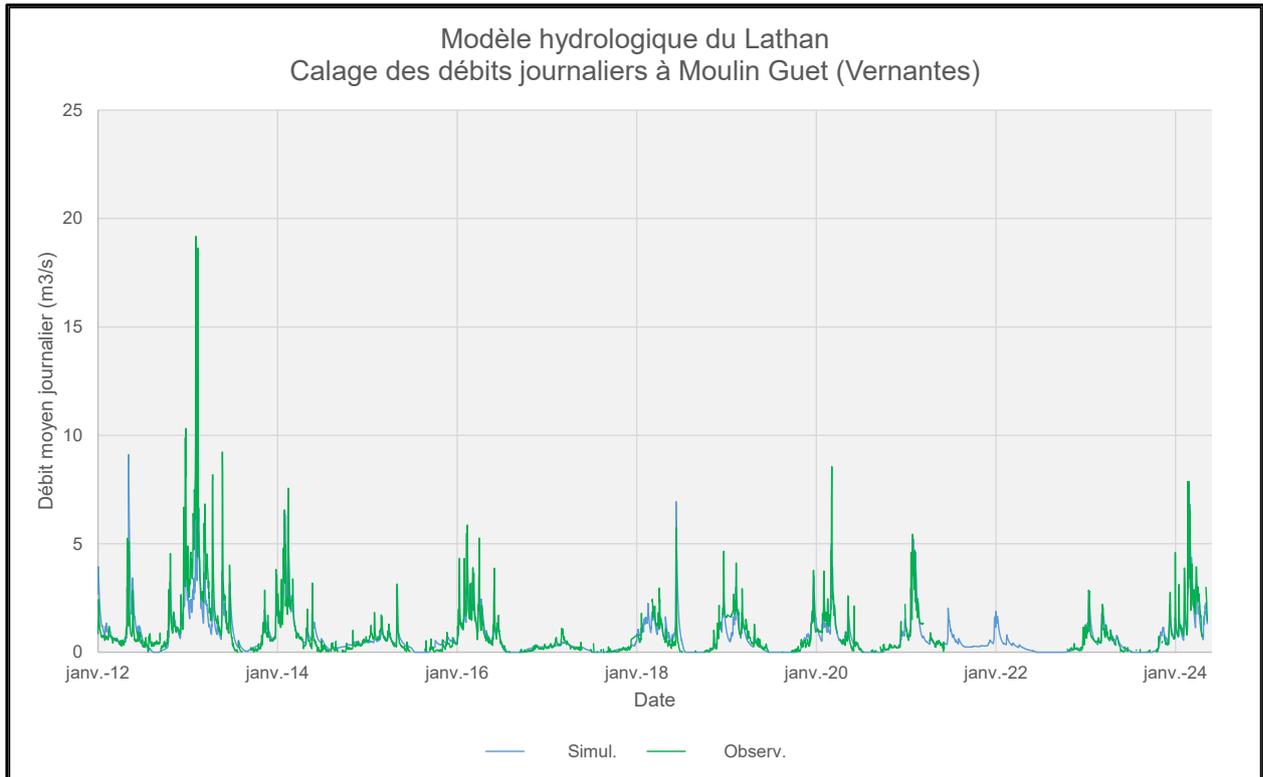


Illustration 15 : Ajustement des débits du Lathan (période 2012-2024).

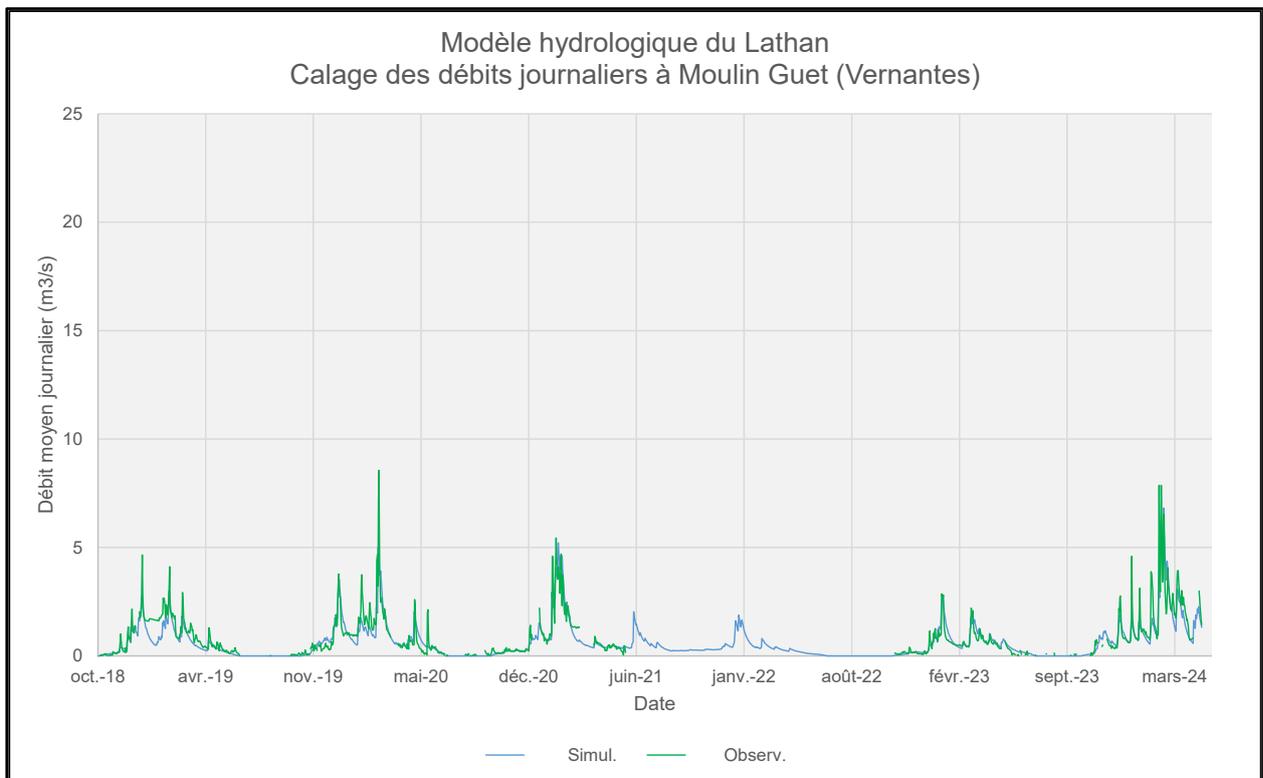


Illustration 16 : Ajustement des débits du Lathan (détail des années 2018-2023).

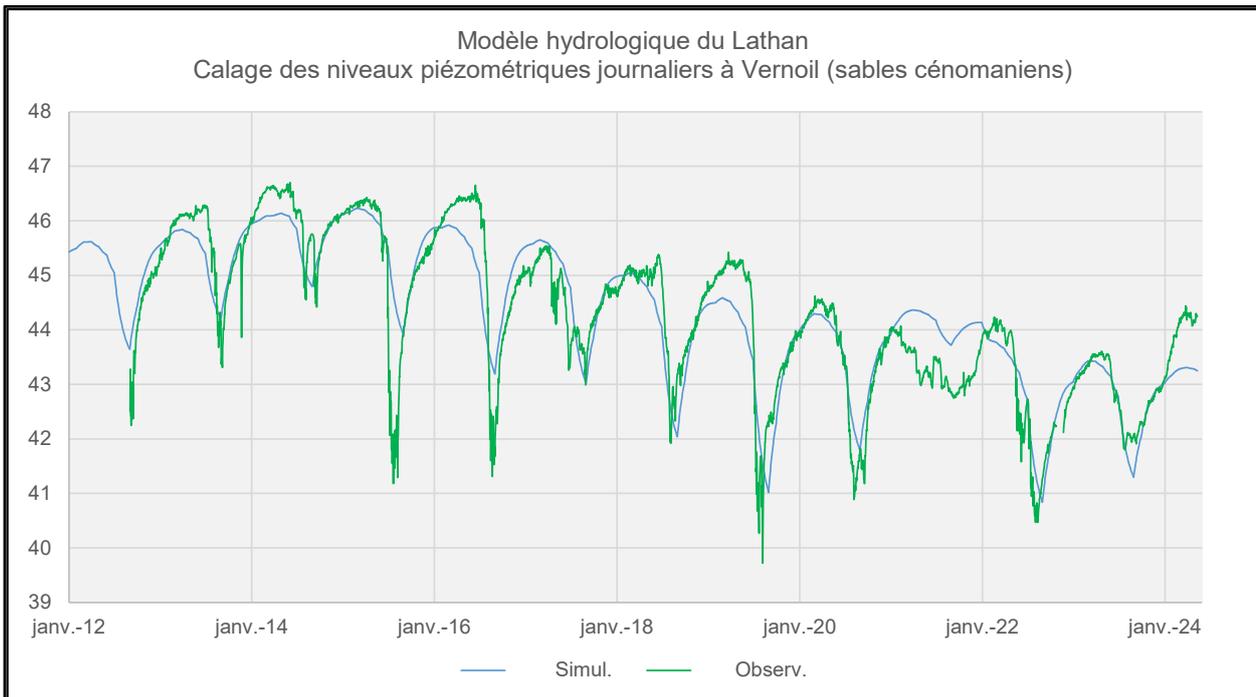


Illustration 17 : Ajustement des niveaux piézométriques des sables cénomaniens à Vernoil-le-Fourrier (BSS001FFLX). Période 2012-2024

### • **Résultats de calage**

Les paramètres de calage principaux obtenus sont les suivants :

- Superficie du bassin versant jaugé : 272,6 km<sup>2</sup>
- Débit extérieur (entrant ou sortant) : nul
- Transformation du débit par sa racine carrée pour la calibration
- Coefficient d'emmagasinement : 1,8 %, conforme aux valeurs attendues pour les sables cénomaniens inférieurs
- Niveau piézométrique de base de l'aquifère modélisé : 33,38 m NGF
- Coefficient de correction des pluies : nul
- Coefficient de correction de l'ETP : 20 %
- Capacité du réservoir sol progressif : 313,9 mm
- Hauteur d'équi-Ruissellement-Percolation du réservoir hypodermique H (Rui\_Perco) : 7,1 mm
- Temps de 1/2 percolation vers la nappe (T1/2\_Perco) : 1,4 mois
- Temps de 1/2 tarissement souterrain (rapide) [Réservoir G1] : 58 mois
- Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (T1/2\_Perco2) : 30 mois
- Temps de 1/2 tarissement souterrain lent [Réservoir G2] : 58 mois
- Prise en compte des prélèvements influençant les débits du Lathan et les niveaux de la nappe des sables cénomaniens.

### 3.2.3. Bassin versant du Changeon

#### a) Contexte hydrogéologique du bassin versant du Changeon

- **Hydrographie**

Le Changeon prend sa source à Hommes dans l'Indre-et-Loire, à une altitude de 85 m NGF. Son cours suit une direction générale est-ouest, puis nord-sud, puis est-ouest jusqu'à sa confluence avec le Lane à Saint-Nicolas-de-Bourgueil, à une altitude de 26 m NGF. Le linéaire total du Changeon est de 35 km, et la superficie de son bassin versant atteint 247,6 km<sup>2</sup> (Illustration 2). Le Lane et le Changeon confluent pour former l'Authion.

Les débits journaliers du Changeon sont connus depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2010 grâce à la station hydrométrique située au lieu-dit Moulin Foulon à Gizeux, à la moitié de son cours (suivi réalisé par le SYDEVA). La superficie du bassin versant en amont de la station hydrométrique est de 89,6 km<sup>2</sup>. Le Tableau 8 donne quelques grandeurs significatives décrivant le régime hydrométrique du Changeon.

Débit moyen journalier (L/s)				Débit moyen mensuel - Etiage (L/s)	
Minimum	Maximum	Médian	Moyen	QMNA5	QMNA10
48 (24/07/2019)	4 370 (14/02/2014)	233	327	70	59

Tableau 8 : Grandeurs caractéristiques du débit du Changeon (Hydroportail).

- **Hydrogéologie**

Les formations géologiques du bassin versant du Changeon appartiennent au domaine sédimentaire du Bassin Parisien (Illustration 18). À l'affleurement, on rencontre :

- Les formations éocènes représentées par des calcaires lacustres, en tête du bassin versant ;
- Les formations du Crétacé, représentées par les sables coniaciens (sénoniens inférieurs) qui surmontent le tuffeau turonien. Les produits d'altération de ces formations sont présents en placage aux interfluves, sous forme d'argiles à silex.
- Des dépôts holocènes constitués des alluvions de l'Authion et de la Loire, principalement développés dans la partie aval du bassin versant.

Le tuffeau séno-turonien et les alluvions de l'Authion constituent les ressources en eau souterraines principales du bassin versant. Les alluvions sont peu significatives en amont de Moulin Foulon : **seuls les sables coniaciens et le tuffeau turonien, qui forment un seul réservoir, constituent une ressource aquifère remarquable dans la partie jaugée du bassin versant.**

Ainsi, ce sont les niveaux piézométriques du Séno-Turonien (sables coniaciens + tuffeau turonien) qui seront simulés par le modèle hydrologique de ce bassin versant.

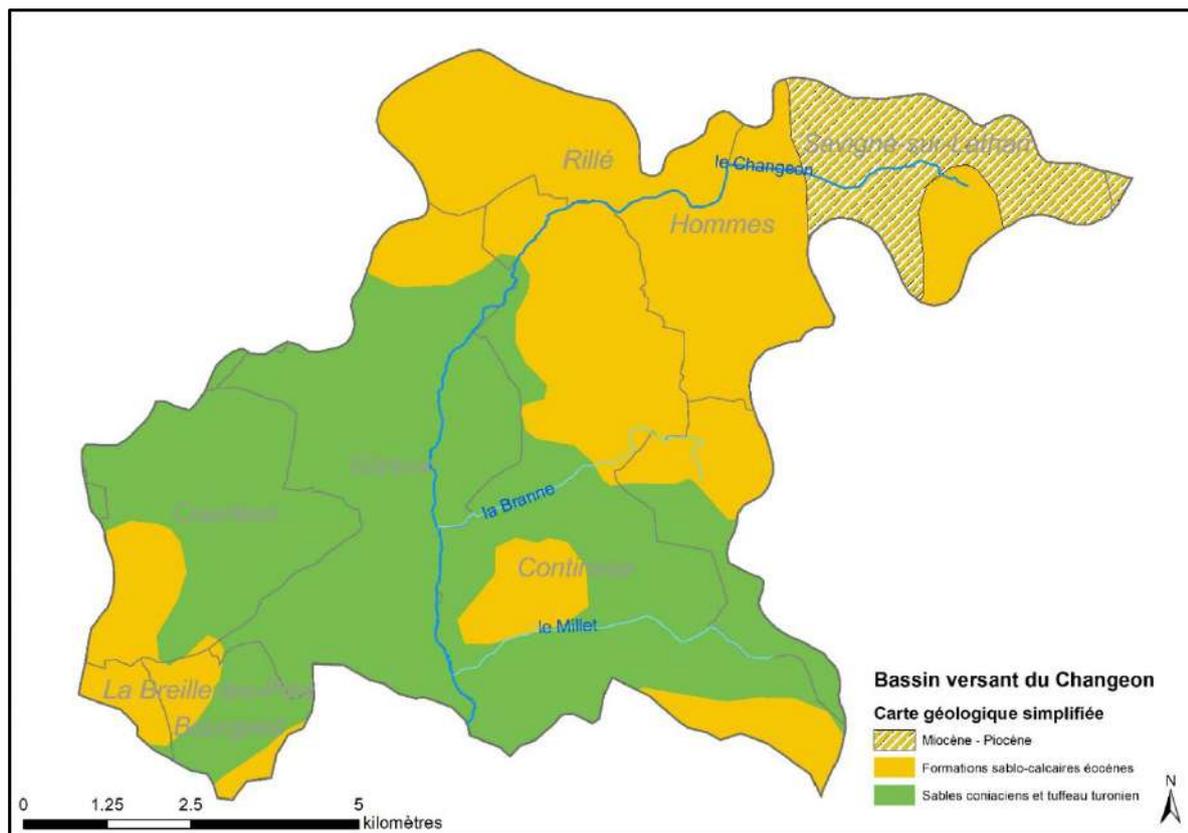


Illustration 18 : Carte hydrogéologique simplifiée du bassin versant du Changeon (carte géologique au 1/250 000 des Pays-de-la-Loire)

b) Stations modélisées (bassin versant du Changeon)

Les débits moyens journaliers du Changeon à la station hydrométrique L900000701 de Moulin Foulon (Gizeux), maintenue par le SYDEVA, ont été collectés par le biais de l'Hydroportail. Ils sont disponibles depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2010 (Illustration 19).

