



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Contribution des eaux souterraines au débit de l'Argance (Maine-et-Loire et Sarthe)

Rapport final

BRGM/RP-73039-FR

Version 1 du 24 novembre 2023

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

Chrétien P.

Vérificateur :

Nom : Arnaud L.

Fonction : Hydrogéologue

Date : 20/11/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : Rachez X.

Fonction : Directeur régional

Date : 24/11/2023

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

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

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

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

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

Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Bilan eau, gestion ressource eau, modèle GARDENIA, soutien étiage, Argance, Maine-et-Loire, Sarthe, Pays-de-la-Loire

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

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.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

La direction régionale du BRGM Pays de La Loire a été sollicitée par l'Établissement Public Loire pour approfondir la connaissance du rôle des eaux souterraines dans le fonctionnement du bassin versant de l'Argance. Dans cet objectif, le BRGM élabore un modèle hydrologique global du bassin versant au moyen du logiciel GARDENIA©, afin de s'appuyer sur le bilan hydrologique qu'il procure pour quantifier la contribution des nappes au débit du cours d'eau.

Le bassin versant de l'Argance appartient au Bassin Parisien. On y rencontre les formations hydrogéologiques principales suivantes :

- Les calcaires du Dogger, captifs sous les argiles et marnes du Cénomanien inférieur et du Jurassique supérieur.
- Les sables cénomaniens, présents partout dans le bassin versant. Au sein de cet étage géologique, on distingue deux horizons aquifères :
 - les sables de Bousse (sables à Catopygus) du Cénomanien supérieur.
 - les sables du Perche, du Mans et de la Trugalle du Cénomanien inférieur à moyen.
- Les calcaires crayeux séno-turonien, peu développés.

Les sables du Cénomanien inférieur à moyen (sables du Perche etc.) sont au contact de l'Argance sur la majeure partie de son cours. Parmi les différentes formations aquifères citées ci-dessus, ils représentent celle susceptible de jouer un rôle prédominant dans l'écoulement de l'Argance.

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.

Le modèle hydrologique du bassin versant de l'Argance élaboré par le BRGM s'attache à reproduire les débits moyens journaliers de l'Argance à la Chapelle-d'Aligné et les niveaux piézométriques journaliers des sables cénomaniens à Villaines-sous-Malicorne de 1993 à 2023, à partir des précipitations journalières observées à Sablé-sur-Sarthe et de l'évapotranspiration potentielle journalière au Mans. Par ailleurs, les prélèvements en nappe et cours d'eau, tous usages confondus, sont pris en compte dans le modèle.

Les éléments suivants sont particulièrement dignes d'intérêt :

- La pluie efficace (ruissellement + recharge des nappes) moyenne annuelle du bassin versant s'établit à 139 mm/an. La recharge quant à elle est en moyenne de 57 mm/an.
- Le ruissellement est nul ou presque entre juillet et septembre.
- Pendant cette période, le débit de l'Argance est quasi exclusivement assuré par la vidange des sables cénomaniens : ils contribuent à près de 95% au débit de l'Argance en moyenne. Cette observation est conforme à ce que nous avons pu démontrer antérieurement dans des bassins versants de Loire-Atlantique, Mayenne, et Sarthe.

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. Objectifs de l'étude	7
1.2. Contexte hydrogéologique du bassin versant de l'Argance	7
1.2.1. Hydrographie	7
1.2.2. Hydrogéologie	8
2. Modélisation globale du bassin versant avec le logiciel GARDENIA©	11
2.1. Présentation synthétique des modèles	11
2.1.1. Principe de fonctionnement du Logiciel GARDENIA©	11
2.1.2. Choix des stations à modéliser	12
2.2. Données utilisées dans le modèle	13
2.3. Calage des modèles	17
3. Résultats obtenus	21
3.1. Pluie efficace et recharge des sables cénomaniens	21
3.2. Calcul du Base Flow Index avec la Méthode ESPERE	23
3.3. Contribution des nappes au débit des cours d'eau	24
3.4. Prévision des débits hivernaux 2023-2024	25
3.4.1. Principes de la méthode de prévision	26
3.4.2. Prévision des débits de l'Argance pour l'hiver 2023-2024	27
4. Conclusion	29
5. Bibliographie	31

Liste des figures

Illustration 1 : Hydrogéologie générale simplifiée du département de la Sarthe.	9
Illustration 2 : Contexte hydrogéologique simplifié du bassin versant de l'Argance.	10
Illustration 3 : Schéma GARDENIA© à un seul réservoir souterrain (a) et deux réservoirs souterrains (b).	12
Illustration 4 : Localisation des stations de mesures dont les observations ont été introduites dans le modèle.	14
Illustration 5 : Prélèvements annuels connus dans le bassin versant de l'Argance en amont de la station hydrométrique entre 1999 et 2021 (BNPE).	15
Illustration 6 : Prélèvements moyens mensuels intégrés dans le modèle global GARDENIA© .	16
Illustration 7 : Ajustement des débits de l'Argance.	18
Illustration 8 : Ajustement des débits de l'Argance (détail des années 2016-2022).	19
Illustration 9 : Ajustement des niveaux piézométriques des sables cénomaniens.	19
Illustration 10 : Ajustement des niveaux piézométriques des sables cénomaniens (détail des années 2016-2022).	20
Illustration 11 : Pluie efficace et recharge annuelles.	21

Illustration 12 : Recharge et pluie efficace mensuelle (moyenne 1993-2023).	22
Illustration 13 : Recharge moyenne annuelle des nappes vs. pluie efficace moyenne annuelle.	23
Illustration 14 : Histogramme de la contribution moyenne mensuelle des eaux souterraines au débit de l'Argance.	25
Illustration 15 : Prévion des débits de l'Argance (avec procédure adaptative).	27
Illustration 16 : Prévion des débits de l'Argance : zoom sur les plus faibles débits	28

Liste des tableaux

Tableau 1 : Quelques grandeurs caractéristiques du débit de l'Argance (source : Hydroportail). 8	
Tableau 2 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle.	13
Tableau 3 : Tableau récapitulant les extrapolations effectuées pour augmenter l'historique des prélèvements.	15
Tableau 4 : Résultats du calage du modèle : coefficients d'ajustement obtenus.	18
Tableau 5 : Pluie efficace et recharge moyennes annuelles calculées au moyen de modèles GARDENIA© dans plusieurs bassins versants de la Sarthe (adapté de Chrétien, 2022).	22
Tableau 6 : Contribution mensuelle des sables cénomaniens au débit de l'Argance – Moyenne des années 1998-2023	24

Liste des annexes

Annexe 1	Description du logiciel GARDENIA©	33
Annexe 2	Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit des cours d'eau	39

1. Introduction

1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

La direction régionale du BRGM Pays de La Loire a été sollicitée par l'Établissement Public Loire pour approfondir la connaissance du rôle des eaux souterraines dans le fonctionnement du bassin versant de l'Argance.

L'Argance est un bassin versant de l'aval du Loir, affluent en rive droite, situé en Sarthe et en Maine-et-Loire. Une étude conduite sur le bassin du Loir pour la Commission Locale de l'Eau du SAGE en 2017 déterminait que l'Argance était le seul secteur du SAGE du Loir en déficit quantitatif de la ressource en eau sur l'ensemble de l'année.

La feuille de route du SAGE, validée en 2019, identifiait l'Argance comme l'un des trois secteurs sur lesquels une amélioration de la connaissance est prioritaire.

L'objectif de ce programme est de concevoir un modèle hydrologique global du bassin versant de l'Argance, au moyen du logiciel GARDENIA©. Développé par le BRGM, le logiciel GARDENIA© (modèle Global À Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères, Thiéry, 2014) permet de calculer, à partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur son bassin d'alimentation :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) ;
- et / ou le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente.

GARDENIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Il prend en compte les prélèvements du bassin versant et établit un bilan hydrologique pluie / évapotranspiration réelle / ruissellement / infiltration vers la nappe. Sous réserve de parvenir à un calage du modèle suffisamment robuste, il est possible à travers ce bilan d'estimer la part d'eau souterraine qui contribue au débit du cours d'eau modélisé.

1.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'ARGANCE

1.2.1. Hydrographie

L'Argance prend sa source à Villaines-sous-Malicorne dans la Sarthe, à une altitude de 80 m NGF. Après un écoulement ouest-est sur un tronçon relativement court (5 km), elle suit une orientation nord-est/sud-ouest (11 km) puis nord-sud (3,5 km) jusqu'à sa confluence avec la Sarthe. Le linéaire total de l'Argance est de 19,5 km, et la superficie de son bassin versant atteint 82 km².

Les débits de l'Argance sont connus depuis novembre 1992 grâce à la station hydrométrique située au lieu-dit la Cheviraye à la Chapelle-d'Aligné. La superficie du bassin versant en amont de la station hydrométrique est de 59 km². La qualité des données qu'elle procure est jugée bonne aussi bien en basses, moyennes et hautes eaux (source : fiche d'identité de la station sur [Hydroportail](#)).

Débit moyen journalier (L/s)				Débit moyen mensuel - Etiage (L/s)	
Minimum	Maximum	Médian	Moyen	QMNA5	QMNA10
0 (29/08/1993)	6 110 (11/02/2013)	116	225	8	5

Tableau 1 : Quelques grandeurs caractéristiques du débit de l'Argance (source : Hydroportail).

1.2.2. Hydrogéologie

Du point de vue géologique, le bassin de l'Argance appartient à la marge occidentale du Bassin de Paris. Celui-ci comporte dans la Sarthe quatre aquifères principaux (cf. Illustration 1) :

- les calcaires du Jurassique moyen (Dogger) ;
- les sables du Cénomaniens (Crétacé) ;
- les calcaires sablo-craeyeux du Séno-Turonien (Crétacé) ;
- les alluvions des grands cours d'eau (Sarthe, Huisne, Loir).

Plus localement, dans le bassin versant de l'Argance, d'après la BDLISA¹ et le MODGEAU² :

- Les **calcaires du Dogger** n'affleurent nulle part, mais sont plus ou moins captifs sous les argiles et marnes du Cénomaniens inférieur et du Jurassique supérieur.
- Les **sables cénomaniens** sont présents partout dans le bassin versant. Au sein de cet étage géologique, on distingue deux formations aquifères :
 - les sables de Bousse (**sables à Catopygus**) du Cénomaniens supérieur libres à l'affleurement ou captifs sous couverture des formations post-cénomaniennes (Séno-Turonien et Éocène).
 - séparés des précédents par les marnes à Ostracées (Cénomaniens supérieur), les **sables du Perche, du Mans et de la Trugalle** du Cénomaniens inférieur à moyen, libres à l'affleurement ou captifs sous les marnes à Ostracées.
- Les **calcaires craeyeux séno-turonien**, bien que présents en rive gauche au sommet du coteau, sont peu développés, sous couverture d'un horizon altéré principalement constitué d'argiles à silex.
- Les **alluvions de l'Argance** sont peu développées.

¹ Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères, <https://bdlisa.eaufrance.fr/>

² MODèle Géologique pour la gestion des ressources en EAU, <https://sigespal.brgm.fr/?article186>

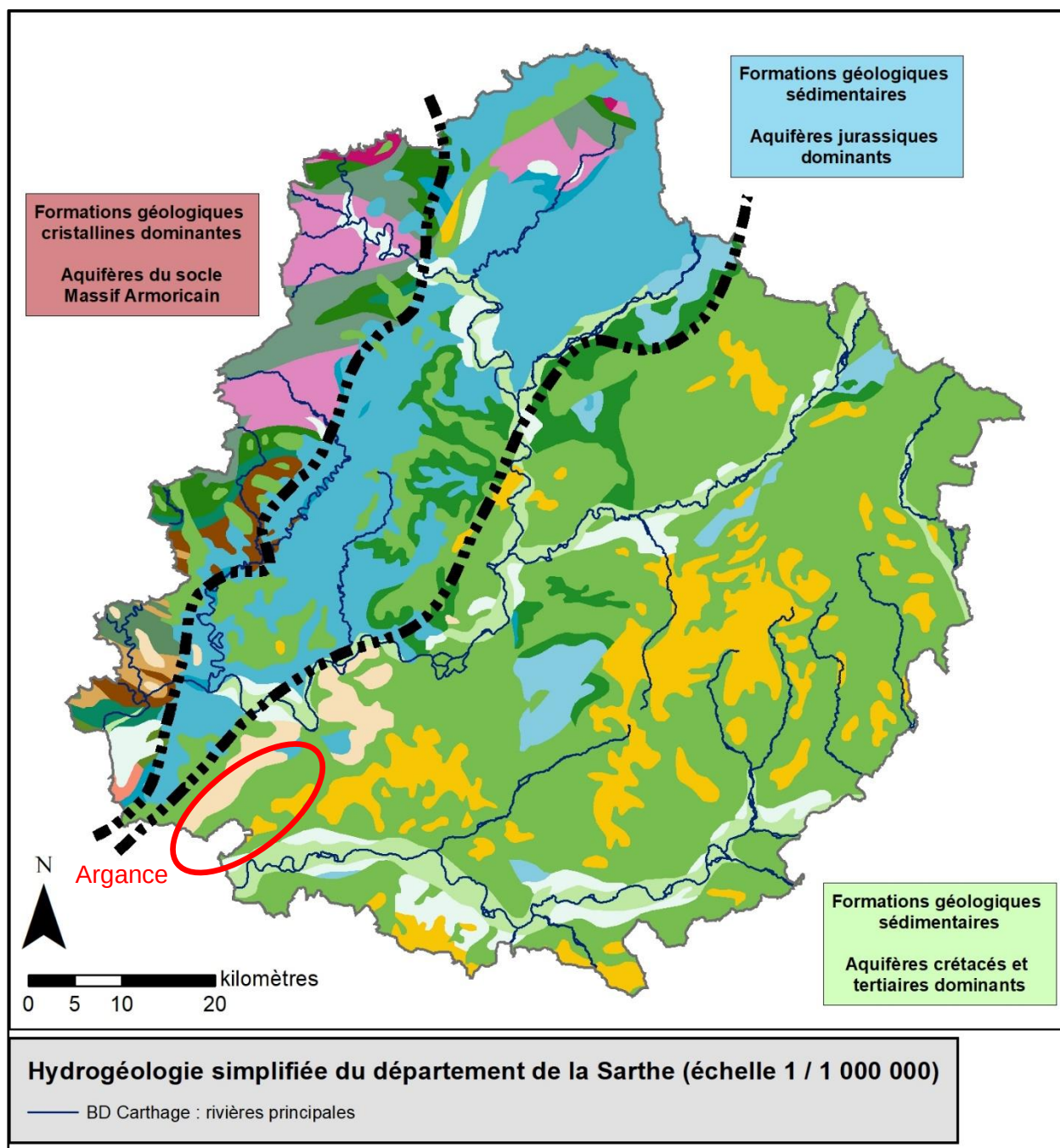


Illustration 1 : Hydrogéologie générale simplifiée du département de la Sarthe.