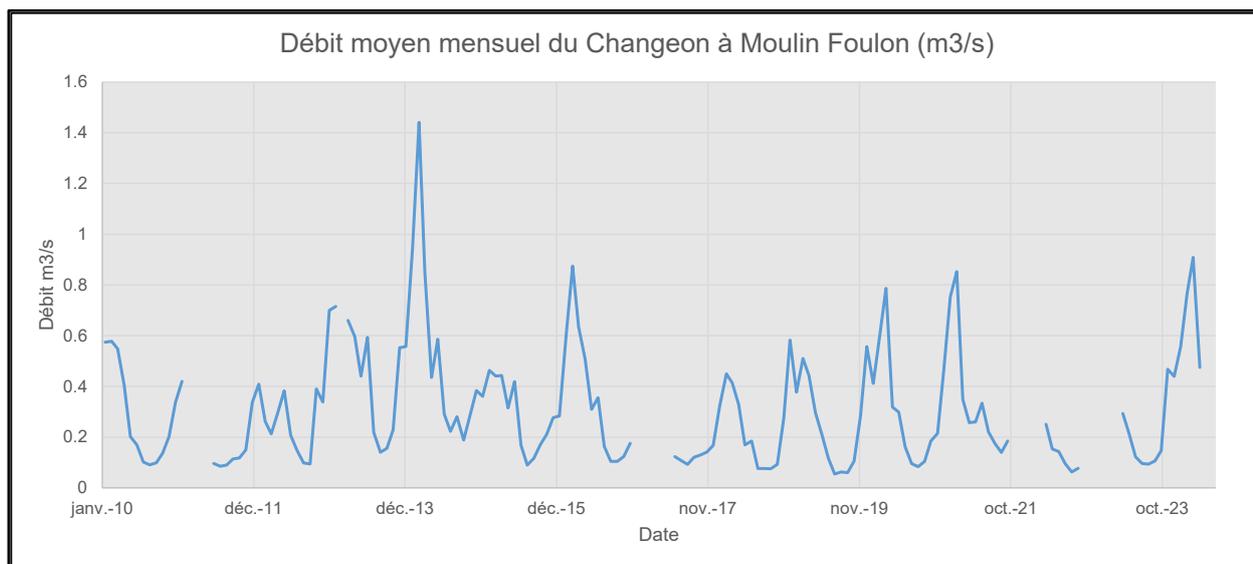


Illustration 19 : Débits moyens mensuels du Changeon à Moulin Foulon (Hydroportail).

Aucun piézomètre avec un historique suffisamment long n'enregistre les niveaux piézométriques journaliers du bassin du Changeon. A proximité, les niveaux piézométriques journaliers de la nappe du Séno-Turonien sont enregistrés par le piézomètre de Vernoi-le-Fourrier ([BSS001FFLW](#)) depuis 2012 et par le piézomètre de Channay-sur-Lathan ([BSS001FEWY](#)) depuis 1993. Ces deux ouvrages appartiennent au Réseau patrimonial national de suivi quantitatif des eaux souterraines et sont respectivement maintenus par la Direction régionale des Pays-de-la-Loire (réseau 0400000201) et la Direction régional Centre Val de Loire du BRGM (réseau 0400000203).

Nous présentons les résultats de la modélisation obtenus avec le piézomètre de Vernoi-le-Fourrier (Illustration 20).

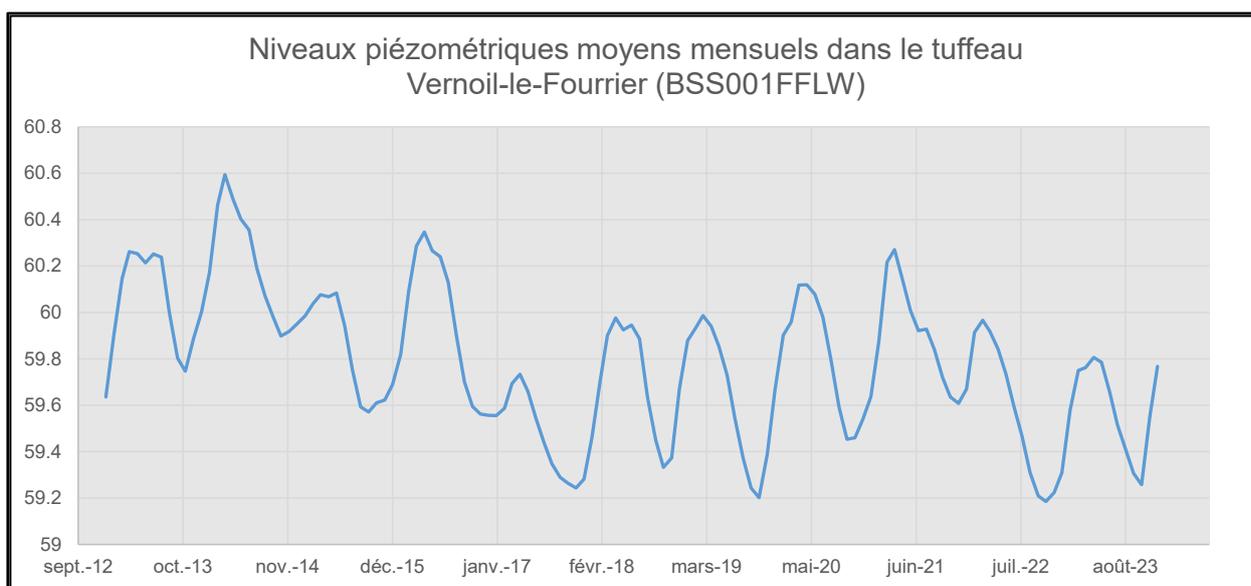


Illustration 20 : Niveaux piézométriques moyens mensuels à Vernoi-le-Fourrier (aquifère séno-turonien)  
c) Données utilisées (bassin versant du Changeon)

Données	Station		Fréquence	Début	Fin
Pluies (hauteur de précipitation, mm)	Saigné-sur-Lathan	37241001	journalière	01/01/2010	08/06/2024
Evapotranspiration potentielle (ETP, mm)	Tours	37179001	journalière	01/01/2010	08/06/2024
Débits (m3/s)	Moulin Foulon (Gizeux)	L900000701	moyenne journalière	01/01/2010	30/05/2024
Niveaux piézométriques(m NGF)	Vernoi-le-Fourrier	BSS001FFLW	maximum journalier	01/09/2012	10/06/2024
Volumes prélevés dans le bassin versant (dans les rivières, plans d'eau, et nappes)	données fournies par le SMBAA, à partir de données de l'OUGC			01/01/2010	31/12/2021

Tableau 9 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle du Changeon.

Les données introduites dans le modèle du Changeon sont récapitulées dans le Tableau 9 et sur l'illustration 21.

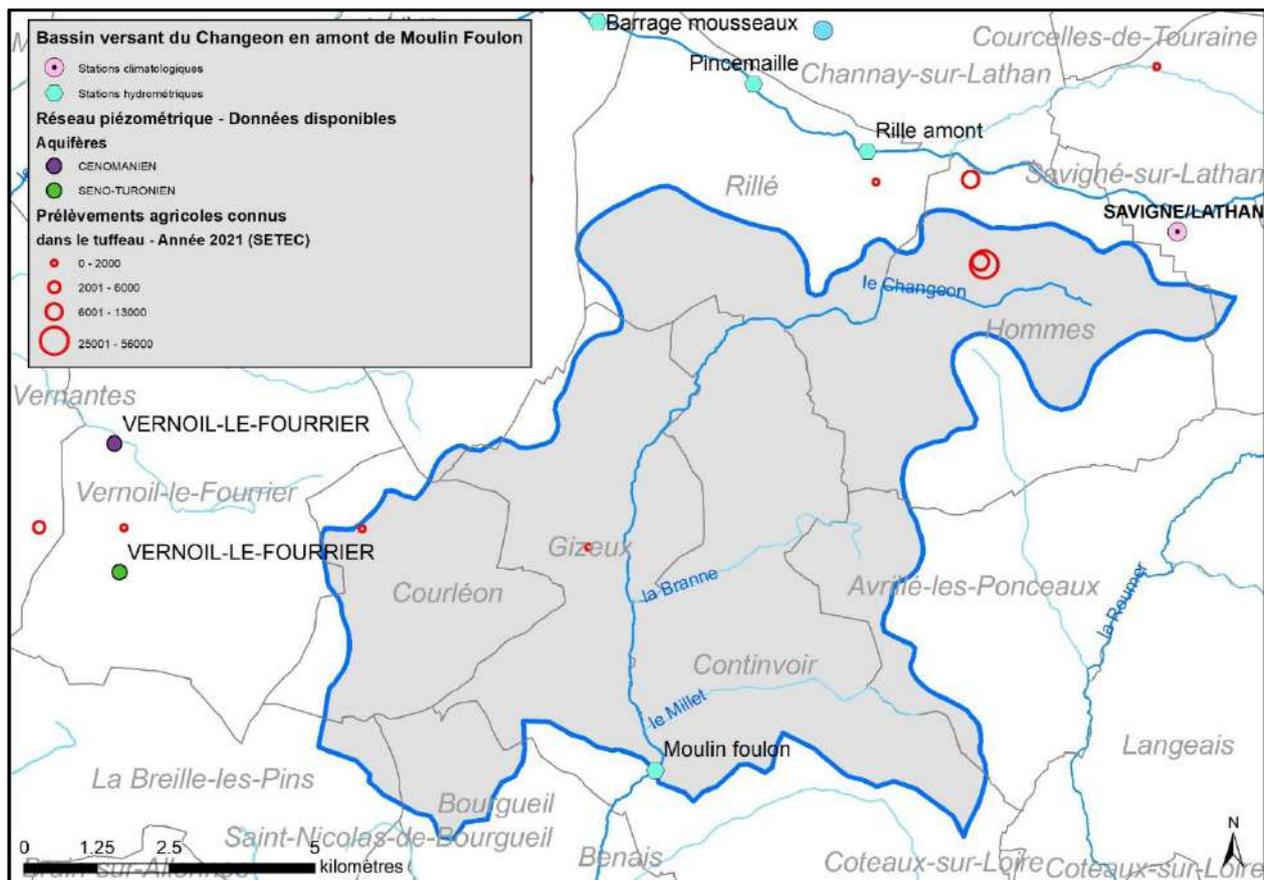


Illustration 21 : Données disponibles pour le bassin versant du Changeon.

L'irrigation est peu développée dans le bassin versant du Changeon, comparé aux bassins du Couasnon et du Lathan. Le § c) ci-dessus décrit la manière dont les prélèvements fournis par le SMBAA à partir des données de l'OUGC retravaillées par SETEC HYDRATEC ont été introduites dans le modèle du Changeon (méthode identique au Couasnon).

d) Résultats du calage réalisé

- **Coefficient de Nash**

Pour caractériser la performance du calage des modèles, nous donnons dans le Tableau 10 :

- Le coefficient de Nash entre la série temporelle de la racine carrée des débits simulés et la série temporelle des débits observés,
- Le coefficient de Nash entre la série temporelle des niveaux piézométriques simulés et la série temporelle des niveaux piézométriques observés,
- Le coefficient de Nash global, qui correspond à une moyenne pondérée des deux précédents.

Pour modéliser au mieux les niveaux piézométriques de l'aquifère séno-turonien à Vernoi-le-Fourrier (BSS001FFLW) et les débits du Changeon à Moulin Foulon, et afin de prendre en compte la présence des deux aquifères séno-turonien et éocènes (cf. § 3.2.3 a)), nous avons opté pour le schéma de modélisation à deux réservoirs proposé par GARDENIA© (cf. Illustration 1). Il donne par ailleurs de meilleurs résultats de calage que le schéma à un seul réservoir.

Désignation du modèle	Cours d'eau modélisé	Aquifère dont les niveaux piézométriques sont modélisés	Période de modélisation	Coefficient de Nash sur la racine carrée des débits	Coefficient de Nash des niveaux piézométriques	Coefficient de Nash global du modèle
BV Changeon	Changeon	Tuffeau sénoturonnien	2010-2024 avec 3 années de démarrage (2010-2012 non prises en compte dans le calcul du coefficient de Nash)	0.84	0.91	0.87

Tableau 10 : Résultats du calage du modèle : coefficients d'ajustement obtenus.

Plus le coefficient de Nash s'approche de la valeur 1, meilleur est le calage du modèle. Un modèle GARDENIA© est considéré comme « bien calé » lorsque le coefficient de Nash global est supérieur à 0,75. Dans le cas présent, avec un coefficient de Nash global de 0,87<sup>5</sup>, nous considérons que le calage du modèle est satisfaisant (Tableau 10).

• **Résultat graphique**

Le résultat graphique du calage figure sur les illustrations 22 à 24 ci-dessous.

Le modèle restitue de manière fidèle les débits journaliers du Changeon, notamment à l'étiage. Les chroniques observées et simulées s'avèrent très proches. Il restitue également de façon très satisfaisante les cycles annuels des niveaux journaliers de l'aquifère sénoturonnien. Il a tendance à surestimer les niveaux piézométriques des basses eaux, ce qui peut s'expliquer par le fait que la chronique piézométrique de Vernoi-le-Fourrier (bassin du Lathan) est peut-être influencée par les effets de prélèvements saisonniers.

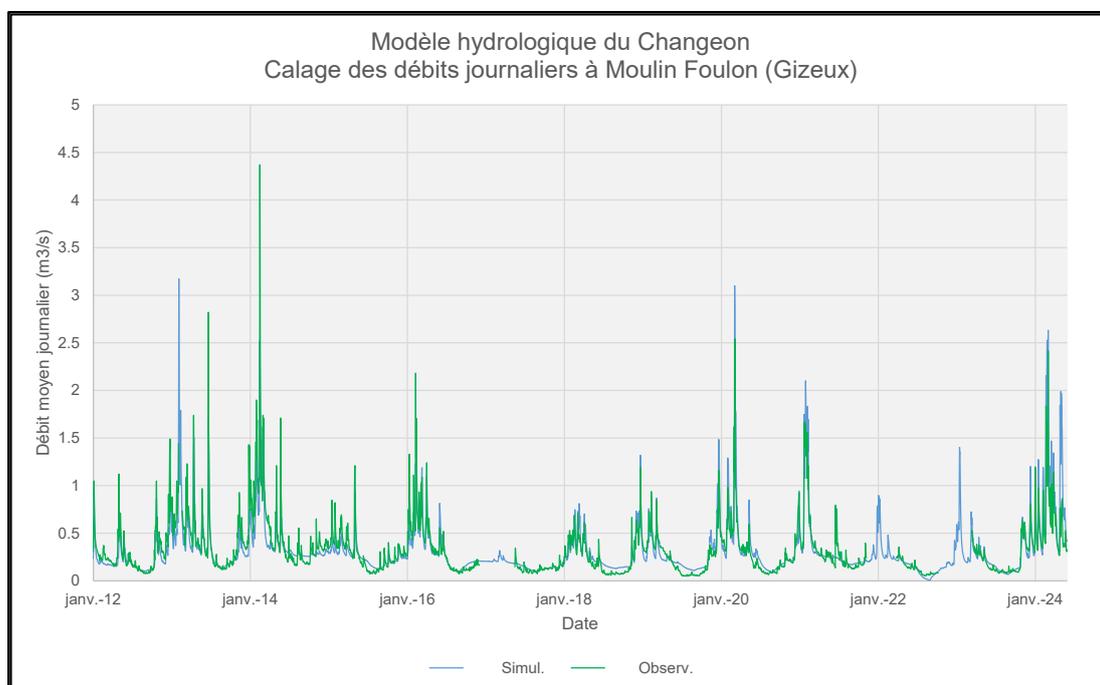


Illustration 22 : Ajustement des débits du Changeon (période 2012-2024)

<sup>5</sup> le coefficient de Nash global avec prise en compte des débits naturels (et pas leur racine carrée) est de 0,84 dans cet exemple, mais il est conseillé de calibrer le modèle en transformant les débits de rivière par leur racine carrée (Thiery, 2014).

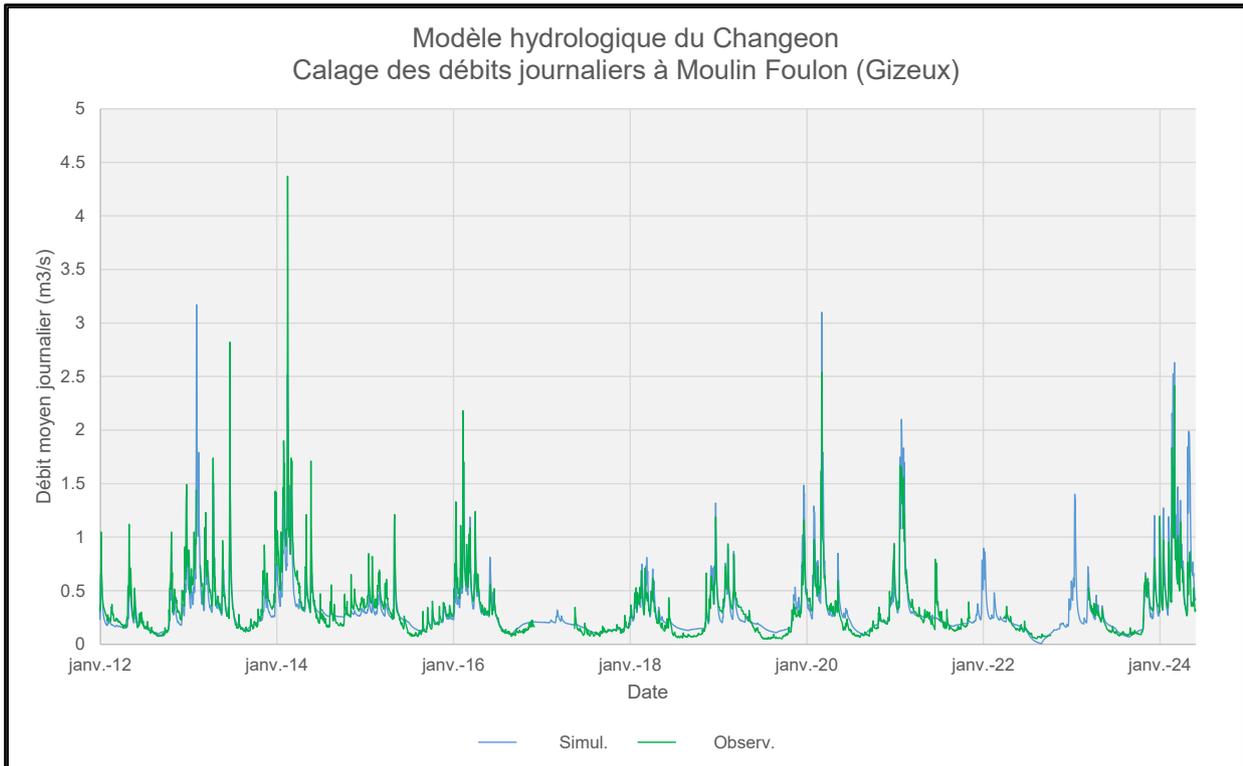


Illustration 23 : Ajustement des débits du Changeon (détail des années 2018-2023).

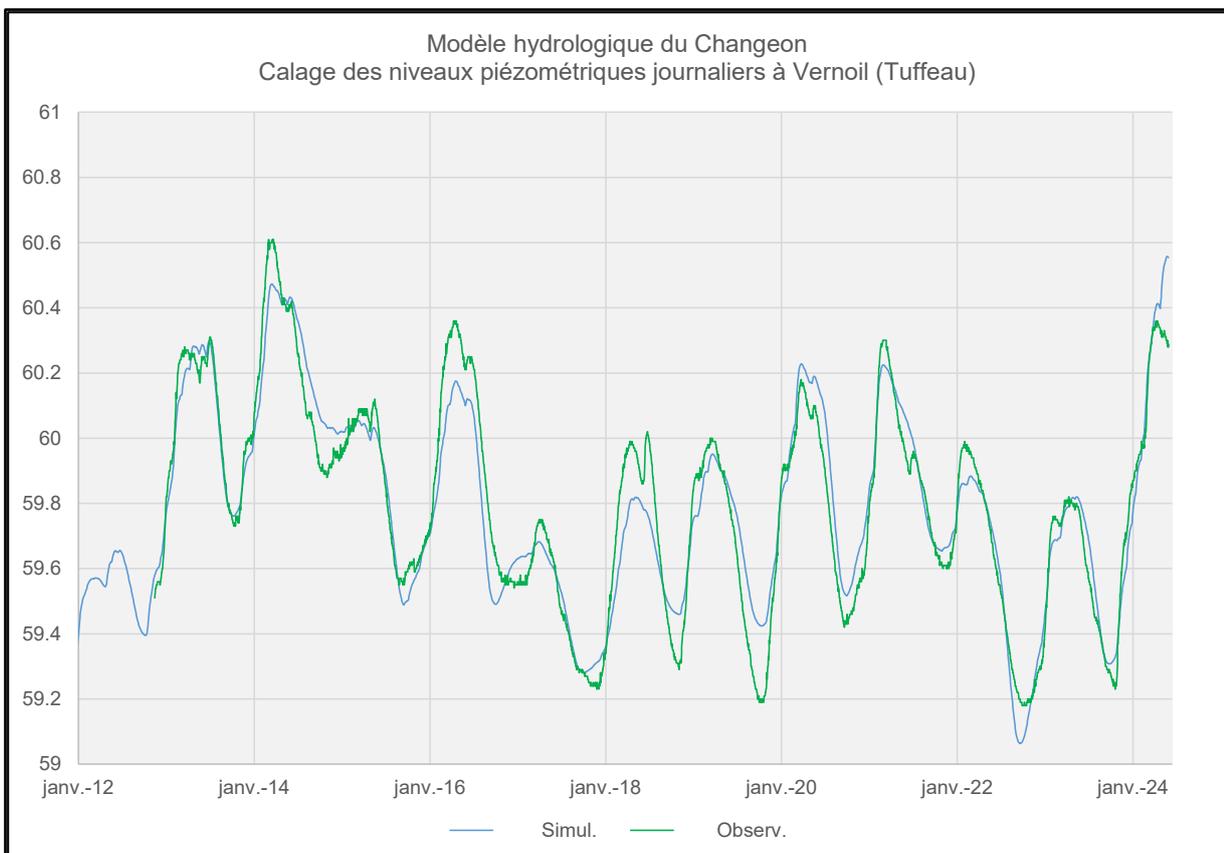


Illustration 24 : Ajustement des niveaux piézométriques du tuffeau à Vernoil-le-Fourrier (BSS001FFLW). Période 2012-2024

- **Résultats de calage**

Les paramètres de calage principaux obtenus sont les suivants :

- Superficie du bassin versant jaugé : 89,5 km<sup>2</sup>
- Débit extérieur (entrant ou sortant) : nul
- Transformation du débit par sa racine carrée pour la calibration
- Coefficient d'emmagasinement : 9,2 %, conforme aux valeurs attendues pour les sables cénomaniens inférieurs
- Niveau piézométrique de base de l'aquifère modélisé : 58,99 m NGF
- Coefficient de correction des pluies : nul
- Coefficient de correction de l'ETP : 7,8 %
- Capacité du réservoir sol progressif : 268,2 mm
- Hauteur d'équi-Ruissellement-Percolation du réservoir hypodermique H (Rui\_Perco) : 19,6 mm
- Temps de 1/2 percolation vers la nappe (T1/2\_Perco) : 0,35 mois
- Temps de 1/2 tarissement souterrain (rapide) [Réservoir G1] : 15 mois
- Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (T1/2\_Perco2) : 22,3 mois
- Temps de 1/2 tarissement souterrain lent [Réservoir G2] : 15 mois
- Prise en compte des prélèvements influençant les débits du Changeon et les niveaux de la nappe séno-turonienne.

### **3.3. EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS**

Dans la configuration conceptuelle retenue pour la modélisation, le débit moyen mensuel des cours d'eau (Couasnon, Lathan et Changeon) calculé par le modèle GARDENIA© est la somme d'un écoulement rapide, d'un écoulement lent, et d'un écoulement très lent (car les modèles comportent deux réservoirs souterrains). Sans information sur d'éventuels transferts (positifs ou négatifs) d'eau souterraine aux limites de la zone modélisée, on ne considère aucun échange souterrain avec l'extérieur du bassin, latéralement ou « sous » la section de jaugeage.

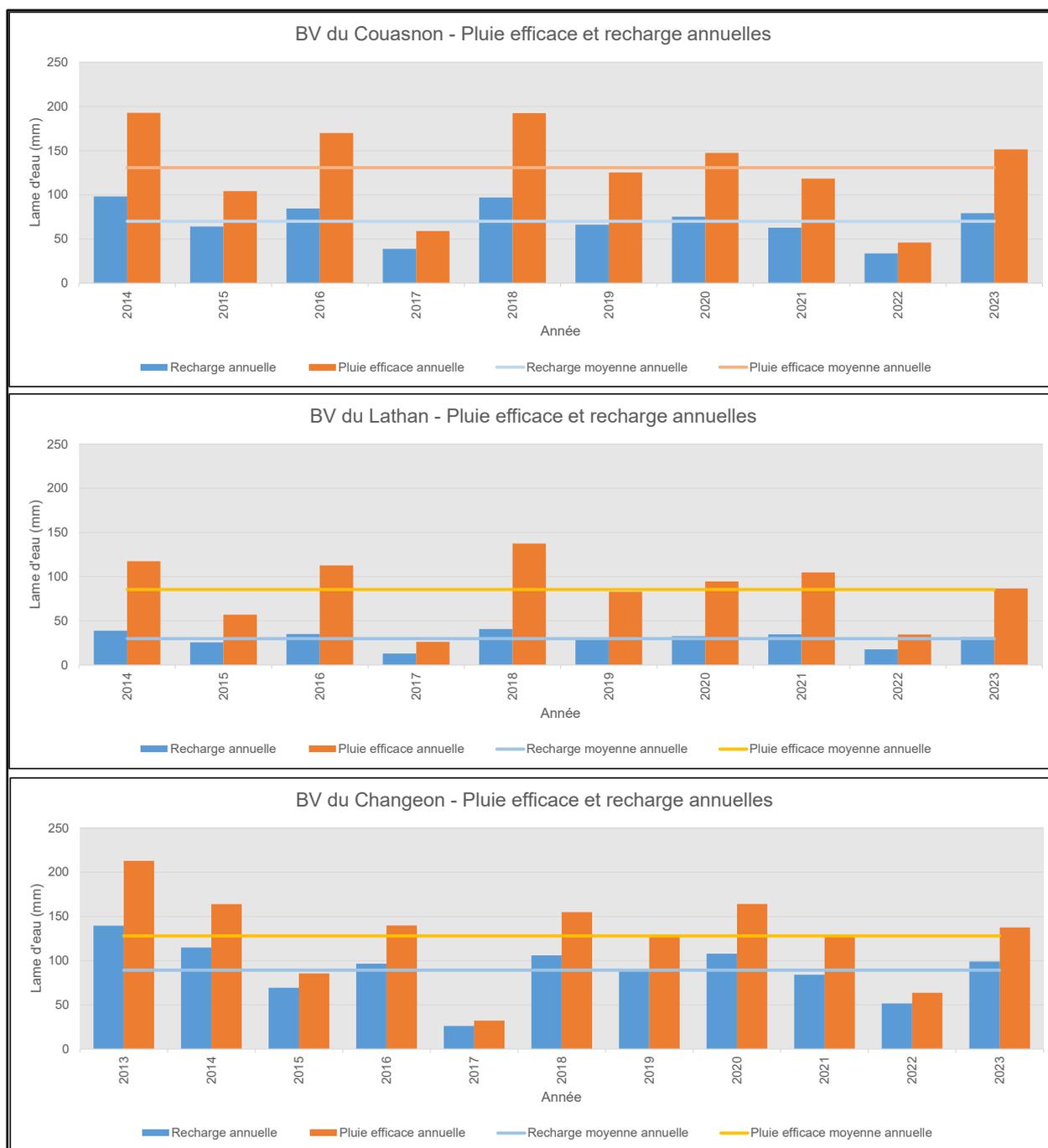
La contribution moyenne mensuelle des eaux souterraines au débit des cours d'eau peut ainsi être approchée en calculant le rapport entre le débit des écoulements lent et très lent et le débit total du cours d'eau simulé. Il est possible d'effectuer le même calcul sur une période d'intérêt donnée, comme la période du 1<sup>er</sup> juin au 31 août qui correspond en règle générale à la période d'irrigation.

#### **3.3.1. Pluie efficace et recharge**

Les modèles hydrologiques calculent la pluie efficace annuelle (= ruissellement + recharge) et la recharge annuelle. Elles sont du même ordre de grandeur pour le Couasnon et le Changeon, mais plus faibles pour le Lathan (Tableau 11 et Illustration 25).

	Recharge moyenne annuelle (mm)	Pluie efficace moyenne annuelle (mm)
Couason (2014-2023)	70	131
Lathan (2014-2023)	42	91
Changeon (2013-2023)	89	128

Tableau 11 : Pluie efficace et recharge moyennes annuelles.



*Illustration 25 : Pluie efficace et recharge annuelles.*

On mesure bien le contraste qui peut exister dans ces trois bassins versants entre les années où les pluies efficaces sont élevées (>150 mm, comme en 2014 et 2018) et celles où elles sont particulièrement faibles (< 50 mm, comme en 2017).

Par ailleurs, en dépit de pluies annuelles brutes comparables à celles d'autres bassins versants modélisés dans de précédentes études selon une méthodologie identique (Chrétien 2022 et 2023 et Chrétien & Seguin 2024), les trois bassins modélisés dans le bassin de l'Authion se placent parmi ceux où les pluies efficaces sont les plus faibles (Tableau 12 et Illustration 26). L'évapotranspiration étant peu variable en plaine, elle n'explique pas ce constat, qui est sans doute plutôt lié à la pression des prélèvements (et les incertitudes liées à leur prise en compte dans un modèle global comme Gardenia, qui ne permet pas la localisation précise des points de prélèvements).

À cet égard le Lathan se singularise particulièrement, avec des pluies efficaces moyennes annuelles significativement plus faibles que les autres bassins versants. La pression de l'irrigation dans ce bassin versant, et le contrôle anthropique des débits du Lathan (lâchers d'eau à partir de la retenue de Pincemaille) incitent néanmoins à la prudence dans l'interprétation des résultats du modèle.

Désignation du modèle	Cours d'eau modélisé	Aquifère dont les niveaux piézométriques sont modélisés	Pluie efficace moyenne annuelle	Recharge moyenne annuelle	Pluie brute moyenne annuelle
Couasnon SénoTuro	le Couasnon	Craie séno-turonienne	131	70	658
Lathan Céno	le Lathan	Sables cénomaniens	91	42	706
Changeon Séno-Turo	le Changeon	Craie séno-turonienne	128	89	710
HYROME	l'Hyrôme	Socle	183	50	863
CULLOTERIE2	la Gée	Calcaires du Dogger	196	104	815
LATOUCHE2	la Vègre (socle)	Socle	279	191	789
SAVIGNE	la Vive-Parence	Sables cénomaniens	166	12	789
CAMP_BRETON	le Berdin	Calcaires du Dogger	250	27	778
ARGANCE	l'Argance	Sables cénomaniens	139	57	711
PENVERT	la Bienne	Calcaires du Dogger	190	36	687
PENVERT2	l'Orne saosnoise	Calcaires du Dogger	231	122	687
CONTERIE	la Tortue	Craie séno-turonienne	168	108	683
MENUEAU	l'Orne champenoise	Calcaires du Dogger	188	90	683
BOIS_NEVILLAY	le Loir	Sables cénomaniens	223	155	635
LACAVE	l'Aune	Sables cénomaniens	209	136	635
RICHARDIERE	la Vègre (Jurassique)	Calcaires du Dogger	197	77	635
VAUXDUPUIS	la Veuve	Sables cénomaniens	153	86	635
CONTERIE2	le Narais	Craie séno-turonienne	140	108	615
<b>Moyenne tous modèles</b>			<b>181</b>	<b>87</b>	<b>706</b>

Tableau 12 : Pluie efficace et recharge moyennes annuelles calculées au moyen de modèles GARDENIA© dans plusieurs bassins versants des Pays-de-la-Loire (adapté de Chrétien & Seguin, 2024)

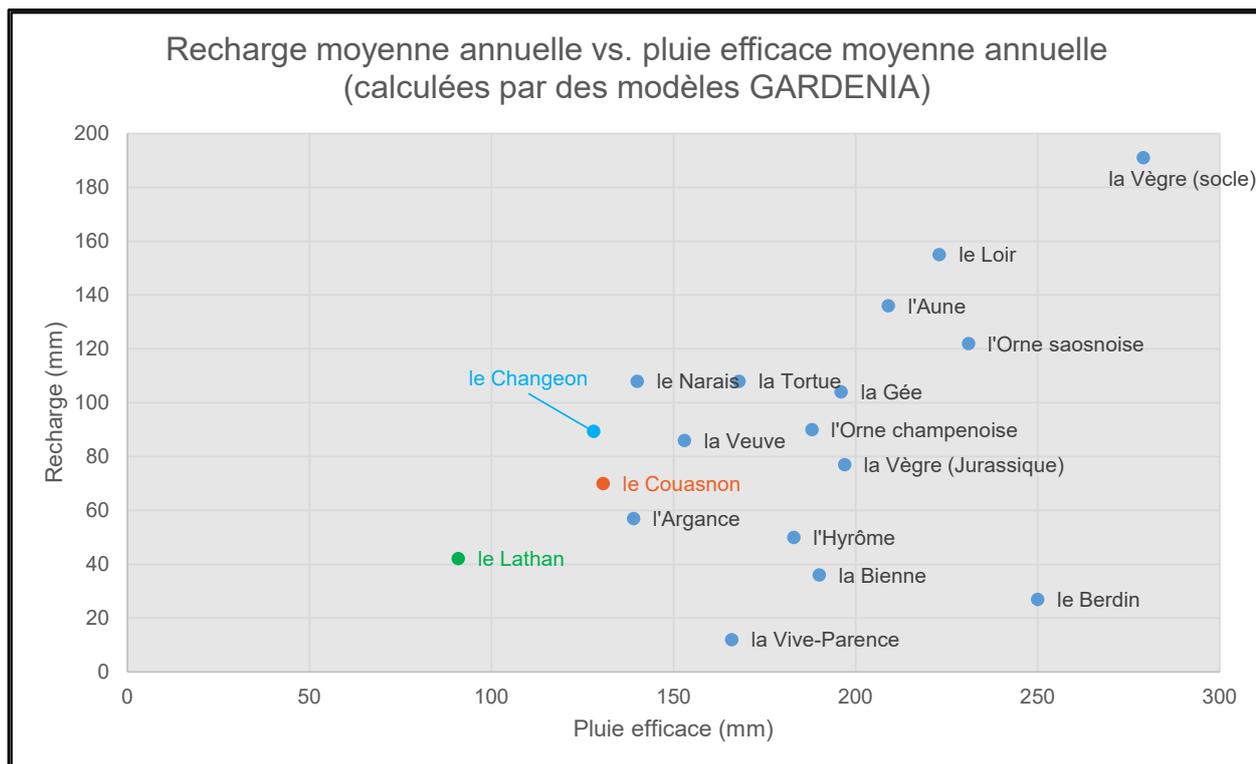


Illustration 26 : Recharge moyenne annuelle des nappes vs. pluie efficace moyenne annuelle, par bassin versant (adapté de Chrétien & Seguin, 2024).