D'après la carte géologique au 1/50 000 et la BDLISA (cf. Illustration 2), l'Argance est au contact de deux aquifères :

- les sables à Catopygus en tête de bassin versant, là où l'Argance prend sa source ;
- ces sables disparaissent rapidement vers l'aval, et après une distance modérée sur les marnes à Ostracées (< 2 km), ce sont **les sables du Cénomanién inférieur à moyen** au contact des alluvions qui accompagnent l'Argance sur la plus longue partie de son cours (15 km).

Ces deux aquifères sont susceptibles de contribuer au débit de l'Argance.

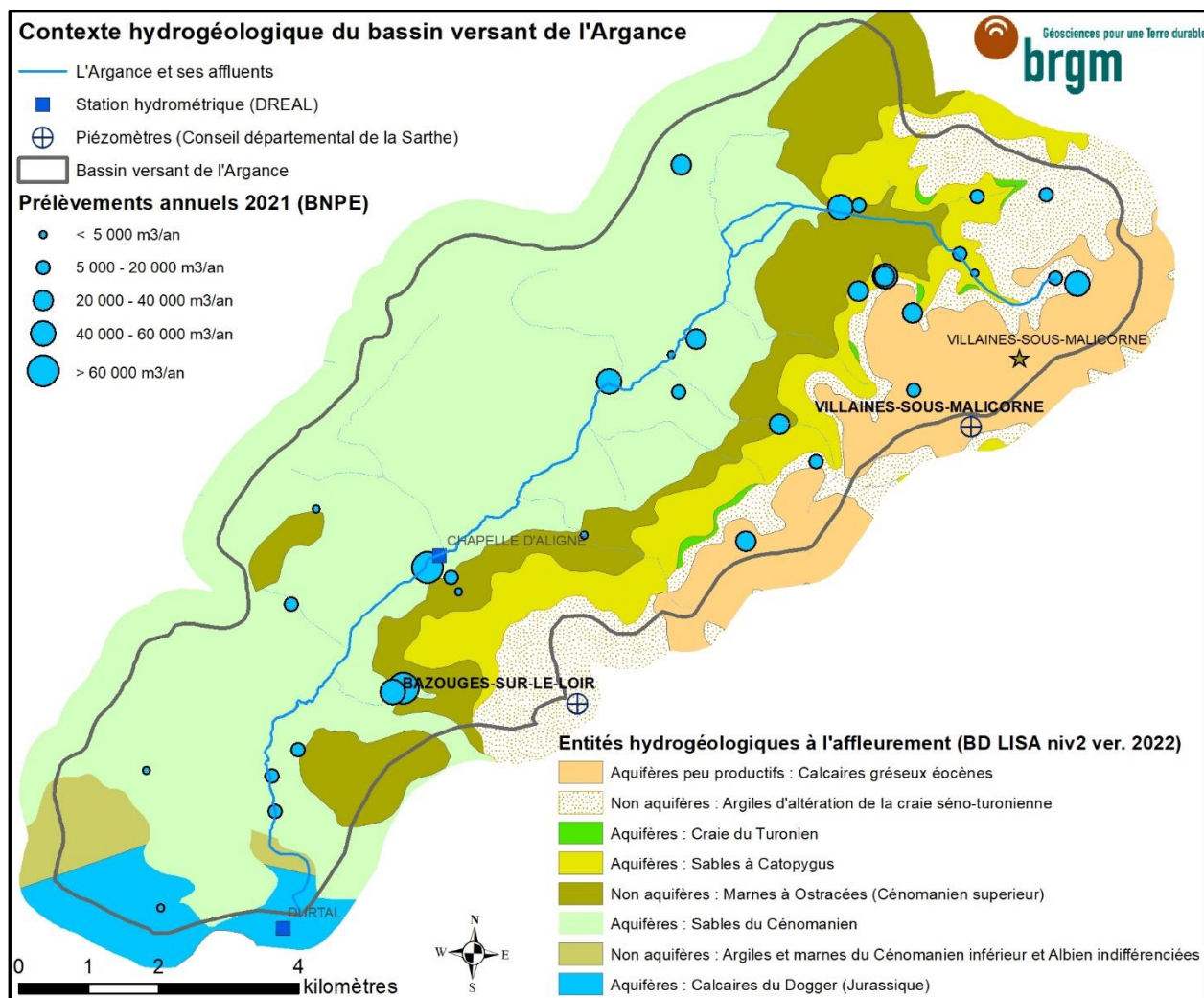


Illustration 2 : Contexte hydrogéologique simplifié du bassin versant de l'Argance.

2. Modélisation globale du bassin versant avec le logiciel GARDENIA©

Des modèles pluies – niveaux piézométriques – débits ont été construits au moyen du logiciel GARDENIA©, version 8.9 (Thiéry, 2014). Grâce à eux, il est possible d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant par l'élaboration d'un bilan hydrologique. Les modèles globaux sont notamment mis à profit pour :

- quantifier la contribution moyenne mensuelle des nappes au débit du cours d'eau ;
- simuler les débits moyens journaliers de l'Argance et les niveaux maximums journaliers des sables cénomaniens sur la période 01/10/2023 – 30/09/2024 à partir de scénarios statistiques de pluies.

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 effets des pompages situés dans le bassin versant étudié sont pris en compte. Une description plus complète du logiciel est détaillée en Annexe 1. 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).

2.1. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES MODELES

2.1.1. Principe de fonctionnement du Logiciel GARDENIA©

Le logiciel GARDENIA© permet l'utilisation d'un schéma à un seul réservoir souterrain (cf. Illustration 3, a) ou à deux réservoirs souterrains (cf. Illustration 3, b).

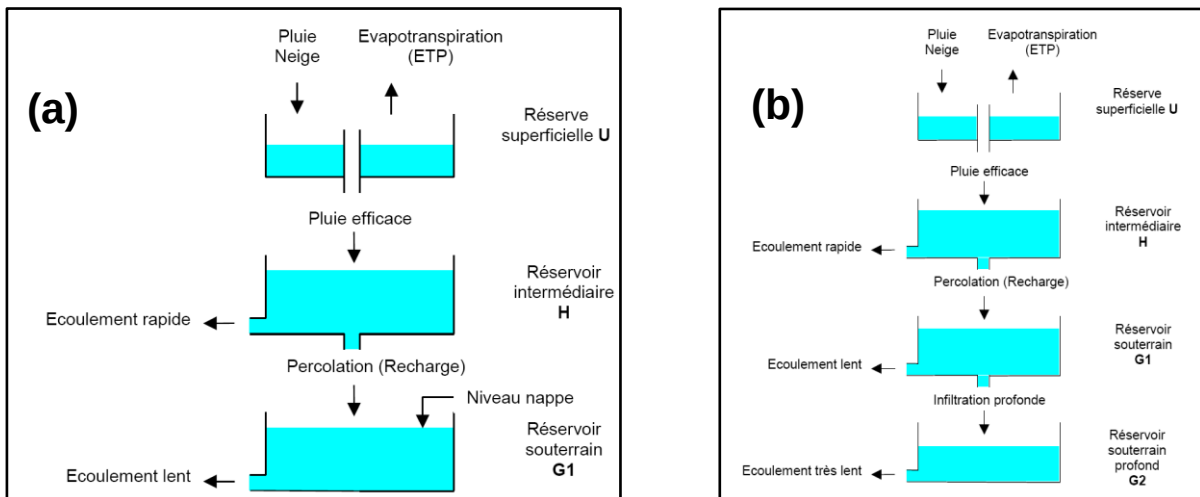


Illustration 3 : Schéma GARDENIA© à un seul réservoir souterrain (a) et deux réservoirs souterrains (b).

2.1.2. Choix des stations à modéliser

Les débits de l'Argance sont connus grâce à la station hydrométrique M1534510 de la Chapelle-d'Aligné maintenue par l'Unité Hydrométrie de la DREAL Pays-de-la-Loire. Les débits moyens journaliers de l'Argance du 01/01/1993 au 31/12/2022 (30 ans) ont été collectés par le biais de [l'Hydroportail](#) (anciennement Banque Hydro).

Dans le bassin versant de l'Argance, seuls les niveaux des eaux souterraines contenues dans les sables cénomaniens sont enregistrés :

- le piézomètre de Bazouges-sur-le-Loir a été actif de 1998 à 1999 puis de 2001 à 2008 avec de nombreuses lacunes tout au long de la période. Il est par ailleurs fortement influencé par des prélèvements en période d'étiage. Pour ces deux raisons, il ne constitue pas un bon candidat pour le calage des niveaux des sables cénomaniens simulés par le modèle.
- le piézomètre de Villaines-sous-Malicorne est suivi depuis 1994 et est toujours actif en 2023. Hormis les années 2005, 2007 et 2020 qui comportent des lacunes, la chronique des niveaux journaliers est complète. En dépit du fait que la chronique subit l'influence des prélèvements saisonniers destinés à l'irrigation, le piézomètre constitue un candidat satisfaisant pour la modélisation des niveaux de l'aquifère des sables du Cénomaniens.

Ces deux piézomètres sont situés à l'extérieur du bassin de l'Argance, mais à proximité immédiate de la limite définie par la BD Carthage (200 m). En revanche, les niveaux des autres aquifères en présence (calcaires éocènes, craie turonienne, calcaires jurassiques) ne sont suivis par aucun piézomètre dans le bassin de l'Argance, ou à proximité immédiate. Leur absence ne constitue pas un inconvénient pour atteindre les objectifs de l'étude, puisque ces aquifères jouent selon toute vraisemblance un rôle secondaire dans le soutien d'étiage du cours d'eau, n'étant que très peu voire pas du tout au contact de l'Argance.

2.2. DONNEES UTILISEES DANS LE MODELE

Données	Station		Fréquence	Début	Fin
Pluies (hauteur de précipitation, mm)	Sablé-sur-Sarthe	72264001	journalière	01/01/1993	30/09/2023
Evapotranspiration potentielle (ETP, mm)	Le Mans	72181001	journalière	01/01/1993	30/09/2023
Débits de l'Argance (m3/s)	La Chapelle-d'Aligné	BSS001BQYC	moyenne journalière	01/01/1993	30/09/2023
Niveaux piézométriques des sables cénomaniens (nNGF)	Villaines-sous-Malicorne	M1534510	maximum journalier	01/01/1993	30/09/2023
Volumes prélevés dans le bassin versant, en nappe et en cours d'eau	voir précisions dans le texte			01/01/1999	31/12/2021

Tableau 2 : Récapitulatif des données introduites dans le modèle.

Les données suivantes sont introduites dans le modèle (cf. Tableau 2 et Illustration 4) :

- quantité de précipitations journalières à Sablé-sur-Sarthe de la période 01/01/1993 – 31/12/2022 (données Météo France) ;
- évapotranspiration potentielle (ETP) journalière calculée au Mans sur la période 01/01/1993 – 31/12/2022 (données Météo France) ;
- débits moyens journaliers enregistrés à la Chapelle-d'Aligné sur la période 01/01/1993 – 31/12/2022 (données DREAL) ;
- niveaux piézométriques journaliers enregistrés dans les sables cénomaniens à Villaines-sous-Malicorne sur la période 01/01/1993 – 31/12/2022 (données BRGM) ;
- Volumes annuels prélevés en nappe et en rivière dans le bassin versant de l'Argance en amont de la station hydrométrique (bassin versant jaugé) sur la période 01/01/1999 – 31/12/2021 (lire ci-dessous comment ces données ont été augmentées et introduites dans le modèle).

L'examen des données de la BNPE appellent les commentaires suivants :

- L'exploitation de l'unité de production d'eau potable de la Chapelle-d'Aligné ne s'est pas poursuivie après 2007. Cette unité produisait de l'eau potable à partir d'un forage.
- Les prélèvements destinés à l'irrigation sont très majoritairement issus d'eau souterraine (seules deux prises d'eau superficielle prélèvent moins de 10% des volumes).
- Il n'y a pas de prélèvements industriels dans le bassin versant en amont de la station de jaugeage de la Chapelle-d'Aligné.