### 3.3.2. Estimation de la contribution des nappes aux débits des cours d'eau

Pour reproduire les débits ( $Q$ ) observés, le modèle GARDENIA© décompose l'écoulement du cours d'eau en une composante rapide, une composante lente et une composante très lente. Les écoulements lents et très lents du bilan hydrologique sont assimilés à un écoulement souterrain, tandis que l'écoulement rapide est assimilé à un écoulement superficiel. Il s'agit d'une approximation, qui est acceptable dans le cas des modèles développés ici car ils sont calibrés (calés) simultanément sur une série de débits à l'exutoire et sur une série de niveaux piézométriques représentatifs.

$$Q_{\text{rivière}} = Q_{\text{écoulement rapide}} + Q_{\text{écoulement lent}} + Q_{\text{écoulement très lent}}$$

$$Q_{\text{écoulement rapide}} \approx Q_{\text{superficiel}} \approx \text{ruissellement}$$

$$Q_{\text{écoulement lent}} + Q_{\text{écoulement très lent}} \approx Q_{\text{souterrain}} \\ \approx \text{composante du débit assuré par la vidange de l'aquifère}$$

Ainsi, la contribution des eaux souterraines au débit du cours d'eau est obtenue en divisant le débit de l'écoulement souterrain modélisé par le débit du cours d'eau simulé par le modèle.

Annuellement, sur la période modélisée, la contribution moyenne des eaux souterraines au débits des cours d'eau atteint :

- 54% pour le Couasnon ;
- 51% pour le Lathan ;
- 67% pour le Changeon.

En Annexe 3 figure le détail mensuel au cours de la période modélisée de cette contribution (les années qui ne sont pas prises en compte pour le calage du modèle sont exclues), exprimée en pourcentage et en lame d'eau (mm), pour chacun des bassins versants modélisés. Le Tableau 13 et les graphes ci-dessous (Illustration 27 et suivantes) en font la synthèse.

	Contribution relative des nappes (% du débit du cours d'eau)			Contribution absolue des nappes (lame d'eau en mm)		
	Couasnon	Lathan	Changeon	Couasnon	Lathan	Changeon
Janvier	41%	42%	56%	6.6	4.7	7.2
Février	42%	38%	51%	5.7	4.3	7.0
Mars	45%	39%	64%	6.5	4.7	8.1
Avril	62%	55%	85%	6.4	4.6	8.0
Mai	72%	65%	83%	6.6	4.7	8.3
Juin	75%	66%	91%	6.2	4.6	7.9
Juillet	91%	81%	99%	6.3	4.8	7.8
Août	98%	92%	99%	6.1	4.7	7.5
Septembre	97%	97%	99%	5.7	4.5	7.0
Octobre	90%	96%	97%	5.7	4.7	7.0
Novembre	71%	77%	85%	5.4	4.5	6.6
Décembre	49%	54%	68%	5.6	4.6	7.0

Tableau 13 : Contribution mensuelle de l'aquifère au débit des cours d'eau – Moyenne sur la période modélisée.

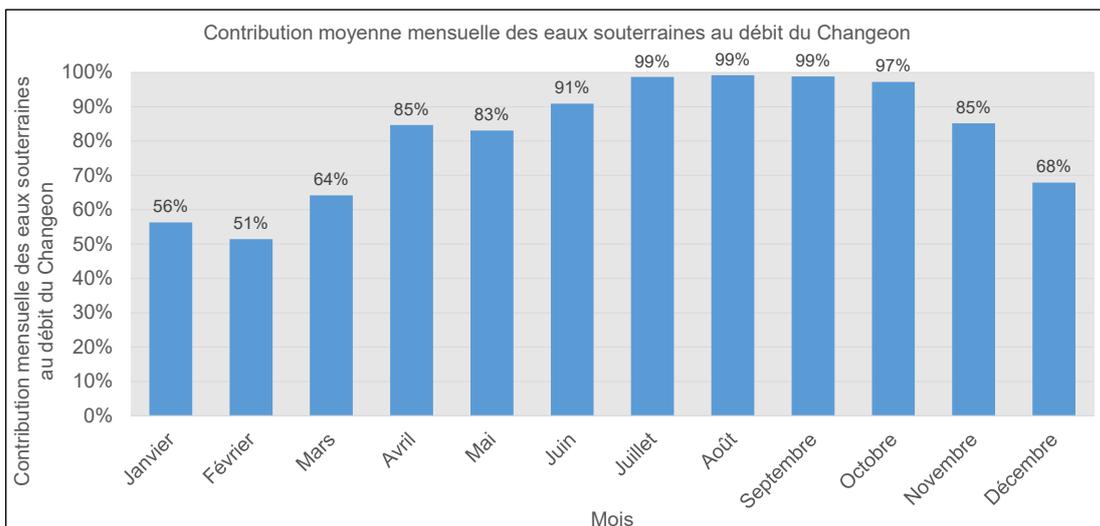
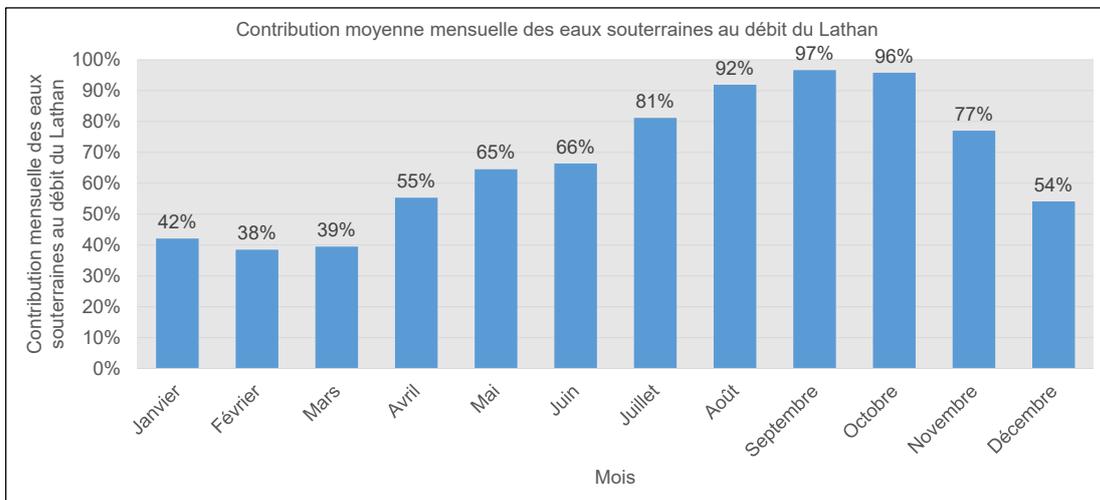
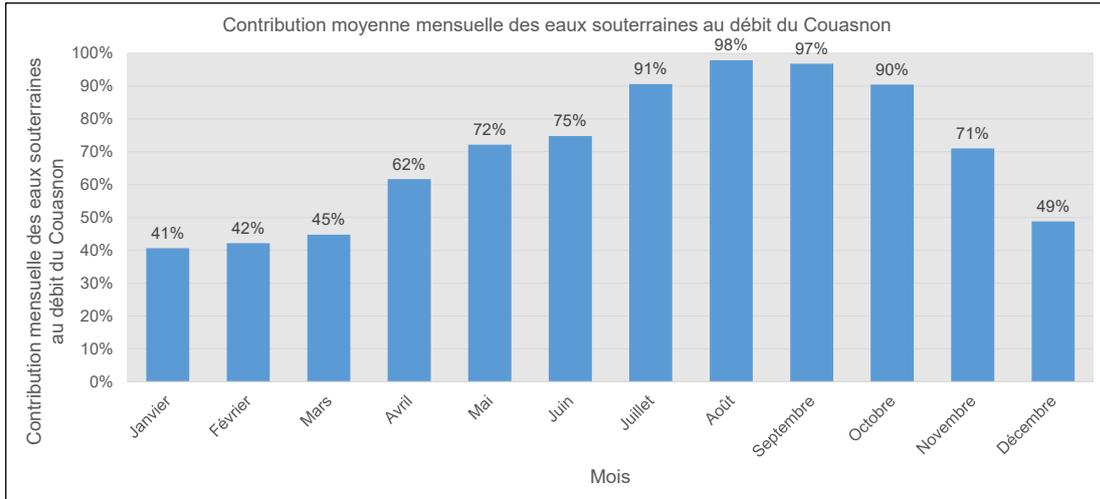


Illustration 27 : Histogrammes de la contribution moyenne mensuelle des eaux souterraines au débit du Couason, du Lathan et du Changeon.

**La décomposition mensuelle indique que la contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau (en proportion) est significative toute l'année (Illustration 28, Illustration 29**

et Illustration 30). Du mois de mai à l'automne, les eaux souterraines jouent un rôle fondamental pour le maintien d'un débit dans les cours d'eau, puisqu'elles assurent alors au moins les 3/4 du débit. C'est encore plus marqué dans le bassin du Changeon, où les nappes contribuent à hauteur de 4/5 du débit d'avril à novembre.

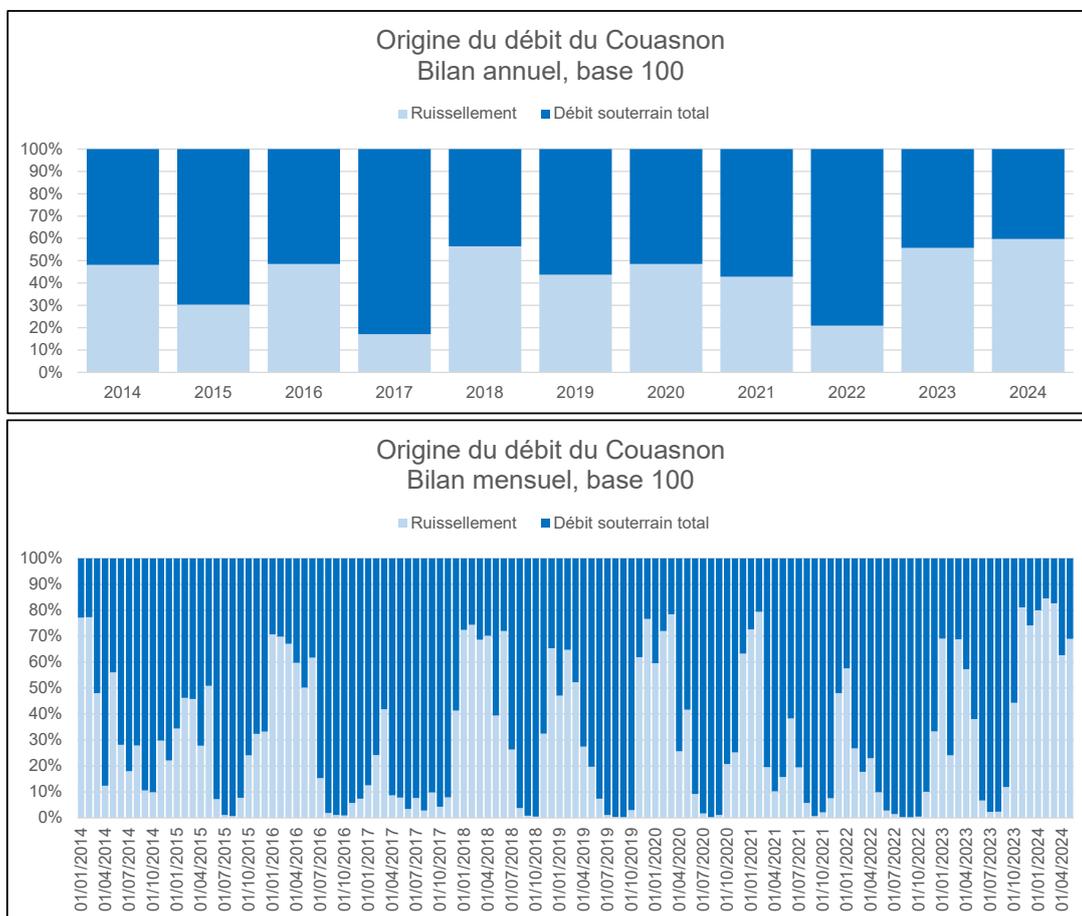


Illustration 28 : Répartition entre ruissellement et contribution des nappes dans le débit du Couason, annuellement et mensuellement.

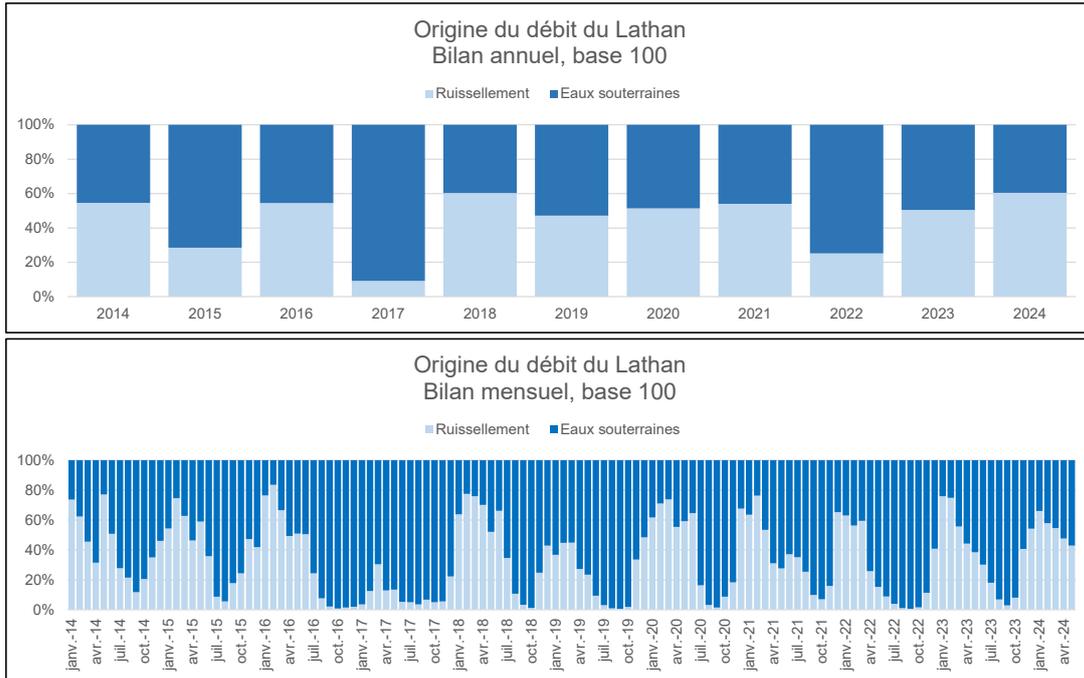


Illustration 29 : Répartition entre ruissellement et contribution des nappes dans le débit du Lathan, annuellement et mensuellement.

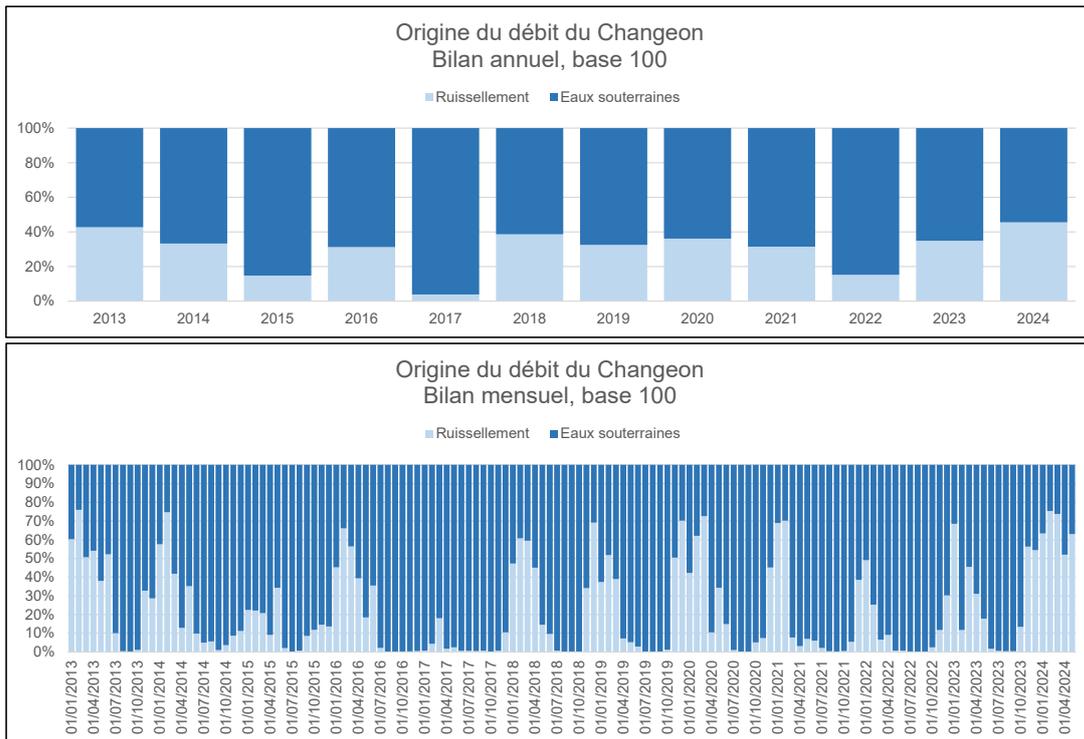


Illustration 30 : Répartition entre ruissellement et contribution des nappes dans le débit du Changeon, annuellement et mensuellement.

## 4. Zones propices à la recharge des aquifères

### 4.1. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

La méthodologie décrite dans le § 4.2 s'appuie sur des travaux antérieurs destinés le plus souvent à cartographier la capacité d'infiltration des sols, notion sémantiquement proche de l'aptitude à la recharge des aquifères. Dans le cadre du projet DésiVille (Prézeau et collab., 2004), une synthèse bibliographique de méthodes employées a été réalisée par le BRGM.

Lorsque le travail aboutit à une carte d'infiltrabilité (ce n'est pas le cas de tous les travaux consultés), la méthode principalement employée repose sur une analyse multicritère (AMC). Le CEREMA a publié un guide du zonage pluvial, qui décrit l'élaboration de carte d'aptitude à l'infiltration basé sur une AMC (CEREMA, 2020). Le projet MUSE piloté par l'ADEME en collaboration avec d'autres organismes (CEREMA, INRAE, IRSTV, BRGM, Univ Aix-Marseille, CEREGE, Chambre d'agriculture de l'Indre) propose quant à lui une méthode partiellement fondée sur une AMC (Branchu et collab., 2021).

D'autres méthodes s'appuient sur :

- La modélisation de scénarios de gestion des eaux pluviales (Bonneau et collab., 2022),
- Le cumul d'informations (Belbeze, 2022) – méthode proche d'une AMC,
- Des méthodes de télédétection à partir d'imagerie satellitaire SPOT (Dornier et collab., 2001, Desprats & Dutartre 1994).

Dans la bibliographie consultée, les cartes d'infiltrabilité issues d'une AMC concernent les territoires suivants :

- Bassin versant de l'Hérault (Dornier et collab., 2001)
- Libourne (Bouvard, 2021)
- Angoulême (Bouvard, 2021)
- Communauté Urbaine de Strasbourg (Petter, 2013 et Urban, 2011)
- Rennes Métropole (Pinson & Bault, 2019)
- Grand Lyon (Vallin et collab., 2016)
- Bordeaux Métropole (Pierlot et collab., 2016)
- Toulouse (Belbeze 2022)
- Département des Hauts-de-Seine (Pierlot et collab., 2011)
- Nantes Métropole (Conil & Plat, 2015)
- Renens (Poyat, date inconnue)

En Annexe 1 figure un tableau synthétique comparant les diverses méthodes employées dans le cadre de ces travaux.

Par ailleurs, le BRGM et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse ont lancé en 2018 un projet de recherche « Etude de la faisabilité de la recharge artificielle sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (RMC) » dans le cadre d'une convention de partenariat entre les deux établissements (Caballero et collab., 2018).

Parmi ces travaux, ceux réalisés par le BRGM pour la métropole rennaise (Pinson & Bault, 2019a) et pour le bassin RMC (Caballero et collab., 2018) semblent les plus pertinents, pour les raisons suivantes :

- Les méthodes employées reposent sur une analyse multicritère qui prend explicitement en compte les trois critères les plus souvent retenus : perméabilité des sols, épaisseur de la zone non saturée (ZNS) et pente des terrains ;
- Le caractère ruisselant ou infiltrant des sols est pris en compte de manière implicite puisque les valeurs de l'IDPR<sup>6</sup> sont moyennées au sein d'unités fonctionnelles qui sont définies sur la base des contours des UCS<sup>7</sup> (Rennes) ou des entités BDLISA<sup>8</sup> (bassin RMC) ;
- La méthodologie, reproductible au sein d'autres territoires d'échelle comparable, est précisément et exhaustivement décrite dans un rapport disponible en ligne ([BRGM/RP-68599-FR](#) et [BRGM/RP-67534-FR](#)).

## 4.2. METHODOLOGIE RETENUE

Compte-tenu de ce qui précède, du contexte hydrogéologique du territoire et des données disponibles, le BRGM et le SMBAA ont retenu comme critères pertinents pour cartographier les zones propices à la recharge des aquifères :

- L'épaisseur de la zone non saturée ;
- La perméabilité des entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement ;
- La pente des terrains ;
- La capacité d'infiltration des entités hydrogéologiques présentes à l'affleurement au moyen de l'IDPR.

En tout point du bassin versant de l'Authion, on attribue une note aux terrains, allant de 0 (très défavorable) à 4 (très favorable). La manière avec laquelle les notes ont été attribuées est décrite dans le paragraphe 4.3.

Ces notes décrivent la contribution particulière du critère considéré en un point donné du bassin versant de l'Authion à l'aptitude à la recharge des aquifères. La moyenne des quatre notes ainsi obtenues détermine la classe d'aptitude finale des terrains du bassin versant.

## 4.3. DESCRIPTION DES DONNEES PRISES EN COMPTE

### 4.3.1. Zone non saturée (ZNS)

L'épaisseur de la zone non saturée correspond à l'épaisseur de terrain entre le sol et la surface de la nappe, c'est-à-dire à la profondeur de la nappe (Illustration 31).

---

<sup>6</sup> Indice de développement et de persistance des réseaux

<sup>7</sup> Unités cartographiques de sol

<sup>8</sup> Base de données des limites des systèmes aquifères

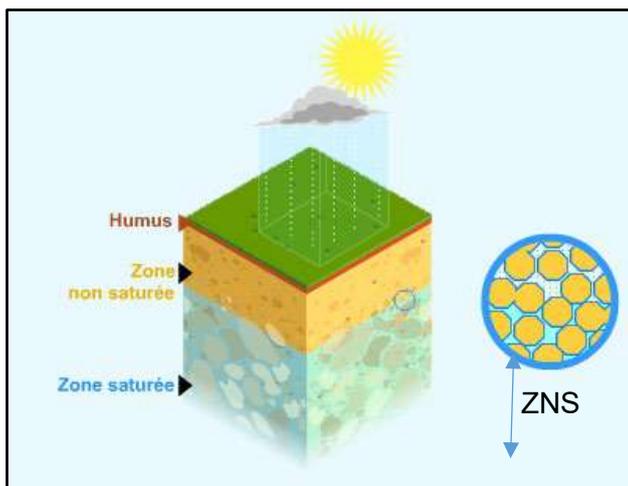


Illustration 31 : Zone non saturée d'un aquifère.

Plus l'épaisseur de la zone non saturée est grande, plus l'entité hydrogéologique dispose d'une capacité potentielle de stockage de l'eau. Ainsi, pour caractériser l'aptitude à la recharge des aquifères, la note attribuée au critère ZNS augmente avec l'épaisseur de la ZNS.

Valeur ZNS	Note	Classe
< 2 m	1	Défavorable
2 - 4 m	2	Peu favorable
4 - 7 m	3	Favorable
> 7 m	4	Très favorable

Tableau 14 : Classification du critère ZNS pour l'AMC destinée à cartographier les zones propices à la recharge des aquifères.

Le Tableau 14 détaille la classification du critère ZNS qui sera utilisée par la suite pour réaliser l'analyse multicritère. Elle est le fruit d'une réflexion entre les propositions des études antérieures (Lucassou, 2023 et Caballero, 2018) et la variabilité des valeurs de ZNS rencontrées dans le bassin versant de l'Authion.

Cette information est disponible grâce à un travail que le BRGM a mené pour tout le bassin Loire-Bretagne (Pinson et collab., 2019b), pour les basses eaux et les hautes eaux. Par précaution, les hautes eaux étant essentiellement moins favorables que les basses eaux pour noter le critère ZNS, on utilise les hautes eaux pour cartographier ce critère (Illustration 32).

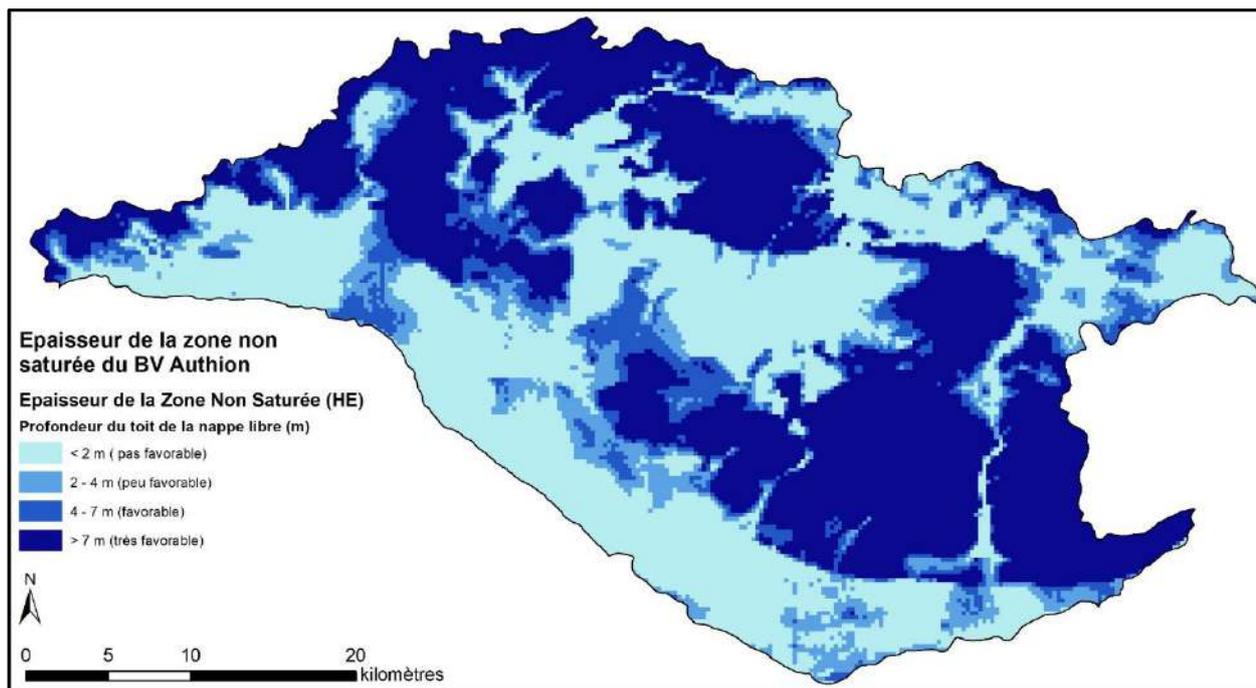


Illustration 32 : Cartographie de la zone non saturée en période de hautes eaux dans le bassin versant de l'Authion.

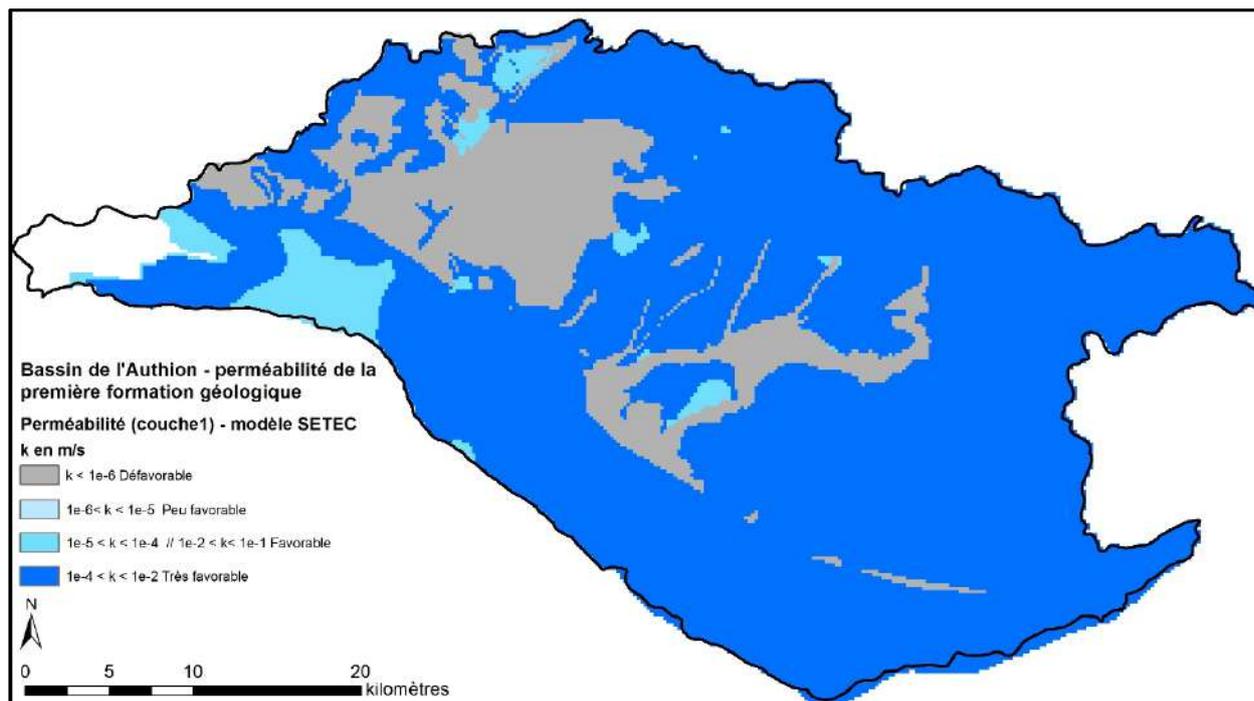
#### 4.3.2. Perméabilité de la formation présente à l’affleurement

Dans le cadre de la révision de l’étude des volumes prélevables du bassin versant de l’Authion, le bureau d’études SETEC HYDRATEC, prestataire du SMBA, a conçu en 2024 un modèle maillé des écoulements souterrains du territoire (à l’exception de l’extrémité occidentale du bassin versant de l’Authion où les formations sédimentaires sont absentes). Ce modèle a nécessité de cartographier la distribution spatiale des perméabilités des entités hydrogéologiques sédimentaires en présence, que nous avons utilisée pour les besoins de la cartographie du critère perméabilité (Illustration 33). Elles sont issues du processus de calage du modèle maillé.

Nous proposons quatre classes de perméabilités, en reprenant celles de l’étude du bassin RMC (Caballero, 2018). Les aquifères doivent permettre un bon écoulement de l’eau, mais sans que celui-ci ne se fasse trop rapidement, dans la mesure où l’on recherche les secteurs qui stockeront l’eau dans la durée (c’est-à-dire sans la restituer trop rapidement au réseau hydrographique, par exemple). Ainsi, les fortes perméabilités sont aussi un facteur déclassant du critère perméabilités (Tableau 15).

Valeur k (m/s)	Note	Classe
< 1e -6	1	Défavorable
1e-6 < k < 1e-5	2	Peu favorable
1e-5 < k < 1e-4	3	Favorable
1e-2 < k < 1e-1		
1e-4 < k < 1e-2	4	Très favorable

Tableau 15 : Classification du critère « perméabilité ».



*Illustration 33 : Distribution spatiale des perméabilités issues du modèle maillé conçu par SETEC HYDRATEC (2024).*

Dans la partie occidentale du bassin où les entités hydrogéologiques à l’affleurement appartiennent au Massif armoricain et n’ont pas été modélisées par SETEC HYDRATEC, la note peu favorable est attribuée. En effet, les perméabilités des formations de socle métamorphiques sont généralement comprises en  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$   $m.s^{-1}$  dans des contextes hydrogéologiques similaires (Chrétien, 2018).

En définitive, 78% de la surface du bassin versant est occupée par des entités hydrogéologiques à l’affleurement dont les perméabilités appartiennent à la classe « très favorable », tandis que 16% appartiennent à la classe « défavorable ». Les classes « peu favorable » et « favorable » occupent quant à elles respectivement 2 et 4 % de la surface du bassin versant (Illustration 33).

#### 4.3.3. Pente des terrains

La pente du sol joue un rôle important dans les écoulements de surface, mais aussi sur les capacités d’infiltration (Lucassou et collab., 2023). En effet, une pente trop importante empêche les stockages d’eau et réduit ainsi la possibilité pour l’eau de pluie de pénétrer dans le sol, au profit de son évacuation vers l’aval par ruissellement.

Pour les besoins de l’étude, la pente a été calculée à partir du MNT (Modèle Numérique de Terrain) fourni par l’IGN au pas de 5 m, au moyen d’un logiciel SIG (Illustration 34).

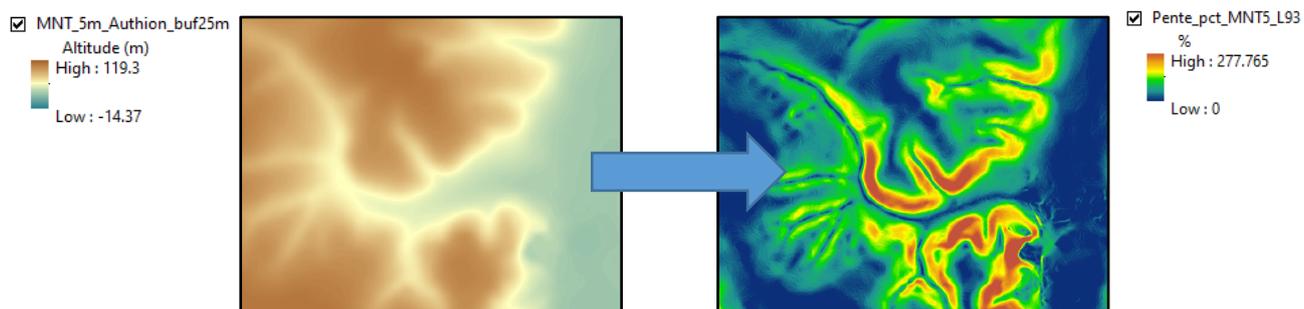


Illustration 34 : Schéma illustrant le passage du MNT 5 m de l'IGN vers une carte des pentes (%).