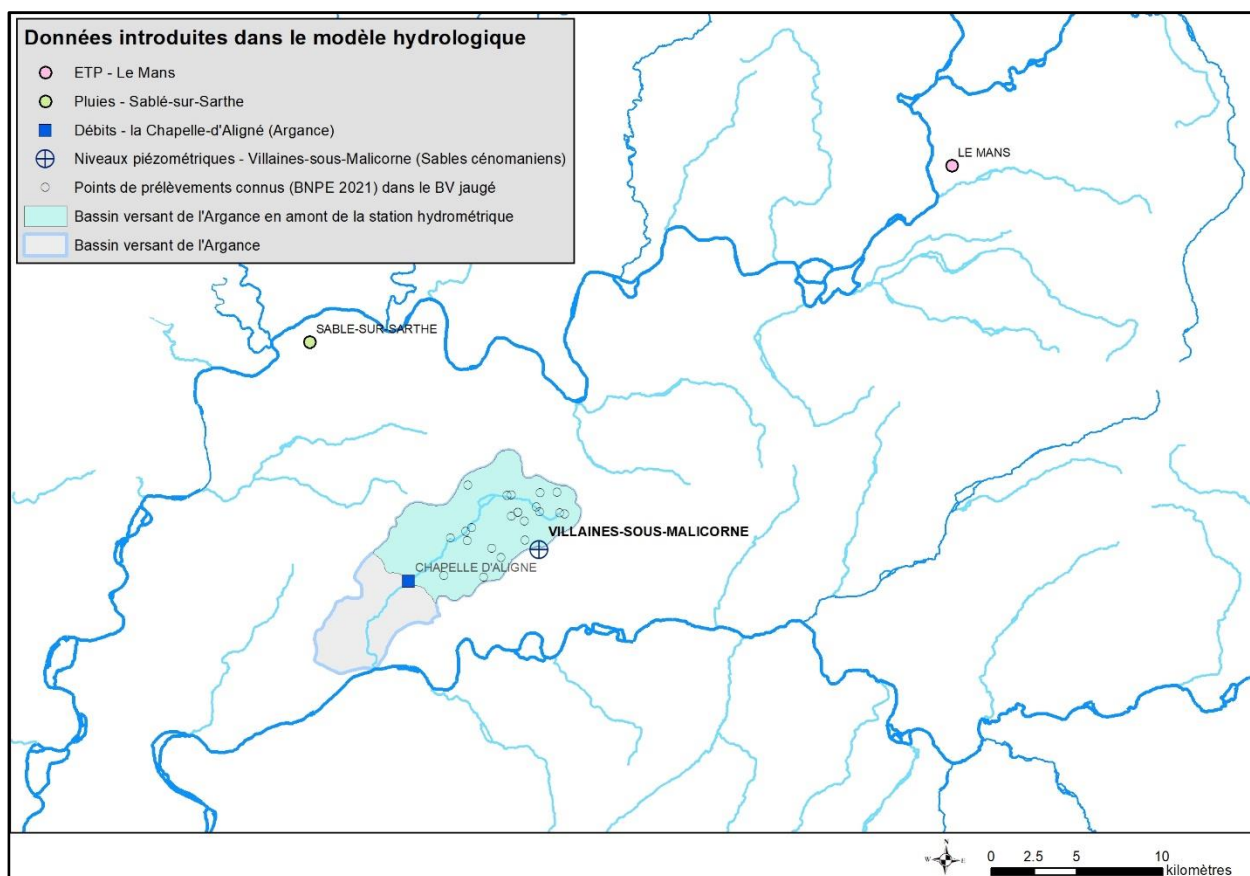


Illustration 4 : Localisation des stations de mesures dont les observations ont été introduites dans le modèle

Les données de prélèvement ont fait l'objet d'un traitement spécifique. Au moment de la construction du modèle et de son calage, nous disposons de deux sources de données :

- la BNPE (<https://bnpe.eaufrance.fr/>), qui fournit les volumes annuels prélevés sur la période 1998-2020 (1999 pour l'irrigation), déclinés selon les usages IRRIGATION/INDUSTRIES/AEP et basés sur la déclaration de redevance des usagers auprès de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne ;
- les résultats d'un travail spécifique réalisé par SUEZ (SAFEGE) pour le compte de l'EP Loire dans le cadre de l'étude HMUC (Hydrologie, Milieu, Usages, Climat) en cours dans le bassin versant de l'Argance, qui estiment les prélèvements journaliers sur la période 2000-2021 destinés aux usages IRRIGATION/ABREUVEMENT et prenant également en compte l'évaporation des plans d'eau ainsi que les rejets vers le milieu que constituent les fuites des réseaux AEP, les exhaures d'assainissement, et la lutte antigel.

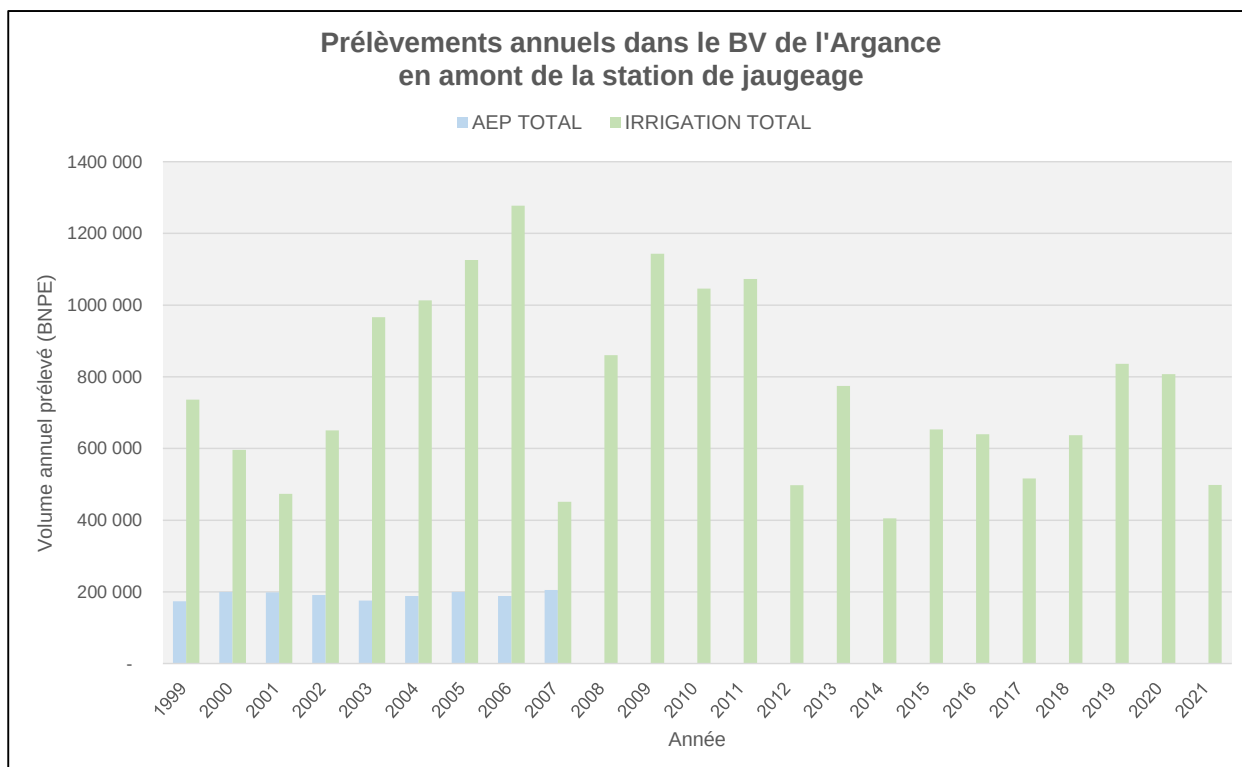


Illustration 5 : Prélèvements annuels connus dans le bassin versant de l'Argance en amont de la station hydrométrique entre 1999 et 2021 (BNPE).

À partir de ces deux sources de données, nous avons bâti un historique des prélèvements sur la période 1993-2022, comme le récapitule le Tableau 3 :

Période	IRRIGATION	AEP
1993-1997	Moyenne annuelle de la période 1999-2021 (BNPE)	Moyenne annuelle de la période où les prélèvements sont non nuls : 1998-2007
1998	Moyenne annuelle de la période 1999-2021 (BNPE)	BNPE
1999	BNPE	BNPE
2000-2020	Communiqués par l'EP Loire (HMUC)	BNPE
2021	BNPE	BNPE
2022	Valeur maximale des dix dernières années	Année 2021 BNPE : 0

	valeurs les plus fiables issues de la BNPE ou de l'analyse HMUC (EP Loire)
	valeurs incertaines issues d'une extrapolation sommaire

Tableau 3 : Tableau récapitulant les extrapolations effectuées pour augmenter l'historique des prélèvements.

S'agissant des prélèvements issus de la BNPE, les prélèvements ne sont pas intégrés au modèle de la même manière selon les usages. Dans le modèle GARDENIA©, les prélèvements sont introduits en débits instantanés sortants. Une étape de conversion des volumes en débits instantanés était donc nécessaire :

- pour les usages « industrie » et « eau potable » (y compris cheptel), les usages ont été moyennés sur 365 jours et ramenés à un débit moyen instantané exprimé en m³/s. Ainsi, un prélèvement d'eau potable de 500 000 m³ pour l'année 2015 est introduit dans le modèle GARDENIA© chaque jour de l'année 2015 par un débit sortant (négatif) instantané de $-\frac{500\,000}{365 \times 24 \times 365} = -0,01585 \text{ m}^3/\text{s}$.
- pour les usages « irrigation », les prélèvements ont été ventilés sur 100 jours du 24 mai au 31 août (période d'irrigation), et ramenés à un débit moyen instantané exprimé en m³/s. Ainsi, le prélèvement d'un irrigant de 10 000 m³ pour l'année 2018 est introduit dans le modèle aux GARDENIA© aux dates allant du 24 mai au 31 août 2018 par un débit sortant (négatif) instantané de $-\frac{10\,000}{100 \times 24 \times 3600} = -0,00116 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cette méthode pour intégrer de façon différenciée les prélèvements des bassins versants modélisés a déjà été employée dans le passé pour des études similaires en Loire-Atlantique (Chrétien, 2019), Mayenne (Chrétien & Manceau, 2020), et Sarthe (Chrétien, 2022). Elle n'a pas été nécessaire pour les prélèvements communiqués par l'EP Loire, qui ont été fournis au BRGM au pas de temps journalier (ils ont simplement été convertis en débit instantané, sans passer par la ventilation des prélèvements destinés à l'irrigation).

L'illustration 6 montre la prédominance des prélèvements estivaux, principalement destinés à l'irrigation, dans les usages de l'eau du bassin versant. Les prélèvements moyens des mois juin+juillet+août totalisent 1 050 000 m³, ce qui représentent un débit moyen sortant instantané de 132 L.s⁻¹, à comparer au QMNA5 de l'Argance (8 L.s⁻¹, cf. § 1.2.1).

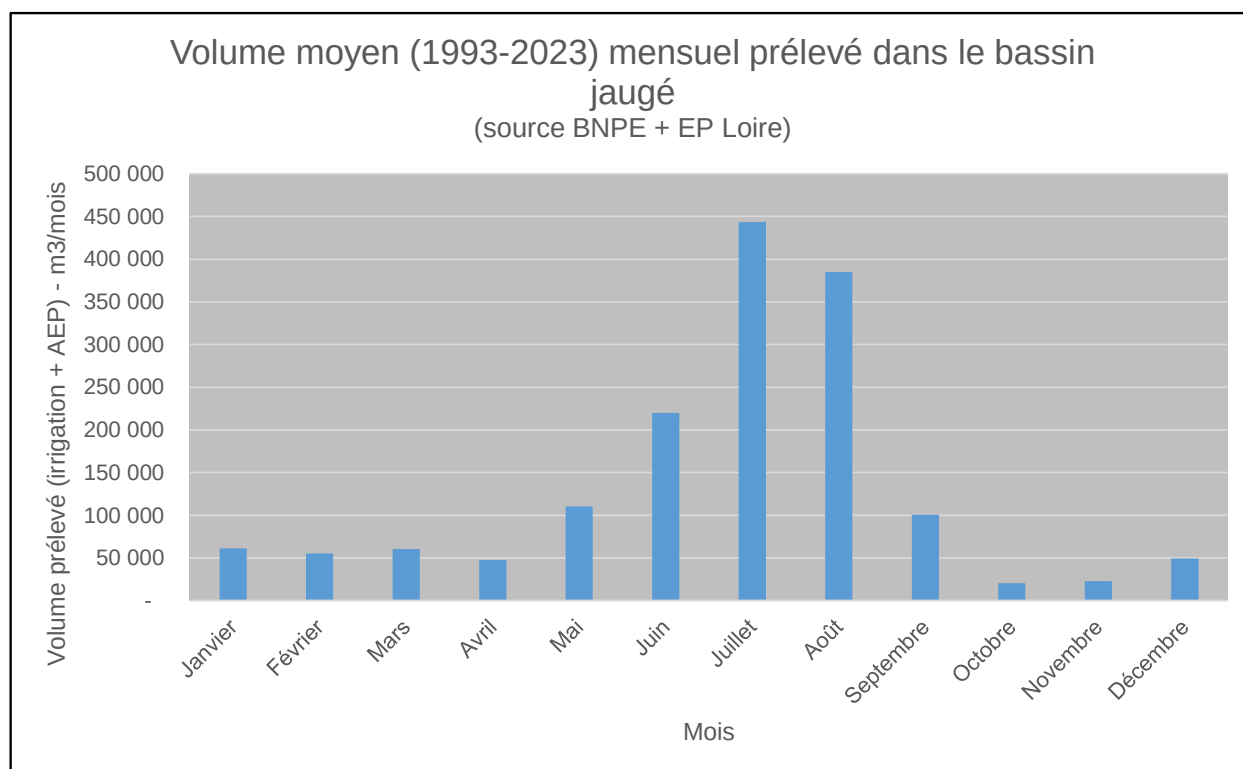


Illustration 6 : Prélèvements moyens mensuels intégrés dans le modèle global GARDENIA©

2.3. CALAGE DES MODELES

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
- 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 le cas présent pour le bassin versant de l'Argance.**

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.