Nous proposons quatre classes de pente (Tableau 16), en reprenant celles de l'étude du bassin RMC (Caballero, 2018). La carte des pentes résultant de cette classification figure en Illustration 35.

Valeur pente (%)	Note	Classe
> 30	1	Défavorable
30 < p < 8	2	Peu favorable
8 < p < 3	3	Favorable
3 < p < 0	4	Très favorable

Tableau 16 : Classification du critère « pente des terrains ».

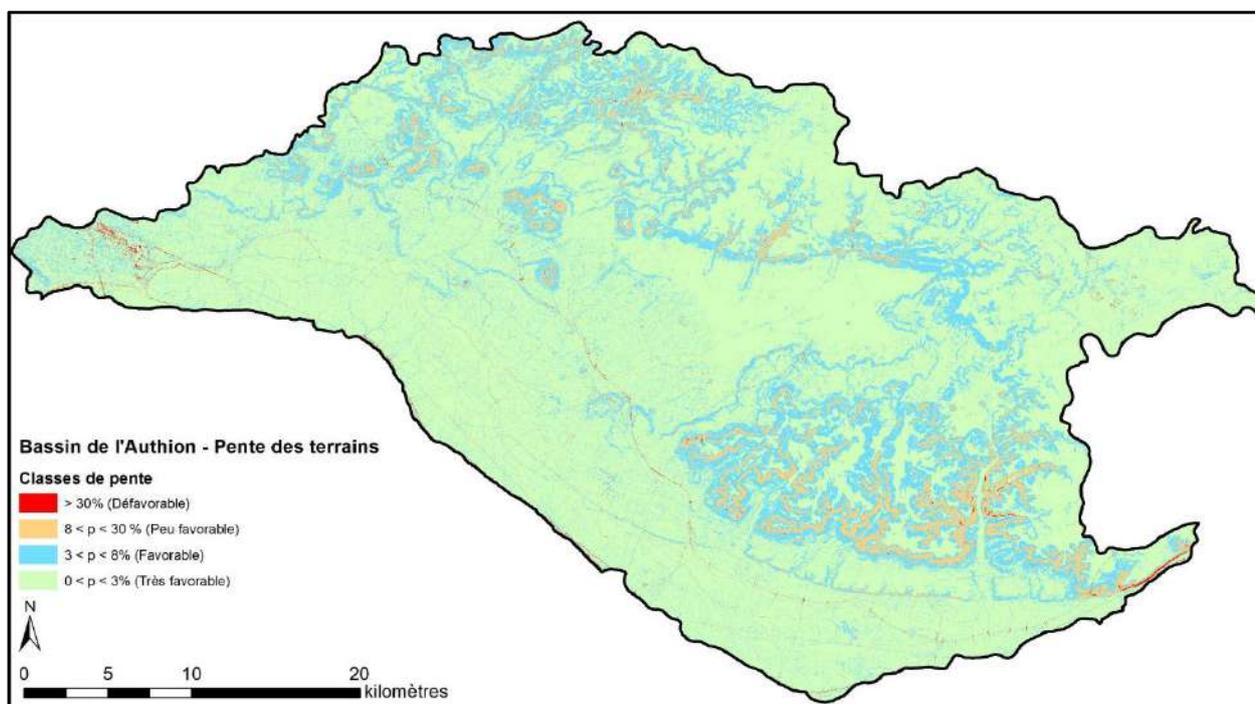


Illustration 35 : Distribution spatiale des pentes issues du MNT au pas de 5 m de l'IGN.

#### 4.3.4. Capacité d'infiltration des terrains

L'Indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) a été déployé par le BRGM (Corbier et Mardhel, 2004) pour qualifier un territoire en termes de « chemins empruntés » par les eaux météoriques. L'eau qui se répand à la surface des terrains naturels (qui n'est pas absorbée par les plantes ou soumise à une évaporation directe), quitte son bassin versant de deux manières distinctes :

- Elle ruisselle à la surface, se concentre dans les ruisseaux et les rivières et quitte le bassin à la faveur d'un exutoire de surface ;
- Elle s'infiltré dans le sous-sol, se concentre dans un aquifère puis quitte le bassin par un exutoire souterrain ou par une rivière dans le cas où les eaux souterraines soutiennent cette rivière.

**L'IDPR** est un indice sans unité qui **caractérise l'aptitude qu'a une unité de surface à ruisseler ou infiltrer les eaux météoriques**. Il est par exemple souvent utilisé dans les études de vulnérabilité des aquifères. Il est basé sur une approche géomorphologique qui compare le réseau hydrographique réel avec le réseau hydrographique théorique élaboré à partir du MNT (Caballero, 2018). Il s'échelonne de 0 (totalement infiltrant) à 2 000 (totalement ruisselant).

Les terrains les plus infiltrants sont les plus propices à la recharge des aquifères (Tableau 17).

Valeur IDPR (hors alluvions Loire Authion)	Note	Classe
> 1400	1	Défavorable
1000 < IDPR < 1400	2	Peu favorable
600 < IDPR < 1000	3	Favorable
< 600	4	Très favorable

Tableau 17 : Classification du critère « capacité d'infiltration des terrains ».

L'IDPR est disponible à une résolution de 25 m (Illustration 36), mais est préférentiellement utilisé sous forme polygonale, classiquement en utilisant les polygones de la carte géologique harmonisée au 1/50 000.

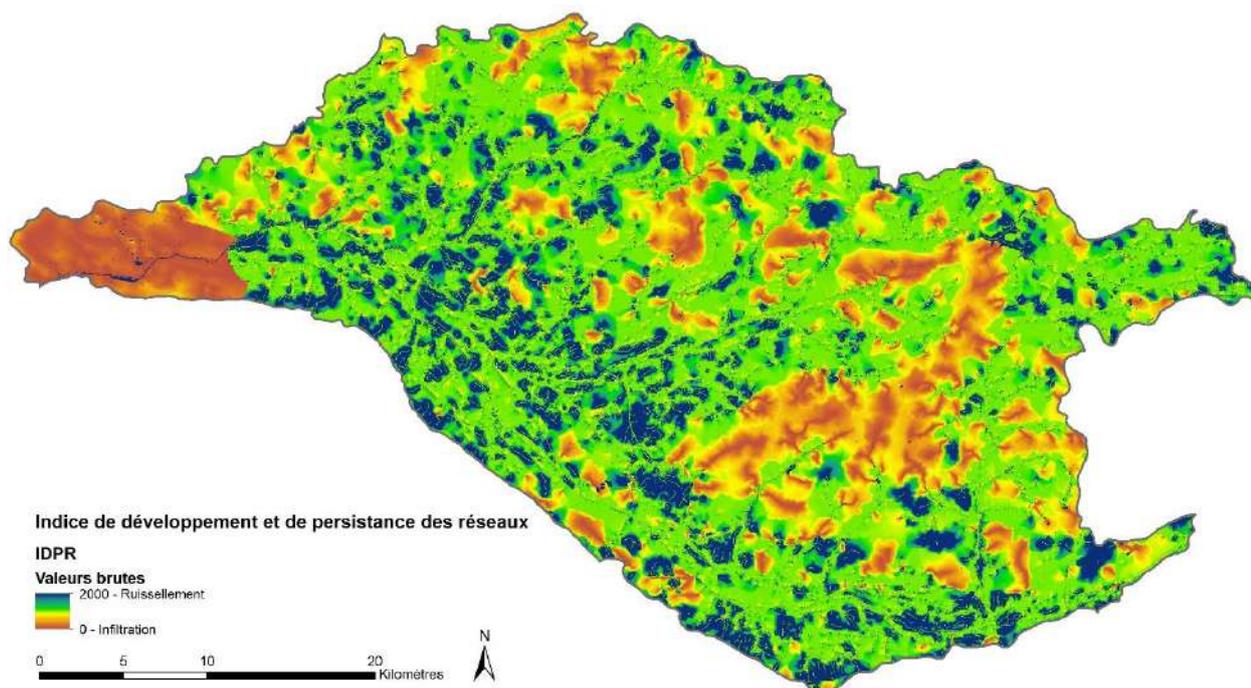


Illustration 36 : Valeurs brutes de l'IDPR dans le bassin versant de l'Authion.

Afin de cartographier la capacité d'infiltration des terrains du bassin versant de l'Authion, une valeur moyenne de l'IDPR pour chaque formation géologique présente a été calculée (Illustration 37). C'est à cette valeur moyenne de l'IDPR par formation géologique qu'est ensuite attribuée une note, conformément au Tableau 17.

### **Cas spécifique des alluvions de l'Authion et de la Loire**

L'IDPR ne doit pas être utilisé dans les alluvions. Au niveau des alluvions de l'Authion et de la Loire, une autre approche a été utilisée. Grâce aux informations contenues dans les notices explicatives des cartes géologiques au 1/50 000 qui couvrent les alluvions de l'Authion et de la Loire, confirmées par les logs géologiques validées de la BSS, la jalle a été grossièrement délimitée. Il s'agit d'une couche d'argiles de teinte sombre, épaisse de quelques mètres, et séparant les alluvions supérieures et inférieures. Elle joue le rôle de couche semi-imperméable et constitue un écran entre les horizons aquifères (cf. notices des cartes géologiques de Saumur, Thouarcé, Longué et Angers), diminuant de ce fait la capacité d'infiltration de l'horizon alluvionnaire.

Les alluvions peuvent être considérées comme infiltrantes. La note 3 leur est attribuée, sauf là où la présence de la jalle est documentée, où la note 2 est attribuée.

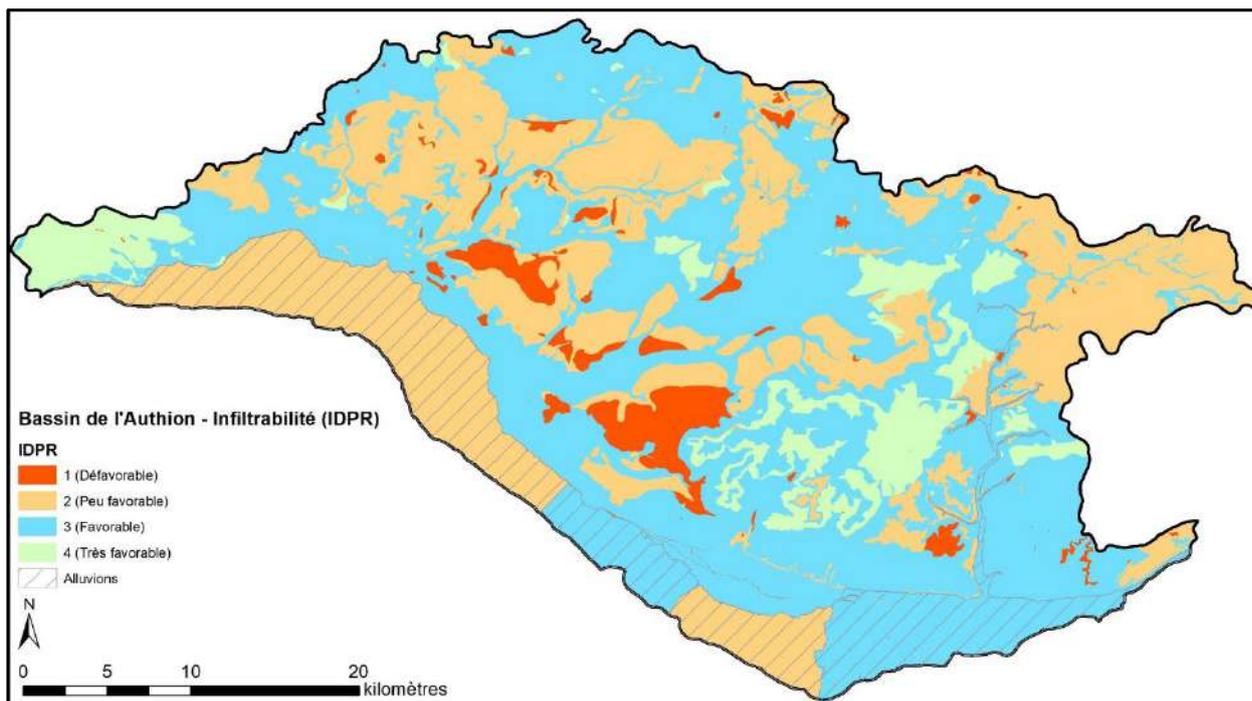


Illustration 37 : Distribution spatiale des pentes issues du MNT au pas de 5 m de l'IGN.

#### 4.4. ANALYSE MULTICRITERE ET CLASSE FINALE D'APTITUDE A LA RECHARGE

La classe finale d'aptitude à la recharge des aquifères est obtenue en calculant la moyenne des notes attribuées aux quatre critères intermédiaires (Illustration 38). Les proportions de la surface de chaque classe au sein du bassin versant se répartissent selon le Tableau 18. Seuls 15 % de la surface du bassin versant de l'Authion sont estimés peu favorables à recharge, et concernent principalement les secteurs où affleurent les marnes à ostracées.

Classe finale	Proportion de la surface du bassin versant de l'Authion
Défavorable	< 1 %
Peu favorable	15,2 %
Favorable	70,3 %
Très favorable	14,4 %

Tableau 18 : Proportion surfacique des quatre classes finales de l'aptitude à la recharge des aquifères du bassin versant de l'Authion.



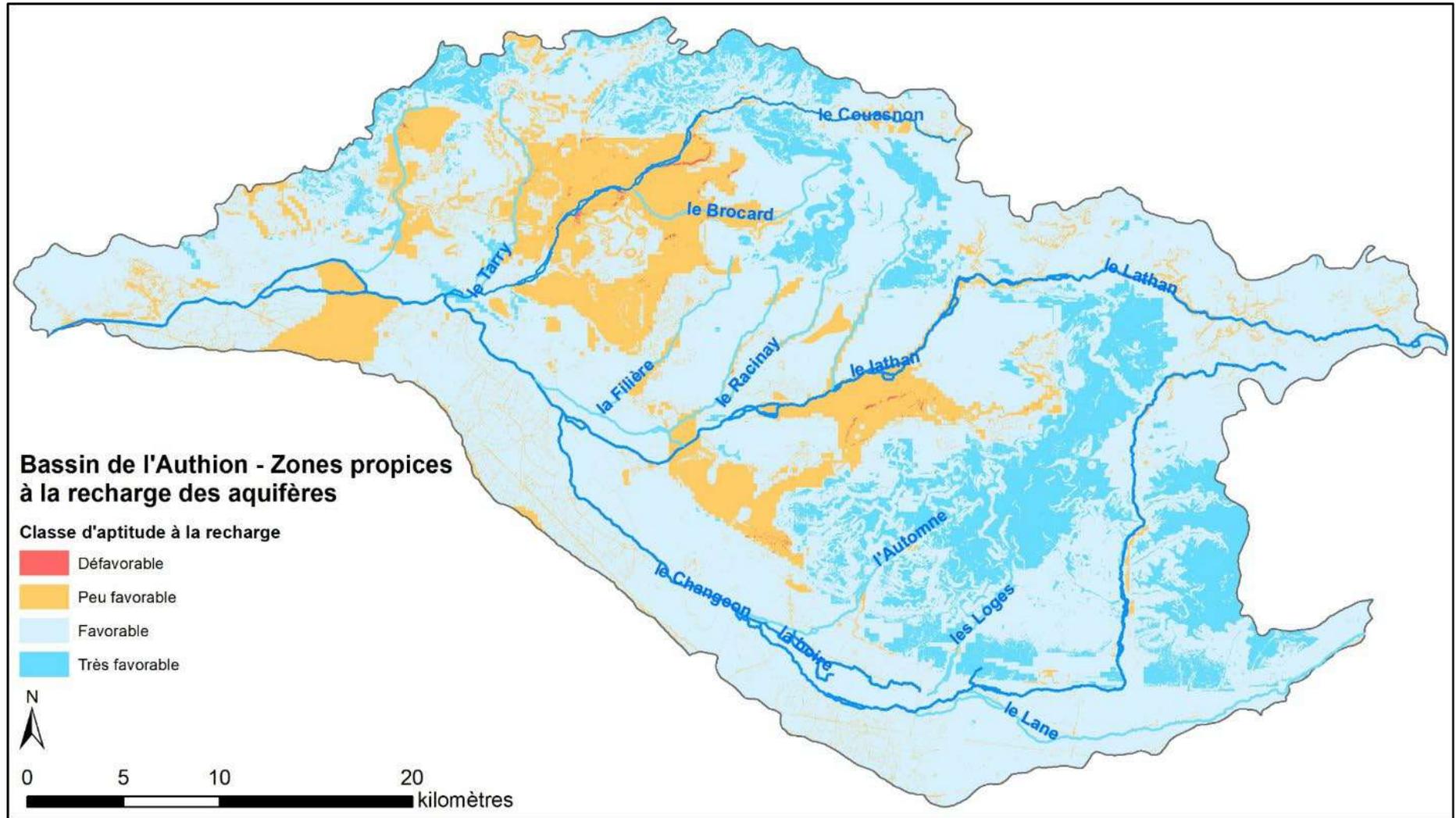


Illustration 38 : Zones propices à la recharge des aquifères du bassin versant de l'Authion.