Pour caractériser la performance du calage des modèles, nous donnons par la suite :

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

Afin de rendre compte de la coexistence de deux réservoirs au sein des sables cénomaniens (Craie sableuse du Turonien + Sables à Catopygus et Sables de la Trugalle), chacun étant susceptible de contribuer au débit de l'Argance (cf. § 1.2.2), nous avons adopté le schéma de

modélisation à deux réservoirs proposé par GARDENIA© (cf. Illustration 3). 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 des débits	Coefficient de Nash des niveaux piézométriques	Coefficient de Nash global du modèle
BV ARGANCE	Argance	Sables cénomaniens	1993-2022 avec 5 années de démarrage (1993-1997 non prises en compte dans le calcul du coefficient de Nash)	0,82	0,82	0,82

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 0,82, nous considérons que le modèle est bien calé (cf. Tableau 4). Le résultat graphique du calage figure sur les illustrations 7 à 10 ci-dessous.

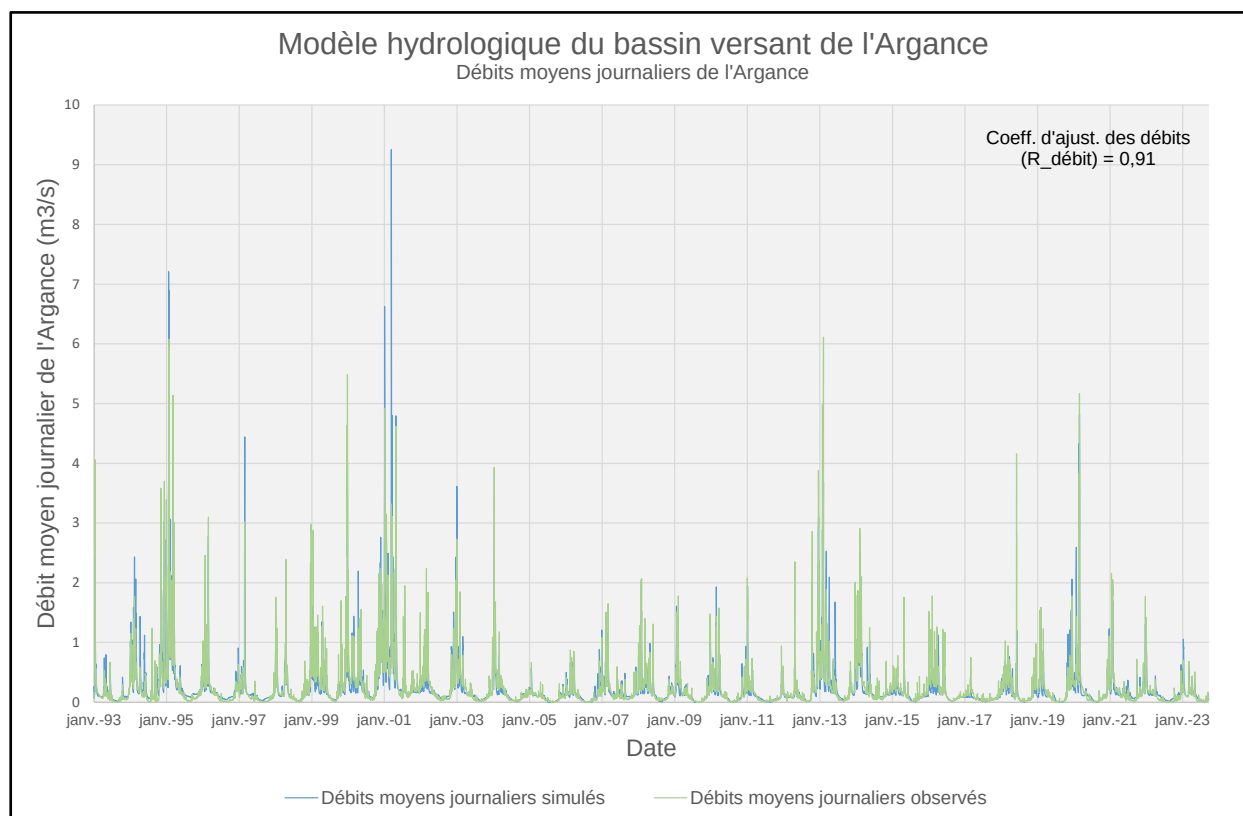


Illustration 7 : Ajustement des débits de l'Argance.

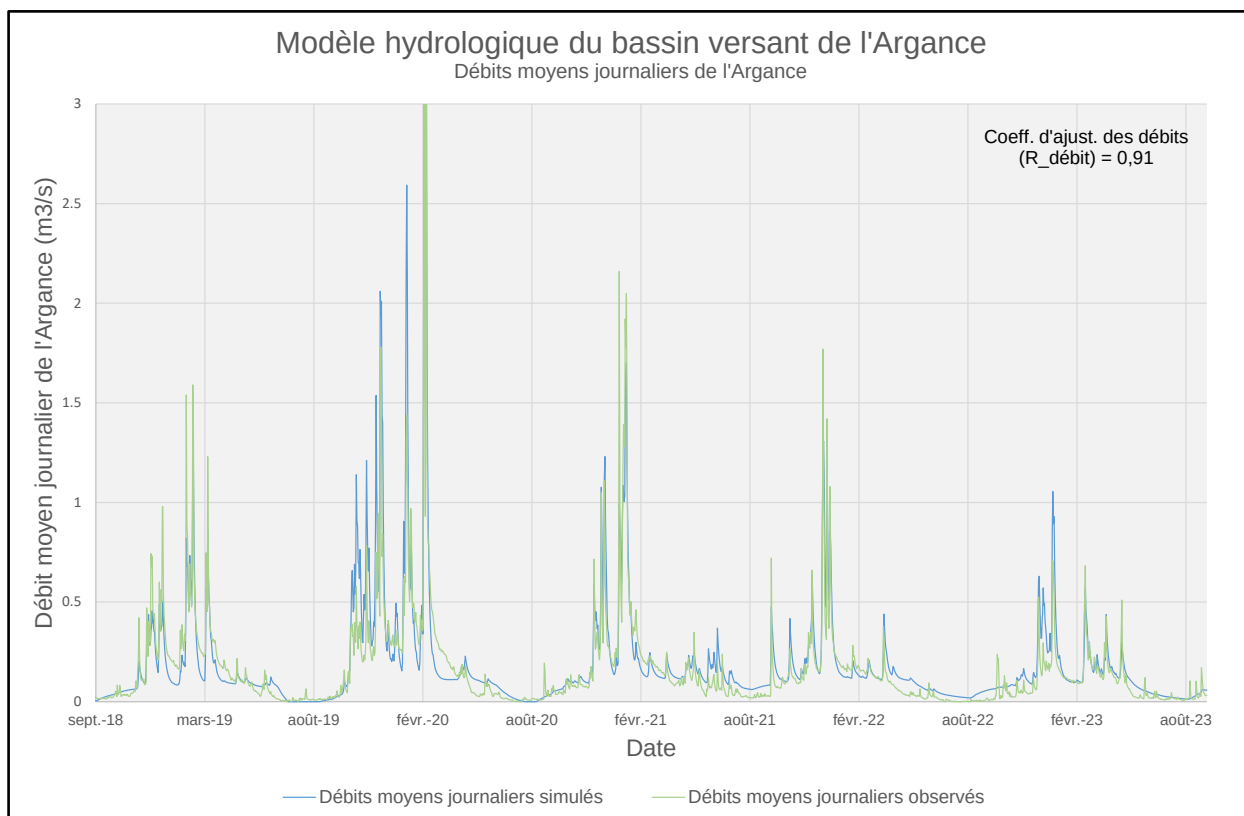


Illustration 8 : Ajustement des débits de l'Argance (détail des années 2016-2022).

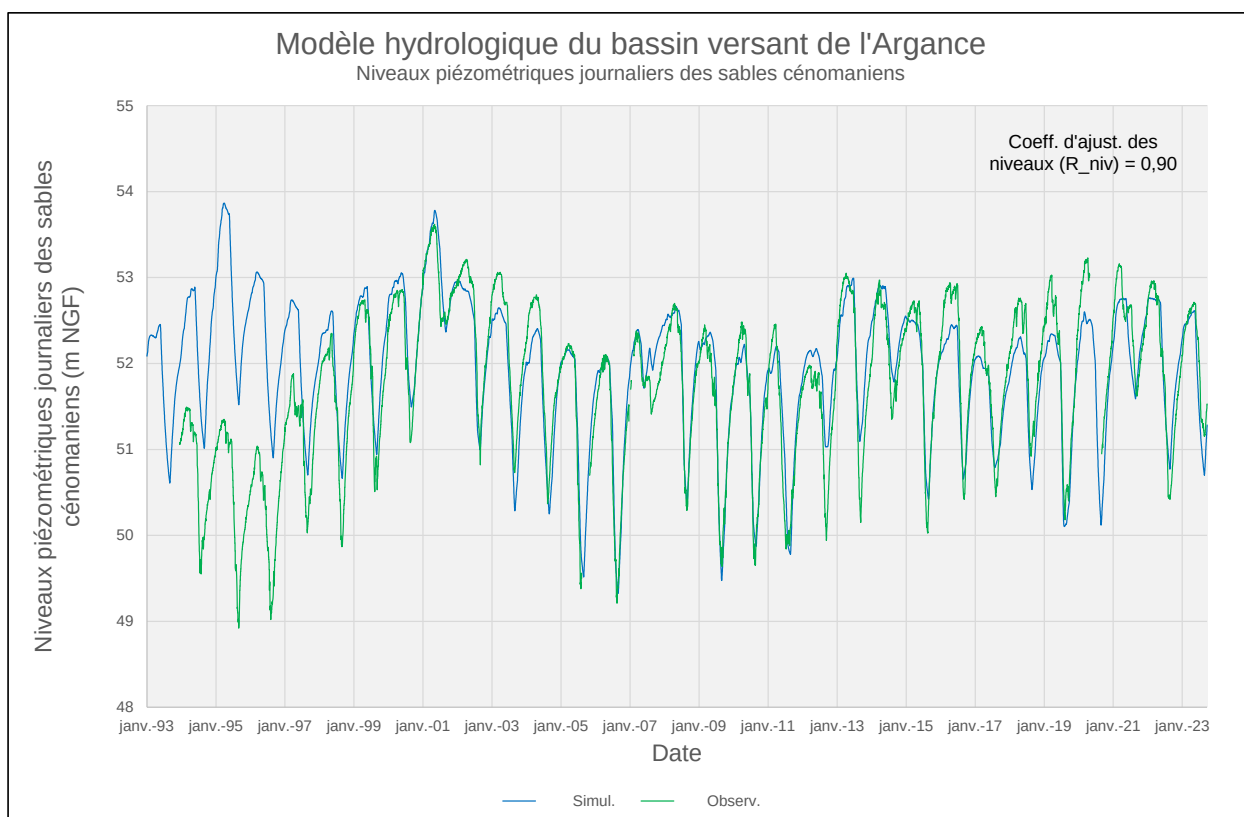


Illustration 9 : Ajustement des niveaux piézométriques des sables cénomaniens.

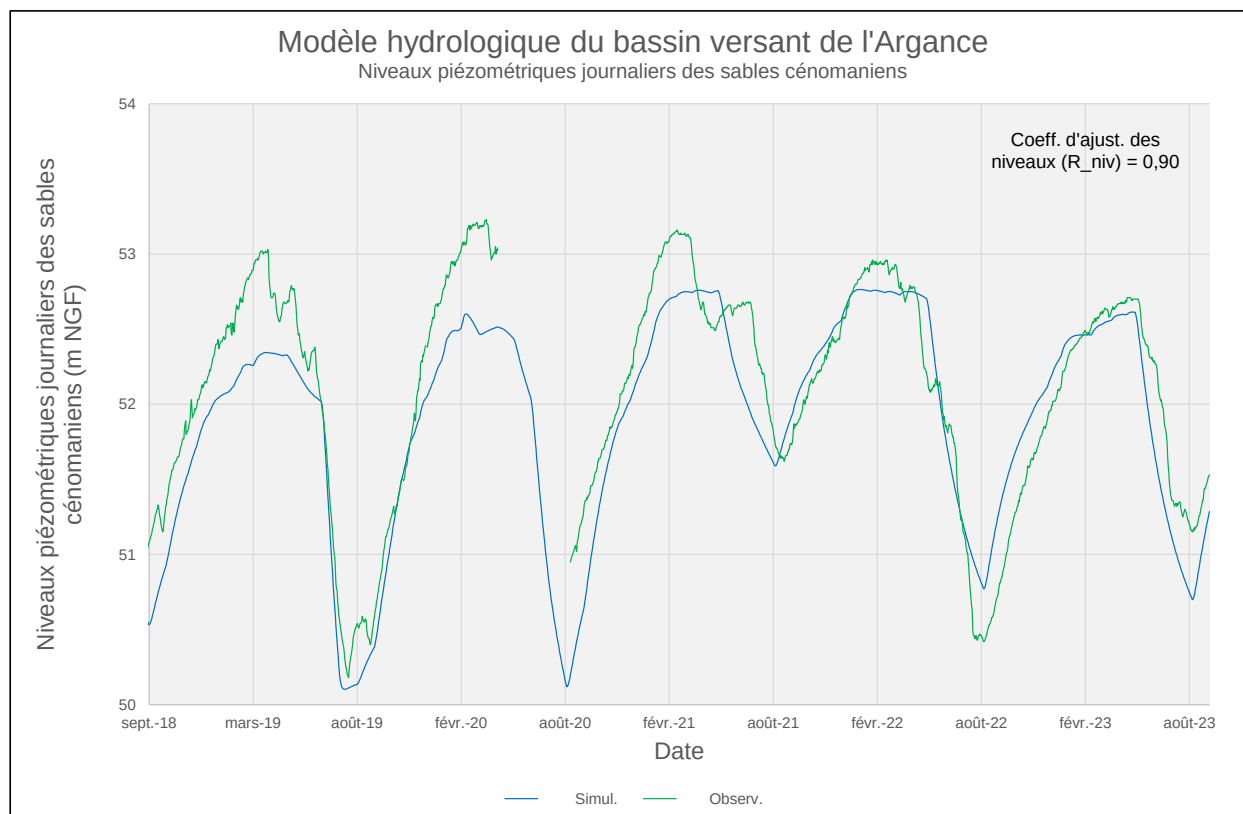


Illustration 10 : Ajustement des niveaux piézométriques des sables cénomaniens (détail des années 2016-2022).

Les paramètres de calage principaux sont les suivants :

- Superficie du bassin versant jaugé : 59 km² (donnée hydroportail)
- Débit extérieur (entrant ou sortant) : nul
- Coefficient d'emménagement : 4,5%, cohérent avec le caractère libre de l'aquifère sur la majeure partie du bassin versant
- Niveau piézométrique de base de l'aquifère modélisé : 51,34 m NGF
- Coefficient de correction des pluies : nul
- Coefficient de correction de l'ETP : 15%
- Capacité du réservoir sol progressif : 285 mm, cohérent avec les valeurs rencontrées dans les modèles sarthois déjà évoqués (Chrétien, 2022)
- Hauteur d'équi-Ruissellement-Percolation du réservoir hypodermique H (Rui_Perco) : 4,45 mm, cohérent avec les valeurs rencontrées dans les modèles sarthois déjà évoqués (Chrétien, 2022)
- Temps de 1/2 percolation vers la nappe (T1/2_Perco) : 0,4 mois, cohérent avec les valeurs rencontrées dans les modèles sarthois déjà évoqués (Chrétien, 2022)
- Temps de 1/2 tarissement souterrain (rapide) [Réservoir G1] : 11,4 mois, cohérent avec les valeurs rencontrées dans les modèles sarthois déjà évoqués (Chrétien, 2022)
- Temps de 1/2 tarissement souterrain lent [Réservoir G2] : 40,5 mois, cohérent avec les valeurs rencontrées dans les modèles sarthois déjà évoqués (Chrétien, 2022)

3. Résultats obtenus

Dans la configuration simplifiée retenue pour la modélisation (absence d'échanges souterrains avec l'extérieur du bassin, latéralement ou « sous » la section de jaugeage), le débit moyen mensuel de l'Argance calculé par le modèle GARDENIA© est la somme d'un écoulement rapide, d'un écoulement lent, et d'un écoulement très lent (car le modèle comporte deux réservoirs souterrains).

La contribution moyenne mensuelle des eaux souterraines au débit de l'Argance 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^{er} juin au 31 août qui correspond en règle générale à la période d'irrigation.

3.1. PLUIE EFFICACE ET RECHARGE DES SABLES CENOMANIENS

Le modèle hydrologique calcule la pluie efficace annuelle (= ruissellement + recharge). Elle est en moyenne de 139 mm/an au cours de la période 1993-2022 (années complètes), avec un écart type de 75 mm (cf. Illustration 11). La recharge quant à elle est en moyenne de 57 mm/an, avec un écart type de 21 mm.

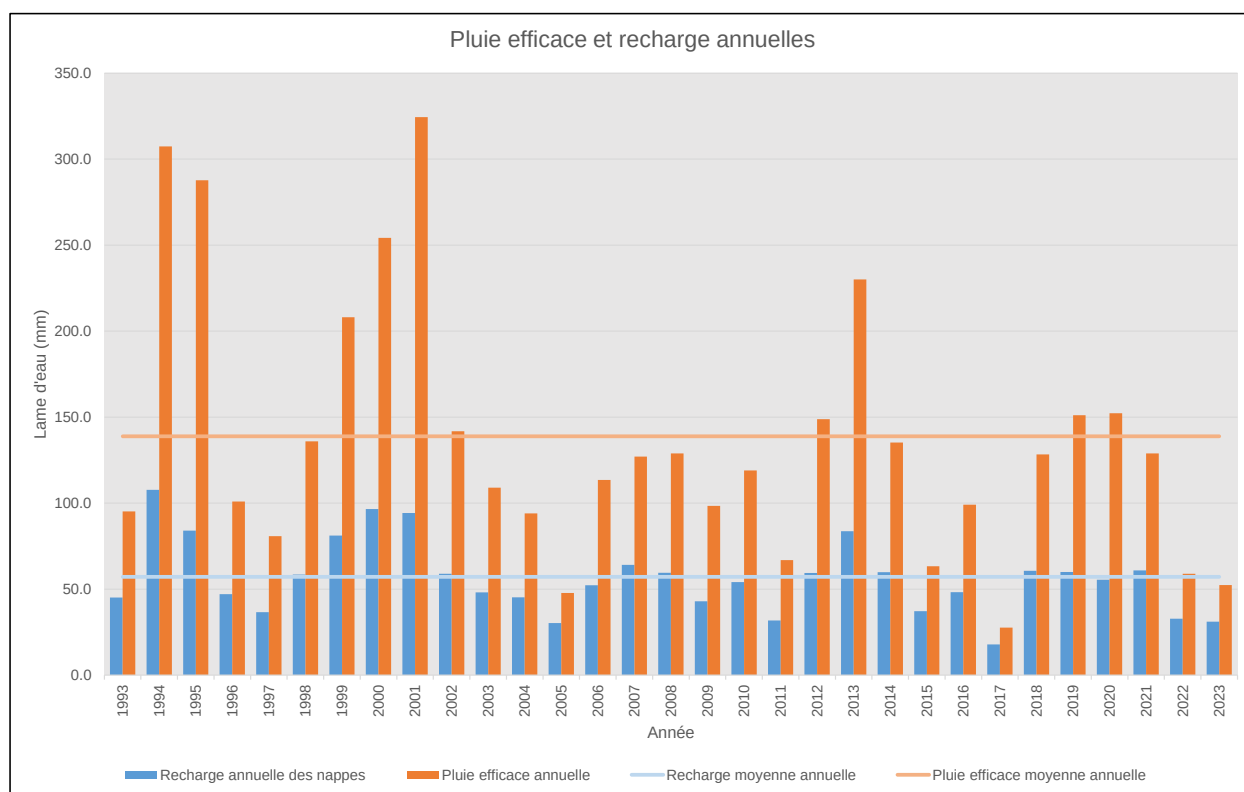


Illustration 11 : Pluie efficace et recharge annuelles.

Ces moyennes masquent la forte différence qui existe entre les valeurs estivales et hivernales de la recharge et de la pluie efficace (cf. Illustration 12). Le ruissellement (en première approximation, il est égal à la différence entre pluie efficace et recharge) est quasi nul de juillet à septembre.

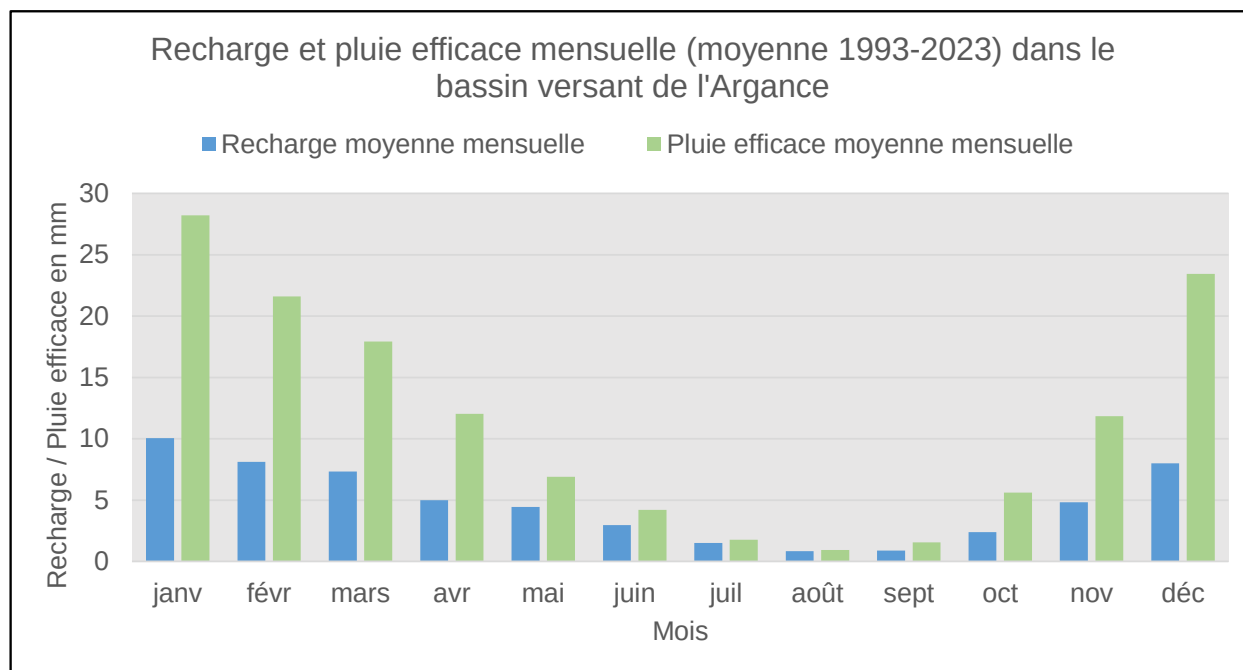


Illustration 12 : Recharge et pluie efficace mensuelle (moyenne 1993-2023).

Ces valeurs sont relativement faibles par rapport à celles que nous avons calculées dans une précédente étude selon la même méthode pour une dizaine de bassins versants sarthois, alors même que les précipitations du bassin versant sont proches de la moyenne (Tableau 5 et Illustration 13 issus de Chrétien, 2022).

Désignation du modèle	Cours d'eau modélisé	Aquifère dont les niveaux piézométriques sont modélisés	Pluie efficace moyenne annuelle	Recharge moyenne annuelle	Pluie brute
CULLOTERIE2	la Gée	Calcaires du Dogger	196	104	815
LATOCHE2	la Vègre	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	Orne saosnois	Calcaires du Dogger	231	122	687
CONTERIE	la Tortue	Craie séno-turonienne	168	108	683
MENUEAU	Orne champenois	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	Calcaires du Dogger	197	77	635
VAUXDUPUIS	la Veuve	Sables cénomaniens	153	86	635
CONTERIE2	le Narais	Craie séno-turonienne	140	108	615
Moyenne tous modèles			195	94	698

Tableau 5 : Pluie efficace et recharge moyennes annuelles calculées au moyen de modèles GARDENIA© dans plusieurs bassins versants de la Sarthe (adapté de Chrétien, 2022).