## 5. Conclusion

Le Syndicat Mixte du Bassin de l'Authion et ses Affluents (SMBAA) et le BRGM ont collaboré via une convention de partenariat initiée en 2021 pour mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème de l'Authion, notamment ses eaux souterraines. Cette convention comprend trois actions, dont les résultats des actions 2 et 3 sont détaillés dans des rapports spécifiques.

L'action 1, résumée ici, se concentre sur deux objectifs principaux : la quantification des échanges nappe-rivière et la cartographie des zones propices à la recharge des aquifères. Initialement, le deuxième objectif devait cartographier les zones d'échanges nappe-rivière, mais il a été réorienté vers la cartographie des zones de recharge des aquifères.

Pour quantifier les échanges nappe-rivière, trois modèles ont été créés pour les bassins versants du Couasnon, du Lathan et du Changeon en utilisant le logiciel GARDENIA©. Ces modèles ont révélé que les aquifères contribuent significativement aux débits des cours d'eau, avec une contribution annuelle moyenne supérieure à 50 %. Pendant les mois d'été, cette contribution dépasse 80 %, soulignant l'importance de préserver les ressources en eau souterraine pour maintenir les débits des cours d'eau à cette période.

Concernant la cartographie des zones propices à la recharge des aquifères, la méthodologie s'appuie sur des travaux antérieurs et utilise une analyse multicritère. Les critères retenus sont l'épaisseur de la zone non saturée, la perméabilité des entités hydrogéologiques, la pente des terrains, et la capacité d'infiltration des entités hydrogéologiques. En combinant ces critères, une note a été attribuée à chaque point du bassin versant, permettant de déterminer la classe d'aptitude finale à la recharge des aquifères. Seuls 15 % de la surface du bassin versant de l'Authion sont estimés peu favorables à la recharge, principalement dans les secteurs où affleurent les marnes à ostracées.



## 6. Bibliographie

**Alcayde G.** avec la collaboration de Bigot A. et Feys R. (1970) – Carte géologique de la France au 1/50 000. Feuille de Saumur.

**Belbeze S.** avec la collaboration de Assy Y., Le Cointe P. et Rame E. (2022) – CAPacité d'Infiltration des eaux pluviales du territoire de TOULouse Métropole (CAPITOU). Rapport final V1. BRGM/RP-71904-FR, 72 p., 45 fig., 14 tab.

**Blaise J.** avec la collaboration de Arnaud A. et Brossé R. (1985) – Carte géologique de la France au 1/50 000. Feuille de Thouarcé.

**Bonneau J., Branger F., Castebrunet H., Lipeme Kouyi G.** (2022) – Modélisation de scénarios de gestion des eaux pluviales à la source face aux changements globaux. INRAE. 2022. hal-03993757

**Bouvard J.** (2021) – La désimpermeabilisation des sols sur les villes de Libourne et Angoulême. Rapport de fin d'études, Sciences de l'ingénieur [physics]. dumas-03611435.

**Branchu P., Marseille, F., Béchet B., Bessière J.-P., Boithias L., Duvigneau C., Genesco P., Keller C., Lambert M.-L., Laroche B., Le Guern C., Lemot A., Métois R., Néel C., Sheriff R.** (2021). MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme. 155 p.

**Brossé R. & Louail J.** avec la collaboration de Herrouain Y. (1976) – Carte géologique de la France au 1/50 000. Feuille de Longué.

**Cavet P.** avec la collaboration de Arnaud A., Blaise J., Brossé R., Chauris L., Gruet M., et Lardeux H. (1976) – Carte géologique de la France au 1/50 000. Feuille d'Angers.

**Cerema** (2020) – Guide du zonage pluvial. De son élaboration à sa mise en œuvre. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-459-3.

**Chrétien P. & Lucassou F.** avec la collaboration de V. Baudouin, A. Frioux, C. Gautron, M. Lair, G. Rodriguez, E. Rouxel & J. Toutain (2011) – Bassin Versant de Neuillé – Interprétation des campagnes piézométriques basses et hautes eaux. Rapport final – BRGM/RP-60290-FR, 46 p., 12 ill., 4 tab., 2 ann.

**Chrétien P.** (2018) – Délimitation des zones au sein desquelles un forage est susceptible d'engendrer un impact significatif sur le débit des cours d'eau de Loire-Atlantique. Rapport final. BRGM/RP-67069-FR, 72 p., 30 ill., 21 tabl., 3 ann., 1 CD.

**Chrétien P.** (2022) – Définition de niveaux piézométriques statistiques dans la Sarthe. Phase 3 : modélisation globale de dix bassins versants. Rapport final V2. BRGM/RP-72143-FR, 87 p., 10 ill., 12 tab., 3 ann.

**Chrétien P.** (2023). Contribution des eaux souterraines au débit de l'Argance (Maine-et-Loire et Sarthe). Rapport final V1. BRGM/RP-73039-FR, 44 p., 16 ill., 6 tab., 2 ann.

**Chrétien P. & Seguin A.** (2024). Contribution des eaux souterraines au débit de l'Hyrôme (Maine-et-Loire). Rapport final V1. BRGM/RP-73461-FR, 44 p., 17 ill., 7 tab., 2 ann.

**Conil P. & Plat E.** (2015) – Aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales sur le territoire de Nantes Métropole. Rapport final. [BRGM/RP-65025-FR](#), 63 p., 32 ill., 2 ann.

**Corbier P. & Mardhel V.** (2003) – Carte de vulnérabilité simplifiée des bassins versants de la région Pays-de-la-Loire. Rapport final BRGM/RP-53106-FR, 102 p., 44 ill., 4 ann.

**Desprats J.F. & Dutartre P.** (1994) – Régionalisation par télédétection des mesures pour l'évaluation des ressources en eau souterraine. Approche cartographique des potentialités d'infiltration. [BRGM/RR-37922-FR](#). 35 p., 18 fig., 3 tab.

**Dormier V., Desprats J.F., King C.** (2001) – Projet PACTES – Module : Analyse des états de surface des bassins versants. Possibilités de passage à l'infiltrabilité localisée. [BRGM/RP-51234-FR](#), 31 p. 12 fig., 8 tab.

**Klinka T., Chrétien P. & Sebai A.** (2024). Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire). Rapport final V1. [BRGM/RP-7308-FR](#), 57 p., 25 ill., 4 tab., 4 ann.

**Lucassou F., Mougin B.**, avec la collaboration de Stollsteiner P. (2015) – Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor. Rapport final. BRGM/RP-64123-FR, 156 p. 74 ill. 6 ann.

**Lucassou F., Schroëtter J.-M. et Koch F.** avec la collaboration de Deray G., Debel A., Escudier M. (EPTB Vilaine) (2023) – ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la **Seiche** (Moulins). Rapport final V0. BRGM/RP-72339-FR, 132 p., 86 ill., 3 ann.

**Nash J.E. & Sutcliffe J.V.** (1970) – River flow forecasting through conceptual models Part I – A discussion of principles. Journal of Hydrology, volume 10, issue 3, pp. 282-290.

**Petter C.** (2013) – Définition des potentialités d'infiltration des eaux pluviales sur le territoire de la Communauté Urbaine de Strasbourg (67) au regard des contraintes locales – Rapport final, Antea Group. A69568/A, 41 pages, 3 fig., 2 tab., 10 ann.

**Pierlot D, Ahyerre M., Kovacs Y.** (2016) – Cartographie indicative d'aptitude à l'infiltration à l'échelle de Bordeaux Métropole. [Techniques Sciences Méthodes](#) n°11. 10 p., 3 fig. 1 tab.

**Pierlot D., Castillon S. et Laborde R.** (2011) - Cartographie de l'infiltrabilité dans les sols du département des Hauts-de-Seine. Conseil Départemental des Hauts-de-Seine. 40 p., 11 fig., 3 ann.

**Pinson S. et Bault V.** (2019a) – Profondeur des entités Hydrogéologiques et évaluation des contraintes à l'infiltration des Eaux pluviales urbaines sur le territoire de Rennes Métropole. Projet PHOEBUS. Rapport final. [BRGM/RP-68599-FR](#), 74 p., 45 ill., 3 ann.

**Pinson S., Tillier L., Allier D., Bourguin B., Sedan-Miegemolle O.** (2019b) – Développement de méthodes permettant l'identification de la sensibilité des cours d'eau et la variation des emprises des zones humides liées aux prélèvements dans les eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport final. BRGM/RP-69287-FR, 219 p., 125 ill., tabl., 7 ann.

**Poyat Y.** – Cartographie du potentiel de désimperméabilisation des sols (Renens). Note méthodologique non référencée. 4 p., 3 fig.

**Prézeau F., Clozel B., Lucassou F., Le Guern C.** avec la collaboration de Chrétien P., Bruhat C., Leduc T., Musy M., Rodler A., Dufrasnes E., Monnot A. (2024). DésiVille : où et comment désimpermeabiliser les sols ? Cartographie du potentiel de désimpermeabilisation des sols à l'échelle territoriale et locale. [Guide méthodologique](#).

**Rosenbrock H.H.** (1960) – An automatic method for finding the greatest or the least value of a function. *Compter journal* 3.3., pp. 175-184, oct. 1960.

**Schomburgk S.** (2022) – Définition d'un réseau piézométrique de référence et contribution à la mise en place de seuils de gestion dans le bassin versant de l'Authion. Rapport final. [BRGM/RP-72219-FR](#), 133 p., 45 fig. 3 ann.

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

**Urban S.** (2011) – Cartographie de la perméabilité des formations superficielles du territoire de la Communauté Urbaine de Strasbourg. [BRGM/RP-60275-FR](#), 77 p. hors annexes, 43 ill.

**Vallin V., Dumont E., Pétilion G., Gerolin A., Degrave M.,** et collab (2016) – Cartographier l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales : l'expérience de 6 collectivités en France. Novatech 2016 - 9<sup>ème</sup> Conférence internationale sur les techniques et stratégies pour la gestion durable de l'Eau dans la Ville, Juin 2016, Lyon, France. hal-03322091.



## **Annexe 1 Comparaison de méthodes employées pour cartographier le potentiel d'infiltration des terrains – Critères retenus pour l'analyse multicritère**



Bassin versant de l'Authion. Cartographie des zones propices à la recharge des aquifères

Territoire - Carte d'infiltrabilité	Critères retenus pour l'AMC						Zonages supplémentaires déclassant la note AMC											
	Perméabilités du sol ou sous sol	ZNS	Pentes	Lithologie / Pédologie	IDPR	Toit du substratum imperméable	Zonage SSP	PPC	Présence de cavités, risques stabilité	Présence d'argiles	Hydromorphie	Contraintes enviro.	Zones endoréiques	Occupation des sols	Zones de remblais	Points bas	Risques remontée de nappe	Présence de zones humides
Bassin versant de l'Hérault				X (traduite en classe d'infiltration)										X (Type de cultures)				
Libourne	X										X							
Angoulême	X										X							
Communauté Urbaine de Strasbourg (Petter 2013)	X (des formations superficielles)	X (plus hautes eaux centennales)									X							
Communauté Urbaine de Strasbourg (Urban 2011)	X	X												X	X			
Rennes Métropole	X	X	X	(X pédologie)	X				X	X			X					
Métropole de Lyon	X	X	X	X (pédologie)				X										
Bordeaux Métropole (2016)			X	X			X	X	X								X	
Bordeaux Métropole (2023)	X	X	X	X (coeff. emmagasinement par lithologie)	X	X	X	X			X							
Département des Hauts-de-Seine	X		X				X	X	X	X								
Nantes Métropole		X	X	X	X			X	(X)	X	X							X
Guide CEREMA "zonage pluvial"		X		X					X									
Toulouse	X	? Pas clair	X		X		X						X					
Renens	X	X	X			X	X											
MUSE	X (fonction de pédotransfert)			X (texture)		X				X								

(X) = prise en compte indirecte du critère

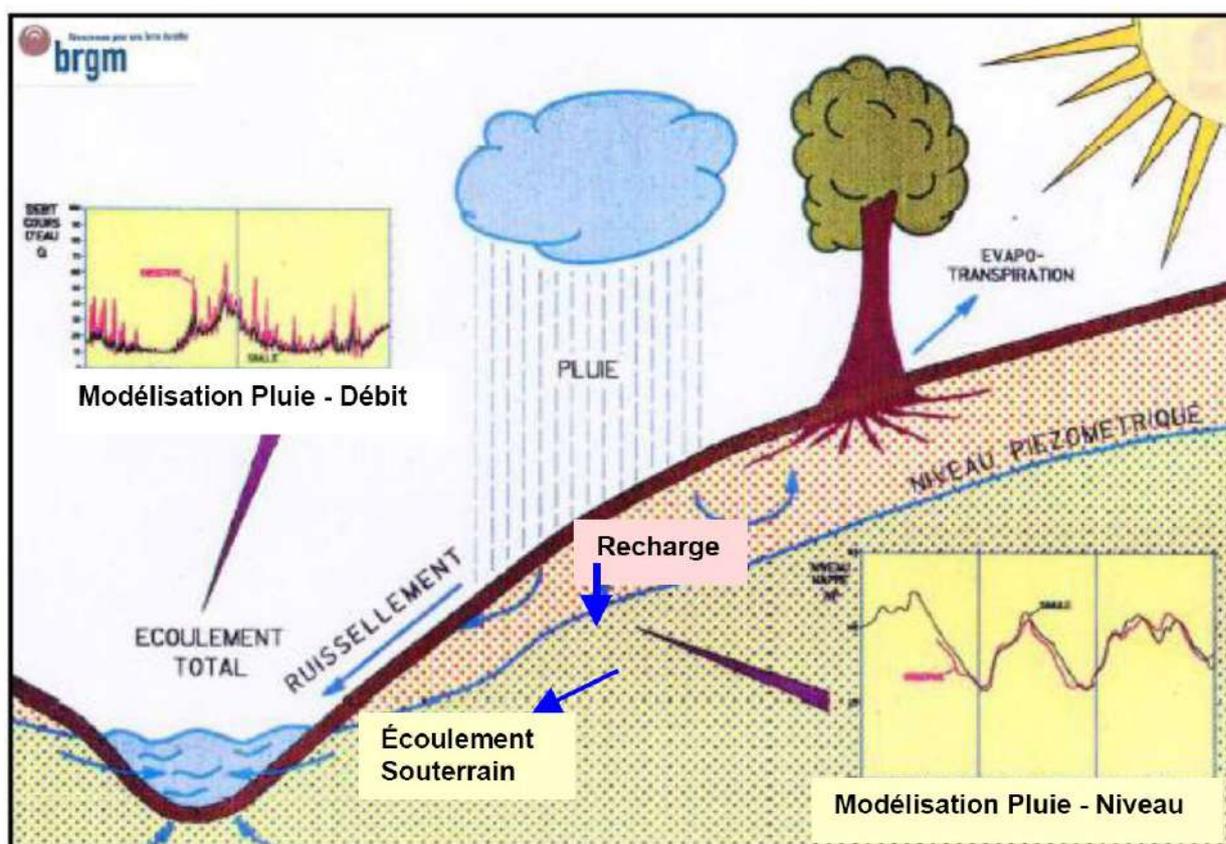


## **Annexe 2 Description du logiciel GARDENIA©**



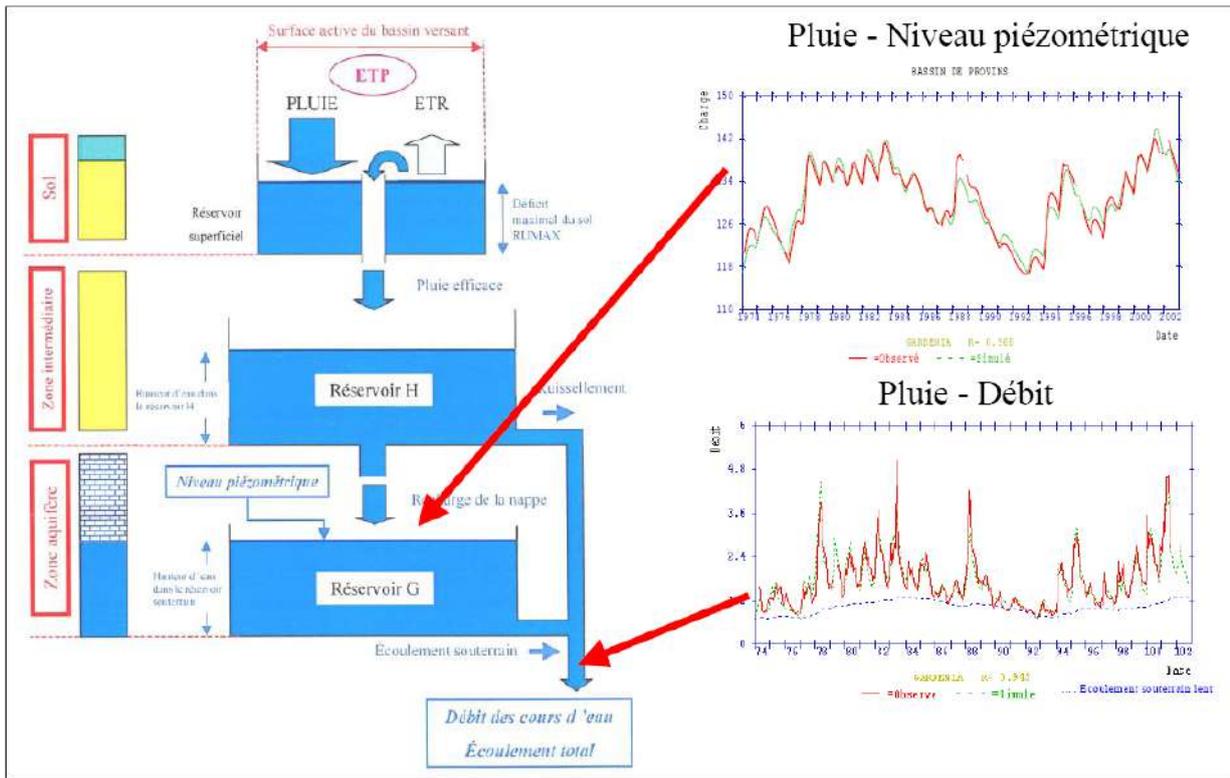
(Le contenu de cette annexe est adapté du rapport BRGM/RP-64123-FR de Lucassou et collab., 2015.)