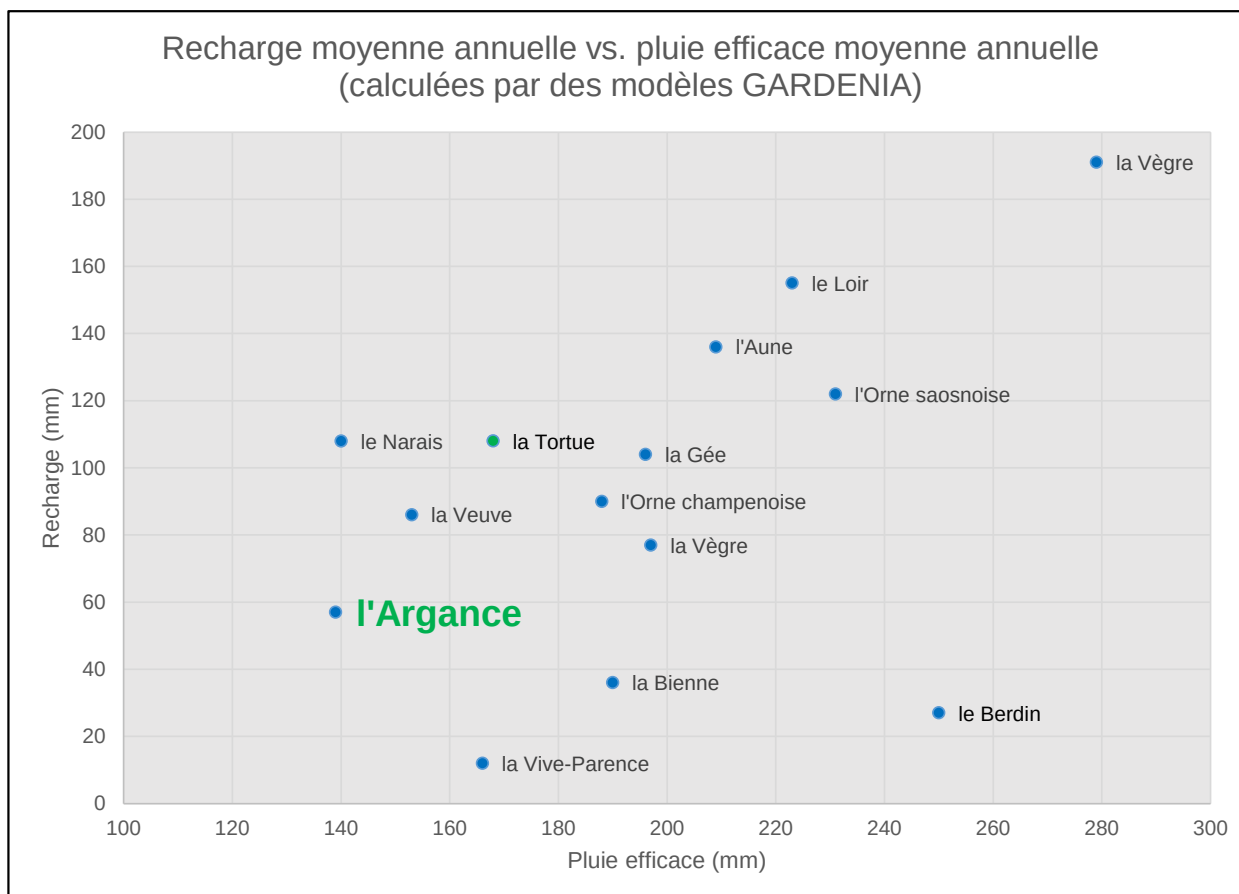


Illustration 13 : Recharge moyenne annuelle des nappes vs. pluie efficace moyenne annuelle.

3.2. CALCUL DU BASE FLOW INDEX AVEC LA METHODE ESPERE

La méthode [ESPERE](#) permet de mettre en œuvre rapidement et simultanément une dizaine de méthodes d'estimation de la recharge d'un aquifère ou de la pluie efficace. En s'appuyant sur des approches variées qui valorisent des données de nature différente, ESPERE fournit à la fois une estimation de la recharge de l'aquifère et un intervalle de confiance sur les résultats. ESPERE a été conçu pour limiter au maximum le nombre et le type de paramètres à fournir par l'utilisateur, de manière à pouvoir être appliqué dans un grand nombre de contexte, y compris en cas de connaissances réduites.

En l'occurrence, nous l'utilisons pour estimer le Base Flow Index (BFI), c'est-à-dire le rapport entre la somme des débits de base journaliers et la somme des débits journaliers, en appliquant la procédure de calcul du débit de base développée par l'Institut d'Hydrologie de Wallingford (Gustard et Dernuth, 2008). Le BFI peut être assimilé à la lame d'eau infiltrée qui rejoint le cours d'eau, et doit s'approcher de la contribution des nappes au débit de l'Argance.

Par cette méthode, on obtient un BFI moyen annuel (1993-2022) de 56%.

3.3. CONTRIBUTION DES NAPPES AU DEBIT 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 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.

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

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

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

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. En annexe 2 figure le détail mensuel au cours de la période 1998-2023 de cette contribution, exprimée en pourcentage et en lame d'eau (mm). Les tableaux et graphes ci-dessous en font la synthèse.

	Contribution relative (% du débit de l'Argance)	Contribution absolue (en mm, lame d'eau)
Janvier	29%	4.7
Février	38%	4.6
Mars	46%	5.2
Avril	60%	5.1
Mai	65%	5.2
Juin	77%	5.0
Juillet	91%	5.0
Août	96%	4.7
Septembre	95%	4.3
Octobre	79%	4.3
Novembre	60%	4.2
Décembre	37%	4.4

Tableau 6 : Contribution mensuelle des sables cénomaniens au débit de l'Argance – Moyenne des années 1998-2023

La contribution des sables cénomaniens au débit de l'Argance est toujours significative, puisqu'en moyenne mensuelle elle est comprise entre 29 et 96% du débit total du cours d'eau (cf. Tableau 6 et Illustration 14). Elle est presque exclusive en juillet, août et septembre. Ces observations sont conformes à celles que nous avons formulées dans l'étude précédemment citée (Chrétien, 2022), mais aussi dans des études antérieures portant sur des bassins versants de Loire-Atlantique (Chrétien, 2019) et Mayenne (Chrétien et Manceau, 2020).

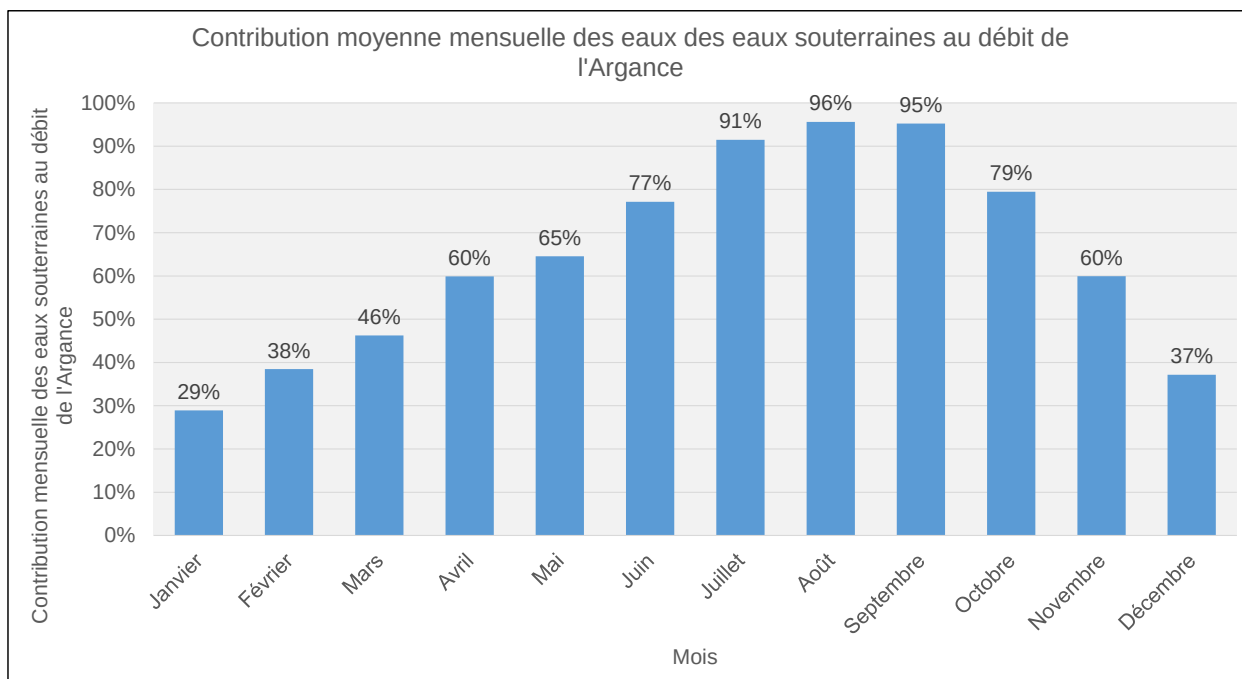


Illustration 14 : Histogramme de la contribution moyenne mensuelle des eaux souterraines au débit de l'Argance.

Par ailleurs, la moyenne annuelle de la contribution des nappes au débit de l'Argance estimée par le modèle est de 42%, donc du même ordre de grandeur que le BFI calculé par la méthode ESPERE (cf. § 3.2).

3.4. PREVISION DES DEBITS HIVERNAUX 2023-2024

Une fois calibré le modèle GARDÉNIA© peut être utilisé en simulation :

- Extension de données :

À partir des observations climatiques il permet de calculer, pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, ou le niveau piézométrique en un point d'une nappe, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures.

- Simulation de scénarios :

Simulation de débits ou de niveaux piézométriques résultant de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrage) ou de séquences de précipitations exceptionnelles (dimensionnement de fondations, de parkings).

- À cette possibilité de simulation, GARDÉNIA© v8.8 ajoute la possibilité d'émission de prévisions :

Il est ainsi possible de prolonger une série de débits ou de niveaux piézométriques observés jusqu'à une certaine date à partir de des scénarios de précipitations prévisionnels pour les semaines ou mois futurs (sécheresses, périodes de hautes eaux). Ce sont ces prévisions que nous présentons ici.

3.4.1. Principes de la méthode de prévision

a) *Calculs probabilistes à partir de scénarios*

Les précipitations n'étant évidemment pas connues après la date d'émission de la prévision, il est nécessaire de faire des hypothèses sur les précipitations futures. La méthode de prévision est la suivante :

- On rassemble un certain nombre d'années de précipitations réellement observées, de l'ordre de 30 à 50 ans si possible. Dans le cas présent, nous avons travaillé à partir des données de pluies et d'ETP de la période 1993-2023 soit (presque) 31 années de données (l'année 2023 étant incomplète au moment de la réalisation de la prévision).
- On suppose qu'après la date d'émission de la prévision (le 1^{er} octobre 2023 par exemple) les précipitations des quatre mois suivants (octobre à janvier) ont une égale probabilité d'être les précipitations des mois d'octobre à janvier 1993, ou 1994 etc. ou 2023.
- GARDÉNIA© réalise une simulation par année de précipitations disponible (31 scénarios dans notre exemple correspondant aux 31 années de précipitations).
- On dispose alors de 31 débits calculés pour le 1^{er} octobre, de 31 débits calculés pour le 2 octobre... 31 débits calculés pour le 29 mars 2023 (portée 180 jours).
- Pour un jour donné on dispose donc de 31 réalisations et GARDÉNIA© calcule le débit de probabilité de non-dépassement X % en classant tout simplement les 31 réalisations et en calculant le quantile X %. Ce calcul est fait séparément pour chaque pas de temps (pour chacun des 180 jours de la période du 1^{er} octobre 2023 au 29 mars 2024 dans notre exemple).
- Pour une probabilité de non-dépassement on dispose chaque jour d'un débit (qui correspond à des années différentes). GARDÉNIA© édite alors ces débits et les dessine. Ce sont des débits probabilistes.
- La courbe tracée donne pour chaque jour le débit ayant une probabilité de non-dépassement donnée.

b) *Correction des écarts en début de simulation*

Pour calculer les débits ou les niveaux de nappe à partir d'une certaine date il faut, en simulation comme en prévision, démarrer les calculs largement avant cette date pour permettre l'initialisation des niveaux des réservoirs du modèle.

Si la calibration est satisfaisante, le modèle permet généralement de reproduire correctement le fonctionnement d'un bassin versant à partir des précipitations et de l'Évapotranspiration potentielle. Cependant, bien que le modèle soit calibré, on observe à certaines périodes des écarts de simulation qui peuvent être dus à plusieurs raisons :

- Les précipitations ne sont pas parfaitement connues ou pas homogènes sur tout le bassin.
- Le fonctionnement du bassin est plus complexe que sa schématisation par le modèle (le tarissement n'est pas parfaitement exponentiel, la notion de réserve utile en est une simplification de la réalité, etc.)

Si ces écarts lorsqu'ils sont peu nombreux et d'amplitude modérée ne nuisent pas significativement aux résultats de la modélisation, ils sont plus ennuyants s'ils se produisent à la date d'émission de la prévision. La différence essentielle entre une simulation et une émission de prévision est en effet la suivante :

- Dans une opération de simulation, un écart de simulation au début de la période d'extension ne pose pas de problème car le but est d'obtenir une simulation statistiquement proche de vraies valeurs.
- Dans une opération de prévision, la situation est différente puisqu'on connaît exactement le débit ou le niveau de nappe à la date d'émission et le but est en fait de prévoir la variation par rapport à la dernière situation connue. Par exemple si la valeur observée le jour de l'émission est égale à 100 et si la valeur simulée est égale à 115 et décroît jusqu'à 105 dans les 30 jours suivants l'émission : on ne sait pas comment interpréter la prévision. Sachant que la dernière observation est égale à 100 : est-ce que la valeur dans 30 jours sera 105 comme calculé (soit une augmentation de +5) ou bien de 90 (soit une diminution de 10 ... comme prévu.)

Pour émettre une prévision fiable et utilisable il est donc nécessaire de minimiser au mieux l'écart de simulation initial. En fait pour obtenir des résultats fiables le modèle ne corrige pas uniquement l'écart initial, mais corrige régulièrement les éventuels écarts précédant l'émission de la prévision, au fur et à mesure qu'ils apparaissent. Les écarts de simulation sont réduits par une procédure adaptative qui permet de très légèrement corriger les niveaux des réservoirs du modèle de façon à se rapprocher de manière optimale des débits ou niveaux piézométriques observés.