La compréhension d'un hydro-système peut être facilitée par la mise en place d'un modèle représentant de manière schématisée la réalité. Le logiciel de modélisation GARDENIA© (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères), développé par le BRGM, est utilisé dans le domaine de l'hydro(géo)logie (hydrologie et hydrogéologie) pour modéliser et éventuellement prévoir des niveaux de nappes ou des débits à l'exutoire d'un bassin versant (Thiéry, 2014). Il permet de modéliser le fonctionnement d'un hydro-système, tel que celui schématisé sur l'illustration ci-dessous.



Il permet de simuler le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur le bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) ou jusqu'au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique). Ce modèle est « global » car il considère des données d'entrée non spatialisées, pluie et évapotranspiration potentielle, et en sortie, débit à l'exutoire et/ou niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.

Le logiciel GARDENIA© simule le cycle de l'eau en utilisant plusieurs réservoirs « en cascade ».



Les modélisations ont été réalisées avec des modèles à deux réservoirs, afin de simuler les différents régimes d'écoulement souterrain existant dans les aquifères des bassins versants étudiés. Les échanges entre les réservoirs sont définis par des fonctions de transfert faisant intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant. Le calage du modèle consiste à ajuster au mieux les valeurs de ses paramètres de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits et/ou des niveaux piézométriques aussi proches que possible des débits et/ou des niveaux piézométriques observés (Thiéry, 2014) en exploitant l'ensemble des données disponibles tout en veillant à conserver des paramètres aussi réalistes que possible. Ce calage s'effectue par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux, donne des bornes de variations plausibles pour chacun d'eux et indique ceux qui doivent être optimisés. L'optimisation concomitante des différents paramètres est effectuée selon un algorithme non linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960). Le logiciel teste des valeurs de ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées (coefficient d'ajustement R). Ce calage s'effectue sous le contrôle de l'utilisateur, qui peut le contraindre notamment par la fixation des valeurs de certains paramètres ou de bornes plausibles.

Le coefficient d'ajustement R est égal à la racine du coefficient de Nash-Sutcliffe (1970). Le coefficient de Nash (NTD) est défini par :

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}$$

où  $q_{ci}$  et  $q_{oi}$  sont le débit calculé (modélisé) et le débit observé du jour  $i$  ;

$\bar{q}_o$  est la moyenne de  $q_{oi}$  sur les  $n$  jours servant au calcul du coefficient.

Le critère de Nash varie entre  $-\infty$  et 1. Pour un modèle parfait ce coefficient est égal à 1. Un coefficient égal à 0 indique que les prédictions du modèle sont aussi précises que l'utilisation de la moyenne des données observées. **On considère généralement que la simulation est correcte (exploitable) à partir de valeurs du critère de Nash supérieures à 0,75.**

Une fois calé, le modèle est en mesure de :

- **Calculer les différents termes du bilan hydrologique** en permettant notamment, dans une certaine mesure, de différencier les deux composantes de l'écoulement :
  - celle rapide que l'on peut assimiler au ruissellement superficiel (et à la composante rapide des écoulements karstiques dans un milieu sédimentaire) ;
  - celle lente que l'on peut assimiler à la composante lente des écoulements souterrains, **c'est-à-dire à la contribution des aquifères au débit des rivières.**
- Simuler des débits et/ou des niveaux résultant d'épisodes climatiques exceptionnels. Ces simulations permettent le dimensionnement d'ouvrages tels que des retenues pour l'irrigation, des aménagements de sources, des fondations de bâtiments, des niveaux de sous-sol, le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques pour l'évacuation des crues ou pour la régulation des débits (barrages), etc. ;
- Faire une extrapolation interne (comblement d'une période lacunaire de la série) des débits ou des niveaux piézométriques sur une longue période pendant laquelle on ne possède pas de mesures, à partir, par exemple, de différents scénarii climatiques ;
- **Émettre une prévision de débits et/ou de niveaux piézométriques (extrapolation à des temps futurs).** Il est possible de prolonger une série observée jusqu'à une certaine date **à partir de scénarios de précipitations prévisionnels** pour les semaines ou mois futurs (sécheresses, périodes de hautes eaux) ;
- Reconstituer des valeurs manquantes dans une chronique de débits (rivière ou source), et/ou de niveau piézométrique (nappe). Les séries ainsi complétées peuvent être utilisées plus facilement dans d'autres calculs ou modélisations.

Dans le cadre de cette étude, les modélisations des débits des cours d'eau et des niveaux piézométriques ont été réalisées simultanément au pas de temps journalier à partir des données de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (données météorologiques journalières). Les prélèvements annuels ont également été intégrés, à partir de données de la Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (<https://bnpe.eaufrance.fr/>).



## **Annexe 3**

# **Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit de l'Hyrôme**



<b>Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit du Couason (%)</b>												
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Moyenne mensuelle
<b>Janvier</b>	23%	66%	29%	87%	28%	53%	40%	27%	42%	31%	20%	41%
<b>Février</b>	23%	54%	30%	76%	26%	35%	28%	21%	73%	76%	15%	42%
<b>Mars</b>	52%	54%	33%	58%	31%	48%	21%	81%	82%	31%	17%	45%
<b>Avril</b>	88%	72%	40%	91%	30%	73%	74%	90%	77%	43%	37%	62%
<b>Mai</b>	44%	49%	50%	92%	61%	80%	58%	84%	90%	62%		72%
<b>Juin</b>	72%	93%	38%	97%	28%	93%	91%	62%	97%	93%		75%
<b>Juillet</b>	82%	99%	85%	92%	74%	99%	98%	81%	99%	98%		91%
<b>Août</b>	72%	99%	98%	97%	96%	100%	100%	94%	100%	98%		98%
<b>Septembre</b>	89%	92%	99%	90%	99%	100%	99%	99%	100%	88%		97%
<b>Octobre</b>	90%	76%	99%	96%	100%	97%	79%	98%	100%	56%		90%
<b>Novembre</b>	70%	68%	94%	92%	68%	38%	75%	92%	90%	19%		71%
<b>Décembre</b>	78%	67%	93%	59%	35%	23%	37%	52%	67%	26%		49%
<b>Min.</b>	23%	49%	29%	58%	26%	23%	21%	21%	42%	19%	15%	
<b>Max.</b>	90%	99%	99%	97%	100%	100%	100%	99%	100%	98%	37%	

Superficie du BV : 222 km<sup>2</sup>  
en amont de Beaufort-en-  
Anjou (Gée)

	<b>Débit souterrain mensuel alimentant le Couasnon, exprimé en lame d'eau (en mm)</b>											<b>Moyenne mensuelle</b>
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
<b>Janvier</b>	9.5	8.6	7.3	6.8	5.5	6.3	6.1	6.1	5.7	4.5	5.7	6.6
<b>Février</b>	9.0	7.7	7.2	6.0	5.3	5.9	6.0	6.0	5.1	4.2	5.7	5.7
<b>Mars</b>	10.2	8.6	7.9	6.7	6.2	6.7	6.9	6.7	5.6	4.7	6.8	6.5
<b>Avril</b>	9.7	8.3	7.9	6.4	6.3	6.5	6.7	6.4	5.4	4.8	6.9	6.4
<b>Mai</b>	9.8	8.6	8.2	6.4	6.7	6.6	6.9	6.4	5.5	5.1	7.4	6.6
<b>Juin</b>	9.5	8.1	8.1	6.0	6.6	6.2	6.6	6.2	5.1	4.9		6.2
<b>Juillet</b>	9.6	8.1	8.3	6.0	7.0	6.2	6.6	6.4	5.1	4.9		6.3
<b>Août</b>	9.4	7.7	8.1	5.8	6.8	6.0	6.3	6.2	4.9	4.7		6.1
<b>Septembre</b>	9.0	7.2	7.5	5.5	6.3	5.5	5.9	5.8	4.5	4.4		5.7
<b>Octobre</b>	9.0	7.3	7.4	5.5	6.3	5.5	5.9	5.8	4.5	4.5		5.7
<b>Novembre</b>	8.5	7.0	6.9	5.2	5.9	5.3	5.7	5.4	4.2	4.7		5.4
<b>Décembre</b>	8.7	7.2	6.9	5.3	6.2	5.8	5.9	5.5	4.3	5.2		5.6
<b>Min.</b>	8.5	7.0	6.9	5.2	5.3	5.3	5.7	5.4	4.2	4.2	5.7	
<b>Max.</b>	10.2	8.6	8.3	6.8	7.0	6.7	6.9	6.7	5.7	5.2	7.4	<b>Moyenne annuelle</b>
<b>Lame d'eau souterraine totale annuelle alimentant le cours d'eau (année hydrologique)</b>	114	101	92	79	72	75	74	74	65	55	51	80

Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit du Lathan (%)												
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Moyenne mensuelle
<b>Janvier</b>	20%	76%	35%	97%	38%	44%	38%	24%	35%	25%	32%	42%
<b>Février</b>	15%	65%	21%	91%	27%	26%	32%	15%	58%	55%	19%	38%
<b>Mars</b>	39%	58%	23%	75%	29%	39%	19%	55%	72%	31%	13%	39%
<b>Avril</b>	74%	70%	28%	90%	34%	66%	58%	70%	80%	44%	27%	55%
<b>Mai</b>	46%	55%	52%	91%	43%	72%	37%	73%	93%	55%		65%
<b>Juin</b>	58%	84%	41%	95%	19%	90%	65%	47%	94%	80%		66%
<b>Juillet</b>	75%	95%	76%	95%	60%	97%	88%	48%	96%	90%		81%
<b>Août</b>	77%	95%	94%	96%	89%	99%	97%	66%	99%	95%		92%
<b>Septembre</b>	87%	81%	98%	94%	97%	100%	99%	89%	99%	97%		97%
<b>Octobre</b>	90%	72%	99%	96%	99%	98%	91%	93%	98%	92%		96%
<b>Novembre</b>	80%	65%	99%	96%	67%	51%	85%	90%	89%	38%		77%
<b>Décembre</b>	82%	67%	98%	81%	26%	24%	46%	55%	69%	35%		54%
<b>Min.</b>	15%	55%	21%	75%	19%	24%	19%	15%	35%	25%	13%	
<b>Max.</b>	90%	95%	99%	97%	99%	100%	99%	93%	99%	97%	32%	

Superficie du BV : 273 km<sup>2</sup>  
en amont de Vernantes  
(Moulin Guet)

	Débit souterrain mensuel alimentant le Lathan, exprimé en lame d'eau (en mm)											Moyenne mensuelle
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
<b>Janvier</b>	5.5	5.3	5.1	5.0	4.6	4.6	4.5	4.4	4.4	4.1	4.1	4.7
<b>Février</b>	5.0	4.8	4.8	4.4	4.2	4.2	4.2	4.1	4.0	3.8	3.9	4.3
<b>Mars</b>	5.6	5.3	5.2	4.9	4.6	4.7	4.6	4.5	4.4	4.2	4.2	4.7
<b>Avril</b>	5.4	5.1	5.0	4.7	4.5	4.5	4.4	4.4	4.2	4.0	4.1	4.6
<b>Mai</b>	5.5	5.3	5.2	4.8	4.7	4.7	4.6	4.5	4.3	4.2	4.3	4.7
<b>Juin</b>	5.4	5.1	5.0	4.6	4.5	4.5	4.4	4.3	4.2	4.0		4.6
<b>Juillet</b>	5.5	5.2	5.2	4.8	4.7	4.6	4.6	4.5	4.3	4.2		4.8
<b>Août</b>	5.5	5.2	5.2	4.7	4.7	4.6	4.5	4.5	4.2	4.1		4.7
<b>Septembre</b>	5.3	5.0	5.0	4.5	4.5	4.4	4.3	4.3	4.1	4.0		4.5
<b>Octobre</b>	5.4	5.1	5.1	4.7	4.6	4.5	4.5	4.4	4.2	4.1		4.7
<b>Novembre</b>	5.2	4.9	4.9	4.5	4.4	4.3	4.3	4.3	4.0	3.9		4.5
<b>Décembre</b>	5.4	5.1	5.0	4.6	4.6	4.5	4.4	4.4	4.1	4.1		4.6
<b>Min.</b>	5.0	4.8	4.8	4.4	4.2	4.2	4.2	4.1	4.0	3.8	3.9	
<b>Max.</b>	5.6	5.3	5.2	5.0	4.7	4.7	4.6	4.5	4.4	4.2	4.3	<b>Moyenne annuelle</b>
<b>Lame d'eau souterraine totale annuelle alimentant le cours d'eau (année hydrologique)</b>	65	63	61	58	55	54	53	53	51	49		56

<b>Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit du Changeon (%)</b>													
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Moyenne mensuelle
<b>Janvier</b>	40%	42%	78%	55%	99%	53%	63%	58%	31%	51%	32%	37%	56%
<b>Février</b>	24%	25%	78%	34%	96%	39%	48%	38%	30%	75%	88%	25%	51%
<b>Mars</b>	49%	58%	79%	44%	82%	41%	61%	27%	92%	93%	55%	26%	64%
<b>Avril</b>	46%	87%	91%	61%	98%	55%	93%	90%	97%	91%	69%	48%	85%
<b>Mai</b>	62%	65%	66%	82%	98%	85%	95%	66%	93%	99%	82%	37%	83%
<b>Juin</b>	48%	90%	98%	65%	99%	90%	97%	85%	94%	99%	98%		91%
<b>Juillet</b>	90%	95%	100%	98%	99%	99%	100%	99%	98%	100%	99%		99%
<b>Août</b>	100%	94%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		99%
<b>Septembre</b>	100%	99%	91%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		99%
<b>Octobre</b>	99%	96%	88%	100%	100%	100%	99%	95%	99%	98%	87%		97%
<b>Novembre</b>	67%	91%	85%	100%	99%	66%	50%	93%	95%	88%	44%		85%
<b>Décembre</b>	71%	89%	86%	100%	89%	31%	30%	55%	61%	70%	46%		68%
<b>Min.</b>	24%	25%	66%	34%	82%	31%	30%	27%	30%	51%	32%	25%	
<b>Max.</b>	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	48%	

Superficie du BV : 89,5 km<sup>2</sup>  
en amont de Gizeux (Moulin  
Foulon)

<b>Débit souterrain mensuel alimentant le Changeon, exprimé en lame d'eau (en mm)</b>													
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Moyenne mensuelle
<b>Janvier</b>	6.9	8.7	8.6	7.5	7.1	5.2	6.7	7.2	7.9	7.4	6.3	7.3	7.2
<b>Février</b>	7.1	8.6	7.8	7.6	6.2	5.2	6.4	7.2	8.0	6.8	6.0	7.3	7.0
<b>Mars</b>	8.4	10.2	8.7	8.7	6.8	6.3	7.4	8.5	9.0	7.5	6.7	9.0	8.1
<b>Avril</b>	8.5	9.8	8.3	8.8	6.5	6.6	7.1	8.4	8.5	7.1	6.7	9.3	8.0
<b>Mai</b>	9.0	10.1	8.7	9.1	6.5	6.9	7.2	8.7	8.5	7.2	7.1	10.2	8.3
<b>Juin</b>	9.0	9.8	8.2	9.0	6.1	6.6	6.8	8.5	8.1	6.7	6.7	9.9	7.9
<b>Juillet</b>	9.5	9.9	8.2	9.1	6.1	6.6	6.8	8.5	8.2	6.6	6.7		7.8
<b>Août</b>	9.2	9.6	7.8	8.8	5.8	6.3	6.5	8.2	7.9	6.3	6.5		7.5
<b>Septembre</b>	8.5	9.0	7.4	8.1	5.4	5.9	6.0	7.6	7.3	5.9	6.0		7.0
<b>Octobre</b>	8.4	9.0	7.5	8.0	5.4	5.8	5.9	7.5	7.2	5.9	6.0		7.0
<b>Novembre</b>	8.1	8.5	7.2	7.4	5.0	5.5	5.8	7.2	6.8	5.6	6.1		6.6
<b>Décembre</b>	8.4	8.6	7.4	7.4	5.1	6.2	6.6	7.4	7.0	5.8	6.7		7.0
<b>Min.</b>	6.9	8.5	7.2	7.4	5.0	5.2	5.8	7.2	6.8	5.6	6.0	7.3	
<b>Max.</b>	9.5	10.2	8.7	9.1	7.1	6.9	7.4	8.7	9.0	7.5	7.1	10.2	Moyenne annuelle
<b>Lame d'eau souterraine totale annuelle alimentant le cours d'eau (année hydrologique)</b>	91	110	102	98	82	71	78	89	96	84	76		87





**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale des Pays-de-la-Loire**

1 rue des Saumonières  
BP 92342  
44323 – Nantes Cedex 3 – France  
Tél. : 02 51 86 01 51

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**