Pour en savoir plus sur la procédure adaptative de correction des écarts, le lecteur pourra consulter Thiéry (2018 a et b).

3.4.2. Prévision des débits de l'Argance pour l'hiver 2023-2024

Une prévision des débits de l'Argance a été réalisée à partir du modèle hydrologique GARDENIA. La date d'émission de la prévision est le 1^{er} octobre 2023. Les débits ainsi simulés selon plusieurs scénarios climatiques statistiques de pluie figurent sur les Illustration 15 et Illustration 16.

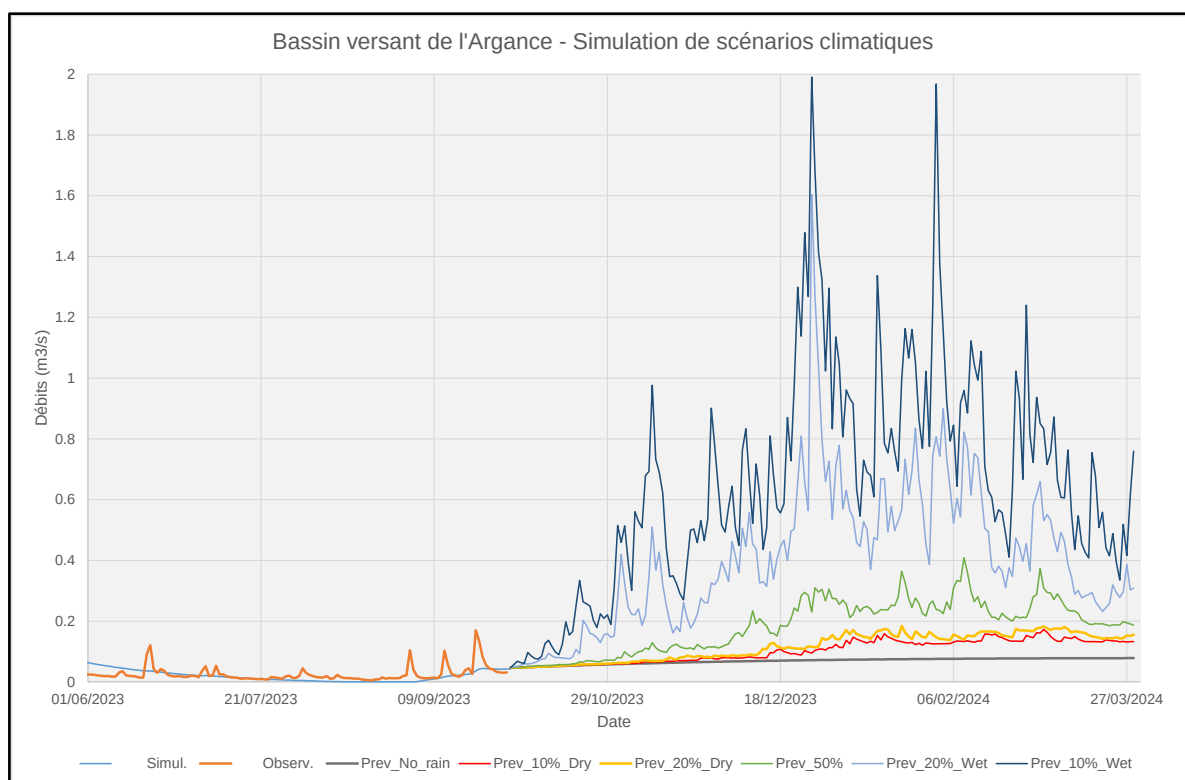


Illustration 15 : Prévision des débits de l'Argance (avec procédure adaptative).

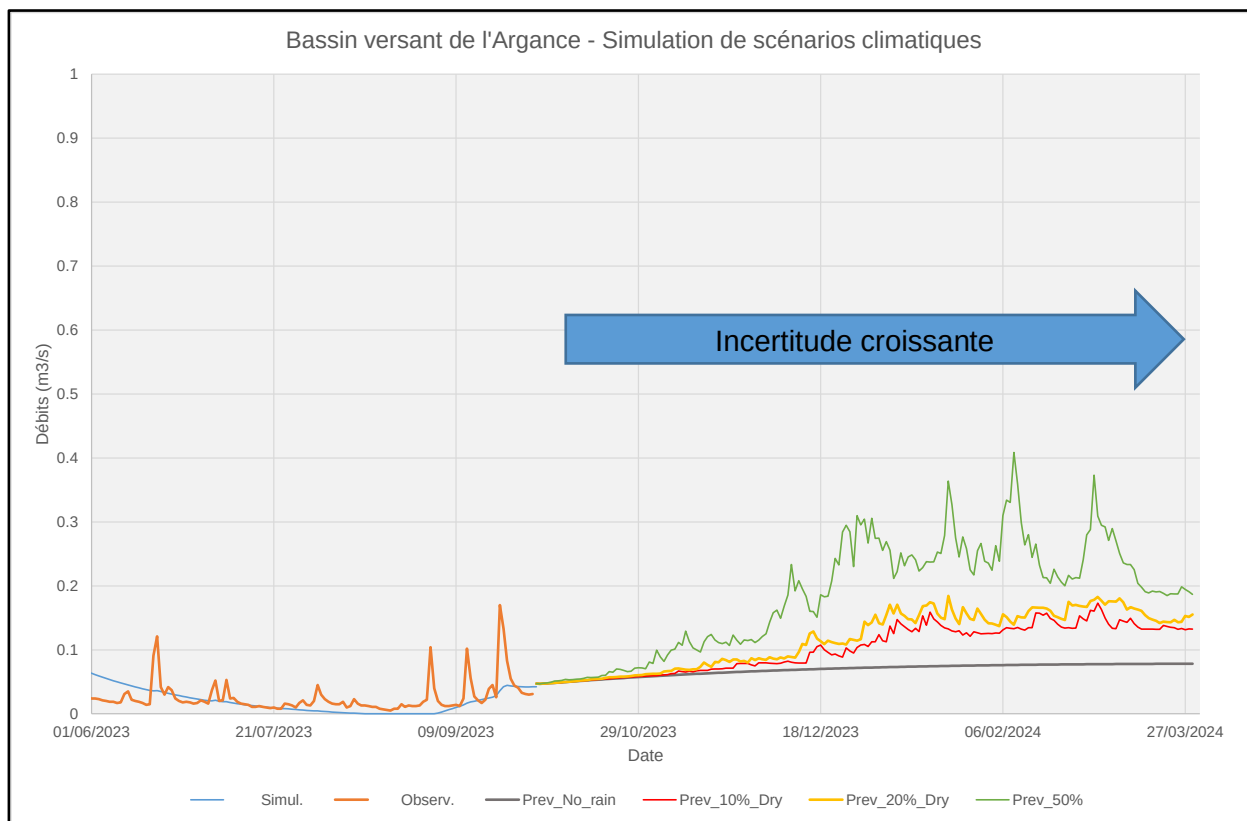


Illustration 16 : Prédiction des débits de l'Argance : zoom sur les plus faibles débits

Les seuils figurant sur les Illustration 15 et Illustration 16 proviennent de l'arrêté préfectoral relatif à la préservation de la ressource en eau en période de sécheresse (« arrêté cadre sécheresse » - ACS - du 30 juin 2020), et concernent spécifiquement le bassin versant de l'Argance.

La prévision des débits de l'Argance montre que même dans le scénario sans pluie (« prévision garantie »), les débits de l'Argance en sortie d'hiver se maintiendraient au-dessus du seuil d'alerte renforcée. Mais la portée de cette prévision (180 j à partir de la date d'émission) rend celle-ci très incertaine.

4. Conclusion

La direction régionale du BRGM Pays de La Loire a été sollicitée par l'Établissement Public Loire pour approfondir la connaissance du rôle des eaux souterraines dans le fonctionnement du bassin versant de l'Argance. Pour atteindre cet objectif, le BRGM a élaboré un modèle numérique hydrologique global des écoulements du bassins versants.

Au moyen de données climatiques (pluies et ETP journalières), celui-ci simule les débits moyens journaliers de l'Argance à la Chapelle d'Aligné et les niveaux piézométriques journaliers des sables du Cénomaniens inférieur à moyen. Il dresse le bilan des échanges d'eau au sein du bassin versant, représenté par un réservoir correspondant aux cours d'eau, et deux réservoirs correspondants aux eaux souterraines. Il quantifie les termes mensuels de ce bilan à l'échelle du bassin versant de l'Argance.

Il est intéressant de relever les enseignements suivants :

- La pluie efficace (ruissellement + recharge des nappes) moyenne annuelle du bassin versant s'établit à 139 mm/an. La recharge quant à elle est en moyenne de 57 mm/an.
- Ces valeurs sont relativement faibles par rapport à celles que nous avons calculées dans une précédente étude selon la même méthode pour d'autres bassins versants sarthois, alors même que les précipitations du bassin versant sont proches de la moyenne.
- Le ruissellement est nul ou presque entre juillet et septembre.
- Pendant cette période, le débit de l'Argance est quasi exclusivement assuré par la vidange des sables cénomaniens : ils contribuent pour près de 95% au débit des cours d'eau en moyenne (1998-2023). Cette observation est conforme à ce que nous avons pu démontrer antérieurement dans des bassins versants de Loire-Atlantique, Mayenne, et Sarthe.

Il convient de souligner que le bassin de l'Argance est soumis pendant l'étiage à une pression anthropique forte liée au niveau des prélèvements en nappe, qui représentent en moyenne à l'étiage un débit instantané sortant de -130 L.s^{-1} , soit seize fois supérieur au QMNA5 de l'Argance (8 L.s^{-1}). Ces prélèvements sont réalisés majoritairement par des forages destinés à l'irrigation, disséminés surtout en rive gauche de l'Argance. Bien que le modèle global que nous avons conçu prenne en compte ces prélèvements et simule correctement les niveaux des sables cénomaniens et les débits de l'Argance (compte-tenu des coefficients de Nash $> 0,8$), il ne saurait restituer avec précision l'impact de forages géographiquement dispersés dans le bassin versant. Leur nécessaire prise en compte engendre donc une incertitude sur les résultats du modèle.

Enfin, le modèle élaboré pour l'EP Loire peut être utilisé pour prévoir les niveaux piézométriques des sables cénomaniens et les débits de l'Argance, selon des scénarios climatiques statistiques. La prévision réalisée dans le cadre de l'étude montre que les débits de l'Argance devraient se maintenir au-dessus du seuil d'alerte renforcée à la sortie de l'hiver, mais ces résultats sont à considérer avec précaution compte-tenu de la longue portée de cette prévision (180 jours entre la date d'émission de la prévision au 1^{er} octobre 2023 et la fin mars 2024). Il conviendrait donc d'émettre une nouvelle prévision au milieu de l'hiver pour consolider ce résultat.

5. Bibliographie

Chrétien P. (2019) – Définition d'indicateurs piézométriques en Loire-Atlantique. Rapport final BRGM/RP-69140-FR, 160 p., 131 ill., 18 tabl., 2 ann.

Chrétien P. & Manceau J.-C. (2020) – Contribution à la définition d'indicateurs piézométriques dans le bassin versant de l'Oudon. Rapport final. BRGM/RP-70318-FR, 60 p., 15 ill., 11 tabl., 3 ann.

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.

Gustard A. & Dernuth S. (2008) - Low-Flow Estimation and Prediction, Operational Hydrology Report n°50 - WMO n°1029.

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.

Préfecture de la Sarthe (2020) – Arrêté cadre du 30 juin 2020 relatif à la préservation de la ressource en eau en période de sécheresse.

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

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

Thiéry D. (2018a) – Le modèle GARDENIA avec procédures adaptatives. Note technique NT EAU 2004/01. 17 p., 11 fig.

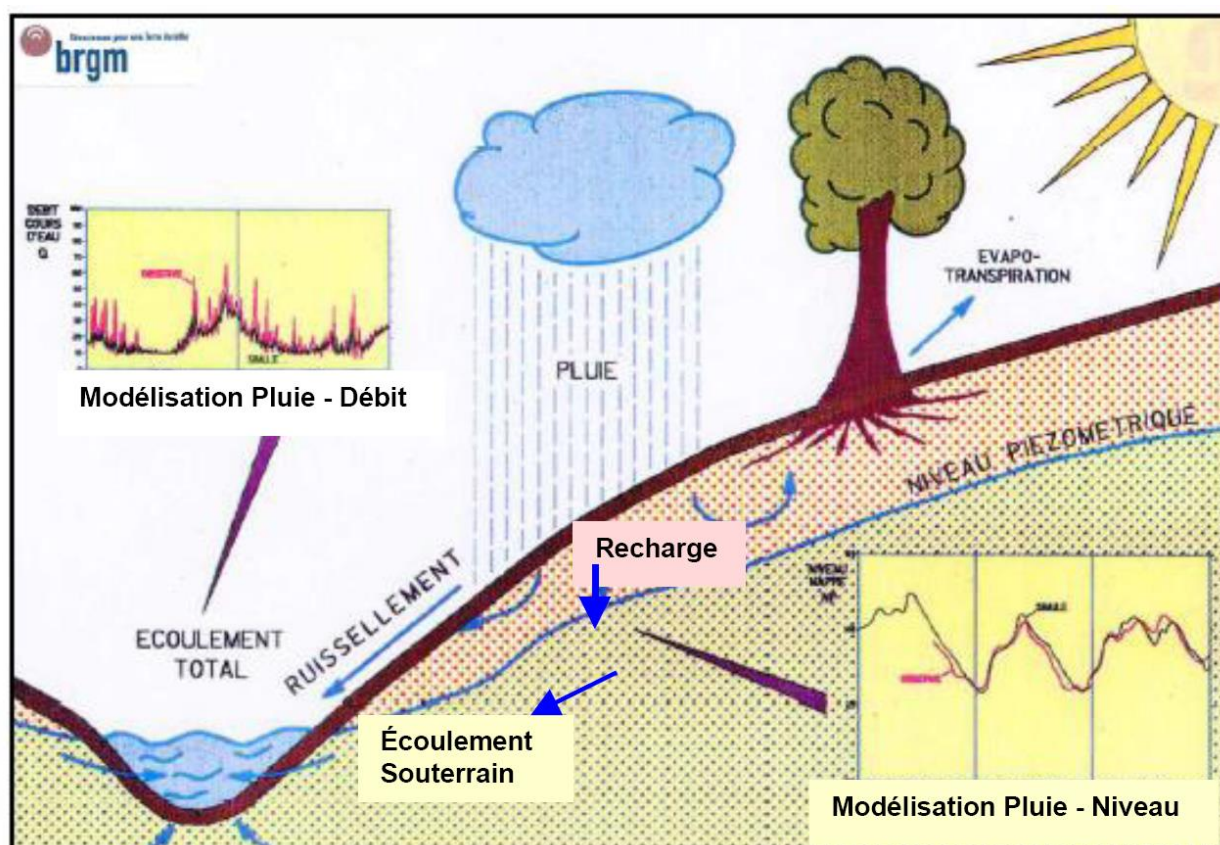
Thiéry D. (2018b) – Préviation de débits ou de niveaux avec le modèle hydrologique global GARDENIA v8.6. Note technique NT EAU 2004/02. 14 p., 6 fig.

Annexe 1

Description du logiciel GARDENIA©

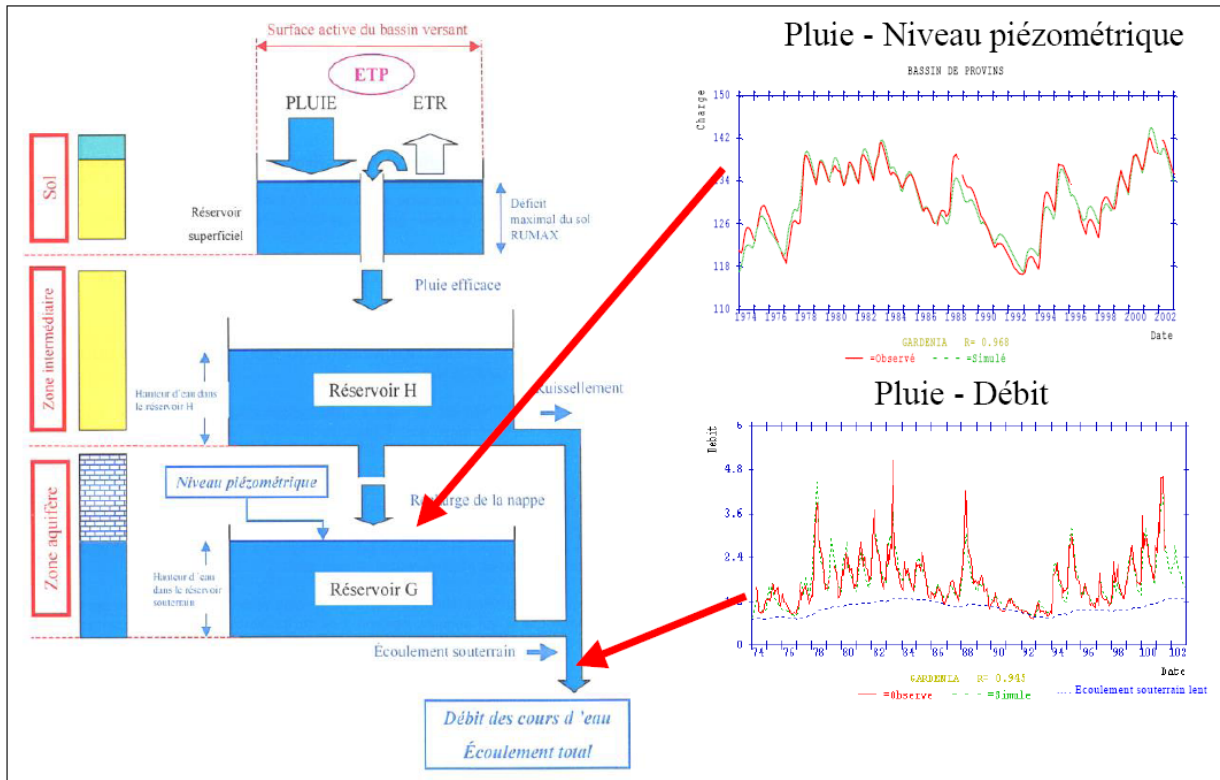
(Le contenu de cette annexe est adapté du rapport BRGM/RP-64123-FR de Lucassou et collab., 2015.)

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 de la présente étude ont été réalisées avec un modèle à deux réservoirs pour simuler les différents régimes d'écoulement souterrain existant dans les aquifères du bassin versant de l'Argance. 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 fournies par le bureau d'études SUEZ (SAFEGE) qui au moment de la réalisation de l'étude du BRGM était missionné par l'EP Loire pour établir une analyse HMUC (Hydrologie, Milieu, Usages, Climat) du bassin de l'Argance.

Annexe 2

Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit des cours d'eau

	Contribution mensuelle des eaux souterraines au débit du cours d'eau (%)																										
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Janvier	18%	15%	29%	10%	67%	16%	13%	41%	32%	23%	27%	21%	24%	19%	51%	14%	19%	53%	33%	94%	22%	42%	25%	21%	29%	22%	29%
Février	86%	27%	26%	23%	49%	30%	61%	71%	35%	16%	22%	33%	21%	32%	81%	12%	16%	49%	27%	80%	20%	20%	18%	23%	80%	85%	38%
Mars	66%	50%	37%	9%	39%	43%	44%	80%	21%	29%	29%	61%	21%	64%	90%	17%	48%	65%	28%	65%	24%	33%	13%	74%	78%	40%	46%
Avril	17%	25%	22%	22%	89%	95%	71%	82%	57%	90%	35%	63%	47%	98%	51%	29%	59%	74%	30%	98%	28%	85%	96%	79%	57%	47%	60%
Mai	58%	52%	39%	35%	81%	79%	78%	76%	71%	71%	46%	70%	93%	100%	39%	42%	38%	35%	56%	94%	57%	86%	74%	63%	93%	64%	65%
Juin	87%	63%	57%	95%	96%	90%	97%	93%	97%	48%	58%	89%	96%	100%	65%	34%	80%	84%	40%	99%	29%	83%	93%	58%	95%	97%	77%
Juillet	94%	95%	72%	79%	98%	88%	99%	99%	100%	45%	99%	99%	100%	100%	72%	95%	97%	99%	95%	98%	93%	97%	99%	54%	96%	98%	91%
Août	100%	99%	92%	95%	97%	98%	99%	100%	100%	54%	100%	100%	100%	96%	90%	100%	88%	100%	100%	97%	99%	99%	100%	88%	100%	99%	96%
Septembre	95%	91%	97%	95%	93%	100%	100%	100%	96%	90%	100%	100%	100%	97%	99%	100%	97%	88%	100%	93%	100%	100%	99%	99%	99%	95%	95%
Octobre	62%	35%	45%	87%	88%	100%	77%	93%	49%	97%	96%	100%	81%	99%	18%	93%	95%	85%	100%	98%	100%	66%	87%	57%	98%		79%
Novembre	47%	41%	13%	92%	20%	73%	77%	57%	35%	75%	45%	66%	42%	95%	27%	45%	77%	81%	96%	95%	46%	12%	79%	53%	72%		60%
Décembre	17%	12%	16%	82%	15%	46%	62%	45%	24%	42%	52%	23%	24%	34%	8%	34%	69%	77%	98%	45%	25%	12%	20%	24%	33%		37%
Min.	17%	12%	13%	9%	15%	16%	13%	41%	21%	16%	22%	21%	21%	19%	8%	12%	16%	35%	27%	45%	20%	12%	13%	21%	29%	22%	
Max.	100%	99%	97%	95%	98%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	97%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	99%	100%	99%	
Moyenne mensuelle (année hydrologique)	72%	54%	46%	45%	81%	63%	73%	80%	67%	48%	60%	69%	66%	71%	72%	41%	60%	75%	62%	93%	59%	68%	59%	62%	72%	71%	

Superficie du BV : 59 km2 en
amont de la Chapelle d'Aligné

	Débit souterrain mensuel alimentant le cours d'eau, exprimé en lame d'eau (en mm)																										
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Moyenne mensuelle
Janvier	4.1	4.7	5.8	7.5	6.7	6.3	5.1	4.2	3.5	4.1	4.6	4.5	4.1	4.4	3.3	4.7	5.5	4.8	4.0	3.5	2.8	3.7	4.7	4.5	4.9	3.9	4.74
Février	3.8	4.6	5.6	7.2	6.0	6.0	5.0	3.8	3.2	4.0	4.6	4.4	4.0	4.1	3.1	5.0	5.5	4.4	4.0	3.1	2.9	3.6	4.8	4.5	4.4	3.6	4.58
Mars	4.2	5.3	6.2	8.5	6.7	6.7	5.4	4.2	3.9	4.9	5.1	4.9	4.7	4.7	3.2	5.9	6.4	4.9	4.5	3.5	3.5	4.3	5.6	5.0	4.7	4.0	5.22
Avril	4.3	5.2	6.0	8.8	6.4	6.2	5.2	3.9	4.0	4.7	5.1	4.7	4.8	4.4	3.0	6.0	5.9	4.7	4.6	3.3	3.7	4.1	5.3	4.7	4.5	4.0	5.07
Mai	4.7	5.5	6.5	9.3	6.4	6.2	5.3	4.0	4.1	4.7	5.5	4.8	4.8	4.3	3.3	6.3	6.1	4.9	4.8	3.2	3.9	4.1	5.3	4.8	4.6	4.2	5.22
Juin	4.4	5.3	6.3	8.6	6.0	5.8	4.9	3.8	3.8	4.5	5.3	4.5	4.5	3.9	3.3	6.2	5.9	4.7	4.8	3.0	3.9	3.8	5.0	4.6	4.2	3.9	4.97
Juillet	4.4	5.3	6.4	8.5	5.9	5.8	4.9	3.7	3.8	4.8	5.2	4.5	4.4	3.8	3.4	6.3	5.9	4.6	4.9	2.9	4.0	3.8	4.9	4.8	4.2	3.8	4.95
Août	4.2	5.1	6.2	8.2	5.6	5.5	4.6	3.5	3.6	4.8	4.9	4.2	4.1	3.6	3.3	5.9	5.6	4.4	4.6	2.8	3.8	3.6	4.6	4.7	4.0	3.6	4.72
Septembre	3.8	4.6	5.7	7.5	5.1	5.0	4.2	3.2	3.3	4.6	4.5	3.9	3.8	3.3	3.1	5.4	5.2	4.0	4.2	2.6	3.5	3.3	4.2	4.4	3.6	3.4	4.35
Octobre	3.8	4.8	5.7	7.4	5.1	4.9	4.2	3.2	3.3	4.5	4.4	3.7	3.8	3.3	3.2	5.3	5.1	4.1	4.1	2.6	3.4	3.3	4.1	4.4	3.6		4.32
Novembre	3.8	4.8	5.9	6.9	5.0	4.6	4.0	3.1	3.3	4.2	4.2	3.5	3.6	3.0	3.5	5.1	4.8	3.8	3.7	2.4	3.2	3.5	3.9	4.3	3.4		4.16
Décembre	4.1	5.2	6.7	6.8	5.6	4.7	4.1	3.3	3.7	4.4	4.5	3.7	3.9	3.1	4.0	5.2	4.8	3.9	3.7	2.5	3.6	4.3	4.2	4.5	3.5		4.42
Min.	3.8	4.6	5.6	6.8	5.0	4.6	4.0	3.1	3.2	4.0	4.2	3.5	3.6	3.0	3.0	4.7	4.8	3.8	3.7	2.4	2.8	3.3	3.9	4.3	3.4	3.4	
Max.	4.7	5.5	6.7	9.3	6.7	6.7	5.4	4.2	4.1	4.9	5.5	4.9	4.8	4.7	4.0	6.3	6.4	4.9	4.9	3.5	4.0	4.3	5.6	5.0	4.9	4.2	Moyenne annuelle
Lame d'eau souterraine totale annuelle alimentant le cours d'eau (année hydrologique)	50	57	68	90	78	69	60	48	43	50	58	54	50	48	39	60	68	57	52	41	39	45	55	54	53	45	55



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

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

Direction régionale Pays-de-la-Loire

1 rue des Saumonières
BP 92343
44323 Nantes cedex 3 – France
Tél. : 02 51 86 01 51

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm