

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
*Liberté*
*Égalité*
*Fraternité*

Géosciences pour une Terre durable
brgm

**Document à accès immédiat**

# Outils d'Aide à la Gestion et Protection des Ressources en eau du département de l'Orne (61) - Fonctionnement quantitatif des principaux bassins-versants du département

## Rapport Final

**BRGM/RP-74443-FR**
Version 1 du 10 avril 2025

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

**Idée Erwan, Baulon Lisa, Laurencelle Marc et Boisson Alexandre**

Avec la collaboration de N. Sagnimorte et Q. Guerard

| **Vérificateur :** | |
|---|---|
| Nom : | Luc Arnaud |
| Fonction : | Hydrogéologue expert |
| Date : | 02/06/2025 |
| Signature : | |

| **Approbateur :** | |
|---|---|
| Nom : | Manuel Parizot |
| Fonction : | Directeur Régional Normandie |
| Date : | 31/08/2025 |
| Signature : | Manuel PARIZOT<br>Directeur Régional<br>BRGM Normandie |

**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

Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
*Liberté Égalité Fraternité*

AGENCE eau seine NORMANDIE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
*Liberté Égalité Fraternité*

agence de l'eau Loire-Bretagne

# Avertissement

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

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

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

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

# Votre avis nous intéresse

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

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

**Mots clés :** Normandie, Orne, Analyse statistique, Clustering, Bilan hydrologique, Hydrogéologie, Modélisation globale, Profil d'altération, Ressource en eau, GARDENIA, Risle, Sarthe, Noireau, Rouvre, Touques, Iton, Avre, Huisne, Varenne, Mayenne, Dives

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

**Idée Erwan, Baulon Lisa, Laurencelle Marc et Boisson Alexandre (2025)** – Outils d'Aide à la Gestion et Protection des Ressources en eau du département de l'Orne (61) - Fonctionnement quantitatif des principaux bassins-versants du département. Rapport Final V1.BRGM/RP-74443-FR, 183 p.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-22/09/2022

# Synthèse

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme de mise à disposition d'un Outil d'Aide à la décision et de Gestion des Principales Ressources aquifères du département de l'Orne (OAGPRO 61). Celui-ci est mené en partenariat avec le Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne (SDE61) et avec le soutien des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne.

Ce travail fait suite à une première phase de synthèse et valorisation des données géologiques et hydrogéologiques existantes, qui s'est terminée en 2019 (Phase 1). Il s'inscrit donc dans une seconde phase du programme qui consiste à fournir des éléments opérationnels de connaissance, quantitatifs et qualitatifs, devant permettre une meilleure gestion des ressources en eau souterraine du département de l'Orne (Atlas hydrogéologique).

Lors de la phase 1 du programme OAGPRO61, il a pu être souligné (RP-69331-FR) le fait que :

- Les cours d'eau du domaine de socle ont les débits spécifiques moyens interannuels (modules) les plus importants du département : 10 à 15 l/s par km².
- En domaine sédimentaire, les débits spécifiques moyens des rivières sont plus faibles : 5 à 9 l/s/km². A noter : les BV de l'Avre et de l'Eure présentent des débits spécifiques très faibles qui s'expliquent vraisemblablement par l'existence de circulations karstiques.
- L'indicateur du ratio entre module et QMNA5 montre qu'il existe un effet de saisonnalité très marqué sur les bassins versants du domaine de socle armoricain : rapport de 10 à 20 alors qu'il est plutôt de l'ordre de 2 à 4 (hors BV de l'Avre et de l'Eure) pour les cours d'eau du domaine sédimentaire (et voisin de 10 pour les cours d'eau situés sur des bassins versants « mixtes » comme la Sarthe et l'Orne).

Ainsi le débit des cours d'eau situés sur des bassins versants du domaine sédimentaire est plus régulier tout au long de l'année, à l'inverse de ceux du domaine armoricain. Les débits des cours d'eau en domaine sédimentaire sont soutenus par les puissantes nappes des formations jurassiques et de la craie. A noter tout de même : quelques rivières des formations de socle, comme le Noireau et la Varenne, peuvent avoir des débits spécifiques estivaux plus élevés que celles des bassins versants mixtes que sont l'Orne et la Sarthe, pourtant alimentées en partie par les formations calcaires du Jurassique.

**Du fait de son contexte géologique et géomorphologique, il existe donc une forte disparité dans le fonctionnement hydrologique des principaux bassins versants du département de l'Orne.**

C'est pour cela que le SDE61 a souhaité que le BRGM précise la contribution des eaux souterraines au fonctionnement hydrologique des principaux bassins versants du département de l'Orne, et remette ces éléments dans leur contexte géologique et hydrogéologique de façon à préciser le rôle quantitatif des principaux aquifères.

Les principaux apports de ce volet quantitatif du programme OAGPRO61 peuvent être résumés de la façon suivante.

L'une des avancées majeures a consisté à adapter les méthodologies d'estimation des principaux prélèvements en eaux souterraines et en eaux de surfaces en parallèle des réflexions menées sur les territoires des SAGE Sarthe Amont, Mayenne et ZRE Bajocien-Bathonien. Ces évolutions

ont permis de caractériser la pression en prélèvement exercée sur les ressources à l'échelle départementale.

Dans le cadre de cet exercice, le BRGM a pu identifier un certain nombre de lacunes, notamment sur les données de rejets qui peuvent peser sur les bilans quantitatifs. En cohérence, un certain nombre de recommandations ont pu être émises pour que des précisions puissent être apportées dans le cadre des études EVP ou HMUC, afin de vérifier ou affiner certaines hypothèses.

Les informations compilées à l'échelle départementale ont permis de souligner le fait que les bassins versants de l'Orne, la Sarthe, l'Huisne et la Varenne sont les secteurs présentant les ratios volumes prélevés/volumes rejetés les plus défavorables, et dans une moindre mesure les bassins versants de l'Iton, de la Rouvre et de la Vie.

À l'inverse, les bassins versants de la Mayenne, du Noireau, de la Dives, de la Risle, de l'Eure, de l'Avre et de l'Orbiquet semblent avoir des ratios plus favorables (ces résultats peuvent être nuancés par les lacunes concernant les données de rejets collectées et disponibles pour les besoins de cette étude).

Dans ce volet, les résultats de quatorze modèles globaux (type GARDENIA) ont été utilisés (dont douze nouveaux mis en œuvre ou mis à jour dans le cadre du programme OAGPRO61) de manière à couvrir la quasi-totalité des bassins versants et permettant de disposer d'informations quantitatives comparables sur une grande partie du département. Ces modèles permettent de simuler le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique global d'un bassin versant pour chercher à reproduire les signaux de débit d'un cours d'eau et de niveau des eaux souterraines à l'aide de données climatiques.

Les bilans hydrologiques obtenus à l'aide des modélisations globales font apparaitre les éléments suivants :

Domaine sédimentaire :

- Les bassins versants crayeux de l'Est (ex. Iton, Avre, Guiel, Charentonne) offrent le meilleur soutien aux cours d'eau et un potentiel intéressant pour de futurs prélèvements, malgré des fonctionnements parfois karstiques.
- Les bassins de la Vie, de la Touques et de l'Huisne présentent des aquifères complexes (céno-turonien, oxfordien) nécessitant une meilleure évaluation des prélèvements possibles.
- L'aquifère Aalénien-Bajocien-Bathonien, bien que largement répandu, a un potentiel limité (bassins de la Dives, de la Sarthe et de l'Orne), car souvent captif et de qualité dégradée.

Domaine de socle :

- Le soutien aux cours d'eau est globalement faible, sauf pour la Varenne et la Mayenne, qui présentent un meilleur potentiel.
- Des études complémentaires sont nécessaires pour expliquer ces différences, notamment vis-à-vis de la Rouvre et du Noireau, moins favorables.
- Toutefois, les prélèvements déjà importants sur la Varenne-Égrenne et la Mayenne limitent la création de nouveaux points, sauf en cas de substitution entre eaux de surface et eaux souterraines.

Par ailleurs, l'analyse des chroniques de niveau et de débit des cours d'eau effectuée pour évaluer leur représentativité afin de pouvoir les utiliser dans les outils de modélisation a permis également de souligner les différences de dynamiques entre des cours d'eau du département de l'Orne. Cette analyse complémentaire a cherché également à évaluer la diversité du territoire

dans sa résilience aux sècheresses en lien avec les aquifères du territoire, que l'on peut résumer ainsi :

- À l'Est (domaine sédimentaire) : Les nappes, plus inertielles, réagissent lentement aux déficits pluviométriques (et à l'inverse également les recharges sont lentes). Les déficits de pluies efficaces pendant les périodes habituelles de recharge peuvent entrainer un allongement des périodes de vidange (cas des craies cénomaniennes et turoniennes) avec parfois des sécheresses qui peuvent alors durer plusieurs mois ou années.
- À l'Ouest (domaine de socle) : Les aquifères, peu capacitifs mais réactifs, se rechargent et se vident rapidement. Ils supportent mal les déficits prolongés ou les recharges tardives, ce qui peut poser des problèmes à l'échelle saisonnière.

Ce travail constituait une première approche dans la compréhension du fonctionnement quantitatif des bassins versants du département de l'Orne qui peut ouvrir la voie à l'utilisation plus généralisée des outils de modélisation pour une meilleure gestion territoriale des ressources en eau du département de l'Orne, notamment pour répondre aux questions de la résilience de ces ressources face aux sécheresses et de leur évolution future en contexte de réchauffement global (étude changement climatique).

Un dernier volet s'est attaché à compiler quelques éléments de connaissance sur les formations d'altération puisque ce rapport et les précédents ont pu mettre en évidence le rôle quantitatif et qualitatif prépondérant, pour ne pas dire majeur, dans la dynamique hydrologique des bassins versants et de leurs aquifères. Il a pu être fait le constat que les connaissances disponibles montrent de grandes lacunes sur le développement des altérites et leur cartographie ainsi que la quantification de leur rôle hydrogéologique, quel que soit le type de contexte (formations de socle ou sédimentaires).

Cette étude quantitative a permis enfin au BRGM de lister un certain nombre de recommandations :

1. De développer ou d'adapter les outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion quantitative à l'échelle des principaux SAGE du territoire, sur des bassins versants de l'Orne (dont Rouvre et Noireau), de la Sarthe amont et de l'Huisne en particulier (modèle globaux insuffisants) pour appréhender les ressources disponibles :
    a. D'une manière générale de poursuivre la collecte des données de prélèvements et rejets ;
    b. D'améliorer le suivi des eaux souterraines et superficielles, afin de disposer de données représentatives et de chroniques suffisantes pour permettre leur analyse et utilisation dans les outils de gestion ;
    c. D'améliorer la connaissance sur les secteurs à forts enjeux. Des compléments semblent nécessaires à ce sujet sur l'Orne amont, la Sarthe amont et l'Huisne pour mieux prendre en compte la complexité hydrogéologique de ces grands ensembles hétérogènes (interfaces des formations aquifères, relations nappes-rivières (jaugeages), effet de la compartimentation verticale et horizontale sur les écoulements et fonctionnement des nappes.
2. En domaine Sédimentaire :
    a. D'améliorer la connaissance du fonctionnement des secteurs alimentés par des nappes superposées, en particulier sur les bassins de l'Huisne et de la Touques. Mais aussi sur les secteurs où les ressources exploitées sont captives, de façon à mieux caractériser leur recharge et les effets de drainance, mais aussi à mieux évaluer l'incidence réelle des prélèvements sur la ressource ;

b. D'améliorer la connaissance du fonctionnement karstique des aquifères sédimentaires afin de mieux évaluer l'incidence quantitative et qualitative de ces fonctionnements.

3. En domaine de socle :
   a. D'améliorer la connaissance et la caractérisation des singularités du fonctionnement hydrogéologique des bassins de la Varenne (dont l'Egrenne son principal affluent) et de la Mayenne et notamment du rôle pressenti des formations paléozoïques ;
   b. D'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrogéologique des aquifères de socle, notamment du rôle de l'altération et des structures tectoniques sur leur capacité aquifère et leur productivité.

# Sommaire

1 Introduction ..... 15
1.1 Contexte general ..... 15
1.2 Contexte spécifique ..... 15

2 Bilan des prélèvements et rejets par bassin versant ..... 19
2.1 Collecte des données ..... 19
*2.1.1 Collecte des données de prélèvements ..... 19*
*2.1.2 Collecte des données de rejets ..... 22*
2.2 Estimation des prelevements sur les principaux bassins versants ..... 23
*2.2.1 Prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) ..... 23*
*2.2.2 Prélèvements industriels ..... 27*
*2.2.3 Prélèvements agricoles ..... 31*
*2.2.4 Synthèse pour l'ensemble des prélèvements ..... 45*
2.3 Bilan des rejets ..... 49
*2.3.1 Origine des données ..... 49*
*2.3.2 Mensualisation des rejets ..... 49*
*2.3.3 Synthèse des rejets ..... 50*
2.4 Synthèse globale du volet prélevements-rejets ..... 52
*2.4.1 Principaux résultats ..... 52*
*2.4.2 Comparaison avec les éléments rapportés en bibliographie ..... 54*
*2.4.3 Recommandations techniques pour les besoins d'études volumes prélevables ..... 54*

3 Analyse préliminaire des chroniques piézométriques et hydrologiques disponibles pour les besoins des modèles ..... 57
3.1 Objectifs ..... 57
3.2 Méthodologie ..... 57
*3.2.1 Données disponibles ..... 57*
*3.2.2 Regroupement par similarités statistiques (clustering) ..... 58*
*3.2.3 Dynamique des chroniques ..... 59*
3.3 Résultats ..... 61
*3.3.1 Similitude des chroniques et proposition de clustering ..... 61*
*3.3.2 Dynamique des débits (eaux de surface) et niveaux piézométriques (eaux souterraines) à l'échelle des bassins versants ..... 68*

4 Apport de la modélisation pour l'évaluation de la contribution des ressources en eaux souterraines au fonctionnement hydrologique des bassins-versants ..... 77
4.1 Objectifs et Méthodologie générale ..... 77
*4.1.1 Rappel des besoins et objectifs de ce volet ..... 77*
*4.1.2 Principes de fonctionnement du modèle GARDENIA ..... 77*
*4.1.3 Principe de fonctionnement du modèle Eros ..... 78*
4.2 Délimitation et structuration des zones à modeliser ..... 79
*4.2.1 Choix des bassins versants ..... 79*
*4.2.2 Principes de calibration ..... 80*
4.3 Données d'entrée des modèles ..... 81
*4.3.1 Précipitations et évapotranspiration ..... 81*
*4.3.2 Capacité du réservoir sol ..... 83*
*4.3.3 Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation ou le RUIPER ..... 83*
*4.3.4 Prélèvements dans les eaux souterraines ..... 85*
4.4 Résultats issus de l'exploitation des modeles globaux ..... 86
*4.4.1 Remarques sur le fonctionnement hydrogéologique des bassins versants ..... 89*

*4.4.2 Evolutions possibles des ressources dans le futur, en contexte de changement climatique (synthèse bibliographique) ..... 104*
*4.4.3 Enseignements méthodologiques sur les données et outils utilisés ..... 116*

5 Pour aller plus loin… sur les altérites du département de l'Orne ..... 119
5.1 Préambule ..... 119
*5.1.1 Définitions ..... 119*
*5.1.2 Objectifs ..... 120*
*5.1.3 Méthodologie ..... 121*
5.2 Caractérisation pour le département de l'Orne ..... 123
*5.2.1 Domaine sédimentaire ..... 124*
*5.2.2 Domaine de socle armoricain ..... 126*
5.3 Vers une caractérisation plus fine des profils d'altération ..... 131

6 Conclusions générales et recommandations ..... 133
6.1 Conclusions générales ..... 133
6.2 Recommandations générales ..... 136
6.3 Recommandations spécifiques ..... 138
*6.3.1 Investigations proposées en domaine sédimentaire ..... 138*
*6.3.2 Investigations proposées en domaine de socle ..... 141*
6.4 Vers une gestion « pilotée » des ressources en eau souterraines du département de l'Orne ..... 150

7 Références Bibliographiques ..... 153

# Liste des figures

Figure 1 : « Carte d'identité » hydrologique et géologique des différents bassins versants dans le département de l'Orne Première colonne : en Rose les Bv du domaine de socle armoricain, En Orange les Bv du domaine sédimentaire et en vert les BV mixtes Source : Données Hydroportail et Météo France (1981-2010) - Fond cartographique : Géologie simplifiée de la Région Normandie, d'après Vernhet et Janjou (2002) pour le département de l'Orne – BRGM, BD Carthage - IGN ..... 17

Figure 2 : Bassins versants du département de l'Orne ..... 19

Figure 3 : Zones de Répartition des Eaux (ZRE) du département de l'Orne, Bajocien-Bathonien (AESN) et Cénomanien captif (AELB) ..... 21

Figure 4 : Synthèse cartographique des prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable sur les principaux bassins versants du département de l'Orne ..... 25

Figure 5 : Coefficients de mensualisation appliqués aux volumes annuels prélevés pour l'AEP pour l'ensemble du département ..... 27

Figure 6 : Synthèse cartographique des prélèvements pour l'Industrie sur les principaux bassins versants du département de l'Orne..... 29

Figure 7 : Evolution des volumes prélevés pour l'agriculture dans le département de l'Orne de 1994 à 2018 (données Agences de l'Eau et BNPE) ..... 31

Figure 8 : Données statistiques communales du Recensement Général Agricole (RGA – DRAAF) ..... 32

Figure 9 : Evolution des effectifs bovins sur la période 1988-2020 (source : RGA – DRAAF)... 32

Figure 10 : Estimation des besoins en eau pour l'abreuvement des cheptels du département de l'Orne ..... 33

Figure 11 : Répartition des besoins en eau pour l'abreuvement ..... 34

Figure 12 : Coefficients de mensualisation des besoins estimés pour l'abreuvement des animaux ..... 34

Figure 13 : Nombre de jours de forte chaleur à Flers (données Météo France, source : infoclimat.fr)..... 35

Figure 14 : Ecarts de volume (en $m^3$/an) par commune entre besoins estimés et volumes déclarés ou autorisés de la DDT pour l'abreuvement des animaux..... 36

Figure 15 : Coefficients Culturaux utilisés (Kc) par le BRGM dans le département de l'Orne ... 37

Figure 16 : Exemple de bilan hydrique saisonnier (source : J.-J. Collin, Les eaux souterraines, 2004)..... 38

Figure 17 : Mailles SAFRAN au droit de chaque bassin versant étudié dans le département de l'Orne (gauche) et précipitations moyennes annuelles AURELHY (droite), source Météo France ..... 39

Figure 18 : Réserve utile des sols (en mm) dans le département de l'Orne (source INRAE) sur l'illustration à gauche et ses valeurs moyennes réparties par unité homogènes de sols du RRP (source Vigisol-SAFER) sur l'illustration à droite..... 39

Figure 19 : Orientation technico économique des exploitations (OTEX) des communes du département de l'Orne (source : RA 2020, DRAAF) ..... 40

Figure 20 : Estimation du volume d'irrigation dans le département de l'Orne..... 41

Figure 21 : Comparaison entre les volumes maximum déclarés/autorisés par la DDT de l'Orne pour l'irrigation et l'estimation réalisée par le BRGM Normandie ..... 42

Figure 22 : Comparaison entre les volumes répertoriés dans la BNPE et l'estimation réalisée par le BRGM Normandie pour l'irrigation ..... 43

Figure 23 : Somme des prélèvements moyens totaux c) différenciés dans les eaux souterraines a) et superficielles b) estimés pour les principaux bassins versants du département de l'Orne (chiffes en Mm3/an). ..... 47

Figure 24 : Coefficient de mensualisation appliqué aux rejets annuels ..... 49

Figure 25 : Part des rejets entre acteurs, chiffres en $Mm^3$/an ..... 50

Figure 26 : Rejets moyens dans les eaux de surface, synthèse à l'échelle des principaux bassins-versants du département de l'Orne ..... 51

Figure 27 : Synthèse des principaux usages des eaux à l'échelle du département de l'Orne ... 52

Figure 28 : Carte des piézomètres (pts bleus) et stations hydrométriques (carrés rouges) utilisés dans ce volet pour l'analyse statistique ..... 58

Figure 29 : Carte des 51 Piézomètres utilisés pour l'analyse statistique des principaux aquifères suivis (source : SDE61 – BRGM) ..... 59

Figure 30 : Décomposition des chroniques de débit du Néal à Médréac en Ille et Vilaine (J0626610) avec en haut les données brutes journalières (en $m^3$/s) et en bas les anomalies mensuelles (en noir) et anomalies lissées sur 12 mois (en rouge). ..... 60

Figure 31 : Propagation des anomalies de précipitations dans le cycle hydrologique (de haut en bas : Précipitations, ruissellement, humidité du sol, débit des cours d'eau et niveaux piézométriques). Extrait de Van Loon, 2015..... 61

Figure 32 : Matrice de corrélation des différents groupes de clusters ..... 61

Figure 33 : Ecart à la moyenne des chroniques au pas de temps mensuel des 6 clusters principaux et analyse de la cyclicité des chroniques (Adom = cycle annuel dominant, PAdom = cylces pluri-annuels dominants, mixte = superposition des cycles annuels et pluri-annuels).... 62

Figure 34 : Carte du clustering final de 51 piézomètres, département de l'Orne ..... 63

Figure 35 : Ecarts aux normales des séries piézométriques classées par leur position géographique (du bleu au rouge d'ouest en est) ..... 64

Figure 36 : Ecarts aux normales des chroniques de débits classées par leurs positions géographiques (du bleu au rouge d'ouest en est). Le rectangle rouge illustre la partie représentée Figure 37 ..... 65

Figure 37 : Ecarts aux normales des chroniques de débits classées par leurs positions géographiques (du bleu au rouge d'ouest en est) – Zoom sur la période 2012-2024 ..... 65

Figure 38 : Ecarts aux normales des chroniques de niveaux piézométriques classées par géologie ..... 66

Figure 39 : Ecarts aux normales des chroniques de niveaux piézométriques classées par géologie (Cornéennes du Briovérien, Schistes du Briovérien et Calcaires du Bajocien-Bathonien) ..... 67

Figure 40 : Ecarts aux normales des chroniques de niveaux piézométriques classées par géologie (Craie du Cénomanien et Sables du Perche du Cénomanien) ..... 67

Figure 41 : Ecarts aux normales des chroniques de débits de cours d'eau pour l'Huisne et la Varenne ..... 68

Figure 42 : A gauche, exemple de chronique de débit ; A droite, écarts aux normales mensuelles (en noir) et écarts lissés sur 12 mois (en rouge) ..... 69

Figure 43 : Comparaison entre les écarts aux normales lissés entre les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques sur le bassin du Noireau. Le rectangle rouge représente la partie zoomée sur l'illustration du bas. ..... 70

Figure 44 : Comparaison entre les écarts aux normales lissés entre les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques sur le bassin de l'Huisne – Sélection des piézomètres présentant le même signal que les cours d'eau. ..... 71

Figure 45 : Comparaison entre les écarts aux normales lissés entre les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques sur le bassin de l'Huisne – Sélection des piézomètres ne présentant pas le même signal que les cours d'eau. ..... 71

Figure 46 : Exemple d'un hydrogramme et variabilité des débits (Le Noireau à Saint-Pierre-d'Entremont – I342201001) ..... 72

Figure 47 : Moyennes journalières (centrées-réduites) des niveaux piézométriques pour l'ensemble des piézomètres classées par leur position géographique (du bleu au rouge d'ouest en est) ..... 73

Figure 48 : Moyennes journalières (centrée-réduite) des niveaux piézométriques pour l'ensemble des piézomètres classées par lithologie ..... 73

Figure 49 : Hydrogrammes mensuels sur les cours d'eau du département classés par leur position géographique ..... 74

Figure 50 : Ecarts aux normales mensuelles lissés des 46 chroniques piézométriques du département avec en rouge la moyenne, en bleu la médiane. Les plages de gris représentent les minimums et maximums ainsi que les premiers et derniers quartiles ..... 74

Figure 51 : Ecarts aux normales mensuelles lissés des 53 chroniques de débits du département avec en rouge la moyenne, en bleu la médiane. Les plages de gris représentent les minimums et maximums ainsi que les premiers et derniers quartiles ..... 75

Figure 52 : Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique global à réservoirs GARDENIA (Thiéry, 2014), source : BRGM, OFB, modifié par E. IDEE et S. BOURDAN ..... 77

Figure 53 : Exemple d'application d'un bassin complexe décomposé en 9 sous bassins (Thiéry, 2018) ..... 78

Figure 54 : Portions des bassins-versants modélisables à l'aide de modèles globaux ..... 79

Figure 55 : Moyennes annuelles pondérées des pluies (a) et d'ETP (b) calculées à partir des données SAFRAN (1990-2019) ..... 82

Figure 56 : Valeurs moyennes de l'IDPR (2017) pour les principaux bassins du département de l'Orne ..... 84

Figure 57 : Volumes mensuels prélevés dans les eaux souterraines ..... 85

Figure 58 : Bilans hydrogéologiques simplifiés des principaux bassins versants du département de l'Orne ..... 87

Figure 59 : Coupe géologique sur le bassin versant de la Rouvre (feuille géologique au 1/50 000e Briouze - BRGM) ..... 89

Figure 60 : Coupe géologique réalisée sur le bassin versant de la Mayenne (feuille géologique au 1/50 000e de Domfront – BRGM) ..... 90

Figure 61 : Coupe géologique sur le bassin de l'Orne montrant son hétérogénéité morphologique et lithostratigraphique (feuille géologique au 1/50 000e de Sées - BRGM) ..... 92

Figure 62 : Coupe géologique réalisée sur l'amont du bassin de la Sarthe (feuille géologique au 1/50 000e de L'Aigle - BRGM) ..... 92

Figure 63 : Niveaux piézométriques simulés pour le bassin de la Sarthe pour le piézomètre BSS000TTBM sans prélèvements a) et avec prélèvements b)..... 93

Figure 64 : Coupe lithologique réalisée sur le bassin de la Sarthe entre le Mêle et Alençon (Lithologic, 2009) ..... 94

Figure 65 : Coupe géologique sur le bassin versant de l'Huisne, en pointillés superposition des nappes oxfordiennes et crétacées du bassin de l'Huisne, les flèches horizontales matérialisent les écoulements et les flèches verticales les effets de drainance mis en avant (Rapport Synthèse Géologique et structurale RP-69292-FR, modifié)..... 96

Figure 66 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Avre en période de basses eaux - Rapport BRGM/RP-60458-FR, David P.-Y. (2012)..... 99

Figure 67 : Coupe géologique du Pays d'Auge (Feuille géologique au 1/50 000$^{e}$ de Vimoutiers – BRGM, modifié). En vert les formations crayeuses et leur nappe représentée en pointillés, en bleu foncé et orange les formations oxfordiennes et leur nappe, enfin en bleu clair les formations marneuses calloviennes constituant le substratum, peu perméable. .....100

Figure 68 : Coupe géologique de la campagne de Trun, en pointillés rouge la surface piézométrique supposée de la nappe du Bajocien-Bathonien, les flèches matérialisent les hypothèses d'écoulements non vérifiées à ce jour (Feuille géologique au 1/50 000$^{e}$ de Vimoutiers – BRGM modifiée) .....101

Figure 69 : Estimation de la recharge annuelle moyenne pour chaque bassin versant .....103

Figure 70 : Evolution des précipitations sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes (source : Rapport BRGM/RP-71398-FR) .....105

Figure 71 : Evolution de l'Evaporation Potentielle (ETP) sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes (source : Rapport BRGM/RP-71398-FR)..106

Figure 72 : Changements en température et précipitation de l'ensemble des simulations pré-sélectionnées par Explore2 pour le travail à l'échelle nationale à l'horizon lointain 2070-2099 (source : https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/354). .....108

Figure 73 : Médiane de l'ensemble multi-modèles DRIAS-2020 / ADAMONT / SIM2, trajectoire d'émissions GES RCP 8.5, a) Ecart du module des débits ; b) Ecart des très bas débits (P5)110

Figure 74 : Médiane des modèles DIRAS-2020 de pluie efficace cumulée (valeur de référence et écart à cette valeur par horizon).....111

Figure 75 : Synthèse sur l'évolution du climat du bassin amont de la Sarthe avec le couple ALADIN63_CNRM-CM5 (Sources : DRIAS in SUEZ Consulting, 2022) .....112

Figure 76 : a) écarts sur les niveaux minimums mensuels des eaux souterraines, b) écarts sur les QMNA5 des cours d'eau .....114

Figure 77 : Profil type d'altération d'un massif de socle « ancien » établi d'après Thiery et al., 2019.....120

Figure 78 : Exemple de différence de traitement de l'information au moment des étapes de foration pour un même type de roche mère : schistes. La coupe a) est inexploitable en comparaison de la coupe b) qui possède des descriptifs plus précis permettant le positionnement d'interfaces des profils d'altération (source : banque de données du sous-sol BSS - BRGM) .122

Figure 79 : Formations superficielles et d'altération issues de la carte géologique harmonisée du département de l'Orne (source : Vernhet, 2002). A noter : la nature des altérites autochtones de socle a été différenciée en fonction du type de roche mère dont elles sont issues ..... 123

Figure 80 : Carte des formations superficielles allochtones (lœss/limons et alluvions) et autochtones du domaine sédimentaire (Argiles à Silex) d'après les informations de la carte géologique harmonisée (source : BRGM)..... 124

Figure 81 : Type d'altérites à silex et épaisseur d'après Quesnel (1997) ..... 125

Figure 82 : Description lithologique d'ouvrages utilisés pour caractériser les altérites du domaine armoricain, source : Banque de données du Sous-Sol (BSS)..... 126

Figure 83 : Synoptique de l'altération type des roches magmatiques ou sédimentaires de socles anciens..... 127

Figure 84 : Cartographie rattachée aux forages de la nature et l'épaisseur des allotérites, de l'épaisseur de l'horizon altéré et de l'épaisseur minimum des Isaltérites ..... 129

Figure 85 : Identification de zones conductrices pouvant correspondre à des approfondissements des profils d'altération et ou à des circulations préférentielles des eaux souterraines. Investigations électromagntiques réalisées, à différentes profondeurs, sur le secteur de Calligny (Pont de Vère) sur le bassin du Noireau (source Calligée fournie par le SDE61)..... 131

Figure 86 : Cartographie prédictive des horizons d'altération (source : BRGM d'après Thiery et al., 2019)..... 132

Figure 87 : A) Estimation de la part d'alimentation des eaux souterraines dans les bilans hydrologiques – B) Part des prélèvements en eau souterraine vs Recharge des principaux bassins versants du département de l'Orne..... 135

Figure 88 : Carte de situation des SAGE (source : GESTEAU - Eau France, 2024) ..... 138

Figure 89 : Schéma conceptuel des échanges entre la nappe de la craie et la nappe de l'Oxfordien (source : BRGM/RP-73813-FR) A noter : les formations oxfordiennes se biseautent à l'ouest du pays d'Auge ce qui peut fausser la représentation proposée notamment sur le bassin de la Vie. ..... 139

Figure 90 : Traçages colorimétriques dans les systèmes karstiques : dolines, pertes, cours d'eau, résurgences, source : https://bdtracages.brgm.fr/..... 140

Figure 91 : Front de Taille de métasédiments briovériens de la carrière de St Pierre d'Entremont sur le bassin du Noireau (Source : http://www.apgn.fr/apgn/carte_site/fic_s61_86.pdf , crédit L.Dupret)..... 141

Figure 92 : Coupes géologiques au travers les formations paléozoïques de la région de St Clair de Halouze (source BRGM- DREAL) et exemple de suivi piézométrique entre les formations paléozoïques et leur encaissant (RP-69331-FR) ..... 143

Figure 93 : Levés géologiques réalisés par Chantereine et al (1983) sur le bassin du Noireau dans le calvados A) et de la Mayenne près de Couptrain B)..... 145

Figure 94 : Diagraphies réalisées dans les Flyschs de Gaspésie pour identifier les caractéristiques hydrogéologiques de différentes séquences (Chouinard, 2023) ..... 147

Figure 95 : Interprétation d'une coupe de sondage incliné dans le Briovérien supérieur de St Sauveur Landelin (Manche), source : BRGM 88-SGN-420-GEO..... 148

Figure 96 : Exemple de coupe lithologique et technique dans les formations briovériennes de la commune de Barenton (Manche), à l'ouest du Parc Naturel Régional Normandie Maine. Source : Rapport BRGM/RR-33616-FR..... 149

Figure 97 : Exemple d'évolution possible des débits de la Sélune dans le département de la Manche, trajectoire climatique RCP8.5, moyenne de 5 modèles issus de la « short list » de Météo France (source : article de The Conversation tiré du rapport BRGM/RP-71398-FR) .....151

Figure 98 : Visualisation graphique de différentes évolutions possibles des niveaux piézométriques en période habituelle de recharge selon plusieurs scénarii tendanciels, comparaison avec période de retour statistique ou seuils fixés dans l'arrêté « sécheresse » départemental, exemple du département des Côtes d'Armor tiré du site internet MétéEAU Nappes (à la date du 01/09/2025). .....152

## Liste des annexes

Annexe 1 Synthèse bibliographique des données de prélèvements .....157

Annexe 2 Calibration des modèles globaux .....161

Annexe 3 Ecarts aux normales des cours d'eau classés par bassins versants .....163

Annexe 4 Comparaisons des écarts aux normales piézométriques et de débit par bassins versants individualisés .....167

Annexe 5 Clustering des piézomètres du département de l'Orne.....173

# 1 Introduction

## 1.1 CONTEXTE GENERAL

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme de mise à disposition d'un Outil d'Aide à la décision et de Gestion des Principales Ressources aquifères du département de l'Orne (OAGPRO 61). Celui-ci est mené en partenariat avec le Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne (SDE61) et avec le soutien des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne.

Ce travail fait suite à une première phase de synthèse et valorisation des données géologiques et hydrogéologiques existantes, qui s'est terminée en 2019. Il s'inscrit donc dans une seconde phase du programme qui consiste à fournir des éléments opérationnels de connaissance, quantitatifs et qualitatifs, devant permettre une meilleure gestion intégrée des ressources en eau du département de l'Orne (Atlas hydrogéologique).

Ce programme OAGPRO61 comprend au total 7 rapports.

Phase 1 d'Etat des Lieux, données et connaissances disponibles (2017-2020) :

- Synthèse Géologique et Structurale : Rapport BRGM/RP-69292-FR
- Synthèse des connaissances hydrogéologiques (bibliographique) : Rapport BRGM/RP-69331-FR
- Bancarisation des données collectées : Rapport BRGM/RP-69332-FR

Phase 2 Fonctionnement des aquifères sédimentaires et de socle (2021-2025) :

- Faciès chimiques et qualité des eaux souterraines : Rapport BRGM/RP-71026-FR
- Réalisation des cartes piézométriques départementales : Rapport BRGM/RP-73813-FR
- Fonctionnement quantitatif des principaux bassins-versants du département de l'Orne : Rapport BRGM/RP-74443-FR, présent rapport
- Synthèse générale - Atlas Hydrogéologique du Département de l'Orne : Rapport BRGM/RP-74686-FR

## 1.2 CONTEXTE SPECIFIQUE

Lors de la phase 1 du programme OAGPRO61, il a pu être souligné le fait que :

- Les cours d'eau du domaine de socle ont les débits spécifiques moyens interannuels (modules) les plus importants du département : 10 à 15 l/s/km².
- En domaine sédimentaire, les débits spécifiques moyens des rivières sont plus faibles : 5 à 9 l/s/km². A noter : les BV de l'Avre et de l'Eure présentent des débits spécifiques très faibles qui s'expliquent vraisemblablement par l'existence de circulations karstiques.
- L'indicateur donné par le ratio entre module et QMNA5 montre qu'il existe un effet de saisonnalité très marqué sur les bassins versants du domaine de socle armoricain : rapport de 10 à 20 alors qu'il est plutôt de l'ordre de 2 à 4 (hors BV de l'Avre et de l'Eure) pour les cours d'eau du domaine sédimentaire (et voisin de 10 pour les cours d'eau situés sur des bassins versants « mixtes » comme la Sarthe et l'Orne).

Ainsi, le débit des cours d'eau situés sur des bassins versants du domaine sédimentaire est plus régulier tout au long de l'année, à l'inverse de ceux du domaine armoricain. Les débits des cours d'eau en domaine sédimentaire sont soutenus par les puissantes nappes des formations jurassiques et de la craie, voir paragraphe 2.3 suivant. A noter tout de même : quelques rivières

des formations de socle, comme le Noireau et la Varenne, peuvent avoir des débits spécifiques estivaux plus élevés que ceux des bassins versants mixtes que sont l'Orne et la Sarthe, pourtant alimentés en partie par les formations calcaires du Jurassique (

Figure 1).

**Du fait de son contexte géologique et géomorphologique, il existe donc une forte disparité dans le fonctionnement hydrologique des principaux bassins versants du département de l'Orne.**

C'est pour cela que le SDE61 a souhaité que le BRGM précise la contribution des eaux souterraines au fonctionnement hydrologique des principaux bassins versants du département de l'Orne, et remette ces éléments dans leur contexte géologique et hydrogéologique de façon à préciser le rôle quantitatif des principaux aquifères.

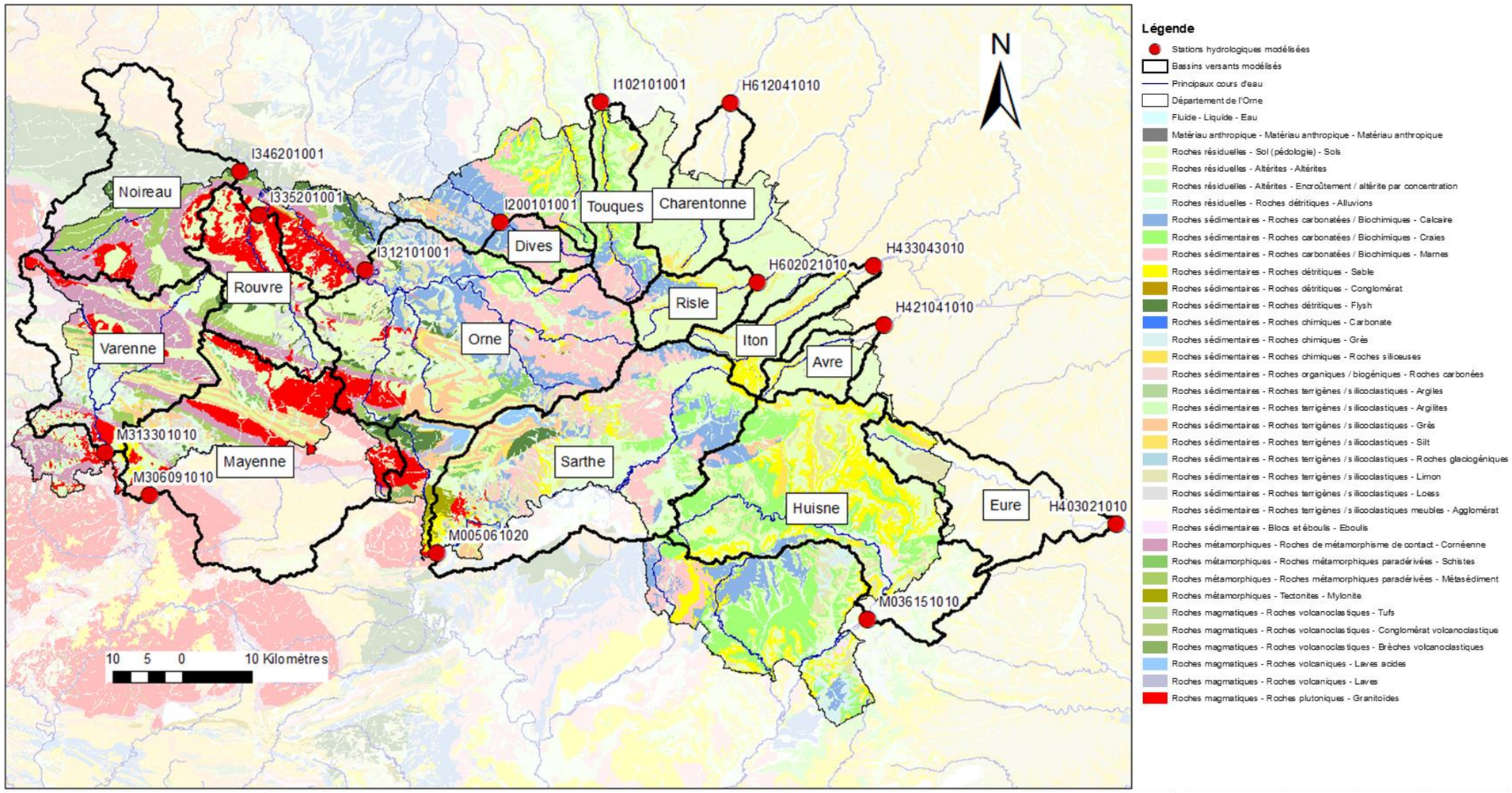
Pour ce faire, le BRGM a proposé de valoriser les résultats des modélisations existantes et de compléter ces informations par la mise en œuvre de modèles globaux (sur 10 bassins versants) de façon à pouvoir disposer d'informations quantitatives et comparatives sur une grande partie du département.

En préambule de ce travail, il s'est avéré nécessaire de quantifier la « pression » globale exercée par les prélèvements en eau (souterraine et superficielle) et les rejets de façon à pouvoir retranscrire ces derniers dans les modèles (entrée/sortie) et de manière à bien prendre en compte leurs effets sur le bilan quantitatif.

Ce volet de l'étude est découpé en quatre grandes parties distinctes mais complémentaires :

- Une première partie de bilan des prélèvements et rejets ;
- Une seconde partie de bilan hydrologique quantitatif basé sur l'utilisation de modèles globaux ;
- Une troisième partie de valorisation des données piézométriques et hydrométriques des zones sédimentaires et de socle ;
- Une dernière partie sur le rôle des altérites.

Dans chaque chapitre, nous nous sommes attachés à décrire le jeu de données disponibles, les outils et méthodes utilisées pour produire les calculs, ainsi que les incertitudes associées à certaines hypothèses ou choix méthodologiques. Ces derniers éléments ont conduit à rappeler, en conclusion, les limites d'usage des modèles globaux et ont conduit à formuler un certain nombre de recommandations pour lever ces incertitudes et améliorer les connaissances.




| Bassin-versants | Surface du BV à la station hydrométrique (km²) | Formations du Domaine de Socle | | | | Formations du Domaine Sédimentaire | | | | | Autres | Module/QMNA5 | Débit Spécifique (l/s/km²) | Débit Spécifique à l'étiage (l/s/km²) | Pluviométrie moyenne annuelle (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Granite et Cornéennes | Métasédiments et Flyschs Briovériens | Grès et Schistes Paléozoiques | Volcanites | Craie Céno-Turonienne | Sables du Perche ou équivalent | Calcaires et sables Oxfordiens | Marnes Callovo-oxfordiennes | Calcaires Aaléniens, Bajociens et Bathoniens | Autres formations | | | | |
| Noireau à Cahan | 523 | 30% | 47% | 23% | | | | | | | | 14,1 | 13 | 0,92 | 913 |
| Rouvre à Ségrie Fontaine | 299 | 61% | 39% | | | | | | | | | 17,6 | 11,1 | 0,63 | 907 |
| Mayenne à Cigné | 829 | 39% | 40% | 21% | | | | | | | | 20,2 | 10,5 | 0,52 | 888 |
| Varenne à St Frimbault | 514 | 54% | 5% | 41% | | | | | | | | 8,79 | 14,4 | 1,47 | 915 |
| Orne à la Courbe | 934 | 9% | 4% | 21% | | 9% | | | 23% | 16% | 17% | 10,4 | 8,25 | 0,8 | 797 |
| Sarthe à St Céneri | 907 | 2% | 2% | 9% | 2% | 20% | 2% | 5% | 37% | 4% | 17% | 9,8 | 7,9 | 0,8 | 799 |
| Dives à St Lambert | 87 | | | | | 16% | | 1% | 59% | 24% | | 16,7 | 5,4 | 0,32 | 729 |
| Touques aux Moutiers Hubert | 194 | | | | | 60% | | 19% | 20% | | | 1,9 | 8,2 | 4,4 | 803 |
| Charentonne à la Trinité de Rév | 221 | | | | | 97% | 3% | | | | | 2 | 8 | 4,02 | 794 |
| Risle à Rai | 146 | | | | | 75% | 12% | 9% | 4% | | | 2,8 | 8,7 | 3,15 | 776 |
| Iton à Bourth | 158 | | | | | 80% | 18% | 1% | | | | 4,1 | 7,9 | 1,95 | 787 |
| Avre à St Chritophe | 109 | | | | | 93% | 6% | | | | 1% | 17,3 | 3,2 | 0,18 | 786 |
| Eure à St Luperce | 317 | | | | | 93% | 6% | | | | 1% | 7,3 | 4,8 | 0,67 | 771 |
| Huisne à Nogent | 825 | | | | | 67% | 27% | 3% | 2% | | 1% | 3,2 | 7,3 | 2,3 | 769 |

*Figure 1 : « Carte d'identité » hydrologique et géologique des différents bassins versants dans le département de l'Orne*
*Première colonne : en Rose les Bv du domaine de socle armoricain, En Orange les Bv du domaine sédimentaire et en vert les BV mixtes*
*Source : Données Hydroportail et Météo France (1981-2010) - Fond cartographique : Géologie simplifiée de la Région Normandie, d'après Vernhet et Janjou (2002) pour le département de l'Orne – BRGM, BD Carthage - IGN*

# 2 Bilan des prélèvements et rejets par bassin versant

## 2.1 COLLECTE DES DONNEES

Il est important de rappeler que ce volet de l'étude quantitative vise à la valorisation des données existantes, et facilement accessibles sur les prélèvements et rejets dans les hydro-systèmes (eaux superficielles et souterraines) des principaux bassins versants du département de l'Orne (Figure 2).

A l'inverse des études de type volumes prélevables (EVP ou HMUC), ce volet ne comprenait donc pas d'enquêtes ou d'investigations spécifiques, auprès des différents acteurs de l'eau du territoire, pour compléter les éventuelles lacunes de données.

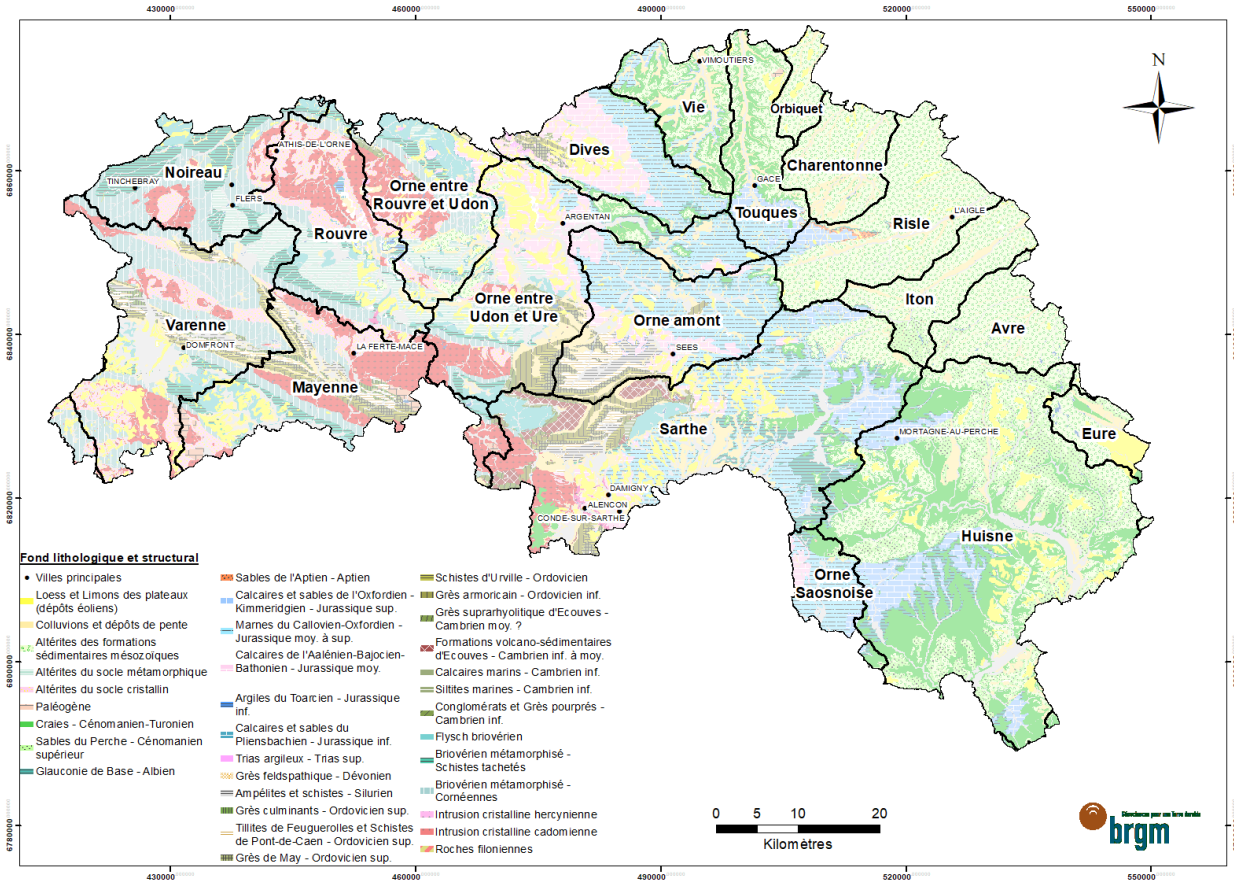



*Figure 2 : Bassins versants du département de l'Orne*

### 2.1.1 Collecte des données de prélèvements

Un inventaire des points de prélèvements et des volumes prélevés sur le département de l'Orne a été dressé à partir des données reçues de : l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et Loire

Bretagne (AESN et AELB) ; la Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE)[1] ; les bases de données des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et leur déclaration annuelle (base GEREP) et registre des émissions polluantes (IREP), toutes deux gérées par la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL) ; la base de données des autorisations de prélèvement au titre de la loi sur l'eau de la Direction Départementale des Territoires de l'Orne (DDT61). Pour le bassin de l'Orne et de la Dives, les prélèvements agricoles pour irrigation ont également été transmis par l'Organisme Unique de Gestion Collective (OUGC) de la ZRE Bajocien-Bathonien. cf. Tableau 1.

Les données de prélèvements collectées et utilisées dans la suite de l'étude sont rappelées ci-dessous (Tableau 1) :

| Source de données | Période couverte | Contenu | Qualité |
|---|---|---|---|
| **AESN/AELB** | 1994-2017 | Ouvrages (nom et coordonnées en X et en Y) de prélèvements AEP, industriels et agricoles avec le volume annuel prélevé associé | Données complètes pour les usages AEP, mais non exhaustif pour les usages industriels et agricoles |
| **BNPE** | 2008-2020 | Ouvrages (nom et coordonnées en X et en Y) de prélèvements AEP, industriels et agricoles avec le volume annuel prélevé associé | Données non exhaustives pour les usages AEP, industriels et agricoles |
| **DDT** | 2018 | Prélèvements agricoles et AEP autorisés ou déclarés | Données vraisemblablement non exhaustives |
| **GEREP** | 2013-2015 et 2017 | Volume annuel prélevé par établissement industriel | Données récentes incomplètes et années limitées |
| **IREP** | 2003-2018 | Ouvrages de prélèvements industriels et volume annuel prélevé associé | Uniquement les industries ICPE soumis à Autorisation |
| **RPQS** | 2015-2019 | Rapport annuel du délégataire (Rapport sur le Prix et la Qualité des Services) | Données mensuelles pour les usages AEP |
| **OUGC** | 2010-2020 | Prélèvements agricoles pour irrigation (eaux superficielles ou souterraines) | Données mensuelles pour les prélèvements pour l'irrigation |

*Tableau 1 : Sources des données utilisées pour les prélèvements en eau*

*Attention : Il est important de noter que les bases de données des Agences de l'Eau ne recensent que les volumes prélevés supérieurs à 7 000 m$^3$/an, soumis à redevance. Par ailleurs, le seuil de déclaration des prélèvements auprès de la police de l'eau (DDT) est de 10 000 m$^3$/an ou moins si la capacité de prélèvements est supérieure à 400m$^3$/h. Cependant ce seuil est abaissé à 8 m$^3$/h dans les Zones de Répartitions des Eaux (ZRE)[2]- cf.* Figure 3.

[1] La banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE) est l'outil national dédié aux prélèvements sur la ressource en eau, pour la France métropolitaine et les départements d'outre-mer. https://bnpe.eaufrance.fr/

[2] https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000048136763

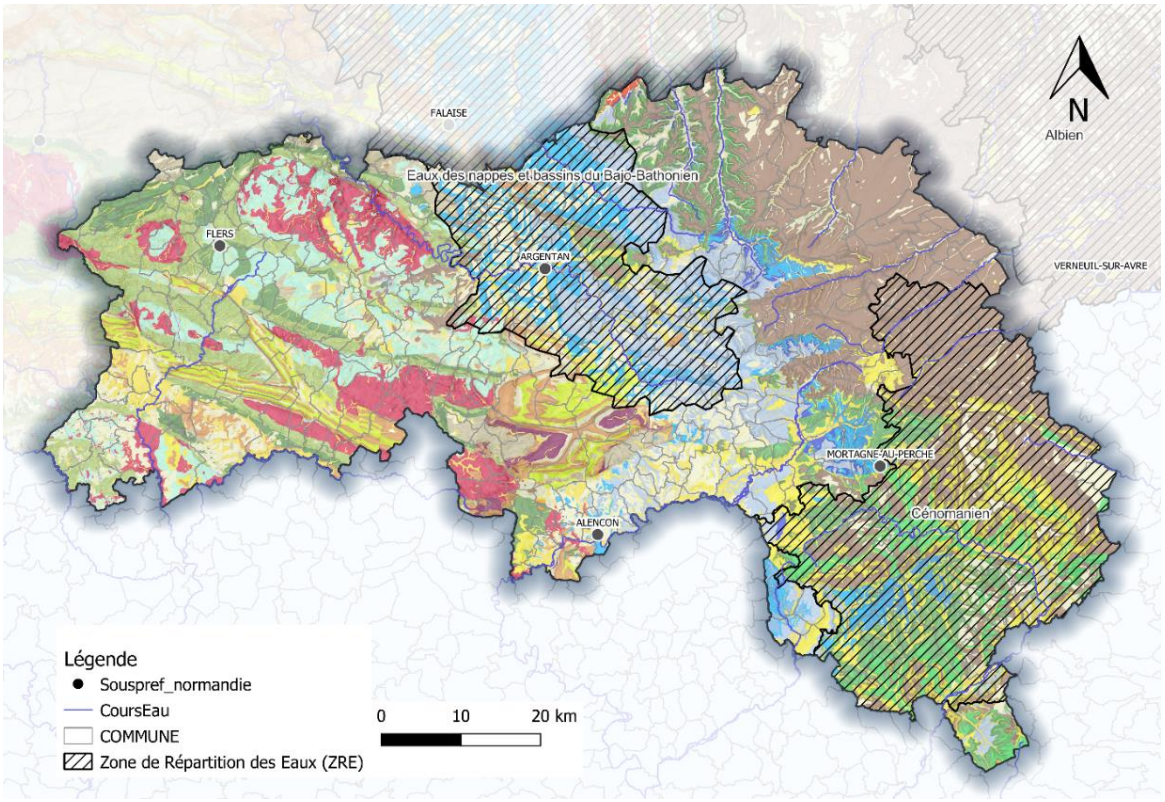



*Figure 3 : Zones de Répartition des Eaux (ZRE) du département de l'Orne, Bajocien-Bathonien (AESN) et Cénomanien captif (AELB)*

Un rattachement des ouvrages de prélèvements, à partir du code BSS ou des coordonnées en XY du point de prélèvement, a été nécessaire afin d'éviter de constituer des doublons qui fausseraient les bilans des volumes prélevés à l'échelle de la zone d'étude. Si le code BSS ou les coordonnées en XY n'étaient pas disponibles sur l'ouvrage, alors le point a été positionné au centroïde de l'infrastructure qui prélève (collectivité, industrie par exemple).

Ces prélèvements ont été **classés en trois principaux types d'usages** : les besoins pour **l'alimentation en eau potable (AEP)**, les utilisations pour **l'agriculture (élevage ou irrigation)** et les utilisations pour **l'industrie**. IMPORTANT : Les usages pour l'énergie ont été exclus de ce volet, la retenue du barrage de Rabodanges sur l'Orne n'a donc pas été comptabilisée pour les besoins de cette étude.

Une distinction entre les points de prélèvements en eaux souterraines et en eaux superficielles a été réalisée à partir des données transmises ainsi que le rattachement des volumes prélevés au point d'eau (ouvrage) correspondant (forage ou puits en eaux souterraines et source ou prise d'eau en eaux superficielles).

*Attention, pour les besoins d'évaluation de la pression quantitative, les prélèvements réalisés sur des sources sont considérés comme affectant le milieu des eaux superficielles et non souterraines. Les prélèvements sur ces sources affectent en effet directement le débit des cours d'eau qu'elles contribuent normalement à alimenter. Ce point méthodologique diffère de l'analyse qualitative où les sources sont habituellement rattachées aux eaux souterraines.*

### 2.1.2 Collecte des données de rejets

Les rejets anthropiques comprennent les rejets urbains traités dans les stations de traitement des eaux usées (STEU) issus des Agences de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et Loire-Bretagne (AELB), des données GEREP issues de la DREAL ainsi que du portail d'informations sur l'assainissement communal (ERU)[3], recensées par le Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau (SANDRE) sur le département de l'Orne.

A l'image des prélèvements, les rejets ont été différenciés en deux types : les rejets en rivières et les rejets par infiltration dans le sol.

Les données de rejets collectées sont illustrées ci-dessous (Tableau 2) :

| Source | Période | Contenu | Qualité |
|---|---|---|---|
| AESN | 2012-2019 | Point de rejet (nom et coordonnées en X et en Y) et volume journalier rejeté associé | Données complètes pour les STEU |
| AELB | 2007-2021 | Point de rejet (nom et coordonnées en X et en Y) et volume journalier rejeté associé | Données complètes pour les STEU |
| ERU | 2014-2020 | Point de rejet (nom et coordonnées en X et en Y) et volume annuel rejeté associé | Données annuelles pour les STEU |
| GEREP | 2013-2015 et 2017 | Volume annuel rejeté par établissement industriel | Données récentes incomplètes et années limitées |

*Tableau 2 : Origine des données utilisées pour les rejets*

**Les données de prélèvements et rejets collectées ont fait l'objet d'un croisement entre les différentes sources dans le but de constituer une base de données couvrant la période 1995-2020, dont les résultats seront présentés dans les paragraphes suivants.**

**Il est important de noter que les synthèses présentées dans ce rapport ont été produites à l'échelle <u>départementale, uniquement</u>.**

**Les données de prélèvements et rejets des portions de bassins versants situés en dehors du département de l'Orne n'ont pas été collectées dans ce volet, toutefois, les données des autres départements ont par la suite été utilisées pour les besoins de la phase de modélisation présentée au Chapitre 3. Ces dernières n'ont cependant pas fait l'objet de la même attention que celles situées dans le Département de l'Orne.**

[3] https://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/pages/data/actu.php

## 2.2 ESTIMATION DES PRELEVEMENTS SUR LES PRINCIPAUX BASSINS VERSANTS

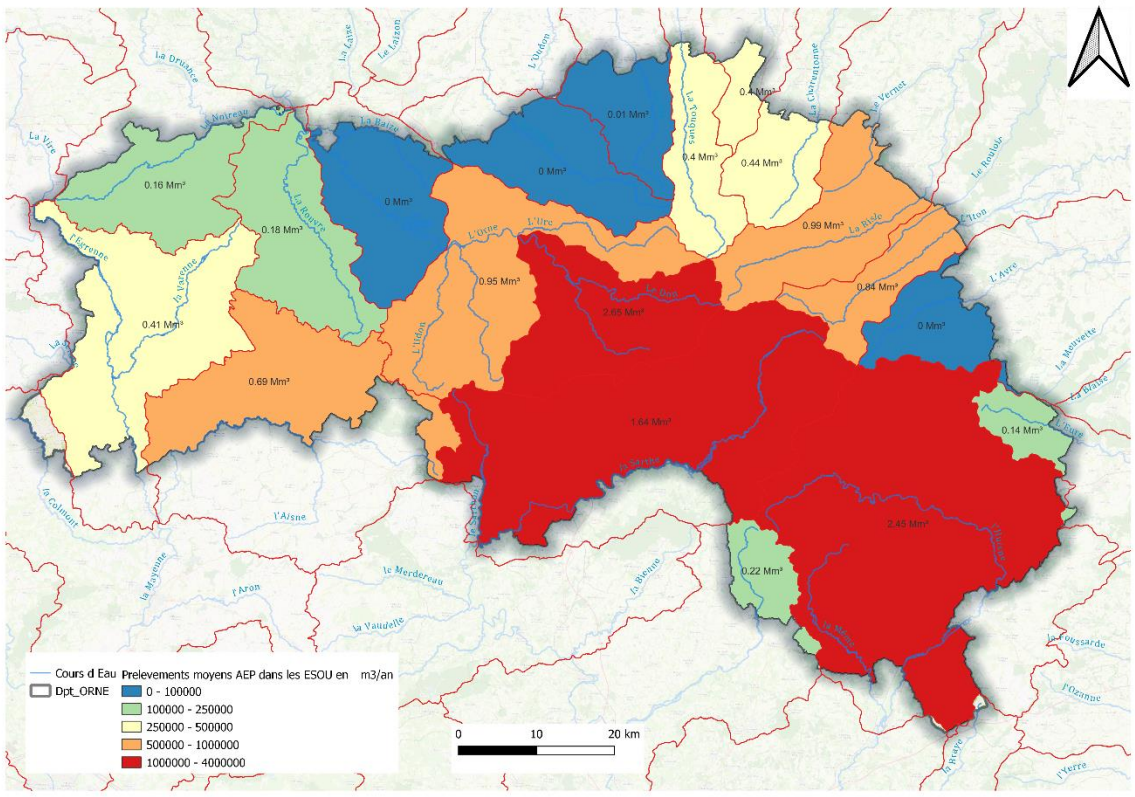
### 2.2.1 Prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP)

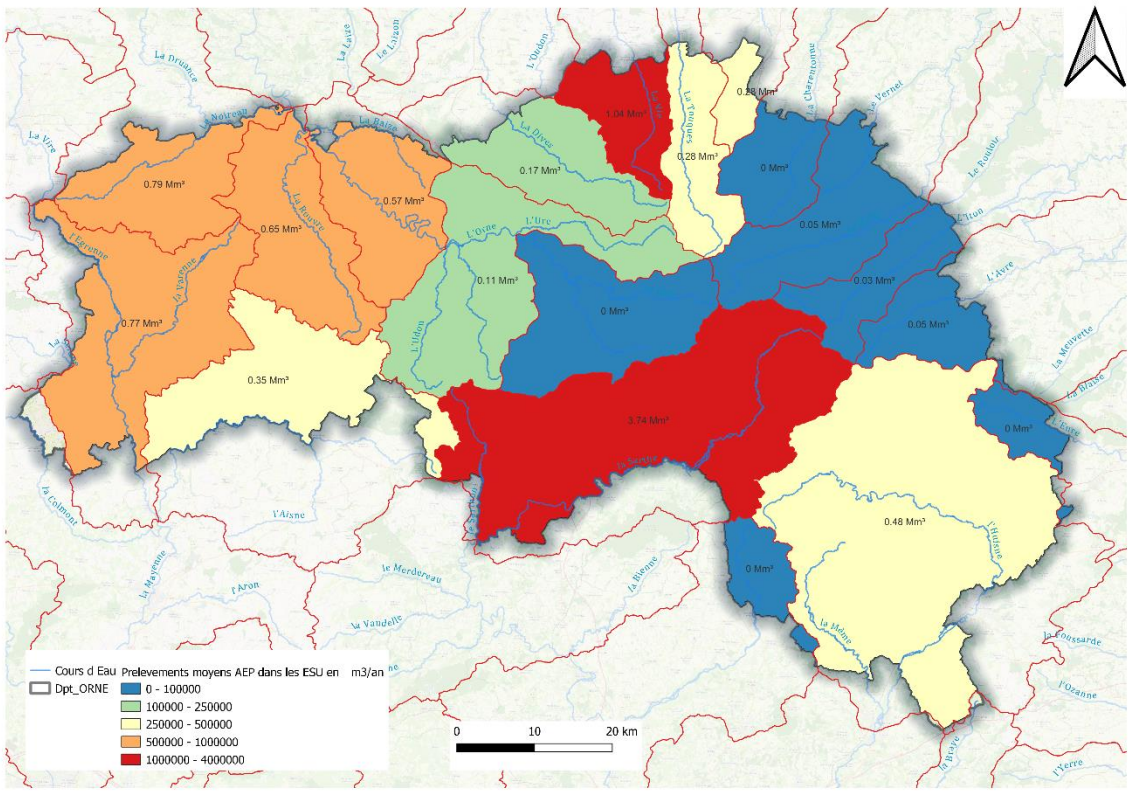
#### *2.2.1.1 Synthèse des volumes prélevés*

Les volumes prélevés pour l'AEP entre 1994 et 2020 varient de 20 à 24 $Mm^3$/an pour l'ensemble du département de l'Orne (dont consommations industrielles et agroalimentaires prélevées sur le réseau d'adduction). Ils se répartissent de la manière suivante entre eaux souterraines et eaux superficielles : respectivement de l'ordre de 12 $Mm^3$/an et 9 $Mm^3$/an. L'évolution des chiffres sur cette période montre globalement une stabilité des volumes prélevés pour l'AEP, à la fois pour les eaux souterraines et superficielles.

Cette information est à mettre en perspective avec la baisse régulière de la population depuis plusieurs décennies : en effet, selon l'INSEE, le département de l'Orne comptait près de 300 000 habitants en 1982 contre un peu plus de 275 000 en 2022. La baisse de la population ne se corrèle donc pas avec la stagnation des prélèvements en eau potable. Cette différence pourrait peut-être s'expliquer avec les hypothèses suivantes (non vérifiées) : l'augmentation des besoins, le report de consommations agricoles et/ou industrielles vers l'AEP, les pertes des réseaux.

La Figure 4, page suivante, met en évidence que les prélèvements pour satisfaire les besoins AEP sont assez hétérogènes d'un bassin à l'autre (écart important). Par ordre d'importance, on trouve : les bassins de la Sarthe, de l'Orne et de l'Huisne suivis par la Varenne, la Mayenne, la Risle et la Vie, tous supérieurs au million de $m^3$ par an. Le Noireau, la Rouvre, la Touques et la Charentonne, l'Iton supérieurs à 500 $Km^3$/an. L'Orbiquet, l'Eure, l'Orne Saosnoise et enfin l'Avre, ferment la marche et sont tous inférieurs à 500 voir inférieurs à 100 $Km^3$/an pour ce dernier.



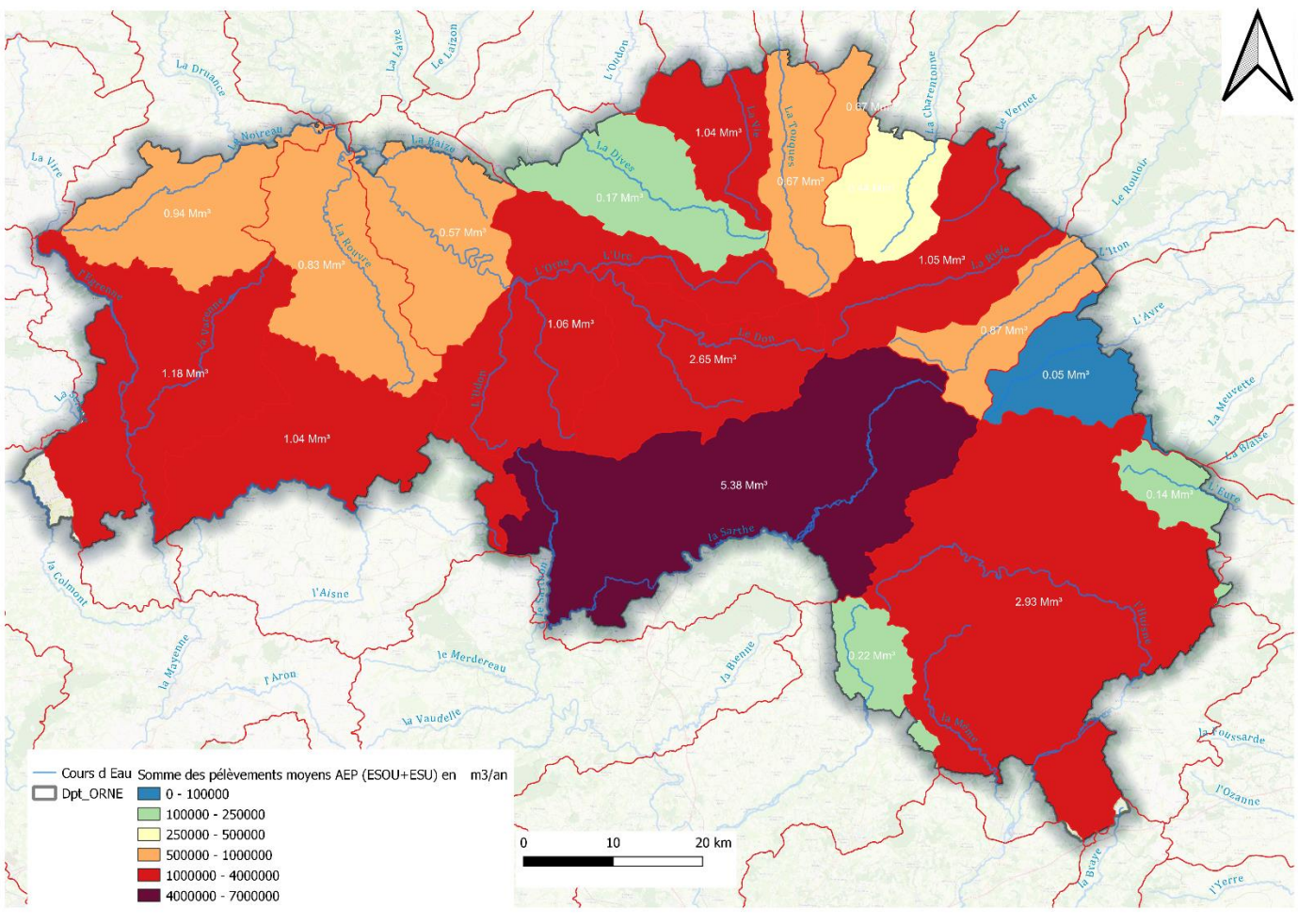




*Figure 4 : Synthèse cartographique des prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable sur les principaux bassins versants du département de l'Orne*

#### *2.2.1.2 Mensualisation des données*

Les données de prélèvements AEP, issues des Agences de l'Eau et de la BNPE, ont essentiellement pu être collectées au pas de temps annuel. Une mensualisation de ces données a donc été nécessaire afin de pouvoir retranscrire les variations saisonnières de ces prélèvements dans les modèles.

Les coefficients de mensualisation appliqués aux ouvrages de prélèvements pour l'AEP ont été définis à partir des RPQS (Rapport annuel du délégataire, sur le Prix et la Qualité des Services) de 2015 à 2018, qui nous renseignent sur les variations mensuelles de certains points de prélèvements pour l'AEP. 15 ouvrages de prélèvements représentatifs du département ont été retenus (prélèvement en zone de socle et en zone sédimentaire, ainsi qu'en eaux souterraines et en eaux superficielles). Les coefficients de mensualisation appliqués aux volumes prélevés pour l'AEP sans distinction entre les eaux souterraines et en eaux superficielles sont présentés en Figure 5. En général, les prélèvements sont plus importants durant les mois de janvier et de juin à septembre, et sont les moins importants lors des mois de février, mars et octobre. Cette répartition a donc été appliquée à l'ensemble des prélèvements du département.

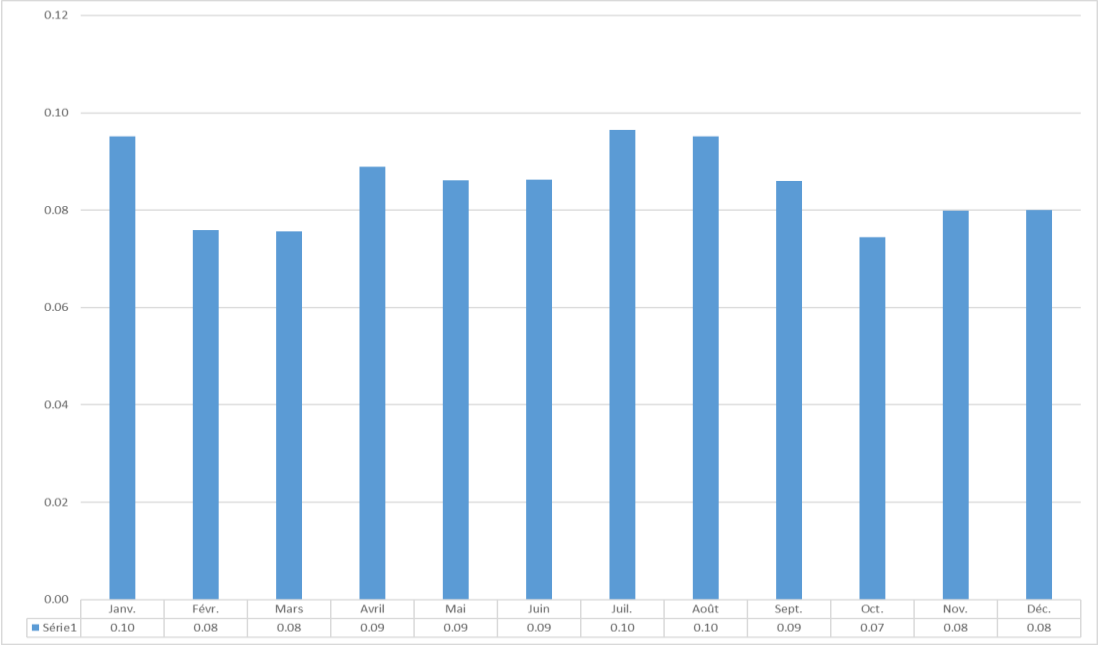



*Figure 5 : Coefficients de mensualisation appliqués aux volumes annuels prélevés pour l'AEP pour l'ensemble du département*

### 2.2.2 Prélèvements industriels

#### *2.2.2.1 Synthèse des volumes prélevés*

Une grande majorité des communes du département de l'Orne ne possèdent pas ou très peu de prélèvements pour des besoins industriels. Ces derniers représenteraient tout de même 5,7 $Mm^3$/an en moyenne à l'échelle du département (période 1994-2020).

Par ordre d'importance, les prélèvements recensés dans le département de l'Orne sont plus importants en moyenne sur les bassins du sud du territoire : la Varenne (2,2 $Mm^3$/an), l'Huisne (1,3 $Mm^3$/an), et la Sarthe dans une moindre mesure. Au nord du département, c'est le bassin de la Rouvre qui possède les volumes prélevés les plus importants (0,37 $Mm^3$/an).

On note que les bassins de l'Ouest du territoire concentrent la majorité des prélèvements dans les eaux de surface, alors que ceux de l'Est concentrent les prélèvements dans les eaux souterraines (Figure 6).

Avec les données disponibles, l'Orne et la Sarthe ne rentrent pas dans les territoires avec les volumes les plus importants, ce qui est surprenant avec la présence sur ces deux bassins des deux plus importantes communautés urbaines d'Argentan et Alençon (cela semblerait indiquer un possible report des besoins industriels vers l'AEP).

#### *2.2.2.2 Mensualisation des données*

Les volumes des prélèvements industriels sont recueillis au pas de temps annuel. Après analyse, il a été constaté une certaine homogénéité des besoins mensuels de prélèvements des industriels. Aussi, il n'a pas été retenu de coefficient de mensualisation in fine pour ce type d'acteur (**volume constant chaque mois**).

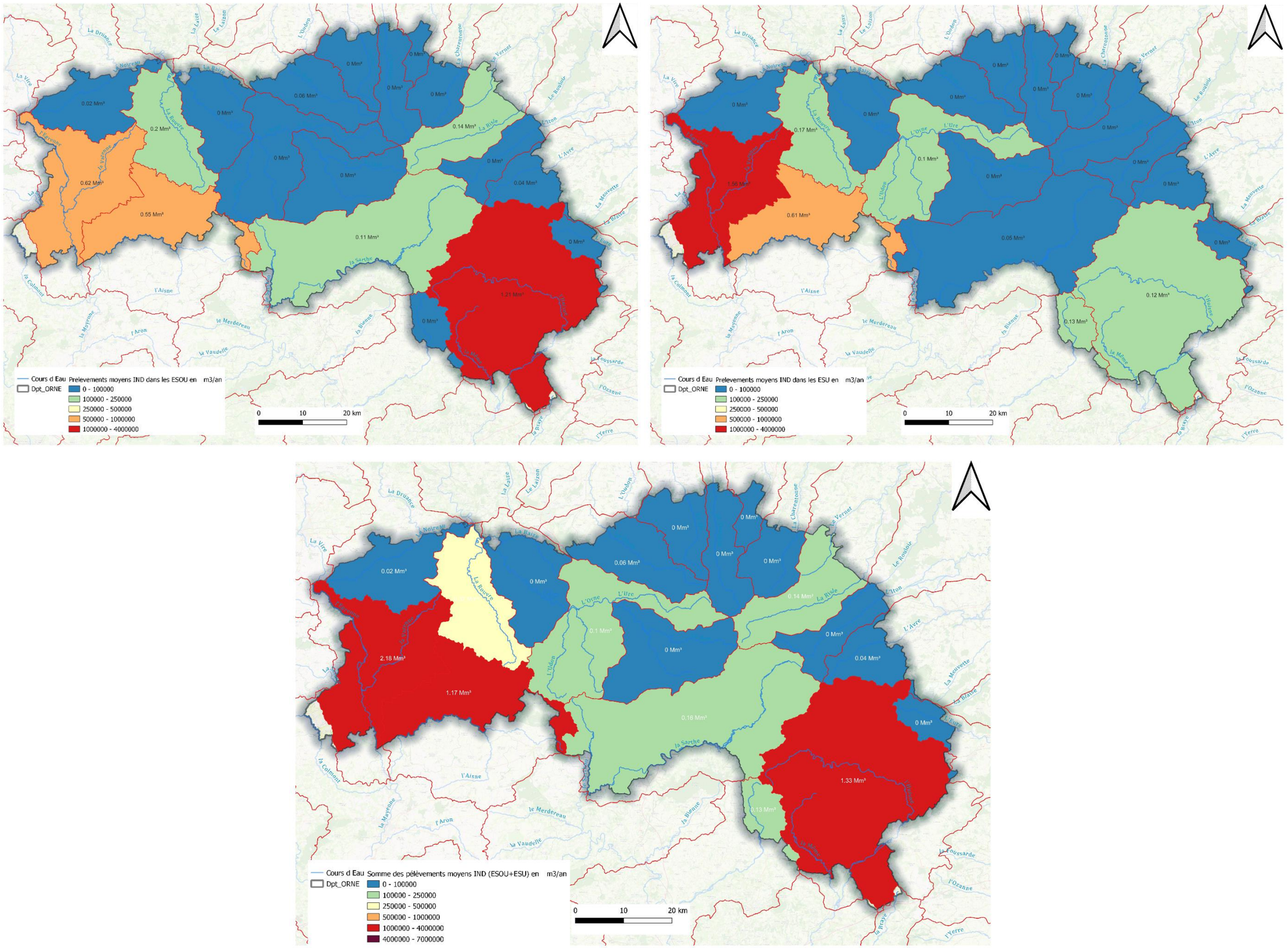



*Figure 6 : Synthèse cartographique des prélèvements pour l'Industrie sur les principaux bassins versants du département de l'Orne*

### 2.2.3 Prélèvements agricoles

Les données des prélèvements agricoles (irrigation et abreuvement) collectées montrent des écarts significatifs qui illustrent leur manque de fiabilité et ne permettent pas de réaliser un bilan des volumes prélevés pour l'agriculture. On le rappelle, le nombre d'ouvrages (cf. Figure 7) et les volumes associés ne permettent pas de réaliser des bilans des volumes prélevés pour un usage agricole à cette échelle.

Ces lacunes avaient par ailleurs déjà été soulignées dans différents documents d'état des lieux des SAGE que le BRGM a pu consulter.

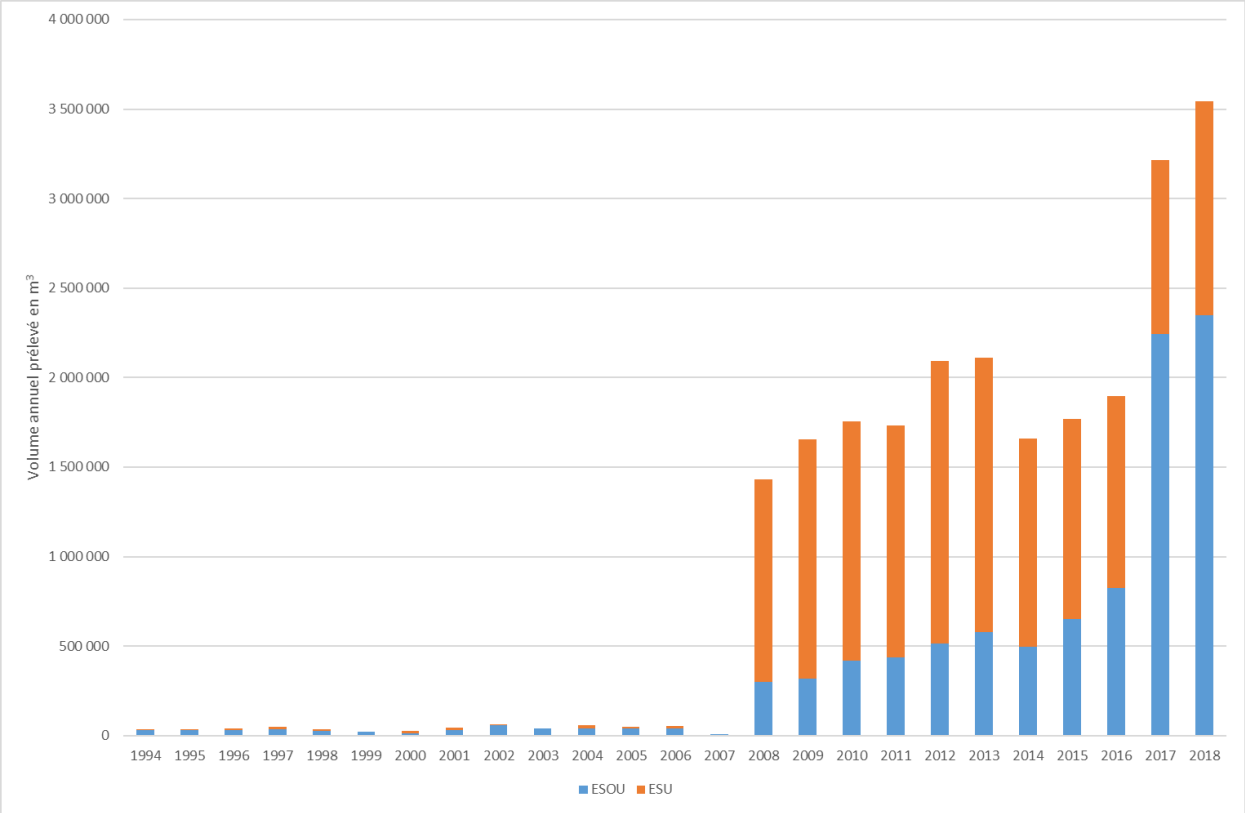



*Figure 7 : Evolution des volumes prélevés pour l'agriculture dans le département de l'Orne de 1994 à 2018 (données Agences de l'Eau et BNPE)*

Par conséquent, **il s'est avéré nécessaire de procéder à des estimations sur les besoins en eau pour l'abreuvement et l'irrigation à l'échelle de l'ensemble du département de l'Orne**.

Ces calculs estimatifs s'appuient en particulier sur les données communales disponibles dans les Recensements Généraux Agricoles (RGA 1988-2000-2010 et 2020, source : AGRESTE)[4].

[4] Il est important de noter que ces données sont couvertes par le secret statistique et ne sont communiquées que lorsque le nombre d'exploitants par commune est supérieur à 3 et si aucune exploitation ne représente plus de 85% du résultat.

### *2.2.3.1 Estimation des Volumes prélevés pour l'abreuvement*

#### 2.2.3.1.1 Méthodologie

La méthode utilisée pour estimer les volumes mensuels des ouvrages de prélèvements ayant un usage dominant « abreuvement » consiste à estimer le volume d'eau annuellement consommé par le bétail à partir des données RGA Communaux[5] de 1988, 2000, 2010 et 2020.

Dans le département de l'Orne, les bovins sont la catégorie de cheptel la plus importante en termes d'effectifs. Une tendance à la baisse du nombre de têtes est observée sur la période 1988-2020 (-23,7% en 32 ans). Cf. Figure 8 ci-après.

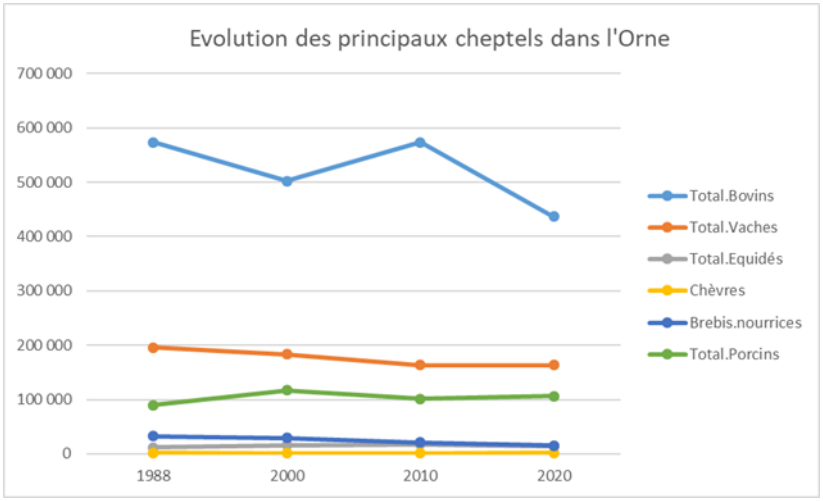



*Figure 8 : Données statistiques communales du Recensement Général Agricole (RGA – DRAAF)*

Du point de vue géographique, la population bovine est principalement localisée sur l'ouest du département, dans la zone bocagère (particulièrement dans les bassins versants de la Mayenne, de la Rouvre, du Noireau et de la Varenne) cf. Figure 9 ci-dessous.

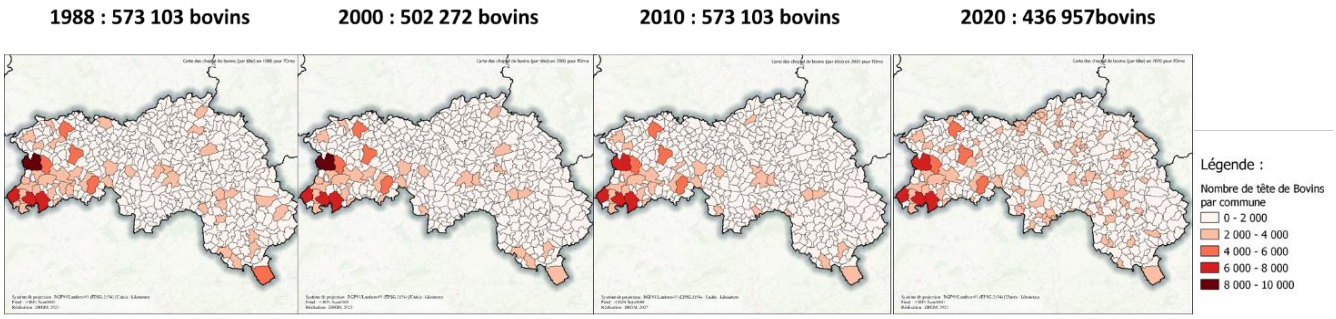



*Figure 9 : Evolution des effectifs bovins sur la période 1988-2020 (source : RGA – DRAAF)*

A partir de ces informations, le BRGM a proposé de réaliser une estimation des besoins en eau consommée par les différents types de cheptels existants dans le département. Le calcul s'appuie sur les valeurs de consommation moyenne journalière par animal estimée à deux périodes de l'année « chaude » et « moyenne tempérée » - rapportées ci-après dans le Tableau 3. Il s'agit

[5] Opération décennale européenne et obligatoire, le Recensement Général Agricole (RGA) a pour objectif d'actualiser les données sur l'agriculture française et de mesurer son poids dans l'agriculture européenne. https://agriculture.gouv.fr/les-chiffres-definitifs-et-detailles-du-recensement-agricole-2020

d'une synthèse des valeurs retenues dans le cadre des études quantitatives menées sur la Sarthe, la Mayenne, la ZRE Bajocien-Bathonien, compilant également d'autres références bibliographiques régionales du nord de la France (région Bourgogne Franche Comté, étude INRAE 2013 notamment).

| | Synthèse | |
|---|---|---|
| Consommation Journalière par type de cheptel (L/j) | Consommation moyenne | Consommation Estivale |
| Vaches allaitantes | 50 | 64 |
| Vaches laitières | 79 | 93 |
| Bovins de moins de 1 an | 23 | 31 |
| Bovins de 1 an ou plus | 29 | 36 |
| Caprins | 8 | 10 |
| Ovins | 5 | 7 |
| Porcs | 17 | 24 |
| Truies | 19 | 28 |
| Volailles | 0,2 | 0,2 |
| Equidés | 28 | 61 |
| Lapins | 0,4 | |

*Tableau 3 : Données compilées issues de la synthèse des travaux estimatifs réalisés pour les besoins des études quantitatives sur la Sarthe, Mayenne, ZRE Bajocien-Bathonien et autres ref. régionales du Nord France*

*Attention : ces chiffres ne tiennent pas compte des « consommations » supplémentaires des bâtiments d'élevage (lavage/nettoyage en particulier). Une surconsommation entre +10 et +30 L par tête/jour pour les bovins pourrait dans ce cas être ajoutée par exemple, mais celle-ci est le plus souvent prise sur le réseau d'AEP pour des questions sanitaires. Ces besoins restent donc encore mal évalués, mais pourraient représenter près de 18% des besoins totaux pour les bovins d'après Massabie et al., (INRAE - 2013). Ils sont différents d'un cheptel à l'autre.*

L'estimatif tient compte d'un nombre de journées « chaudes » fixé arbitrairement à 90 jours/an (soit environ 3 mois).

#### 2.2.3.1.2 Résultats

L'application des besoins en eau journaliers aux effectifs communaux du RGA ont permis d'estimer des besoins annuels en eau d'abreuvement pour l'ensemble du département de l'Orne (Figure 10). En 2020, le volume estimé représenterait un peu plus de 8,2 $Mm^3$. Les résultats montrent également une baisse des volumes calculés sur la période 1988-2020, principalement imputable à la baisse des effectifs bovins.

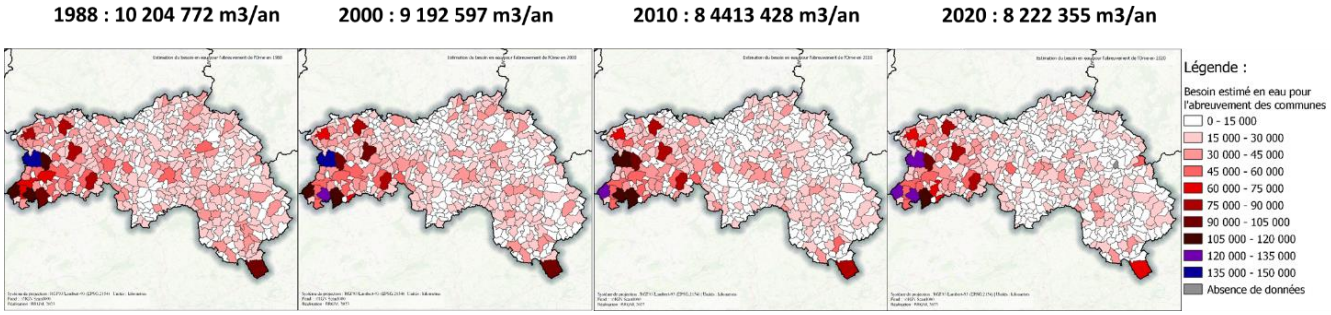



*Figure 10 : Estimation des besoins en eau pour l'abreuvement des cheptels du département de l'Orne*

Par défaut, l'évolution a été lissée dans les bases de données entre chaque période décadaire du RGA pour l'ensemble de la période 1994-2020 modélisée.

#### 2.2.3.1.3 Répartition et mensualisation

En l'absence de données précises généralisées, la répartition (en %) de l'eau issue du milieu naturel et du réseau AEP ainsi que la répartition eau souterraine et eau de surface, servant à l'alimentation du bétail, a été répartie à dire d'expert, en fonction de la géologie simplifiée du département (Figure 11).

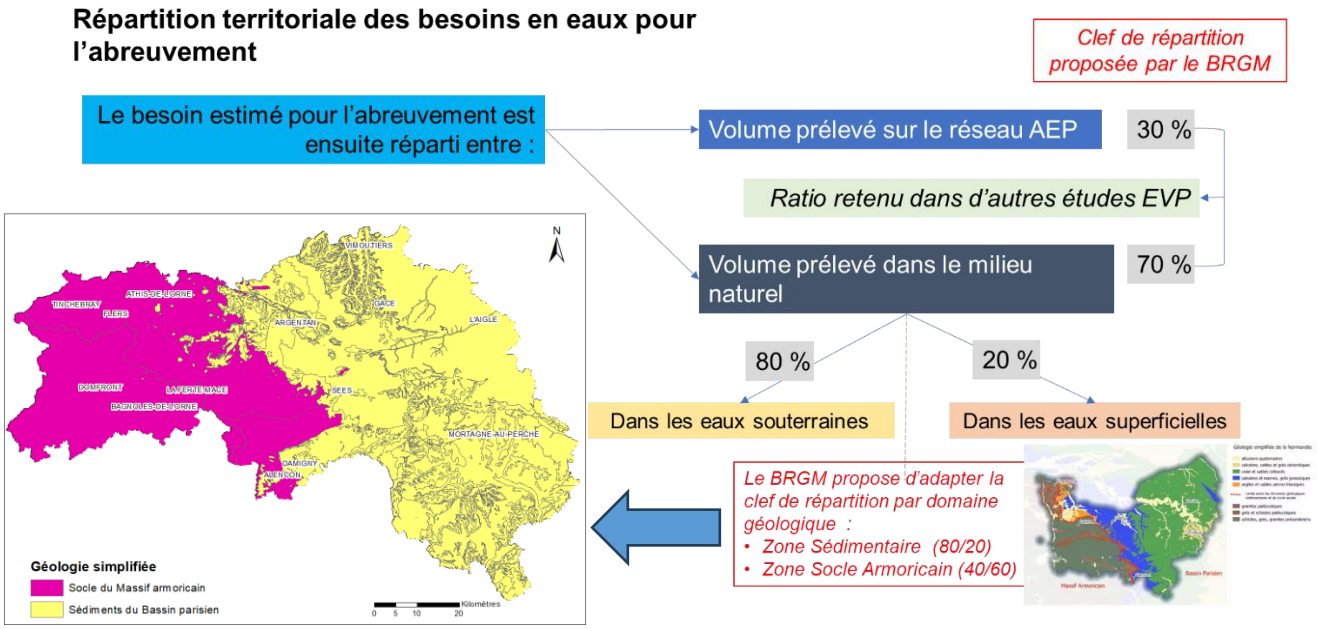



*Figure 11 : Répartition des besoins en eau pour l'abreuvement*

Le BRGM propose ensuite une mensualisation de ces estimations annuelles afin de représenter la saisonnalité des besoins, plus importants durant la période estivale, notamment entre les mois de Juin à Septembre (Figure 12).

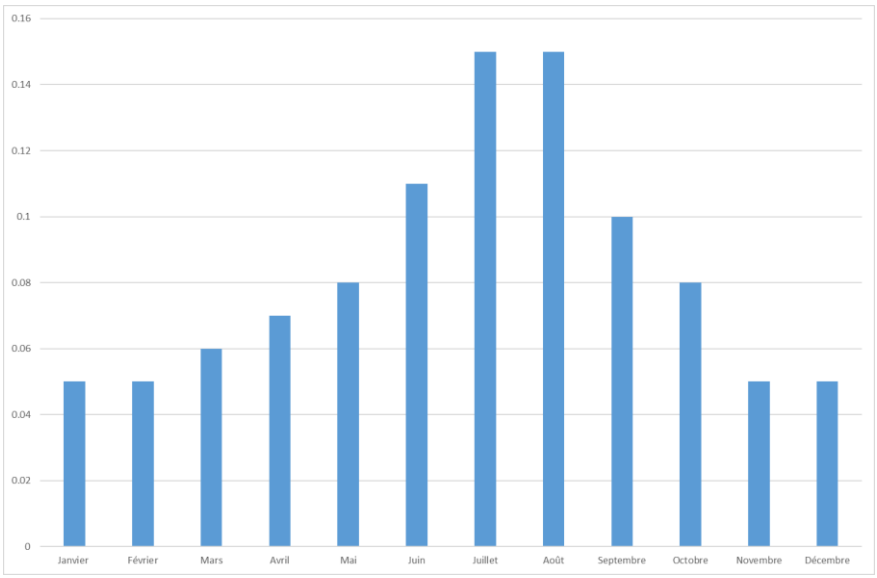



*Figure 12 : Coefficients de mensualisation des besoins estimés pour l'abreuvement des animaux*

Une évolution du mode de calcul pourrait, à l'avenir, consister à faire varier le besoin en fonction du nombre de jours de chaleur (Temp. > 20°C). Cette valeur de jours de chaleur est variable

chaque année et différente en fonction des régions hydroclimatiques (Massabie et al., 2013). A titre d'exemple, on note que ce nombre est légèrement supérieur à 100 jours en moyenne annuelle et que celui-ci tend globalement à augmenter sur la période 2012-2024 à la station météorologique de Flers (Figure 13).

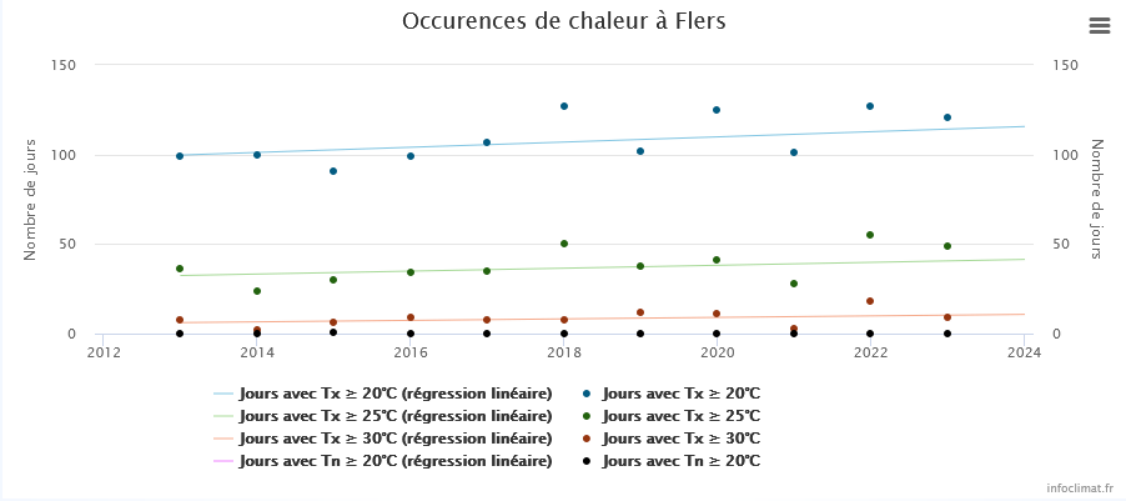



*Figure 13 : Nombre de jours de forte chaleur à Flers (données Météo France, source : infoclimat.fr)*

**Il est donc vraisemblable, qu'en contexte de changement climatique, le besoin d'abreuvement ne suive pas une évolution linéaire dans le futur (càd. parfaitement corrélée avec les effectifs animaux, dont la tendance est actuellement en baisse), mais que cette variation baissière soit de fait limitée/contrebalancée par l'augmentation des températures et jours de chaleur et donc des besoins.**

#### 2.2.3.1.4 Comparaison avec les volumes déclarés/autorisés de la DDT

La comparaison des volumes déclarés ou autorisés de la DDT (en 2018) avec les besoins estimés en eau pour l'abreuvement des animaux par commune en 2020 permet de mettre en évidence des écarts très importants (Figure 14) entre les volumes comptabilisés et ceux estimés.

Cette différence peut sans doute s'expliquer par les incertitudes suivantes :

- Une connaissance insuffisante des ouvrages ou points d'eau utilisés pour les besoins en eau pour les usages agricoles ;
- Une connaissance approximative de la répartition entre volumes prélevés dans les milieux naturels (difficilement comptabilisés) ou consommés sur les réseaux d'adduction d'eau potable ;
- Une connaissance approximative des consommations entre les différents usages : abreuvement, irrigation, mixte (les deux à la fois) ou autres ;
- Une connaissance très lacunaire, à l'échelle des SAGE ou collectivités gestionnaires, des prélèvements en eau situés sous les seuils règlementaires ou fiscaux (cf. paragraphe 2.2.1).

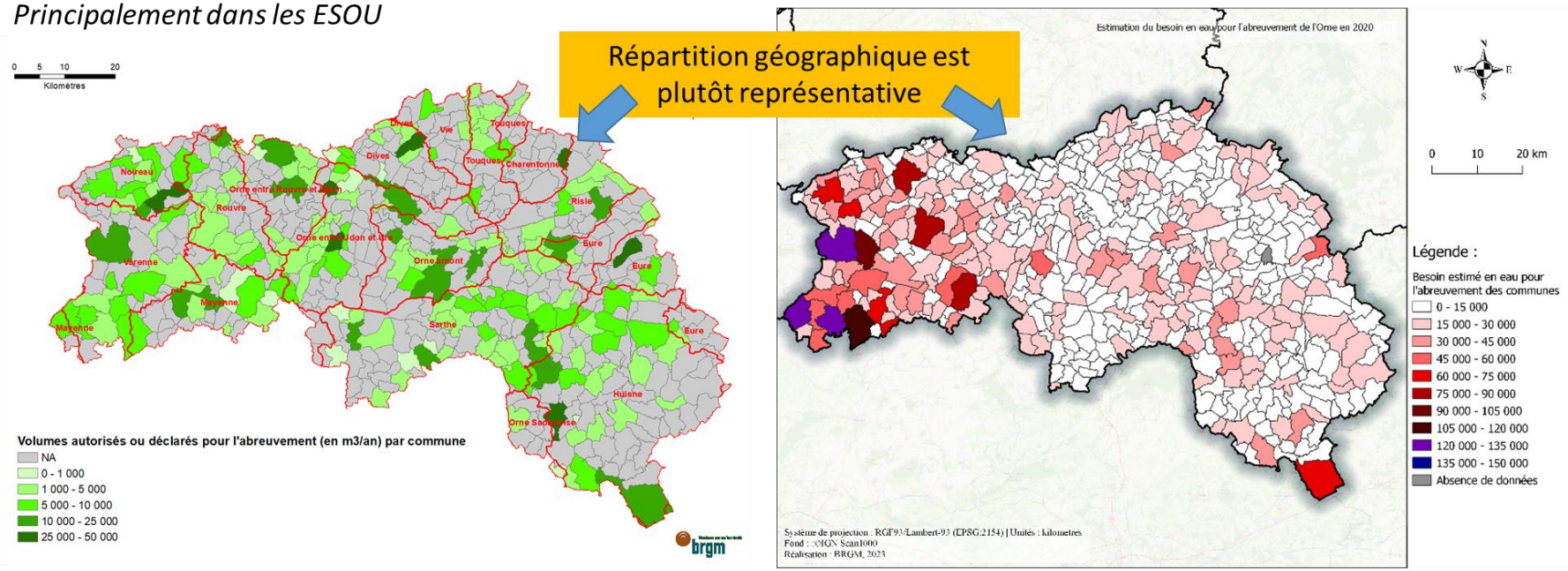
Une source de satisfaction est cependant que la répartition géographique de ces besoins est dans son ensemble représentative.

**DDT : 1 165 843 m3 de volume maximal autorisé en 2018**

*Principalement dans les ESOU*

(Avant répartition)

**Besoins abreuvement estimés pour 2020 : 8 222 355 m3**




Quel Ratio AEP/Milieu puis ESU/ESOU retenir in fine ?
Un avis issu des ventes d'eau potable ?

*Exemple répartition (Milieu/AEP), chiffres 2020 :*
*- 50/50 : 4,1Mm3/4,1Mm3*
*- 60/40 : 4,9 Mm3/3,3Mm3*
*- 70/30 : 5,7 Mm3/2,5Mm3*

*Figure 14 : Ecarts de volume (en m$^3$/an) par commune entre besoins estimés et volumes déclarés ou autorisés de la DDT pour l'abreuvement des animaux*

### *2.2.3.2 Estimation des Volumes prélevés pour l'Irrigation*

#### 2.2.3.2.1 Méthodologie

L'estimation des besoins en eau pour l'irrigation des cultures est déterminée à partir du croisement des surfaces de cultures nécessitant irrigation avec une dose d'irrigation mensuelle (calculée en fonction des pluies, évapotranspirations et les coefficients culturaux – Rieul, 1992).

Le calcul de la **dose d'irrigation mensuelle** est réalisé à l'aide d'un bilan hydrique (Figure 16 page suivante) comprenant l'évapotranspiration maximale (ETM), le coefficient cultural (Kc) et la réserve utile (RU) :

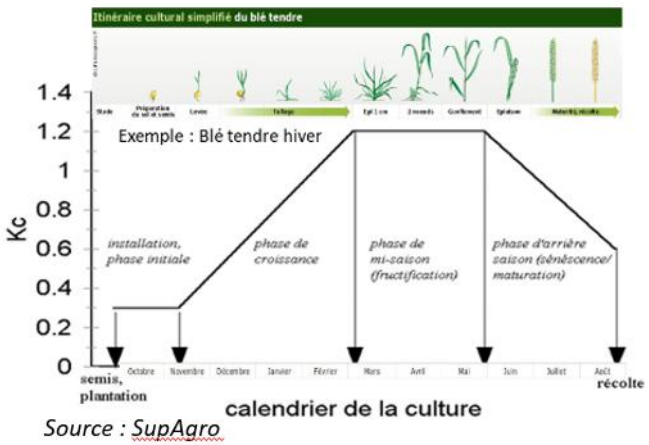
- Si RU du mois précédent + Pluie – ETM est inférieure au seuil de la RU[6], alors la dose d'irrigation = Seuil RU – RU du mois précédent + Pluie – ETM
- Si RU du mois précédent + Pluie – ETM est supérieure au seuil de la RU, alors la dose d'irrigation = 0
- RU du jour = RU du mois précédent + Dose d'irrigation + Pluie – ETM

Le coefficient cultural (Kc) permet de corriger l'ETP suivant une culture donnée et son stade de développement (Surdyk, 2023).

Ainsi, plus la culture est développée d'un point de vue végétatif, plus le Kc approche de 1, et à ce moment-là l'ETP équivaut à l'ETM. Le Kc est calculé suivant les cultures et leur cycle de développement, on trouve de nombreux abaques pour chaque culture (Figure 15).

Kc = ETMax/ETP (coefficient sans dimension), ne tombe pas à 0 au cours du temps car l'ETP n'est pas nulle dans nos régions tempérées.

NB : Seules les cultures qui nécessitant un recours potentiel à l'irrigation seront retenues, soit : le blé, le maïs, l'orge et les cultures fruitières pour le département de l'Orne[7].




*Cultures irriguées principalement dans l'Orne*

| Période | Céréales | Maïs (fourrage) | Cultures fruitières |
|---|---|---|---|
| 1-janv. | 0.8 | 0.3 | 0.3 |
| 1-févr. | 0.8 | 0.3 | 0.3 |
| 1-mars | 1 | 0.3 | 0.3 |
| 1-avr. | 1.1 | 0.5 | 0.7 |
| 1-mai | 1.2 | 0.7 | 0.7 |
| 1-juin | 1.2 | 1 | 0.85 |
| 1-juil. | 0.8 | 1.2 | 1 |
| 1-août | 0.5 | 1 | 1 |
| 1-sept. | 0.6 | 0.5 | 0.7 |
| 1-oct. | 0.6 | 0.5 | 0.3 |
| 1-nov. | 0.6 | 0.3 | 0.3 |
| 1-déc. | 0.6 | 0.3 | 0.3 |

*KC, croisement entre différentes sources de données :*

- *FAO*
- *Chambre d'agriculture de l'Eure*
- *Site de l'Association régionale pour la maitrise des irrigations (ARDEPI) sur bassin RMC*

*Figure 15 : Coefficients Culturaux utilisés (Kc) par le BRGM dans le département de l'Orne*

[6] Le seuil RU est défini à 2/3 de la RU.

[7] Statistiques agricoles des principales cultures irriguées source RA2020 (DRAAF) : https://draaf.normandie.agriculture.gouv.fr/IMG/html/20220725-fts_ra2020_orne.html#surfaces-agricoles

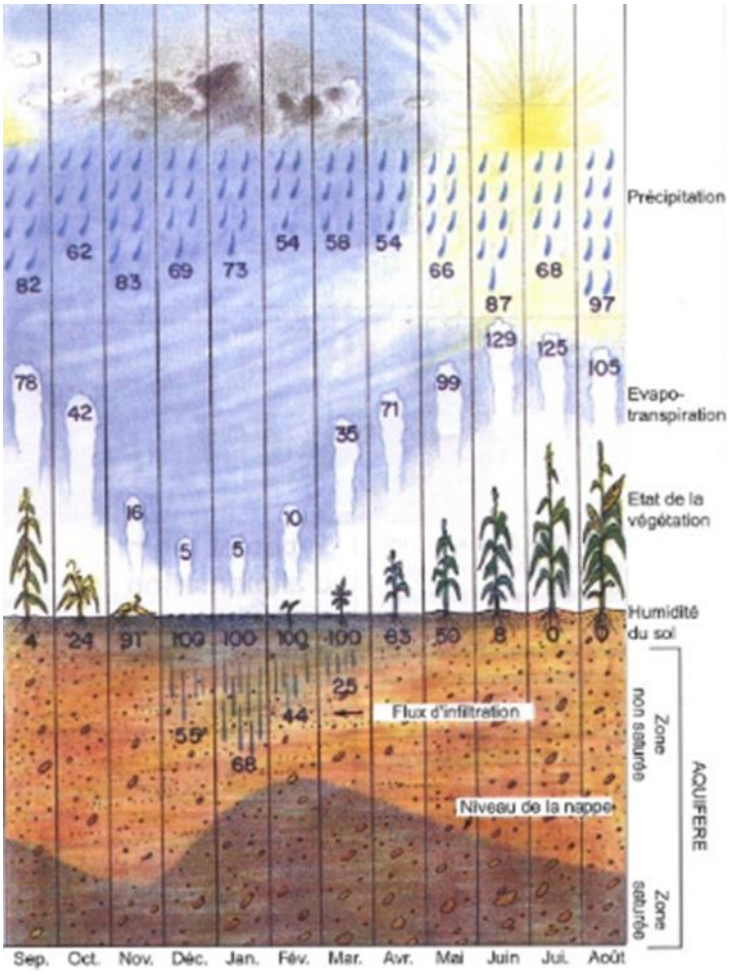



*Figure 16 : Exemple de bilan hydrique saisonnier (source : J.-J. Collin, Les eaux souterraines, 2004)*

Les données de pluies et d'évapotranspiration potentielle (ETP) « SAFRAN » ont été utilisées pour réaliser les estimations des besoins en eau pour l'irrigation. SAFRAN utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire, au pas de temps horaire, des paramètres tels que les précipitations liquides et l'ETP. Ces paramètres sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). Les pluies et ETP SAFRAN ont été utilisées au pas de temps mensuel. Les chroniques pluie et ETP ont été extraites de la publithèque de Météo-France (fichiers disponibles par décennie pour l'ensemble des mailles du territoire français pour la période 1958 à 2020). Un script Python a été développé pour extraire de ces fichiers de données les mailles qui concernent la zone d'étude et reconstituer des séries temporelles de pluie et d'ETP pour chacune de ces mailles.

Les chroniques moyennes de pluie et d'ETP sont ensuite calculées à partir des mailles SAFRAN recoupant le bassin versant (Figure 17). Ces données sont ensuite associées aux coefficients culturaux (Kc) des surfaces cultivées.

Les doses d'irrigation nécessaires ainsi calculées au pas de temps mensuel pour la période 1994-2020 ont été multipliées par la surface des parcelles concernées. Ces valeurs ont été regroupées par commune.

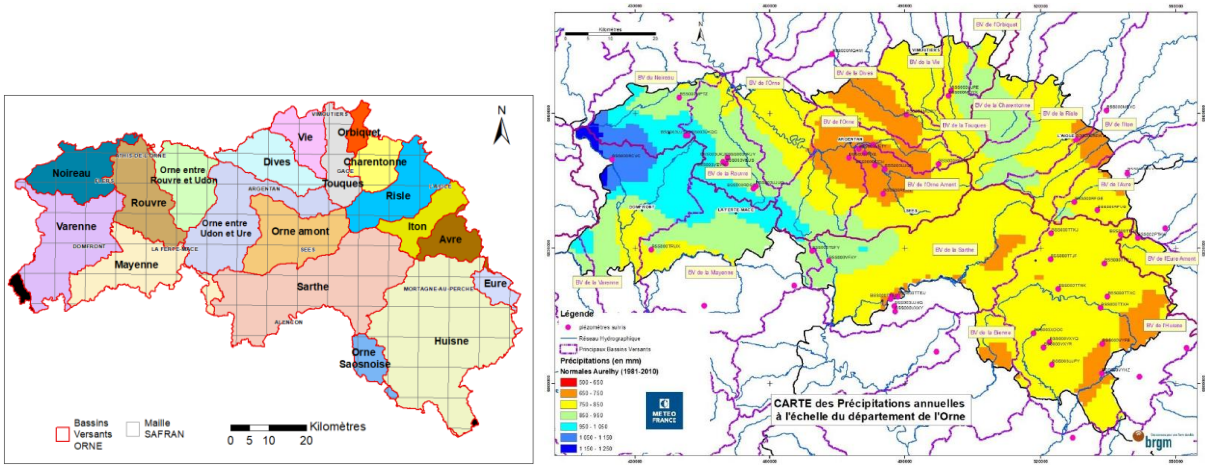



*Figure 17 : Mailles SAFRAN au droit de chaque bassin versant étudié dans le département de l'Orne (gauche) et précipitations moyennes annuelles AURELHY (droite), source Météo France*

La réserve utile est moyennée au niveau de chaque commune à partir des données de l'INRAE qui définissent la réserve utile des sols de la France métropolitaine avec une résolution de 90 m en fonction du type de sol et notamment de leur granulométrie. Ces données ont été moyennées par unités homogènes définies dans les référentiels régionaux pédologiques (RRP) - (Figure 18).

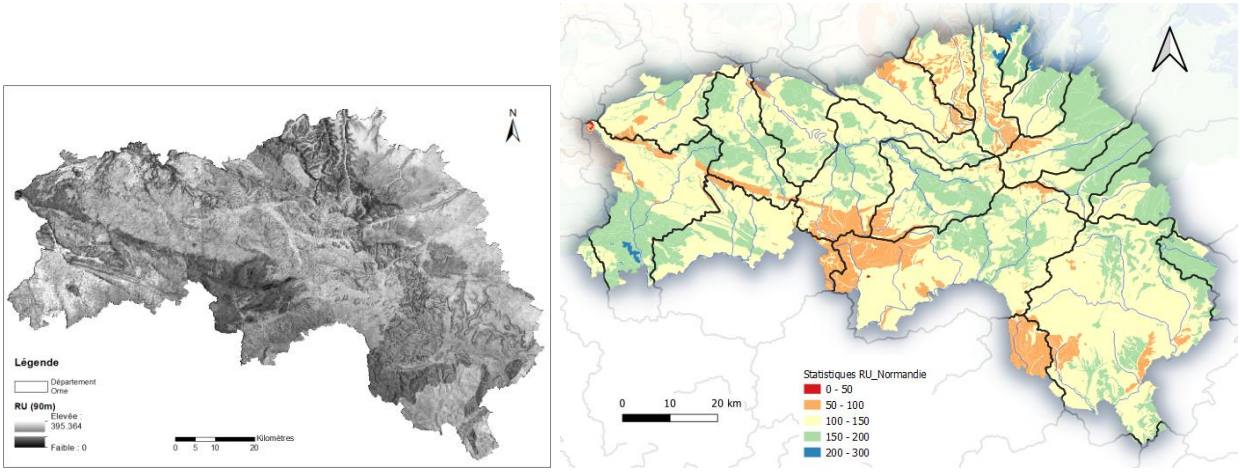



*Figure 18 : Réserve utile des sols (en mm) dans le département de l'Orne (source INRAE) sur l'illustration à gauche et ses valeurs moyennes réparties par unité homogènes de sols du RRP (source Vigisol-SAFER) sur l'illustration à droite*

Les données des RGA de 1988, 2000 et 2010 et 2020 relatives aux principales surfaces cultivées (en hectares) sont utilisées pour estimer les besoins en eau pour l'irrigation par commune du département et lissées pour couvrir l'ensemble de la période de calcul considérée (1994-2020).

Il est à noter que l'orientation technico-économique communale des exploitations indique encore une majorité d'exploitations tournées vers la polyculture-élevage (Figure 19) ce qui implique une forme de diversité des surfaces cultivées présentes sur le territoire du département de l'Orne.

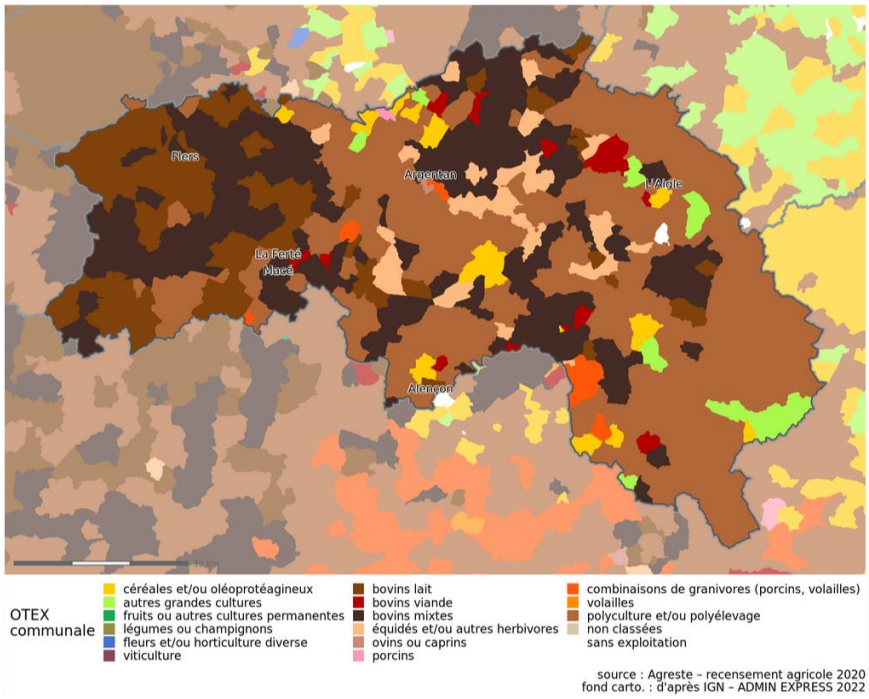



*Figure 19 : Orientation technico économique des exploitations (OTEX) des communes du département de l'Orne (source : RA 2020, DRAAF)*

NB : les données des Registres Parcellaires Graphiques (RPG)[8] ne sont disponibles que depuis 2007 et ne couvrent donc pas toute la période de temps ciblée (1994-2020). Ces données ne peuvent donc pas être utilisées pour annualiser le calcul. De plus ces informations, rapportées à l'échelle des îlots culturaux, peuvent paraître trop détaillées pour être utilisées pour les besoins de modèles globaux (non-spatialisés).

#### 2.2.3.2.2 Pondération des Résultats

Il a semblé nécessaire au BRGM de pondérer le besoin d'irrigation estimé par calcul car : 1) les pratiques d'irrigation ne sont *de facto* pas développées dans le département et 2) la situation de stress hydrique ne se traduit pas nécessairement par une action d'arrosage.

Une pondération a été proposée avec les ratios de surfaces irriguées déclarées à la DRAAF par Bassin Versant (BV), les données communales n'étant pas disponibles[9] (Tableau 4). En effet, le secret statistique couvrant la quasi-totalité des communes du département, celui-ci limite alors la connaissance des surfaces réelles de cultures nécessitant un besoin potentiel d'irrigation sur le département de l'Orne.

[8] Le registre parcellaire graphique (RPG) est une base de données géographiques des contours des parcelles et îlots culturaux associant leur groupe de cultures majoritaire. Cette BD servant de référence à l'instruction des aides de la politique agricole commune (PAC). https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-culturaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/

[9] Les données sont soumises au secret statistique lorsque le nombre d'exploitations agricoles est inférieur à trois à l'échelle communale et si une exploitation représente plus de 85% du résultat.

Les données fournies ont permis de mettre en évidence que celui-ci était assez inégal à l'échelle du département : globalement faible sur les bassins versants du domaine de socle et plus élevé sur les bassins versants situés en domaine sédimentaire.

Même si elles sont globalement très faibles, ces données soulignent que les besoins d'irrigation seraient en croissance significative sur la dernière décennie, cf. Tableau 4 ci-dessous.

| | % SAU | | |
|---|---|---|---|
| BV | 2000 | 2010 | 2020 |
| Avre | 0,13% | 0,10% | 0,37% |
| Orne Saosnoise | 0,24% | 0,09% | 0,36% |
| Charentonne | 0,00% | 0,10% | 0,22% |
| Dives | 0,05% | 0,61% | 1,07% |
| Eure | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Huisne | 0,09% | 0,06% | 0,18% |
| Iton | 0,32% | 0,07% | 0,76% |
| Mayenne | 0,00% | 0,01% | 0,02% |
| Noireau | 0,05% | 0,00% | 0,01% |
| Orbiquet | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Orne Amont | 0,02% | 0,03% | 0,11% |
| Orne Aval | 0,00% | 0,04% | 0,16% |
| Orne moyenne | 0,10% | 0,11% | 0,39% |
| Risle | 0,05% | 0,04% | 0,20% |
| Rouvre | 0,04% | 0,01% | 0,11% |
| Sarthe | 0,04% | 0,05% | 0,05% |
| Sarthon | 0,00% | 0,15% | 0,60% |
| Touques | 0,07% | 0,06% | 0,03% |
| Varenne | 0,02% | 0,03% | 0,02% |
| Vie | 0,00% | 0,07% | 0,01% |
| **Moyenne ORNE** | 0,06% | 0,08% | 0,23% |

*Tableau 4 : Pourcentage de surface agricole utile (SAU) irriguée dans le Dpt 61 selon les données du RGA*

Les résultats du calcul ainsi pondéré montrent (Figure 20) que le volume estimé pour répondre au besoin d'irrigation est globalement faible, mais que celui-ci augmente entre 2000 et 2020[10]. Ce constat est par ailleurs cohérent avec l'augmentation du nombre de forages déclarés pour cet usage (obs. BRGM à partir des données issues de la BSS).

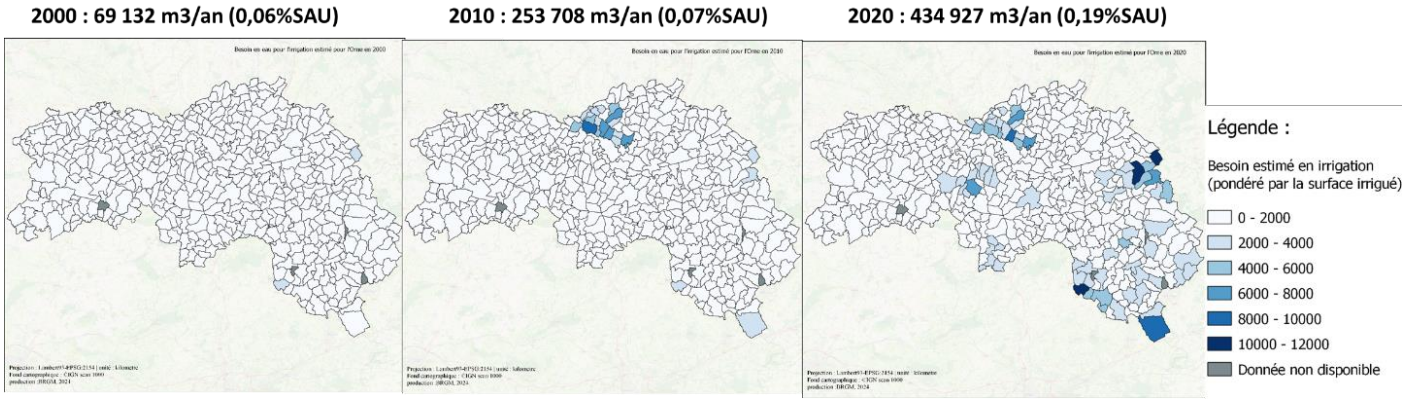



*Figure 20 : Estimation du volume d'irrigation dans le département de l'Orne*

Au niveau territorial, les bassins versants de la Dives/Orne, de l'Huisne et de l'Iton semblent être les secteurs les plus concernés par ces prélèvements. Ces derniers seraient donc plus

[10] Les données de 1988 ne sont pas connues.

importants, en zone sédimentaire, à l'est du département, en particulier sur des secteurs couverts par des Zones de Répartition des Eaux (ZRE – cf. paragraphe 2.1.1).

Dans ce contexte, le BRGM estime que 100% de la satisfaction de ces besoins se fait par des prélèvements dans le milieu naturel et plus particulièrement dans les eaux souterraines.

Cependant, des demandes ponctuelles ou exceptionnelles d'irrigation ont pu être demandées par le passé dans l'ouest du département, lors des années hydrologiques particulièrement déficitaires, de façon à sécuriser la production de fourrages ou de cultures d'ensilage (utilisées comme alimentation animale).

**Pour conclure, on constate que l'estimation des volumes correspondant au besoin en eau pour les besoins d'irrigation seraient donc bien moins importants que ceux pour l'abreuvement (20x moins importants).**

Une matrice a été reconstituée pour permettre de calculer les besoins sur l'ensemble de la période modélisée : 1994-2020.

#### 2.2.3.2.3 Comparaison avec les volumes déclarés/autorisés de la DDT

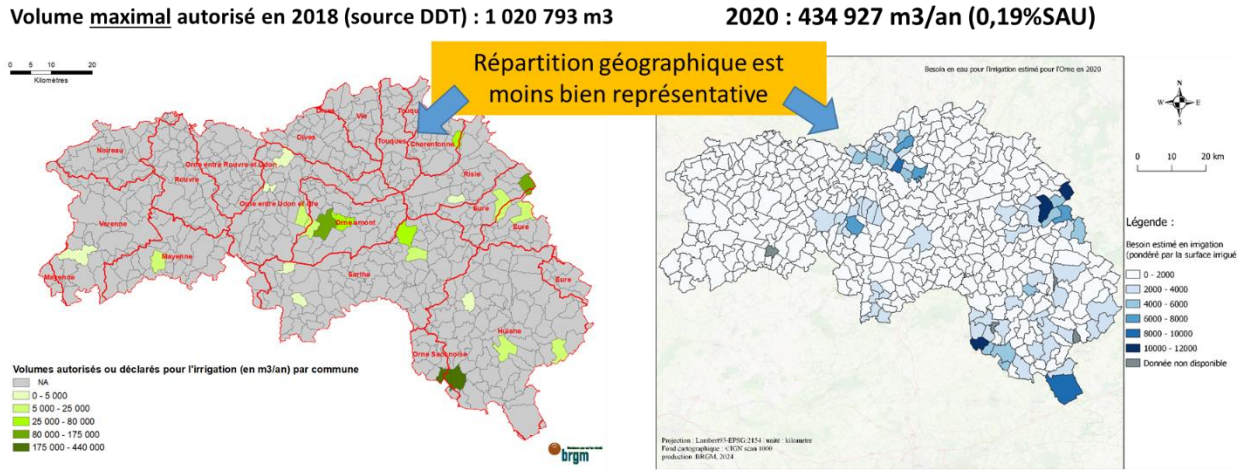



*Figure 21 : Comparaison entre les volumes maximum déclarés/autorisés par la DDT de l'Orne pour l'irrigation et l'estimation réalisée par le BRGM Normandie*

Le calcul estimatif réalisé par le BRGM pour l'année 2020 apparait inférieur au volume total maximum autorisé en 2018. Outre le fait que cette différence peut s'expliquer par les conditions hydroclimatiques entre 2018 et 2020, l'écart peut également s'expliquer par le fait que l'ensemble des volumes autorisés n'ont probablement pas été réellement prélevés (cf. Figure 21).

En termes de répartition spatiale des prélèvements, le recensement réalisé par l'Organisme Unique de Gestion (OUGC), dans le cadre de l'étude sur les volumes prélevables de la ZRE Bajo-Bathonien, a permis de mettre à jour l'existence de nouveaux ouvrages pour l'irrigation, sur le secteur de la Dives/Orne qui n'apparaissent pas sur la carte de gauche de la Figure 21. Alors que les secteurs de l'Huisne, de l'Orne et de l'Ouche (Iton) sont a priori bien identifiés et cohérents avec les estimations.

Le même exercice de comparaison des résultats avec les données de la BNPE montre que le calcul estimatif réalisé par le BRGM est proche des données de la BNPE disponibles pour l'année

2020 alors que cette même comparaison réalisée avec des données plus anciennes (2010) montre des écarts significatifs (Figure 22).

Le BRGM explique cet écart par le fait que les données les plus récentes ont pu bénéficier à la fois d'une meilleure capitalisation par les Agences de l'Eau mais aussi de bénéficier des études volumes prélevables réalisées ou en cours sur le territoire (études HMUC Sarthe amont/Mayenne et étude EVP ZRE Bajo-Bathonien et dans une certaine mesure sur l'Huisne).

Il est donc probable que les données récentes de la BNPE aient bénéficié de mises à jour liées à ces études et donc que les chiffres disponibles pour les dernières années soient in fine plus fiables que celles des années antérieures (par exemple 2010 et avant). Les écarts relatifs sont toutefois faibles (à relativiser) au regard des volumes en jeu.

Aussi, le calcul estimatif du BRGM apparait comme étant plus fiable que l'utilisation des chiffres de la BNPE sur la période retenue de 1994-2020.

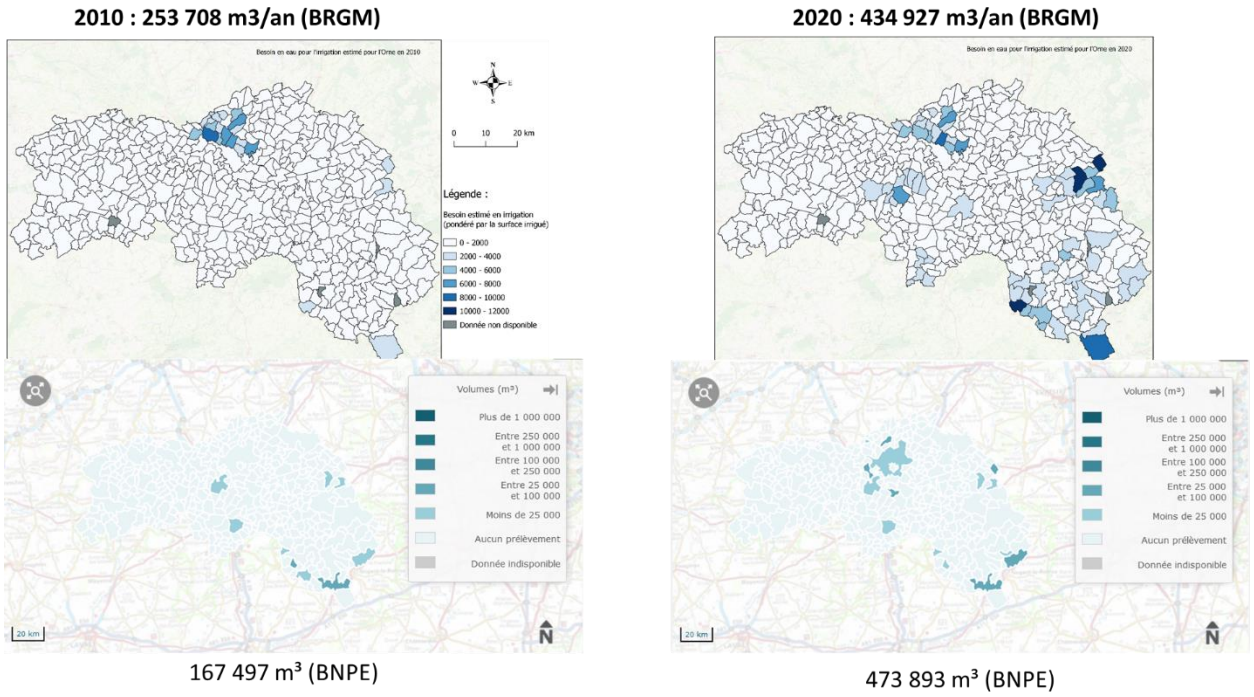



*Figure 22 : Comparaison entre les volumes répertoriés dans la BNPE et l'estimation réalisée par le BRGM Normandie pour l'irrigation*

### *2.2.3.3 Synthèse pour l'estimation des besoins agricoles*

Les tableaux ci-dessous présentent les besoins moyens annuels estimés pour les années 2000, 2010 et 2020 pour l'ensemble des usages agricoles (abreuvement et irrigation), en eaux souterraines et en eaux superficielles des principaux bassins versants du département de l'Orne (Tableau 5 et Tableau 6).

Les volumes prélevés en eaux superficielles sont plus importants en zone de socle tandis que les volumes prélevés en eaux souterraines sont globalement plus importants en zone sédimentaire. Les volumes totaux estimés pour les besoins agricoles seraient relativement importants sur les bassins versants suivants (par ordre décroissant) : l'Orne (+1,1 $Mm^3$ au total), la Varenne, l'Huisne, la Mayenne, la Sarthe, la Rouvre et le Noireau.

À l'inverse, c'est sur les bassins versants de l'Eure, l'Orbiquet, le Sarthon, la Charentonne, l'Orne Saosnoise, l'Avre, l'Iton, la Vie et la Touques que les besoins en eau agricole seraient les moins importants. On relève un écart important entre ces deux groupes de bassins-versants.

| | Irrigation | | | Abreuvement | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bassin versa** | **2000** | **2010** | **2020** | **2000** | **2010** | **2020** |
| Avre | 2 513 | 8 025 | 20 462 | 76976 | 80162 | 83353 |
| Charentonne | 0 | 4 920 | 5 590 | 106491 | 95535 | 84585 |
| Dives | 2 324 | 88 794 | 80 525 | 224081 | 198702 | 173326 |
| Eure | 0 | 0 | 0 | 42402 | 38039 | 33679 |
| Huisne | 24 165 | 46 230 | 105 256 | 886076 | 851512 | 817856 |
| Iton | 10 293 | 8 212 | 46 043 | 95350 | 80115 | 65595 |
| Mayenne | 0 | 1 615 | 2 422 | 654799 | 740658 | 827127 |
| Noireau | 1 047 | 0 | 315 | 416917 | 415523 | 414133 |
| Orbiquet | 0 | 0 | 0 | 68921 | 62053 | 55186 |
| Orne Amont | 1 334 | 6 482 | 17 247 | 359754 | 351414 | 343080 |
| Orne moyenr | 7 051 | 26 988 | 52 644 | 410834 | 381982 | 353131 |
| Orne Aval | 0 | 4 850 | 9 370 | 337308 | 326877 | 316438 |
| Orne Saosno | 11 195 | 11 027 | 35 497 | 74704 | 65338 | 55971 |
| Risle | 1 667 | 6 143 | 12 960 | 215159 | 182192 | 149222 |
| Rouvre | 1 113 | 1 762 | 7 097 | 511612 | 546104 | 580600 |
| Sarthe | 4 862 | 21 218 | 16 659 | 780456 | 744720 | 708980 |
| Sarthon | 0 | 7 336 | 19 773 | 65948 | 56414 | 46879 |
| Touques | 745 | 2 184 | 563 | 202185 | 178116 | 154042 |
| Varenne | 822 | 5 551 | 2 369 | 946077 | 972112 | 998157 |
| Vie | 0 | 1 962 | 136 | 179751 | 162035 | 144323 |
| **général Dpt.** | **69 132** | **253 299** | **434 927** | **6 655 801** | **6 529 603** | **6 405 663** |

*Tableau 5 : Synthèse de l'évolution des besoins en eau estimé pour l'Agriculture (irrigation et abreuvement) sur les principaux bassins versants du département pour les années 2000, 2010 et 2020*

| | 2020 | | |
|---|---|---|---|
| **Bassin versant** | **Total Agri ESOU** | **Total Agri ESU** | **Total** |
| Eure | 26 941 | 6738 | 33 679 |
| Orbiquet | 44 146 | 11040 | 55 186 |
| Sarthon | 39 168 | 27484 | 66 652 |
| Charentonne | 73 251 | 16924 | 90 175 |
| Orne Saosnoise | 80 268 | 11200 | 91 468 |
| Avre | 87 138 | 16677 | 103 815 |
| Iton | 98 512 | 13126 | 111 638 |
| Vie | 115 585 | 28874 | 144 459 |
| Touques | 123 786 | 30819 | 154 605 |
| Risle | 132 326 | 29856 | 162 182 |
| Dives | 219 170 | 34681 | 253 851 |
| Orne Aval | 144 928 | 180880 | 325 808 |
| Orne Amont | 271 561 | 88766 | 360 327 |
| Orne moyenne | 252 127 | 153648 | 405 775 |
| Noireau | 165 974 | 248474 | 414 448 |
| Rouvre | 239 343 | 348354 | 587 697 |
| Sarthe | 514 897 | 210742 | 725 639 |
| Mayenne | 333 279 | 496270 | 829 549 |
| Huisne | 759 495 | 163617 | 923 112 |
| Varenne | 401 639 | 598887 | 1 000 526 |
| **Total général Dpt.Orne** | **4 096 592** | **2 710 319** | **6 806 911** |

*Tableau 6 : Répartition des besoins en eau estimés pour l'année 2020 entre prélèvements en eaux souterraines (ESOU) et eaux superficielles (ESU)*

### 2.2.4 Synthèse pour l'ensemble des prélèvements

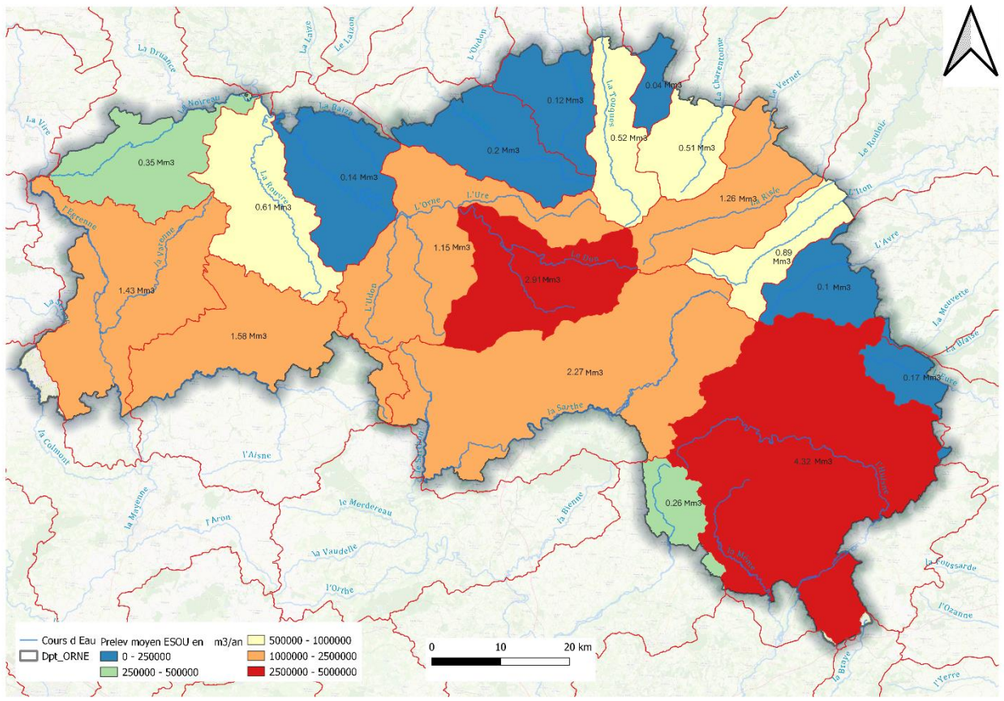
Il est important de souligner que les nombreuses hypothèses nécessaires à la reconstitution des chroniques de prélèvement ont été discutées et validées en comité de pilotage.

Les données ainsi compilées à l'échelle départementale, montrent que l'ensemble des prélèvements dans les **eaux souterraines (ESO)** apparaissent comme relativement importants pour les bassins versants de l'Huisne, de l'Orne, de la Sarthe, de la Mayenne et de la Varenne ainsi que pour la Risle.

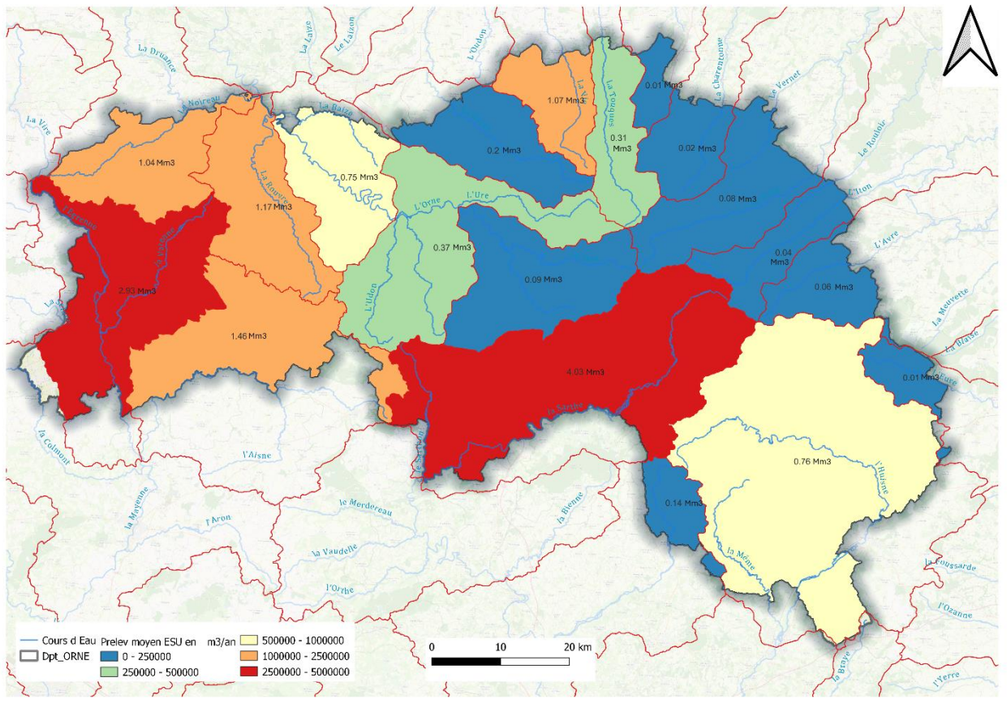
De leur côté, l'ensemble des prélèvements dans les **eaux de surface (ESU)** apparaissent comme relativement importants pour les bassins versants de la Sarthe, de la Varenne, la Mayenne, le Noireau, la Rouvre et la Vie.

Si on somme l'ensemble des prélèvements entre eaux souterraines et superficielles, ce sont les bassins suivants qui se distinguent par ordre décroissant : la Sarthe, l'Huisne, l'Orne, la Varenne, la Mayenne, la Rouvre, la Risle et le Noireau pour les plus importants (Figure 23).

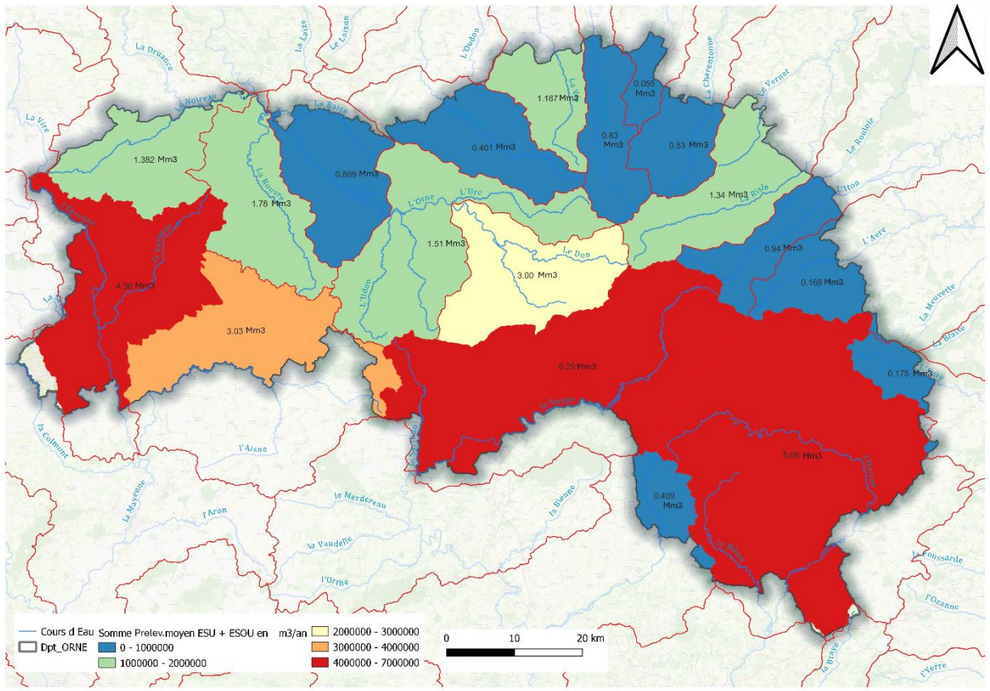
A l'inverse, la « pression relative » exercée par l'ensemble des prélèvements (ESU+ESO) semble moins importante sur les têtes de bassins-versants du quart nord-est du département.




a)




b)




c)

*Figure 23 : Somme des prélèvements moyens totaux c) différenciés dans les eaux souterraines a) et superficielles b) estimés pour les principaux bassins versants du département de l'Orne (chiffes en Mm3/an).*

## 2.3 BILAN DES REJETS

### 2.3.1 Origine des données

Les données de rejets issues de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB) ne sont disponibles qu'à partir de 2008. Les rejets de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) ne sont disponibles qu'à partir de 2010. Les données de rejet des industriels sont disponibles de 2013 à 2020 dans la base de données GEREP et IREP. Les données de rejets eaux résiduaires urbaines (ERU) des stations d'épuration urbaines (STEU) ne sont disponibles que sur la période 2014 à 2020 sur la plateforme sur l'assainissement collectif[11]. Par conséquent, les données sur les volumes rejetés sont considérées comme incomplètes, en particulier avant l'année 2008.

### 2.3.2 Mensualisation des rejets

Les volumes de rejets issus des données ERU et GEREP sont au pas de temps annuel. Les variations saisonnières ne sont pas perçues à cette échelle. Par conséquent, une mensualisation des volumes annuels permet d'observer ces tendances saisonnières.

Les volumes journaliers disponibles (issus des Agences de l'Eau) sont mensualisés et montrent qu'il existe une variabilité saisonnière des volumes de rejets selon les mois de l'année. Un coefficient de répartition par mois a été déterminé pour les volumes de rejets manquants en prenant en compte les variations mensuelles. Le coefficient de mensualisation a été déterminé à partir des volumes moyens mensuels de 311 stations de rejets (Figure 24).

Les lacunes de volumes de rejets des STEU ont été comblées (sur la période de fonctionnement de la station) à partir des données de rejets moyens annuels qui ont été réparties avec le coefficient de mensualisation visible en Figure 24.

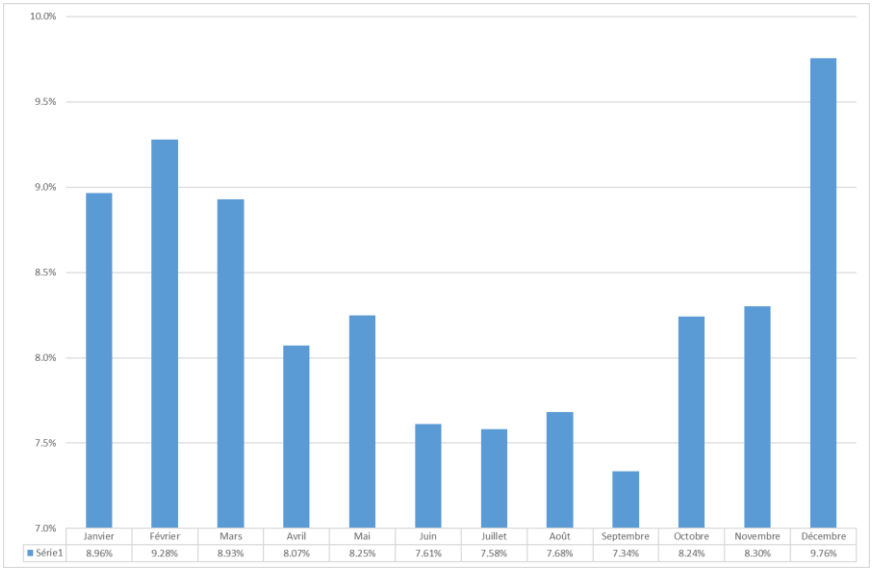



*Figure 24 : Coefficient de mensualisation appliqué aux rejets annuels*

[11] https://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/pages/data/actu.php

On note que ces rejets sont plus importants durant la période hivernale (plus de 9% du volume annuel de Décembre à Mars) et plus faibles durant la période estivale (environ 7,5% du volume annuel de Juin à Septembre).

### 2.3.3 Synthèse des rejets

La connaissance des volumes rejetés apparait comme largement lacunaire au regard des données de prélèvement (en particulier pour les usages industriels). En effet, seule la base de données GEREP a permis de collecter des données de rejets industriels, sur la période 2013-2018.

La Figure 25 montre que les rejets industriels représentent 22% des volumes rejetés totaux contre 78% de rejets collectifs en moyenne.

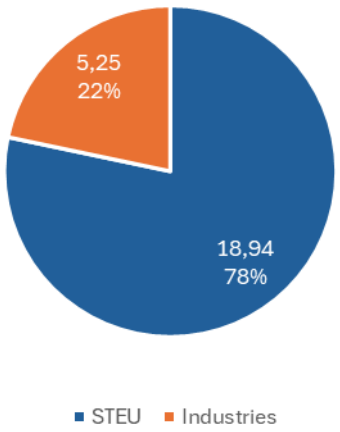



*Figure 25 : Part des rejets entre acteurs, chiffres en Mm³/an*

Dans le détail, les chiffres collectés montrent une grande variabilité annuelle et interannuelle, ce qui pourrait indiquer qu'une partie des eaux rejetées pourrait vraisemblablement provenir, pour partie, d'eaux pluviales (réseaux unitaires, mauvais raccordements, entrées parasites).

**Les rejets sont inférieurs aux volumes annuels prélevés (industriels et AEP) ce qui implique que l'ensemble des volumes rejetés ne passent pas par les STEU ou rejets des collectivités ou industriels. Une partie n'est pas comptabilisée dans le cadre de cet exercice : comme l'assainissement individuel (habitat rural dispersé) par exemple, les pertes des réseaux ou les transferts d'eau entre bassins (volumes non évalués dans le cadre de cette étude).**

Dans le département de l'Orne, les rejets collectifs se font quasi exclusivement dans les eaux de surface (99 %). De leur côté, les rejets industriels (lorsqu'ils ont été collectés) se font en moyenne à 88% dans les eaux superficielles et à 12% par infiltration dans le sol ou le sous-sol.

Ce constat implique que cette répartition a nécessairement un impact quantitatif positif sur le débit des cours d'eau. A l'inverse, la concentration de ces rejets dans les cours d'eau ne permet cependant pas de compenser les prélèvements dans les eaux souterraines.

Par ailleurs, ces derniers peuvent également avoir un impact qualitatif non négligeable sur les milieux, accentué en particulier lors des périodes sèches puisque ces derniers bénéficient alors d'un moindre effet de dilution.

Comparativement parlant, ce sont les bassins versants du bassin Loire-Bretagne, au sud du département de l'Orne, qui possèdent les volumes de rejet les plus importants (Figure 26).

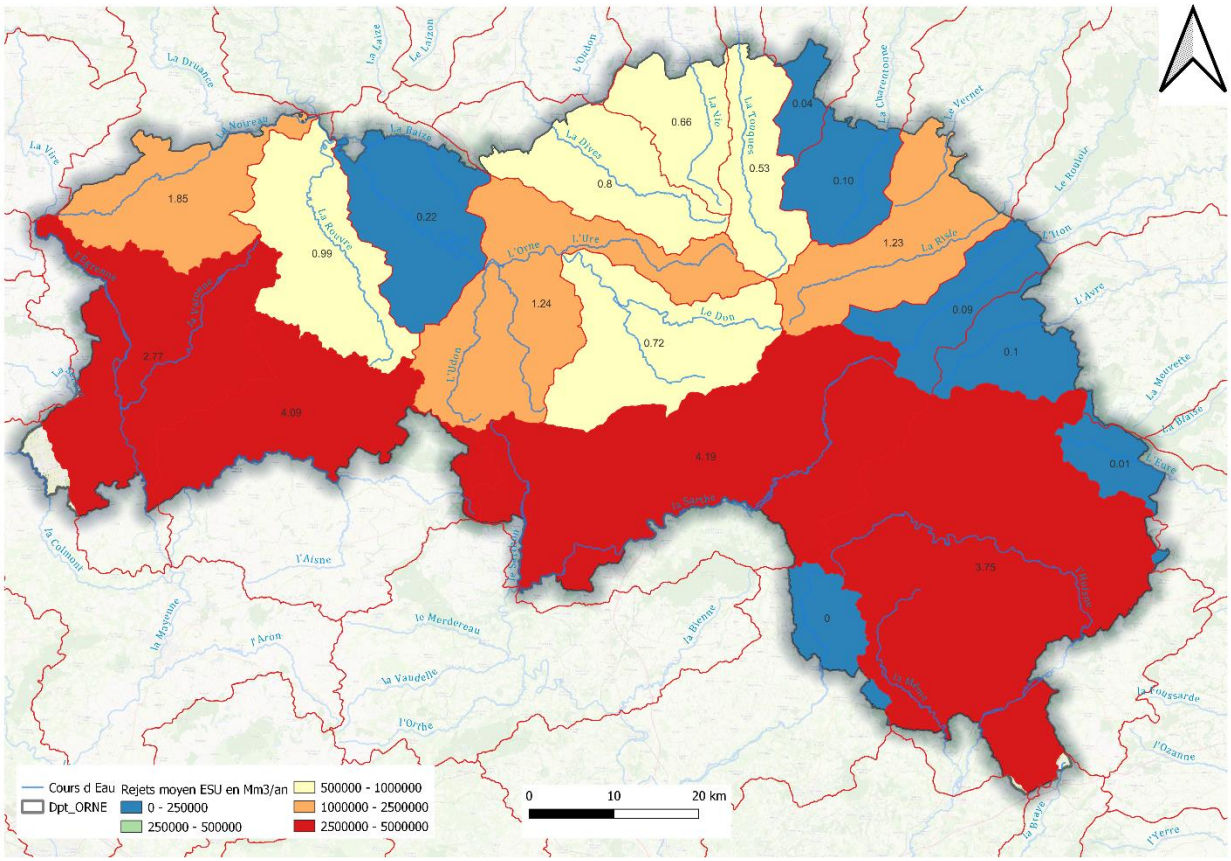



*Figure 26 : Rejets moyens dans les eaux de surface, synthèse à l'échelle des principaux bassins-versants du département de l'Orne*

## 2.5 SYNTHESE GLOBALE DU VOLET PRELEVEMENTS-REJETS

### 2.5.1 Principaux résultats

Les prélèvements pour l'**AEP** sont répartis sur l'ensemble du territoire du département de l'Orne, avec des volumes de prélèvements annuels moyens de l'ordre de 21,2 $Mm^3$ dans l'ensemble.

Les prélèvements **industriels**, peu nombreux sur le département, représenteraient des volumes moyens annuels de l'ordre de 5,7 $Mm^3$.

Concernant les prélèvements pour un usage **agricole**, les estimations réalisées indiquent un prélèvement moyen annuel de l'ordre de 6,4 $Mm^3$.

A l'échelle départementale, les prélèvements sont assez bien partagés entre eaux souterraines et eaux superficielles (majorité pour les eaux souterraines 56%[12]) – (Figure 27). Mais cet équilibre relatif cache de vraies disparités territoriales entre l'Ouest armoricain et l'Est sédimentaire mais également entre le Nord rattaché au bassin Seine-Normandie et le Sud rattaché au bassin Loire-Bretagne. Avec des prélèvements dans les eaux de surface un peu plus importants à l'Ouest et au Sud, comparativement parlant.

| Estimation volumes Dpt Orne en Mm3/an | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Prélèvement (en m3/an)** | | | | |
| | AEP | Industriels | Agricoles | Total |
| Eaux souterraines | 12,15 | 2,96 | 3,69 | 18,80 |
| Eaux de surface | 9,07 | 2,75 | 2,72 | 14,54 |
| **Rejets (en m3/an)** | | | | |
| | STEU | | Industriel | Total |
| Eaux souterraines | 0,19 | | 0,61 | 0,06 |
| Eaux de surface | 18,76 | | 4,64 | 23,39 |

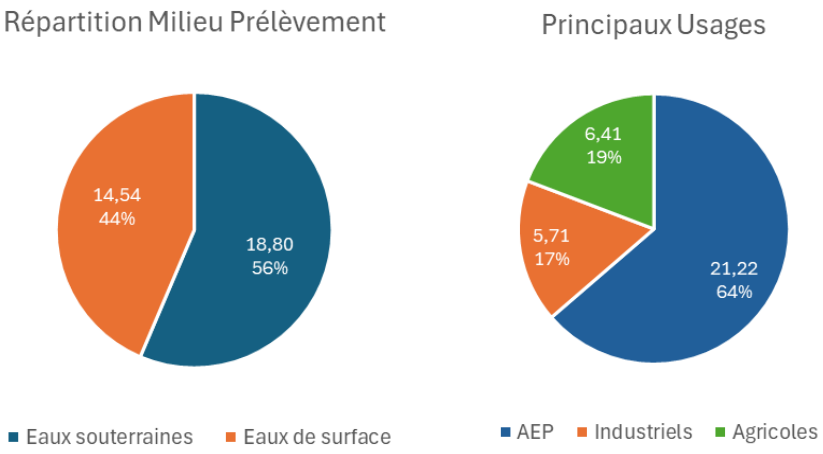



*Figure 27 : Synthèse des principaux usages des eaux à l'échelle du département de l'Orne*

Les rejets sont en grande majorité réalisés en eaux de surface (plus de 99%), principalement par les STEU. Les prélèvements sont réalisés en eaux souterraines et en eaux de surfaces ou sources et ces volumes sont, dans une grande majorité des cas, rejetés en rivières. Le manque

[12] On rappellera que les prélèvements sur les sources sont considérés comme des prélèvements directs dans les eaux de surface.

de données de rejets industriels ne permet pas toutefois d'obtenir des volumes rejetés plus cohérents pour les bilans quantitatifs. C'est donc un élément de connaissance limitant.

**Les bassins versants de l'Orne, la Sarthe, l'Huisne et la Varenne sont les secteurs présentant les ratios volumes prélevés/volumes rejetés les plus défavorables à l'échelle du département, et dans une moindre mesure les bassins versants de l'Iton, de la Rouvre et de la Varenne.**

**À l'inverse, les bassins versants de la Mayenne, du Noireau, de la Dives, de la Risle, de l'Eure, de l'Avre et de l'Orbiquet semblent avoir des ratios plus favorables (Tableau 7).**

| | | Prélèvements 100Km3/an | | | | Rejets 100Km3/an | | | Ratio 100Km3/an | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bassin Versant | Milieu | AEP | Industriels | Agricoles | *Total* | STEU | Industriel | *Total* | ESOU | ESU | Ratio global |
| Avre | Eaux souterraines | 0,0 | 0,4 | 0,7 | *1* | 0,00 | 0,00 | *0* | -1 | | |
| | Eaux de surface | 0,5 | 0,0 | 0,2 | *1* | 0,99 | 0,00 | *1* | | 0 | -1 |
| Charentonne | Eaux souterraines | 4,4 | 0,0 | 0,7 | *5* | 0,28 | 0,00 | *0* | -5 | | |
| | Eaux de surface | 0,0 | 0,0 | 0,2 | *0* | 0,60 | 0,43 | *1* | | 1 | -4 |
| Dives | Eaux souterraines | 0,0 | 0,6 | 1,4 | *2* | 0,00 | 0,03 | *0* | -2 | | |
| | Eaux de surface | 1,7 | 0,0 | 0,3 | *2* | 1,61 | 6,39 | *8* | | 6 | 4 |
| Eure | Eaux souterraines | 1,4 | 0,0 | 0,3 | *2* | 0,01 | 0,00 | *0* | -2 | | |
| | Eaux de surface | 0,0 | 0,0 | 0,1 | *0* | 0,14 | 0,00 | *0* | | 0 | -2 |
| Huisne | Eaux souterraines | 24,5 | 12,1 | 6,5 | *43* | 0,02 | 0,33 | *0* | -43 | | |
| | Eaux de surface | 4,8 | 1,2 | 1,6 | *8* | 27,11 | 10,44 | *38* | | 30 | -13 |
| Iton | Eaux souterraines | 8,4 | 0,0 | 0,5 | *9* | 0,00 | 0,00 | *0* | -9 | | |
| | Eaux de surface | 0,3 | 0,0 | 0,1 | *0* | 0,89 | 0,00 | *1* | | 0 | -8 |
| Mayenne | Eaux souterraines | 6,9 | 5,5 | 3,3 | *16* | 0,07 | 2,17 | *2* | -14 | | |
| | Eaux de surface | 3,5 | 6,1 | 5,0 | *15* | 37,04 | 3,88 | *41* | | 26 | 13 |
| Noireau | Eaux souterraines | 1,6 | 0,2 | 1,7 | *3* | 0,00 | 0,93 | *1* | -1 | | |
| | Eaux de surface | 7,9 | 0,0 | 2,5 | *10* | 18,33 | 0,16 | *18* | | 8 | 6 |
| Orbiquet | Eaux souterraines | 0,0 | 0,0 | 0,4 | *0* | 0,02 | 0,00 | *0* | 0 | | |
| | Eaux de surface | 0,0 | 0,0 | 0,1 | *0* | 0,42 | 0,00 | *0* | | 0 | 0 |
| Orne Amont | Eaux souterraines | 26,5 | 0,0 | 2,5 | *29* | 0,00 | 0,00 | *0* | -29 | | |
| | Eaux de surface | 0,0 | 0,0 | 0,9 | *1* | 5,48 | 1,71 | *7* | | 6 | -23 |
| Orne Aval | Eaux souterraines | 0,0 | 0,0 | 1,4 | *1* | 0,05 | 0,00 | *0* | -1 | | |
| | Eaux de surface | 5,7 | 0,0 | 1,8 | *8* | 2,23 | 0,00 | *2* | | -5 | -7 |
| Orne Moyenne | Eaux souterraines | 9,5 | 0,0 | 2,0 | *11* | 0,49 | 0,03 | *1* | -11 | | |
| | Eaux de surface | 1,1 | 1,0 | 1,5 | *4* | 11,34 | 1,04 | *12* | | 9 | -2 |
| Orne Saosnoise | Eaux souterraines | 2,2 | 0,0 | 0,4 | *3* | 0,00 | 0,11 | *0* | -3 | | |
| | Eaux de surface | 0,0 | 1,3 | 0,1 | *1* | 0,00 | 0,00 | *0* | | -1 | -4 |
| Risle | Eaux souterraines | 9,9 | 1,4 | 1,2 | *13* | 0,00 | 0,03 | *0* | -13 | | |
| | Eaux de surface | 0,5 | 0,0 | 0,3 | *1* | 11,08 | 1,26 | *12* | | 12 | -1 |
| Rouvre | Eaux souterraines | 1,8 | 2,0 | 2,3 | *6* | 0,03 | 1,34 | *1* | -5 | | |
| | Eaux de surface | 6,5 | 1,7 | 3,5 | *12* | 3,20 | 6,67 | *10* | | -2 | -7 |
| Sarthe | Eaux souterraines | 16,4 | 1,1 | 5,2 | *23* | 0,43 | 0,52 | *1* | -22 | | |
| | Eaux de surface | 37,4 | 0,5 | 2,4 | *40* | 38,37 | 3,52 | *42* | | 2 | -20 |
| Touques | Eaux souterraines | 4,0 | 0,0 | 1,2 | *5* | 0,00 | 0,53 | *1* | -5 | | |
| | Eaux de surface | 2,8 | 0,0 | 0,3 | *3* | 4,50 | 0,76 | *5* | | 2 | -2 |
| Varenne | Eaux souterraines | 4,1 | 6,2 | 4,0 | *14* | 0,46 | 0,11 | *1* | -14 | | |
| | Eaux de surface | 7,7 | 15,6 | 6,0 | *29* | 21,13 | 6,60 | *28* | | -2 | -15 |
| Vie | Eaux souterraines | 0,0 | 0,0 | 1,2 | *1* | 0,00 | 0,00 | *0* | -1 | | |
| | Eaux de surface | 10,4 | 0,1 | 0,3 | *11* | 3,12 | 3,51 | *7* | | -4 | -5 |

*Tableau 7 : Synthèse des données de prélèvement-rejet dans le département de l'Orne (Warning : il ne s'agit pas de bilans quantitatifs !)*

### 2.5.2 Comparaison avec les éléments rapportés en bibliographie

Un travail de comparaison a été effectué avec les données quantitatives de prélèvement bibliographiques disponibles au moment de l'étude pour les principaux bassins versants.

Ce travail de synthèse est présenté en Annexe 1.

Dans l'ensemble, **les données compilées ou estimées sont conformes aux éléments présentés dans ce chapitre, sauf sur deux territoires : l'Huisne et l'Iton** où les volumes rapportés en bibliographie apparaissent comme sous-estimés, en particulier pour les usages agricoles.

### 2.5.3 Recommandations techniques pour les besoins d'études volumes prélevables

#### *2.5.3.1 Compléments d'ordres généraux*

Les différentes chroniques compilées (tant pour les prélèvements que pour les rejets) font apparaitre des lacunes dans les données disponibles avant 2007-2008. Celles-ci sont souvent insuffisantes et donc peu fiables.

En conséquence, il est alors nécessaire de retenir des hypothèses pour pouvoir les reconstituer. L'une d'elle a consisté à répartir sur la période 1994-2008, la moyenne des prélèvements de 2009 à 2015, en l'absence de tendance marquée. Si une légère tendance était marquée, alors une régression linéaire a pu être utilisée dans ce cas précis.

Pour fiabiliser les résultats des études quantitatives, il apparait également important de compléter la collecte des éléments suivants, ce qui permettra d'obtenir in fine des bilans quantitatifs plus réalistes :

- Affiner les calculs estimatifs des besoins en eau pour les usages agricoles (abreuvement ou irrigation) en confrontant les différentes hypothèses : prélèvement sur réseau, jours de chaleurs pour l'abreuvement notamment, utilisation du RPG pour l'irrigation, répartition des prélèvements entre milieu souterrain et superficiel (etc…).

  *On rappellera que la méthode de calcul proposée est une estimation qui peut s'écarter des prélèvements réels. Toutefois, la méthodologie déployée, s'appuyant sur les données et connaissances actuelles, apparait comme étant satisfaisante. Celle-ci a de plus été discutée et validée lors de comités techniques et comités de pilotages.*

- Améliorer la connaissance des volumes prélevés et rejetés pour un usage industriel.

  *On rappelle également que les données de rejets industriels sont parcellaires. Un suivi annuel voire mensuel des rejets industriels permettrait d'obtenir des informations plus réalistes sur les volumes restitués aux milieux.*

- Pour améliorer la balance des bilans, il apparait également nécessaire de proposer une estimation des volumes rejetés issus de l'assainissement non collectif ainsi qu'un décompte des pertes issues des réseaux d'AEP, ainsi qu'une identification des transferts d'eau entre bassins (exemple la Dives où il existe très peu de points de prélèvements AEP), car ces volumes vont également impacter la part d'eau restituée dans les milieux.

- Pour permettre l'intégration de ces données dans les outils d'aide à la décision ou d'anticipation permettant l'évaluation et la gestion des tension saisonnières, d'estimation des effets du changement climatique sur les ressources en eau**, il apparait**

**indispensable de disposer, autant que possible, de suivi des volumes prélevés/rejetés mensuels voire journaliers (pour l'ensemble des usages)**.

D'autres pistes d'amélioration peuvent être envisagées comme par exemple : l'estimation des prélèvements inférieurs à 7 000 $m^3$/an (dont volumes particuliers, non recensés par les agences de l'eau et les DDT), l'estimation encore des volumes évaporés des cours d'eau et plans d'eau, qui sont des éléments qui peuvent venir accentuer les chiffres présentés dans cette étude.

Enfin, il va sans dire que l'ensemble des données collectées et traitées doivent être bancarisées et mises à disposition du plus grand nombre, notamment au travers des plateformes nationales BNPE (interbassins) qui facilitent leur diffusion.

#### *2.5.3.2 Compléments sur le recensement des ouvrages de prélèvement des eaux souterraines et l'ajout d'informations sur les aquifères captés*

Pour les besoins d'études quantitatives de type EVP ou HMUC, il est important de rapporter les informations de volume prélevé ou rejeté au point d'eau, notamment pour mieux apprécier l'impact des prélèvements sur les ressources en eau, mais aussi pour reconstituer les chroniques de niveaux et débits désinfluencés.

Nous l'avons indiqué en introduction de ce chapitre, un effort important a été fait pour distinguer le milieu de prélèvement entre eaux souterraines et eaux superficielles. Dans le cas d'études type EVP, des efforts supplémentaires seront à faire pour préciser le type de ressource souterraine utilisée : nappe profonde ou superficielle ou alluviale et le type de lithologie exploitée dans le cas de nappes superposées (nappe de la craie ou de l'Oxfordien par exemple dans le bassin de l'Huisne).

Ces informations sont cruciales à obtenir, en particulier pour les modèles maillés, car elles peuvent contribuer à préciser l'impact des prélèvements sur le fonctionnement hydrologique des bassins : évaluation des impacts directs ou indirects sur la recharge des nappes et le débit des cours d'eau, évaluation des flux de drainance entre les eaux superficielles et souterraines. A noter : le choix fait dans l'étude Sarthe Amont de considérer l'ensemble des prélèvements réalisés dans certaines nappes libres comme ayant une incidence directe sur le débit des cours d'eau (Suez, 2022).

À l'échelle du département, 365 points de prélèvements sont dénombrés sur le département de l'Orne, dont 220 points de prélèvements en eaux souterraines et 145 en eaux de surface. Une majorité de ces prélèvements sont utilisés pour **l'alimentation en eau potable** (234 points de prélèvements AEP dont 134 en eaux souterraines et 100 en eaux de surface), alors que les points de prélèvements **industriels** et **agricoles** sont minoritaires (Tableau 8).

| | Type | Usage | Nombre d'ouvrage |
|---|---|---|---|
| Prélèvement | Eau souterraine | AEP | 134 |
| | | Industriel | 61 |
| | | Agricole | 25 |
| | Eau de surface | AEP | 100 |
| | | Industriel | 18 |
| | | Agricole | 27 |

*Tableau 8 : Nombre de points de prélèvements recensés par usage en 2018*

D'après les données disponibles, seuls 52 ouvrages/points de prélèvements agricoles seraient répertoriés, dont 25 en eaux souterraines et 27 en eaux superficielles pour l'ensemble du département. Cette donnée apparait peu réaliste au regard de l'occupation des sols du département.

Le nombre de points de prélèvements agricoles semble sous représenté, ce qui a été mis en avant dans l'état des lieux de certains SAGE, comme sur celui de l'Orne amont où un recensement aurait permis d'identifier pas loin de 517 ouvrages de prélèvements potentiels, représentant une densité de 0,5 point par km², parmi lesquels une grande majorité relèverait d'usages agricoles (Persello, 2008).

**La question du recensement des ouvrages et de la vérification de leur localisation apparait donc également être un enjeu pour les besoins des études quantitatives (rattachement des volumes d'eaux souterraines prélevées à leur aquifère et répartition des volumes prélevés entre ces ouvrages).**

# 3 Analyse préliminaire des chroniques piézométriques et hydrologiques disponibles pour les besoins des modèles

## 3.1 OBJECTIFS

L'objectif ce volet est de pouvoir qualifier la dynamique d'évolution des niveaux des différents piézomètres du département de l'Orne, en complément des analyses réalisées dans la phase 1, notamment dans le volet des connaissances hydrogéologiques (Rapport RP-69331-FR).

Ce travail vise à mettre en avant, à l'échelle des bassins versants du département de l'Orne, les différences de dynamiques entre des cours d'eau et piézomètres de suivi pour évaluer leur représentativité, en particulier pour pouvoir les utiliser dans les outils de modélisation ou dans le cadre d'études visant à une meilleure gestion territoriale des ressources en eau. Elle cherche aussi à évaluer la diversité du territoire dans sa résilience aux sècheresses en lien avec les aquifères du territoire, ce qui peut ouvrir la voie à des objectifs futurs à une étude départementale de la résilience de ces ressources aux sécheresses et de leur évolution future en contexte de réchauffement global (changement climatique).

Ces éléments ont été appréhendés au travers de l'analyse statistique des chroniques piézométriques ou débit de cours d'eau disponibles. Les analyses ont été réalisées notamment au travers d'une normalisation des données par leurs écarts aux normales afin de pouvoir comparer des données de différents types sur des référentiels similaires.

## 3.2 METHODOLOGIE

### 3.2.1 Données disponibles

L'analyse réalisée s'est appuyée sur les chroniques piézométriques provenant de 46 points de mesures et sur les débits des cours d'eau provenant de 53 stations hydrométriques[13] situées sur le territoire du département de l'Orne (Figure 28).

[13] Données des services hydrométriques des DREAL Normandie et Pays de Loire, disponibles sur l'hydroportail

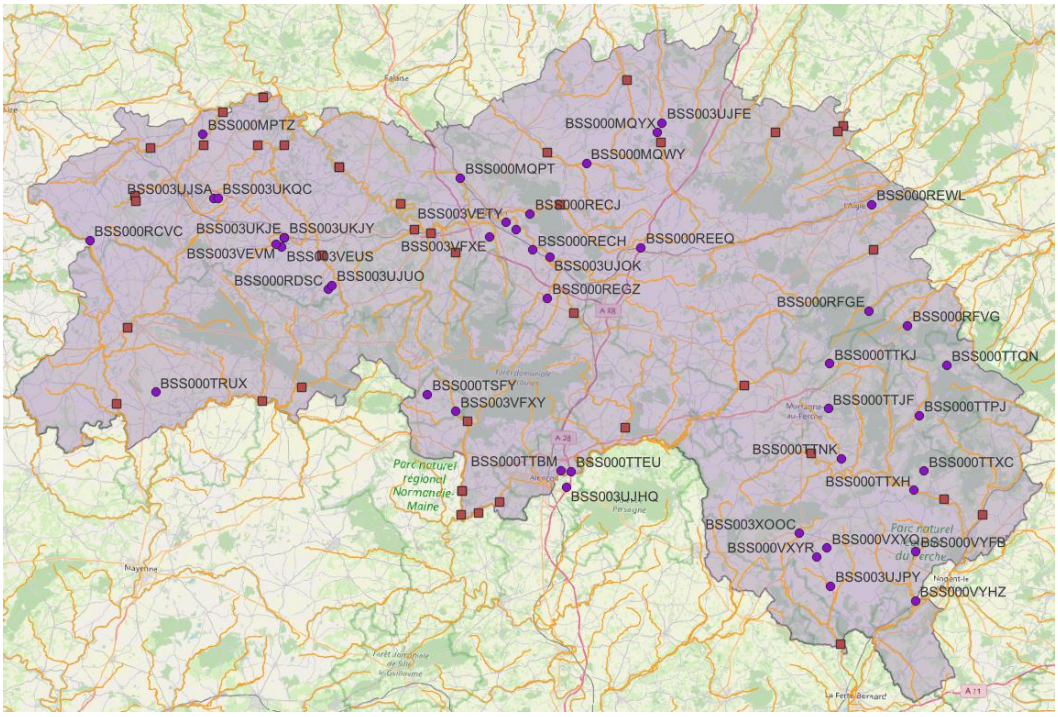



*Figure 28 : Carte des piézomètres (pts bleus) et stations hydrométriques (carrés rouges) utilisés dans ce volet pour l'analyse statistique*

Les périodes de mesures entre les stations ne sont pas homogènes. Certaines stations ont été mises en service tardivement et d'autres ont été arrêtées. Pour recréer des séries temporelles à long terme, l'ensemble des données a été utilisé.

### 3.2.2 Regroupement par similarités statistiques (clustering)

On rappellera en préambule qu'une analyse préliminaire des données disponibles a été faite.

Le BRGM a développé dans le cadre du programme MATUREAU (Maturation de codes scientifiques R de traitement de données liées à l'Eau) – (Laurencelle M., et Lohier T., 2024), à l'aide de scripts R, un outil d'analyse de « chroniques piézométriques » (séries temporelles de niveaux d'eau souterraine) incluant un module de corrélation statistique et clustering de ces séries temporelles.

Cet outil permet d'abord d'extraire et prétraiter les données de niveaux d'eau de N piézomètres issus d'ADES (la base de données nationale française sur les eaux souterraines, gérée par le BRGM) et/ou d'autres sources de données (ex. fichiers locaux) au besoin.

Dans le cas du département de l'Orne, un filtrage a été fait sur une liste étendue de piézomètres situés dans le département et son pourtour[14], en fonction du nombre de données et de la durée de suivi, de manière à pouvoir disposer d'un nombre de données suffisamment représentatives. In fine ce sont 51 (46+5) ouvrages qui ont pu être analysés pour ce besoin (Figure 29).

[14] Données du réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du syndicat départemental de l'eau de l'Orne (SDE61) et du réseau patrimonial national de suivi quantitatif des eaux souterraines de la région Normandie et de la région Pays de Loire opérés par le BRGM, disponibles sur le portail ADES

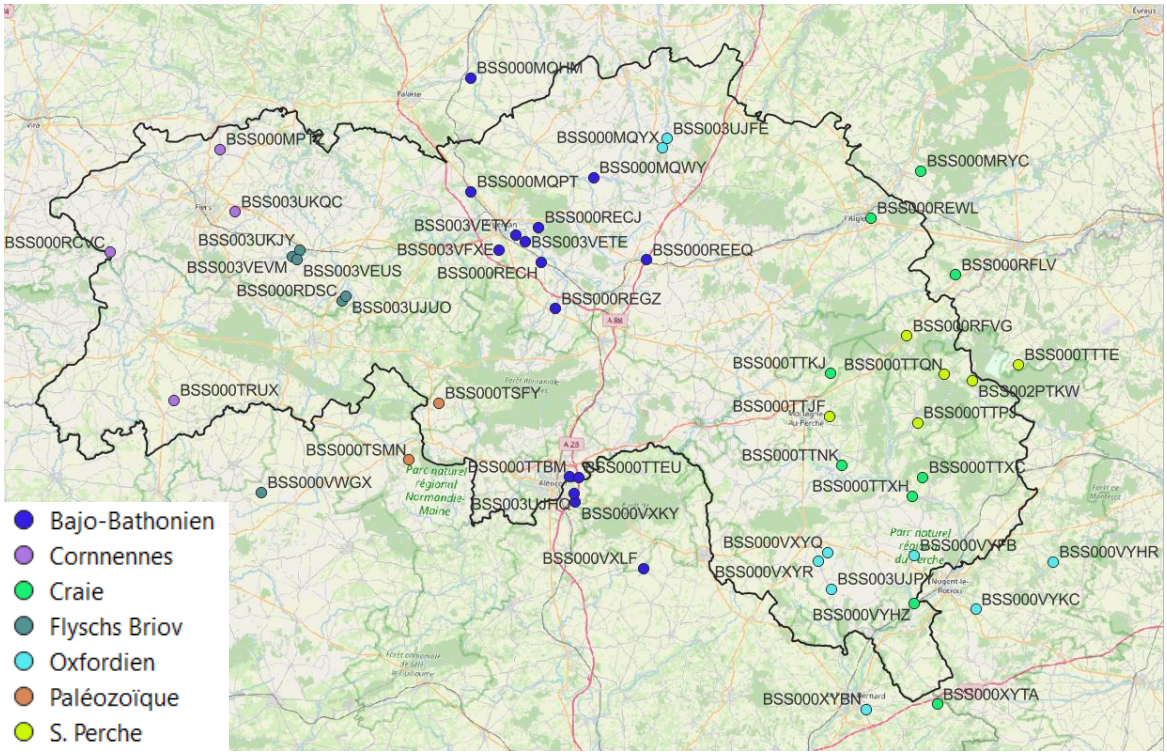



*Figure 29 : Carte des 51 Piézomètres utilisés pour l'analyse statistique des principaux aquifères suivis (source : SDE61 – BRGM)*

A noter : les piézomètres BSS003VFXY, BSS003UJOK, BSS003UKJE, BSS003UKJY, BSS003UJSA et BSS003XOOC ont ainsi été exclus car ils possédaient un nombre de données ou une durée de suivi insuffisante (Durée de chronique suffisante = minimum 5 années).

Ensuite, le regroupement des chroniques de niveaux d'eau (individus) s'est fait avec la fonction *pam* de la librairie cluster de R qui met en œuvre l'algorithme des k-médoïdes, préféré par rapport aux *k-means* car jugé plus robuste face aux bruits et aux valeurs aberrantes. La dissimilarité entre individus est évaluée via deux mesures de distances : i) une distance « statistique » basée sur la corrélation entre séries A et B : d = 1 – r(A,B) ; ii) une distance « géographique » (optionnelle, non appliquée dans le cas présent) entre les points A et B.

L'utilisateur peut choisir le type de corrélation calculée (linéaire classique de Pearson ; de rang, non paramétrique, de Kendall) et contraindre le nombre de clusters.

L'outil exporte un tableau de résultats (avec le numéro de cluster attribué à chaque individu et plusieurs indicateurs renseignant sur la qualité du clustering) ainsi que des résultats visuels détaillés (par cluster) et globaux (carte, matrice de graphiques).

### 3.2.3 Dynamique des chroniques

Les données utilisées ont été prétraitées en éliminant les points aberrants et, dans le cas de périodes courtes d'absence de données, les points manquants ont été interpolés par interpolation linéaire.

L'analyse de la dynamique a été effectuée au travers de l'analyse d'anomalies normalisées. La procédure utilisée est inspirée de celle présentée par Boutt, 2018; Weider and Boutt, 2010. Ces anomalies sont calculées suivant l'équation suivante :

$$A_i = \frac{m_i - \overline{m}}{\sigma_m}$$

Avec $m_i$ la valeur moyenne mensuelle, $\overline{m}$ la moyenne de ce mois sur l'ensemble de la série et $\sigma_m$ l'écart type de cette dernière moyenne. Une moyenne mobile sur 12 mois est ensuite appliquée sur les anomalies mensuelles *Ai*. Cette technique atténue les fluctuations court terme et accentue les fluctuations long terme. Cette normalisation permet de comparer entre elles les données d'un type différent pour comparer leurs tendances relatives. Si *Ai* < 0, cela indique que les valeurs du paramètre sont inférieures aux normales, alors que si *Ai* > 0, les valeurs sont supérieures. Ainsi, pour les ressources en eau, les anomalies négatives représentent les périodes de basses eaux et les anomalies positives, les périodes humides.

Un exemple de calcul d'anomalie est présenté sur la Figure 30 avec le signal brut en haut ; en bas les anomalies mensuelles (en noir) et leur lissage sur 12 mois (en rouge). Les moyennes des différentes données (anomalies lissées) sont ensuite comparées qualitativement pour les sites.

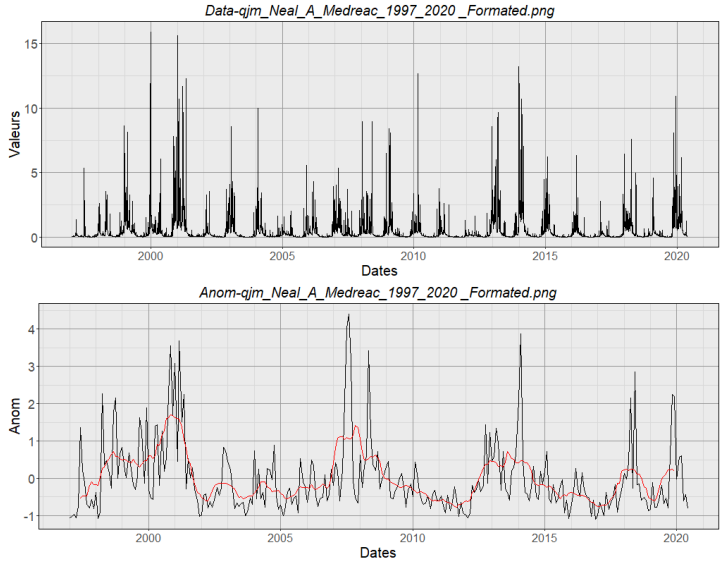



*Figure 30 : Décomposition des chroniques de débit du Néal à Médréac en Ille et Vilaine (J0626610) avec en haut les données brutes journalières (en m³/s) et en bas les anomalies mensuelles (en noir) et anomalies lissées sur 12 mois (en rouge).*

Les variations climatiques (précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP)) sont les entrées de l'hydrologie et hydrogéologie de la région. Ces variations climatiques sont ensuite modulées au travers du ruissellement, des sols, des cours d'eau et des aquifères. Lors de leur transition d'un compartiment hydrologique à un autre, ces variations sont bien souvent atténuées par le sol et le milieu souterrain et décalées dans le temps. Ces éléments ont été illustrés par Van Loon, (2015) sur la Figure 31. Ces décalages temporels et leurs atténuations sont des indicateurs de la capacité du milieu à faire face à des variations climatiques courtes et intenses ou à emmagasiner des tendances d'évolution plus longues et continues. Dans cette étude, les comparaisons seront réalisées entre le débit des cours d'eau et les niveaux piézométriques.

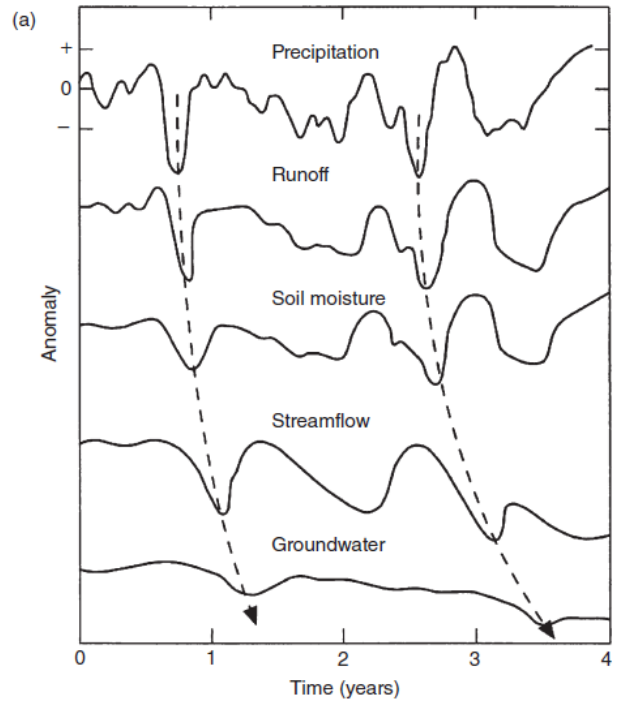



*Figure 31 : Propagation des anomalies de précipitations dans le cycle hydrologique (de haut en bas : Précipitations, ruissellement, humidité du sol, débit des cours d'eau et niveaux piézométriques). Extrait de Van Loon, 2015*

## 3.3 RESULTATS

### 3.3.1 Similitude des chroniques et proposition de clustering

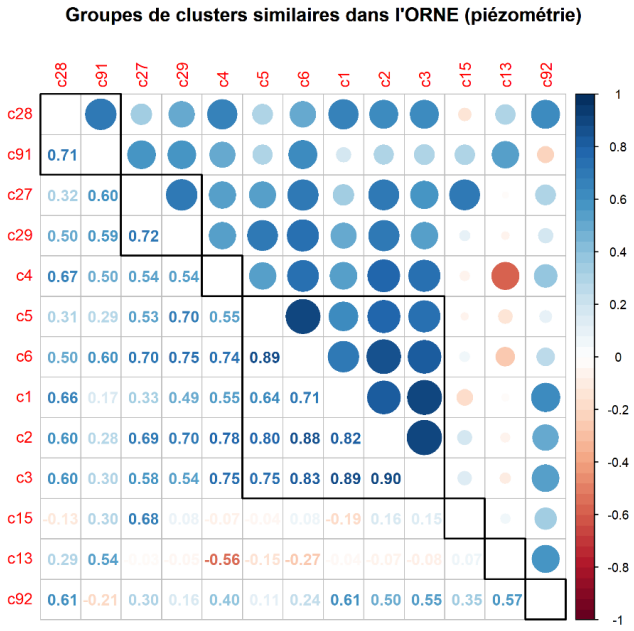



*Figure 32 : Matrice de corrélation des différents groupes de clusters*

L'ensemble des chroniques piézométriques sont comparées entre elles (corrélation linéaire), jusqu'à définir des groupes (*clusters*) pour lesquels la corrélation est la meilleure. La matrice de corrélation entre groupes (Figure 33) permet d'en distinguer 6 principaux, numérotés C1 à C6. A noter : le groupe C4 se situe un peu à part du groupe principal (intègre le Pz d'Almenêches, influencé par des prélèvements proches).

Elle permet également de mettre en évidence des *outliers* (C13, C15, C27, C228, C29, C92), n'appartenant donc pas aux groupes principaux.

A noter enfin que les *outliers* correspondent vraisemblablement à des ouvrages influencés par des pompages, ou des ouvrages qui se situent dans une configuration de type nappe captive à semi-captive (cf. rapport BRGM/RP-69331-FR). On fait donc l'hypothèse que l'opération de clustering a permis de regrouper dans le groupe dit « principal » les ouvrages en situation de nappe libre.

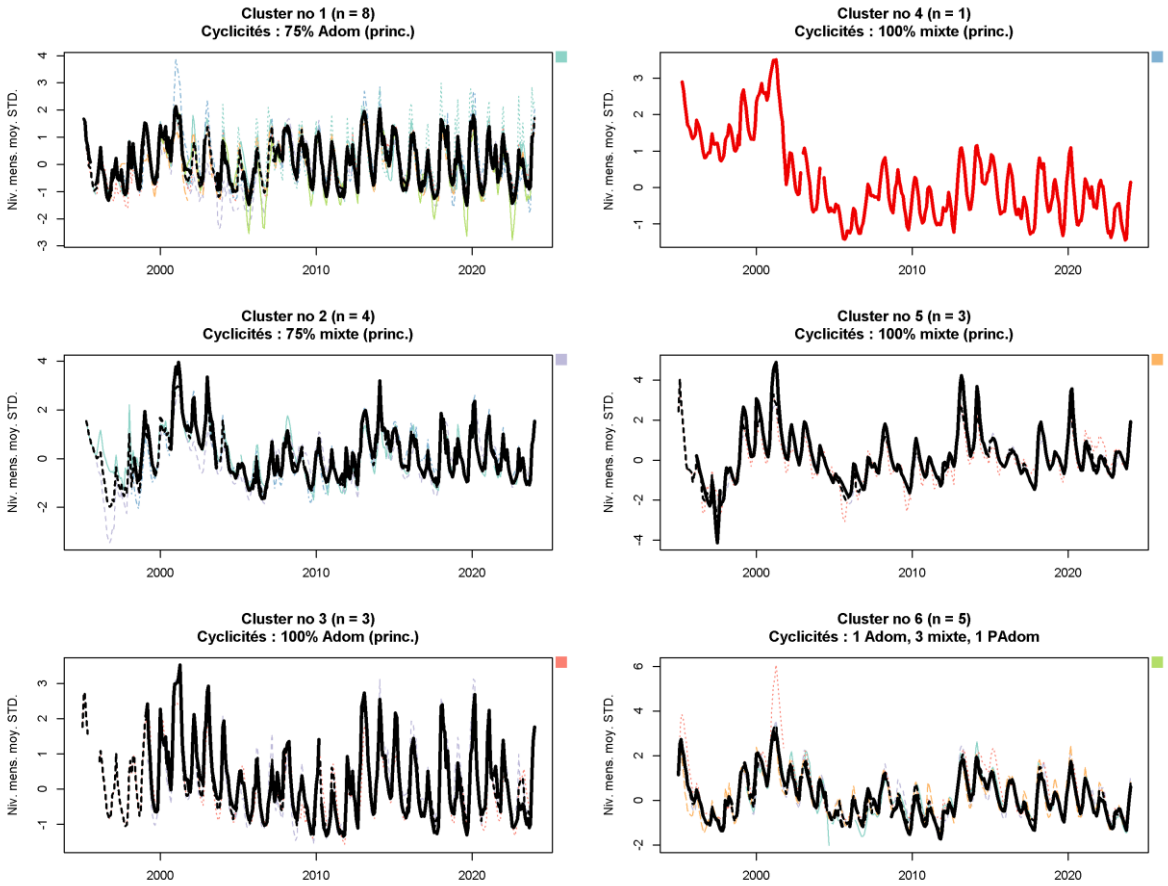



*Figure 33 : Ecart à la moyenne des chroniques au pas de temps mensuel des 6 clusters principaux et analyse de la cyclicité des chroniques (Adom = cycle annuel dominant, PAdom = cylces pluri-annuels dominants, mixte = superposition des cycles annuels et pluri-annuels).*

La carte du regroupement des ouvrages est proposée en page suivante (Figure 34).

Le cluster N°1, le plus important en nombre d'ouvrages, semble correspondre au fonctionnement des ouvrages situés à l'ouest du département, en domaine de socle armoricain ou implantés dans des aquifères sédimentaires peu épais (parfois en situation discordante sur les formations de socle).

Le cluster N°2 pourrait concerner des ouvrages du domaine sédimentaire et de socle disposant d'une épaisseur mouillée importante, et pourrait être influencé par les interactions avec les eaux de surface ou leur position en vallée.

Le cluster N°3 pourrait être influencé par la présence de nappes perchées ou isolées dans des aquifères peu étendus des formations jurassiques.

Le cluster N°5 semblerait correspondre à des situations de nappes sédimentaires calcaires vraisemblablement fissurées ou karstiques (principalement).

Le cluster N°6 semblerait être caractéristique de la nappe de la craie, quelle que soit sa situation géographique.

Les cluster 5 et 6 se retrouvent donc uniquement à l'est du département, en domaine sédimentaire (Bassin Parisien).

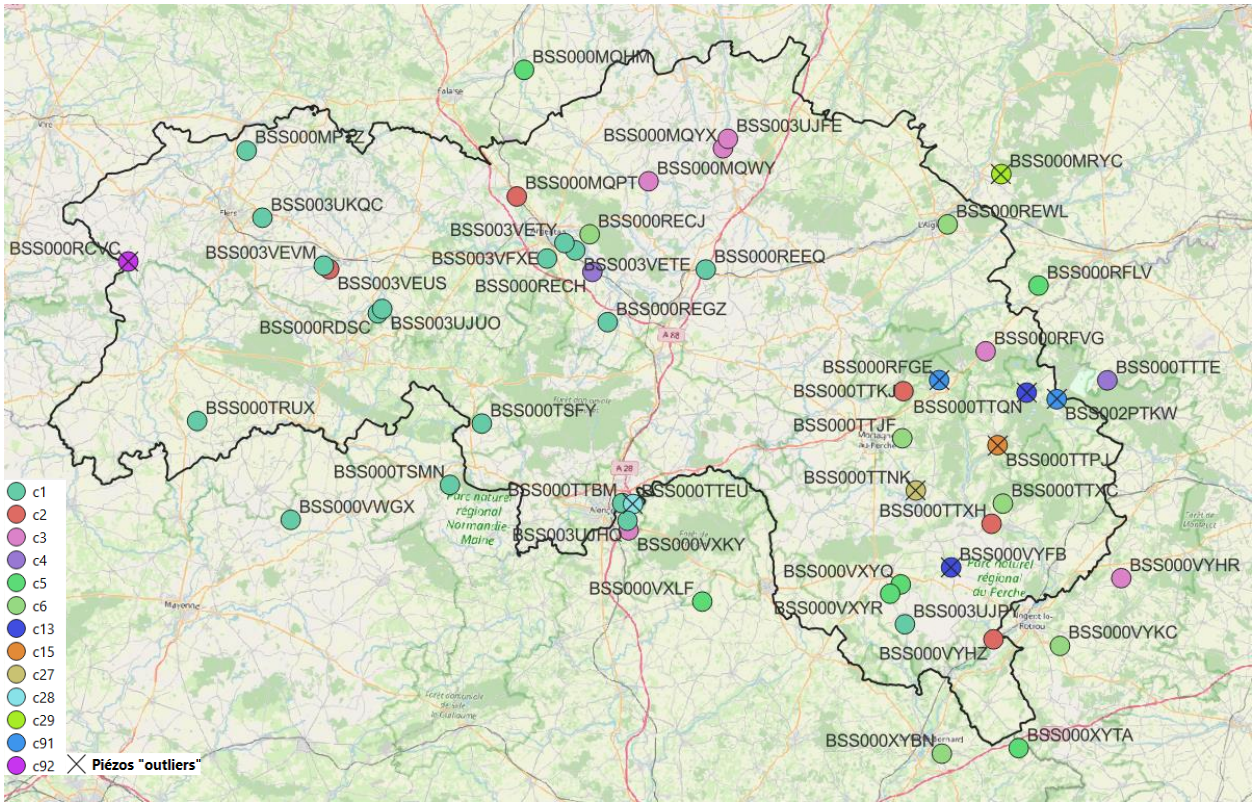



*Figure 34 : Carte du clustering final de 51 piézomètres, département de l'Orne*

Dans le cas présent, l'influence des facteurs lithologiques, structuraux (proximité faille), géomorphologiques, hydroclimatiques n'a pas été analysée spécifiquement à l'aide de cet outil. L'évaluation proposée ci-dessus n'est donc donnée qu'à titre indicative.

Dans les paragraphes ci-dessous, nous allons explorer l'influence des facteurs géographiques et géologiques sur la piézométrie et le débit des cours d'eau, qui peuvent donc influencer possiblement la dynamique d'évolution des niveaux piézométriques au cours du temps.

### *3.3.1.1 Influence de la position géographique (hydroclimatique)*

Pour évaluer l'influence générale de la géologie et/ou du climat, les écarts aux normales lissées ont été calculées pour chaque chronique, individuellement à la fois pour les piézomètres Figure 35) et les cours d'eau (Figure 36).

Les différentes chroniques ont ensuite été classées d'est en ouest par leur coordonnées géographiques (Lambert 93) avec sur les illustrations suivantes l'ouest en bleu et l'est en rouge. Un gradient est observable montrant une organisation spatiale dans les chroniques collectées à l'échelle du territoire : les écarts aux normales observés sur la partie est semblent globalement retardés par rapport à la partie ouest. Cette composante semble être l'un des facteurs mis en avant dans le clustering C1.

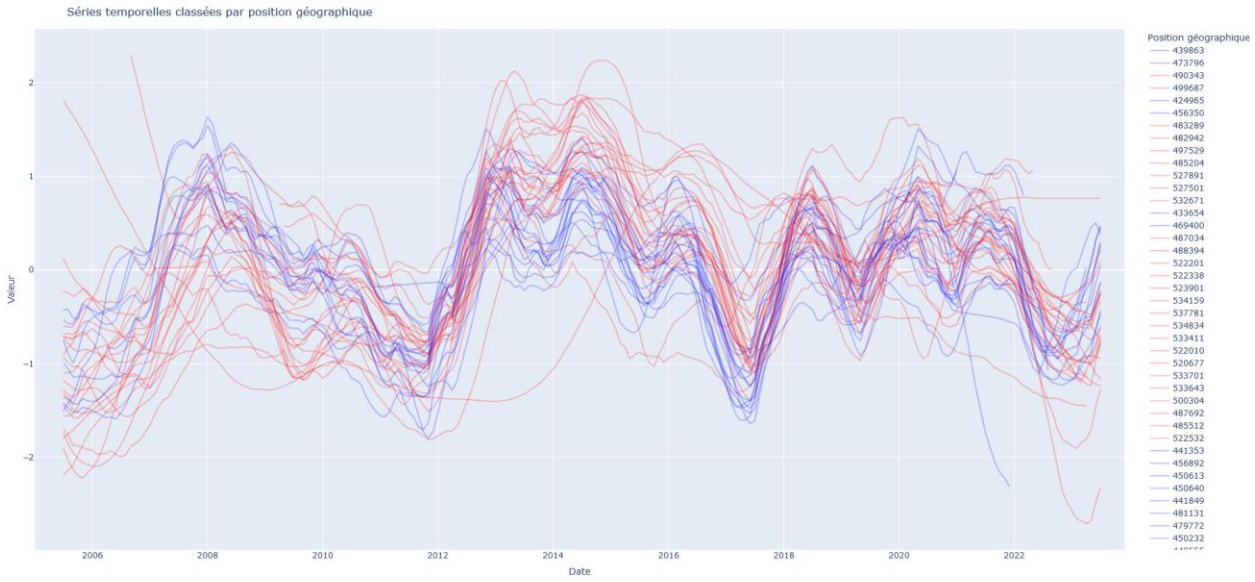



*Figure 35 : Ecarts aux normales des séries piézométriques classées par leur position géographique (du bleu au rouge d'ouest en est)*

Ce gradient est/ouest est aussi visible sur les débits des cours d'eau avec des écarts relatifs aux normales plus larges sur les séries temporelles situées à l'ouest que celles de l'est (Figure 36). Les différences semblent plus marquées sur les évènements récents 2000-2024 que sur les évènements anciens (1970-2000). Les minimas des écarts apparaissent généralement plus tôt à l'Ouest qu'à l'Est du département. Un zoom est proposé sur la Figure 37. Cette différence de quelques mois pourrait être reliée à la différence d'inertie des aquifères et la contribution aux eaux de surfaces par ceux-ci, ce qui semble indiquer une moindre sensibilité des aquifères de l'Est du département aux variations hydroclimatiques.

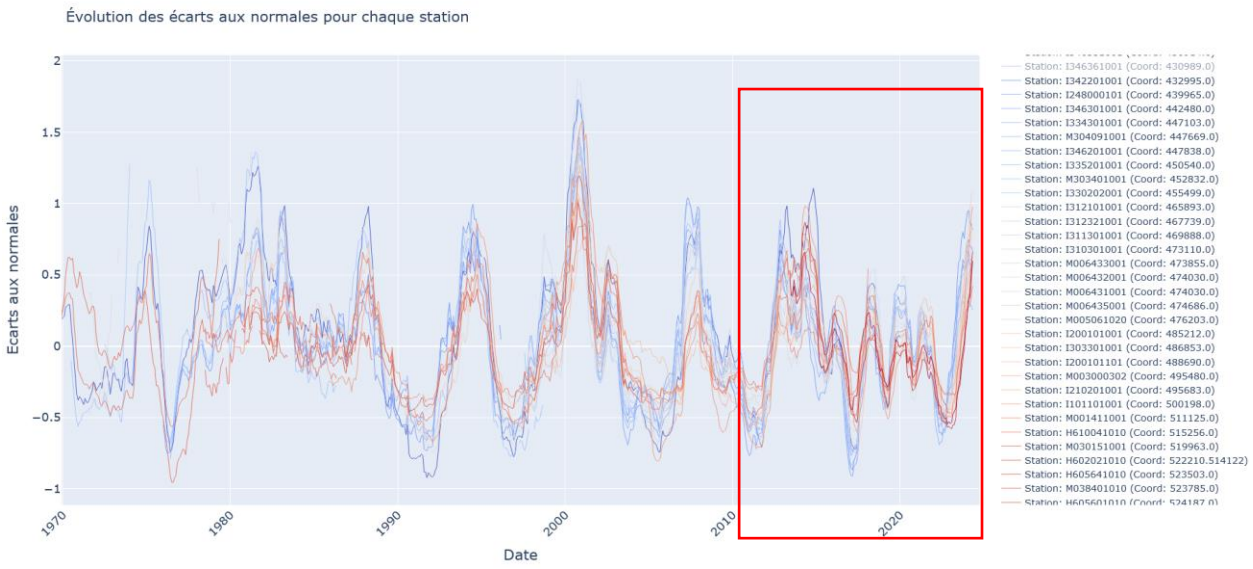



*Figure 36 : Ecarts aux normales des chroniques de débits classées par leurs positions géographiques (du bleu au rouge d'ouest en est). Le rectangle rouge illustre la partie représentée Figure 37*

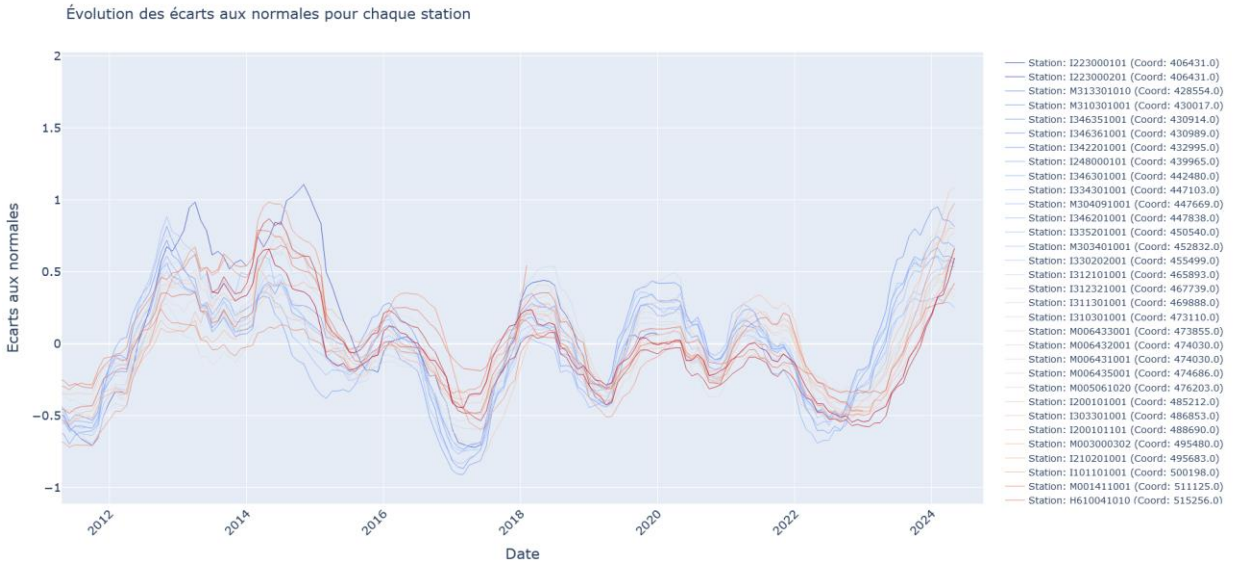



*Figure 37 : Ecarts aux normales des chroniques de débits classées par leurs positions géographiques (du bleu au rouge d'ouest en est) – Zoom sur la période 2012-2024*

### *3.3.1.2 Lien avec la géologie*

Un facteur explicatif des différences observées sur les écarts aux normales, en fonction de la position géographique, pouvant être la géologie, les chroniques d'écarts aux normales ont été classées selon ce critère (Figure 38).

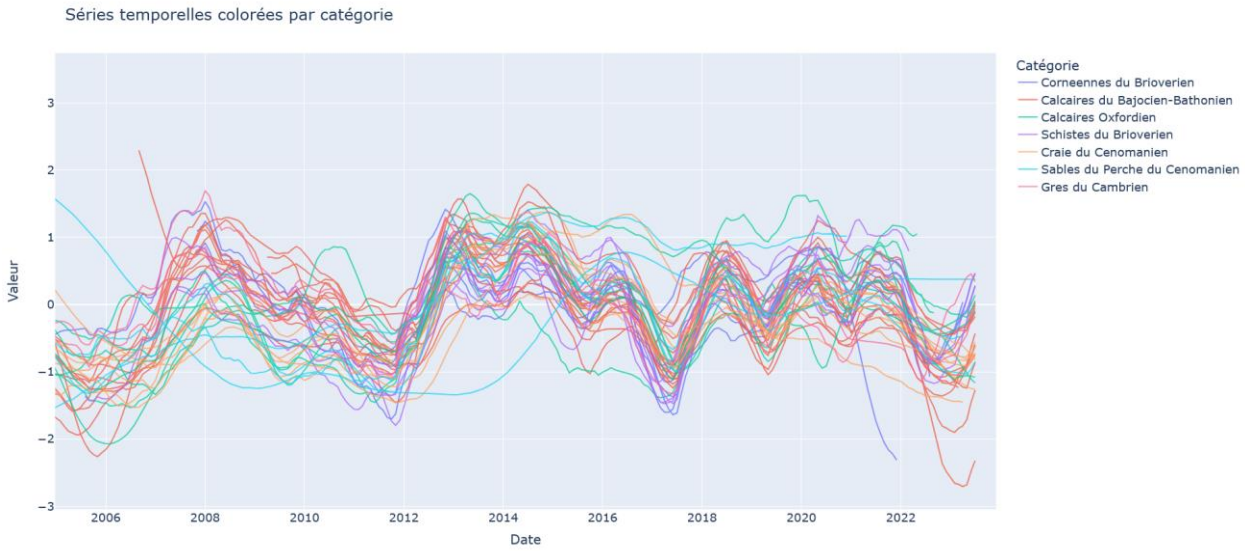



*Figure 38 : Ecarts aux normales des chroniques de niveaux piézométriques classées par géologie*

Ces regroupements montrent une certaine hétérogénéité des dynamiques au sein des aquifères, et des groupes ne montrent pas de résultats clairement définis. Cependant, certaines tendances sont observables. On observe notamment en 2017 une baisse plus rapide et plus marquée pour les schistes du Briovérien et les cornéennes (courbes violettes et bleues foncées).

Afin de clarifier les résultats, les figures suivantes présentent les mêmes résultats par sélection de catégories. Avec les éléments les plus réactifs (Figure 39) et les plus inertiels (Figure 40).

Les éléments les plus réactifs sont les cornéennes et les schistes briovériens ainsi que les calcaires Bajociens (Figure 39). En relatif par rapport à leurs normales, les baisses de 2011 et 2017 sont plus importantes dans les schistes que celles de 2019 et 2022 qui sont peu marquées. Pour les calcaires bajociens, les écarts aux normales sont plus importants en 2022.

Pour les éléments plus inertiels (craie et sables du Cénomanien), on observe une tendance à la baisse par rapport aux normales qui se poursuit depuis 2020 (Figure 40). Dans les calcaires, l'amplitude de la vidange estivale de 2022 est relativement plus marquée.

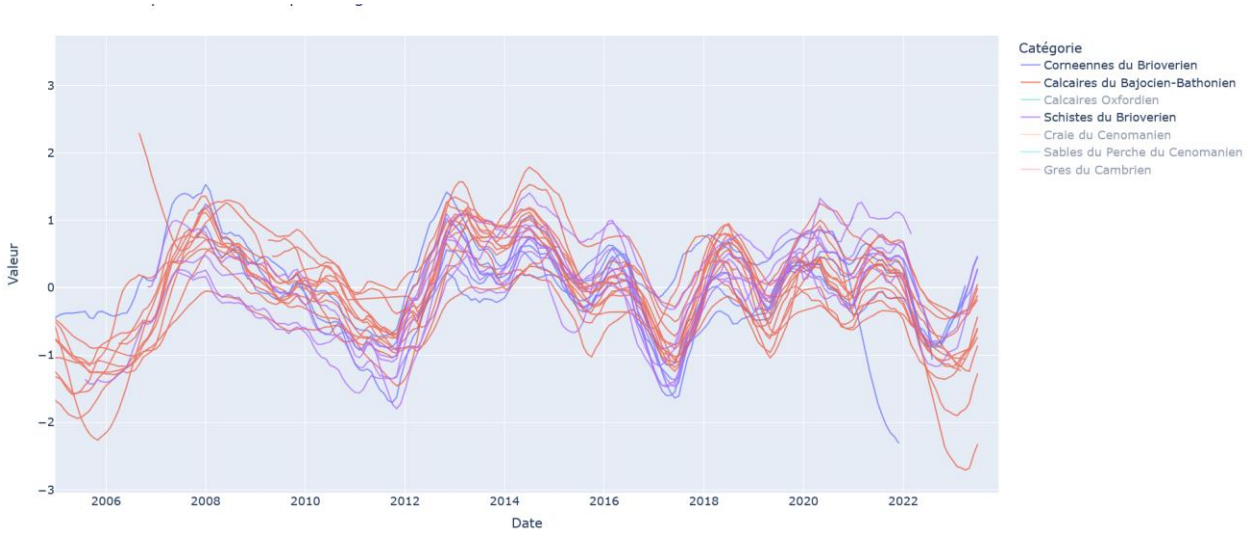



*Figure 39 : Ecarts aux normales des chroniques de niveaux piézométriques classées par géologie (Cornéennes du Briovérien, Schistes du Briovérien et Calcaires du Bajocien-Bathonien)*




*Figure 40 : Ecarts aux normales des chroniques de niveaux piézométriques classées par géologie (Craie du Cénomanien et Sables du Perche du Cénomanien)*

La comparaison a été faite aussi sur les cours d'eau. La figure représentant l'ensemble des chroniques est présentée en Annexe 3. Pour des raisons de lisibilité, seuls deux cours d'eau sont présentés ici (Figure 41), l'Huisne et la Varenne représentant respectivement les domaines sédimentaires et armoricains du département de l'Orne.

On constate que l'amplitude des variations et les baisses sont plus précoces et plus importantes sur le bassin de la Varenne. Ceci montre une plus grande connexion et réactivité aux cycles climatiques alors que la plus faible amplitude et le décalage temporel indiquent un effet tampon plus important sur le bassin de l'Huisne (effet inertiel).

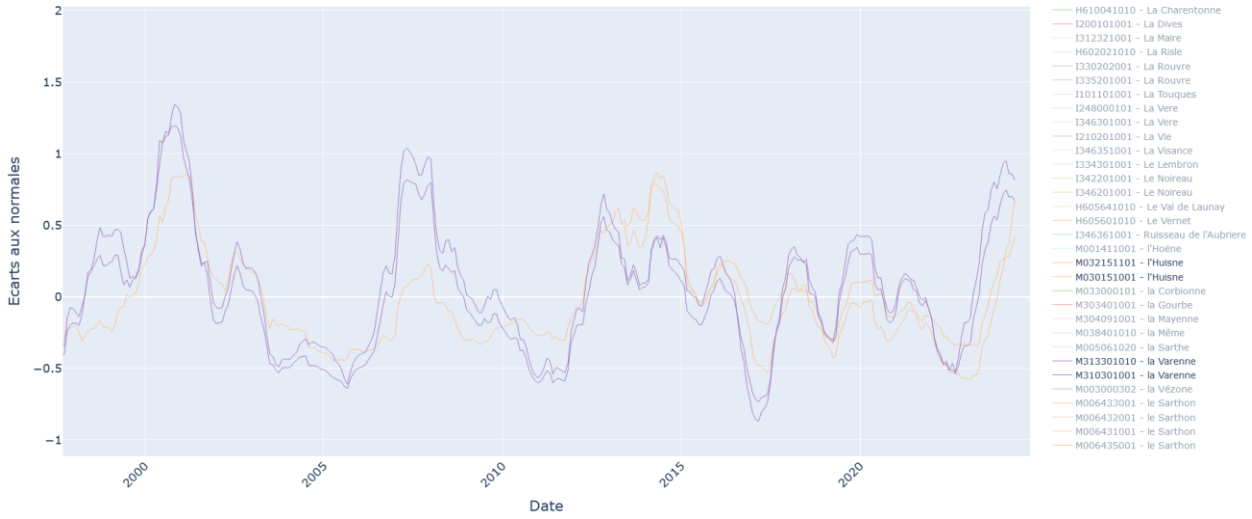



*Figure 41 : Ecarts aux normales des chroniques de débits de cours d'eau pour l'Huisne et la Varenne*

### 3.3.2 Dynamique des débits (eaux de surface) et niveaux piézométriques (eaux souterraines) à l'échelle des bassins versants

Les analyses réalisées mettent en avant des différences de dynamiques des aquifères et le lien avec les cours d'eau à l'échelle du département : l'Ouest du département présente des cycles plus rapides et plus marqués que l'est, ce qui s'explique par la géologie avec des aquifères de socle à l'Ouest et des aquifères sédimentaires à l'Est. Ces différences observées sur les dynamiques des aquifères restent visibles sur les débits des cours d'eau même si, en raison de l'influence des écoulements rapides liés au ruissellement, la part provenant des aquifères est atténuée.

Pour aller plus loin, une comparaison des dynamiques des eaux de surface et souterraines a été réalisée à l'échelle des bassins versants. Les chroniques ont été comparées sur la période 2005-2024 afin d'homogénéiser les durées des chroniques et éviter les biais liés à des périodes de mesures différentes dans le calcul des statistiques.

#### *3.3.2.1 Evolution à l'échelle interannuelle*

Les écarts aux normales mensuelles sont calculés puis lissés sur une période de 12 mois afin de représenter les grandes tendances d'évolution en éliminant les cycles saisonniers. Un exemple sur un piézomètre est fourni sur la Figure 42 page suivante.

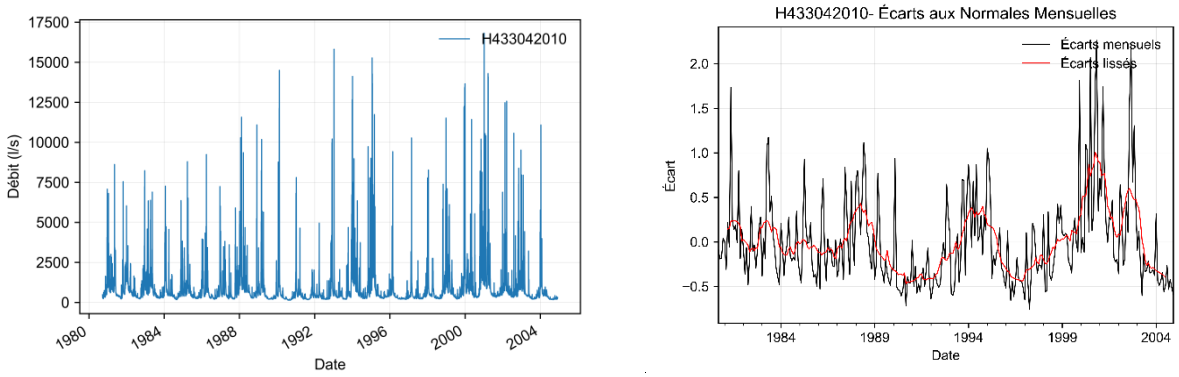



*Figure 42 : A gauche, exemple de chronique de débit ; A droite, écarts aux normales mensuelles (en noir) et écarts lissés sur 12 mois (en rouge)*

La comparaison entre écarts aux normales piézométriques et de débit des cours d'eau n'a pas pu être réalisée dans les bassins de l'Iton, Risle, Guiel, Vie, Mayenne, Orne et Baize, ces bassins ne présentant pas de données à la fois de débit et de niveaux piézométriques exploitables sur cette période. La comparaison a été réalisée sur 9 bassins : le Noireau, la Rouvre, la Varenne, la Dives, la Touques, l'Orne et Ure, l'Orne amont et l'Huisne. L'ensemble des figures est fourni en Annexe 4.

Un exemple de comparaison est fourni sur la Figure 43 pour le bassin versant du Noireau. Sur cette figure, les chroniques de débits sont représentées en bleu et celles issues de niveaux piézométriques en rouge.

On remarque ainsi que les écarts entre les anomalies, compilées à l'échelle mensuelle, peuvent varier en fonction des événements hydroclimatiques rencontrés et impacter de façon différente les ouvrages de suivi.

En effet, en prenant l'exemple des années 2011 et 2017 (Figure 43), on constate que les minimas par rapport aux normales, liés initialement au déficit de pluviométrie, apparaissent en février. Sur les piézomètres ces minimas apparaissent en mai et juin indiquant une inertie de 3-4 mois. Par ailleurs, pour ces deux évènements, la différence des écarts aux normales est enregistrée de façon tout à fait différente entre les différents ouvrages.

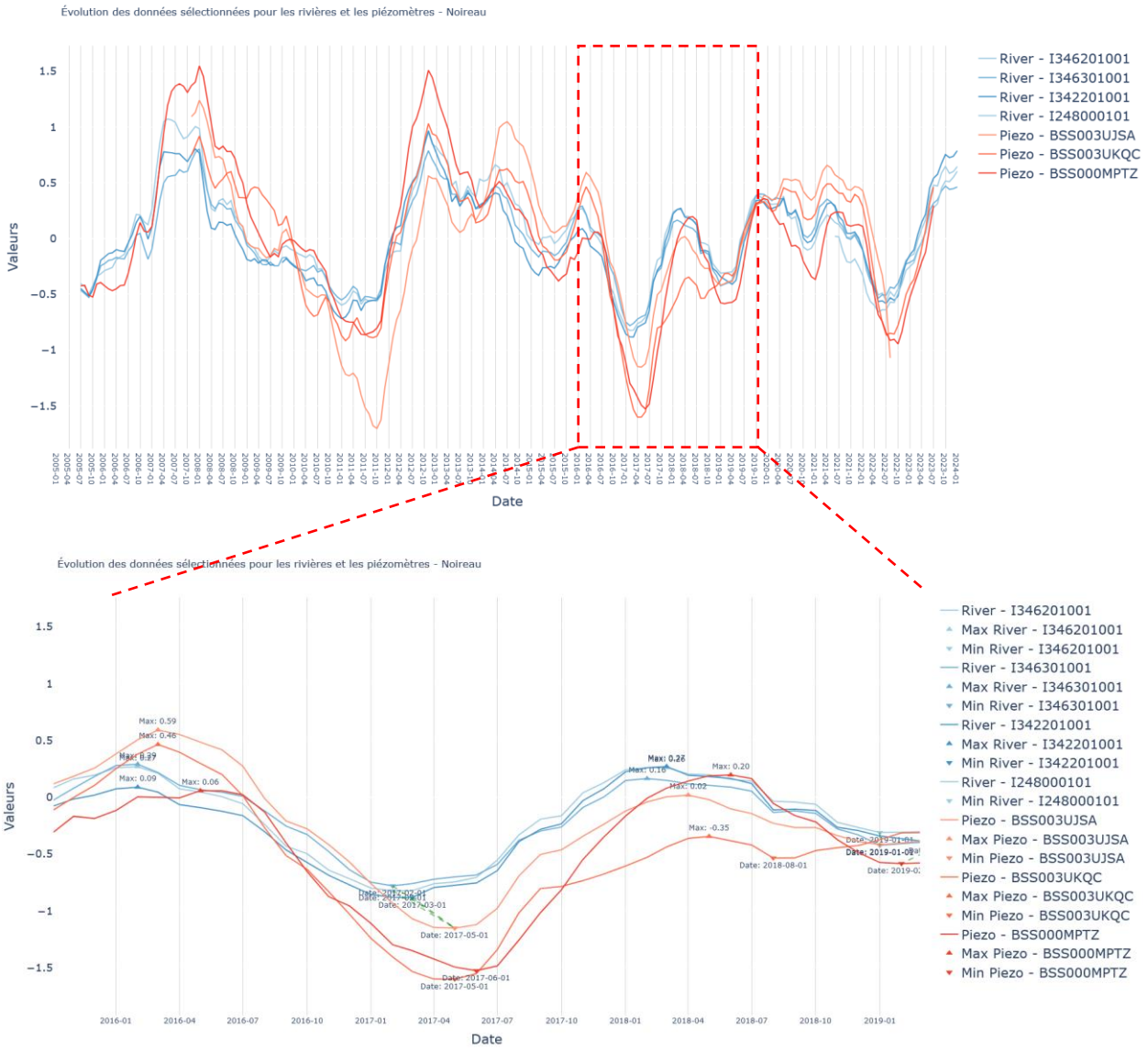



*Figure 43 : Comparaison entre les écarts aux normales lissés entre les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques sur le bassin du Noireau. Le rectangle rouge représente la partie zoomée sur l'illustration du bas.*

Le décalage temporel constaté est plus faible sur d'autres bassins tels que la Varenne, la Dives, la Touques où la résolution mensuelle ne permet pas d'observer de différence par cette méthode. Les différences ne sont pas non plus observables sur l'Orne amont, mais les mesures de débits disponibles sur cette période sont très courtes et ne permettent pas une comparaison complète.

Sur la Sarthe amont, les différences sont très peu marquées en 2017 mais sont plus importantes en 2022.

Sur les bassins de la Rouvre, Orne et Ure, les écarts sont de l'ordre de 1-2 mois en fonction des événements ou piézomètres utilisés.

Dans le cas de l'Huisne, le nombre important de piézomètres disponibles montre une forte variabilité avec, pour certains, des comportements similaires entre eux (Figure 44) alors que pour d'autres, les variations sont très différentes (Figure 45).

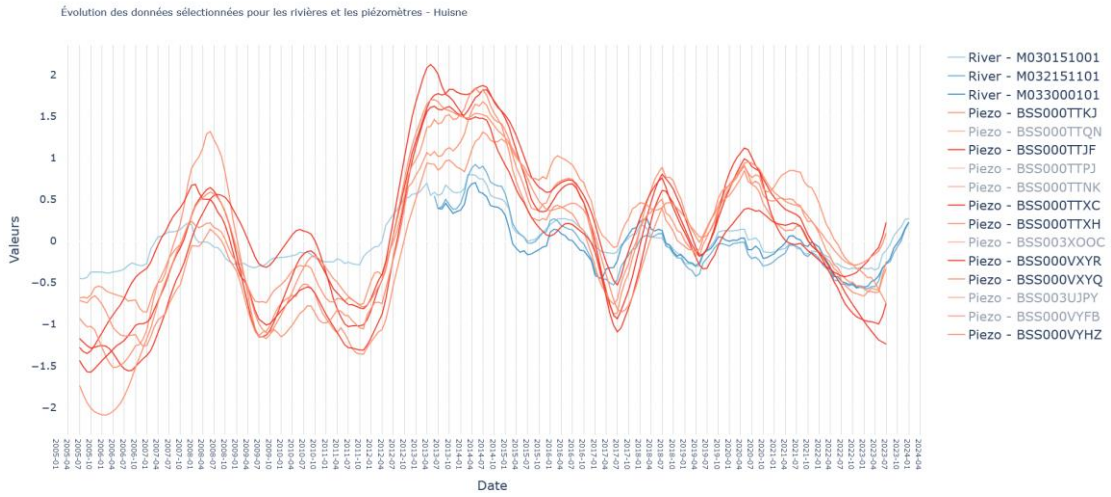



*Figure 44 : Comparaison entre les écarts aux normales lissés entre les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques sur le bassin de l'Huisne – Sélection des piézomètres présentant le même signal que les cours d'eau.*

Ce premier groupe (Figure 44) présente un décalage de 1 à 2 mois avec les minima des cours d'eau et ont entre eux un comportement homogène.

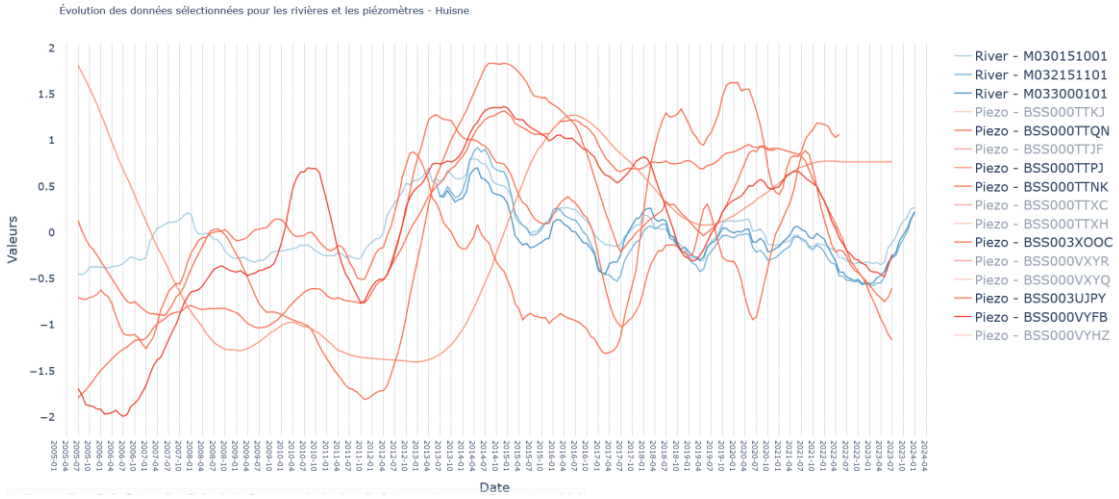



*Figure 45 : Comparaison entre les écarts aux normales lissés entre les débits des cours d'eau et les niveaux piézométriques sur le bassin de l'Huisne – Sélection des piézomètres ne présentant pas le même signal que les cours d'eau.*

Les piézomètres du second groupe (Figure 45) ont des tendances très différentes qui semblent déconnectées des cours d'eau. Les piézomètres de ce second groupe sont situés dans les Craies et Sables du Perche.

Ainsi, ce qu'il faut retenir c'est que **les différences observées sur les écarts aux normales de chacun des points d'observation (piézomètres ou station hydrométriques) ne doivent pas être considérées comme représentatives du fonctionnement de l'ensemble du bassin versant**. Les mesures piézométriques, en particulier, peuvent montrer des différences importantes de variations au sein d'un même bassin comme l'illustre le cas de l'Huisne. **Un piézomètre unique n'est souvent pas suffisant pour caractériser à lui seul le fonctionnement de l'ensemble d'un bassin versant, en particulier lorsque celui-ci présente une géologie hétérogène (cas de la plupart des bassins du département de l'Orne)**.

### *3.3.2.2 Evolution à l'échelle annuelle*

L'évolution annuelle des débits et leur variabilité peuvent être représentées sur un hydrogramme tel que celui fourni pour le Noireau (Figure 46). Cette observation complémentaire permet d'obtenir des informations à plus haute fréquence que les analyses interannuelles précédentes.

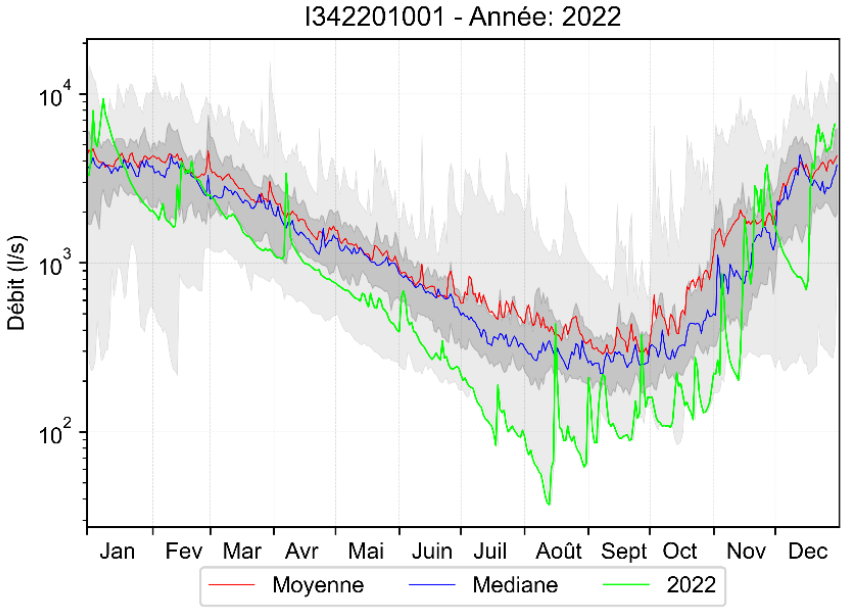



*Figure 46 : Exemple d'un hydrogramme et variabilité des débits (Le Noireau à Saint-Pierre-d'Entremont – I342201001)*

Les moyennes des niveaux piézométriques journaliers sont présentées pour l'ensemble des piézomètres classées par position géographique (Figure 47) et lithologie (Figure 48). Les moyennes présentées sont centrées réduites pour comparaison.

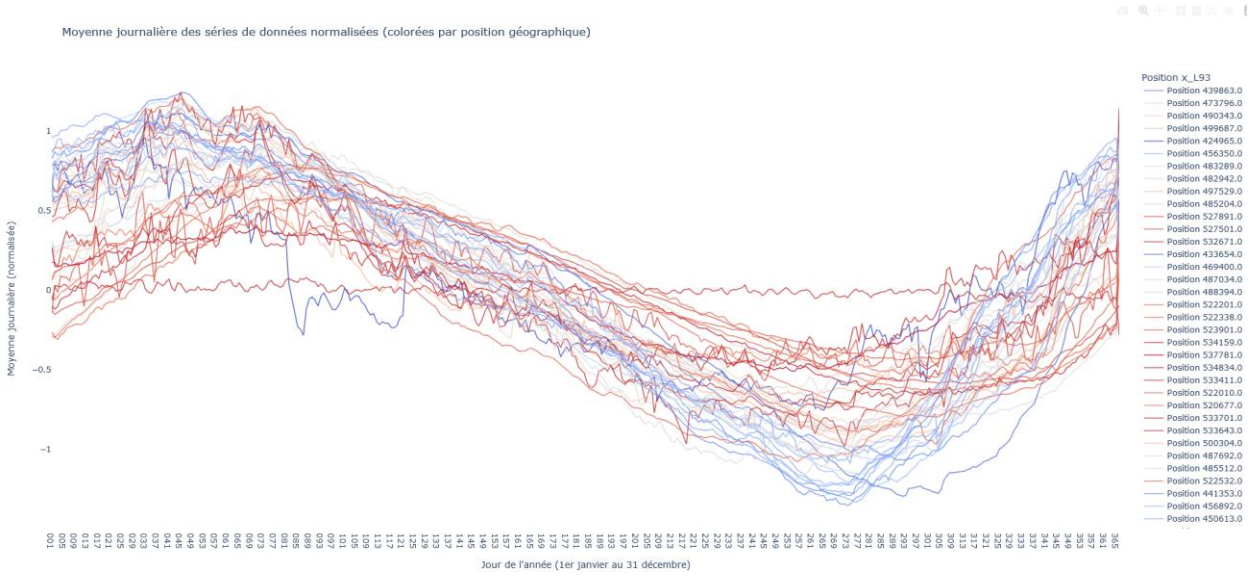



*Figure 47 : Moyennes journalières (centrées-réduites) des niveaux piézométriques pour l'ensemble des piézomètres classées par leur position géographique (du bleu au rouge d'ouest en est)*

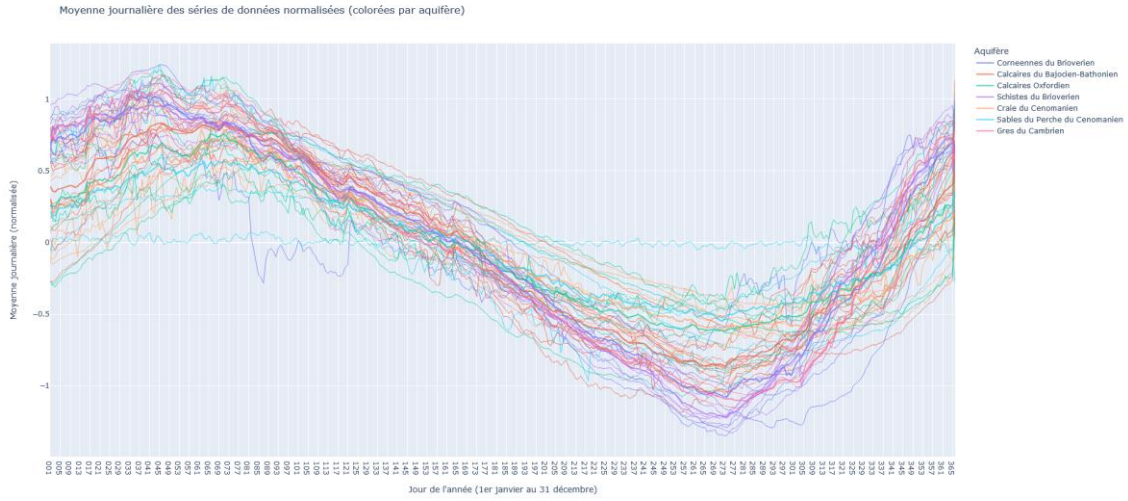



*Figure 48 : Moyennes journalières (centrée-réduite) des niveaux piézométriques pour l'ensemble des piézomètres classées par lithologie*

La comparaison relative des chroniques du département de l'Orne montre de façon globale que les différences d'écart à la moyenne sont globalement peu marquées. Toutefois, une comparaison fine de ces écarts montre que les niveaux piézométriques à l'ouest du département (dans les schistes et cornéennes), commencent leur vidange et se rechargent de manière plus précoce et ont des écarts relatifs plus importants entre les périodes de hautes et basses eaux que les piézomètres de l'est du département situés dans des aquifères sédimentaires plus capacitifs.

Une démarche similaire a été appliquée pour les cours d'eau en moyennant mensuellement les débits afin de lisser le signal et éviter les fluctuations importantes dues à l'effet des ruissellements. On constate également pour les cours d'eau que les différences observées d'ouest en est sont peu marquées (Figure 49) avec toutefois des périodes humides plus et sèches plus précoces pour les cours d'eau de l'ouest du département, corrélant les observations faites sur les piézomètres.

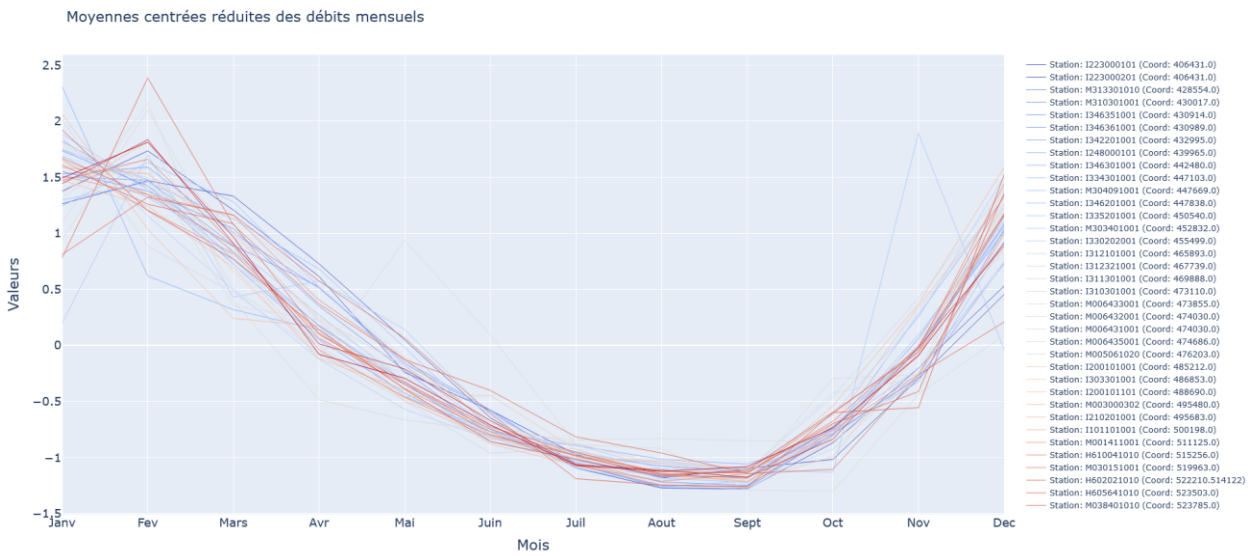



*Figure 49 : Hydrogrammes mensuels sur les cours d'eau du département classés par leur position géographique*

### *3.3.2.3 Sensibilité aux périodes de sécheresse*

La similitude des écarts aux moyennes permet d'agréger l'ensemble des chroniques piézométriques du réseau départemental de l'Orne (46 points) pour obtenir une tendance globale (Figure 50). Sur ces figures, les minimas représentent les périodes de sécheresse et les maximas les périodes humides. Sur ces chroniques moyennes issues de niveaux piézométriques, les niveaux les plus bas sont observés sur les années 1996, 2005, 2011, 2017 et 2022. Il n'est pas observé de tendance générale à la hausse ou à la baisse.

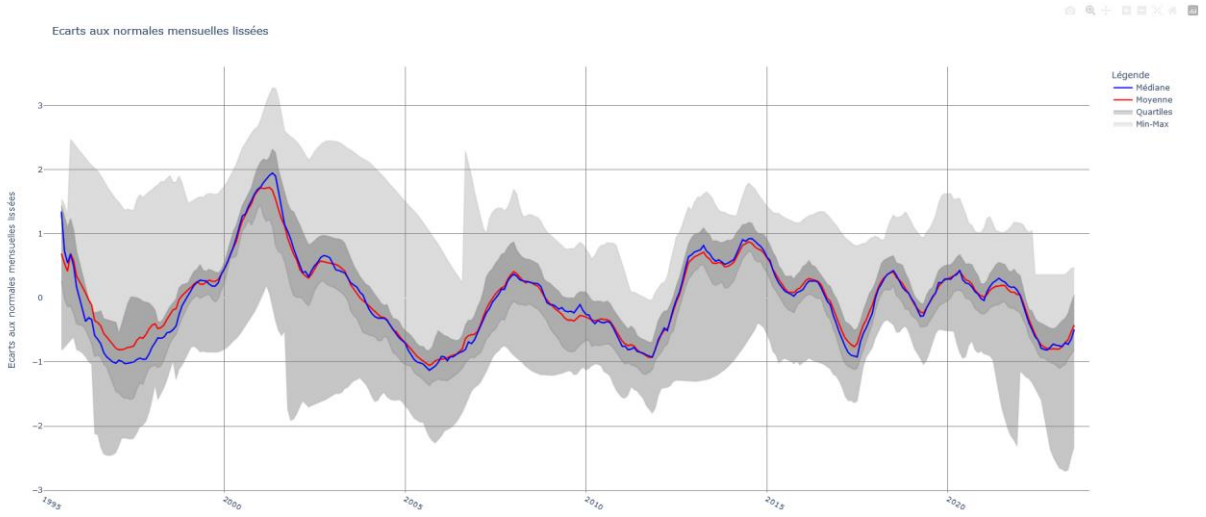



*Figure 50 : Ecarts aux normales mensuelles lissés des 46 chroniques piézométriques du département avec en rouge la moyenne, en bleu la médiane. Les plages de gris représentent les minimums et maximums ainsi que les premiers et derniers quartiles*

Un travail similaire sur les chroniques des débits moyens journaliers des différents cours d'eau permet de produire un historique plus long remontant à 1970 (Figure 51).

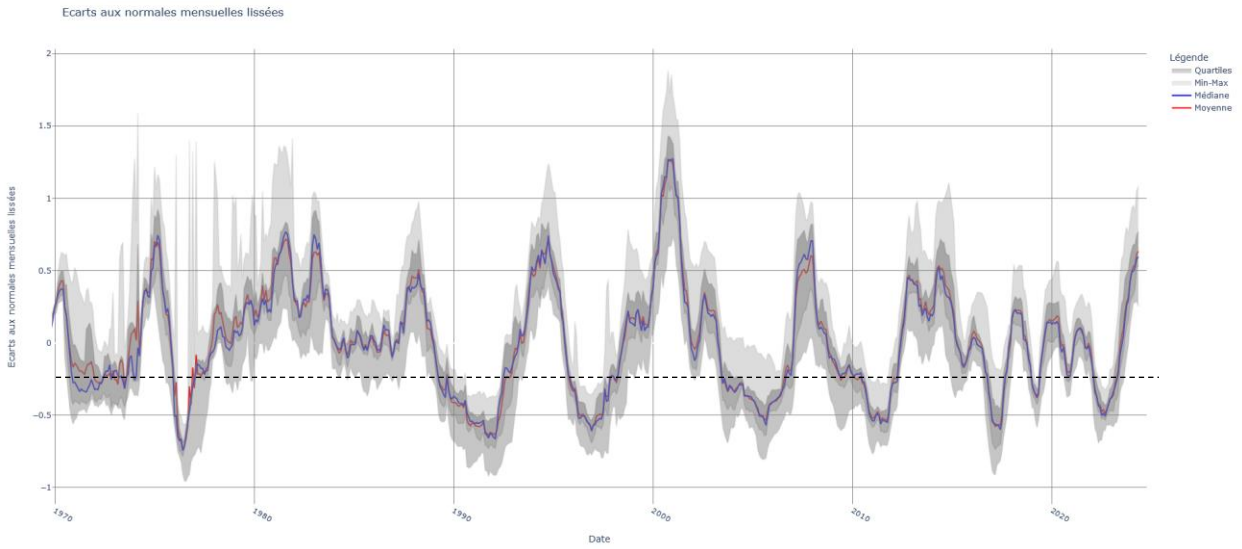



*Figure 51 : Ecarts aux normales mensuelles lissés des 53 chroniques de débits du département avec en rouge la moyenne, en bleu la médiane. Les plages de gris représentent les minimums et maximums ainsi que les premiers et derniers quartiles*

La reconstitution de l'historique met en avant une forte cyclicité avec des minimas correspondants à 1976, 1992, 1996, 2005, 2011, 2017, 2019 et 2022. La reconstitution réalisée permet également de comparer l'impact relatif de ces sécheresses, leur durée et impact sur le cycle de l'eau.

Ainsi, il peut être souligné que les événements de 1976 et 1989 restent les plus impactants sur les ressources en eau depuis 1970. Les périodes de plus long déficit par rapport aux normales ont eu lieu entre 1989-1992 et 2003-2006.

Les sécheresses récentes (2017, 2019, 2022) faisaient suite à des périodes de niveaux normaux et ces périodes de déficit ont été relativement courtes par rapport aux événements passés.

Ceci montre que les sécheresses des dernières années ont été plus fréquentes que par le passé mais que leur amplitude n'était pas plus importante. De même, les déficits récents observés ont eu lieu sur des périodes courtes et ont commencé sans que les niveaux soient initialement plus bas que les normales.

Au regard des informations présentées ci-dessus et de la comparaison fine des écarts réalisée au paragraphe précédent, il devient alors possible d'apporter des informations complémentaires sur le comportement et la capacité de résilience des ressources en eau à l'échelle du département, ainsi :

- **Dans l'Est du département (domaine sédimentaire)**, les déficits pluviométriques se reportent plus tardivement sur les niveaux piézométriques, en raison d'une inertie plus importante de l'hydrosystème (des eaux souterraines en particulier). Ces périodes de déficits peuvent se maintenir sur plusieurs mois voire années en l'absence de recharge (dynamique annuelle à pluriannuelle). *A titre d'exemple, la craie du Cénomanien et du Turonien peut être affectée par des successions d'années sèches liées à une variation des périodes de recharge (décalage temporel ou amplitude moindre). Ces variations ont pour conséquence d'allonger les périodes de vidange, entrainant alors un déficit et donc une moindre disponibilité des ressources.*

- **A l'Ouest (en domaine de socle armoricain),** les aquifères, moins capacitifs, semblent peu sensibles aux successions d'années sèches. Le renouvellement des ressources se fait plus rapidement lors des périodes de recharge. En revanche leur vidange, tout aussi rapide, lors des périodes sèches peut entraîner des difficultés dans le cas de périodes de déficits prolongés, à l'échelle de quelques mois, ou lors de recharges tardives (dynamique saisonnière).

Ces éléments seront confirmés par la modélisation présentée au chapitre 4 suivant (et son Annexe 2), en effet les temps de ½ tarissement des nappes sont relativement courts en domaine de socle (de l'ordre du mois à moins d'un mois) alors qu'ils sont bien plus importants en domaine sédimentaire (de 3 à 5 mois en moyenne pour les nappes libres).

# 4 Apport de la modélisation pour l'évaluation de la contribution des ressources en eaux souterraines au fonctionnement hydrologique des bassins-versants

## 4.1 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE GENERALE

### 4.1.1 Rappel des besoins et objectifs de ce volet

Ce volet vise à analyser et évaluer la contribution des eaux souterraines dans le fonctionnement des différents bassins versants. Ce travail est réalisé à l'aide de modèles globaux construits pour représenter de façon simplifiée le fonctionnement des bassins versants. Ces modèles sont structurés et calés sur la base des chroniques de données existantes, à la fois sur les débits des rivières et les niveaux piézométriques.

Le BRGM a modélisé 10 bassins versants du département, les autres données présentées ci-après proviennent d'autres études quantitatives menées par le BRGM ou d'autres opérateurs.

### 4.1.2 Principes de fonctionnement du modèle GARDENIA

Le BRGM a développé le code de calcul GARDÉNIA[15] pour simuler le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique global d'un bassin versant. Le principe est de chercher à reproduire les signaux de débit d'un cours d'eau et de niveau des eaux souterraines à l'aide de données climatiques par un système de réservoirs emboités se vidant les uns dans les autres, reproduisant les éléments principaux qui impactent le cycle de l'eau (Figure 52).

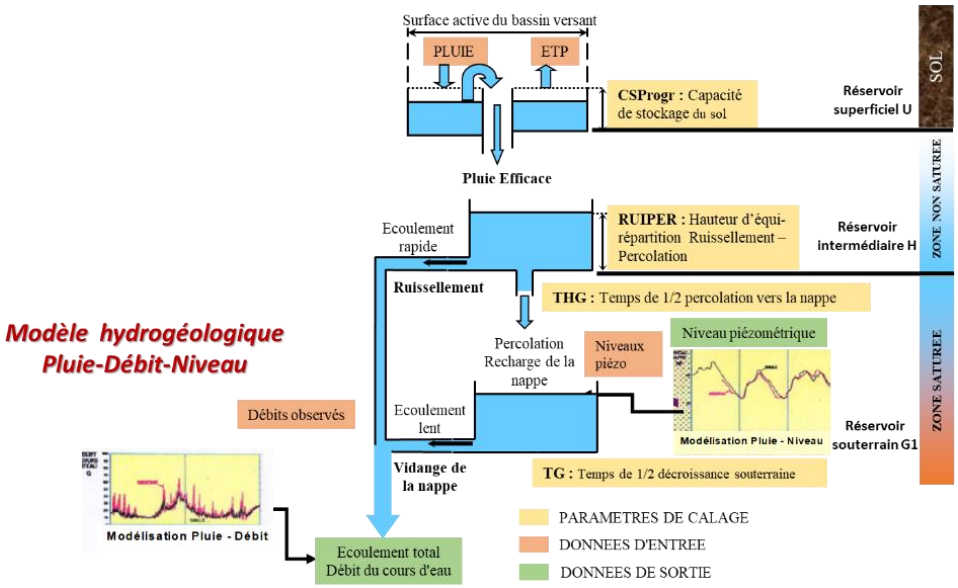



*Figure 52 : Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique global à réservoirs GARDENIA (Thiéry, 2014), source : BRGM, OFB, modifié par E. IDEE et S. BOURDAN*

[15] GARDÉNIA : ou modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des NIveaux Aquifères, est un modèle hydroclimatique global à réservoirs, développé par le BRGM, pour la simulation de l'hydrologie des bassins versants.

### 4.1.3 Principe de fonctionnement du modèle Eros

Le modèle ÉROS (**E**nsemble de **R**ivières **O**rganisées en **S**ous bassins), développé par le BRGM, est un modèle hydroclimatique (pluie – débit de rivière – niveau piézométrique) semi-global, permettant de simuler des bassins versants hétérogènes sous forme de grappes de sous-bassins connectés entre eux (Thiéry, 2019). Chaque sous-bassin est simulé par un modèle global à réservoirs GARDÉNIA (Figure 52), qui utilise des lois physiques simplifiées pour représenter l'écoulement à travers une série de réservoirs.

Le code de calcul EROS est ainsi adapté à la simulation de grands bassins hétérogènes (différences de pluviométrie et d'ETP, d'occupation du sol, de taux de ruissellement et donc d'infiltration, de débits d'échanges, etc.). Il permet la modélisation des débits des cours d'eau et des niveaux piézométriques des aquifères

La zone d'étude est décomposée en un certain nombre de sous bassins composant une grappe et reliés entre eux par une relation d'arborescence. On affecte à chaque sous bassin un numéro d'ordre. La Figure 53 présente un exemple schématique d'un bassin formé de 9 sous bassins (numérotés de 1 à 9).

La partie gauche est un plan du bassin versant et la partie droite montre l'arborescence correspondante. Dans cet exemple, on dispose de 5 points d'observations : à l'exutoire des sous bassins n° 1, 2, 3, 6 et 9. On remarque que 3 « points de jonction » ont été introduits : en aval des sous bassin 4 et 5, du sous bassin 7 et en aval du sous bassin 8. Ces 3 points de confluence (de superficie égale à zéro) ont été introduits pour permettre le calcul des débits (mais pas des niveaux piézométriques car il s'agit de point de jonction sans surface et donc sans bilan hydroclimatique).

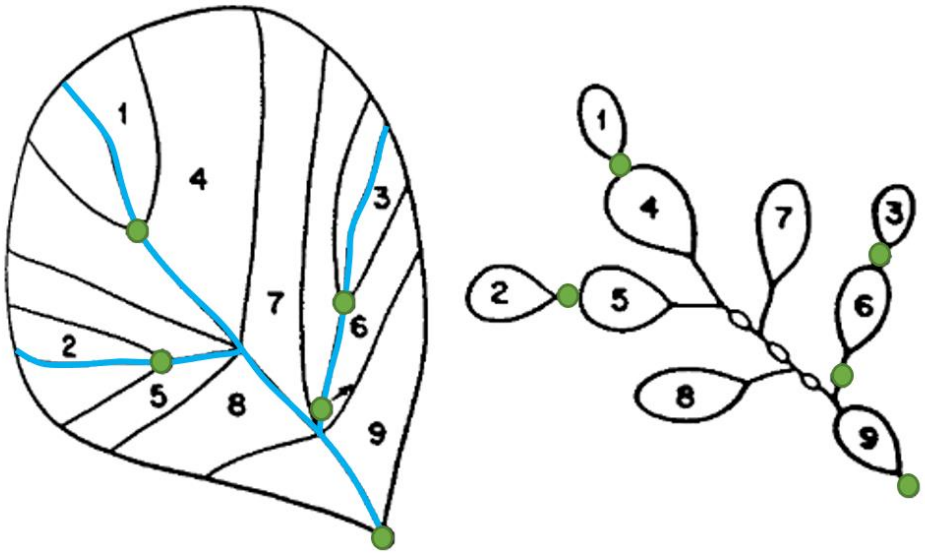



*Figure 53 : Exemple d'application d'un bassin complexe décomposé en 9 sous bassins (Thiéry, 2018)*

Chaque sous bassin est schématisé par un modèle hydrologique global avec ses paramètres propres. Le débit calculé à l'exutoire des sous bassins amont arrive directement dans le sous bassin aval.

Notons que dans ce type de modèle, comme pour le modèle GARDENIA, toutes les données d'entrée (données météorologiques, débits d'exportation, débits d'importation) doivent être sans lacune d'observation. Par contre, il est possible d'avoir des lacunes dans les données de sortie

(débits des cours d'eau) qui ne sont utilisées que pour le calage. Cette souplesse permet de prendre en compte de longues périodes de calage donc représentatives des grandes fluctuations interannuelles climatiques (notamment pluviométriques) et de l'inertie des aquifères (effet « mémoire »).

## 4.2 Délimitation et structuration des zones à modeliser

### 4.2.1 Choix des bassins versants

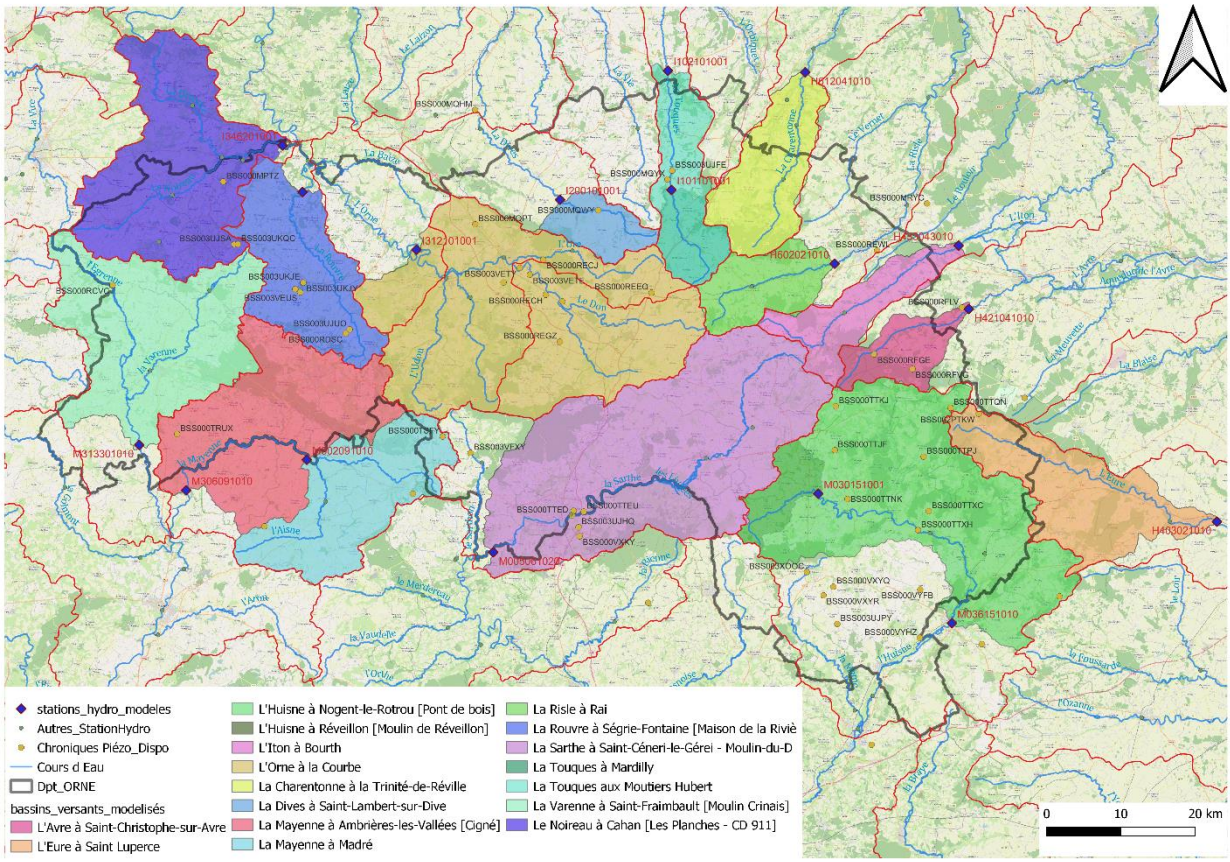



*Figure 54 : Portions des bassins-versants modélisables à l'aide de modèles globaux*

Comme expliqué avant, les portions de bassins versants à représenter s'appuient sur la disponibilité des données au niveau des stations hydrométriques maillant le réseau hydrographique du territoire. Le choix des stations à utiliser a été guidé 1) par le besoin de couvrir les principaux bassins versants du département, 2) de tenir compte des longueurs de chroniques disponibles et de leur continuité dans le temps, conditionnant leur représentativité et 3) en excluant par exemple les stations trop proches de retenues ou influencées par le fonctionnement d'ouvrages hydrauliques.

Sur les portions de bassins versants ainsi identifiés (Figure 54), ont ensuite été listés également les piézomètres de référence pouvant potentiellement servir pour le calage des niveaux. La sélection des piézomètres de référence a été guidée par : leur position sur le bassin, le type d'aquifère suivi et la représentativité des chroniques (non captif, non influencé, cf. volet hydrogéologique de la phase 1 de l'étude, rapport BRGM/RP-69331-FR).

A ce stade, le BRGM a retenu l'hypothèse que les bassins hydrologiques et hydrogéologiques étaient relativement voisins en terme surfacique. Lors de l'élaboration des cartes piézométriques, il a pu être constaté que les bassins topographiques et souterrains se chevauchaient ou se recoupaient assez largement. Ce constat est dû au choix méthodologique retenu pour leur élaboration : influence de la topographie sur la piézométrie, et parce que les principaux cours d'eau ont été représentés comme drainants (cf. rapport BRGM/RP-73813-FR).

**En accord avec le SDE61, la modélisation réalisée par le BRGM a porté sur les 10 bassins suivants : Noireau, Rouvre, Orne, Charentonne, Risle, Iton, Avre, Huisne, Mayenne, et Varenne.**

Les bassins versants de la Touques et de la Dives ont été modélisés par le BRGM pour les besoins de l'étude quantitative menée sur le département du Calvados et la ZRE du Bajocien-Bathonien (étude en cours pour la Touques).

D'autres données récentes étaient par ailleurs disponibles sur le bassin de la Sarthe qui a fait l'objet de modélisations dans le cadre d'études HMUC (Suez Consulting). Ces éléments ont toutefois dû être reproduits pour les besoins de cette étude.

**De fait, des informations quantitatives, produites par le BRGM, sont disponibles à la comparaison sur la quasi-totalité du département de l'Orne**, sauf pour les bassins versants suivants : la Vie, et l'Orne (en aval du barrage de Rabodanges et avant sa jonction avec la Rouvre) au nord du département, le Colmont et le Sarthon à l'ouest et au sud du bassin versant de la Sarthe ; l'Orne Saosnoise et la Même au sud-est sur le bassin de l'Huisne.

### 4.2.2 Principes de calibration

Les modèles globaux mis en œuvre par le BRGM dans le cadre de l'étude OAGPRO61 sont de type Pluie (P) Niveau (N) Débit (Q). Leur construction est adaptée à chaque contexte et ajustée par l'opérateur. Quelques principes sont rappelés ci-après :

- Les logiciels (GARDENIA/EROS) permettent l'utilisation d'un modèle simple avec un seul réservoir souterrain, qui peut être ajusté si besoin avec l'ajout d'un second réservoir souterrain. Ce dernier choix s'avère souvent nécessaire pour arriver à reproduire les comportements de systèmes complexes, influencés par des écoulements souterrains rapides et lents. Ce choix est souvent nécessaire en domaine de socle, si l'on cherche à bien reproduire les signaux de recharge et vidange des eaux souterraines, influencés par les circulations dans la zone altérée et fissurée de ces aquifères. Ce schéma conceptuel peut également être adapté en domaine sédimentaire, en particulier au cas des aquifères superposés ou karstiques.
- Il est possible d'utiliser des options pour améliorer le calage des débits en introduisant des pertes ou gains vers d'autres bassins voisins, atteinte d'un niveau de base ou seuil de débordement, pour le niveau des eaux souterraines, etc….

Initialement, les données d'entrée/sortie du modèle devaient être au pas de temps mensuel. Cependant, celui-ci s'avère in fine non idéal pour pouvoir représenter fidèlement les systèmes réactifs ou rapides. Le calage en mensuel amène souvent à une mauvaise estimation des pluies efficaces, ce qui affecte in fine les termes du bilan hydrologique, et amène donc à une mauvaise compréhension du fonctionnement global du bassin versant modélisé.

Ce constat posé, le BRGM a alors retenu de construire les modèles avec des données au pas de temps journalier. Ce choix est facilité par le fait que les principales données d'entrée : de pluie (P), d'ETP, de niveaux (N) et de débits (Q) sont disponibles au pas de temps journalier. En

contrepartie, cela nécessite de discrétiser les données de prélèvements et rejets dont les valeurs sont souvent annuelles ou, au mieux, mensuelles.

Le calage est réalisé de façon itérative, jusqu'à ce que les signaux restitués en sortie soient jugés satisfaisants. Pour cela, on se base sur les indicateurs de performance calculés par GARDENIA/EROS. Ces derniers sont obtenus en comparant les chroniques mesurées et modélisées en sortie de modèle. Il s'agit du critère Nash-Sutcliffe (1970)[16].

La valeur de celui-ci est comprise entre 0 et 1 (ce dernier renvoyant à une parfaite reproduction du comportement observé). Usuellement un calage est dit satisfaisant lorsque sa valeur de Nash est supérieure à 0,7[17], mais l'analyse graphique des résultats reste indispensable.

Pour les données de niveau, sur certains bassins versants, il a été possible de tester les chroniques de différents piézomètres pour arriver à identifier celui avec lequel on obtenait un meilleur calage, celui-ci pouvant alors être considéré comme étant plus représentatif du fonctionnement global de l'hydrosystème.

Par exemple, sur le bassin de l'Huisne, des tests ont été réalisés en utilisant les données de suivis disponibles dans les 3 principaux aquifères : Sables du Perche, Craie et Oxfordien afin de trouver le ou les piézomètres dont le modèle global arriverait le mieux à reproduire le fonctionnement hydrogéologique.

Le travail de calibration et de choix des modèles conceptuels est présenté en Annexe 2.

## 4.3 Données d'entrée des modèles

### 4.3.1 Précipitations et évapotranspiration

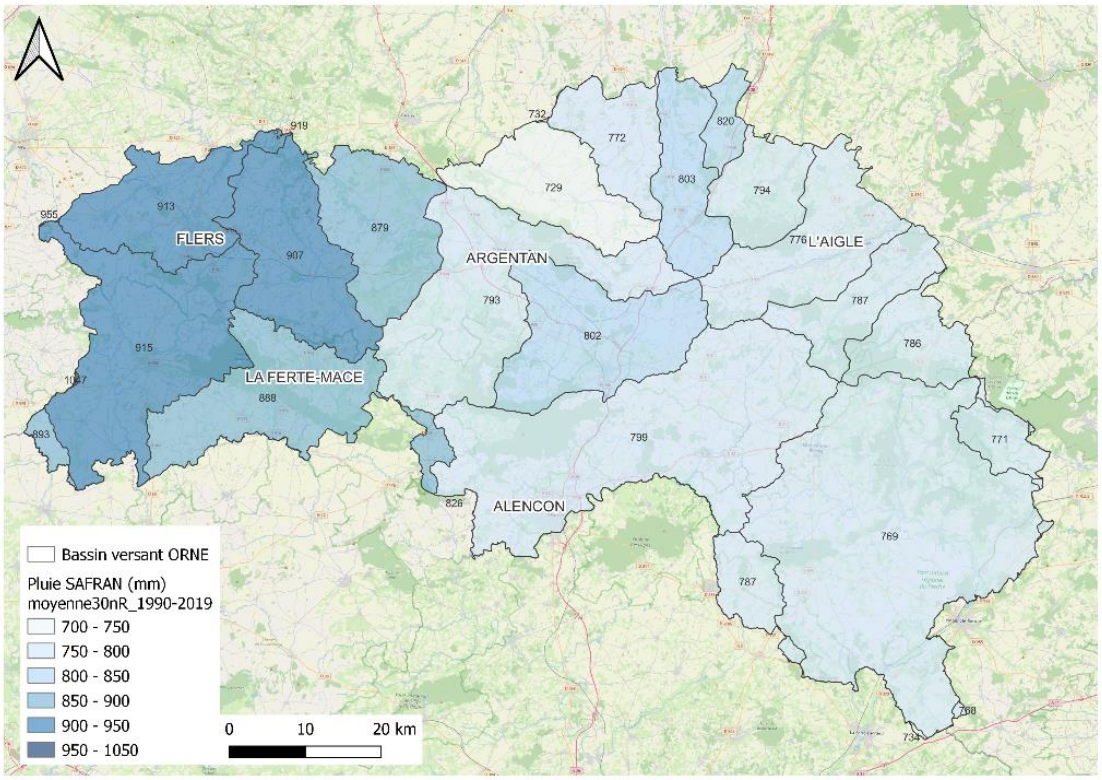
Les données de précipitation (Pluie P) et d'évapotranspiration (ETP) ont été extraites de la base de données SAFRAN de Météo-France.

Celle-ci combine les données d'analyse de modèles météorologiques et d'observations aux stations pour produire, au pas de temps horaire, les paramètres suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km) pour l'ensemble des mailles du territoire français pour la période 1958 à aujourd'hui (Figure 17 page 39).

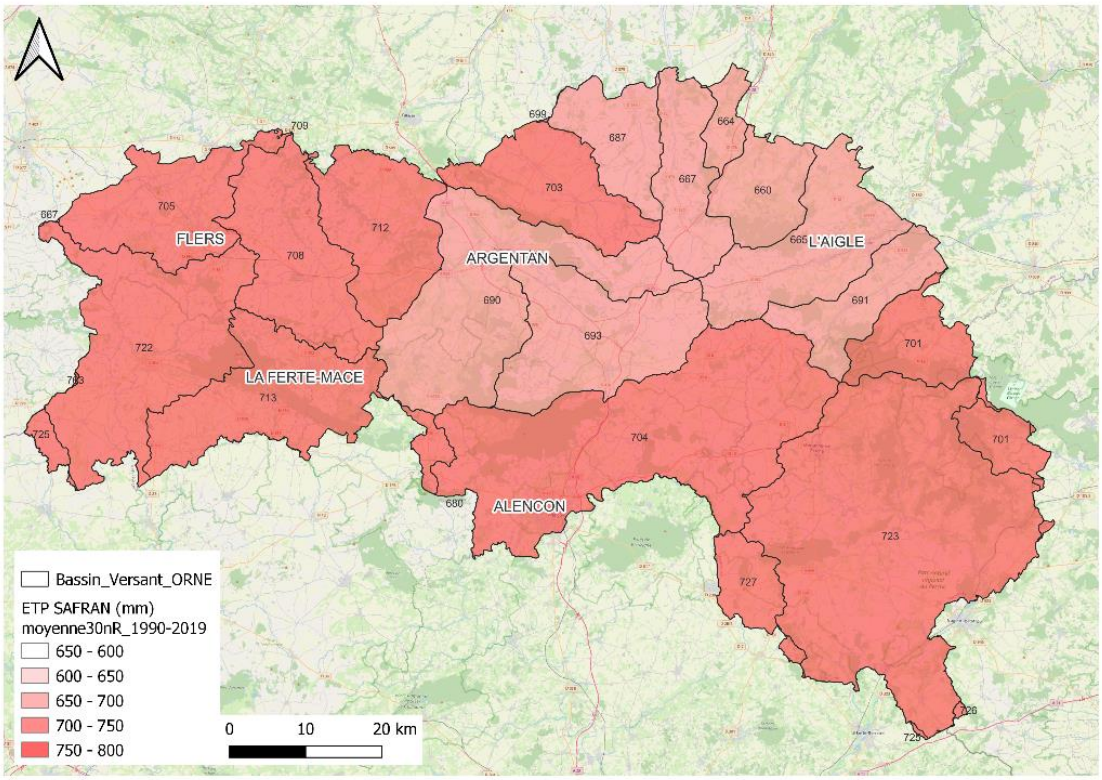
Pour les besoins de l'étude, une chronique (moyenne pondérée) de pluie et d'ETP journalière a ensuite été recalculée pour chaque secteur modélisé.

[16] Le critère de Nash-Sutcliffe est fondé sur la somme des carrés des écarts entre valeurs simulées et observées, rapporté à la variance des valeurs observées. D'autres indicateurs ou critères pourraient être utilisés pour évaluer la performance des modèles.

[17] http://www.graie.org/graie/graiedoc/reseaux/autosurv/GRAIE-Criteres-INDICATEURS-AUTOEVALUTIONdesMODELES-AUTOSURVEILLANCE-WEB18-v1.pdf




a)




b)

*Figure 55 : Moyennes annuelles pondérées des pluies (a) et d'ETP (b) calculées à partir des données SAFRAN (1990-2019)*

Les moyennes pondérées de ces données sont présentées ci-dessus à l'échelle départementale, en fonction de la surface occupée par chaque bassin versant (Figure 55).

### 4.3.2 Capacité du réservoir sol

La réserve utile (RU), est la quantité d'eau que le sol peut stocker et restituer aux plantes pour leurs besoins physiologiques. Dans les modèles EROS/GARDENIA, cette grandeur peut être utilisée pour représenter la capacité de stockage du sol dans les modèles ou capacité max du réservoir sol. Avec la difficulté, pour les modèles non-spatialisés, que cette grandeur est moyennée pour l'ensemble du bassin versant modélisé. Une autre difficulté est que le développement important de certaines formations d'altérites peut également influencer ce paramètre, mais ce processus est plus difficilement quantifiable.

La réserve utile des sols a été estimée en utilisant le Référentiel Régional Pédologique de Basse-Normandie (2018), pour lequel les unités homogènes de sols ont été croisées avec la carte RU de la France produite par l'INRAE en 2021 (Figure 18 page 39).

Dans le département de l'Orne, les valeurs moyennes de la réserve utile (RU) sont assez hétérogènes et varient de 0 à 300 mm. On constate que les valeurs de RU sont généralement plus faibles sur les zones de relief et à l'inverse plus fortes sur les plateaux et dans les plaines.

### 4.3.3 Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation ou le RUIPER

Il s'agit de la hauteur du deuxième réservoir H (voir Figure 52 page 77), qui permet une répartition équitable entre l'écoulement rapide (ruissellement) et la percolation (infiltration), contribuant à l'écoulement lent souterrain.

Les valeurs indicatives, utilisées en première approche pour calibrer la valeur de RUIPER des modèles, ont été déterminées à partir de l'indicateur d'IDPR18 qui évalue la capacité du sol à permettre l'infiltration de l'eau ou à favoriser le ruissellement. Le coefficient de ruissellement a ensuite été estimé en fonction des classes de l'IDPR du Tableau 9.

En dehors des plateaux du Pays d'Auge et d'Ouche au nord-est du département de l'Orne, apparaissant comme plus infiltrants, le reste du territoire se trouve plutôt sur des formations moyennement infiltrantes (45 à 65 %) à peu infiltrantes (45 à 25 %) que ce soit en domaine de socle armoricain, ou dans la zone sédimentaire (notamment du fait du recouvrement des formations marneuses calloviennes) – (Figure 56 page suivante).

[18] IDPR : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux est l'indice développé par le BRGM pour qualifier le caractère plus ou moins infiltrant des formations géologiques affleurantes (Mardhel et al., 2021)

| Valeur de l'IDPR | Signification | Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation de l'infiltration | Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation du ruissellement |
|---|---|---|---|
| 0 – 200 | Infiltration très majoritaire | 95 % | 5 % |
| 200 - 400 | | 85 % | 15 % |
| 400 - 600 | Infiltration Moyenne | 75 % | 25 % |
| 600 -800 | | 65 % | 35% |
| 800 -1000 | | 55 % | 45 % |
| 1000 – 1200 | | 45 % | 55 % |
| 1200 - 1400 | | 35 % | 65 % |
| 1400 - 1600 | Ruissellement moyen | 25 % | 75 % |
| 1600- 1800 | | 15 % | 85 % |
| 1800 -2000 | Ruissellement majoritaire | 5 % | 95 |

*Tableau 9 : Correspondance utilisée entre la valeur de l'IDPR et le coefficient de ruissellement (Pinson et al., 2010 modifié par David et al., 2016)*

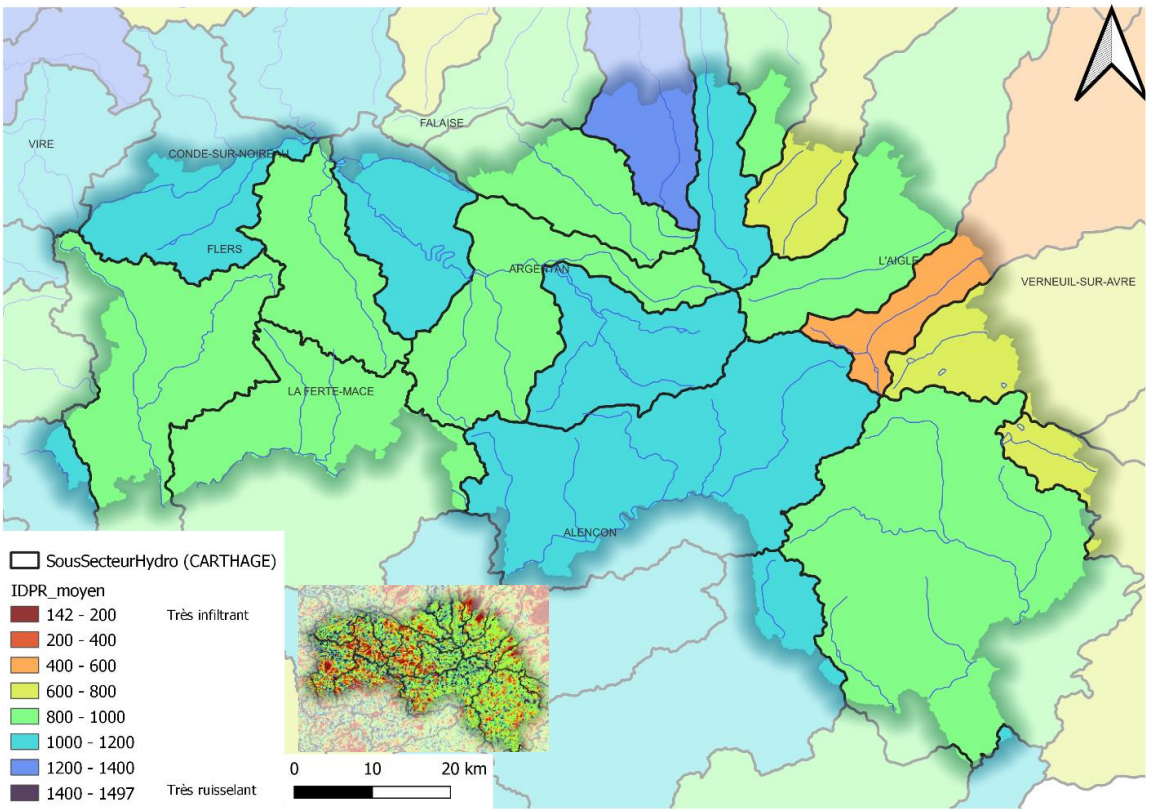



*Figure 56 : Valeurs moyennes de l'IDPR (2017) pour les principaux bassins du département de l'Orne*

### 4.3.4 Prélèvements dans les eaux souterraines

La Figure 57 ci-après reproduit l'ensemble des chroniques reconstituées de prélèvements dans les eaux souterraines par année et par mois pour l'ensemble des bassins versants.

| Étiquett | Somme de Avre | Somme de Charentonn | Somme de Dives | Somme de Eure | Somme de Huisne a R | Somme de Huisne a N | Somme de Iton | Somme de Mayenne Am | Somme de Mayenne Ma | Somme de Noireau | Somme de Orne | Somme de Risle | Somme de Rouvre | Somme de Sarthe | Somme de Touques | Somme de Varenne | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1994 | 214 391 | 998 601 | 77 926 | 1 697 107 | 98 450 | 2 947 672 | 903 106 | 1 328 255 | 745 561 | 1 756 918 | 4 909 984 | 1 333 334 | 862 024 | 2 487 701 | 1 108 846 | 862 521 | 22 332 397 |
| 1995 | 216 651 | 1 011 176 | 77 226 | 1 753 472 | 98 543 | 2 934 835 | 916 184 | 1 327 842 | 744 579 | 1 839 417 | 4 805 634 | 1 191 993 | 734 930 | 2 489 206 | 1 096 080 | 881 140 | 22 118 908 |
| 1996 | 217 992 | 1 039 824 | 76 526 | 1 735 775 | 98 738 | 3 039 525 | 972 210 | 1 327 433 | 743 595 | 1 765 237 | 4 865 845 | 936 085 | 702 556 | 2 499 655 | 1 151 217 | 941 620 | 22 113 833 |
| 1997 | 220 628 | 962 946 | 75 832 | 1 670 604 | 98 147 | 3 056 056 | 948 509 | 1 327 022 | 742 611 | 1 732 681 | 4 614 379 | 678 869 | 748 245 | 2 394 042 | 1 180 556 | 912 954 | 21 364 081 |
| 1998 | 194 677 | 1 031 825 | 75 135 | 1 737 836 | 98 369 | 2 997 565 | 902 210 | 1 326 610 | 741 624 | 1 709 537 | 4 544 917 | 742 573 | 785 015 | 2 377 022 | 1 244 062 | 917 597 | 21 426 574 |
| 1999 | 177 853 | 988 131 | 74 673 | 1 741 788 | 98 272 | 3 362 408 | 836 821 | 1 326 199 | 740 643 | 1 691 071 | 4 959 881 | 654 689 | 832 493 | 2 367 094 | 1 224 246 | 932 408 | 22 008 670 |
| 2000 | 177 605 | 916 289 | 74 584 | 1 701 548 | 98 130 | 3 315 135 | 661 342 | 1 325 787 | 739 663 | 1 716 043 | 4 861 991 | 773 621 | 832 412 | 2 356 235 | 1 226 758 | 938 027 | 21 715 170 |
| 2001 | 178 396 | 997 722 | 75 477 | 1 708 388 | 98 267 | 3 485 188 | 650 385 | 1 325 373 | 738 671 | 1 720 955 | 4 865 319 | 960 836 | 671 898 | 2 413 983 | 1 171 910 | 949 887 | 22 012 655 |
| 2002 | 177 915 | 965 893 | 75 183 | 1 715 897 | 98 288 | 3 427 125 | 651 567 | 1 324 960 | 737 695 | 1 697 678 | 4 318 101 | 1 105 456 | 668 306 | 2 397 036 | 1 144 895 | 901 277 | 21 407 272 |
| 2003 | 179 774 | 975 720 | 77 724 | 1 722 949 | 98 724 | 3 368 156 | 702 600 | 1 324 542 | 736 711 | 1 665 904 | 4 434 967 | 982 397 | 444 129 | 2 460 005 | 1 133 088 | 1 007 096 | 21 314 486 |
| 2004 | 178 348 | 973 413 | 76 028 | 1 728 824 | 98 249 | 3 327 570 | 776 763 | 1 324 134 | 735 732 | 1 511 890 | 4 379 707 | 756 022 | 360 418 | 2 455 194 | 1 174 067 | 973 890 | 20 830 249 |
| 2005 | 179 570 | 973 671 | 79 615 | 1 733 855 | 98 673 | 3 467 642 | 750 319 | 1 323 722 | 734 749 | 1 555 659 | 4 632 808 | 716 459 | 432 568 | 2 522 643 | 1 370 423 | 961 493 | 21 533 869 |
| 2006 | 179 707 | 967 995 | 79 508 | 1 736 281 | 98 763 | 3 300 713 | 679 879 | 1 323 310 | 733 763 | 1 714 823 | 4 507 377 | 750 998 | 568 769 | 2 474 197 | 1 453 994 | 962 458 | 21 532 535 |
| 2007 | 176 551 | 948 578 | 73 152 | 1 717 874 | 97 922 | 3 252 388 | 670 537 | 1 322 892 | 732 786 | 1 631 658 | 4 406 445 | 754 218 | 467 616 | 2 427 299 | 1 306 445 | 1 179 481 | 21 165 842 |
| 2008 | 174 047 | 999 058 | 78 820 | 1 501 552 | 98 309 | 2 753 044 | 809 931 | 1 298 664 | 718 820 | 1 477 034 | 4 455 537 | 684 065 | 545 156 | 2 506 861 | 1 249 232 | 1 270 752 | 20 620 882 |
| 2009 | 186 535 | 877 601 | 81 970 | 1 667 565 | 102 223 | 3 446 248 | 930 947 | 1 277 293 | 740 696 | 1 432 317 | 4 422 844 | 622 886 | 516 939 | 2 623 988 | 1 479 575 | 1 292 179 | 21 701 806 |
| 2010 | 190 456 | 1 452 873 | 92 876 | 1 676 804 | 280 108 | 3 517 426 | 1 075 110 | 1 324 176 | 732 934 | 1 891 964 | 4 370 984 | 714 683 | 499 607 | 3 156 234 | 1 446 115 | 1 317 322 | 23 739 672 |
| 2011 | 186 745 | 1 021 338 | 88 377 | 1 650 516 | 262 799 | 3 203 571 | 1 018 389 | 1 297 203 | 716 210 | 1 837 399 | 3 668 760 | 699 571 | 490 719 | 2 923 050 | 1 383 412 | 1 527 922 | 21 975 981 |
| 2012 | 170 813 | 1 149 356 | 76 804 | 1 505 821 | 246 570 | 2 981 445 | 1 093 025 | 1 284 746 | 698 036 | 1 307 466 | 3 656 767 | 793 974 | 584 095 | 2 810 196 | 1 367 635 | 1 495 504 | 21 222 253 |
| 2013 | 172 503 | 1 152 203 | 85 150 | 1 791 235 | 246 461 | 2 960 172 | 1 111 351 | 1 371 856 | 744 212 | 1 280 734 | 4 200 961 | 725 339 | 582 588 | 2 992 894 | 1 403 539 | 1 483 924 | 22 305 122 |
| 2014 | 148 372 | 1 100 268 | 81 324 | 1 638 215 | 247 067 | 3 046 497 | 1 130 386 | 1 320 426 | 751 889 | 1 181 729 | 4 146 476 | 642 707 | 542 969 | 2 832 036 | 1 320 958 | 1 458 112 | 21 589 431 |
| 2015 | 147 842 | 1 107 053 | 95 659 | 2 423 547 | 255 133 | 2 899 246 | 1 181 258 | 1 393 139 | 757 676 | 1 046 589 | 4 232 611 | 665 232 | 560 107 | 2 831 531 | 1 371 505 | 1 429 642 | 22 397 770 |
| 2016 | 125 785 | 842 597 | 85 378 | 2 229 643 | 250 023 | 3 442 629 | 1 163 387 | 1 129 816 | 774 961 | 1 229 929 | 3 996 012 | 597 227 | 561 172 | 2 700 835 | 1 285 476 | 1 618 521 | 22 033 391 |
| 2017 | 131 961 | 819 539 | 89 563 | 2 204 544 | 259 653 | 3 411 057 | 1 145 167 | 1 215 414 | 697 650 | 1 016 732 | 4 225 840 | 583 593 | 572 417 | 2 769 698 | 1 376 804 | 1 164 786 | 21 684 418 |
| 2018 | 143 614 | 945 972 | 80 209 | 2 407 911 | 274 675 | 3 917 860 | 950 215 | 1 191 615 | 757 599 | 945 456 | 4 043 372 | 437 009 | 436 007 | 2 664 441 | 1 505 807 | 1 039 729 | 21 741 491 |
| 2019 | 160 474 | 906 000 | 94 521 | 2 499 921 | 268 200 | 3 636 077 | 1 038 021 | 1 107 157 | 776 501 | 904 238 | 4 116 768 | 488 303 | 425 882 | 2 294 707 | 1 524 098 | 1 090 508 | 21 331 376 |
| 2020 | 145 349 | 897 777 | 87 567 | 2 871 924 | 268 895 | 3 779 166 | 1 053 777 | 1 140 621 | 769 402 | 907 828 | 4 080 804 | 495 030 | 494 081 | 2 376 891 | 1 500 726 | 1 150 996 | 22 020 834 |

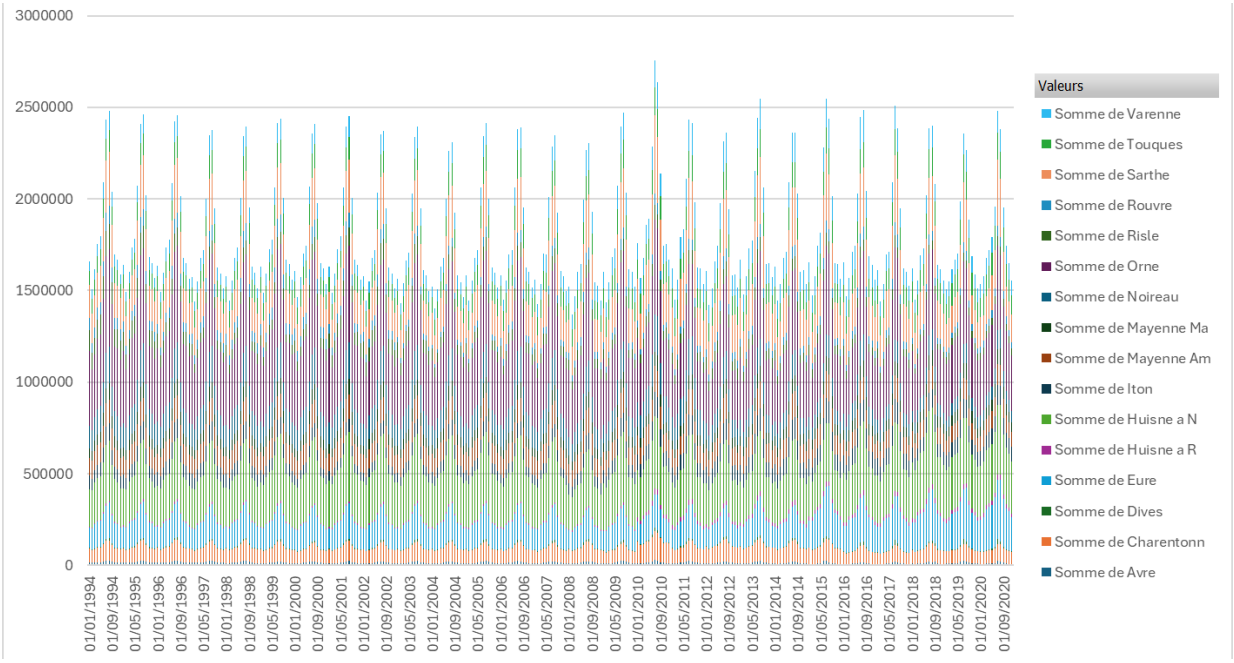



*Figure 57 : Volumes mensuels prélevés dans les eaux souterraines*

A noter : les prélèvements en nappe n'ont pas été intégrés dans le modèle via la fonction d'influence, mais sont bien pris en compte dans le calcul du bilan.

On rappellera que les débits prélevés et injectés dans les rivières n'ont pas été pris en compte car il n'était pas demandé au BRGM de reconstituer le débit naturel des cours d'eau. Ce travail ne s'inscrivant pas dans une démarche type volume prélevable.

## 4.4 RESULTATS ISSUS DE L'EXPLOITATION DES MODELES GLOBAUX

Les indicateurs de performance des modèles, les valeurs des paramètres de calage ainsi que les différents termes du bilan hydrologique sont consignés dans le tableau récapitulatif de la Figure 58 présenté en page suivante.

En complément, les données utilisées, la période de calage et les principales hypothèses prises sont détaillées en Annexe 2. Des résultats graphiques sont également reportés dans cette annexe.

| Carac. Modeles globaux | | | | Bilan Hydrologique | | | | | | | | Param.Calage | | | | | Indicateur Performance Modele | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Type Modèle | Opérateur | Nom BV | Superficie BV modelisé en km² | Pluie en mm A | Evapo-Transpiration Réelle (ETR en mm) B | Pluie efficace (en mm) C | Débit Rapide (en mm) D | Infiltration en mm | Prélèvements ESOU moyen en mm | % infiltration | Alim Souterraine (%) | Type de modèle | Capacité sol (en mm) | RUIPER 0 = infiltr. 1 = Ruisselle | Coef. d'emmagasinement nappe (%) | Facteur d'échange externe (%) | Nom Station Hydro | Nash calage ESU I | Nom Piézomètre | Nash calage ESOU J | Commentaires |
| Global/GARDENIA | BRGM | Varenne | 517 | 917 | 525 | 392 | 298 | 94 | 2,2 | 2% | 24,0% | Reservoir Double + Seuil | 145 | 0,76 | 0,33 | 0 | Saint-Fraimbault (M313301010) | 0,83 | La-Selle-La-Forge (BSS003UKQC) – Cornéennes | 0,93 | Piézomètre Hors Bassin<br>81 % du débit souterrain vient du réservoir profond |
| Global/EROS | BRGM | Mayenne à Madré | 335 | 881 | 510 | 371 | 292 | 79 | 2,3 | 3% | 20,7% | 1 réservoir avec Seuil | 162 | 0,79 | 0,08 | 0 | Mayenne à Madré (M302091010) | 0,89 | Pré-en-Pail (BSS000TSMN) – Grès Cambrien | 0,73 | |
| Global/EROS | BRGM | Mayenne à Ambriere | 493 | 891 | 521 | 370 | 270 | 100 | 2,6 | 3% | 26,3% | 1 réservoir | 157 | 0,73 | 0,1 | 0 | Mayenne à Ambrières (M306091010) | 0,89 | Le Horps (BSS000VWGX) – schistes Brioveriens | 0,81 | modèle à double réservoir testé mais ne donne pas de meilleur résultat, 79% Alim souterrain par le réservoir profond |
| Global/GARDENIA | BRGM | Noireau | 520 | 917 | 540 | 375 | 337 | 38 | 2,9 | 8% | 8,6% | Reservoir Double + Seuil | 175 | 0,90 | 0,11 | 0 | Cahan (I346201001) | 0,85 | La-Selle-La-Forge (BSS003UKQC) – Cornéennes | 0,87 | 83 % de l'Alim souterrain vient du réservoir profond |
| Global/GARDENIA | BRGM | Rouvre | 301 | 881 | 535 | 345 | 306 | 39 | 2 | 5% | 10,9% | Reservoir Double + Seuil | 185 | 0,89 | 0,2 | 0 | Ségrie-Fontaine (I335201001) | 0,87 | Le Grais (BSS003UJUO) – Schistes du Briovérien | 0,89 | 86 % de l'Alim souterrain provient du réservoir profond |
| Global/GARDENIA | BRGM | Orne | 932 | 786 | 539 | 244 | 219 | 25 | 4,7 | 19% | 6,8% | 1 réservoir | 196 | 0,90 | 0,31 | 0 | La Courbe (I312101001) | 0,82 | Sai (BSS000RECJ) – Calcaires du Bajocien-Bathonien | 0,91 | Le modele régional ZRE donne le même ordre de grandeur de contribution des ESOU sur le secteur d'Argentan |
| Global/GARDENIA | BRGM | Sarthe amont | 908 | 801 | 558 | 240 | 212 | 28 | 2,8 | 10% | 9,2% | Réservoir Double | 221 | 0,88 | 0,02 | 0 | M005 0610 20 – La Sarthe à Saint-Céneri-le-Gérei | 0,82 | Alençon - Stade (BSS000TTBM) - Calc. Bajo-Bathonien | 0,59 | Calage rapide, influence pompages |
| Global/GARDENIA | BRGM | Avre | 109 | 730 | 538 | 188 | 74 | 114 | 1,6 | 1% | 56,8% | 1 réservoir | 241 | 0,39 | 0,59 | -83 | Saint-Christophe-sur-Avre (H4210410) | 0,79 | Saint-Christophe-sur-Avre (BSS000RFLV) – Craie du Séno-Turonien | 0,77 | % de pertes très important (cohérent avec le modèle conceptuel) |
| Global/GARDENIA | BRGM | Iton | 159 | 810 | 532 | 276 | 113 | 163 | 5,8 | 4% | 55,3% | 1 réservoir | 227 | 0,41 | 0,98 | -22 | Bourth (H433043010) | 0,78 | Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL) – Craie du Cénomanien | 0,81 | Pertes vers le BV de l'Avre |
| Global/GARDENIA | BRGM | Risle | 149 | 805 | 509 | 295 | 132 | 163 | 5,2 | 3% | 53,4% | 1 réservoir | 186 | 0,45 | 1,03 | +0,08/0,38 | Rai (H602021010) | 0,68 | Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL) – Craie du Cénomanien | 0,74 | Reçoit un petit peu d'eau d'autres BV ? |
| Global/GARDENIA | BRGM | Charentonne | 224 | 775 | 512 | 262 | 81 | 181 | 4,5 | 2% | 67,5% | 1 réservoir | 211 | 0,31 | 6 | -1,9 | La-Trinité-de-Réville (H612041010) | 0,67 | Mesnil-en-Ouche (BSS000LBFR) – Craie marneuse du Turonien | 0,87 | Piézomètre Hors Bassin<br>Chronique lissée (semi-captif). Pertes faibles vers autre BV ? |
| Global/EROS | BRGM | Touques | 103 | 844 | 593 | 253 | 43 | 210 | 14,8 | 7% | 80,5% | Double réservoir | 282 | 0,17 | 0,14 | 0 | Moutiers-Hubert | 0,85 | Mardilly (BSS000MQYX) - Roussier de Gacé Oxfordien | 0,92 | 84% de l'Alim souterraine viendrait du réservoir profond |
| Global/EROS | BRGM | Dives | 88 | 735 | 573 | 162 | 124 | 38 | 0,9 | 2% | 23,3% | 1 réservoir | 216 | 0,77 | 1,7 | 0 | Saint-Lambert-sur-Dives - I2001010 | $R^2$ = 0,91 | Occagnes (BSS000MQPT) - Calcaires Bathoniens | $R^2$= 0,89 | Modèle 2013, calage modèle initial ZRE, non repris en 2024 |
| Global/EROS | BRGM | Huisne au Réveillon | 78 | 728 | 540 | 246 | 88 | 158 | 3,3 | 2% | 61,5% | 1 réservoir | 260 | 0,36 | 10 | 0 | Réveillon (M030151001) | 0,75 | Mauves-Sur-Huisne (BSS000TTNK) – Craie du Cénomanien | 0,84 | calages testés avec d'autres piézomètres (craie, sables perche et même oxfordien), mais c'est avec cette simulation que l'on reproduit le mieux le débit en aval |
| Global/EROS | BRGM | Huisne à Nogent | 748 | 722 | 506 | 274 | 71 | 203 | 4,4 | 2% | 71,9% | 1 réservoir | 173 | 0,26 | 10 | 0 | Nogent-le-Rotrou (M036151010) | 0,78 | Trizay-Coutretot-Saint-Serge (BSS000VYKC) – Calcaires de l'Oxfordien | 0,77 | Secteur complexe fortement structuré (S fracturé) avec facteur important d'échange entre aquifères, déjà souligné dans études SAFEGE |
| Global/EROS | BRGM | Eure amont | 319 | 737 | 485 | 250 | 121 | 129 | 5,8 | 4% | 48,9% | Pluie Débit | 170 | 0,48 | 1 | -75 | Saint Luperce H4030210 | 0,87 | | | Modèle 2023 Pluie Débit, Etude BRGM Eure et Loir . Pertes riv vers souterrain > Eure Aval |

*Figure 58 : Bilans hydrogéologiques simplifiés des principaux bassins versants du département de l'Orne*

### 4.4.1 Remarques sur le fonctionnement hydrogéologique des bassins versants

#### *4.4.1.1 Domaine de socle armoricain*

- **La Rouvre et le Noireau (nord du département)**

Le bilan hydrologique nous indique qu'une très faible part d'alimentation serait assurée par les eaux souterraines (10 %, en moyenne), sur ces deux bassins versants.

Le coefficient d'emmagasinement retenu pour caler le modèle est caractéristique des aquifères fissurés ; il est 2 fois supérieur pour le bassin versant de la Rouvre par rapport à celui du Noireau : respectivement 0,2 % contre 0,1%.

La présence d'altérites (proches des piézomètres utilisés), conservées au sein de la dépression du Houlme, pourrait être un élément expliquant ces différences capacitives entre ces deux bassins versants (Figure 59) et expliquerait également la nécessité d'utiliser une configuration à 2 réservoirs pour améliorer la performance de ces modèles. On peut également faire l'hypothèse suivante : la différence capacitive pourrait être liée à une plus grande abondance de méta-sédiments (en particulier ceux de type cornéennes, indurés) sur les bassins du Noireau et de la Rouvre, par comparaison aux bassins du sud-ouest du département (cf. carte d'identité des bassins

Figure 1 page 17).

Rouvre et Noireau possèdent tous deux un faible débit spécifique à l'étiage (< 1l/s/km²), confirmant les éléments calculés par les modèles, c'est-à-dire un faible apport par les eaux souterraines au débit des cours d'eau.

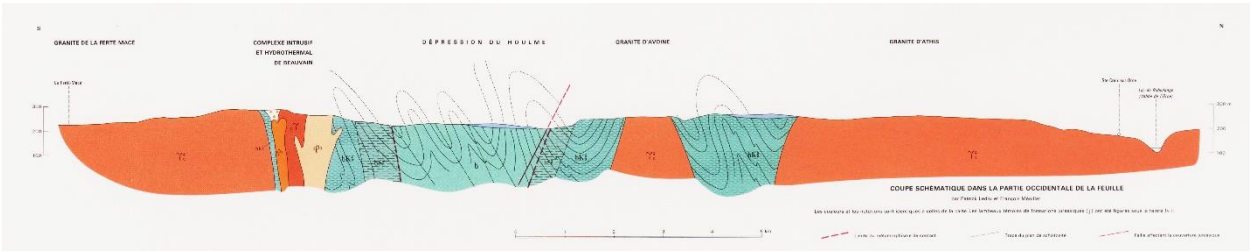



*Figure 59 : Coupe géologique sur le bassin versant de la Rouvre (feuille géologique au 1/50 000e Briouze - BRGM)*

Le potentiel hydrogéologique semble donc être moins favorable sur ces deux bassins versants et explique probablement que les prélèvements en eaux souterraines y soient *de facto* moins importants.

A noter : Ces deux bassins versants n'ont pas fait l'objet d'une modélisation détaillée dans le cadre de l'étude de la ZRE Bajocien-Bathonien. Ces travaux n'apportent donc pas de compléments utiles à la démarche.

- **La Varenne et la Mayenne (sud du département)**

Le bilan hydrologique nous indique qu'une faible part d'alimentation serait assurée par les eaux souterraines (de 20 à 30 %, en moyenne), sur les deux bassins versants. Néanmoins ces valeurs sont largement supérieures à celles estimées pour les autres bassins du domaine de socle au Nord du département.

Les pluies efficaces étant très similaires sur les bassins de l'ouest du département, cette différence serait vraisemblablement à rechercher au niveau hydrogéologique. **En effet, pour expliquer cette différence entre les bassins armoricains du nord et sud du département, on note pour ces derniers la présence des formations paléozoïques** (Figure 60), quasi-absentes des bassins de la Rouvre et du Noireau ; et on peut également faire l'hypothèse d'une **différenciation des formations briovériennes et de leurs altérites au Nord et au Sud du synclinal de Domfront-Mortain, vraisemblablement plus capacitives au sud** (cf. chapitre 5 sur les altérites).

Le débit spécifique de la Varenne à l'étiage est presque comparable à certains bassins versants du domaine sédimentaire (proche de 1,5 l/s/km²). Celui-ci est presque trois fois plus important que celui de la Mayenne voisin (env. 0,5 l/s/km²). Quels éléments pourraient expliquer cette différence notable entre les deux bassins versants à la géologie pourtant très similaire ?

Le coefficient d'emmagasinent global estimé, bien que faible, est 3 fois supérieur pour le bassin versant de la Varenne par rapport à celui de la Mayenne : respectivement 0,3 % contre 0,1%. La présence du grand bassin de St Gilles des Marais pourrait être un autre facteur explicatif de ce plus grand effet capacitif, tout comme la présence de plusieurs systèmes faillés, dont celui de l'Egrenne, facteur également favorable au développement d'une perméabilité de fracture et à l'altération des différentes formations affectées.

L'ensemble de ces hypothèses restent encore à vérifier : rôle et importance des différents facteurs proposés ci-dessus pour expliquer la meilleure contribution des eaux souterraines dans le fonctionnement global des bassins de la Varenne et de la Mayenne.

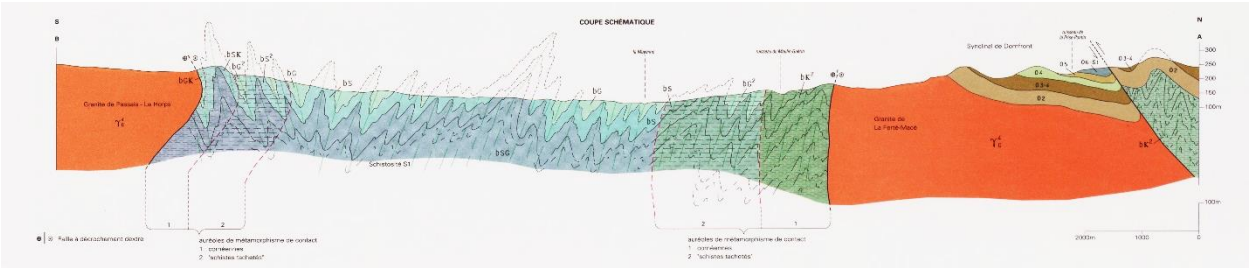



*Figure 60 : Coupe géologique réalisée sur le bassin versant de la Mayenne (feuille géologique au 1/50 000e de Domfront – BRGM)*

Le potentiel hydrogéologique de ces deux bassins apparait plus intéressant que ceux du nord du département. Cependant, les prélèvements en eaux superficielles (et souterraines dans une moindre mesure) y sont déjà relativement importants, tels que mis en avant dans cette étude et dans l'étude HMUC du SAGE Mayenne.

Dans ce contexte, si la création de nouveaux points de prélèvements apparait peu compatible avec l'état et la disponibilité des ressources en eau, il semblerait toutefois possible d'y envisager un ou des transferts des prélèvements dans les eaux de surface vers le milieu souterrain.

#### *4.4.1.2 Domaines mixtes (alimentés à la fois par les formations sédimentaires et de socle)*

- **L'Orne (à l'amont du barrage de Rabodange)**

Le modèle calibré à la station de la Courbe donne un bilan hydrologique avec une très faible part d'alimentation assurée par les eaux souterraines (moins de 10 %). Cette faible contribution des eaux souterraines à l'hydrosystème serait confirmée par le faible débit spécifique de l'Orne à l'étiage (< 1 l/s/km²). L'aquifère Bajocien-Bathonien, en grande partie captif à semi-captif sous les marnes calloviennes, ne contribuerait donc que faiblement au débit du cours d'eau.

Ces éléments amènent à considérer que la rivière se trouverait alors déconnectée de la nappe, en particulier au droit de la zone de recouvrement des marnes calloviennes (secteur captif), ce qui obligerait alors à revoir le schéma conceptuel utilisé (rivière alimentée par la nappe) pour faire les simulations hydrogéologiques (en amont d'Aunou le Faucon - , alimentation de la nappe possible par le cours d'eau et drainance vers la nappe profonde ? ou encore en réduisant la surface du bassin d'alimentation souterrain) – (cf. Figure 61). Pour vérifier cette hypothèse, il serait alors nécessaire de faire des profils le long du cours d'eau et de ses affluents : mesure des niveaux et des débits ainsi que des mesures locales de piézométrie autour de la plaine alluviale.

Dans ce contexte, le renouvellement de la ressource en eau de l'aquifère Bajocien-Bathonien sous couverture pose question. On rappelle que les prélèvements en eau souterraine y représenteraient près de 20 % de la recharge. Il apparait donc important de pouvoir estimer de façon précise l'effet de ces prélèvements, sur les secteurs captifs et libres, notamment à l'aide du modèle maillé. On rappelle qu'il a été mis en évidence, lors de la phase 1 de l'étude (Rapport BRGM/RP-69331-FR), que quelques piézomètres du bassin versant de l'Orne présentaient selon toute vraisemblance une sensibilité particulière face aux principaux prélèvements.

L'exploitation du modèle interdépartemental[19] laisse également penser que, lors des périodes de déficit pluriannuels, les niveaux de la nappe au voisinage des principales zones d'exploitation de la région d'Argentan pourraient diminuer, au point de voir les rivières alimenter la nappe ou encore au point de voir les niveaux passer sous la côte de captivité (toit de l'aquifère), accentuant de fait la drainance des horizons superficiels ou le déficit de soutien des nappes au cours d'eau. Par ailleurs, l'exploitation du modèle suggère également que l'Ure et la Sennevière puissent présenter des zones de pertes sur leur bassin-versant. L'Atlas piézométrique réalisé dans le cadre du programme OAGPRO61 (RP-73813-FR) laisse supposer que le bassin hydrogéologique amont de l'Ure pourrait être déconnecté de celui de l'Orne et s'écouler vers l'Est (flexure supposée de Nonant le Pin, cf. RP-69292-FR). Enfin on rappellera que la partie ornaise de l'aquifère bajocien-bathonien de la plaine d'Argentan ne se trouve pas en continuité avec celui de la plaine de Caen, puisque séparé de ce dernier par le synclinal paléozoïque de la zone Bocaine (cf. également commentaires pour la Dives).

Par ailleurs, au sud-est de Sées, la piézométrie du Bajocien-Bathonien établie par le BRGM en 2024 (rapport RP-73813-FR) n'a pas permis de vérifier si les bassins versants topographiques de la Tanche et de la Vézone, tous deux affluents en rive droite de la Sarthe, pouvaient être capturés par le bassin souterrain de l'Orne. Les failles de Laleu ou la faille bordière du Massif d'Ecouves jouent-elles le rôle de limites hydrogéologiques ? Les éléments à disposition et le modèle développé ne permettent pas actuellement de le préciser.

[19] Etude d'impact de prélèvements supplémentaires dans la nappe captive du Bajo-Bathonien de la région d'Argentan (BRGM/RP-62979-FR).

Il est important de rappeler que le modèle à simple réservoir utilisé dans ce volet ne permet pas de différencier les apports par une composante rapide ou lente des réservoirs souterrains (nappes libres et captives superposées du domaine sédimentaire ou des horizons altérés ou fissurés du domaine de socle). Une évolution du modèle actuel pourrait donc permettre de passer celui-ci dans une configuration à deux réservoirs souterrains et de complexifier celui-ci en ajoutant, lorsque cela est possible, les sous-bassins versants des principaux affluents (modèle semi-distribué).

En effet, il faut souligner que le bassin de l'Orne modélisé (à la Courbe) est de taille importante et à la géologie très hétérogène (Figure 61). Dans ce contexte, il serait donc utile de pouvoir le segmenter, en ajoutant de nouvelles grappes de modèles représentant ses sous-bassins versants (màj. vers un modèle semi-distribué de type EROS) ou de mettre à jour le modèle maillé régional (ZRE Bajocien-Bathonien réalisé par le BRGM). Il serait pour cela nécessaire d'apporter des informations complémentaires sur le fonctionnement de l'amont du bassin (secteur Argentan et de Sées) mais également d'apporter des informations complémentaires sur la participation de ses nombreux affluents comme l'Ure, le Don, l'Udon, la Cance, la Baize et l'Houay pour les principaux.

Cependant, en 2024, tous ces affluents n'étaient pas équipés de stations hydrométriques ou, lorsque ces stations étaient existantes, toutes ces stations ne disposaient pas d'une longueur de chronique suffisante pour permettre leur utilisation dans des modèles. Un constat similaire peut être fait sur les eaux souterraines, puisqu'il n'existe pas de station piézométrique sur le secteur amont (Chailloué/Sées) du bassin de l'Orne ou sur le secteur aval, en domaine de socle (secteurs de Bazoches et compartiment Est du massif d'Athis).

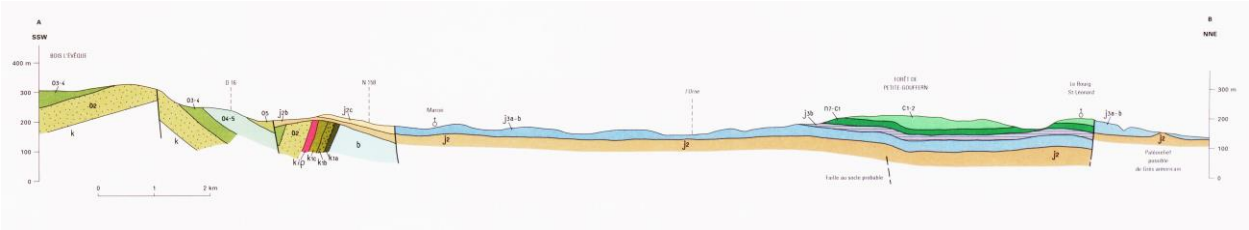


*Figure 61 : Coupe géologique sur le bassin de l'Orne montrant son hétérogénéité morphologique et lithostratigraphique (feuille géologique au 1/50 000e de Sées - BRGM)*

- **La Sarthe**

A son amont (au nord-est du Mêle), le bassin de la Sarthe est soutenu de façon importante par la nappe de la craie et de l'Oxfordien. Sur ce secteur, les débits spécifiques à l'étiage sont supérieurs à 1 l/s/km², voire supérieurs à 3 l/s/km² sur l'Hoëne à la station de Mesnière – (Figure 62).

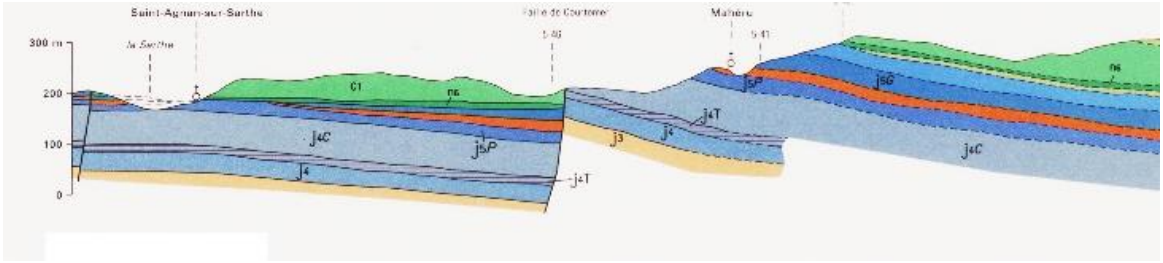



*Figure 62 : Coupe géologique réalisée sur l'amont du bassin de la Sarthe (feuille géologique au 1/50 000e de L'Aigle - BRGM)*

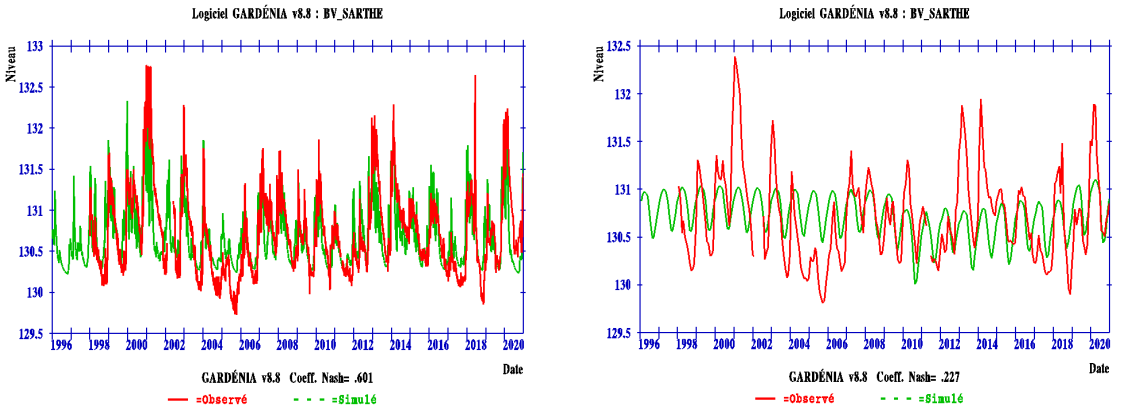
A sa sortie du département de l'Orne, à la station de St Céneri le Gérei, le débit spécifique de la Sarthe à l'étiage diminue pour devenir inférieur à 0,8 l/s/km², alors même que la superficie de son bassin versant a été multipliée par 4 dans un même temps. Cette baisse significative des débits spécifiques d'étiage, entre la partie amont et avale, témoigne d'une diminution relative des apports d'eau souterraine au système.

Ce constat est également souligné dans les termes du bilan hydrologique calculé par le modèle, puisque celui-ci indique que la part moyenne d'alimentation en eau souterraine à la station de St Céneri serait seulement de l'ordre de 11 % (du même ordre que celui de l'Orne).

En aval de Coulonges-sur-Sarthe jusqu'à Semallé-Valframbert, la nappe du Bajocien-Bathonien (principal aquifère) se trouve en grande partie captive à semi-captive sous les formations marneuses du Callovien. Sur ce tronçon, une part importante du réseau hydrographique repose alors directement sur ces formations peu perméables. Dans ce contexte, il est donc tout à fait vraisemblable que les cours d'eau puissent se trouver alors déconnectés des eaux souterraines (Figure 64). Il est à noter que sur ce secteur la piézométrie de la nappe du Bajocien-Bathonien semblerait indiquer une possible drainance du cours d'eau (la rivière alimente la nappe) – (cf. RP-73813-FR) L'étude Lithologic (2009) de la plaine d'Alençon indique même une drainance lente au travers l'ensemble des formations marno-calcaires du Callovien.

D'ailleurs, le coefficient d'emmagasinement global retenu pour caler le modèle nous indique une valeur de 0,02 %, caractéristique d'une nappe captive à semi-captive autour du piézomètre de référence, valeur conforme à ce qui a été rapporté en bibliographie par Lithologic (2009) dans sa synthèse hydrogéologique du Bajocien-Bathonien entre le Mêle et Alençon.

A noter que les performances du modèle sont globalement satisfaisantes pour reproduire les débits et niveaux du piézomètre BSS000TTBM[20] situé à Alençon, sauf pour les étiages qui apparaissent globalement sous-estimés pour les eaux souterraines. Il est fait l'hypothèse que celui-ci est vraisemblablement influencé par les pompages effectués sur les captages proches. Dans ce même secteur, le piézomètre BSS000TTEU présente également une tendance à la baisse au voisinage de sites de prélèvements.




A) B)

*Figure 63 : Niveaux piézométriques simulés pour le bassin de la Sarthe pour le piézomètre BSS000TTBM sans prélèvements a) et avec prélèvements b)*

[20] Sur ce bassin versant, les piézomètres disponibles sont tous situés à proximité de zones de prélèvements. Il n'existe pas de point de suivi des ESOU à l'amont sur le secteur du Mêle-sur-Sarthe ou vers Sées (cf. RP-69331-FR)

La Figure 63 démontre que le modèle global, tel que construit, couvre une superficie trop importante pour pouvoir reproduire de façon satisfaisante les différentes situations hydrogéologiques : nappes libres et captives des domaines sédimentaire et de socle. Pour améliorer les performances de celui-ci, il serait nécessaire de le scinder en différentes sous-unités au fonctionnement plus homogène. En conséquence, l'évaluation de l'incidence des prélèvements en eau souterraine sur les ressources en eau ne peut donc pas être simulée de façon satisfaisante.

A l'image des questions soulevées dans le bassin de l'Orne, on pourra également questionner la capacité de renouvellement des ressources Bajocien-Bathonien sous couverture. Pour mieux évaluer la disponibilité des ressources en eau souterraine, dans ce type de contexte, il serait alors nécessaire de procéder à une évaluation de la recharge et des effets de drainance, du Callovien vers les formations du Dogger (générique) ou de la contribution du cours d'eau. On rappellera que les volumes prélevés actuellement représenteraient environ 14% du volume infiltré à l'échelle de l'ensemble du bassin, ce qui est significatif dans ce contexte.

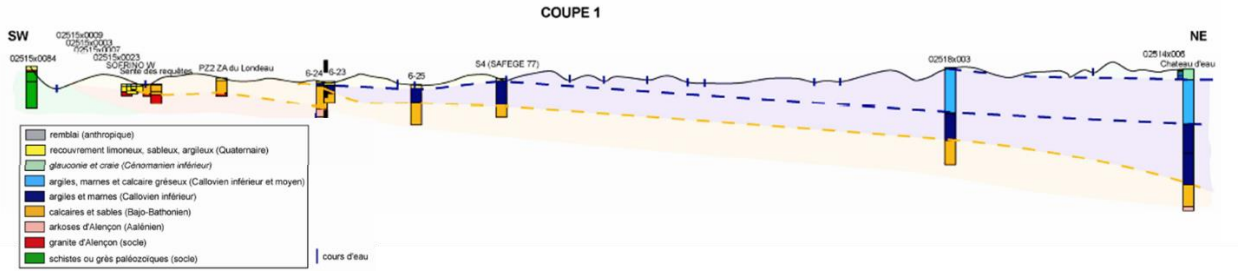



*Figure 64 : Coupe lithologique réalisée sur le bassin de la Sarthe entre le Mêle et Alençon (Lithologic, 2009)*

Sur ce bassin-versant de taille importante et géologiquement hétérogène, il serait là encore particulièrement utile de pouvoir segmenter l'information, de manière à pouvoir disposer d'informations complémentaires sur le fonctionnement hydrologique/géologique des principaux sous-bassins versants comme l'amont du bassin (Sarthe en amont du Mêle, et son affluent l'Hoëne situés dans des contextes géologiques différents avec la présence des formations oxfordiennes et crétacées) et plus en aval celui du Sarthon qui se trouve entièrement en domaine de socle. Mais on peut également envisager de segmenter le cours principal de façon à pouvoir distinguer la partie libre de l'aquifère Bajocien-Bathonien ou sous-recouvrement des formations calloviennes.

A noter : sur les bassins versants de l'Orne et de la Sarthe, la recharge globale calculée est faible : de l'ordre de 10 % des pluies efficaces. Cette valeur serait ainsi à rapprocher de la plus faible surface de nappes libres. En effet, celles-ci représenteraient, a priori, de l'ordre de 60 à 65 % seulement de la surface totale de ces deux bassins versants.

Dans le cas des rivières de l'Orne et de la Sarthe, les modèles globaux actuellement mis en œuvre ne permettent pas d'apporter des informations précises, permettant de différencier les écoulements souterrains rapides ou lents, ou permettant de caractériser la proportion d'échanges entre la nappe et la rivière sur les secteurs libres et sur les secteurs où la rivière coule directement sur les marnes (supposés déconnectés).

Dans cet objectif, l'utilisation de modèles globaux en grappes ou maillés (spatialisés) serait à privilégier. Leur mise en œuvre ou mise à jour dans cet objectif nécessitera toutefois d'acquérir un nombre important de données complémentaires (tel qu'évoqué pour le bassin de l'Orne : chroniques de débit des cours d'eau et des niveaux piézométriques des principaux compartiments homogènes, profils en long jaugeage/niveau des rivières, accompagnées de

mesures piézométriques autour de la plaine alluviale afin de mieux pouvoir caractériser les échanges nappe-rivière).

On rappellera que les études volumes prélevables ont mis en avant un impact accentué des prélèvements lors de périodes d'étiages, puisque le soutien des eaux souterraines serait a priori plus modéré dans le contexte mis en avant. Ces éléments justifient la mise en œuvre d'une démarche de gestion partagée et concertée des ressources en eau disponibles et militent pour le développement d'outils de modélisation du fonctionnement des hydrosystèmes et de pilotage des prélèvements, en particulier dans les eaux souterraines.

#### *4.4.1.3 Domaine sédimentaire*

- **Huisne**

Le bassin versant de l'Huisne est un bassin versant complexe, alimenté par plusieurs aquifères régionaux superposés : l'Oxfordien, la craie, les sables du Perche, mis en contact par le truchement de systèmes faillés majeurs (failles de Mortagne et de Bellême, fossés de Longny et Nogent pour les principaux).

Le bilan hydrologique témoigne d'apports d'eaux souterraines en quantité importante (62 à 73 % en moyenne) assurant un débit d'étiage tout à fait satisfaisant au cours d'eau (> 2l/s/km²), ce malgré de plus faibles précipitations (les plus faibles du département).

Les calages réalisés sur l'amont et l'aval du bassin, à partir de différentes stations piézométriques, montrent la prédominance de l'alimentation par les aquifères crayeux et oxfordiens (cf. Annexe 2 pour les résultats).

Les paramètres de calage des modèles nous indiquent que le coefficient d'emmagasinement global du système serait important, de l'ordre de 10 %. Celui-ci apparait particulièrement élevé et peu représentatif d'une réalité physique.

Des difficultés de calage ont été rencontrées, démontrant qu'il est difficile de pouvoir reproduire le fonctionnement hydrologique de ce bassin versant de façon satisfaisante à l'aide de modèles globaux, avec les connaissances et données disponibles actuellement. Les indicateurs de performance des modèles (à la fois pour les eaux superficielles et souterraines) sont médiocres comparativement aux autres simulations. Ces derniers restent néanmoins globalement satisfaisants (Nash > 0,75).

*A noter : le bureau d'études SUEZ Consulting (2015), qui a également travaillé sur ce secteur dans le cadre de la mise en œuvre d'une étude volume prélevable (EPTB Sarthe, ex-SBS, SAGE Huisne), a rencontré les mêmes difficultés de calage de ses modèles globaux.*

L'utilisation du modèle maillé SAFEGE (2012), construit pour les besoins d'un projet de recherche en eau (maitre d'ouvrage SDE61), a pourtant démontré l'existence d'une drainance verticale entre les différentes nappes crétacées et jurassiques, dans un modèle maillé multicouches reproduisant le fonctionnement d'aquifères superposés (drainance ascendante dans les vallées et descendante sous les plateaux, (cf. schéma conceptuel proposé en conclusion, au chapitre 6). Le bilan hydrologique réalisé à l'aide de cet outil a démontré que les échanges entre ces deux aquifères étaient relativement importants malgré la prise en compte de faibles perméabilités verticales entre les formations géologiques (drainance ascendante estimée à 150 000 $m^3$/j de l'Oxfordien vers le Crétacé).

Il est à souligner également que ces échanges entre nappes ont également été mis en évidence dans le volet hydrochimique du programme OAGPRO61 (Rapport BRGM/RP-71026-FR) illustrant à nouveau l'existence d'une compartimentation verticale et horizontale des aquifères et donc de circulations complexes sur ce bassin-versant.

Les échanges entre nappes mis en évidence sur ce bassin versant et l'existence probable de secteurs où la nappe et les cours d'eau (l'Huisne et ses affluents) ne seraient pas connectés du fait des décalages lithologiques opérés par de nombreuses failles majeures (Figure 65 page suivante), milite pour le fait d'y acquérir d'avantage d'informations sur le fonctionnement hydrologique des principaux sous-bassins et ensuite de développer un modèle conceptuel qui pourra servir de base à la construction d'un modèle maillé spatialisé, dont le paramétrage et calage permettra d'introduire davantage de complexité qu'avec des modèles globaux.

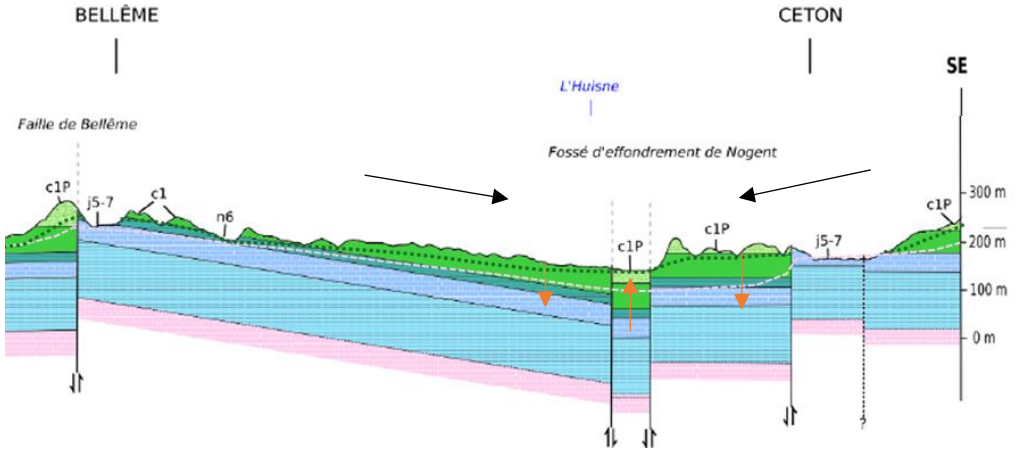



*Figure 65 : Coupe géologique sur le bassin versant de l'Huisne, en pointillés superposition des nappes oxfordiennes et crétacées du bassin de l'Huisne, les flèches horizontales matérialisent les écoulements et les flèches verticales les effets de drainance mis en avant*
*(Rapport Synthèse Géologique et structurale RP-69292-FR, modifié)*

Comme évoqué plus avant, la mise en œuvre d'un modèle maillé sur ce territoire complexe, nécessitera l'acquisition de données complémentaires permettant de consolider les connaissances et la représentation du modèle conceptuel : à la fois sur la géométrie des formations géologiques, le niveau des nappes, sur le niveau et débit des cours d'eau (profils en long) et la compilation de données de paramètres hydrodynamiques (réinterprétation de pompages d'essais), éléments déjà en partie proposés par le bureau d'études pour améliorer les performances du modèle existant ou d'en développer un nouveau, qui intégrera les subtilités des variations géométriques des aquifères et de leur substratum.

Bien qu'ayant un fonctionnement encore largement mal appréhendé, ce bassin versant possède l'un des potentiels hydrogéologiques les plus intéressants à l'échelle du département de l'Orne. Les prélèvements en eaux souterraines y sont importants (cf. paragraphe 2.2) mais relativement limités au regard de la capacité des différents aquifères (ils ne représenteraient que 2% du volume infiltré). Il existe donc vraisemblablement également un potentiel de prélèvements supplémentaires sur ce bassin versant qui reste à mieux valoriser (ce qui est cohérent avec les éléments mis en avant dans l'étude volume prélevable SAFEGE, 2015 pour la partie Ornaise du bassin de l'Huisne).

Il est à noter que la piézométrie réalisée dans le cadre de ce programme OAGPRO61 a démontré que les nappes du Cénomanien (craie et sables du Perche) sont en majorité libres dans le département de l'Orne et que les écoulements sont drainés par le fossé de l'Huisne sur

l'ensemble de son bassin versant. Par ailleurs, les études récentes (RP-70301-FR[21] et RP-62961-FR) indiquent que l'aquifère Cénomanien de l'Orne serait déconnecté de l'aquifère captif régional du bassin Loire-Bretagne (compartimentation géométrique/structurale). De fait, les formations du département de l'Orne ne contribueraient donc pas à son alimentation.

**Dans ces conditions, le maintien du secteur Ornais du bassin de l'Huisne dans la ZRE pose donc question au regard des connaissances géologiques et hydrogéologiques actuelles.**

- **Guiel et Charentonne, Risle, Iton, Avre et Eure**

Les cours d'eau drainant le pays d'Ouche et du Thymerais ont dans l'ensemble des caractéristiques similaires. Ils sont tous alimentés par l'aquifère régional de la craie.

Leur bilan hydrologique fait apparaitre que la contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau est assez importante : comprise entre 50 et 70 % en moyenne.

Leur coefficient d'emmagasinement est assez similaire, proche de 1%, il a cependant été évalué à 6 % dans le cas de la Charentonne (choix d'un piézomètre hors bassin). Ces grandeurs sont représentatives des formations crayeuses, elles indiquent que la nappe y possède un comportement globalement libre (à nuancer parfois avec la couverture des altérites à silex, cf. RP-69331-FR).

Le bilan hydrologique met également en évidence que tous ces bassins sont caractérisés par l'existence de pertes ou gains. Les pertes sont parfois très importantes, comme sur les bassins versants de l'Iton, de l'Avre et de l'Eure, celles-ci se produisent au sein de systèmes karstiques qui se sont développés, notamment autour des systèmes faillés de Senonches et de l'Eure (structures N110)[22].

En dehors du rôle des failles et du développement du karst, la présence des sables du Perche semble également jouer un rôle fondamental pour expliquer le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des bassins versants du sud du territoire (Avre et Eure en particulier). Pour illustrer, on précise que la rivière de l'Eure prend naissance sur les contreforts du massif de Senonches. Sur son extrémité amont, l'écoulement de l'Eure est contrôlé par la faille de l'Eure (direction NO-SE, parallèle à la faille de Senonches, cf. RP-69292-FR et RP-69331-FR) ; celle-ci met en contact les Sables du Perche et la Craie de Rouen avec les formations turoniennes (bloc sud affaissé). Dans le compartiment nord, des sources issues de la nappe perchée des sables du Perche participent alors à l'alimentation du cours d'eau, soit directement (via des petits rus) ou indirectement en alimentant la craie du compartiment sud (secteur de Neuilly sur Eure-Manou).

Toutefois, sur la tête du bassin versant, des assecs sont ponctuellement observés lors des étiages sévères (2019, 2022) en particulier au droit de la station ONDE de Neuilly-sur-Eure (station d'observation la plus amont) dans le département voisin de l'Eure et Loir. Deux hypothèses sont évoquées pour expliquer ce régime : la première est qu'au fur et à mesure que les Sables du Perche s'enfoncent sous les argiles à silex et la craie marneuse, la nappe devient

[21] MODGEAU : Modélisation Géologique de la Sarthe et du Maine et Loire pour une gestion des ressources en eau - 2020.
[22] Le caractère karstique de l'aquifère de la craie a déjà été souligné dans la phase 1 de l'étude (cf. Rapport RP-69331-FR).

captive et sa productivité se dégrade. La seconde est que sur l'extrémité amont du bassin versant, les terrains en surface sont plus ruisselants avec un flux d'infiltration qui représenterait en moyenne la moitié des pluies efficaces seulement (altérites plus argileuses), limitant de fait sa recharge.

Une autre explication pourrait être la déconnexion temporelle entre eaux souterraines et eaux de surface. Ce point est documenté plus en aval, sur le secteur de Courville, où la liaison hydraulique entre eaux superficielles et eaux souterraines semble disparaître. L'Eure serait alors en position perchée et infiltrante au regard de l'évolution de son débit à la baisse, à l'image de l'Avre voisine au passage de la faille de Senonches (cf. Figure 66).

Les pertes affectent le débit spécifique d'étiage des cours d'eau. Ainsi ceux des têtes de bassin de l'Eure et de l'Avre comptent parmi les plus faibles du département (respectivement 0,57 et 0,18 l/s/km²). Ainsi à titre d'exemple, un quart de la recharge serait interceptée par l'Eure à la station de Saint-Luperce, les 3/4 restants s'écouleraient en souterrain (expliquant donc les facteurs d'échange importants calculés par les modèles).

Aussi, même si les tronçons amont de ces deux cours d'eau Eure et Avre n'ont pas fait l'objet d'investigations de terrain dans le cadre de leurs études respectives pour mieux caractériser le fonctionnement des zones de pertes naturelles : « Etude de la nappe de la craie entre Perche et Beauce (2022) » Rapport RP-72056-FR, et synthèse du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Avre - Rapport BRGM/RP-60458-FR, David P.-Y. (2012) ; elles apparaissent tout de même largement soutenues par les eaux souterraines et peu impactées par les prélèvements (peu nombreux).

Le Guiel, la Charentonne et la Risle possèdent à l'inverse un débit spécifique à l'étiage très important (> 3 l/s/km²) témoignant à la fois de l'apport important de la nappe de la craie à l'hydrosystème mais probablement également, de gains dus à d'importantes résurgences karstiques (probable capture de bassins limitrophes).

Ces éléments témoignent donc de l'existence de circulations complexes entre eaux souterraines et superficielles sur ces bassins versants. Cette spécificité engendre une difficulté pour les modèles globaux à reproduire fidèlement les débits aux exutoires (nécessité de faire intervenir des pertes ou gains), dégradant parfois leur coefficient de performance (ces derniers restent tout de même satisfaisants).

**Pour conclure, le potentiel hydrogéologique de ces têtes de bassins-versants est intéressant d'autant que l'ensemble des prélèvements (dans les eaux souterraines et superficielles) y sont aujourd'hui encore relativement limités. Toutefois leur fonctionnement karstique rend le calage des modèles et l'évaluation des pressions plus complexes, d'autant que ce fonctionnement n'est pas toujours bien connu ou appréhendé.**

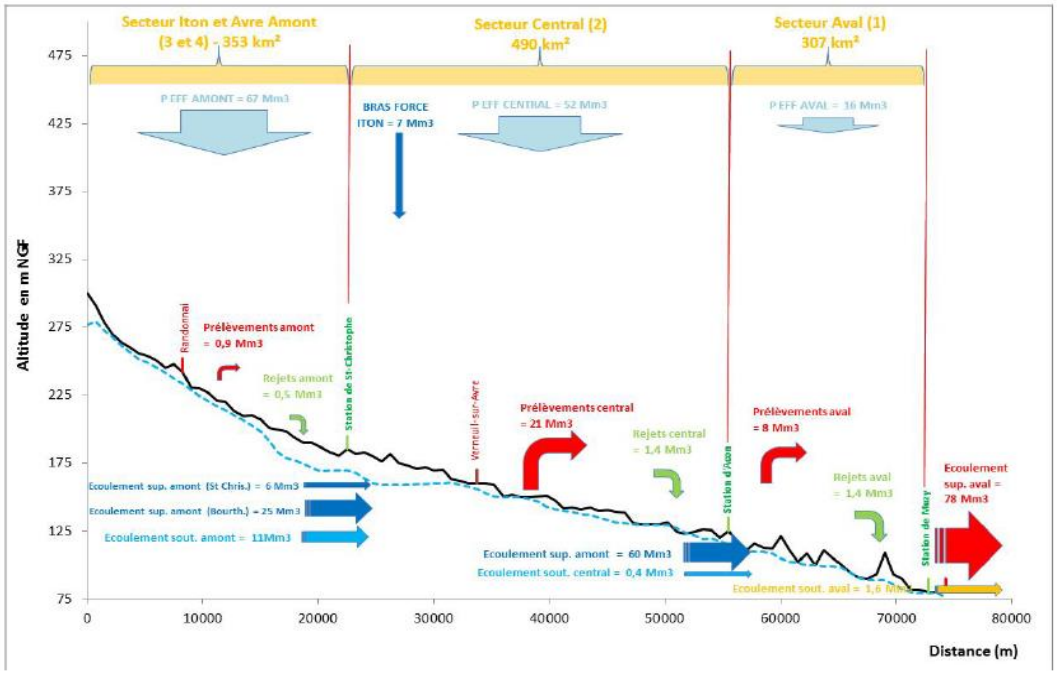



*Figure 66 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Avre en période de basses eaux - Rapport BRGM/RP-60458-FR, David P.-Y. (2012)*

- **Touques et Vie**

Les deux bassins versants du Pays d'Auge (Touques et la Vie) sont caractérisés sur le plan hydrogéologique par la présence de deux formations aquifères superposées abritant la nappe libre de la craie, et la nappe des formations oxfordiennnes, libre à captive selon la configuration géomorphologique. On rappellera que le bassin de la Vie n'a pas été modélisé dans cette étude.

Sur le bassin versant de la Touques, le modèle indique une très forte composante d'alimentation souterraine au débit de la rivière (> 80%). Ces apports se traduisent par une valeur de débit spécifique d'étiage relativement bonne, puisque supérieure à 2,5 l/s/km² (idem pour la Vie qui possède la même valeur caractéristique).

Les paramètres de calage des modèles nous indiquent que le coefficient d'emmagasinement global du système de la Touques est faible, de l'ordre de 0,1 % témoignant d'effets capacitifs assez médiocres du Roussier de Gacé (référence du piézométrique). Le coefficient de partage RUIPER est favorable à l'infiltration, bien que le relief et les pentes soient assez importants sur le bassin.

Le modèle, à double réservoir nous indique que la composante lente, probablement représentative du fonctionnement de la nappe captive inertielle, serait majoritaire (> 55 %).

Bien que ces résultats aient démontré que les aquifères de ce secteur contribuent de façon importante au fonctionnement de l'hydrosystème, il conviendra toutefois de rester prudent sur la disponibilité de ces ressources car ces chiffres ne montrent pas la capacité de la ressource à se reconstituer, et comment s'effectuent ces apports d'eaux souterraines en particulier lors des étiages.

En effet, il est légitime dans ce contexte de s'interroger sur la façon dont va s'effectuer la recharge de l'aquifère oxfordien : les infiltrations par les maigres zones d'affleurement et la drainance de la nappe de la craie vers la nappe oxfordienne est-elle suffisante pour reconstituer rapidement et durablement les ressources ? Des prélèvements importants dans les eaux souterraines pourraient de fait venir limiter encore l'effet de la recharge.

Dans ce contexte, le BRGM recommande d'étudier de façon plus approfondie, le fonctionnement des ressources en eaux souterraines de ces deux bassins versants du Pays d'Auge Ornais, en particulier la recharge et le renouvellement de l'aquifère oxfordien, en grande partie captif sur ce territoire. Le suivi du comportement des nappes (réponse aux évènements hydro-climatiques, effets des prélèvements dans des doublets piézométriques, cartes locales de la piézométrie) sont des informations qui permettront d'affiner le calage des modèles hydrogéologiques disponibles. Ces derniers pourront alors être mis à jour et utilisés pour répondre à ces questions.

Sur le bassin de la Vie (non modélisé dans cette étude), on rappellera que les formations oxfordiennes viennent se biseauter, leur épaisseur diminuant progressivement vers l'Ouest. Dans les vallées, les lits des cours d'eau ont alors parfois incisé celles-ci. La rivière repose alors directement sur les marnes calloviennes (Figure 67), limitant vraisemblablement les échanges nappe-rivière et limitant également, de façon générale, la contribution des eaux souterraines au fonctionnement du bassin de la Vie.

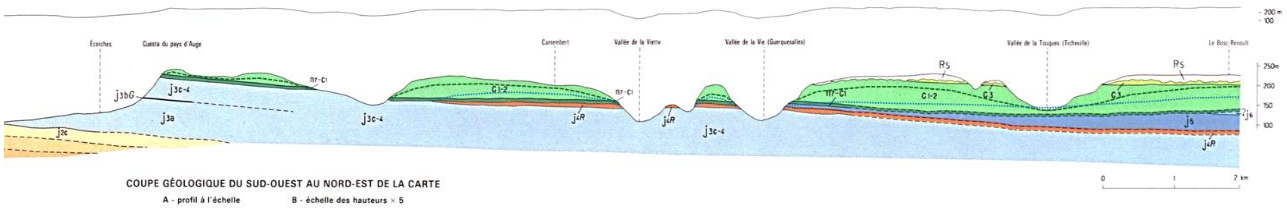



*Figure 67 : Coupe géologique du Pays d'Auge (Feuille géologique au 1/50 000e de Vimoutiers – BRGM, modifié). En vert les formations crayeuses et leur nappe représentée en pointillés, en bleu foncé et orange les formations oxfordiennes et leur nappe, enfin en bleu clair les formations marneuses calloviennes constituant le substratum, peu perméable.*

- **Dives**

L'amont du bassin de la Dives, situé dans le département de l'Orne, se trouve être le prolongement méridional de l'aquifère Bajocien-Bathonien de la plaine de Caen du point de vue géologique. Les formations du Jurassique moyen qui le composent viennent buter sur l'extrémité Est de la structure (paléozoïque) de la zone bocaine (celui-ci est donc a priori déconnecté du bassin de l'Orne couvrant la plaine d'Argentan). Plus à l'est, ces formations s'ennoient vers le nord-est sous les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé rencontrées dans le Pays d'Auge.

Le bilan hydrologique, fourni par une simulation réalisée en 2013 (cf. rapport BRGM/RP-62648-FR) nous indique que les eaux souterraines fournissent une faible contribution, de l'ordre de 20 %, en moyenne, au fonctionnement hydrologique global du bassin versant. Cette information est corroborée par ailleurs par le faible débit spécifique du cours d'eau à l'étiage (proche de 1,5 l/s/km²). Celui-ci est presque comparable à celui de la Varenne, pour le domaine de socle. Cette valeur de débit spécifique à l'étiage est presque deux fois moins importante que celle de la Risle et de la Charentonne (supérieure à 3 l/s/km²). Cette différence peut être expliquée par la présence des marnes calloviennes, qui recouvrent l'aquifère principal Bajocien-Bathonien le

rendant captif sur les pourtours nord-est du bassin versant (en limite avec le bassin de la Vie). Cette couverture marneuse limite de fait les infiltrations. Mais ce n'est pas la seule hypothèse.

Le coefficient d'emmagasinent global retenu par le modèle, indique que les formations carbonatées du Jurassique moyen (Dogger) ont une bonne capacité, de l'ordre de 1 à 3% (voisines de celles des formations crayeuses). Bien que ces valeurs soient favorables, l'alimentation en eau souterraine ne domine pas en termes de part de contribution.

Pour expliquer cette particularité sur le bassin de la Dives, il est possible d'évoquer un ensemble d'autres hypothèses (non vérifiées) - (cf. Figure 68) :

- Le fait que les formations aquifères aient une moins grande facilité à laisser circuler les eaux en leur sein : perméabilités et épaisseurs utiles moindres (faciès de bordures ou d'écueils) ? Il existe très peu de données disponibles pour se comparer aux paramètres hydrodynamiques d'autres secteurs comme ceux de la plaine d'Argentan ou d'Alençon ou sur le secteur de Falaise ;
- Le fait que la rivière puisse être perchée ou déconnectée des eaux souterraines ou que celle-ci puisse alimenter les eaux souterraines, localement ou à plus grande échelle ;
- L'existence d'écoulements profonds (stratification de l'aquifère) en rive droite, pouvant suivre alors le pendage régional des couches, vers le nord-est, en s'appuyant sur des niveaux silicifiés ou de caillasses existantes dans les formations du Bathonien (Ménillet et al.,1994) – (cf. Figure 68) ;
- Une capture des eaux souterraines de l'amont du bassin versant vers le bassin de la Vie, tel que suggéré par la piézométrie dessinée pour les formations du Bajocien-Bathonien (Rapport BRGM/RP-73813-FR) ;
- La déconnexion du bloc situé au sud de Tournai sur Dives en rive gauche n'a pas été mis en évidence dans les travaux de construction de la surface piézométrique : par nombre de mesures insuffisantes ? ou par des mesures disponibles uniquement dans les formations de surface (compartimentation verticale de l'aquifère ?) cf. rapport RP-73813-FR.

On peut également ajouter, que la pluviométrie enregistrée sur ce bassin versant y est l'une des plus faibles du département, comme sur le bassin de l'Huisne à l'opposé (au sud-est de l'Orne) – (cf. Figure 55 page 82).

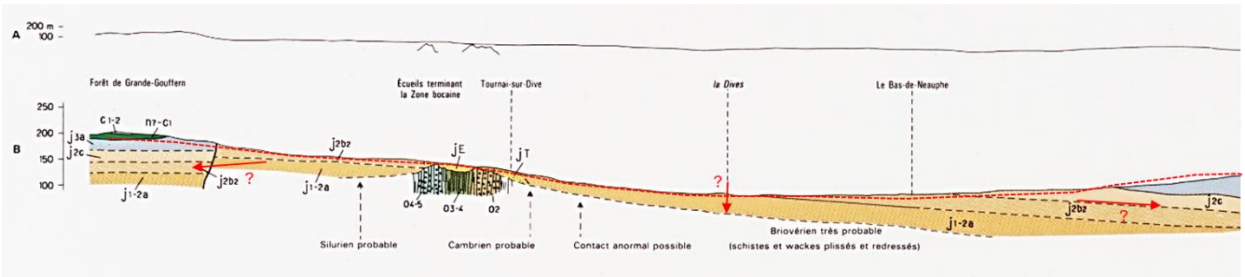



*Figure 68 : Coupe géologique de la campagne de Trun, en pointillés rouge la surface piézométrique supposée de la nappe du Bajocien-Bathonien, les flèches matérialisent les hypothèses d'écoulements non vérifiées à ce jour*
*(Feuille géologique au 1/50 000e de Vimoutiers – BRGM modifiée)*

Pour conclure, le potentiel hydrogéologique du bassin de la Dives apparait donc comme « moyen » par comparaison à ses voisins implantés dans la Craie, mais cohérent avec les résultats obtenus sur le bassin de l'Orne mitoyen.

Par ailleurs, les prélèvements pour l'alimentation en eau potable y sont actuellement limités, du fait de la qualité dégradée des eaux souterraines (cf. rapport RP-73813-FR).

#### *4.4.1.4 Synthèse des bilans hydrologiques*

Le tableau de synthèse des bilans hydrologiques simplifiés obtenus à l'aide des modélisations globales (Figure 58 page 87) fait apparaitre les éléments suivants :

- **En domaine Sédimentaire**, les bassins versants crayeux de l'Est du département sont ceux possédant le meilleur soutien au débit des cours d'eau malgré leur fonctionnement parfois karstique, pouvant impliquer la présence de pertes en rivière ou de différenciation entre surface de bassin topographique ou souterrain ou encore d'échanges entre bassins limitrophes (cas de l'Iton et de l'Avre, du Guiel et de la Charentonne notamment) et présentent un potentiel intéressant pour de futurs prélèvements, comparativement parlant aux autres bassins versants.[23]

  Sur les bassins versants de la Vie et de la Touques et de l'Huisne les conditions de recharge et d'exploitation des aquifères des formations céno-turoniennes et de celles de l'Oxfordien, superposés, méritent une attention particulière. Les travaux de synthèse mis en œuvre ont permis de souligner l'existence d'une compartimentation et de circulation complexe (drainance) impactant leur fonctionnement (recharge et vidange). Ces éléments mis en avant militent pour la nécessité de mieux appréhender l'incidence des prélèvements et à déterminer les volumes réellement disponibles dans ce contexte.

  L'aquifère Aalénien-Bajocien-Bathonien, bien que largement distribué et accessible au centre du département de l'Orne, possède un potentiel hydrogéologique in fine bien moins intéressant comme le démontre les résultats obtenus sur le bassin de la Dives et sur les bassins de la Sarthe et de l'Orne car il s'y trouve en grande partie captif sous les formations marno-calcaires calloviennes. Sur les bassins de la Sarthe et de l'Orne, très grands et hétérogènes sur le plan géologique et hydrogéologique, la recharge estimée par les modèles y est donc très faible, (cf. Figure 69). Dans ce contexte, la soutenabilité des prélèvements doit donc être questionnée notamment au regard de la capacité de la ressource à se renouveler (capacité de recharge, effets de drainance).

  Sur le bassin de la Dives, l'usage des eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable est par ailleurs limité par une qualité dégradée de la ressource, démontrant une forte vulnérabilité de la ressource libre (cf. Rapport BRGM/RP-71026-FR).

- **En domaine de socle**, le soutien des eaux souterraines au débit des cours d'eau est bien moindre, comparativement parlant. Mais, dans ce contexte, le potentiel des bassins versants de la Varenne et de la Mayenne s'est distingué.

  Des études complémentaires seraient nécessaires pour permettre de vérifier les différentes hypothèses mises en avant dans ce volet quantitatif (rôle des altérites, rôle des formations paléozoïques et différenciation géologique des aquifères formations briovériennes +/- métamorphisées) pour expliquer leur meilleure capacité et notamment pour les différencier des bassins de la Rouvre et du Noireau, au nord du département, qui

[23] **Attention cette étude ne constitue pas une étude de définition des volumes prélevables ou disponibles.**

possèdent à l'inverse une plus faible contribution des eaux souterraines au fonctionnement hydrologique de leur bassin.

Il est à noter que l'ensemble des prélèvements dans les eaux de surfaces et les eaux souterraines est important sur les bassins de la Varenne-Egrenne et de la Mayenne, limitant vraisemblablement la création de nouveaux points de prélèvements, sauf si report modal de ces prélèvements des eaux de surface vers les eaux souterraines (substitution rendue a priori possible par la capacité supérieure supposée de leurs aquifères), cf. études volumes prélevables réalisés pour le SAGE Mayenne.

**Important** : la notion de potentiel hydrogéologique ou capacité aquifère (exprimée ici à grande échelle) est à distinguer de la productivité locale des formations aquifères (évaluée par le biais des forages). En effet, des secteurs décrits comme ayant un faible potentiel hydrogéologique peuvent avoir des aquifères à forte productivité et vice-versa. C'est le cas par exemple des ouvrages « Val de Breuil » à Briouze, « Forge » à La Selle-le-Forge, « La Rouillerie » à Caligny, « L'Être » à St-Pierre-du-Regard » qui possèdent une « bonne productivité » pour satisfaire localement les besoins d'alimentation en eau potable et qui pourtant sont situés sur les bassins du Noireau et de la Rouvre qui ont été identifiés dans cette étude comme ayant un moindre potentiel hydrogéologique (estimation de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement hydrologique global du bassin versant par la modélisation).[24]

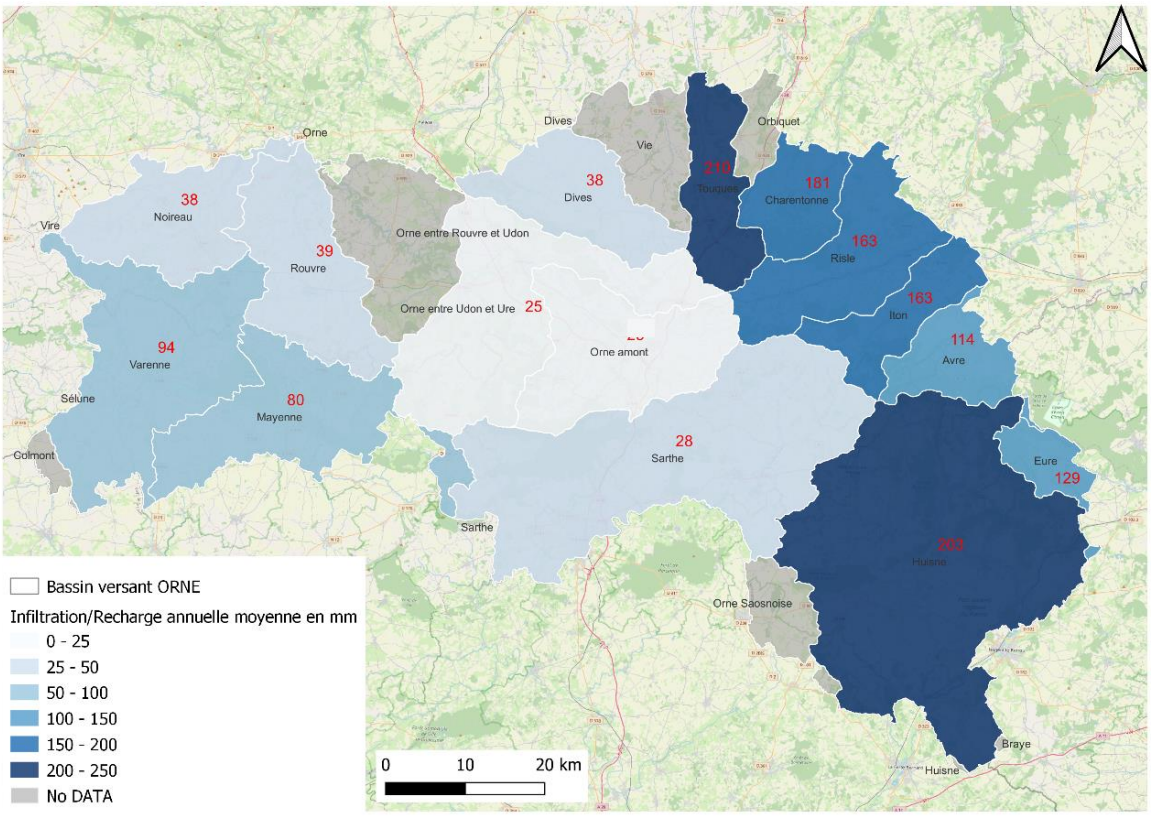



*Figure 69 : Estimation de la recharge annuelle moyenne pour chaque bassin versant*

[24] Se référer au rapport de synthèse des connaissances hydrogéologiques RP-69331-FR pour ce qui concerne la productivité des forages.

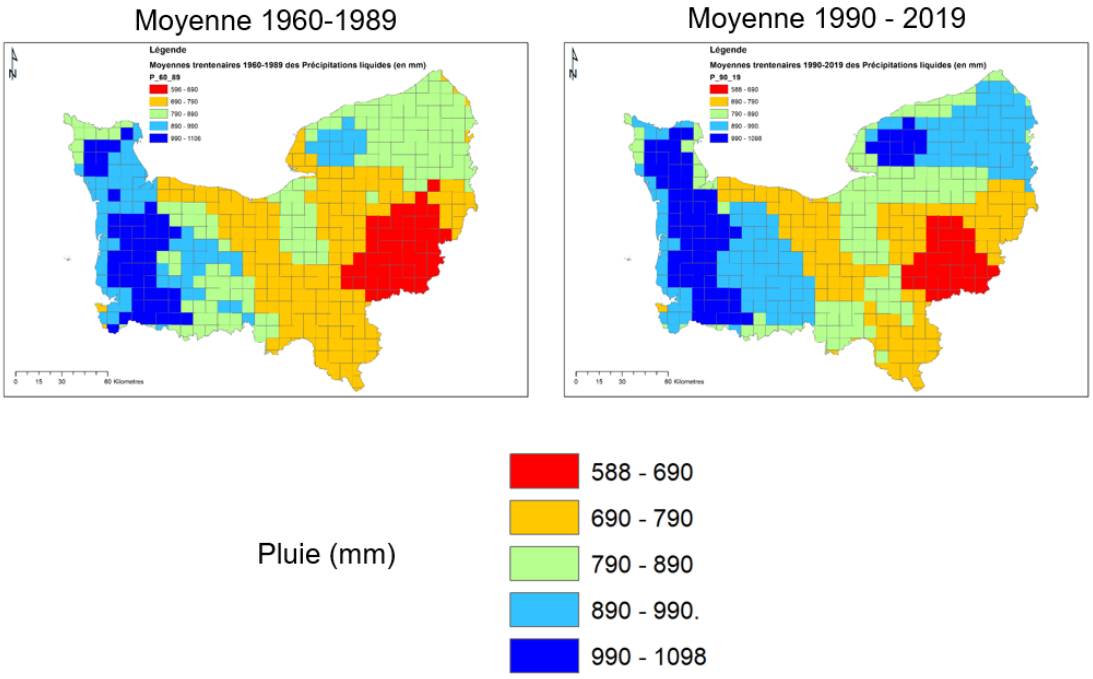
### 4.4.2 Evolutions possibles des ressources dans le futur, en contexte de changement climatique (synthèse bibliographique)

**Important : Le programme OAGPRO61 ne comportait pas d'analyse des possibles évolutions tendancielles futures des ressources en eau de surface et souterraines du département de l'Orne.** Les éléments rapportés dans la suite de ce paragraphe sont donc issus d'une compilation de différentes études disponibles au moment de l'écriture de ce rapport.

Le calcul des moyennes trentenaires de 1960-1989 et 1990-2019 a été réalisé à l'échelle de la Normandie à l'aide des données SAFRAN. Elle montre pour le département de l'Orne :

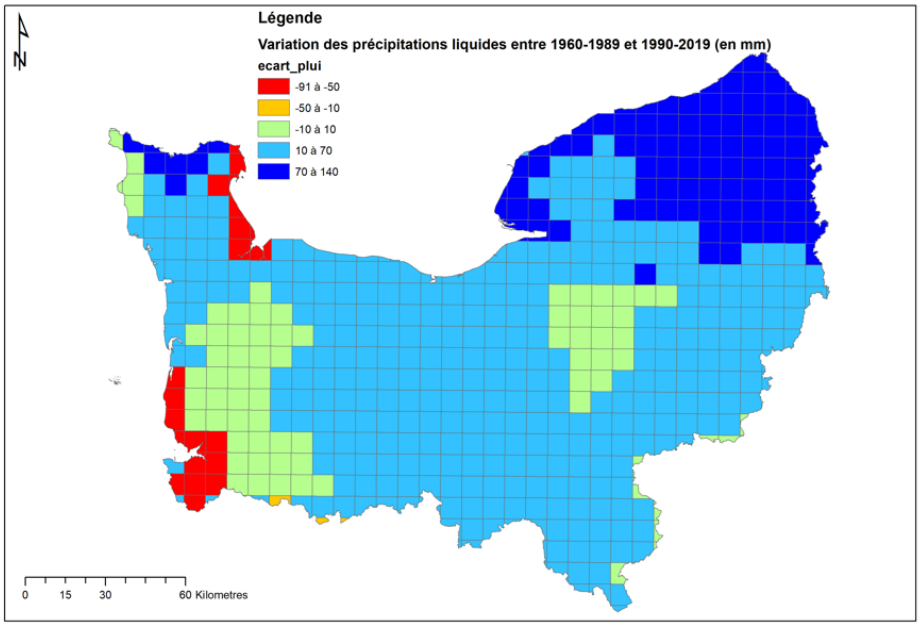
- **une distribution contrastée des précipitations** (Figure 70a), **notamment entre l'Est plus sec et l'Ouest plus arrosé** (cf. également volet 1 de l'étude, rapport RP-69331-FR) avec des moyennes trentenaires de précipitations comprises entre 690 à 990 mm/an et une évolution légèrement positive de la pluviométrie entre ces deux périodes trentenaires (Figure 70b), ce qui n'est pas le cas des façades littorales qui connaissent sur une même période des évolutions beaucoup plus marquées,
- **une augmentation de l'évapotranspiration (ETP) sur l'ensemble du département de l'Orne**, passant d'une fourchette de 610 à 700mm/an à une fourchette de 700 à 790 mm/an, avec une augmentation significative pour l'ensemble du Sud-Est du département, en particulier sur les bassins de l'Huisne (Perche) et la Sarthe (Figure 71b).

Les ressources en eau du Sud-Est du département de l'Orne apparaissent ainsi plus exposées aux effets des sécheresses météorologiques, ainsi que la plaine d'Argentan-Trun-Sées dans une moindre mesure.




*Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE*

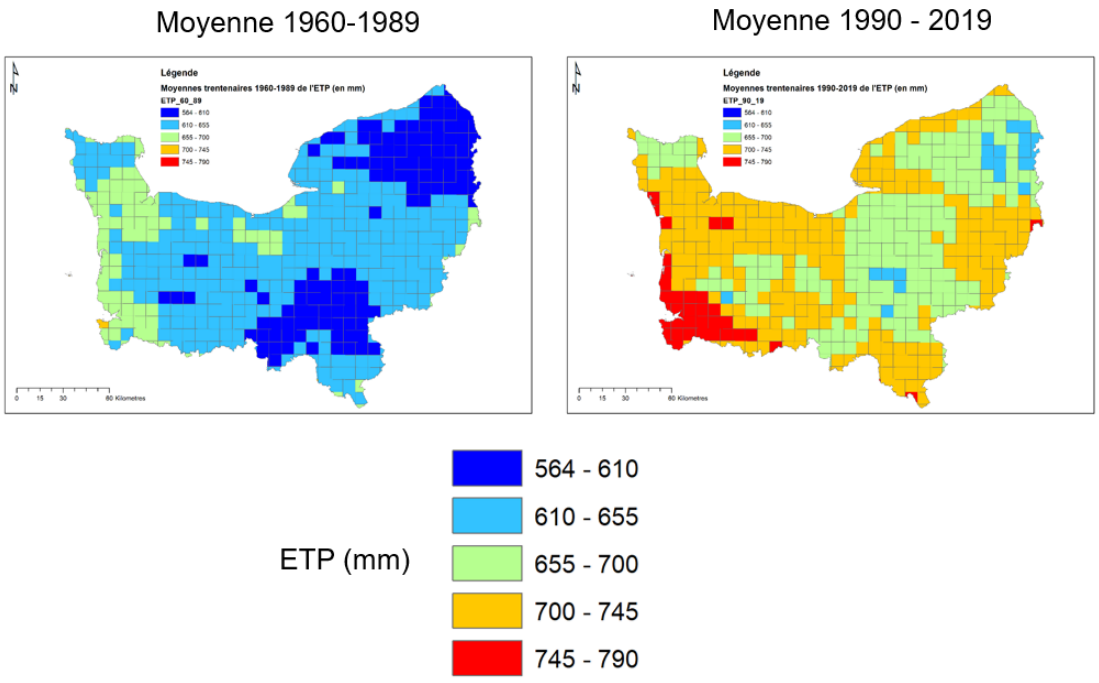
(a)




*Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE*

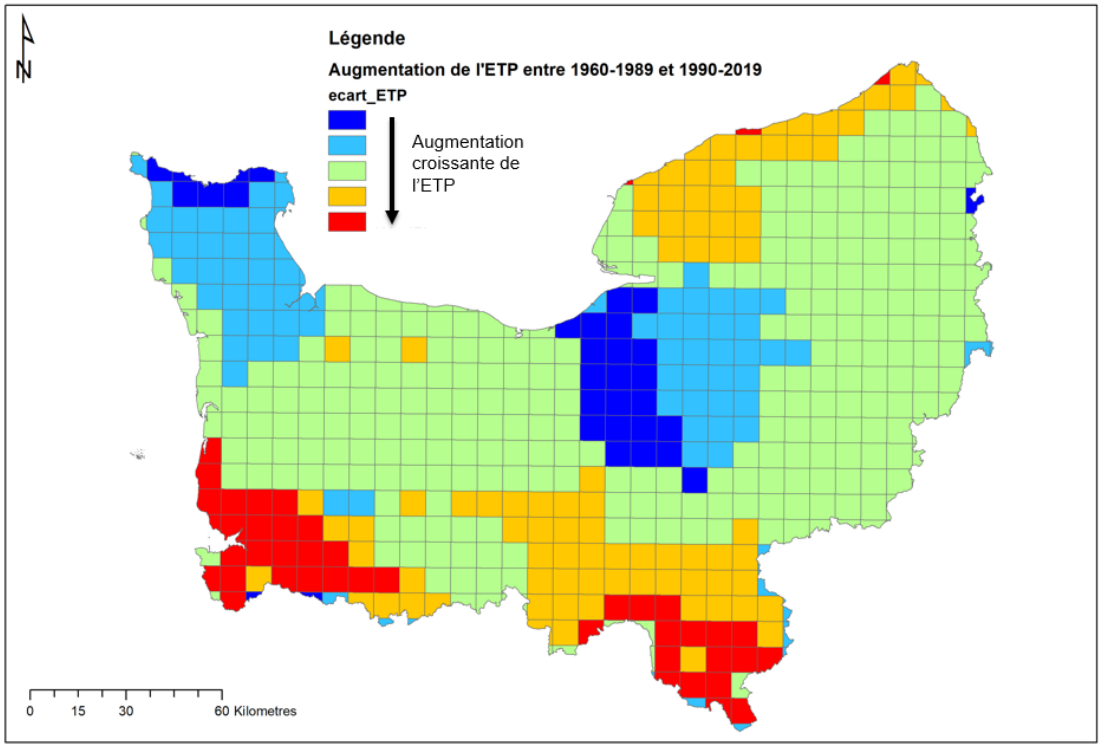
(b)

*Figure 70 : Evolution des précipitations sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes (source : Rapport BRGM/RP-71398-FR)*




*Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE*

(a)




*Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE*

(b)

*Figure 71 : Evolution de l'Evaporation Potentielle (ETP) sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes (source : Rapport BRGM/RP-71398-FR)*

Etant donc désormais établi que les effets du changement climatique se font déjà ressentir aujourd'hui (comme l'attestent déjà les enregistrements de précipitations et d'ETP en Normandie) et qu'une accentuation des phénomènes est attendue dans les prochaines décennies selon les prévisions du GIEC (AR6) ; nous nous sommes alors intéressés aux travaux de modélisation qui ont cherché à modéliser l'impact de ces changements sur les ressources en eau et qui ont été mis en œuvre ces dernières années à des échelles nationales et locales. Les résultats des études suivantes ont donc été synthétisés :

- **L'étude Explore 2** réalisée à l'échelle nationale par un consortium scientifique (Météo France, Inrae, BRGM, EDF et Universités) s'attache à traiter plusieurs scénarii hydroclimatiques possibles et à étudier leurs effets sur les débits des rivières et niveaux des nappes à différentes échelles de temps (approche à grande échelle).
- **L'étude volumes disponibles menée à l'échelle de la ZRE Bajocien-Bathonien** par le BRGM, utilisant le modèle maillé « régional », a réalisé des projections sur l'évolution des niveaux des nappes et débit des cours d'eau (étude en cours ; Arnaud et al., 2025) qui concernent l'ensemble des bassins versants du nord du département de l'Orne (du Noireau à la Touques).
- **L'étude HMUC[25] menée à l'échelle du SAGE Sarthe amont** par SUEZ Consulting, a réalisé des projections d'évolution des débits des cours d'eau en utilisant des modèles globaux (Rapport Phase 1 - Objectif 5 ; Suez Consulting., 2022).

#### *4.4.2.1 Explore 2*

« Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce auquel les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'Écologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France. Le projet Explore2 avait pour objectif, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des dernières publications du GIEC, mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau. »[26]

La sélection de couple de modèles climatiques globaux et régionaux (GCM/RCM) retenue dans Explore2 est basée sur 6 GCMs CMIP5 (les mêmes que DRIAS-2020) et 9 RCMs (les 8 mêmes que DRIAS-2020 et le nouveau HadREM3-GA7-05), soit 17 couples GCM/RCM distincts). Il est à noter que les simulations EURO-CORDEX basées sur ces 17 couples ne sont pas toutes disponibles pour les 3 trajectoires d'émission de gaz à effet de serre (RCP) du GIECC. In fine, les simulations sélectionnées comptent donc 36 projections du climat futur (17 RCP8.5, 9 RCP4.5 et 10 RCP2.6) – cf. Figure 72.

[25] Hydrologie-Milieux-Usages-Climat (HMUC)
[26] https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2

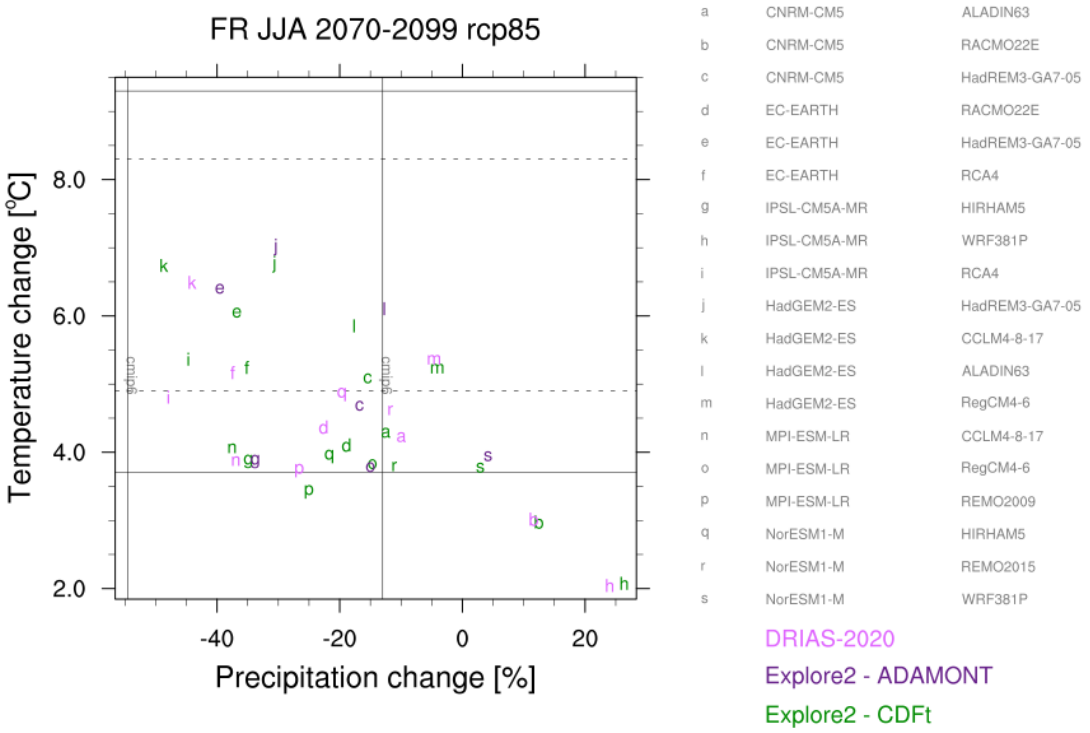



*Figure 72 : Changements en température et précipitation de l'ensemble des simulations pré-sélectionnées par Explore2 pour le travail à l'échelle nationale à l'horizon lointain 2070-2099 (source : https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/354).*

Les résultats et données produites dans le cadre de ce travail sont accessibles, depuis 2024, sur le portail DRIAS-EAU[27].

Pour le département de l'Orne, la médiane de l'ensemble des modèles à l'horizon proche indique :

- une augmentation des débits moyens hivernaux pour l'ensemble du territoire,
- une diminution de ces débits pour les cours d'eau du domaine de socle à l'été et à l'automne (période d'étiage), alors que les cours d'eau du domaine sédimentaire semblent présenter une tendance plus stable ou en légère augmentation.

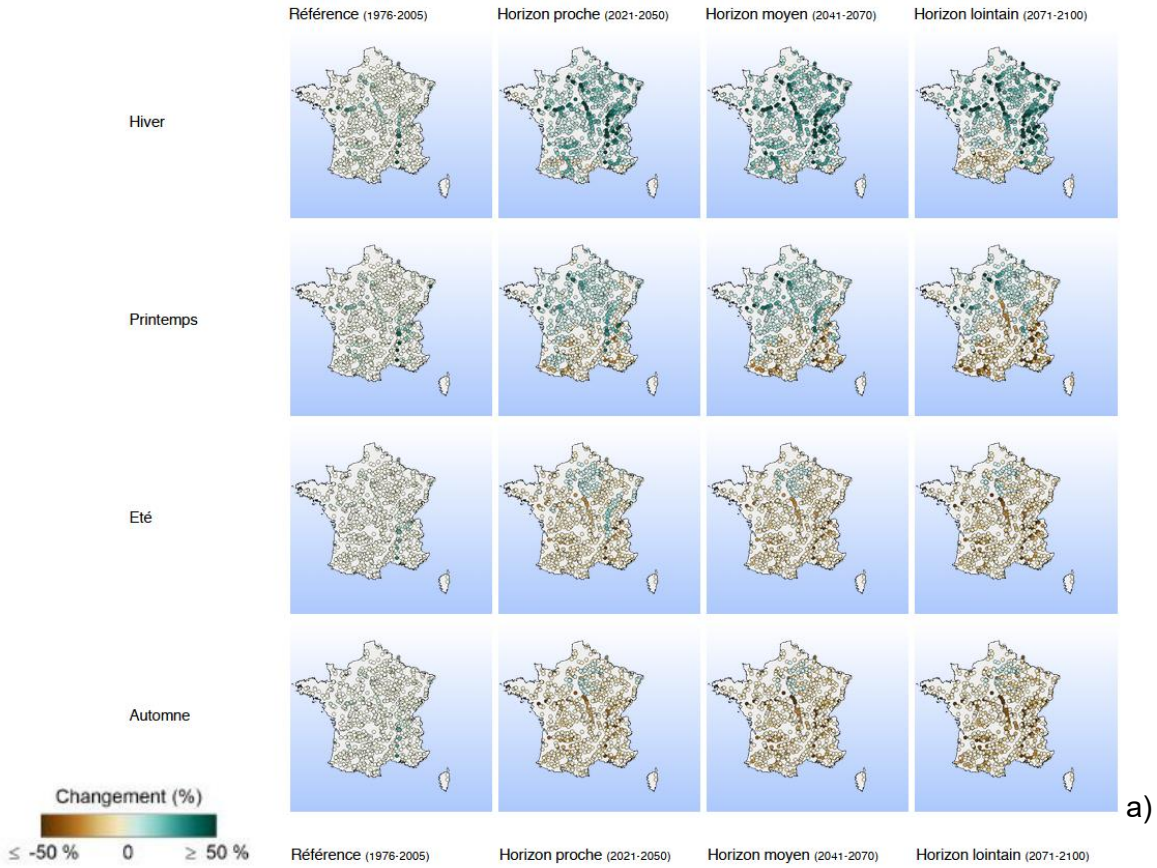
Cette hétérogénéité territoriale semble se traduire également pour les très faibles débits pour l'ensemble des saisons. Ce qui apparaît cohérent avec les résultats présentés plus avant : soutien de nappe / inertie / géologie (Figure 73).

A un horizon plus lointain, on constate que la tendance générale semble toujours la même par rapport à l'horizon proche, avec toutefois une légère accentuation des contrastes, comme le laisse également penser la carte d'évolution des pluies efficaces ci-après (Figure 74 pages suivantes).

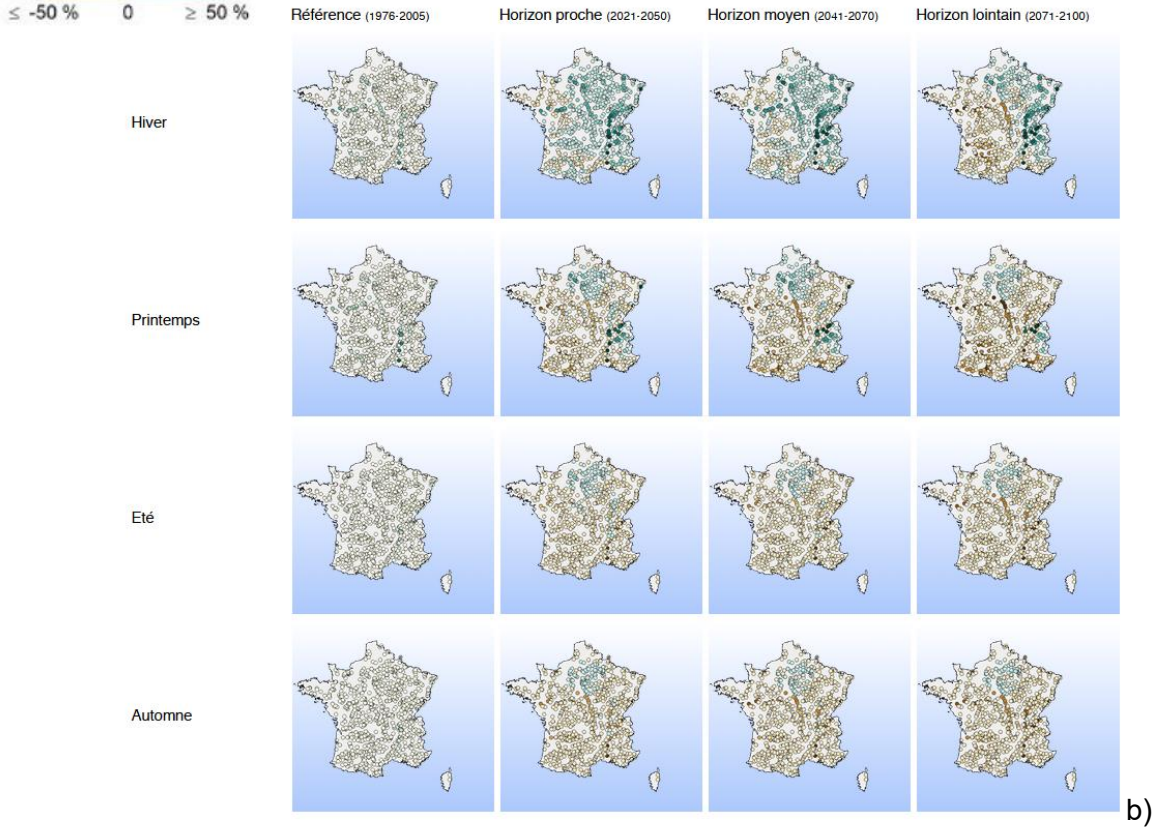
Cette étude nationale apparait intéressante pour dégager des tendances d'évolution futures possibles à l'échelle des grands bassins : Seine, Loire ou encore à l'échelle de régions.

[27] https://www.drias-eau.fr/

A l'image de la descente d'échelle entre modèles climatiques globaux et régionaux, **il apparait nécessaire d'étudier ces tendances à une échelle adaptée aux enjeux territoriaux, c'est-à-dire en utilisant des données locales et outils également mieux représentatifs du fonctionnement d'hydrosystèmes, parfois complexes (contribution des eaux souterraines et échanges nappes-rivières) et de taille plus réduite que les grands bassins versants.**




a)




b)

*Figure 73 : Médiane de l'ensemble multi-modèles DRIAS-2020 / ADAMONT / SIM2, trajectoire d'émissions GES RCP 8.5, a) Ecart du module des débits ; b) Ecart des très bas débits (P5)*

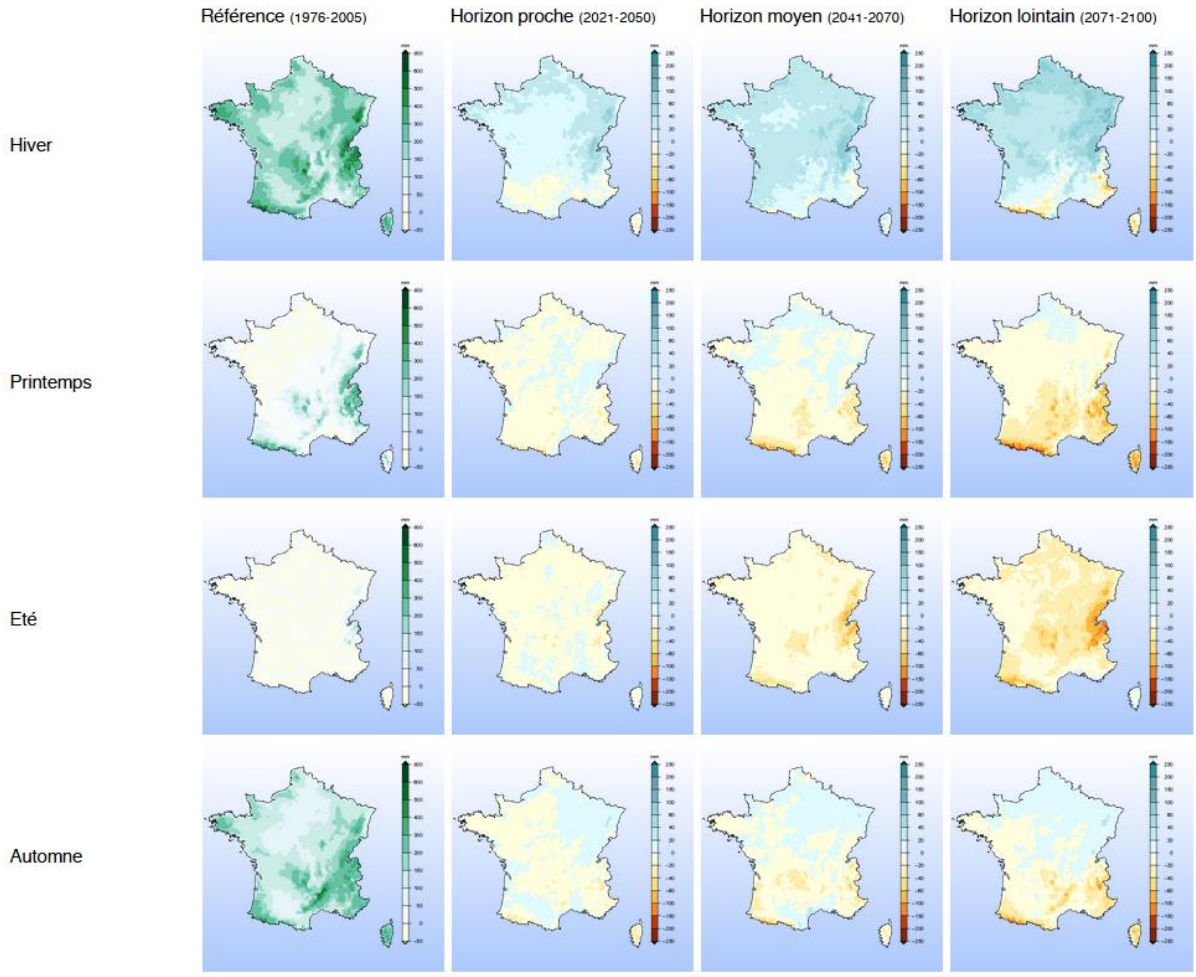



*Figure 74 : Médiane des modèles DIRAS-2020 de pluie efficace cumulée (valeur de référence et écart à cette valeur par horizon)*

### *4.4.2.2 Etude Sarthe Amont*

Données utilisées : DRIAS, modèle « médian » ALADIN63_CNRM-CM5, trajectoires d'émission de GES 4.5 et 8.5 du GIECC (cf. paragraphe précédent sur Explore2 et notamment Figure 72). Chroniques d'usage de l'eau sur la période 2000-2019 et leurs estimations projetées jusqu'à 2060 selon les scénarios d'évolution définis par le COPIL de l'étude.

Principaux résultats obtenus : Etude comparative hydro-climatique (Figure 75) des moyennes interannuelles d'une période de référence actuelle (2000-2019) et d'un horizon plus lointain (2040-2059).

- Précipitations : évolution des cumuls annuels, évolution du nombre de jours de pluie par an, évolution des cumuls mensuels ; évolution du nombre de jours de pluie mensuel.
- Evapotranspiration : écart des cumuls annuels et mensuels.

| | | Horizon 2050 – RCP4.5 | Horizon 2050 – RCP8.5 |
|---|---|---|---|
| ETP | Cumul annuel | +8% par rapport à la moyenne 2000-2019 | +6% par rapport à la moyenne 2000-2019 |
| | Cumul mensuel | Augmentation globale ; mois de mai, septembre et novembre marqué (+15%) | Augmentation globale ; mois de septembre marqué (+20%) |
| Pluviométrie | Cumul annuel | Tendance faiblement marquée à la baisse (-3%) | Tendance à la hausse (+8%) |
| | Nombre de jours de pluie | Tendance légèrement à la baisse (-3%) | Tendance peu marquée et non significative – maintien du nombre de jours |
| | Saisonnalité des précipitations | Intensification en hiver (10 à 20%) – pluies plus rares toutes l'année excepté en janvier, mois de septembre particulièrement sec (-30%) | Intensification en hiver et début d'été – pluies plus rares et moins intense aux mois d'avril et septembre (-10%) |

*Figure 75 : Synthèse sur l'évolution du climat du bassin amont de la Sarthe avec le couple ALADIN63_CNRM-CM5 (Sources : DRIAS in SUEZ Consulting, 2022)*

Le bureau d'études a défini 2 scenarii tendanciels :

- « haut » associant un maintien des prélèvements et l'utilisation de la trajectoire RCP 4.5
- « bas » associant une baisse des prélèvements et l'utilisation de la trajectoire RCP 8.5

L'utilisation de ces scenarii dans les modèles conduit à des résultats contrastés :

- D'après le scénario « tendanciel haut », le QMNA5 de chaque sous bassin versant diminuera à l'horizon 2050 : -25 % environ par rapport à la période actuelle.
- D'après le scénario « tendanciel bas », le QMNA5 de chaque sous-bassin de la Sarthe sur le département de l'Orne augmentera à l'horizon 2050 : +20 à 25 % environ par rapport à la période actuelle, ce qui peut paraitre surprenant avec la trajectoire RCP 8.5 et traduirait donc un poids important des prélèvements.

Dans les deux cas, l'influence des prélèvements sur le débit des cours d'eau resterait a priori inchangée sur l'amont du bassin versant (Hoëne) mais s'accentuerait légèrement sur les sous-bassins situés plus en aval (-2% Sarthe amont et Orne Saosnoise). On rappellera que le poids des prélèvements est important sur ce bassin de la Sarthe (comme souligné au chapitre 2).

#### *4.4.2.3 Etude ZRE Bajocien-Bathonien*

Données utilisées : DRIAS, utilisation des couples de modèles « médian » CNRM-CM5/ALADIN63 et le modèle « évolutions contrastées défavorables » HadGEM2-ES_MOHC/CCLM4 (plus chaud, plus sec) avec la trajectoire d'émission de GES RCP8.5 du GIEC uniquement. Choix de la collectivité d'étudier deux futurs possibles du climat. Chroniques d'usage de l'eau sur la période 1994-2020 et leurs estimations projetées jusqu'à 2100 selon les scénarios d'évolution définis par le COPIL de l'étude (report consommation année 2019 jusqu'en 2100).

Principaux résultats obtenus : Etude comparative relative des moyennes interannuelles d'une période de référence actuelle (1981-2010), et des estimations pour un horizon proche (2036-2065) et lointain (2071-2100), production de cartes d'anomalies spatialisées (par aquifères et par cours d'eau) : d'impact sur la recharge en mm, niveaux mensuels moyens, min. et max. ; débits mensuels moyens, min. et max. et QMNA5.

L'utilisation de ces données dans les modèles conduit à aux résultats suivants (cf. Figure 76) :

- *Pour un Futur « chaud et saisons contrastées », modèle CCLM4*
  - A l'horizon proche (2036-2065) :
    - Baisse quasi généralisée des niveaux piézométriques quelle que soit la situation hydrologique mais baisse plus marquée en basses eaux. Impact moins marqué sur Orne amont, Dives amont et Touques amont et en domaine de socle[28] en hautes eaux (évolution stable).
    - Baisse quasi généralisée des débits en moyennes et basses eaux, plus marquée en basses eaux, notamment en domaine de socle (moins de soutien de nappe).
    - Evolution globalement stable des débits en hautes eaux (≠ crue), légèrement à la baisse sur l'Orne amont.
  - A l'horizon lointain (2071-2100) :
    - La baisse des niveaux et des débits s'accentue à l'exception des hautes eaux où une inversion de tendance est observée en domaine de socle et sur l'Orne amont.
- *Futur «évolutions limitées», modèle ALADIN63*
  - A l'horizon proche (2036-2065) : des situations contrastées :
    - Baisse modérée quasi généralisée des niveaux piézométriques quelle que soit la situation hydrologique (Hautes-Moyennes-Basses Eaux). Impact modéré en basses eaux sur Orne amont, Dives amont et Touques amont et en domaine de socle en hautes eaux (évolutions plutôt stables).
    - Evolution globalement stable des débits moyens sur Orne amont, Dives amont et Touques amont.
    - Baisse des débits de basses eaux, à l'exception de la Touques.
    - Débits de hautes eaux globalement stables, sauf en domaine de socle et extrémité amont de l'Orne, en hausse.
  - A l'horizon lointain (2071-2100), une inversion de tendance est observée :
    - Hausse généralisée des débits en moyennes et hautes eaux (≠ crue), plus marquée en HE. Certains niveaux de nappe restent en baisse notamment en domaine de socle.
    - Situation contrastée en basses eaux : baisse socle (soutien de nappe moindre) / stable voire ponctuellement hausse sur les bassins versants de la Touques, la Dives et Orne amont.

[28] Les cours d'eau et leurs bassins versants du domaine de socle, représentés dans le modèle, sont ceux de la Rouvre et du Noireau qui prennent tous deux leur source dans le département de l'Orne.

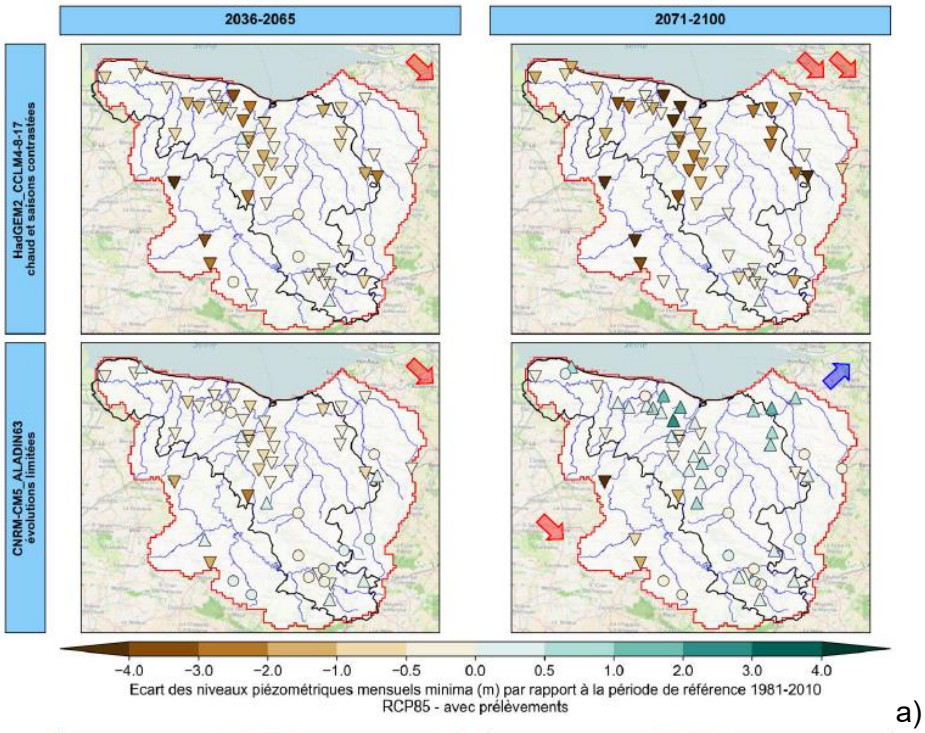



*Figure 76 : a) écarts sur les niveaux minimums mensuels des eaux souterraines, b) écarts sur les QMNA5 des cours d'eau*

#### *4.4.2.4 Remarques pour une meilleure prise en compte des effets du changement climatique à l'échelle du département de l'Orne*

Concernant les projections futures de l'impact attendu du changement climatique sur les ressources en eau, le premier élément à souligner est la difficulté à comparer les résultats entre études.

Très peu d'éléments sont dans les faits réellement comparables entre ces deux études. Cependant, toutes deux tendent à montrer à des baisses de débit minimum des cours d'eau à un horizon temporel assez proche, avec l'utilisation du modèle régional ALADIN63 pour une trajectoire RCP 8.5.

En effet, les méthodologies diffèrent sur :

- Le choix des trajectoires d'émission de GES
- Le choix des modèles : utilisation d'un modèle ou de plusieurs (lesquels), pour quelle stratégie : s'adapter à quels scénarios ?
- Les horizons temporels choisis pour réaliser les moyennes trentenaires : période de référence, mesure des écarts à court, moyen ou long terme
- Les scenarii de prélèvements futurs (stable, hausse, baisse). Si plus chaud, plus de consommation ?
- La comparaison des écarts sur niveaux de nappes et/ou débits des cours d'eau
- Les indicateurs statistiques de mesure d'écart : haut, moyen, bas sur niveau/débit annuels ou mensuels
- Les indicateurs d'état : QMNA5, VCN10, recharge

Depuis la réalisation de ces études, l'Etat français a donné un cadre de travail commun aux organismes :

- Trajectoire de référence pour l'adaptation au Changement Climatique (TRACC[29]) = +4°C en 2100, choix des couples de modèles de référence
- Objectifs du plan national de stratégie d'adaptation au changement climatique présenté par le gouvernement en 2024 (PNACC3[30]) pour préparer le territoire aux changements à différentes échelles de temps, de l'immédiat (2030), intermédiaire (2050), au plus lointain (2100)
- Plan Eau[31] (2023) avec comme objectif de baisser les prélèvements de -10% en 2030 pour tous les acteurs, de mieux mesurer/évaluer les volumes prélevés et rejetés, etc...

Ces stratégies dépendent pour une grande partie des données et méthodes fournies par la communauté climatologique. Il est à souligner que celles-ci ont évolué et évoluent encore aujourd'hui, au grès des avancées scientifiques, ce qui nécessite une forme d'adaptabilité de la part des communautés utilisatrices de ces données. En particulier celle des hydrologues/hydrogéologues qui s'intéressent à l'effet des variations du climat sur les ressources en eau notamment pour chercher à évaluer leur disponibilité future pour satisfaire les usages.

[29] https://meteofrance.com/sites/meteofrance.com/files/files/editorial/rapport-trajectoire-rechauffement-adaptation-changement-climatique-partie-1.pdf
[30] https://consultation-pnacc.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2024-10/Document_de_presentation_du_PNACC_3.pdf
[31] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/MAR2023_DP-PLAN%20EAU__BAT%20%281%29_en%20pdf%20rendu%20accessible.pdf

Aussi, pour apporter des informations comparables, utiles et plus facilement appropriables par les gestionnaires et décideurs, il apparait important de pouvoir donner une **cohérence territoriale (départementale) à ces résultats**.

Les différents outils disponibles sur le département de l'Orne : modèles globaux ou maillés pourraient être utilisés à cet effet pour produire une synthèse sur la sensibilité des ressources et de leurs usages.

### 4.4.3 Enseignements méthodologiques sur les données et outils utilisés

#### *4.4.3.1 Limites identifiées*

1. Sur l'utilisation des modèles globaux

Les modèles globaux tels que GARDÉNIA présentent plusieurs inconvénients du fait de leur structure non spatialisée (modèle 1D). Ce type de modèle simplifie les processus hydrologiques et hydrogéologiques en se plaçant dans un schéma conceptuel (théorique) où les nappes (libres et homogènes) alimentent les rivières, ce qui ne permet pas de représenter facilement les interactions complexes entre les eaux de surface et les eaux souterraines ou de différencier les apports de plusieurs unités aquifères.

Dans ce type de modèle, on prend en compte implicitement mais globalement, par le biais du débit global des rivières, les apports par les principaux aquifères contributifs aux débits des cours d'eau.

Aussi, bien que la reproduction et le calage des signaux de pluie-niveau-débit puissent donner satisfaction, l'interprétation des paramètres de calage et des termes du bilan hydrologique sera moins représentative, ou sujet à caution, dans le cas de la simulation de très grands bassins versants ou dans le cas de bassins hétérogènes et complexes.

Une solution pour palier, en partie, aux limites présentées ci-avant, est d'utiliser des modèles semi-distribués (type EROS), où plusieurs grappes de modèles globaux sont connectées les unes aux autres.

Ce schéma permet alors de mieux prendre en compte ces hétérogénéités en intégrant des variations à l'échelle de sous-bassins versants. Cela nécessite toutefois de multiplier les besoins de données d'entrée ou de calage que l'on souhaite représenter (dont le niveau des eaux souterraines et de débit des cours d'eau suivis sur des points d'observations représentatifs de chaque tronçon ou sous-bassin).

Par ailleurs, il aurait été intéressant de tester une approche de détermination du Base Flow Index (BFI), c'est-à-dire le rapport entre l'écoulement de base et le débit total du cours d'eau. Les résultats pourraient apporter alors un autre éclairage et conforter ou pas les résultats des modélisations GARDENIA/EROS.

2. Sur l'utilisation des données d'entrée et de calage des modèles

Par ailleurs, les modèles globaux ne peuvent utiliser que des données d'entrée et paramètres de calage globalisés pour l'ensemble du bassin versant simulé. Ce qui nécessite d'intégrer ou de moyenner par exemple les données comme les précipitations et l'évapotranspiration, la capacité de ruissellement ou d'infiltration des sols, la capacité de stockage des différents aquifères, les prélèvements et rejets….

Il a pu être démontré que le calage des données pouvait être rendu difficile dans le cas de grands bassins hétérogènes qui ne parviennent pas à reproduire fidèlement des comportements spécifiques (bassin alimenté par plusieurs aquifères superposés aux dynamiques différentes).

La modélisation des sous-groupes nécessite alors de s'assurer de pouvoir disposer de l'ensemble des données d'entrées adaptées à la nouvelle échelle spatiale que l'on souhaitera pouvoir modéliser.

Cependant, nous avons pu voir que nombre de sous-bassins versants ne disposaient pas des informations minimums nécessaires : stations hydrométriques permettant de reproduire les débits des rivières et différents piézomètres représentatifs du fonctionnement local de ce sous-ensemble.

Le plus souvent, seul le coefficient d'emmagasinement (S) est discuté dans ce rapport alors que d'autres paramètres tout aussi pertinents comme le temps de demi-percolation (influence ZNS) et temps de demi-tarissement (fonction des propriétés hydrodynamiques) auraient également mérités d'être commentés pour participer à la compréhension du fonctionnement des bassins versant (cf. Annexe 2). Le lien entre la géologie et les configurations de modèles retenues : ex. 2 réservoirs souterrains améliorent le calage sur certains bassins avec deux dynamiques souterraines distinctes.

#### *4.4.3.2 Améliorations possibles*

A. Disposer de chroniques de niveau des eaux souterraine et de débit des cours d'eau longues, représentatives et distribuées à l'échelle du territoire

Poursuivre les suivis piézométriques et hydrologiques pertinents, les compléter sur les masses d'eau ou tronçons de cours d'eau encore dépourvus de suivis.

Exemple en domaine de socle : il n'existe pas de station hydrologique sur le bassin de l'Egrenne (cet affluent représenterait 60 à 70 % du débit de la Varenne à St Fraimbault), de la Gourbe et de la Vée (petits affluents de la Mayenne) ou encore de la Baize en zone bocaine (affluent de l'Orne situé en aval des retenues de Rabodanges et du Breuil). Il n'existe pas non plus de suivi piézométrique dans les granites et ses altérites (en particulier sur le granite d'Athis du bassin de la Rouvre et du Noireau, les granites la Ferté Macé et de Passais situés sur les bassins de la Varenne et de la Mayenne, cf. rapport BRGM/RP-69331-FR).

B. Accroitre la connaissance et développer des outils de modélisation du fonctionnement des ressources (stratégiques)

- Domaine de socle

Evaluer le rôle des altérites, mieux évaluer le fonctionnement et potentiel des aquifères des formations paléozoïques (modèle géologique 3D) et des flyschs briovériens.

- Domaine Sédimentaire

Mieux évaluer la recharge et le comportement des nappes captives : Bajocien-Bathonien sous le Callovien, Oxfordien sous les formations crayeuses, Sables du Perche au sein des formations crayeuses et ses altérites.

Engager la mise en œuvre de nouveaux modèles maillés (3D) de gestion de la ressource : en particulier sur le bassin de l'Huisne (ZRE) et de la Sarthe Amont qui apparaissent à la fois comme complexes à représenter dans leur fonctionnement et sensibles également de par la pression en prélèvement exercée.

# 5 Pour aller plus loin… sur les altérites du département de l'Orne

## 5.1 PREAMBULE

### 5.1.1 Définitions

Les altérites (régolithe autochtone) sont issues de la transformation d'une roche mère par des processus physico-chimiques (modification composition chimique et propriétés physiques de la roche) et transport d'éléments en phase dissoute (hydrolyse).

Elles se distinguent donc des formations superficielles allochtones qui font intervenir un processus de transport sous forme solide des produits de l'érosion d'une roche mère (actions du vent, de l'eau, de la gravité et de la glace), exemple : alluvions, moraines, éboulis, colluvions et formations de pente, loess, ...

Elles se distinguent encore des sols qui se caractérisent par la présence d'organismes vivants, de matière organique, de matière minérale, d'eau et d'air. Le sol peut se développer sur n'importe quel horizon d'un ancien profil d'altération, ou bien sur des sédiments non consolidés (régolithe allochtone), ou sur une roche non altérée.

Le profil d'altération type est scindé en 3 grands horizons principaux : allotérites, isaltérites et l'horizon sain et découpé en 5 sous-horizons notés H1 à H5 (Thiery et al., 2019) marquant une gradation des variations de propriété mécanique au sein d'une roche (Figure 77 page suivante).

Les allotérites sont les altérites avec structures secondaires liées à l'altération (horizon H5).

Les isaltérites sont les altérites qui conservent les structures principales de la roche mère (horizons H4 à H2) tout en opérant une modification (mécanique et chimique/minéralogique) de ses propriétés et dont l'intensité augmente de bas en haut. Le plus souvent la roche mère développe un aspect fissuré ou feuilleté favorable aux interactions eau-roche (hydrolyse).

Les principaux facteurs influençant le développement d'un profil d'altération sont :

- Lithologique : minéralogie et texture de la roche mère
- Structuration tectonique (diaclases, failles) et leur densité
- Climat (température, précipitations)
- Interactions avec les micro-organismes
- Le temps/durée d'exposition (plusieurs séquences altération/érosion = structuration polyphasée)[32]
- Géomorphologie, conditionnant l'infiltration ou le drainage vers le sous-sol ou l'évaporation par rapport à la position d'un niveau de base :
    - Altitude
    - Pente
    - Eustatisme, tectonique cassant ou ductile, autres déformations de la lithosphère (rifting, dôme thermique, etc…)

[32] Une forte érosion peut accélérer les processus d'altération par décapage des allotérites moins perméables (Hayes et al., 2020).

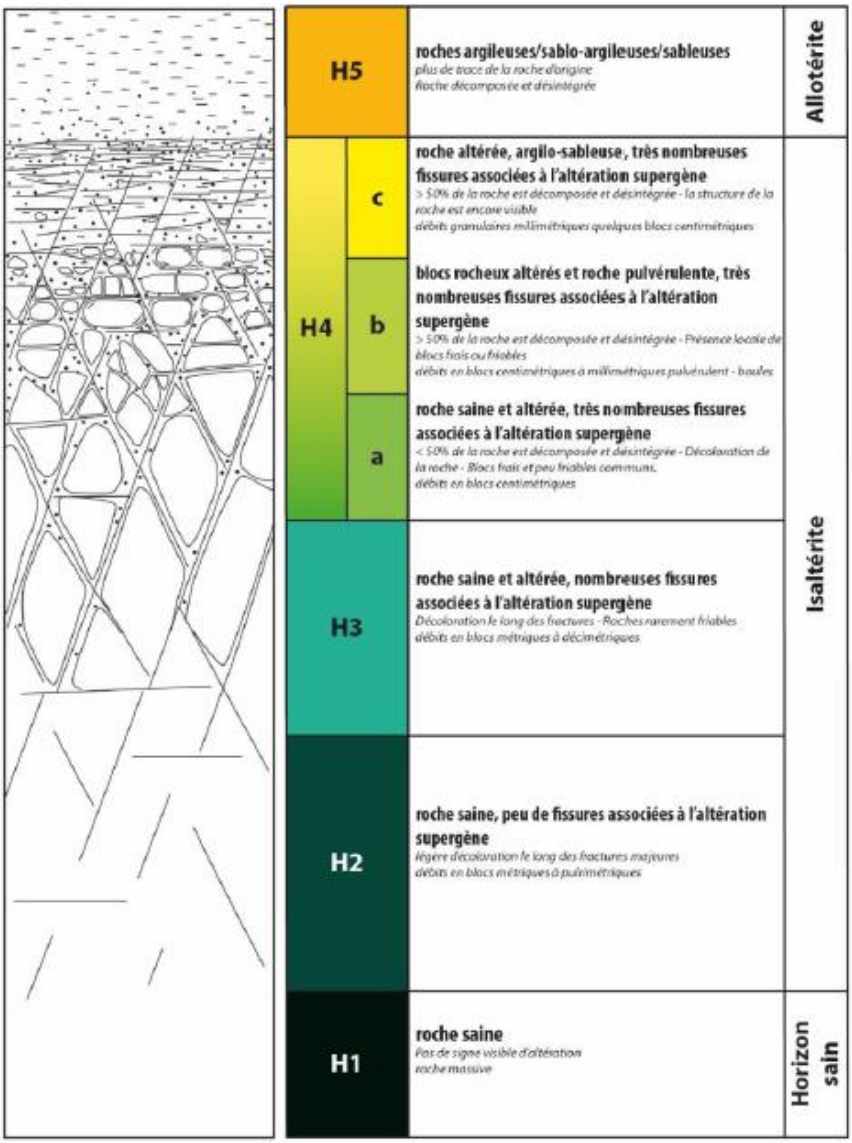



*Figure 77 : Profil type d'altération d'un massif de socle « ancien » établi d'après Thiery et al., 2019*

Dans le département de l'Orne, les formations géologiques les plus anciennes ont enregistré différents processus d'altération/érosion liés notamment aux orogénèses cadomiennes, hercyniennes, alpines/pyrénéennes, on parle de polyphasage. A titre d'exemple Verague (1977) distingue au moins deux phases d'altérations post-hercyniennes, Mésozoïque et Cénozoïque, dans les formations d'altération du socle la région de Sées et Alençon.

### 5.1.2 Objectifs

Les formations d'altération jouent un rôle prépondérant, pour ne pas dire majeur, dans la dynamique hydrologique des bassins versants et de leurs aquifères. Ce rôle a déjà été mis en évidence, dans différents volets des travaux du programme OAGPRO61, dans ce rapport et dans les précédents.

Leur impact quantitatif a déjà été souligné dans le rapport de phase 1 (rapport BRGM/RP-69331-FR) :

- Rôle productif/transmissif de l'horizon fissuré (H4b-H3), en fonction de la connectivité du champ de fractures horizontal et vertical et de son épaisseur ;
- Rôle capacitif (réservoir secondaire) des horizons superficiels (H5 – H4c) fonction de leur nature (+/- perméable) et de leur épaisseur.

Le rôle supposé de ces horizons sur la morphologie de la surface piézométrique des principales formations aquifères du département a également été souligné dans le rapport d'élaboration des cartes piézométriques (RP-73813-FR).

Leur impact sur la qualité des ressources en eau a également été souligné dans le rapport dédié à cette thématique (RP-71026-FR). Il a ainsi pu être mis en évidence que leur nature (+/- perméable) et l'épaisseur des horizons superficiels (H5 -H4bc) peuvent limiter ou au contraire favoriser le transfert des pollutions/contaminants de surface vers le milieu profond ou changer les conditions oxydo-réductrices du milieu, quel que soit le domaine géologique dans lequel on se situe (sédimentaire ou de socle), offrant par exemple des conditions favorables aux processus de dénitrification.

Il était donc important d'apporter des précisions complémentaires, aux éléments descriptifs présentés dans le rapport de synthèse géologique et structurale (RP-69292-FR) en particulier sur leur nature et leur répartition à l'échelle de l'ensemble du département de l'Orne.

Cette synthèse apportera des éléments complémentaires qui pourront s'avérer utiles en particulier si à l'avenir des vérifications des hypothèses formulées sur l'implication des altérites dans la dynamique actuelle des eaux souterraines devaient être mises en œuvre.

### 5.1.3 Méthodologie

La description des profils d'altération passe par l'analyse au cas par cas des informations fournies par différents procédés ou outils aidant à leur caractérisation :

- **Descriptions lors de la phase de foration** : variations des principaux faciès profondeur/épaisseur, présence d'anomalies ou hétérogénéités rencontrées mais aussi texture, couleur, minéraux (front d'apparition de certains cortèges), aspect, dureté et enregistrement des paramètres de forage (vitesse d'avancement, pression sur l'outil, couple de rotation, etc… information sur l'altération (front d'ameublissement ou d'argilisation) ;
- **Diagraphies** : gamma ray, résistivité, sonique (Vp/Vs), imagerie de paroi ;
- **Essais mécaniques** : argilosité, porosité, flexibilité, compression, cisaillement ;
- **Présence de Niveau d'eau/Venues d'eau** : profondeur des premières arrivées d'eau (front de percolation), débit instantané ou cumulé ;

***Attention : Nous attirons l'attention sur le fait qu'une part importante de descriptions rencontrées étaient trop souvent insuffisantes comme l'illustre la Figure 78 ci-après.***

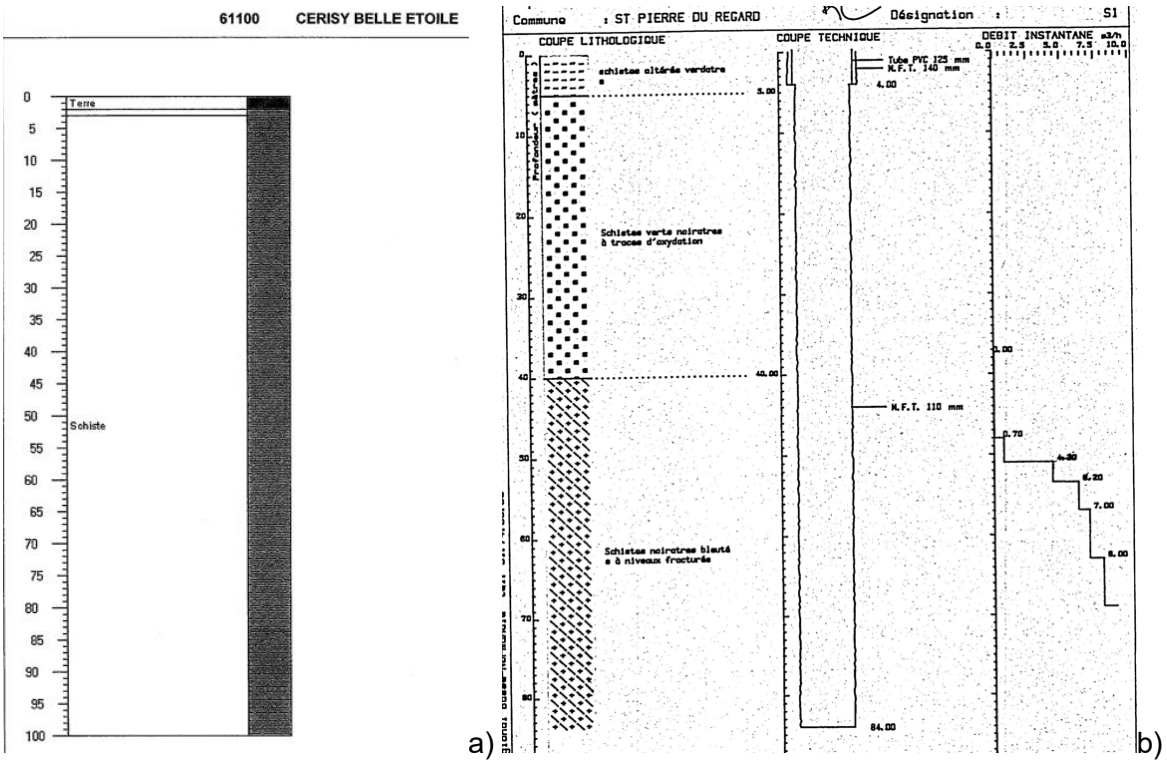



*Figure 78 : Exemple de différence de traitement de l'information au moment des étapes de foration pour un même type de roche mère : schistes. La coupe a) est inexploitable en comparaison de la coupe b) qui possède des descriptifs plus précis permettant le positionnement d'interfaces des profils d'altération (source : banque de données du sous-sol BSS - BRGM)*

## 5.2 CARACTERISATION POUR LE DEPARTEMENT DE L'ORNE

La présence de formations superficielles et d'altération est largement distribuée à l'échelle du département de l'Orne, comme le montre la Figure 79 ci-après. On les retrouve aussi bien en domaine de socle ou en domaine sédimentaire. Quelques éléments essentiels concernant ces formations sont rappelés dans les paragraphes ci-après.

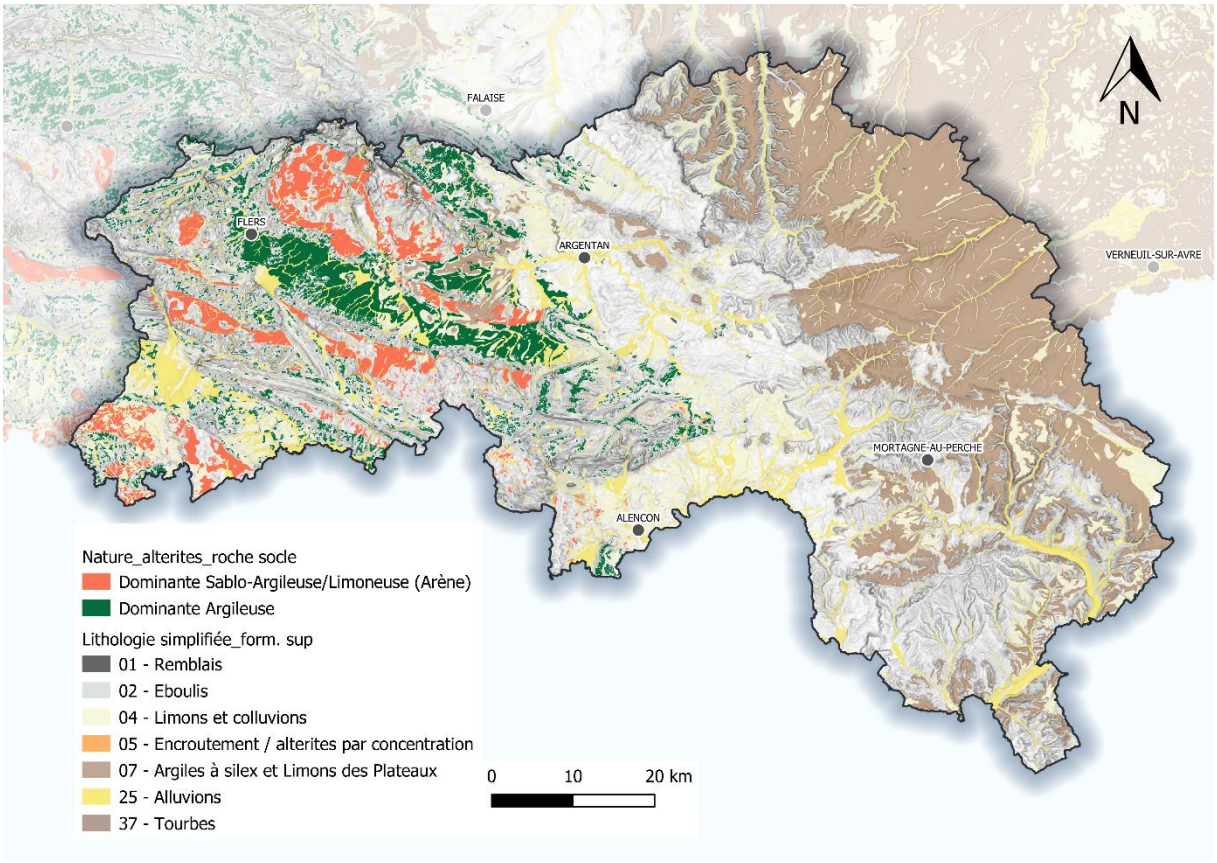



*Figure 79 : Formations superficielles et d'altération issues de la carte géologique harmonisée du département de l'Orne (source : Vernhet, 2002). A noter : la nature des altérites autochtones de socle a été différenciée en fonction du type de roche mère dont elles sont issues*

### 5.2.1 Domaine sédimentaire

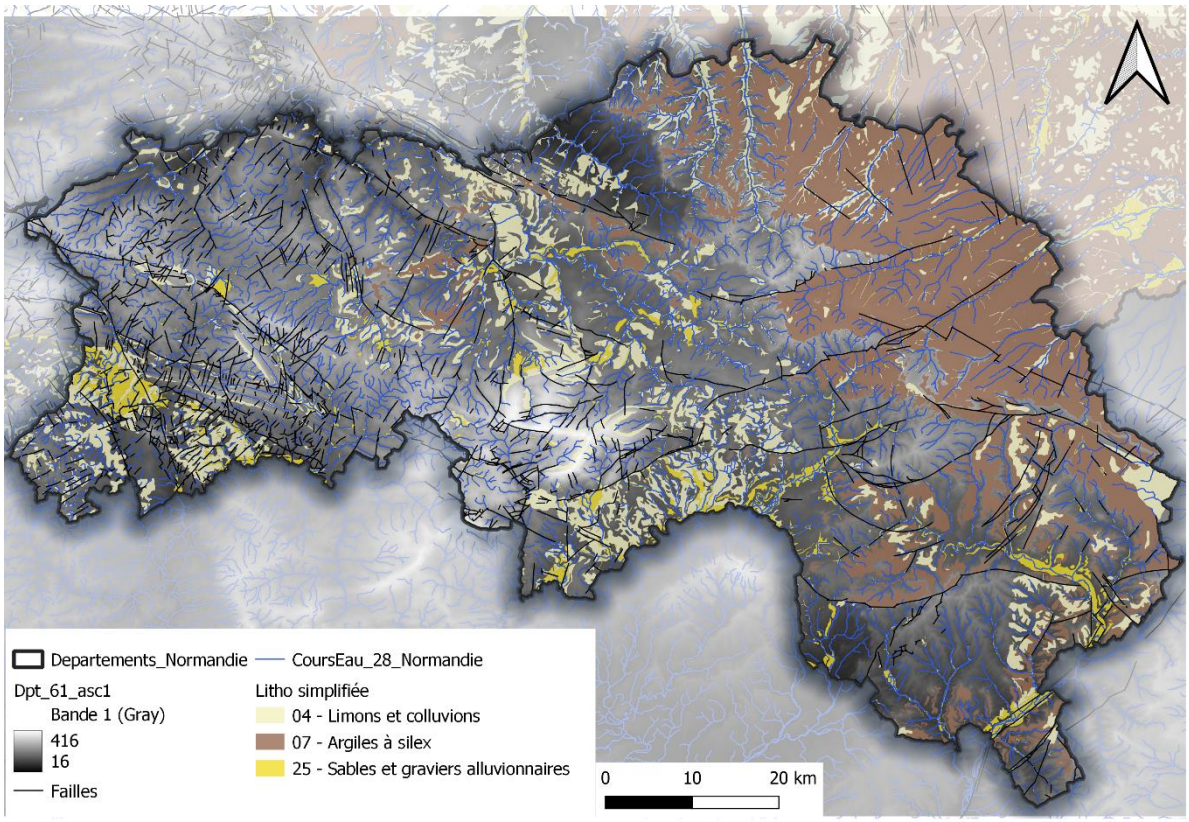



*Figure 80 : Carte des formations superficielles allochtones (lœss/limons et alluvions) et autochtones du domaine sédimentaire (Argiles à Silex) d'après les informations de la carte géologique harmonisée (source : BRGM)*

Les formations superficielles allochtones (lœss/limons et alluvions) et autochtones du domaine sédimentaire (Argiles à Silex) sont représentées sur la carte ci-dessus (Figure 80).

On note qu'à l'inverse de la carte géologique harmonisée du département du Calvados, que celle du département de l'Orne ne distingue pas d'altérites des formations jurassiques du fait de leur faible épaisseur (le plus souvent < 2m). La notice des feuilles géologiques en distingue néanmoins plusieurs types : des limons argileux à cherts ou silex sur les formations calloviennes et calcaires bathoniens et une matrice à dominante argileuse de limon ou sables pour les formations oxfordiennes (Ménillet et Rioult, 1994).

On remarque que les lœss et limons éoliens, quaternaires, sont essentiellement présents sur les bassins de l'Orne et de la Sarthe (plaines d'Argentan, de Sées et d'Alençon) où leur épaisseur dépasse parfois les 5 m. On les retrouve également dans le bassin de la Varenne-Egrenne et de la Mayenne au sud-ouest du département et sur les plateaux crayeux de l'Est du département de l'Orne comme c'est le cas également dans le Sud de l'Eure et le Nord-Ouest de l'Eure-et-Loir. Sur ces secteurs, leur épaisseur est généralement comprise entre 2 et 5 m.

Les formations résiduelles à silex, ou argiles à silex, sont issues de l'altération des formations du Crétacé, principalement crayeuses, durant tout ou partie du Cénozoïque et sont en majorité autochtones. Elles ont été regroupées en six faciès géographiques par les auteurs (Quesnel F., 1997, Laignel, 1997). Elles sont représentées sur la Figure 81 ci-après.

Dans le département de l'Orne, on rencontre principalement les faciès Thimerais et ses variantes (cf. Figure 81) : ils résultent de l'altération de la craie cénomanienne et turonienne (N°5 matrice argileuse marron et silex) et des formations du Perche (N°6[33] argiles franches bariolées). Leur épaisseur est croissante vers le nord-est (peut dépasser les 20 m) et témoigne du biseau sédimentaire des dépôts crayeux initiaux.

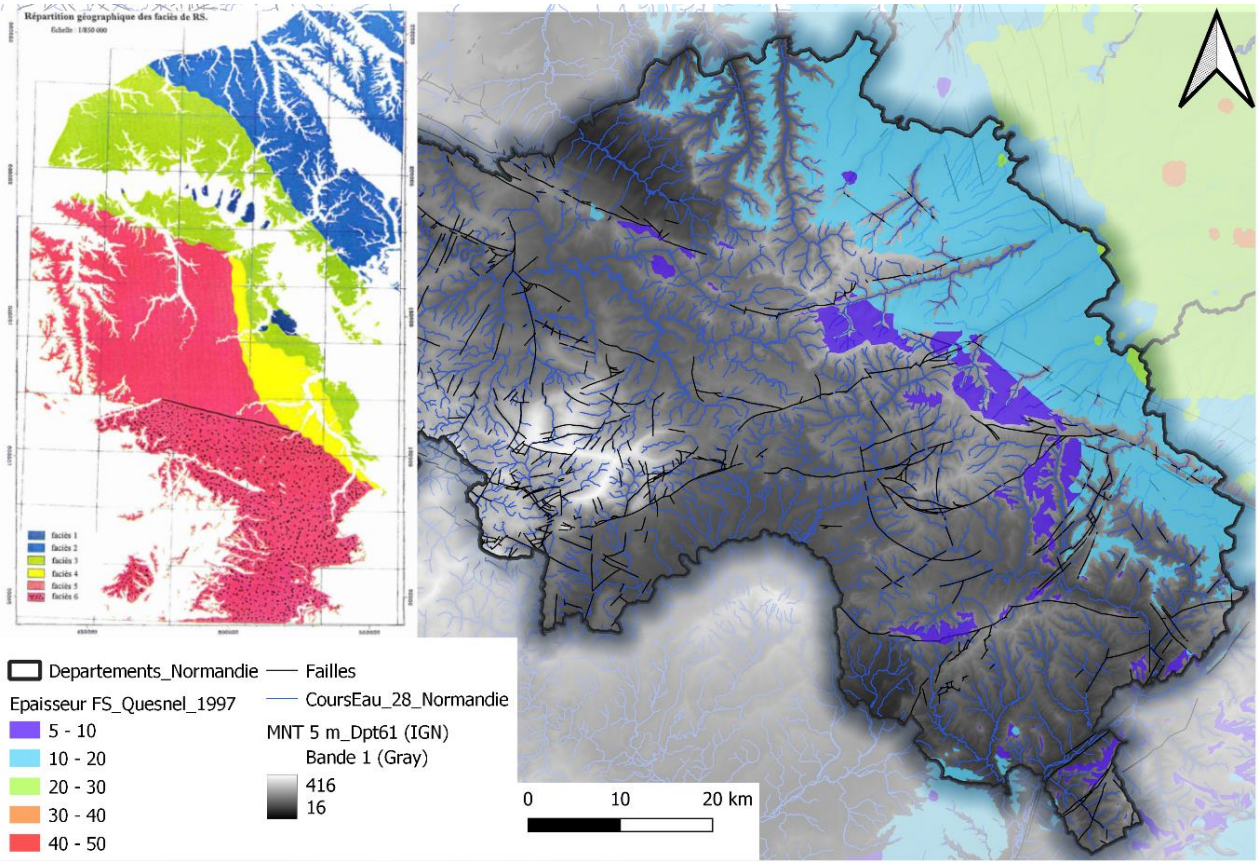



*Figure 81 : Type d'altérites à silex et épaisseur d'après Quesnel (1997)*

**Le rôle de ces formations dans le fonctionnement quantitatif et qualitatif des hydrosystèmes (zones humides, eaux superficielles et souterraines), ou dans le fonctionnement des systèmes karstiques de l'Est du département, est encore aujourd'hui mal appréhendé.**

**Les études menées en Normandie crayeuse et rapportées dans le volet de synthèse hydrogéologique (phase 1) – RP-69331-FR, laissent penser que celles-ci ne sont pas complètement imperméables mais globalement infiltrantes. Les formations superficielles et d'altération pourraient au contraire jouer parfois le rôle de petit aquifère (stock et transfert différé vers aquifère profond ou vers système karstique). Ce rôle pourrait cependant être plus limité dans le département de l'Orne, vraisemblablement par leur épaisseur plus réduite (limite de cuesta).**

[33] Laignel et al., (1993) ont réalisé une description des altérites du Perche dans la carrière de la Ventrouze, près de Tourouvre.

### 5.2.2 Domaine de socle armoricain

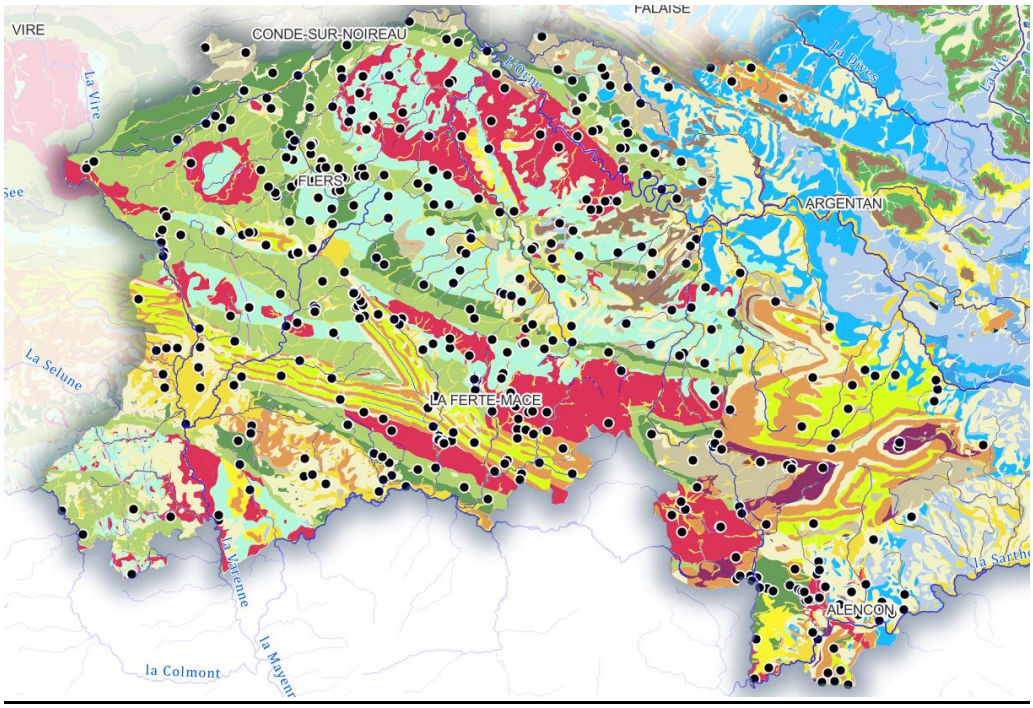



*Figure 82 : Description lithologique d'ouvrages utilisés pour caractériser les altérites du domaine armoricain, source : Banque de données du Sous-Sol (BSS)*

Dans le cadre de cette étude, nous avons procédé à **l'analyse de 504 coupes de forage disponibles dans la banque de données du sous-sol (BSS)** et constitué une base de données de l'altération des roches du domaine armoricain du département de l'Orne[34], contenant les informations suivantes :

- La nature de la (les) roche(s)-mère(s)
- Les épaisseurs et nature des allotérites (H5)
- L'épaisseur minimum d'Isaltérites (mélangeant horizon fissuré et altéré) et épaisseur de l'horizon altéré (H4 bc).

A partir des informations collectées, il a été possible de réaliser une analyse préliminaire des résultats présentés sous forme cartographique.

En surface, les allotérites sont principalement de nature argileuse mais ces dernières peuvent prendre une dominante limoneuse ou sableuse en fonction de la lithologie des roches mères sous-jacentes. L'altération type des roches est globalement vérifiée (Figure 83).

[34] A noter du point de vue spatial : le secteur de Céaucé reste toujours, en 2024, assez lacunaire en informations disponibles.

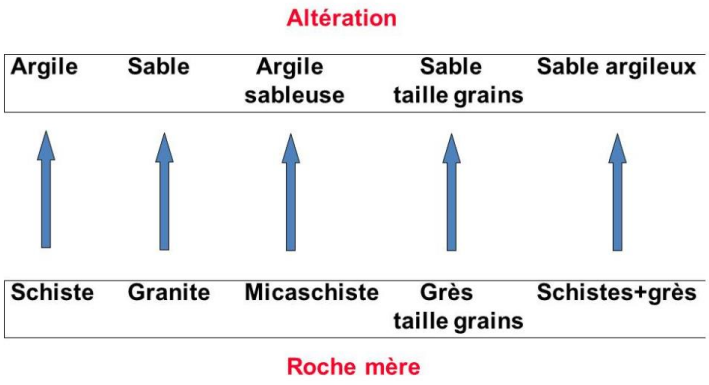



*Figure 83 : Synoptique de l'altération type des roches magmatiques ou sédimentaires de socles anciens*

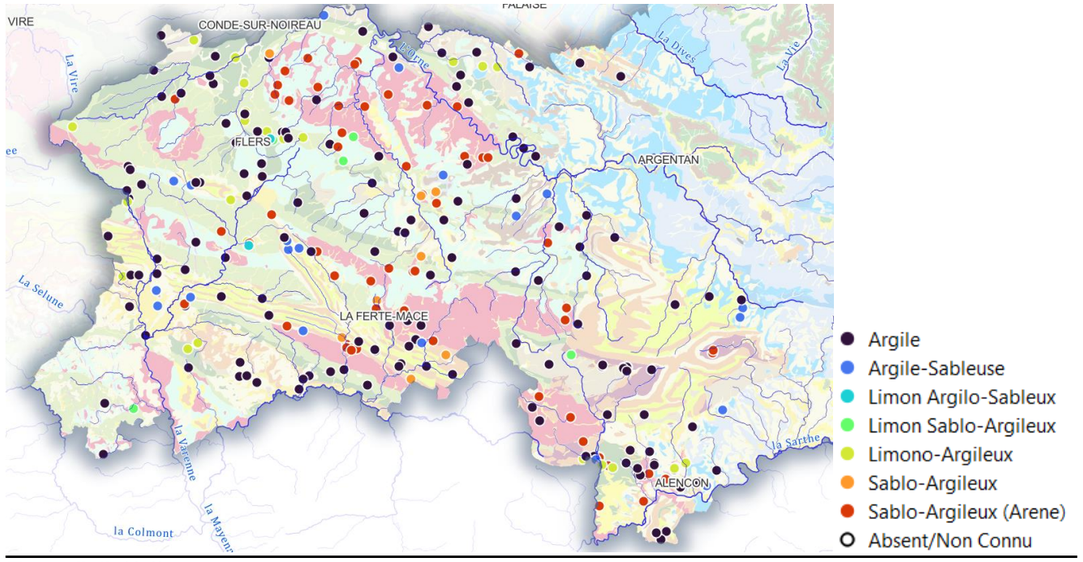
Sur l'aval du bassin versant de la Rouvre (sur le massif d'Athis), on constate que les allotérites semblent majoritairement sableuses et peu épaisses. Cet élément pourrait expliquer en partie la faiblesse du débit spécifique rencontré à l'étiage sur ce bassin, de l'ordre de 0,6 l/s/km², caractérisant un très faible effet capacitif. A l'inverse, le secteur Ouest de Domfront (St Gilles), situé à la jonction de l'Egrenne et de la Varenne, disposerait d'allotérites épaisses et à dominantes argileuses (vraisemblablement plus capacitives), tout comme le secteur de Briouze entre les bassins du Noireau et de la Rouvre.

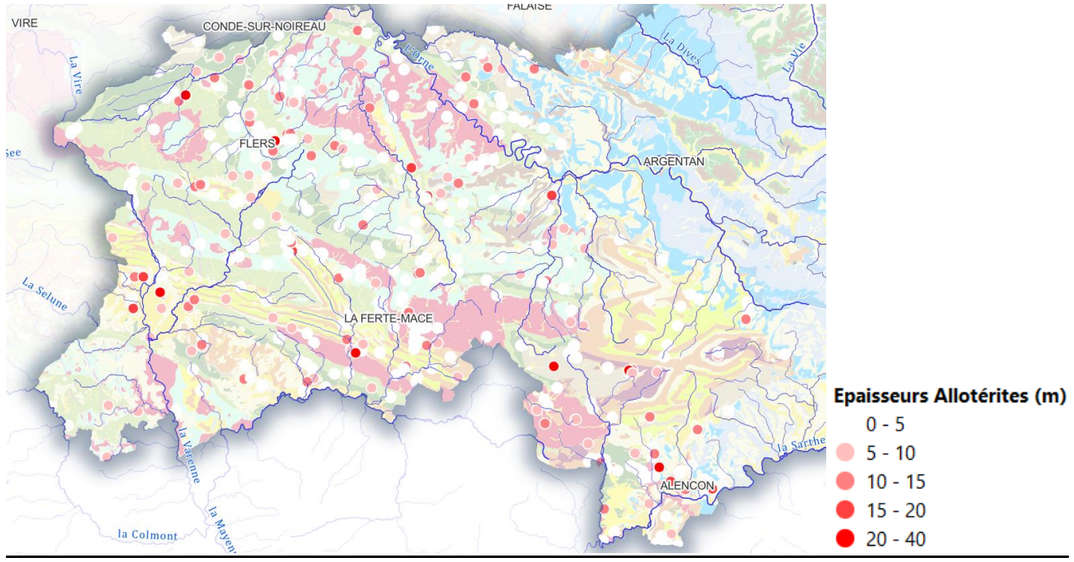
Les modèles réalisés en domaine de socle confirment que le temps de demi-percolation vers le réservoir souterrain est globalement plus lent qu'en domaine sédimentaire, cet élément est donc compatible avec la présence d'altérites à dominantes argileuses (cf. Annexe 2) et au caractère plus ruisselant des formations de surface.

Dans l'ensemble, l'épaisseur minimum des isaltétérites (horizon altéré et fissuré) apparait assez importante pour l'ensemble du domaine armoricain, vraisemblablement du fait du polyphasage de l'altération au cours des différents cycles orogéniques. Toutefois, il semblerait que cette épaisseur soit légèrement plus importante au Sud du domaine (sur les BV de la Sarthe, de la Mayenne et de la Varenne-Egrenne) comparativement à la partie Nord du domaine.

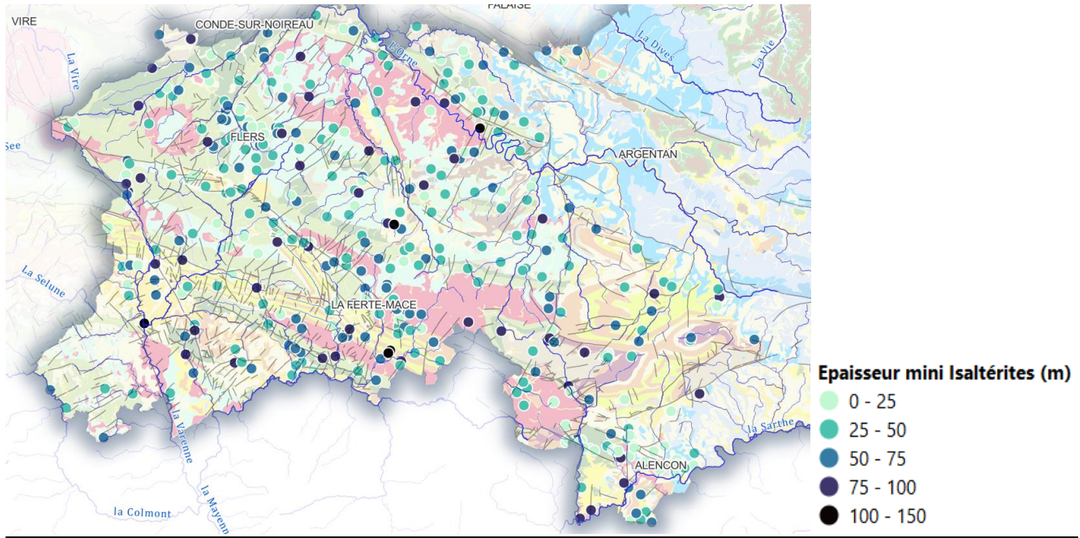
L'épaisseur de l'horizon altéré (H4bc) apparait comme très indépendante des différentes lithologies des roches mères mais semblerait plutôt liée à la présence ou proximité de systèmes faillés (favorisant l'hydrolyse).

L'ensemble de ces éléments restent à confirmer par des analyses statistiques et des contrôles de terrain de manière à pouvoir mieux discrétiser spatialement ces différents paramètres, à l'image de ce qui a été fait en Région Bretagne dans les projets SILURE ou ANAFORE (cf. rapport RP-69331-FR) ou encore dans l'atlas hydrogéologique départemental du Calvados.




*Type d'allotérites*



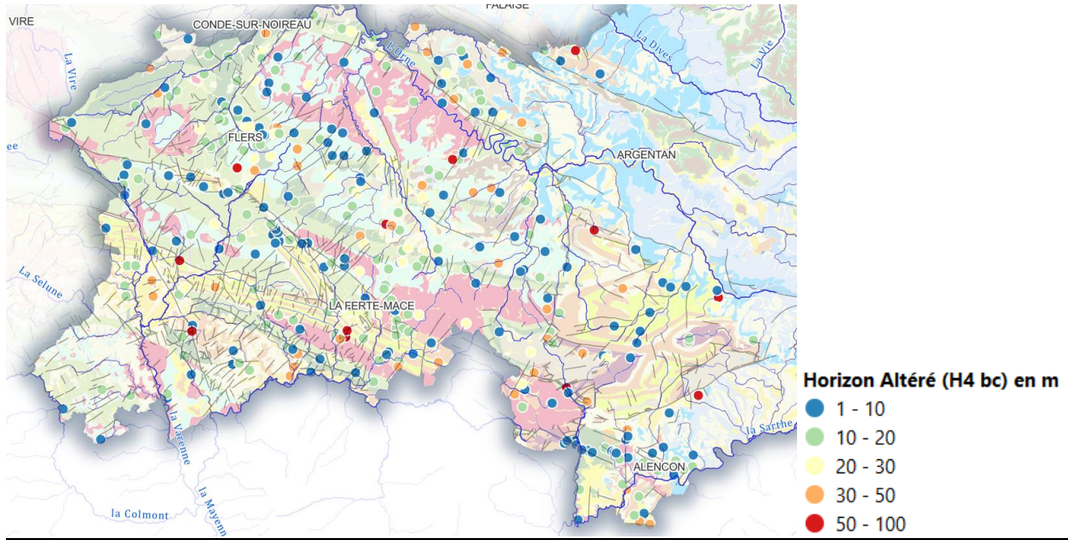




*Figure 84 : Cartographie rattachée aux forages de la nature et l'épaisseur des allotérites, de l'épaisseur de l'horizon altéré et de l'épaisseur minimum des Isaltérites*

## 5.3 VERS UNE CARACTERISATION PLUS FINE DES PROFILS D'ALTERATION

Comment passer d'éléments locaux : observations de terrain, prospections géologiques ou géophysiques (Figure 85) à une régionalisation de la donnée (ou vice-versa) ?

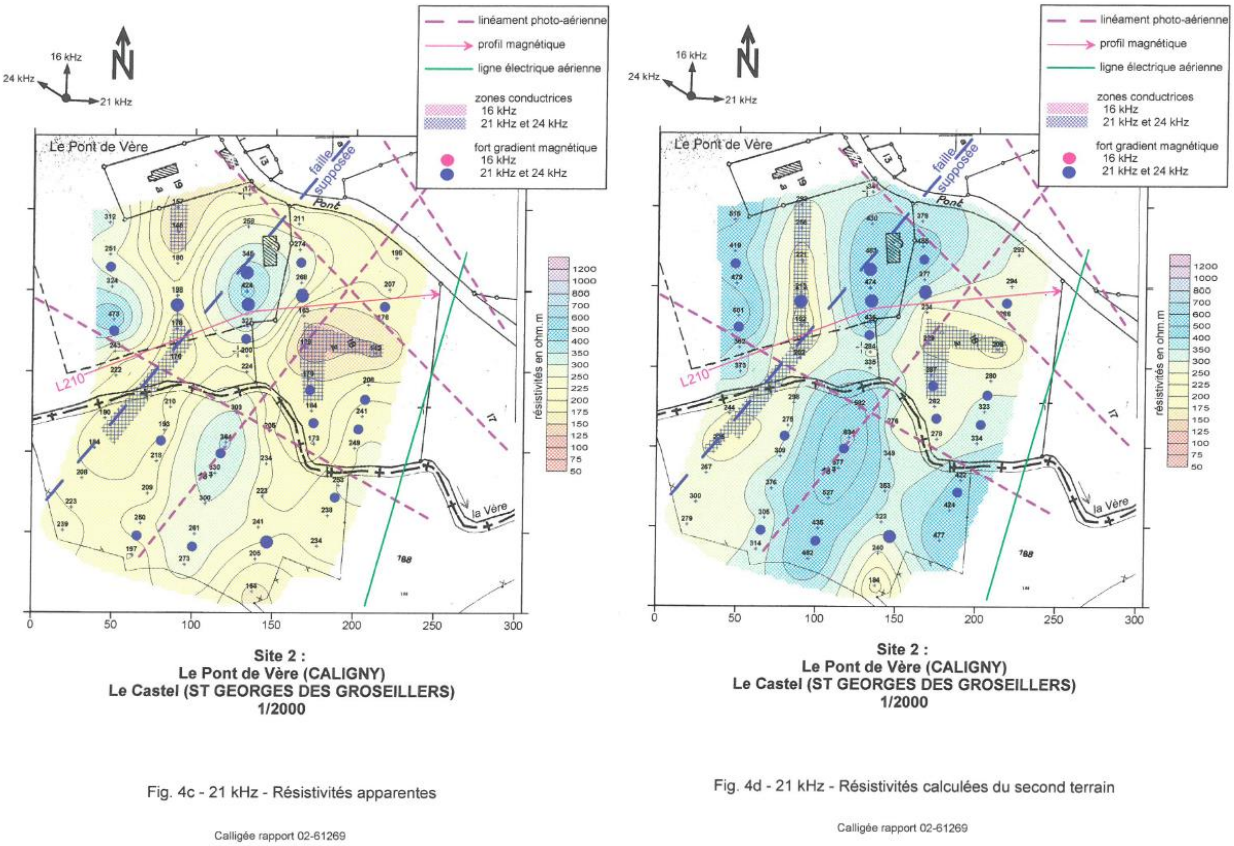



*Figure 85 : Identification de zones conductrices pouvant correspondre à des approfondissements des profils d'altération et ou à des circulations préférentielles des eaux souterraines. Investigations électromagntiques réalisées, à différentes profondeurs, sur le secteur de Calligny (Pont de Vère) sur le bassin du Noireau (source Calligée fournie par le SDE61)*

Cette question de changement d'échelle doit permettre de répondre aussi bien à des programmes de recherche en eau, qu'à des problématiques de gestion ou protection de la ressource en eau ou encore pour estimer la distribution des paramètres hydrodynamiques des formations superficielles et d'altération à l'échelle d'un bassin versant ou d'une aire d'alimentation de captage (cf. rapport BRGM/RP-73813-FR sur le volet exploratoire de ce dernier point).

Si les hétérogénéités sont rares (lithologie homogène à large échelle), les allotérites, horizons altérés et fissurés, peuvent alors être considérés comme des milieux relativement homogènes et être individualisés pour être modélisés. Des lois de corrélation peuvent alors être utilisées pour régionaliser les mesures obtenues sur des profils géophysiques, diagraphies, pompages entre packers (slugs tests) pour déterminer la profondeur des fronts de percolation et de saprolification[35] et les composantes du tenseur de perméabilité.

[35] Les saprolites sont la partie meuble et supérieure du front d'altération comprenant les allotérites et l'horizon fissuré

Si au contraire les formations rencontrées sont hétérogènes, des méthodes prédictives peuvent être déployées. Celles-ci tiennent compte d'un ensemble de paramètres qui permettent de mieux retranscrire et cartographier la mise en place des horizons d'altération dans ce contexte : paramètres morphologiques (pente, courbure, dénivelé, rugosité et cartographie des surfaces d'aplanissement) et de la lithologie des formations : identification de profils types, puis traitement fréquentiel et par degré d'appartenance par la méthode « logique floue » appliquée aux différentes paléo-surfaces d'altération (Figure 86).




*Figure 86 : Cartographie prédictive des horizons d'altération (source : BRGM d'après Thiery et al., 2019)*

Cette méthode peut ensuite être combinée à des mesures de porosité/perméabilité et des suivis piézométriques afin de caractériser le rôle et le fonctionnement hydrogéologique de ces différentes unités : effet filtre ou tampon, zone capacitive voire transmissive et transferts verticaux vers les horizons profonds des aquifères de socle.

L'avantage de cette méthodologie est qu'elle peut être développée à différentes échelles et s'adapter au besoin. Mais elle nécessite en contrepartie d'avoir une bonne connaissance des différents profils développés dans des contextes géologiques parfois complexes (phase de reconnaissance de terrain à ne pas négliger à l'échelle de grands ensembles).

# 6 Conclusions générales et recommandations

## 6.1 CONCLUSIONS GENERALES

Les principaux apports de ce volet quantitatif du programme OAGPRO61 peuvent être résumés de la façon suivante.

L'une des avancées majeures a consisté à adapter les méthodologies d'estimation des principaux prélèvements en eaux souterraines et en eaux de surfaces en parallèle des réflexions menées sur les territoires des SAGE Sarthe Amont et Mayenne ainsi que sur la ZRE Bajocien-Bathonien. Ces évolutions ont permis de caractériser la pression en prélèvement exercée sur les ressources à l'échelle départementale.

Dans le cadre de cet exercice, le BRGM a pu identifier un certain nombre de lacunes, notamment sur les données de rejets qui peuvent peser sur les bilans quantitatifs. En conséquence, un certain nombre de recommandations ont pu être émises pour que des précisions puissent être apportées dans le cadre des études EVP ou HMUC, afin de vérifier ou affiner certaines hypothèses.

Les informations compilées à l'échelle départementale ont permis de souligner le fait que les bassins versants de l'Orne, la Sarthe, l'Huisne et la Varenne sont les secteurs présentant les ratios volumes prélevés/volumes rejetés les plus défavorables, et dans une moindre mesure les bassins versants de l'Iton, de la Rouvre et de la Vie. À l'inverse, les bassins versants de la Mayenne, du Noireau, de la Dives, de la Risle, de l'Eure, de l'Avre et de l'Orbiquet semblent avoir des ratios plus favorables.

Dans cette étude, l'exploitation des résultats de quatorze modèles globaux (type GARDENIA) ont été utilisés, permettant de couvrir la quasi-totalité des bassins versants du département[36]. Ces modèles permettent de simuler le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique global d'un bassin versant pour chercher à reproduire les signaux de débit d'un cours d'eau et de niveau des eaux souterraines à l'aide de données climatiques.

Les bilans hydrologiques obtenus à l'aide des modélisations globales font apparaitre les éléments suivants (Figure 87) :

En Domaine sédimentaire :

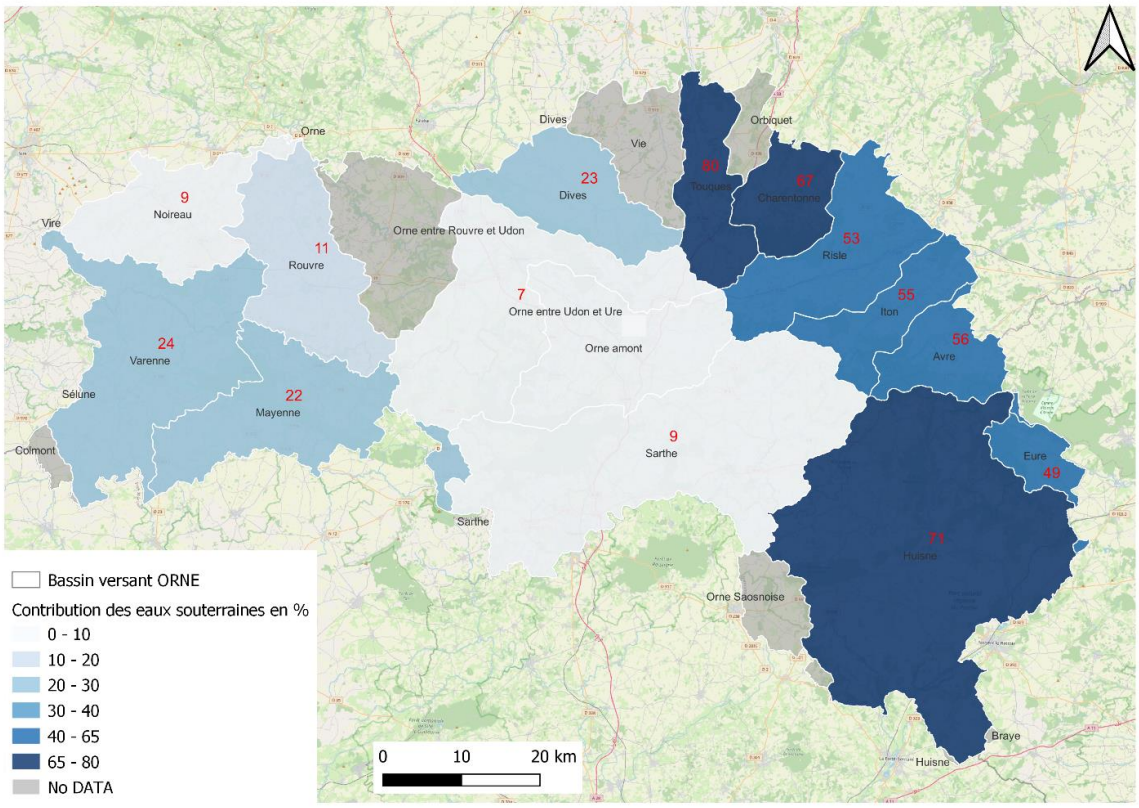
- Les bassins versants crayeux de l'Est (ex. Iton, Avre, Guiel, Charentonne) offrent le meilleur soutien aux cours d'eau et un potentiel intéressant pour de futurs prélèvements, malgré des fonctionnements parfois karstiques.
- Les bassins de la Vie, de la Touques et de l'Huisne sont alimentés par des aquifères superposés (céno-turonien, oxfordien) nécessitant une meilleure caractérisation des circulations complexes qui peuvent y exister du fait d'une compartimentation horizontale et verticale marquée, de façon à pouvoir ensuite mieux évaluer les prélèvements possibles. La Touques en particulier dispose d'un ratio volume d'eaux souterraines prélevé vs recharge moins favorable que l'Huisne (non évalué pour la Vie).

[36] sauf pour les bassins versants suivant : la Vie, et l'Orne (en aval du barrage de Rabodanges et avant sa jonction avec la Rouvre) au nord du département, le Colmont et le Sarthon à l'ouest et au sud du bassin versant de la Sarthe ; L'Orne Saosnoise et la Même au sud-est sur le bassin de l'Huisne.

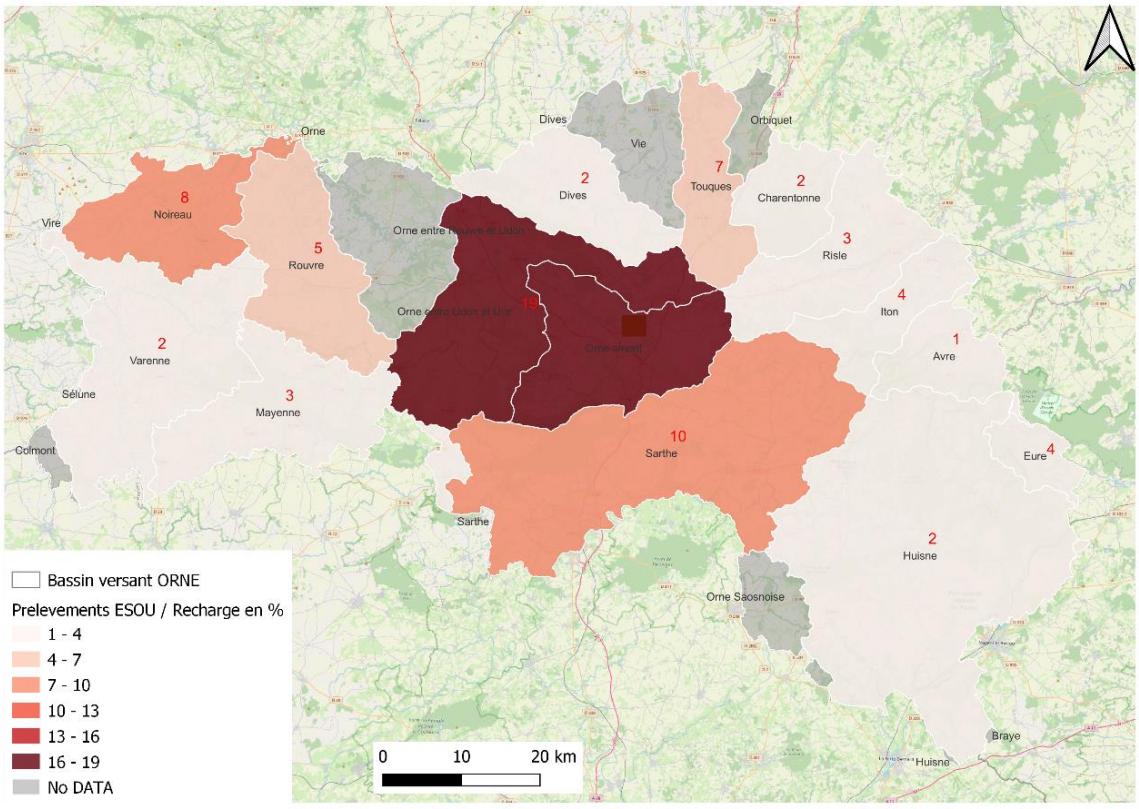
- L'aquifère Aalénien-Bajocien-Bathonien, bien que largement répandu, offre un soutien limité au fonctionnement hydrologique du bassin versant (bassins de la Dives, de la Sarthe et de l'Orne), car captif sur une grande superficie. Les niveaux de prélèvements d'eau souterraine sur l'Orne et la Sarthe justifient la mise en place d'outils de démarche de gestion durable des ressources disponibles pour pouvoir y réaliser des prélèvements ne remettant pas en cause leur équilibre quantitatif. Sur la Dives c'est la qualité dégradée de la ressource qui limite son exploitation pour des usages eau potable.

En Domaine de socle :

- Le soutien des nappes aux cours d'eau est globalement faible, la Varenne-Egrenne et la Mayenne se distinguent dans ce contexte avec un meilleur potentiel.
  Des études complémentaires sont nécessaires pour expliquer ces différences, notamment vis-à-vis de la Rouvre et du Noireau, moins favorables.
- De ce fait, le ratio prélèvements moyens dans les eaux souterraines vs recharge est moins favorable sur le Noireau et la Rouvre.
- Les prélèvements déjà importants sur la Varenne-Égrenne et la Mayenne (dans les eaux de surface principalement) limitent la création de nouveaux points sur ces deux bassins, sauf en cas de substitution entre eaux de surface et eaux souterraines.




A)




B)

*Figure 87 : A) Estimation de la part d'alimentation des eaux souterraines dans les bilans hydrologiques – B) Part des prélèvements en eau souterraine vs Recharge des principaux bassins versants du département de l'Orne*

L'analyse préliminaire des chroniques de niveau et de débit des cours d'eau effectuée pour évaluer leur représentativité afin de pouvoir les utiliser dans les outils de modélisation a permis également de souligner les différences de dynamiques entre des cours d'eau du département de l'Orne. Cette analyse complémentaire a cherché également à évaluer la diversité du territoire dans sa résilience aux sècheresses en lien avec les aquifères du territoire, que l'on peut résumer ainsi :

- À l'Est (domaine sédimentaire) : Les nappes, plus inertielles, réagissent lentement aux déficits pluviométriques (et à l'inverse également les recharges sont lentes). Les déficits de pluies efficaces pendant les périodes habituelles de recharge peuvent entrainer un allongement des périodes de vidange (cas des craies cénomaniennes et turoniennes) avec parfois des sécheresses qui peuvent alors durer plusieurs mois ou années.
- À l'Ouest (domaine de socle) : Les aquifères, peu capacitifs mais réactifs, se rechargent et se vident rapidement. Ils supportent mal les déficits prolongés ou les recharges tardives, ce qui peut poser des problèmes à l'échelle saisonnière.

Ce travail peut ainsi ouvrir la voie à l'utilisation plus généralisée des outils de modélisation pour une meilleure gestion territoriale des ressources en eau du département de l'Orne, notamment pour répondre aux questions de disponibilité des ressources en eau face à l'évolution des besoins en eau (prélèvements) mais aussi pour s'intéresser à la résilience de ces ressources lors des épisodes de sécheresses et de façon plus prospective, d'anticiper les évolutions futures en contexte de réchauffement global (étude changement climatique).

Sur ce dernier point, les éléments disponibles (bibliographiques) sur l'évolution des ressources en contexte de changement climatique sont très peu comparables dans les faits, du fait de la mise en œuvre dans les études de méthodes différentes. Ce qui ne permet pas de comparer les résultats obtenus sur les différents bassins qui ont fait l'objet de ces simulations et ne permet donc pas de disposer actuellement d'une vision d'ensemble, départementale.

Enfin un dernier volet s'est attaché à compiler quelques éléments de connaissance sur les formations superficielles et d'altération (régolithe) puisque ce rapport et les précédents ont pu mettre en évidence le rôle quantitatif et qualitatif prépondérant, pour ne pas dire majeur, dans la dynamique hydrologique des bassins versants et de leurs aquifères. Il a pu être fait le constat que les connaissances actuelles montrent de grandes lacunes sur le développement des altérites et leur cartographie ainsi que la quantification de leur rôle hydrogéologique, quel que soit le type de contexte (formations de socle ou sédimentaires).

## 6.2 RECOMMANDATIONS GENERALES

Cette étude quantitative a permis de mettre en avant la nécessité d'améliorer les connaissances de certains aspects du fonctionnement quantitatif des ressources en eau du département de l'Orne. Dans cette optique, le BRGM recommande en particulier :

1. **De développer ou d'adapter les outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion quantitative** à l'échelle des principaux SAGE du territoire (Figure 88) sur des bassins versants de l'Orne (dont Rouvre et Noireau), de la Sarthe amont et de l'Huisne en particulier (modèle globaux insuffisants) pour appréhender les ressources disponibles :
    a. D'une manière générale de poursuivre la collecte des données de prélèvements et rejets ;
    b. D'améliorer le suivi des eaux souterraines et superficielles, afin de disposer de données représentatives et de chroniques suffisantes pour permettre leur analyse et leur utilisation dans les outils de gestion ;

   c. D'améliorer la connaissance sur les secteurs à forts enjeux. Des compléments semblent nécessaires à ce sujet sur l'Orne amont, la Sarthe amont et l'Huisne pour mieux prendre en compte la complexité hydrogéologique de ces grands ensembles hétérogènes (interfaces des formations aquifères, relations nappes-rivières (jaugeages)), effet de la compartimentation verticale et horizontale sur les écoulements et fonctionnement des nappes ;

2. En **domaine Sédimentaire** :
   a. D'améliorer la connaissance du fonctionnement des secteurs alimentés par des nappes superposées, en particulier sur les bassins de l'Huisne et de la Touques. Mais aussi sur les secteurs où les ressources exploitées sont captives, de façon à mieux caractériser leur recharge et les effets de drainance, mais aussi à mieux évaluer l'incidence réelle des prélèvements sur la ressource ;
   b. D'améliorer la connaissance du fonctionnement karstique des aquifères sédimentaires afin de mieux évaluer l'incidence quantitative et qualitative de ces fonctionnements.

3. En **domaine de socle** :
   a. D'améliorer la connaissance et la caractérisation des singularités du fonctionnement hydrogéologique des bassins de la Varenne (dont l'Egrenne son principal affluent) et de la Mayenne et notamment du rôle pressenti des formations paléozoïques ;
   b. D'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrogéologique des aquifères de socle, notamment du rôle de l'altération et des structures tectoniques sur leur capacité aquifère et leur productivité ;

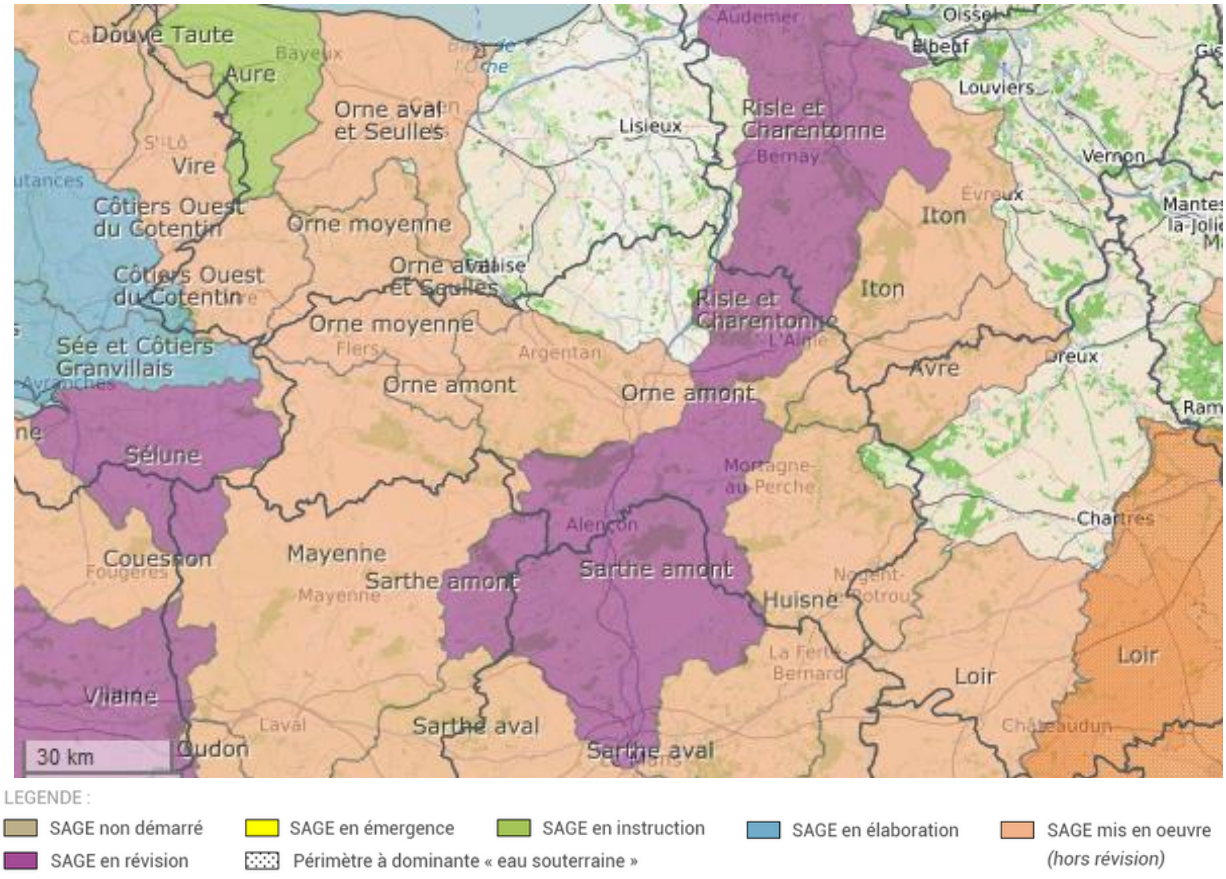



*Figure 88 : Carte de situation des SAGE (source : GESTEAU - Eau France, 2024)*

## 6.3 RECOMMANDATIONS SPECIFIQUES

### 6.3.1 Investigations proposées en domaine sédimentaire

#### *6.3.1.1 Cartographie des limites des toits et murs des principaux aquifères*

Ce volet a mis en évidence le besoin d'informations pour caractériser la compartimentation des aquifères sur les principaux bassins versants tant pour les besoins quantitatifs que qualitatifs.

Pour aider à la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique des principales formations aquifères, dont l'intégration de ces données dans les modèles et schémas conceptuels, il pourrait être proposé de réaliser une cartographie du toit et mur des formations suivantes :

- des formations crayeuses et sableuses du Cénomanien et Turonien ;
- la glauconie de base ou les formations Apto-Albiennes ;
- des formations Oxfordiennes ;
- des formations du dogger (Aalénien, Bajocien et Bathonien) ;
- du socle (sous couverture sédimentaire)

Cependant, il a pu être mis en évidence, dans le cadre de la phase 1, que l'information géologique était très morcelée sur le département de l'Orne, de qualité variable, le plus souvent réalisée à des échelles différentes, et traitée de façon non homogène.

Ce travail devrait comprendre en conséquence : la collecte et mise à jour des données (BSS) [37], la constitution d'une pile litho stratigraphique simplifiée et l'interprétation des données[38] et leur codage dans une base de données unifiée à l'échelle du département, puis la modélisation géostatistique des interfaces en vue de la production de cartes d'isobathes du toit et mur des formations aquifères.

### *6.3.1.2 Nappes superposées*

Les conditions d'alimentation et de recharge des nappes des formations crétacées et de l'Oxfordien sont encore mal appréhendées aujourd'hui (Figure 89). Il conviendrait également d'étudier plus précisément les échanges par drainance verticale (ascendante ou descendante). On s'intéressera en particulier aux conditions de recharge et de renouvellement de l'aquifère oxfordien, dans ce contexte.

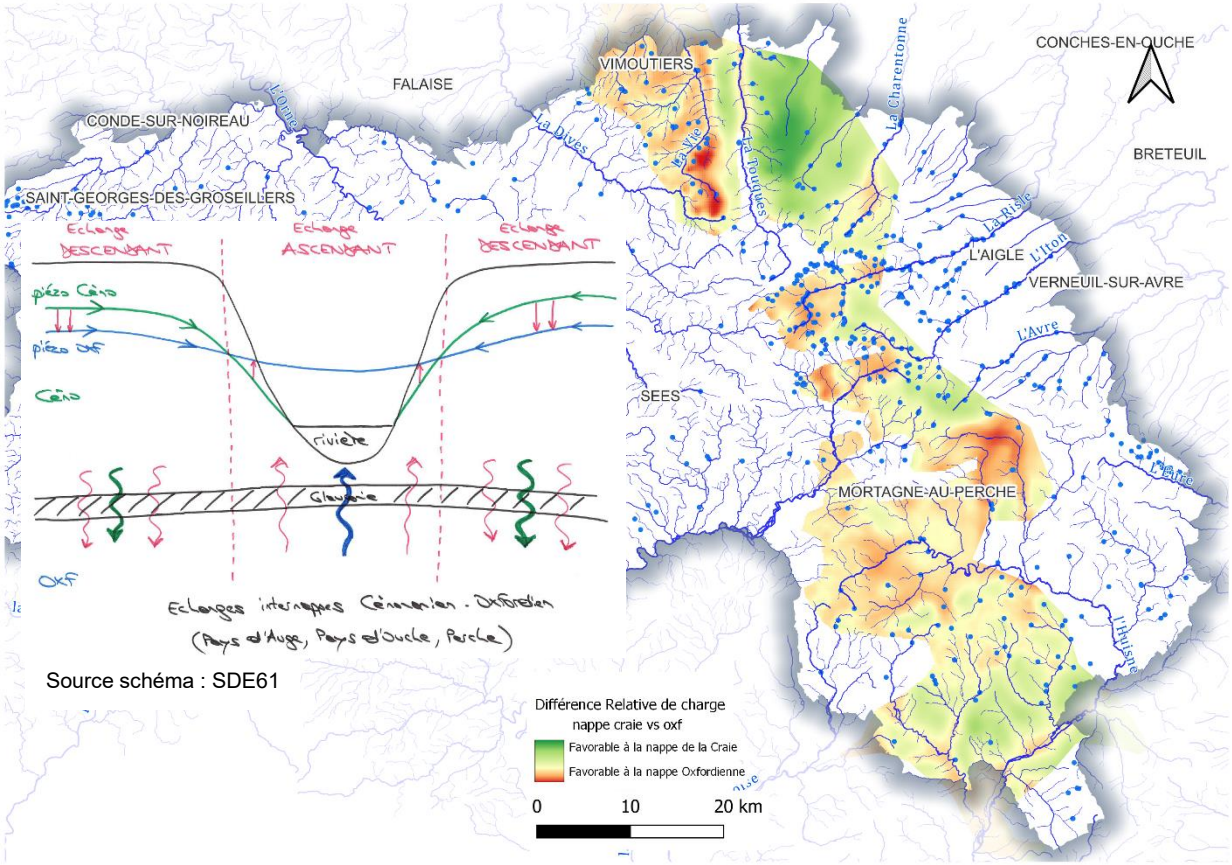



*Figure 89 : Schéma conceptuel des échanges entre la nappe de la craie et la nappe de l'Oxfordien (source : BRGM/RP-73813-FR)*
*A noter : les formations oxfordiennes se biseautent à l'ouest du pays d'Auge ce qui peut fausser la représentation proposée notamment sur le bassin de la Vie.*

[37] Des informations géologiques sont disponibles sur les secteurs couverts par des modèles maillés : ZRE Bajo-Batho de la Plaine Argentan et Trun (BRGM), ZRE Cenomanien (Perche – SOGREAH et Huisne - SAFEGE), MODGEAU (BRGM) couvrant une partie des bassins de l'Huisne et de la Sarthe ; les bassins de l'Iton, de l'Eure et de l'Avre,
[38] s'appuyant sur la synthèse produite dans le cadre de la phase 1 du programme (Rapport RP-69292-FR)

La réalisation de piézomètres en flute de pan, implantés dans les différentes unités lithologiques sur les plateaux et l'interprétation de pompages d'essai par des méthodes récentes de dérivées permettront d'améliorer le schéma conceptuel d'alimentation des différents bassins versants et de mieux caractériser les échanges entre nappes superposées[39].

Pour évaluer l'impact des prélèvements et leur soutenabilité, l'utilisation de modèles hydrogéologiques 3D serait à recommander dans ce type de contexte, comme déjà mis en œuvre par le SDE61 sur le bassin versant de l'Huisne. On rappellera toutefois que la mise en œuvre de tels outils nécessite l'acquisition de nombreuses données d'entrée ou de calage.

#### *6.3.1.3 Etudes du rôle du karst*

Dans l'ensemble du programme OAGPRO61, il a pu être mis en évidence le manque de connaissances sur les conditions de mise en place du karst (karstogénèse) des bassins versants du domaine sédimentaire.

Le BRGM propose que soit recherchée l'existence d'indices karstiques (dolines et endokarst) et la mise en œuvre de suivis quantitatifs et qualitatifs, dont la mise en œuvre de traçages. Ces investigations devant contribuer à préciser l'origine des eaux souterraines, les limites des bassins versants souterrains, et la vulnérabilité des principales ressources en eau de l'Est du département de l'Orne.

Le BRGM recommande la saisie des informations d'opérations de traçages dans la base de données nationale[40] (Figure 90).




*Figure 90 : Traçages colorimétriques dans les systèmes karstiques : dolines, pertes, cours d'eau, résurgences, source : https://bdtracages.brgm.fr/*

Dans ce contexte, il pourrait être également utile d'améliorer la connaissance de la mise en place du karst (karstogénèse) et de ses interactions avec les formations superficielles et d'altération (et donc de mieux caractériser la vulnérabilité des milieux).

Ces travaux de mise à jour pourraient s'appuyer sur ceux développés ces dernières années sur la craie de Normandie orientale, concepts de « révolution de la Craie » (Mortimore, 2011). Ces travaux devront cependant intégrer également de nouvelles recherches sur le karst des

[39] Le SDE devrait prochainement réaliser 2 doublets de piézomètres sur les plateaux en rives droite et gauche de la Touques (au Sap et à Ticheville)
[40] https://bdtracages.brgm.fr/

formations jurassiques (par exemple sur le karst de la région d'Alençon ou dans les formations oxfordiennes de la vallée de la Touques, cf. RP-69331-FR).

### 6.3.2 Investigations proposées en domaine de socle

#### *6.3.2.1 Caractérisation affinée des profils d'altération et de leur rôle hydrogéologique*

Pour valider les principales hypothèses émises dans cette étude sur le rôle des altérites dans le fonctionnement hydrologique des bassins versants du Nord (Rouvre, Noireau et Orne) du Sud de la zone armoricaine (Mayenne, Varenne et Sarthe), le BRGM propose :

- Identification morphologique et minéralogique des principales phases d'altération des différentes formations du socle armoricain du département de l'Orne, géophysique multi-échelle et sondages, interpolation par méthode des logiques floues (contrôle terrain) et cartographie des principaux ensembles.
- Diagraphies, équipement et suivi des sondages/piézomètres en vue de caractériser le rôle hydrogéologique des principales formations d'altération rencontrées. Intérêt environnementaux (support zones humides, qualité et quantité).



*Figure 91 : Front de Taille de métasédiments briovériens de la carrière de St Pierre d'Entremont sur le bassin du Noireau (Source : http://www.apgn.fr/apgn/carte_site/fic_s61_86.pdf , crédit L.Dupret)*

#### *6.3.2.2 Formation Paléozoïques*

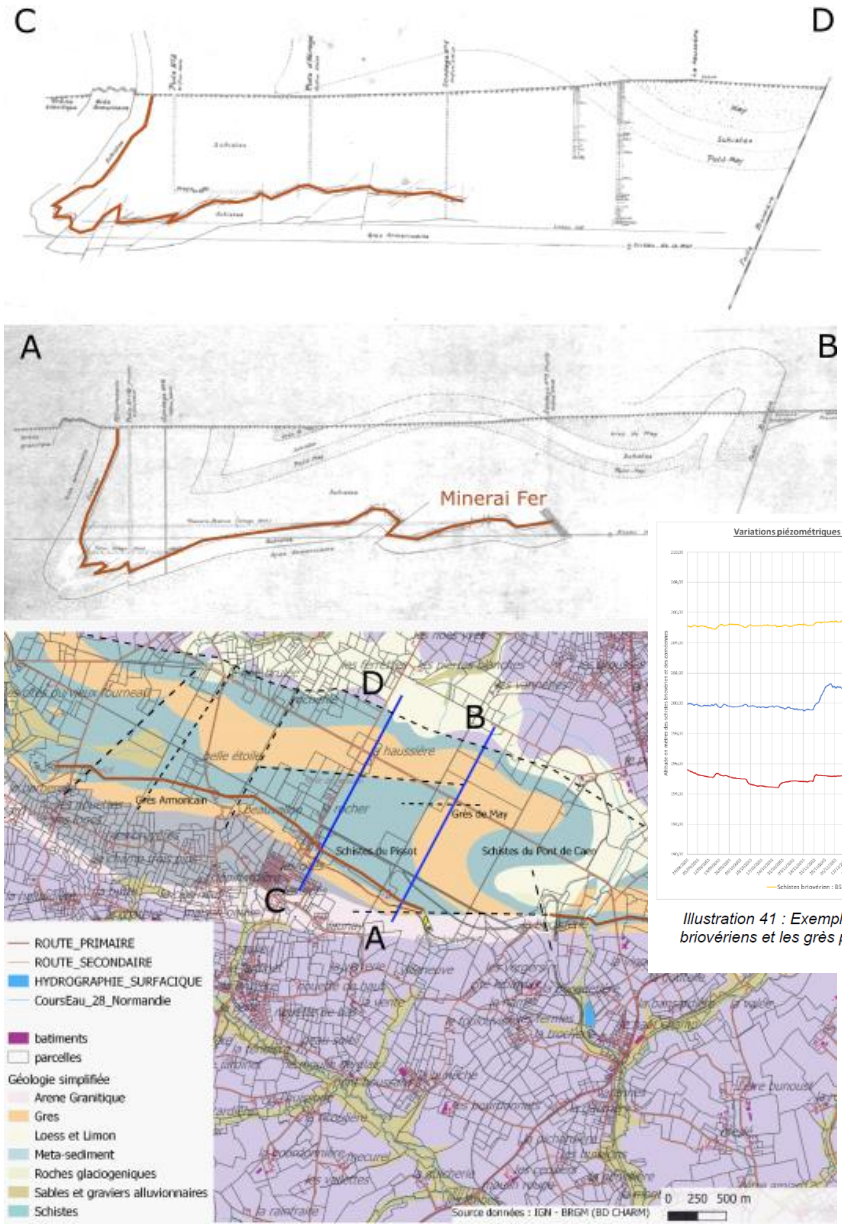
Le programme OAGPRO61 a permis de faire l'hypothèse que les formations paléozoïques pourraient représenter un réservoir d'intérêt pour les eaux souterraines (fonction capacitive et transmissive supposée).

Il conviendrait d'étudier la géométrie des réservoirs et leur compartimentation ou structuration, d'étudier le rôle des structures faillées et les échanges éventuels existants avec l'encaissant.

L'utilisation d'outils géophysiques (électriques et sismiques notamment) serait un plus pour aider à appréhender géométrie et structure de l'aquifère (compartimentation) et l'effet des structures faillées à la fois sur la géométrie et la perméabilité des différentes unités (identification de zones plus conductrices). **La synthèse des données géologiques disponibles pourrait permettre, d'initier un modèle géologique 3D de ces formations. Cet outil deviendrait alors le socle de la connaissance géologique permettant la structuration des réflexions hydrogéologiques les concernant.**

Dans ce contexte, la réalisation de piézomètres implantés dans les différentes unités aquifères apparait indispensable pour bien appréhender l'ensemble des échanges et effets de drainance entre les différentes unités lithologiques (Figure 92). La création de sites pilotes ou observatoires serait également un plus pour comprendre comment est alimenté cet ensemble aquifère, comment s'effectue sa recharge et le renouvellement des ressources (dynamique) et quels sont les facteurs qui vont favoriser la productivité ou les effets de drainage de ces ensembles ?

Par ailleurs, l'étude des interactions avec les aquifères miniers et la faisabilité d'utilisation de ces ressources comme de potentielles ressources de substitution pourraient être envisagées dans le département de l'Orne. D'autres études sont en cours en Bretagne, dans les Pays de la Loire ou en Région Nouvelle Aquitaine pour étudier l'utilisation possible des ressources d'anciennes mines ou carrières. Cette possibilité ne doit donc pas être exclue mais il conviendra d'étudier les ressources potentiellement mobilisables et l'évolution de leur qualité au cours du temps. Ces études de faisabilité d'exploitation devront nécessairement aborder l'évolution possible des aléas miniers en régime d'exploitation et évaluer les éventuels effets attendus.



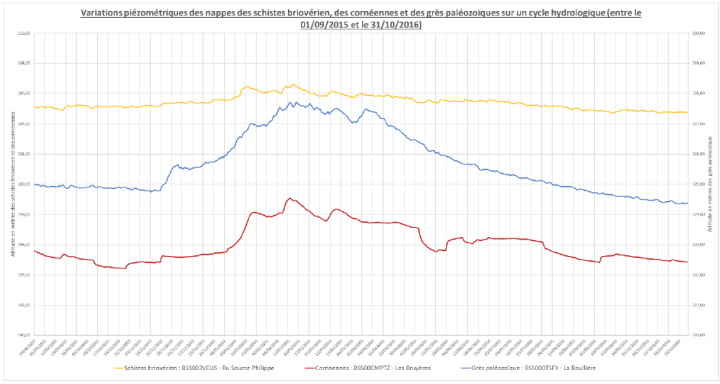




*Illustration 41 : Exemple de réactions différentes de la nappe dans les cornéennes, les schistes briovériens et les grès paléozoïques du département de l'Orne. Année hydrologique 2015-2016. Source : SDE61*

*Figure 92 : Coupes géologiques au travers les formations paléozoïques de la région de St Clair de Halouze (source BRGM- DREAL) et exemple de suivi piézométrique entre les formations paléozoïques et leur encaissant (RP-69331-FR)*

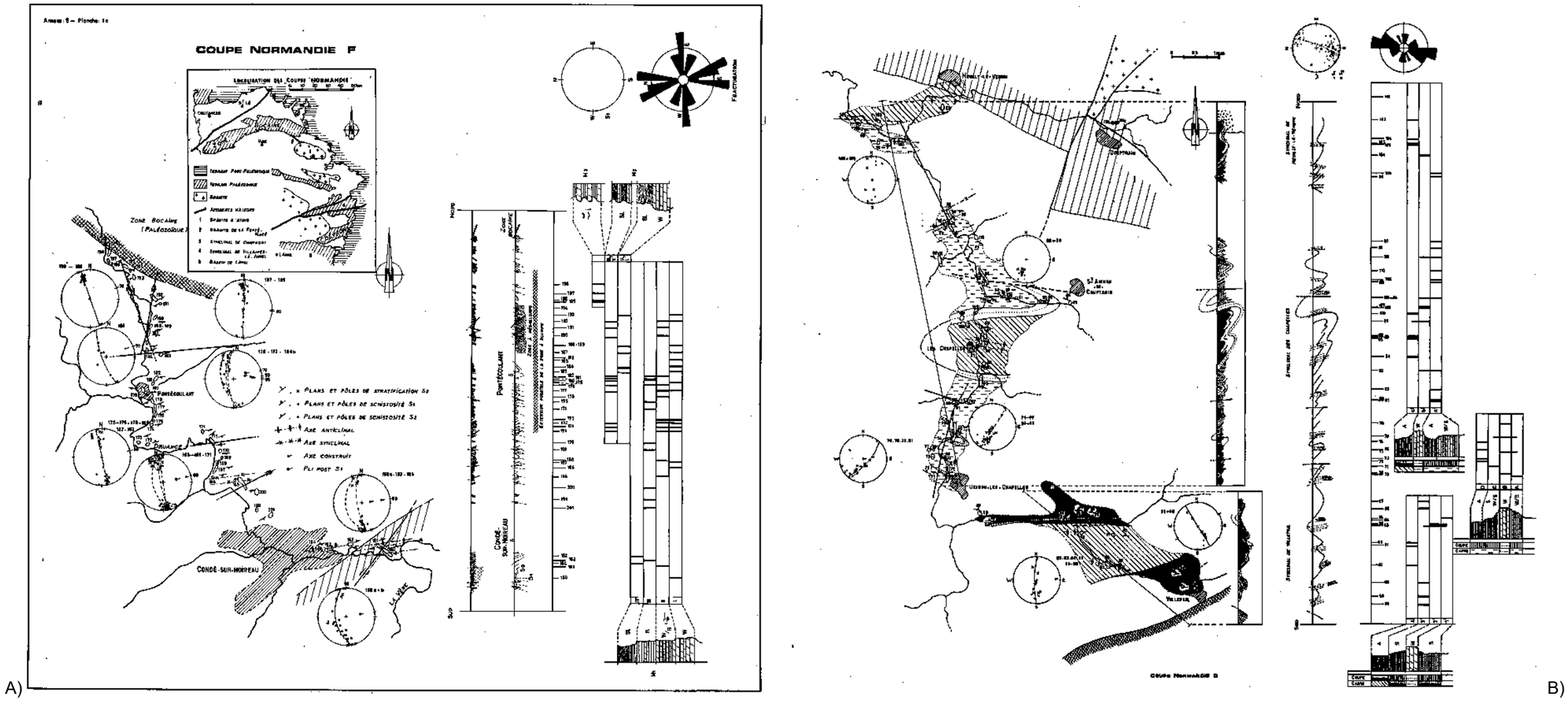
#### *6.3.2.3 Flyschs briovériens*

Dans le cadre de ce programme OAGPRO61 il a pu être mis en évidence, à l'aide des modèles globaux et du travail de synthèse sur les altérites, qu'il existait vraisemblablement une différence notable entre les aquifères des formations briovériennes des bassins du Nord (Rouvre et Noireau) et du Sud du département de l'Orne (Varenne et Mayenne).

En Normandie, cette différenciation entre lithologique et structurale entre Nord et Sud du domaine Nord armoricain a été décrite par le passé par de nombreux auteurs : (Ballèvre 2013, Guerin 2003, le Gall 1993, Gresselin 1990, Doré 1987 – cf. références dans le rapport BRGM RP-69292-FR (Meire et al., 2020). Dans le département de l'Orne, elle a été confirmée par d'anciennes prospections gîtologiques (Chantereine et al., 1983) – (cf. Figure 93 page suivante).

Mais jusqu'à présent les séries épaisses et hétérogènes des Flyschs briovériens (principalement schistes et grès) ne semblaient pas être propices à d'importantes circulations souterraines. **Alors faut-il en rester là ?**

En effet, les différentes configurations lithologiques et structurales rencontrées dans ces unités (calcaires, grès, péllites, formations volcaniques, conglomérats, turbidites, etc…plus ou moins métamorphisées) permettent de dégager différents types de perméabilités dans les roches mères et leurs altérites qui peuvent alors favoriser le stockage des eaux souterraines et leur mobilisation.




A)

*Figure 93 : Levés géologiques réalisés par Chantereine et al (1983) sur le bassin du Noireau dans le calvados A) et de la Mayenne près de Couptrain B)*

Pour répondre à la problématique lithologique et définir le potentiel hydrogéologique des différentes unités, Chouinard (2023) a par exemple utilisé différentes diagraphies pour déterminer le type de séquences et caractériser leur perméabilité.

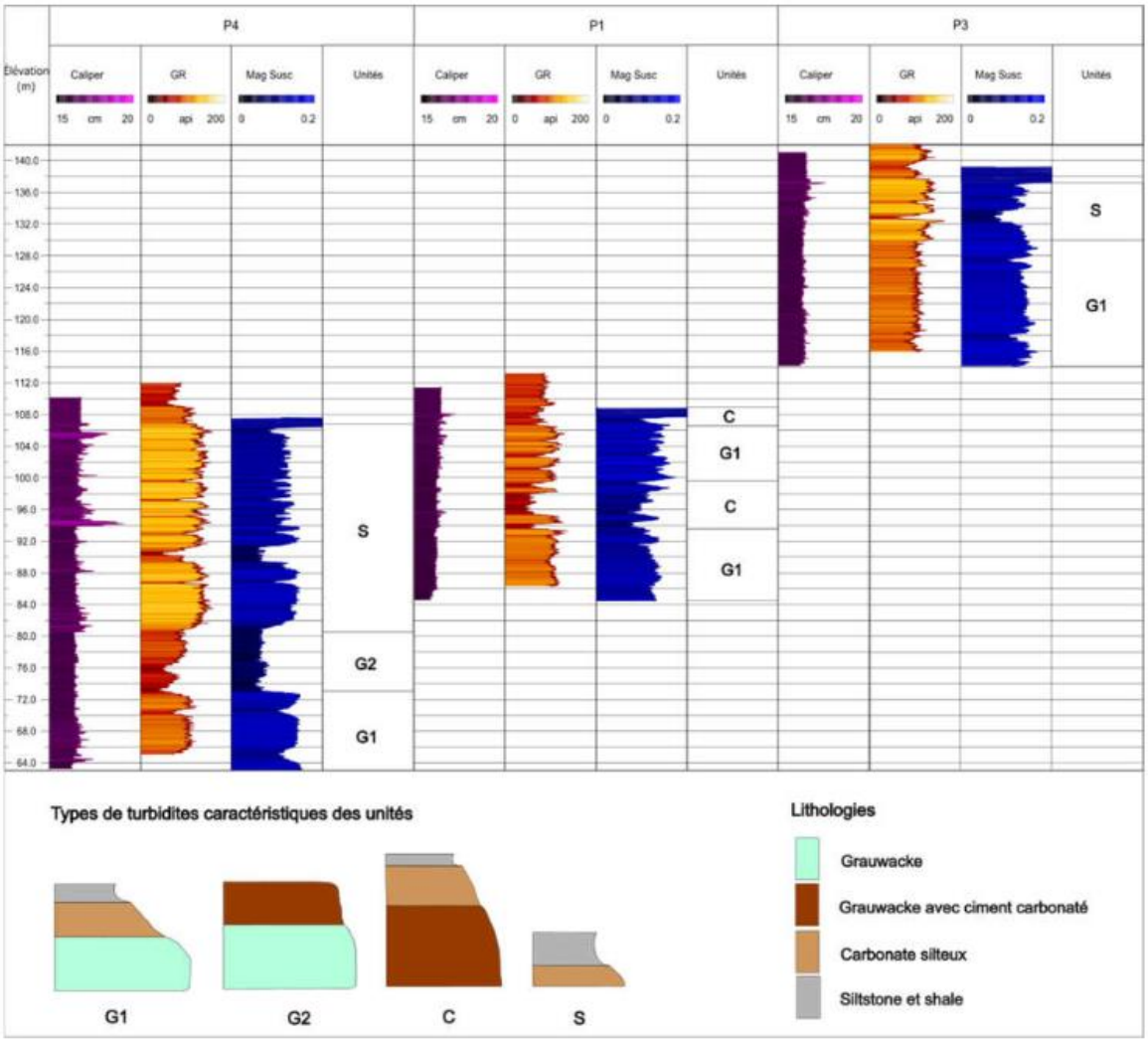



*Figure 94 : Diagraphies réalisées dans les Flyschs de Gaspésie pour identifier les caractéristiques hydrogéologiques de différentes séquences (Chouinard, 2023)*

Dans ce contexte, il sera nécessaire au préalable de bien identifier les différentes séquences de plis qui ont pu parfois inverser les séries (toit et murs des formations se trouvent alors permutés, attention aux interprétations). Pour illustrer cette dernière mise en garde, on prendra une illustration issue des travaux d'interprétation de forage de St Sauveur Villages, près de Coutances dans le département de la Manche (Cassard et Beaujour ,1988). Les auteurs ont pu identifier sur le site deux phases de déformation développant des plis de plans axiaux et schistosités différents (dans les têtes de plis et au niveau de fractures) – cf. Figure 95 page suivante.

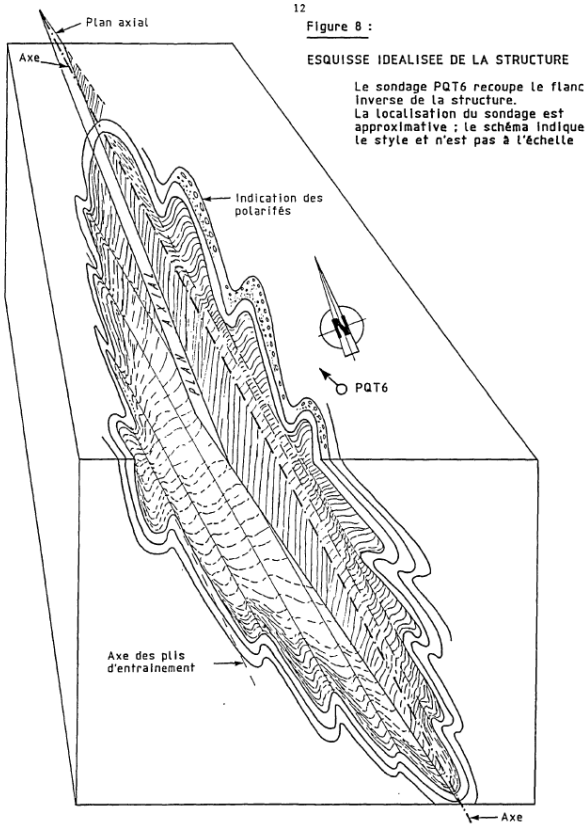



*Figure 95 : Interprétation d'une coupe de sondage incliné dans le Briovérien supérieur de St Sauveur Landelin (Manche), source : BRGM 88-SGN-420-GEO*

Sur le plan hydrogéologique, Pascaud (1991) a par exemple mis en évidence la présence d'une nappe semi-captive[41] dans les aquifères silto-gréseux du Briovérien supérieur du secteur de Barenton (Manche) dans le Parc Naturel Régional Normandie-Maine, à la limite du département de l'Orne.

Lors de projets de recherche en eau, ces unités ont montré une capacité productive intéressante (100 $m^3$/h après développement à la pompe) au contact des grès armoricains du synclinal de Mortain-Domfront (Figure 96).

[41] La nappe est protégée en surface par des niveaux argileux fins jusqu'à 12,5 m de profondeur.

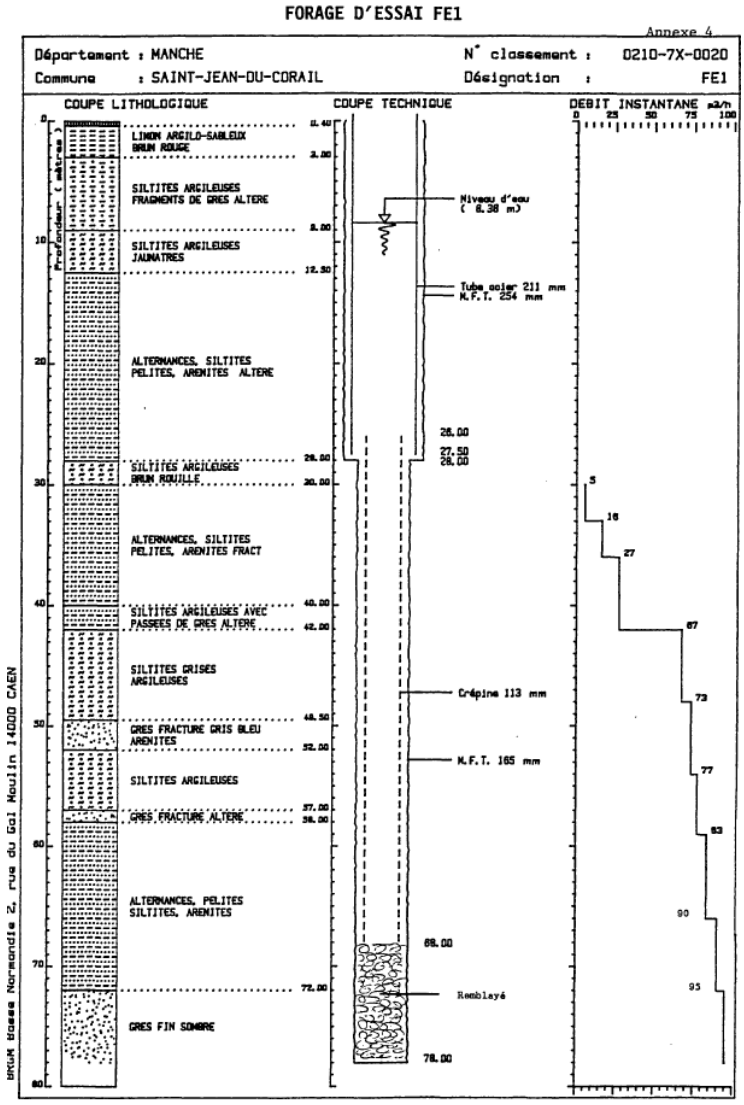



*Figure 96 : Exemple de coupe lithologique et technique dans les formations briovériennes de la commune de Barenton (Manche), à l'ouest du Parc Naturel Régional Normandie Maine. Source : Rapport BRGM/RR-33616-FR*

Les essais de pompage ont toutefois mis en évidence une compartimentation et une connectivité limitée de l'aquifère : les essais par paliers ont montré des rabattements assez importants (pertes de charges linéaires assez importantes au-delà de 30 $m^3/h$). L'essai de longue durée a montré dans ce contexte qu'il n'était pas possible de pomper au-delà de 15 $m^3/h$ pour ne pas générer des rabattements excessifs sur le long terme, limitant de fait son exploitation pour l'alimentation en eau potable.

L'interprétation des pompages d'essais indique une transmissivité calculée à la descente de T = $1{,}1.10^{-4}$ $m^2/s$ (globalement faible) et un emmagasinement S = 0,5 %, valeur étonnement élevée pour ce type de contexte captif, traduisant vraisemblablement une bonne capacité de stockage de l'aquifère. La faible valeur de transmissivité traduit vraisemblablement au contraire la présence d'un réseau de fractures mal connectées, ne permettant pas une mobilisation efficace des eaux souterraines **au sein de structures supposées complexes**. La présence d'altérites argileuses et la mise en connexion de niveaux pélliteux peut alors contraindre la nappe et ses variations et sa dynamique (limitant parfois son renouvellement – caractère captif à semi-captif).

Bien que le calage de la courbe à la remontée avec ces paramètres ne soit pas satisfaisant (choix de solution analytique discutable, qui nécessiterait aujourd'hui une réinterprétation à l'aide de méthodes comme celles de la dérivée pour mieux contraindre le schéma conceptuel local d'alimentation en eau), **on ajoutera que les altérites de surface confèrent à cette nappe un caractère semi-captif** lui assurant une protection relative (avec excès de fer en contrepartie – cf. volet qualité du programme RP-71026-FR).

Pour conclure, il semble donc tout à fait possible de lancer des investigations (géologiques, géophysiques, sondages et diagraphies, pompages et interprétation), à différentes échelles *(upcsalling ou downscalling),* pour permettre de caractériser les formations briovériennes du département de l'Orne et préciser ou confirmer leur rôle et intérêt hydrogéologique. On pourra également proposer une caractérisation des profils d'altérations dans ce contexte comme décrit plus avant.

## 6.4 VERS UNE GESTION « PILOTEE » DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES DU DEPARTEMENT DE L'ORNE

Le projet MESURA piloté par le BRGM pour l'OFB (Vernoux et al., 2020 et 2021), qui s'intéressait aux méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique, a pu démontrer que l'utilisation des modèles était fortement contrainte par la quantité de données disponibles (exemple du bassin de la Vire traité dans ce projet pour la Normandie).

L'hétérogénéité des bassins versants du département de l'Orne, comme l'illustre le cas de l'Huisne, exposé au chapitre 4, a démontré qu'un piézomètre ou une station hydrométrique unique n'est le plus souvent pas suffisante pour être représentative du fonctionnement de l'ensemble du bassin versant.

Les analyses réalisées dans ce rapport, sur les principaux bassins versants, a permis à nouveau de souligner l'importance de disposer de chroniques, représentatives du fonctionnement des principales ressources (non influencées) et de longue durée.

On rappellera à ce sujet que le BRGM a déjà mis en évidence dans le rapport RP-69331-FR, les secteurs (aquifères, blocs litho-structuraux homogènes) lacunaires de suivi pour les eaux souterraines. On rappellera également la nécessité de bancariser ces données et de leur mise à disposition, notamment sur les plateformes nationales comme ADES[42] (cf. RP-69332-FR).

Il peut alors être proposé de travailler sur l'optimisation des réseaux de suivi des milieux aquatiques (ESO+ESU) pour proposer aux services de l'Etat et aux collectivités, des référentiels et indicateurs quantitatifs pertinents :

- pour évaluer la **dynamique de recharge des aquifères libres et captifs** sur les différents bassins versants et sous-bassins : densifier le suivi hydrométrique et piézométrique, réaliser des piézomètres en flute de pan pour instrumenter les aquifères superposés ;
- **pour le suivi des étiages et sécheresses** : identification de secteurs homogènes (dynamiques de vidange et fréquence d'atteinte des minimaux, lien ESU/SEO, choix d'ouvrages et indicateurs pertinents (études en cours dans le Calvados, l'Eure et la Seine-Maritime) ;

[42] https://ades.eaufrance.fr/

- **pour mieux évaluer l'effet des prélèvements sur les ressources en eau** en s'appuyant notamment sur des indicateurs quantitatifs ou environnementaux pertinents (DMB, QMNA5, autres), ce qui implique également une meilleure connaissance des interactions au sein des hydrosystèmes et une meilleure connaissance du fonctionnement des milieux aquatiques.

Lorsque ces points de suivi des eaux de surface et des eaux souterraines sont suffisants pour être représentatifs du fonctionnement des ressources en eau, alors il est plus aisé d'envisager leur usage dans un objectif de gestion de ces ressources.

L'utilisation des modèles disponibles (maillés ou globaux) dans le département pourrait dès lors être envisagée pour :

1) évaluer les ressources disponibles : poursuivre et améliorer les démarches types volumes prélevables EVP ou HMUC sur les principaux bassins versants ;

2) travailler sur des scenarii prospectifs des évolutions possibles des ressources en eau en contexte de changement climatique, pour l'ensemble des bassins versants du département de l'Orne (Figure 98 page suivante) (cf. remarques paragraphe 4.4.2) ;

3) travailler sur l'anticipation d'évolution des niveaux et débits saisonniers (intégration des données dans l'outil Météo des Nappes[43] du BRGM – cf. Figure 97).

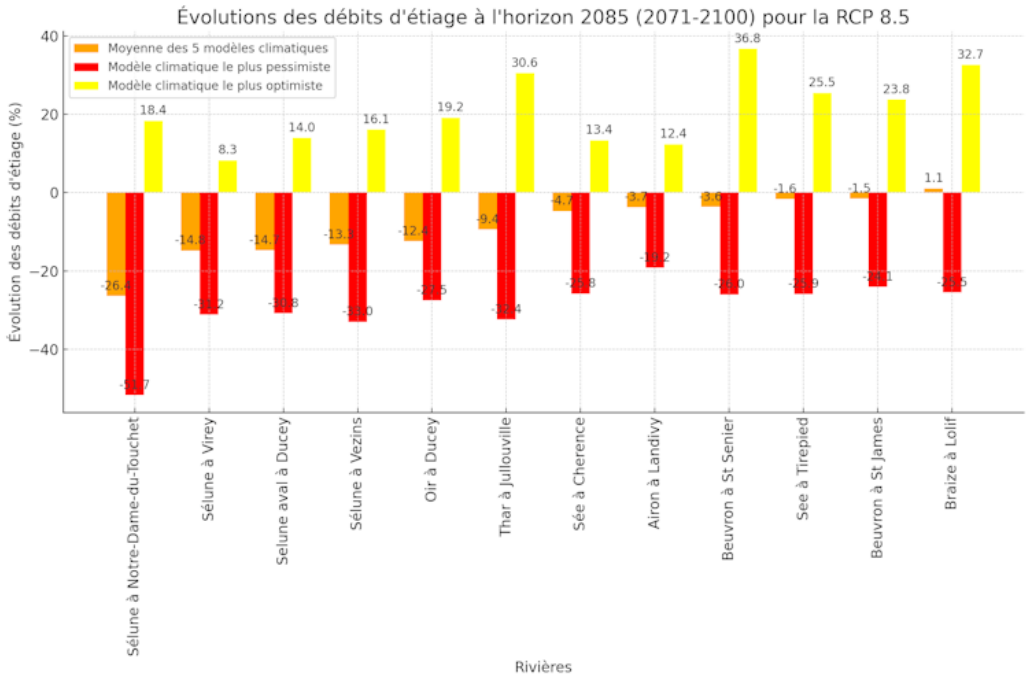



*Figure 97 : Exemple d'évolution possible des débits de la Sélune dans le département de la Manche, trajectoire climatique RCP8.5, moyenne de 5 modèles issus de la « short list » de Météo France (source : article de The Conversation tiré du rapport BRGM/RP-71398-FR)*

[43] https://meteeaunappes.brgm.fr/fr

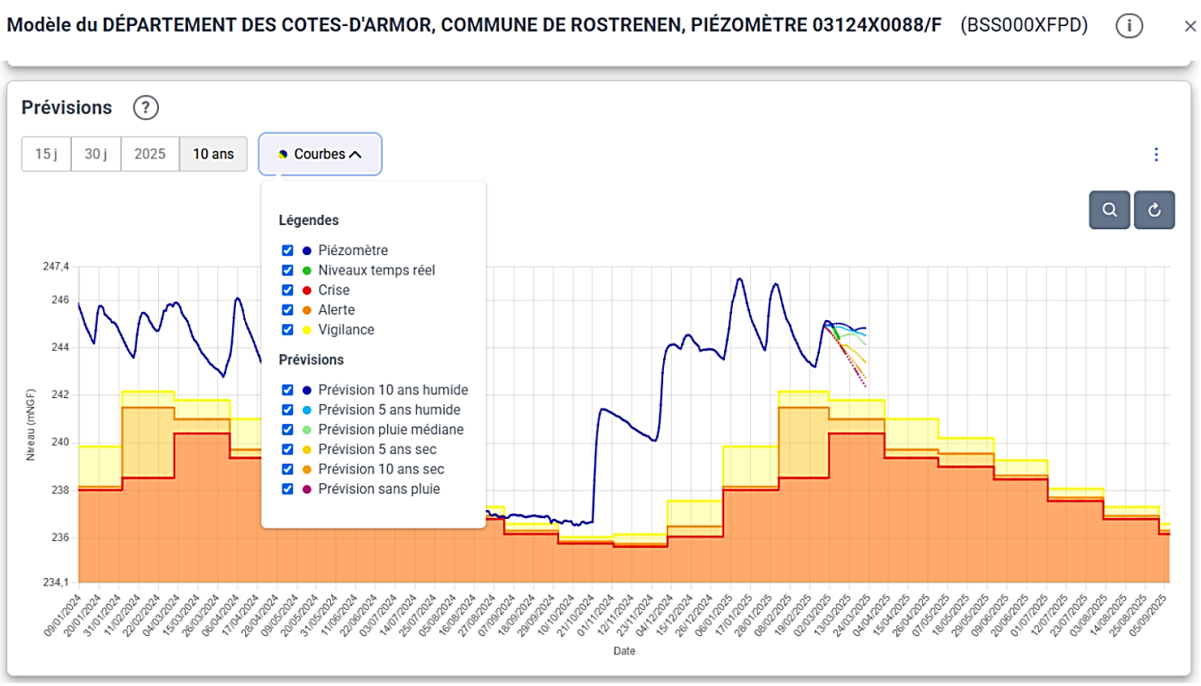



*Figure 98 : Visualisation graphique de différentes évolutions possibles des niveaux piézométriques en période habituelle de recharge selon plusieurs scénarii tendanciels, comparaison avec période de retour statistique ou seuils fixés dans l'arrêté « sécheresse » départemental, exemple du département des Côtes d'Armor tiré du site internet MétéEAU Nappes (à la date du 01/09/2025).*

# 7 Références Bibliographiques

**Arnaud L., Badinier G., Dewandel B., Devau N., Lefèvre Y. Boutirame I. ; Vacher A. (2022) -** Etude de la nappe de la craie entre Perche et Beauce - Phase 2. Rapport final . BRGM/RP-72056-FR, 271 p.

**Boutt D.F., (2018) -** Assessing hydrogeologic controls on dynamic groundwater storage using long-term instrumental records of water table levels. Hydrological Processes 31, 1479–1497. https://doi.org/10.1002/hyp.11119

**Cassard D., Beaujour A. (1988)** – Etude structurale du sondage PQT 6 de Saint Sauveur Lendelin (Manche), Rapport BRGM 88 SGN 420 GEO, 22p.

**Chanteraine J. Chauvel j.-J., Dupret L., Gatinot F., Icart J.-C., Le Corre C., Rabu D., Sauvan P., Villey M. (1983)** - Inventaire Lithologique et Structural du Briovérien (Protérozoïque) de la Bretagne Centrale et du bocage Normand pour la recherche de guides métallogéniques, Document BRGM N°67

**Chouinard, C (2023)** - Comportement des écoulements hydrogéologiques et amorce de chenaux dans une séquence de flysch dans le contexte paraglaciaire du nord de la gaspésie (Canada), Mémoire Maîtrise UQAR, 122 p.

**Collin J.-J. (2004)** Les eaux souterraines - Connaissance et gestion., éditions. BRGM - HERMANN éditeurs des sciences et des arts, 170p.

**David P.-Y. (2012) -** Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre, Etat des connaissances et Analyse des données, Rapport BRGM/RP-60458-FR ; 204 p.

**David P.-Y., Lanini S., et Compère F. (2022)** – Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050. SDEAU50 et AESN, Rapport final. BRGM/RP-71398-FR, 222 p.

**David P.-Y., Meire B., Cary L., Charlier J.-B., Ladouche B., Lemesnil M., Richard M. , Yecora Zorzano L., (2016)** – Etude du fonctionnement et de la vulnérabilité du bassin versant de l'Iton - Etat des connaissances, analyse des données et premiers résultats. Rapport final. BRGM/ RP-65618-FR, 401 p., 246 ill., 22 tabl., 12 ann.

**Hayes, N.R.; Buss, H.L.; Moore, O.W.; Krám, P.; Pancost, R.D., (2020)** -Controls on granitic weathering fronts in contrasting climates.Chem. Geol. 535, 119450.

**Idée E., Jallais N., Boisson A., Neveux A. avec la collaboration de Gresselin F., Dugué O. (2019)** – Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne, Volet hydrogéologique. Rapport final. BRGM/RP-69331-FR, 258p., 122 ill., 20 tabl., 3 ann.

**Idée E., Jallais N.** avec la collaboration de Eid P. et Malassigne V. (2019) – Synthèse géologique et hydrogéologique du département de l'Orne. Volet bancarisation des données. Rapport final BRGM/RP-69332-FR, 55 p., 17 ill., 2 ann., 1 CD.

**Laignel B., (1997)** – Les altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris : Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Document du BRGM 264, 224 p.

**Laurencelle M., Lohier T., (2024)** - Maturation de codes scientifiques R de traitement de données liées à l'Eau au BRGM (MATUREAU). 10èmes Rencontres R, Société Française de Statistique (SFdS), Jun 2024, Vannes, France. hal-04576119.

**Lions J., Idée E., Guerard Q. (2022)** – Faciès chimiques et qualité des eaux souterraines des principaux aquifères du département de l'Orne. Rapport Final. BRGM/RP-71026-FR, 115 p.

**Lithologic (2009)** – Synthèse hydrogéologique de l'Aquifère des calcaires bajo-bathoniens entre Alençon et le Mêle-sur-Sarthe. Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne.

**Maillot M., Boisson A., Boivin B., Idée E., Jallais N. (2024) -** Outils d'Aide à la Gestion et Protection des ressources en eau du département de l'Orne (61) - Réalisation de cartes piézométriques départementales. Rapport final V1. BRGM/RP-73813-FR, 57 p.

**Massabie P., Aubert C., Ménard J.-L., Roy H., Boulestreau-Boulay A.-L. (2013)** - Maîtrise des consommations d'eau en élevage, élaboration d'un référentiel, Identification des moyens de réduction, Construction d'une démarche de diagnostic. Innovations Agronomiques, N°30, pp.87-101. 10.17180/2tw8-t466. Hal-04651979

**Meire B., Caritg S., Idée E. avec la collaboration de Gresselin F. Dugué O. (2019)** – Synthèse géologique et hydrogéologique du département de l'Orne. Volet géologique et structural. Rapport final. BRGM/RP-69292-FR, 169 p., 74 ill., 1 ann.

**Menillet F., Rioult M., Havlicek P., Lecointe A., Monciardini C., Pascaud P. (1994)** – Carte géologique de la France à 1/50.000, feuille de Vimoutiers (n°177) et notice explicative. Ed. BRGM.

**Mortimore R. (2011)** - A chalk revolution: What have we done to the Chalk of England ?, Proceedings of the Geologists Association 122(2): 232-297, DOI: 10.1016/j.pgeola.2010.09.001

**Nash, J. E. , Sutcliffe, J. V. (1970)** : River flow forecasting through conceptual models : part I-A : discussion of principles ; Journal of Hydrology ; 10 ; pp 282-290

**Pascaud P. (1991)** Travaux de recherche hydrogéologique par sondages, suivi et interprétation des pompages d'essai réalisés sur le forage FE1 dans le secteur des Ponceaux, Commune de Barenton et St Jean du Corail (Manche)- Rapport BRGM/RR-33616-FR, 63 p. 43 pht., 2 cartes.

**Persello L. (2008)** - Recensement des ouvrages de prélèvement d'eau souterraine, autres que ceux destinés à l'alimentation en eau potable, sur le territoire du S.A.G.E. Orne amont- Etat des Lieux – Rapport de stage Licence Professionnelle UQEaux Protection de l'Environnement, Usages et Qualité des Eaux, U. Poitiers, 52p.

**Quesnel F. (1997)** – Cartographie numérique en géologie de surface : application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Document du BRGM 263, 430 p. : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00739116/document

**Rieul L. (1992)** - Irrigation. Cemagref Editions, pp.300, 1992, Coll. Guide pratique du CEMAGREF, 2e Edition, 85362-287-8. hal-02576880

**Rouxel E. ; Lasseur E. ; Baudouin V. ; Briais J. ; Andrieu S. ; Badinier G. ; Assy Y. ; Tahon L. ; Allanic C. ; Baptiste J. ; Chrétien P. ; Bourgine B. ; Bellette E. ; D'Incau-Bayal E. ; Fournely J. ; Genre-Grandpierre E. ; Bodéré G. (2020)** - ModGeau : Synthèse et Modélisation géologique du mésozoïque de Sarthe et de Maine-et-Loire, pour une gestion améliorée des ressources en eau. Rapport final . BRGM/RP-70301-FR, 129 p.; 1 ann.

**SAFEGE (2012)** - Modélisation Hydrodynamique des aquifères de l'Huisne (61), Phase 3 et 4 construction et calage du modèle et simulations. Version 3, 90p.

**Salquèbre D. ; Bertin C. ; Douez O. ; Rouxel E. (2013)** - Proposition de délimitation des Nappes à réserver à l'Alimentation en Eau Potable (NAEP) - Bassin Loire-Bretagne. Rapport final . BRGM/RP-62961-FR, 42 p., 1 ann., 1 CD

**Suez Consulting (2022)** - Etude sur la gestion quantitative des ressources en eau du bassin Sarthe amont et élaboration de programmes d'actions dans le cadre de la révision du SAGE, Phase 1 | Objectif 3 : Connaître les prélèvements et rejets réalisés sur le périmètre du SAGE, en leur appliquant individuellement un degré d'incertitude. Rapport V2.0 Avril 2022, projet 20NHF015, 241p.

**Surdyk N (2023)** - Comparaison de méthodes d'acquisition de données pour l'amélioration des connaissances des prélèvements agricoles. Rapport Final. BRGM/RP-72890-FR, 39 p

**Thiéry, D.** (2014) – Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 136 p., 66 fig., 2 ann.

**Thiéry, D.** (2015) – Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.

**Thiéry D.** (2019) – Logiciel ÉROS version v7.1. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-67704-FR, 177 p., 82 fig.

**Thiery Y., Lacquement F., Marçot N. (2019)** - Landslides triggered in weathered crystalline rocks of moderate latitudes: A case study in Mediterranean environment (The Maures Massif, France), Engineering Geology, Volume 248, Pages 164-184, ISSN 0013-7952, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.002.

**Van Loon, A.F. (2015) -** Hydrological drought explained. WIREs Water 2, 359–392. https://doi.org/10.1002/wat2.1085

**Verague J. (1977)** - Les altérations des roches du socle armoricain: relictes morpho-climatiques de la continentalisation post-hercynienne entre Sées et Alençon, Basse-Normandie. Norois. Revue géographique de l'Ouest et des pays de l'Atlantique Nord, 1977, vol. 24, n°. 94, p. 251-269

**Vernhet Y., Janjou D. (2002)** - Carte géologique harmonisée au 1/50.000 du département de l'Orne. Rapport BRGM/RP-51626-FR, 31 p., 3 fig., 18 tab., 1 annexe, 2 pl. hors texte.

**Vernoux J.-F., Allier D., Arnaud L., Castillo C. (2021)** – Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau (MESURA). Rapport final BRGM/RP-70978-FR, 77p. 58 ill.

**Vernoux J.-F. ; Castillo C. ; Allier D. ; Arnaud L.; Manlay A. ; Thinon-Larminach M. ; Aunay B. ; Chabart M. ; Idée E. (2021)** - MESURA - Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau - Rapport d'avancement n° 2 . BRGM/RP-70673-FR, 243 p.

**Vernoux J.-F. ; Castillo C. ; Manceau J.-C. (2020)** - MESURA - Méthodologies d'extrapolation du comportement des aquifères ayant une faible densité de suivi piézométrique pour l'évaluation quantitative des masses d'eau. Rapport d'avancement . BRGM/RP-70057-FR, 34 p., 2 ann.

**Weider, K., Boutt, D.F. (2010)** - Heterogeneous water table response to climate revealed by 60 years of ground water data. Geophysical Research Letters 37. https://doi.org/10.1029/2010GL045561

# Annexe 1 Synthèse bibliographique des données de prélèvements

| Bassin Versant | Avre | Huisne | Iton | Risle | Sarthe |
|---|---|---|---|---|---|
| Origine données Source Biblio | - Rapport BRGM/RP-60458-FR (David P.-Y., 2012) Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre, Etat des connaissances et Analyse des données<br>- Document d'Etat des Lieux (Sept 2006) du Schéma de Gestio et d'Aménagement des Eaux du Bassin de l'Avre, SIVA/DPT27 | Rapport Final de l'Etude VP du SAGE de l'Huisne (SAFEGE, 2015)<br>Modélisation Hydrodynamique des aquifères de l'Huisne (SAFEGE, 2012)<br>EDL du SAGE (2013) | - EDL SAGE (2003)<br>- Etude du fonctionnement et de la vulnérabilité du bassin versant de l'Iton BRGM/RP-65618-FR | Rapport EDL SAGE (2005) de la Risle et Charentonne, volet III - bilan des usages de l'eau | Etude SUEZ Consulting (2023) - Etude sur la gestion quantitative des ressources en eau du bassin Sarthe amont et élaboration de programmes d'actions dans le cadre de la révision du SAGE. Phase 1 \| Objectif 3 : Connaître les prélèvements et rejets réalisés sur le périmètre du SAGE, en leur appliquant individuellement un degré d'incertitude<br>Phase 2 \| Objectif 6 : Connaître l'état des ressources (souterraines ou superficielles) et caractériser les<br>secteurs sous tension |
| Aquifère concerné | Cénomanien (craie) sous les sables du Perche | Non précisé dans l'étude de 2015, Cénomanien captif exclus ???<br>Crétacé indifférencié et Jurassique dans l'étude de 2012 | Craie | Craie | Cénomanien, Oxfordien, Bajo-Batho, Socle Armoricain |
| BV Eaux surface concerné | Avre et ses affluents | Huisne et ses Affluents | Iton | Risle, Guiel, Charentonne | Hoene, Sarthe Amont et Sarthon, Orne Saosnoise, Bienne |
| Période EdL | 2000-2009 | 1998-2012 | 1994-2013 | 1997-2001 | 2000-2019 |
| Prélèvements industriels | 0.4 à 0.6 Mm3/an entre 2000 et 2009 d'après BRGM (dont plus de 50 %pour Center Parcs situé sur la commune des Barils), rien de répertorié dans le département de l'Orne à priori | Ensemble du BV : 5 à 6 Mm3/an<br>Détail pour secteur Ornais (1 ou 2 prelev ESOU uniquement) et Secteur Nogent -Ferté Bernard ( ? +++ dont 4 prelv ESOU et 2 prelev ESU) ? | évolution de 6,1 à 4,2 Mm3/an sur la période 1997-2003 (-30%).<br>3,5 Mm3/an prélevés à la nappe (sur 4,2 en 2003) dont 3 Mm3/an prélevés à eux seuls par la papeterie d'Hondouville dans le dpt de l'Eure. La part dans la partie amont du BV n'est pas précisée, faible à priori au regard des infos disponibles. | 5,4 Mm3 en 2001 en baisse de 10% sur la période de 1997 à 2001 (-10%). 1,8 Mm3/an sont prélevés en nappe, le reste étant dans les cours d'eau, ce sont ces derniers qui diminuent le plus sur la période considérée. Dans l'Orne on recense 3 industriels à Rai et St Sulpice qui prélèvent tous en nappe environ 562 Km3/an en 2001, (10,4 % du total) | Hoene : 0, Sarthe Amont 277 K, Orne Saosnoise 22K, Bienne : 18 Km3/an<br>Principalement sur BV Sarthe par 2 Industriels |
| Prélèvements AEP | 4.71 Mm3/an en 2003 sur l'ensemble du bassin (varie entre 4 et 5 Mm3) + 15 à 25 Mm3/an pour la ville de Paris (Vigne +Breuil+Vert en Drouais). Seulement 3 forages dans l'Orne (Randonnai et la Poterie au Perche) pour environ 77Km3/an prélevés en 2003 (16% des besoins totaux Hors prélèvements EDP). Le BRGM indique que le besoin reste pratiquement constant sur la période 2000-2009, autour de 5 Mm3/an sans EDP. | Ensemble du BV : 25 à 30 Mm3/an avec max période 2004-2005-2006<br>Détail pour secteur Ornais env.200 à 300 Km3/an et Secteur Nogent -Ferté Bernard env. 500 Km3/an | La consommation est en baisse sur la periode passant de 18 Mm3/an au début de la période à moins de 12 Mm3 en 2013. (100% dans les ESOU), le secteur amont Ornais on dénombre 180 Km3/an pour 4 secteurs (Chandai, Les Aspres, Moulins la Marche, Vitrai sous l'Aigle). L'amont Ornais représente donc 1,5 % de l'ensemble des prélèvements AEP du bassin. | 1,7 Mm3/an prélevés dans l'Orne en 2001 pour 14,3 Mm3 prélevé sur l'ensemble du bassin. Les VP dans l'Orne pour l'AEP représentent 11,8 % du voluume total prélevé sur le BV | Hoene : 397K, Sarthe Amont 4,9 M, Orne Saosnoise : 1,2 Mm3/an , Bienne 1,2 Mm3/an<br>A noter : prise d'eau Alençon sur la Sarthe (3,2 Mm3 en 2019) et prélèvements principalement dans le Dogger/Lias et Socle, plus marginalement Cénomanien et Oxfordien. |
| Prélèvements Agricoles Irrigation | Recensement n'est pas fait, estimatif pour irrigation<br>Origine RGA 2000 communal -> 4 584 ha irrigable (7% des surfaces totales cultivées) dont seulement 1% (111ha) dans la partie Ornaise<br>cela représenterait moins de 1 Mm3 les années humides à plus de 1,5 Mm3/an les années sèches pour l'irrigation pour l'ensemble du BV (moins de 5% prélevé au cours d'eau, majorité en ESOU). Essentiellement dans le Thymerais, hors département de l'Orne<br>Le BRGM estime par méthode ETM de calcul de dose d'irrigation que le besoin (fourchette haute) pourrait être de entre 3 à 7Mm3/an | Ensemble du BV : varie de 2 à 8 Mm3/an selon les années, pic entre 2003 et 2006 puis 2009-2011 (80%ESOU majoritairement dans la nappe des sables Cénomaniens).<br>Détail pour secteur Ornais inf. 15 km3/an et Secteur Nogent - Ferté Bernard inf à 190 Km3/an, essentiellement dans les eaux de surface (?). L'Orne ne représenterai env. 1% seulement des besoins du BV.<br>irrigation sur Maïs essentiellement en 2009 entre le 15 juin et 15 septembre | 2520 ha de surfaces irrigables sur l'ensemble du BV (2,9 % de la SAU en 2003). Le secteur amont ne représenterait que 21ha soit 0,2% de la SAU. D'après les données de l'Agence les prélèvement varient entre 0,2 Mm3/an à près de 1,1 Mm3/an entre 1997 et 2003. La répartition entre ESOU et ESU est en moyenne de 75/25 % | 165 Km3 de prélèvement agricole dont quasi aucun pour l'irrigation. 60% dans la nappe et 40% dans les ESU. 5 Agriculteurs du BV représenteraient 95 % de ces prélèvements, tous sont situés dans le dpt de l'Eure. Environ 12 Km3/an sont répertoriés pour les communes du Dpt de l'Orne. | Hoene et Sarthe Amont : 15 K, Orne Saosnoise : 431 K et Bienne : 474Km3/an<br><br>Pour l'irrigation, après comparaison le BE a considéré que les données de l'AELB a partir de 2010 étaient relativement fiables mais a utilisé un méthode de caclul basé sur l'ETM et pondéré par les surfaces irriguées. La difficulté a davantage consisté à définir quel type de ressource était exploitée (cours d'eau, nappe alluviale, nappe "profonde" libre ou captive). Le travail réalisé met en avant que les prélèvements pour l'irrigation sont plus importants dans les ESU à l'échelle de l'ensemble du BV. et tendent à augmenter dans les alluvions de la Sarthe Amont. |
| Prélèvements Agricoles Abreuvement | Non estimé dans l'EDL du SAGE, le BRGM estime le besoin à environ 211 Km3/an à partir du RGA et d'une estimation du besoin pour le cheptel. Plus de 95% des prélèvements sont effectués dans les ESOU | Besoin estimé à 3,2 ou 3,6 Mm3/an avec RGA 2000 et 2010 pour l'ensemble du Bassin<br>répartition 35 % AEP et 65 % Milieu. Soit en moy. 2,34 Mm3/an. Estimé à 1 Mm3/an en 2018 sans détail du calcul. | NC | | Estimatif des consommations des différents cheptels.<br>Hoene : 49K, Sarthe Amont : 485K, Orne Saosnoise : 226 K, Bienne : 37 Km3/an |
| **Total dans le Dpt de l'Orne** | Estimé < 100 Km3/an dont la majorité se fait dans les ESOU (>80 %) | Environ 2 Mm3/an principalement dans les ESOU (>80%) | L'amont du BV (secteur Ornais) pourrait ne représenter que 1 ou 2 % du total du BV (Environ 15 Mm3 au en 2013), soit 150 Km3/an. Les prélèvements se font en grande majorité dans les eaux souterraines (> 80%). | 2,2 Mm3/an en 2001 dans les ESOU (quasi pas de prélèvement ESU sauf pour abreuvement, mais part insignifiante). | Bilan 2019 (Prelev majoritaires en ESU > 80% en moyenne). Valeurs arrondies<br>Hoene : 0,5 M, Sarthe Amont : env. 5,8 M, Orne Saosnoise : 1,9 M, Bienne : 1,8 M m3/an |

| Bassin Versant | Orne amont | Orne Ure | Orne Baize | Dives | Vie | Touques | Rouvre | Noireau | Mayenne | Eure amont |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Origine données Source Biblio | Etude quantitative Calvados/ZRE Bajo-Batho BRGM (2024) | | | | | | | | Etat des Lieux des usages, HMUC/PTGE SAGE Mayenne, Programme EAU CAP 2050/2070 | Etude de la nappe de la craie entre Perche et Beauce (BRGM, 2022) Rapport RP-72056-FR |
| Aquifère concerné | Bajo-Bathonien | Cénomanien, Oxfordien, Bajo-Batho, Socle Armoricain | Bajo-Batho, Socle Armoricain | Bajo-Batho, Socle Armoricain | Oxfordien, Cénomanien | Oxfordien, Cénomanien | Socle Armoricain, granite et cornéennes, flysch | Socle Armoricain, cornéennes princpalement et granite | Socle Armoricain, grès et schistes paléozoïques, cornéennes, granites et flysch | Craie, Sables du Perche |
| BV Eaux surface concerné | Orne et petits afflue | Orne et Ure | Orne et Baize | Dives et Barges | Vie et Viette et petit | Touques | Rouvre | Noireau | Haute Mayenne et Aisne, Varenne et Egrenne, Colmont | Eure (sce à la station de St Luperce |
| Période EdL | 1994-2020 | | | | | | | | 2010-2020 | 2008-2019 |
| Prélèvements industriels | Abs | 124 Km3/an en 2020 dans les ESOU à prox. Argentan | Abs | 44 Km3/an en 2020 dans les ESOU | 150 Km3/an dans les ESOU et 4 Km3/an dans les ESU en 2020 (Livarot) | Abs | 322 Km3/an dans les ESOU et 164Km3/an dans les ESU en 2020 (secteur Briouze) | 18 Km3/an en 2020 dans les ESOU secteur de condé | dans les ESOU : Environ 0,25 Mm3/an du BV de la Varenne et 0,3 Mm3/an dans le BV de la Mayenne plus 0,35 Mm3/an dans les ESU de la Mayenne | Non représentatif |
| Prélèvements AEP | 1,8 Mm3/an dans les ESOU en 2020 | 1 Mm3/an dans les ESOU en 2020 | 187 Km3/an dans les ESOU et 904 Km3/an dans les ESU en 2020 | 195 Km3/an dans les ESU en 2020 | 1,6 Mm3/an dans les ESOU en 2020 | 1,6 Mm3/an dans les ESOU en 2020 | 210 Km3/an dans les ESOU et 905 Km3/an dans les ESU en 2020 | 863 Km3/an dans les ESOU et 315Km3/an dans les ESU en 2020 | Environ 1,8 Mm3/an principalement dans les ESU du BV de la Varenne<br>Environ 1,5 Mm3/an principalement dans les ESOU du BV de la Mayenne | env 1,2 Mm3/an dans les ESOU principalement dans les sables du Perche et la craie |
| Prélèvements Agricoles Irrigation | 53 Km3/an dans les ESOU en 2020 | 76 Km3/an dans les ESOU en 2020 | Abs | 61 Km3/an dans les ESOU et 65Km3/an dans les ESU | Abs | Abs | Abs | Abs | Estimés comme peu significatifs dans les ESU et ESOU sur les deux BV de la Varenne et Mayenne | environ 0,7 Mm3/an dans les ESOU dans les sables du Perche et la Craie |
| Prélèvements Agricoles Abreuvement | 100 Km3/an dans les ESOU et 153 Km3/an dans les ESU en 2020 | 251 Km3/an dans les ESU en 2020 | 27 Km3/an dans les ESOU et 220 Km3/an dans les ESU en 2020 | 217 Km3/an dans les ESU en 2020 | 173 Km3/an dans les ESU en 2020 | 34 Km3/an dans les ESOU et 268 Km3/an dans les ESU en 2020 | 361 Km3/an dans les ESU en 2020 | 463 Km3/an dans les ESU en 2020 | Estimé à environ 1,5 Mm3/an sur le BV de la Varennne et 0,8 Mm3/an sur le BV amont de la Mayenne dont 15% dans les ESU et 60% dans les ESOU, le reste serait prélevé sur l'AEP | 0,1 M3/an dans les ESU |
| **Total dans le Dpt de l'Orne** | 2 Mm3 dans les ESOU en 2020 et 153K dans les ESU | 1,2 Mm3 dans les ESOU en 2020 et 251 Km3 dans les ESU | 214 Km3 dans les ESOU et 1,1 Mm3 dans les ESU en 2020 | 105 Km3 dans les ESOU et 477 Km3 dans les ESU en 2020 | 1,7 Mm3 dans les ESOU et 177 Km3 dans les ESU en 2020 | 1,6 Mm3 dans les ESOU (dont 859Km3 dans l'Oxfordien, soit env. 50%) et 268 Km3 dans les ESU en 2020 | 532 Km3 dans les ESOU et 1,4 Mm3 dans les ESU en 2020 | 881 Km3 dans les ESOU et 778 Km3 dans les ESU en 2020 | | |

# Annexe 2 Calibration des modèles globaux




1

Généralités

## Données

- Modèles P-N-Q
- Sur la période 1994-2020 : utilisation de la plus longue période commune entre N et Q pour réaliser la calibration (donc périodes de calibration différentes entre les différents bassins)
  *Possibilité d'étendre le bilan aux années « non calibrées » en simulant N et Q.*
- Pas de temps prévu mensuel, cependant ce pas de temps n'est pas idéal pour les systèmes les plus réactifs (i.e., socle) :
  - Mauvaise compréhension du fonctionnement => certains processus ne se voient pas à l'échelle mensuelle (e.g. différence de « régime » de variations de la nappe en hautes-eaux et basses-eaux).
  - Mauvaise estimation des pluies efficaces à l'échelle mensuelle par Gardénia (différence significative avec le journalier)

  **=> Affecte le bilan hydrologique du BV**
- Nécessité de caler en journalier pour bien comprendre le fonctionnement des BV en discrétisant les prélèvements, qui plus est, se trouve être la donnée moins fiable par rapport à P, ETP, N et Q.
- Prélèvements sont au pas de temps mensuel, ce qui nécessitera de repasser les modèles en mensuel une fois calibrés



2

BV du Noireau

# Données

- **Modèle existant :** P-Q au pas de temps décadaire avec Q à la station de Cahan (I3462010)
  - *Calibration : 1997-2011*
- Pas de reprise directe du modèle mais inspiration pour caler le nouveau modèle P-N-Q.
- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** Le Noireau à Cahan (I346201001)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Saint-Pierre-du-Regard (BSS000MPTZ) - Cornéennes
    - La-Selle-la-Forge (BSS003UKQC) - Cornéennes
  - 1 modèle par station piézométrique
  - Initialisation et calibration sur une période commune entre les deux piézomètres afin de pouvoir comparer les deux modèles
  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1997-31/12/2007 (car cycles pluriannuels bien marqués)
  - ***Période de calibration :*** 01/01/2008-31/12/2019

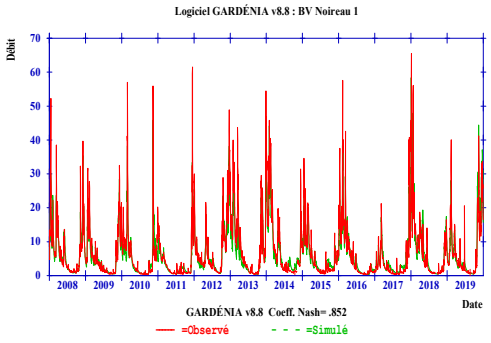


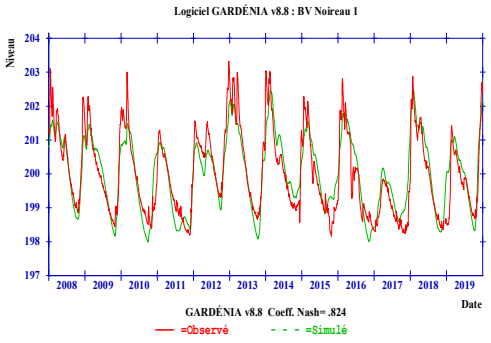


BV du Noireau

# Modèles

- **Modèle Saint-Pierre-du-Regard (BSS000MPTZ – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim2 (Réservoir double + seuil)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8520 | 0.8520 | 0.8243 | 0.8381 | 0.9155 |

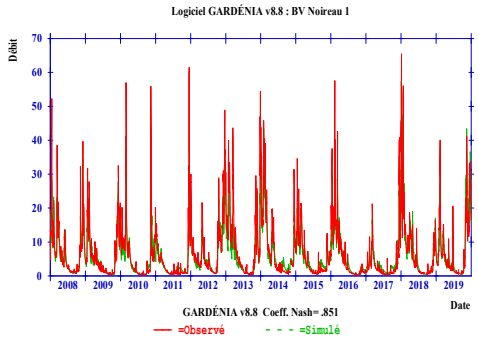
*Augmentation assez significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir*

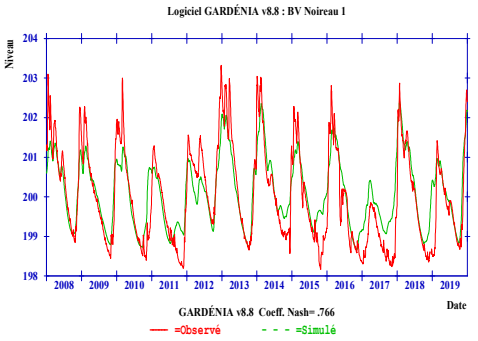
***Surestimation régulière des étiages alors qu'il manque les prélèvements*** *=> rehaussement et désoptimisation du niveau de base (Sim4)*

BV du Noireau

# Modèles

- **Modèle Saint-Pierre-du-Regard (BSS000MPTZ – BSS1)**
  - Modèle envisageable : Sim4 (Réservoir double + seuil ; rehaussement et désoptimisation du niveau de base)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8506 | 0.8506 | 0.7663 | 0.8079 | 0.8988 |

*Diminution du Nash par rapport à Sim2*

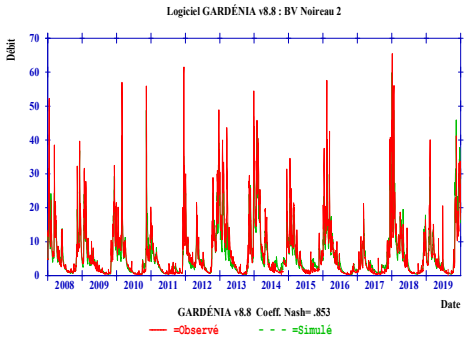


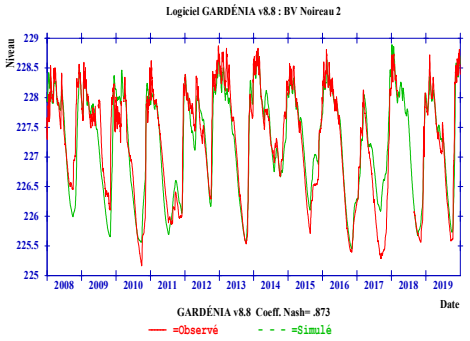
5

BV du Noireau

# Modèles

- **Modèle La-Selle-la-Forge (BSS003UKQC – BSS2)**
  - Meilleur modèle : Sim2 (Réservoir double + seuil)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8532 | 0.8532 | 0.8730 | 0.8630 | 0.9290 |

*Augmentation significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir (+0,08)*

*Modèle avec La-Selle-la-Forge (BSS2) > Saint-Pierre-du-Regard (BSS1)*



6

BV du Noireau

# Modèles

- **Modèle La-Selle-la-Forge (BSS003UKQC – BSS2)**
  - Meilleur modèle : Sim2 (Réservoir double + seuil)

*Convenable pour le secteur*

**Paramètres de calage**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0équil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS2 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 520.00000 | 224.69477 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 175.03689 | 3.00188 | 4.58532 | 0.18482 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 3.61575 | 0.81383 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 0.11454 |

*Convenable pour le secteur*

**Bilan hydrologique**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 917.840 | 540.804 | 0.000 | 375.483 | 0.000 | 337.929 | 0.000 | 5.711 | 30.540 | 0.000 | 0.000 | 2.856 | 9.688 | 0.000 | 89.998 | 36.307 | 0.000 | BV Noireau 2 |

*=> Bilan semblant très correct pour le secteur et très en phase avec celui de l'ancien modèle*





BV de la Rouvre

# Données

- **Pas de modèle existant**

- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** La Rouvre à Ségrie-Fontaine (I335201001)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Le Grais (BSS003UJUO) – Schistes du Briovérien
    - Bellou-en-Houlme (BSS003VEVM) – Schistes du Briovérien
    - Bellou-en-Houlme (BSS003VEUS) - Schistes du Briovérien

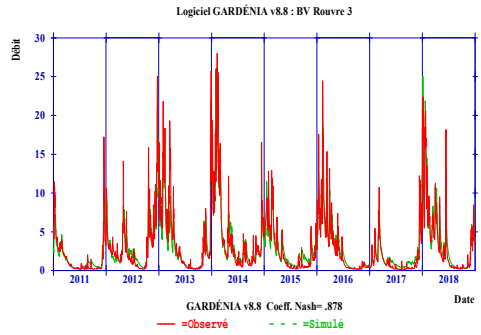
  - 1 modèle par station piézométrique
  - Initialisation et calibration sur une période commune entre les trois piézomètres afin de pouvoir comparer les trois modèles

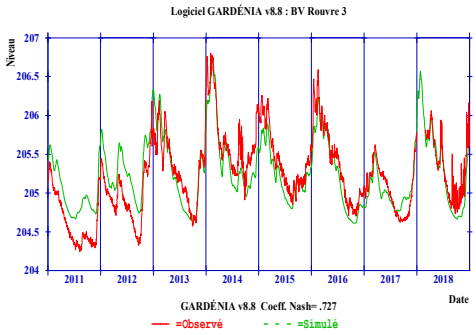
  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/2006-31/12/2010
  - ***Période de calibration :*** 01/01/2011-31/12/2018

BV de la Rouvre

# Modèles

- **Modèle Bellou-en-Houlme (BSS003VEUS – BSS3)**
  - Meilleur modèle : Sim1 (1 réservoir)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8782 | 0.8782 | 0.7269 | 0.8007 | 0.8948 |

*Peu importe le calage et le type de modèle, ce piézomètre est difficile à simuler !!! Cause : non prise en compte des prélèvements ???*

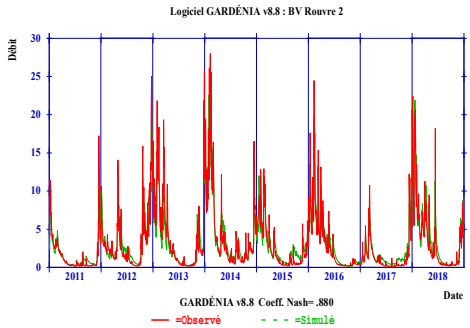


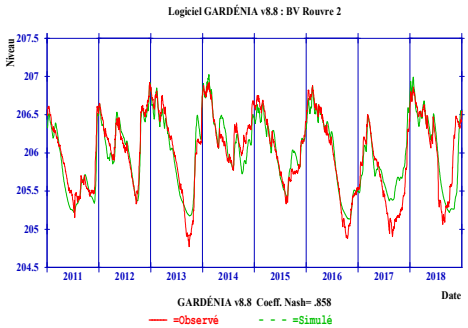
9

BV de la Rouvre

# Modèles

- **Modèle Bellou-en-Houlme (BSS003VEVM – BSS2)**
  - Meilleur modèle : Sim4 (Double réservoir + seuil ; S fixé à 0,2% ; seuil de ruissellement par débordement)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8800 | 0.8800 | 0.8578 | 0.8689 | 0.9321 |

*Augmentation significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir (+0,08)*

*Cependant, il a fallu fixer le S pour ne pas avoir une valeur un peu aberrante pour ce type de formation*



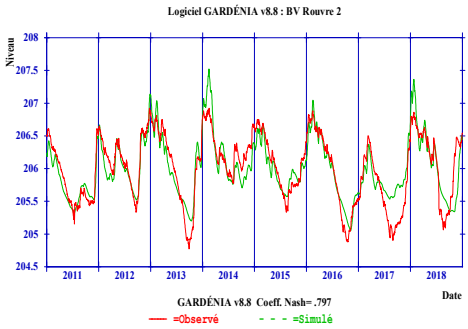
10

BV de la Rouvre

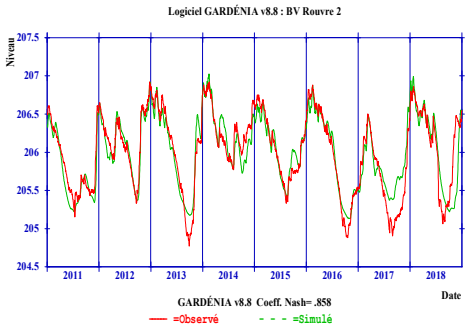
# Modèles

- **Modèle Bellou-en-Houlme (BSS003VEVM – BSS2)**
  - Meilleur modèle : Sim4 (Double réservoir + seuil ; S fixé à 0,2% ; seuil de ruissellement par débordement)

**Sans seuil de débordement (Sim3)**




**Avec seuil de débordement (Sim4)**




*L'ajout d'un seuil de débordement permet de « contenir » les hautes eaux sous un seuil (ici cas d'une nappe très proche de la surface).*

*Modèle avec Bellou-en-Houlme (BSS2) > Bellou-en-Houlme (BSS3)*

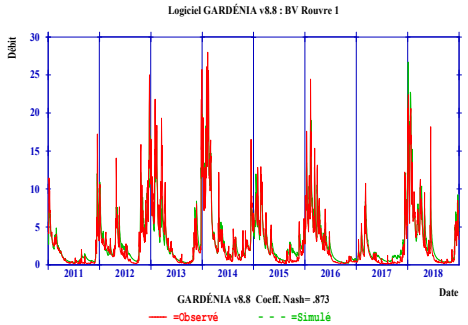


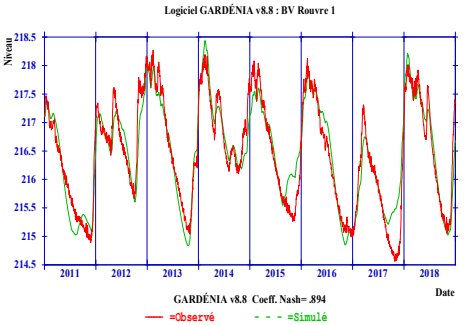
11

BV de la Rouvre

# Modèles

- **Modèle Le Grais (BSS003UJUO – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim3 (Réservoir double + seuil ; S fixé à 0,2%)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8733 | 0.8733 | 0.8941 | 0.8837 | 0.9400 |

*Augmentation significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir (+0,07)*

*Cependant, il a fallu fixer le S pour ne pas avoir une valeur un peu aberrante pour ce type de formation*

*Modèle avec Le Grais (BSS1) > Bellou-en-Houlme (BSS2)*



12

BV de la Rouvre

# Modèles

- **Modèle Le Grais (BSS003UJUO – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim3 (Réservoir double + seuil ; S fixé à 0,2%)

*Convenable pour le secteur*

**Paramètres de calage**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0équil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS1 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 301.00000 | 213.67919 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 185.61329 | 3.80080 | 4.68217 | 0.50494 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 6.66915 | 1.38154 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 0.20000 |

**Bilan hydrologique**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 881.004 | 535.996 | 0.000 | 345.900 | 0.000 | 306.796 | 0.000 | 4.776 | 33.897 | 0.000 | 0.000 | -0.4615 | 11.194 | 0.000 | 88.695 | 38.562 | 0.000 | BV Rouvre 1 |

*=> Bilan semblant très correct pour le secteur*





BV de l'Orne

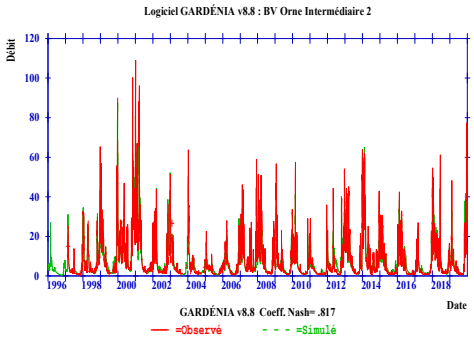
# Données

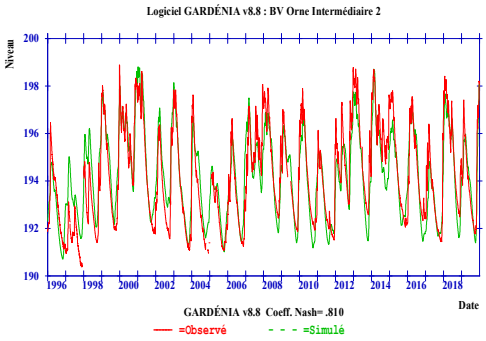
- **Modèle existant :** P-N-Q au pas de temps décadaire avec Q à la station de La Courbe (I3121010) et N à Saint-Germain de-Clairefeuille (BSS000REEQ)
  - *Calibration : 1995-2011*
- Reprise du modèle pour Saint-Germain-de-Clairefeuille.
- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** L'Orne à La Courbe (I312101001)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Saint-Germain-de-Clairefeuille (BSS000REEQ) – Calcaires du Bajocien-Bathonien
    - Sai (BSS000RECJ) – Calcaires du Bajocien-Bathonien
  - 1 modèle par station piézométrique
  - Initialisation et calibration sur une période commune entre les deux piézomètres afin de pouvoir comparer les deux modèles
  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1986-31/12/1995 (car cycles pluriannuels bien marqués)
  - ***Période de calibration :*** 01/01/1996-31/12/2019

BV de l'Orne

# Modèles

- **Modèle Saint-Germain-de-Clairefeuille (BSS000REEQ – BSS2)**
  - Meilleur modèle : Sim6 (Réservoir double + seuil ; correction P et ETP)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8171 | 0.8171 | 0.8096 | 0.8133 | 0.9019 |

*Augmentation du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir*

***Correction de la P et ETP améliore les simulations Q et N, et on se rapproche du bilan du modèle initial***

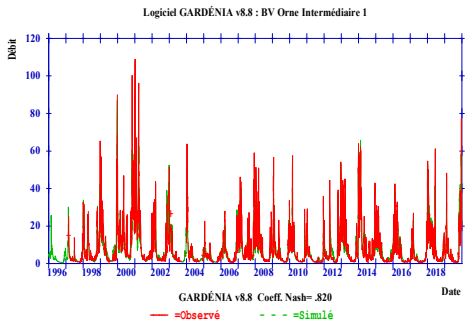


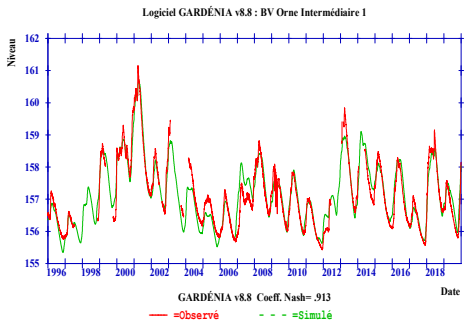


BV de l'Orne

# Modèles

- **Modèle Sai (BSS000RECJ – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim4 (1 réservoir ; correction P et ETP)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8198 | 0.8198 | 0.9130 | 0.8658 | 0.9305 |

***Correction de la P et ETP améliore les simulations Q et N, et on se rapproche du bilan du modèle initial***

*Modèle avec Sai (BSS1) > Saint-Germain-de-Clairefeuille (BSS2)*

BV de l'Orne

# Modèles

- **Modèle Sai (BSS000RECJ – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim4 (1 réservoir ; correction P et ETP)

*Convenable pour le secteur*

**Paramètres de calage**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0équil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BV1 | s Hydroclimat | 0 | 0 | 932 | 153,85584 | -2,84734 | 11,73953 | 0 | 196,29331 | 2,46014 | 5,18602 | 3,4893 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,05 | 0 | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,05 | 1,00E-04 | 1 | 0,3097 |

*Convenable pour le secteur*

**Bilan hydrologique**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 786.306 | 539.129 | 0.000 | 244.343 | 0.000 | 219.142 | 0.000 | 24.318 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.717 | 9.988 | 0.000 | 89.687 | 24.536 | 0.000 | BV Orne Inter |

*=> Bilan semblant très correct pour le secteur et très en phase avec celui de l'ancien modèle malgré le changement de piézomètre*





BV de la Sarthe

# Données

- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** La Sarthe à St Céneri-le-Gerei (M005061020)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Alençon « le stade » (BSS000TTBM) – Calcaires du Bajocien-Bathonien (probablement influencé)
    - Pas d'autre test (simulation non prévue initialement)

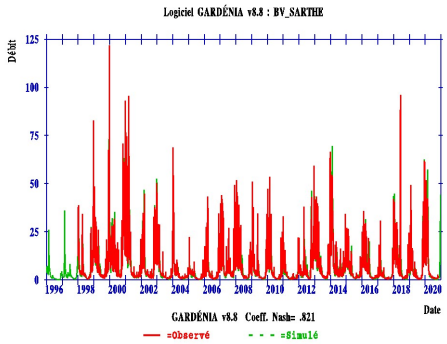
  - 1 modèle par station piézométrique

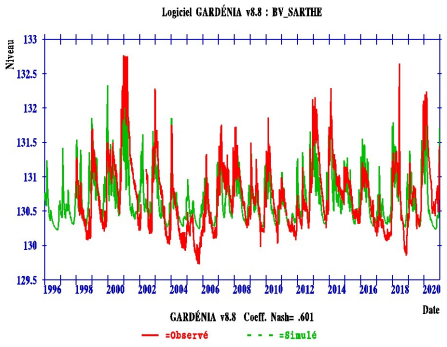
  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1986-31/12/1995 (car cycles pluriannuels bien marqués)
  - ***Période de calibration :*** 01/01/1996-31/12/2019

BV de la Sarthe

# Modèles

- **Modèle Alençon « le stade » (BSS000TTBM)**
  - Meilleur modèle Sim1 (Réservoir double + seuil base)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.821 | 0.8205 | 0.601 | 0.7806 | 0.8835 |

*Le calage des niveaux piézométriques n'est pas satisfaisant, les étiages ne sont pas bien reproduits, probablement du fait de l'influence de pompages dans le voisinage. L'intégration des prélèvements souterrains ne permet pas de reproduire le signal*

Modèle trop grand et générique pour reproduire fidèlement le comportement des ESOU





BV de la Sarthe

# Modèles

- **Modèle Alençon « le stade » (BSS000TTBM)**
  - Meilleur modèle : Sim1 (2 réservoirs + seuil)

*Trop élevé pour le secteur Correction pluie ETP, essai modèle 1 réservoir ?*

*Faible pour le secteur, semi captif ?*

**Paramètres de calage**

| N° | Superfic_Cor | Superfi_Fich | Débit_extér | Coef_Emmag | Niv_Base | Corr_Pluv | Corr_ETP | Rsup_Rumax | Rsup_Progr | Rui_Perco |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | km2 | km2 | m3/s | % | m | % | % | mm | mm | mm |
| BV_SARTHE2 | 930.000 | 930.000 | 0.000 | 0.1000 | 130.169 | 0.000 | 0.000 | 18.188 | 384.898 | 9.652 |

| T1/2_Perco | T1/2_Taris1 | T1/2_Perco2 | Seuil_Sout1 | T1/2_Taris2 | T_Réaction | Fact_Échang | Défic_init | Défic_ini_2 | Seuil_Débor | T1/2_Débor | Max_T1/2_Rui | Corr_Superf |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mois | mois | mois | mm | mois | pas_temps | % | mm | mm | mm | pas_temps | mois | (-) |
| 2.659 | 10.183 | 5.000E-02 | 0.000 | 5.000E-02 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 5.000E-02 | 1.000E-04 | 1.000 |

**Bilan hydrologique**

| ige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 801.335 | 558.183 | 0.000 | 240.951 | 0.000 | 212.407 | 0.000 | 1.644 | 25.919 | 0.000 | 0.000 | 3.182 | 11.486 | 0.000 | 88.154 | 27.582 | 25.929 | BV_SARTHE |

*⇒ Bilan semblant correct pour le secteur, a priori en phase avec celui développé par SUEZ Consulting*
*Calage a améliorer en testant d'autres combinaisons de paramètres et en segmentant si possible ce BV très grand*

BV de l'Avre

# Données

- **Modèle existant :** P-Q-N au pas de temps journalier avec Q à la station de Saint-Christophe-sur-Avre (H9202020)
  - *Calibration : 2005-2013*
- Reprise du modèle
- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** L'Avre à Saint-Christophe-sur-Avre (H4210410)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Saint-Christophe-sur-Avre (BSS000RFLV) – Craie du Séno-Turonien
  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1998-31/12/2007 (car cycles pluriannuels bien marqués)
  - ***Période de calibration :*** 01/01/2008-31/12/2019

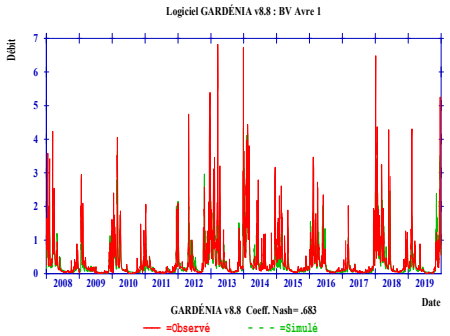




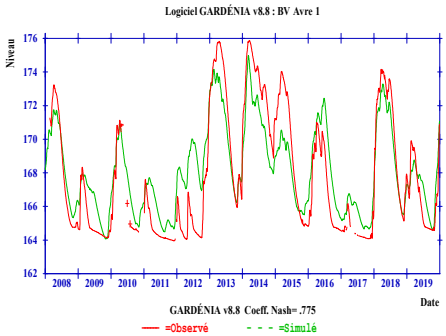
BV de l'Avre

# Modèles

- **Modèle Saint-Christophe-sur-Avre (BSS000RFLV – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim10 (Modèle 1 réservoir ; facteur d'échange externe ; fixer le niveau de base ; pondération sur les écarts de débits pour la calibration ; correction de la pluie et de l'ETP)




- *Pondération sur les écarts de débits pour la calibration, sinon débits d'étiage simulés trop élevés par rapport à l'observé (mais dégradation des hauts débits)*




- *Facteur d'échange externe pour simuler les pertes de débits vers l'aval*
- *Fixation du niveau de base sinon les étiages simulés étaient bien trop bas*

| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6826 | 0.7902 | 0.7755 | 0.7828 | 0.8848 |

- *Correction P et ETP améliore la simulation de Q et N, les paramètres hydroclimato semblent plus cohérents également*

BV de l'Avre

# Modèles

- **Modèle Saint-Christophe-sur-Avre (BSS000RFLV – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim10 (Modèle 1 réservoir ; facteur d'échange externe ; fixer le niveau de base ; pondération sur les écarts de débits pour la calibration ; correction de la pluie et de l'ETP)

*Convenable pour le secteur (cohérent biblio et ancien modèle)*

**Paramètres de calage**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0équil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS1 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 109.00000 | 162.50000 | -6.84508 | 14.99478 | 0.00000 | 241.45043 | 14.62995 | 0.34924 | 2.48412 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 0.00000 | 0.05000 | 0.00000 | -83.87430 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 0.59429 |

*Perte d'eau très importante (cohérent avec ancien modèle)*

*Convenable pour le secteur (cohérent biblio et ancien modèle)*

**Bilan hydrologique**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 730.807 | 538.178 | 0.000 | 188.825 | 0.000 | 74.795 | 0.000 | 18.099 | 0.000 | -94.138 | 0.000 | 5.597 | 19.483 | -49.855 | 39.611 | 113.653 | 0.000 | BV Avre 1 |

*=> Bilan semblant très correct pour le secteur et plutôt proche de l'ancien modèle (même si moins d'équilibre entre %souterrain/%surface par rapport à l'ancien modèle)*





BV de l'Iton

# Données

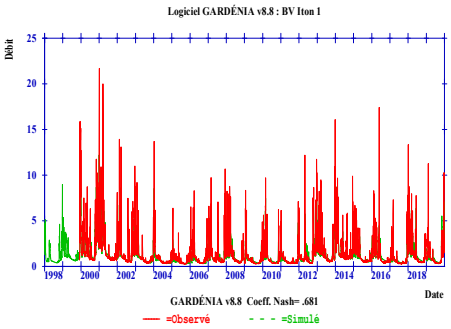
- **Modèle existant :** P-Q-N au pas de temps journalier avec Q à la station de Bourth (H433043010)
  - *Calibration : 1995-2013*
- Reprise du modèle
- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** L'Iton à Bourth (H433043010)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL) – Craie du Cénomanien
  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1988-31/12/1997 (car cycles pluriannuels bien marqués)
  - ***Période de calibration :*** 01/01/1998-31/12/2019

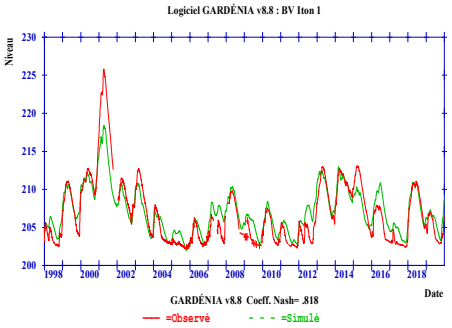
BV de l'Iton

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim9 ou Sim10 (Modèle 1 réservoir ; facteur d'échange externe ; fixer un niveau de base ; transformation des débits pour la calibration ; *correction P et ETP pour Sim10*)

Sim9




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6806 | 0.7822 | 0.8182 | 0.8001 | 0.8945 |

- *Pondération sur les écarts de débits pour la calibration, sinon débits d'étiage simulés trop élevés par rapport à l'observé (mais dégradation des hauts débits)*

- *Facteur d'échange externe pour simuler les pertes de débits vers le BV de l'Avre*
- *Fixation du niveau de base sinon les étiages simulés étaient bien trop bas*



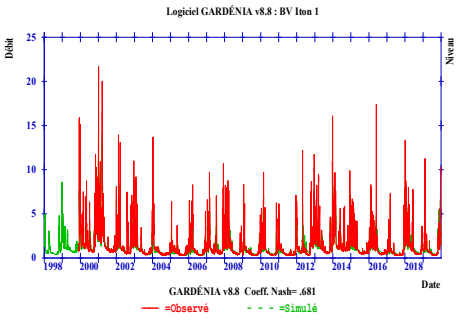


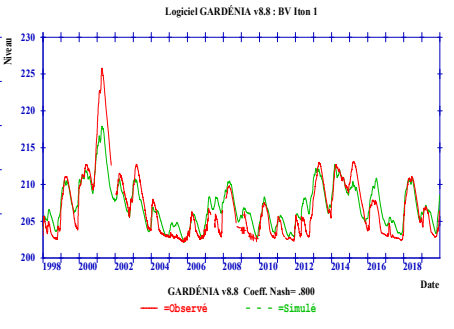
BV de l'Iton

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim9 ou Sim10 (Modèle 1 réservoir ; facteur d'échange externe ; fixer un niveau de base ; transformation des débits pour la calibration ; *correction P et ETP pour Sim10*)

Sim10




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6805 | 0.7797 | 0.8005 | 0.7901 | 0.8889 |

- *Pondération sur les écarts de débits pour la calibration, sinon débits d'étiage simulés trop élevés par rapport à l'observé (mais dégradation des hauts débits)*

- *Facteur d'échange externe pour simuler les pertes de débits vers le BV de l'Avre*
- *Fixation du niveau de base sinon les étiages simulés étaient bien trop bas*

*Nash Sim9 > Sim10, bien que ~ équivalents*
*Cependant, on change considérablement le bilan hydrologique lorsqu'on corrige la P et ETP*

BRGM — SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL — WWW.BRGM.FR

BV de l'Iton

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim9 ou Sim10 (Modèle 1 réservoir ; facteur d'échange externe ; fixer un niveau de base ; transformation des débits pour la calibration ; *correction P et ETP pour Sim10*)

**Paramètres de calage (Sim9)**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (Déquil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS1 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 159.00000 | 198.70000 | 0.72666 | 15.00000 | 0.00000 | 231.40649 | 13.42106 | 0.35931 | 4.48586 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 0.00000 | 0.05000 | 0.00000 | -2.99505 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 0.83337 |

**Paramètres de calage (Sim10)**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (Déquil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS1 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 159.00000 | 198.70000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 227.13330 | 17.82169 | 0.33583 | 4.31531 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 0.00000 | 0.05000 | 0.00000 | -22.80868 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 0.98842 |

**Capacité du réservoir sol « progressif » =** convenable pour ce secteur et dans les gammes des modèles antérieurs

**S =** convenable pour ce secteur et dans les gammes des modèles antérieurs



BV de l'Iton

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim9 ou Sim10 (Modèle 1 réservoir ; facteur d'échange externe ; fixer un niveau de base ; transformation des débits pour la calibration ; *correction P et ETP pour Sim10*)

**Bilan hydrologique (Sim9)**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 816.864 | 571.499 | 0.000 | 242.799 | 0.000 | 110.977 | 0.000 | 125.885 | 0.000 | -3.887 | 0.000 | 4.615 | 53.147 | -1.601 | 45.708 | 131.761 | 0.000 | BV Iton 1 |

**Bilan hydrologique (Sim10)**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 810.971 | 532.412 | 0.000 | 276.278 | 0.000 | 113.700 | 0.000 | 123.736 | 0.000 | -36.562 | 0.000 | 4.562 | 52.113 | -13.234 | 41.154 | 162.514 | 0.000 | BV Iton 1 |

*=> Correction P et ETP : peu d'influence sur la qualité de la simulation, mais modification assez significative du bilan*

*=> Bilans semblant convenables pour le secteur, mais lequel est le meilleur d'un point de vue physique du fait du fonctionnement karstique ?*

*=> Bilans qui diffèrent assez significativement de l'ancien modèle existant*

BV de la Risle

# Données

- **Modèle existant :** P-Q-N au pas de temps journalier avec Q à la station de Rai (H602021010)
  - *Calibration : 1996-2014*
- Reprise du modèle
- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** La Risle à Rai (H602021010)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL) – Craie du Cénomanien
    - *Bois-Arnault (BSS000MRYC) – Craie du Séno-Turonien*

*Le piézomètre de Bois-Arnault devait être testé. Cependant, il y a eu un changement de fréquence d'acquisition de données (mensuel vers journalier), et la chronique montre 2 dynamiques complètement différentes entre ces 2 périodes (composante karstique visible uniquement au pas de temps journalier). Ce piézomètre n'a donc pas été testé.*

  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1984-31/12/1993 (car cycles pluriannuels bien marqués)
  - ***Période de calibration :*** 01/01/1994-31/12/2019



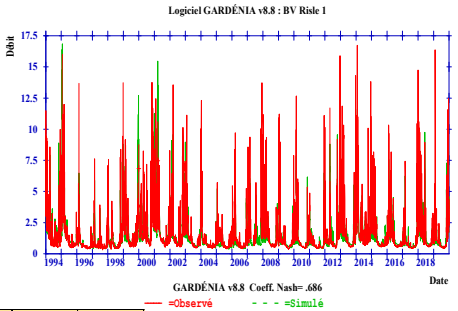


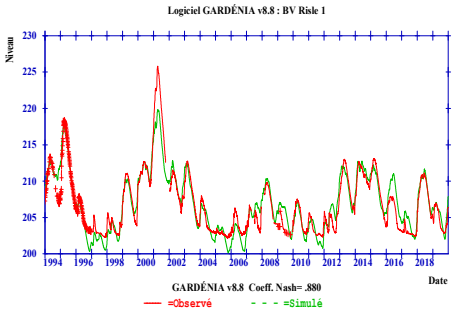
BV de la Risle

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim3 ou Sim4 (1 réservoir ; facteur d'échange externe ; + de poids à Q qu'à N pour la calibration ; *fixation du niveau de base pour Sim4*)

Sim3




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6859 | 0.6859 | 0.8799 | 0.7479 | 0.8648 |

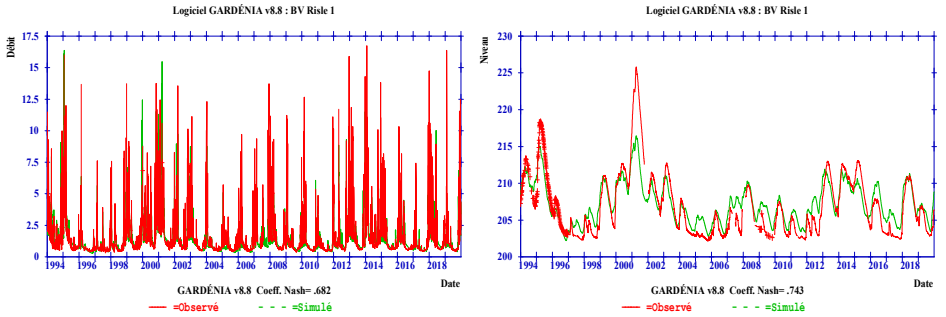
- ***Facteur d'échange externe pour simuler les pertes/apports de débits***
- ***Poids Q > N pour la calibration***

BV de la Risle

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim3 ou Sim4 (1 réservoir ; facteur d'échange externe ; + de poids à Q qu'à N pour la calibration ; *fixation du niveau de base pour Sim4*)

Sim4




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6822 | 0.6822 | 0.7433 | 0.7023 | 0.8380 |

- *Facteur d'échange externe pour simuler les pertes/apports de débits*
- *Poids Q > N pour la calibration*
- ***Fixation du niveau de base pour ne pas que les étiages piézométriques simulés ne soient pas trop bas par rapport aux observés***

*=> Diminution du Nash mais physiquement plus réaliste a priori*





BV de la Risle

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim3 ou Sim4 (1 réservoir ; facteur d'échange externe ; + de poids à Q qu'à N pour la calibration ; *fixation du niveau de base pour Sim4*)

**Paramètres de calage (Sim3)**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (Déquil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS1 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 149.00000 | 192.03251 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 181.22805 | 12.03508 | 0.37682 | 6.87533 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 0.00000 | 0.05000 | 0.00000 | 0.38149 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 0.81480 |

**Paramètres de calage (Sim4)**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (Déquil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS1 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 149.00000 | 199.50000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 186.57285 | 13.79911 | 0.28891 | 4.10182 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 0.00000 | 0.05000 | 0.00000 | 0.07946 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 1.03961 |

**Capacité du réservoir sol « progressif » =** convenable pour ce secteur et dans les gammes des modèles existants

**S =** convenable pour ce secteur et dans les gammes des modèles existants

**Facteur d'échange =** négligeable (intérêt de l'ouvrir ?) et bien loin des 15% estimés dans les précédents modèles

BV de la Risle

# Modèles

- **Modèle Saint-Sulpice-sur-Risle (BSS000REWL – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim3 ou Sim4 (1 réservoir ; facteur d'échange externe ; + de poids à Q qu'à N pour la calibration ; *fixation du niveau de base pour Sim4*)

**Bilan hydrologique (Sim3)**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 805.598 | 507.616 | 0.000 | 297.652 | 0.000 | 151.050 | 0.000 | 147.517 | 0.000 | 0.5606 | 0.000 | -2.464E-02 | 49.408 | 0.1883 | 50.747 | 147.001 | 0.000 | BV Risle 1 |

**Bilan hydrologique (Sim4)**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 805.598 | 509.604 | 0.000 | 295.648 | 0.000 | 132.579 | 0.000 | 163.358 | 0.000 | 0.1297 | 0.000 | 0.1870 | 55.200 | 4.387E-02 | 44.844 | 163.455 | 0.000 | BV Risle 1 |

*=> Bilans semblant convenables pour le secteur, mais lequel est le meilleur d'un point de vue physique ?*

*=> Bilan de Sim4 se rapproche de celui existant, sauf pour % d'échange*

*/!\ Lorsqu'on ajoute une correction de la P et ETP à ces modèles (Sim5 et Sim6), le facteur d'échange est nettement plus élevé (>25% - apports externes) avec moins de PE, mais on s'éloigne des anciens modèles en calibration.*

*=> Compte-tenu de son influence sur le bilan hydrologique (et sur le facteur d'échange), garder le modèle avec ou sans correction des données météo dépend de la fiabilité qu'on donne aux données météo et à l'importance des connexions karstiques dans ce bassin.*



BV de la Charentonne

# Données

- **Pas de modèle existant**

- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** La Charentonne à La-Trinité-de-Réville (H612041010)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Mesnil-en-Ouche (BSS000LBFR) originale – Craie marneuse du Turonien - /!\ Hors BV
    - Mesnil-en-Ouche (BSS000LBFR) lissée – Craie marneuse du Turonien - /!\ Hors BV

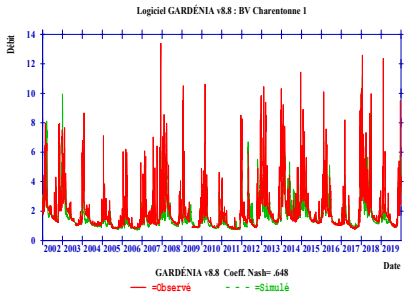
  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1992-31/12/2001 (car cycles pluriannuels bien marqués)
  - ***Période de calibration :*** 01/01/2002-31/12/2019

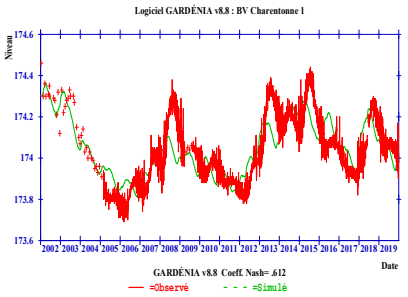
BV de la Charentonne

# Modèles

*Modèle initial*

- **Modèle Mesnil-en-Ouche originale (BSS000LBFR – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim1 (Modèle 1 réservoir)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6482 | 0.6482 | 0.6116 | 0.6298 | 0.7936 |

- *Déphasage HE/BE qui n'a jamais pu être résolu*
- *Calage médiocre*



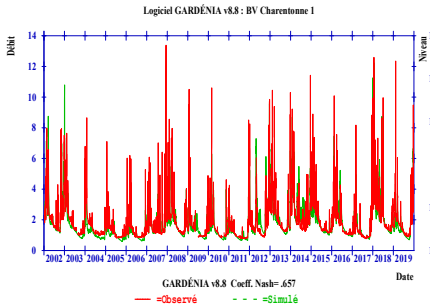


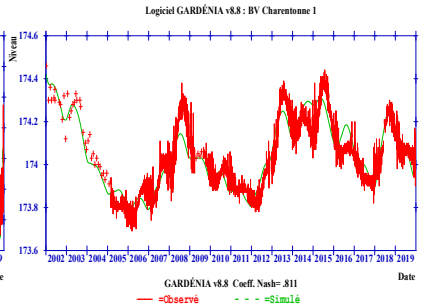
BV de la Charentonne

# Modèles

*Modèle retravaillé*

- **Modèle Mesnil-en-Ouche originale (BSS000LBFR – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim15 (Double réservoir (n°2), S=1%, facteur d'échange externe négatif)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6575 | 0.6575 | 0.8106 | 0.7320 | 0.8556 |

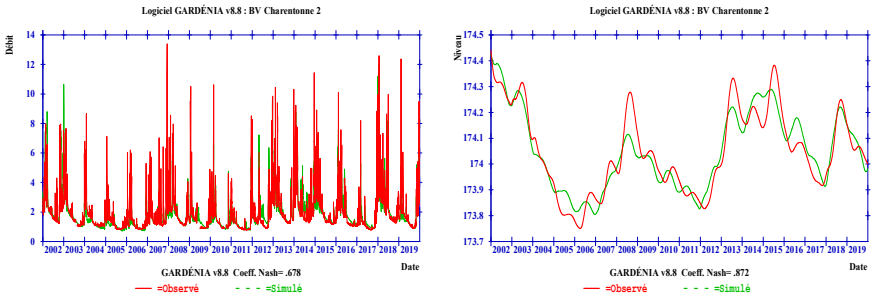
- *Amélioration du déphasage HE/BE par rapport au modèle initial*
- *S fixé à 1% pour être cohérent avec le système*
- *Ouverture du facteur d'échange avec d'autres bassins (présence de karst)*

BV de la Charentonne

# Modèles

*Modèle initial*

- **Modèle Mesnil-en-Ouche lissée (BSS000LBFR – BSS2)**
  - Meilleur modèle : Sim8 (Modèle double réservoir (n°2) ; facteur d'échange externe)




*Augmentation significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir (+0,17)*

| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.6779 | 0.6779 | 0.8715 | 0.7717 | 0.8785 |

- ***Déphasage HE/BE annuelles qui n'a jamais pu être résolu***
- ***Reproduction médiocre du cycle annuel***
- ***Facteur d'échange externe pour simuler le côté karstique du BV***

***Modèle avec chronique lissée (BSS2) > chronique originale (BSS1)***





BV de la Charentonne

# Modèles

*Meilleur modèle initial*

- **Modèle Mesnil-en-Ouche lissée (BSS000LBFR – BSS2)**
  - Meilleur modèle : Sim8 (Modèle double réservoir (n°2) ; facteur d'échange externe)

**Paramètres de calage**

*Convenable pour le secteur*

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0équil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS2 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 224.00000 | 173.37599 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 211.08586 | 32.60814 | 0.38105 | 5.74611 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12.46671 | 0.00000 | 5.74611 | 0.00000 | 1.90015 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 6.00110 |

*Correct mais un peu élevé*

*Perte d'eau vers autre BV (faible)*

**Bilan hydrologique**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 775.748 | 512.063 | 0.000 | 262.417 | 0.000 | 81.347 | 0.000 | 121.589 | 58.668 | -2.355 | 0.000 | -0.2730 | 68.905 | -0.8975 | 30.999 | 181.182 | 57.189 | BV Charenton |

***=> Bilan semblant très correct pour le secteur***

BV de la Charentonne

# Modèles

*Modèle retravaillé*

- **Modèle Mesnil-en-Ouche originale (BSS000LBFR – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim15 (Double réservoir (n°2), S=1%, facteur d'échange externe négatif)

**Paramètres de calage**

*Convenable pour le secteur*

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (Déquil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS1 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 224.00000 | 173.33626 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 241.99542 | 25.35555 | 0.54574 | 4.50985 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50.00000 | 0.00000 | 4.50985 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 1.00000 |

*Fixé donc convenable*

*Pas de perte d'eau vers d'autres bassins*

**Bilan hydrologique**

| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 775.748 | 520.432 | 0.000 | 253.833 | 0.000 | 99.026 | 0.000 | 142.327 | 13.124 | 0.000 | 0.000 | 0.8393 | 61.087 | 0.000 | 39.012 | 154.820 | 12.867 | BV Charentonne 1 |

*=> Bilan semblant très correct pour le secteur*





BV de l'Huisne

# Données

- **Pas de modèle BRGM existant**

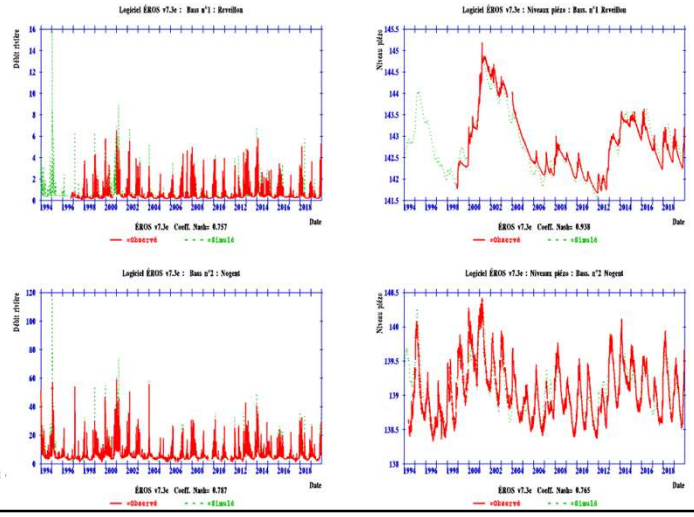
- **Nouveaux modèles :**
  - ***Stations hydrologiques :*** L'Huisne à Réveillon (M030151001) / L'Huisne à Nogent-le-Rotrou (M036151010)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Modèle n°1 :
      - Mauves-Sur-Huisne (BSS000TTNK) – Craie du Cénomanien
      - Trizay-Coutretot-Saint-Serge (BSS000VYKC) – Calcaires de l'Oxfordien
    - Modèle n°2 :
      - Mauves-Sur-Huisne (BSS000TTNK) – Craie du Cénomanien
      - Saint-Hilaire-Sur-Erre (BSS000VYHZ) – Craie du Cénomanien
    - Modèle n°3 :
      - Villiers-Sous-Mortagne (BSS000TTJF) – Sables du Perche
      - Longny Les Villages (BSS000TTPJ) – Sables du Perche
    - Modèle n°4
      - Rémalard En Perche (BSS000TTXH) – Craie du Cénomanien
      - Rémalard En Perche (BSS000TTXH) – Craie du Cénomanien

  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1987-31/12/1993
  - ***Période de calibration :*** 01/01/1994-31/12/2019

BV de l'Huisne

# Modèles

- **Modèle n°1 (BSS000TTNK et BSS000VYKC)**
  - Meilleur modèle : Sim1 (1 réservoir)



| Nash_Débit | Nash_Niveau | Crit_Global | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|
| 0.7567 | 0.9377 | 0.8448 | Reveillon |
| 0.7873 | 0.7649 | 0.7761 | Nogent |
| 0.7720 | 0.8513 | 0.8104 | < Moyenne > |

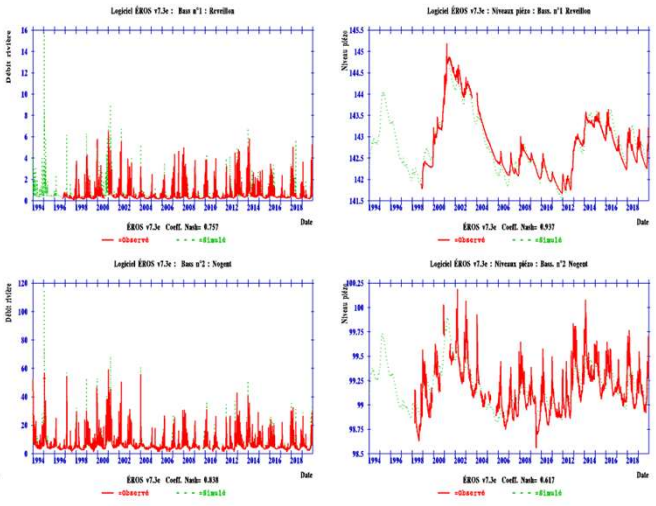
***Meilleure simulation, cependant S beaucoup trop fort => difficile d'améliorer les paramètres de calage sans dégrader significativement la simulation des débits***



BV de l'Huisne

# Modèles

- **Modèle n°2 (BSS000TTNK et BSS000VYHZ)**
  - Meilleur modèle : Sim1 (1 réservoir)



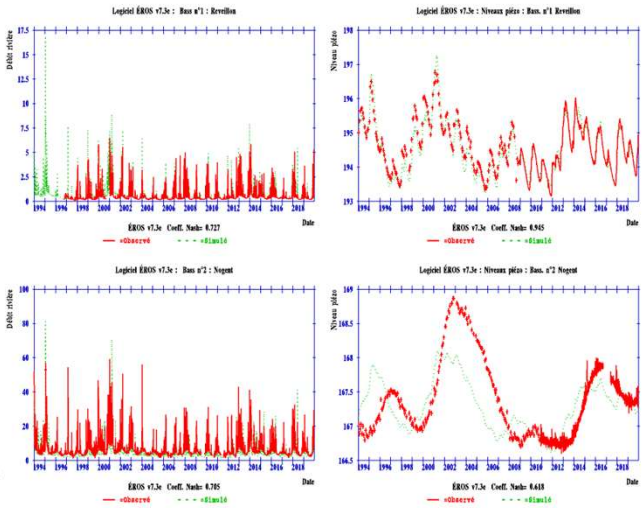
| Nash_Débit | Nash_Niveau | Crit_Global | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|
| 0.7572 | 0.9372 | 0.8448 | Reveillon |
| 0.8379 | 0.6174 | 0.7235 | Nogent |
| 0.7976 | 0.7773 | 0.7841 | < Moyenne > |

***Meilleure simulation, cependant S beaucoup trop fort => difficile d'améliorer les paramètres de calage sans dégrader significativement la simulation des débits***

BV de l'Huisne

# Modèles

- **Modèle n°3 (BSS000TTJF et BSS000TTPJ)**
  - Meilleur modèle : Sim1 (1 réservoir - à ne pas considérer toutefois, gros problème de calage pour le BV aval)



| Nash_Débit | Nash_Niveau | Crit_Global | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|
| 0.7266 | 0.9454 | 0.8324 | Reveillon |
| 0.7046 | 0.6184 | 0.6608 | Nogent |
| 0.7156 | 0.7819 | 0.7466 | < Moyenne > |

*Gros problème de calage des débits (sous-estimés) et niveaux piézométriques (déphasage) pour le BV aval avec toutes les simulations => pas satisfaisant*
*Nappes inertielles (S.PercheTTPJ captifs)*

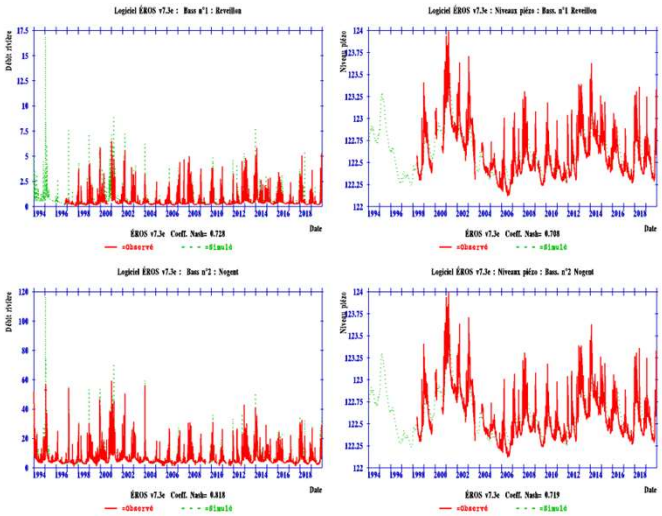
BRGM — SERV



BV de l'Huisne

# Modèles

- **Modèle n°4 (BSS000TTXH et BSS000TTXH)**
  - Meilleur modèle : Sim1 (1 réservoir)



*En principe, il s'agit du piézomètre qui corrèle le mieux aux débits de l'Huisne à Réveillon et Nogent, cependant les résultats ne sont pas significativement meilleurs aux autres modèles, ils sont même moins bons globalement.*

| Nash_Débit | Nash_Niveau | Crit_Global | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|
| 0.7282 | 0.7085 | 0.7183 | Reveillon |
| 0.8184 | 0.7191 | 0.7680 | Nogent |
| 0.7733 | 0.7138 | 0.7431 | < Moyenne > |

*Meilleure simulation, cependant S beaucoup trop fort => difficile d'améliorer les paramètres de calage sans dégrader significativement la simulation des débits*

BRGM — SE

BV de l'Huisne

# Modèles

- **Modèle n°1 (BSS000TTNK et BSS000VYKC) = meilleur modèle**
  - Meilleur modèle : Sim1 (1 réservoir)

*RU Réveillon trop élevée*

**Paramètres de calage**

| Superfic_Cor | Niv_Base | Crit_Débit | Crit_Q_Calib | Nash_Niveau | Corr_Pluv | Corr_ETP | Rsup_Rumax | Rsup_Progr | Ruis_Percol | T1/2_Percol | T1/2_Taris1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 78.800 | 137.542 | 0.7567 | 0.7567 | 0.9377 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 262.592 | 9.591 | 9.950E-02 | 30.000 |
| 748.200 | 138.281 | 0.7873 | 0.7873 | 0.7649 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 173.437 | 20.454 | 0.1001 | 3.335 |

*S trop élevé*

| T1/2_Perco2 | Seuil_Sout1 | T1/2_Taris2 | T_Réaction | Fact_Échang | T_Propagat | Seuil_Débor | T1/2_Débor | T1/2_Rui_Max | Corr_Superf | Coef_Emmag | Nom |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.1000 | 0.000 | 1.000 | 0.8290 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 10.580 | Reveillon |
| 0.1000 | 0.000 | 1.000 | 1.459 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 10.174 | Nogent |

**Bilan hydrologique**

| Pluie | Neige | ETP | ETR | Ré_Init | Pluie_Effic | Températ | Fonte_Neig | Q_Rapide | Ruis_Débor | Q_Souter_1 | Q_Souter_2 | Pompage_Napp | Q_Éch_Sout | Dif_Stock | Alim_Sout_1 | Alim_Sout_2 | %Q_Souterr | %Q_Éch_Sout | %Q_Rapide | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 788.166 | 0.000 | 728.977 | 540.944 | 0.000 | 246.271 | 0.000 | 0.000 | 88.163 | 0.000 | 155.575 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.484 | 158.341 | 0.000 | 63.829 | 0.000 | 35.799 | Reveillon |
| 781.689 | 0.000 | 722.460 | 506.646 | 0.000 | 274.467 | 0.000 | 0.000 | 71.700 | 0.000 | 201.731 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.612 | 203.096 | 0.000 | 73.778 | 0.000 | 26.123 | Nogent |
| 782.306 | 0.000 | 723.081 | 509.914 | 0.000 | 271.780 | 0.000 | 0.000 | 73.269 | 0.000 | 197.333 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.791 | 198.832 | 0.000 | 72.924 | 0.000 | 26.959 | Total |

*=> Bilan semblant très correct pour le secteur*

**ATTENTION :** le modèle simule correctement les débits et les niveaux piézométriques grâce à un coefficient d'emmagasinement élevé. Si ce dernier est diminué (voir autres simulations), la RU explose et les débits de base sont sous-estimés (en lien avec un manque d'alimentation souterraine de la rivière). Un apport externe d'eau issu d'un autre BV ne permet pas de corriger le tir. **Le fonctionnement du système semble trop complexe pour permettre une modélisation globale.**





BV de la Mayenne

# Données

- **Pas de modèle BRGM existant**

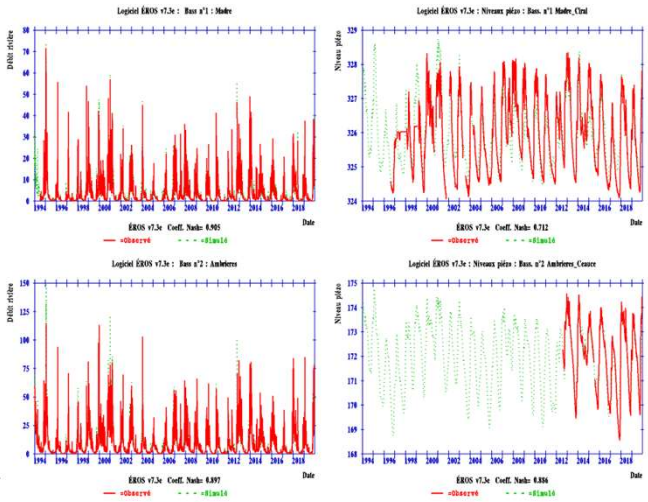
- **Nouveaux modèles :**
  - ***Stations hydrologiques :*** La Mayenne à Madré (M302091010) / La Mayenne à Ambrières (M306091010)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Modèle n°1 :
      - Ciral (BSS000TSFY) – Grès du Cambrien
      - Ceaucé (BSS000TRUX) – Cornéennes
    - Modèle n°2 :
      - Ciral (BSS000TSFY) – Grès du Cambrien
      - Le Horps (BSS000VWGX) – Schistes Brioveriens
    - Modèle n°3 :
      - Pré-en-Pail (BSS000TSMN) – Grès du Cambrien
      - Le Horps (BSS000VWGX) – Schistes Brioveriens

  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/1987-31/12/1993
  - ***Période de calibration :*** 01/01/1994-31/12/2019

BV de la Mayenne

# Modèles

- **Modèle n°1 (BSS000TSFY et BSS000TRUX)**
  - Meilleur modèle : Sim3 (1 réservoir pour Madré ; 2 réservoirs + seuil pour Ambrières)



| Nash_Débit | Nash_Niveau | Crit_Global | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|
| 0.9045 | 0.7117 | 0.8052 | Madre |
| 0.8974 | 0.8859 | 0.8916 | Ambrieres |
| 0.9009 | 0.7988 | 0.8484 | < Moyenne > |

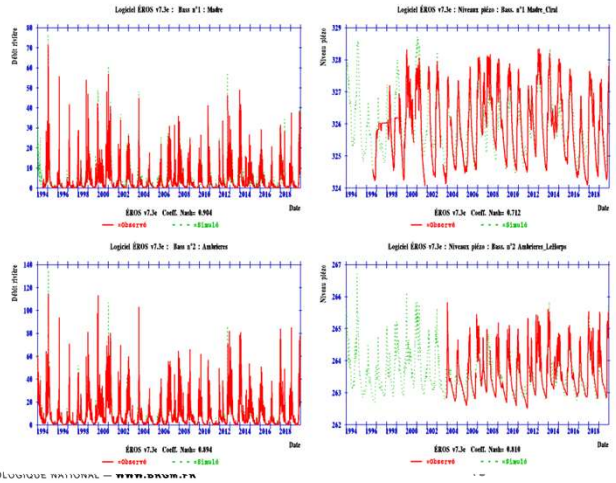




BV de la Mayenne

# Modèles

- **Modèle n°2 (BSS000TSFY et BSS000VWGX)**
  - Meilleur modèle : Sim4 (1 réservoir ; S=0,1% pour Ambrières)



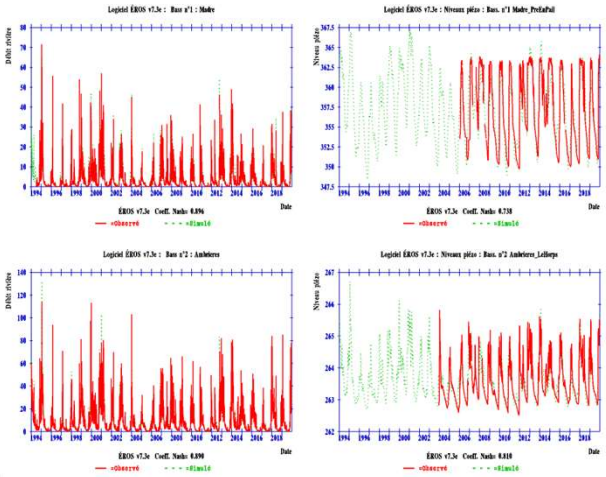
| Nash_Débit | Nash_Niveau | Crit_Global | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|
| 0.9035 | 0.7118 | 0.8048 | Madre |
| 0.8937 | 0.8101 | 0.8514 | Ambrieres |
| 0.8986 | 0.7610 | 0.8281 | < Moyenne > |

- ***Amélioration du bilan pour Ambrières lorsque S est fixé à 0,1%.***
- ***Un modèle double réservoir + seuil a été testé pour Ambrières, mais pas de différence significative avec un modèle 1 réservoir, donc on est resté sur 1 réservoir.***

BV de la Mayenne

# Modèles

- **Modèle n°3 (BSS000TSMN et BSS000VWGX)**
  - Meilleur modèle : Sim3 (1 réservoir ; seuil de débordement à Madré ; S=0,1% à Ambrières)



| Nash_Débit | Nash_Niveau | Crit_Global | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|
| 0.8959 | 0.7377 | 0.8149 | Madre |
| 0.8904 | 0.8100 | 0.8497 | Ambrieres |
| 0.8932 | 0.7738 | 0.8323 | < Moyenne > |

- *Amélioration du bilan pour Ambrières lorsque S est fixé à 0,1%.*
- *Amélioration de la simulation des niveaux piézométriques (hautes eaux) de Madré lorsqu'un seuil de débordement est intégré.*
- *Un modèle double réservoir + seuil a aussi été testé (Sim10), il donne également de bons résultats. La qualité du modèle est à-peu-près identique.*





BV de la Mayenne

# Modèles

- **Modèle n°3 (BSS000TSMN et BSS000VWGX) = meilleur modèle**
  - Meilleur modèle : Sim3 (1 réservoir ; seuil de débordement à Madré ; S=0,1% à Ambrières)

**Paramètres de calage**

*Convenable pour le secteur*

| aperfic_Cor | Niv_Base | Crit_Débit | Crit_Q_Calib | Nash_Niveau | Corr_Pluv | Corr_ETP | Rsup_Rumax | Rsup_Progr | Ruis_Percol | T1/2_Percol | T1/2_Taris1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 335.000 | 346.781 | 0.8959 | 0.8959 | 0.7377 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 162.477 | 10.285 | 1.871 | 0.9607 |
| 493.000 | 262.589 | 0.8904 | 0.8904 | 0.8100 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 157.486 | 15.137 | 2.423 | 0.1000 |

| T1/2_Perco2 | Seuil_Sout1 | T1/2_Taris2 | T_Réaction | Fact_Échang | T_Propagat | Seuil_Débor | T1/2_Débor | T1/2_Rui_Max | Corr_Superf | Coef_Emmag | Nom |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.1000 | 0.000 | 1.000 | 0.8750 | 0.000 | 5.288E-02 | 28.478 | 2.770 | 0.000 | 1.000 | 8.580E-02 | Madre |
| 0.1000 | 0.000 | 1.000 | 0.8886 | 0.000 | 0.5000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.1000 | Ambrieres |

*Convenable pour ces formations*

**Bilan hydrologique**

| Pluie | Neige | ETP | ETR | Ré_Init | Pluie_Effic | Températ | Fonte_Neig | Q_Rapide | Ruis_Débor | Q_Souter_1 | Q_Souter_2 | Pompage_Napp | Q_Éch_Sout | Dif_Stock | Alim_Sout_1 | Alim_Sout_2 | %Q_Souterr | %Q_Éch_Sout | %Q_Rapide | Nom_Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 881.861 | 0.000 | 698.533 | 510.158 | 0.000 | 371.378 | 0.000 | 0.000 | 292.132 | 110.658 | 79.514 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 5.680E-02 | 79.634 | 0.000 | 21.395 | 0.000 | 78.662 | Madre |
| 891.604 | 0.000 | 711.884 | 521.182 | 0.000 | 370.190 | 0.000 | 0.000 | 270.769 | 0.000 | 99.535 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.1183 | 99.555 | 0.000 | 26.879 | 0.000 | 73.143 | Ambrieres |
| 887.662 | 0.000 | 706.483 | 516.722 | 0.000 | 370.671 | 0.000 | 0.000 | 279.412 | 44.771 | 91.435 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 9.345E-02 | 91.495 | 0.000 | 24.656 | 0.000 | 75.380 | Total |

*=> Bilan semblant très correct pour ce secteur de socle*

BV de la Varenne

# Données

- **Pas de modèle existant**

- **Nouveau modèle :**
  - ***Station hydrologique :*** La Varenne à Saint-Fraimbault (M313301010)
  - ***Stations piézométriques :***
    - Tinchebray-Bocage (BSS000RCVC) – Cornéennes
    - Ceaucé (BSS000TRUX) – Cornéennes - /!\ Hors BV
    - La-Selle-La-Forge (BSS003UKQC) – Cornéennes - /!\ Hors BV

  - 1 modèle par station piézométrique
  - Initialisation et calibration sur une période commune entre les trois piézomètres afin de pouvoir comparer les trois modèles

  - ***Période d'initialisation :*** 01/01/2008-31/12/2012
  - ***Période de calibration :*** 01/01/2013-31/12/2019

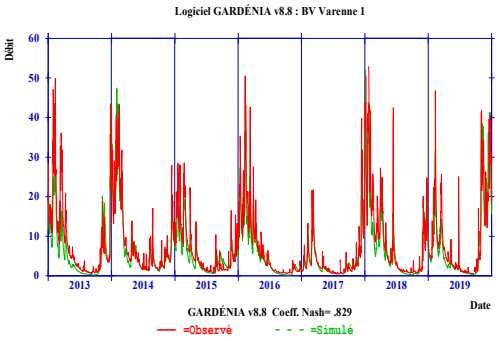


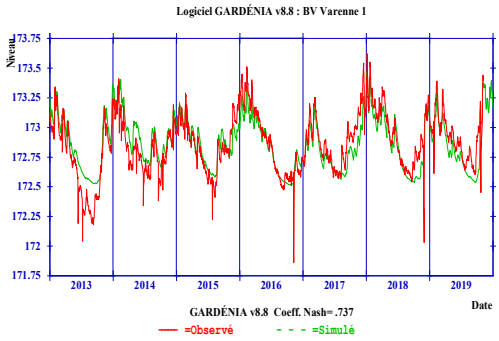


BV de la Varenne

# Modèles

- **Modèle Tinchebray-Bocage (BSS000RCVC – BSS1)**
  - Meilleur modèle : Sim5 (Réservoir double + seuil ; diminution de RUIPER pour augmenter le ruissellement)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8290 | 0.8290 | 0.7367 | 0.7822 | 0.8844 |

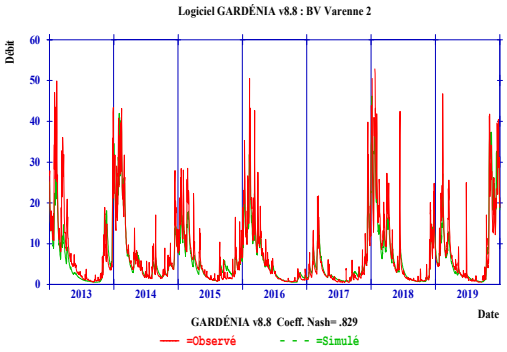
*Augmentation assez significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir*

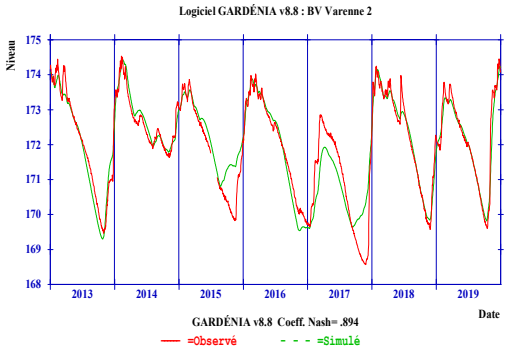
***Nécessité de jouer sur RUIPER sinon le bilan hydrologique paraissait peu réaliste pour ce type de bassin (Sim2 = 46% souterrain vs 54% rapide ; Sim5 = 26% souterrain vs 74% rapide)***

BV de la Varenne

# Modèles

- **Modèle Ceaucé (BSS000TRUX – BSS2 - /!\ hors bassin)**
  - Meilleur modèle : Sim5 (Réservoir double + seuil)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8293 | 0.8293 | 0.8941 | 0.8614 | 0.9281 |

*Augmentation significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir (+0,1)*

*Modèle avec Ceaucé (BSS2) > Tinchebray Bocage (BSS1)*

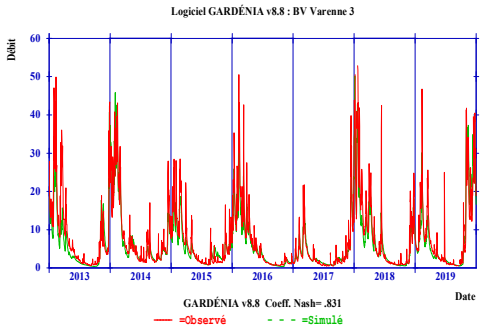


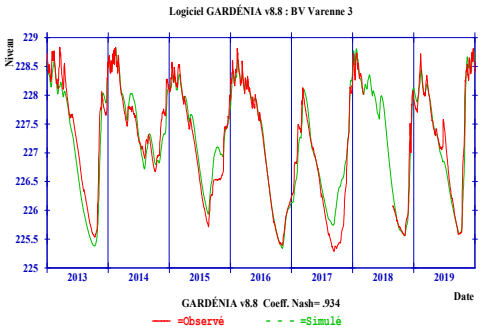


BV de la Varenne

# Modèles

- **Modèle La-Selle-La-Forge (BSS003UKQC – BSS3 - /!\ hors bassin)**
  - Meilleur modèle : Sim5 (Réservoir double + seuil)




| Nash_Q_Nat | Nash_Q_Pon | Nash_Niveau | Nash_Global | R_Global |
|---|---|---|---|---|
| 0.8307 | 0.8307 | 0.9343 | 0.8817 | 0.9390 |

*Augmentation significative du Nash de la piézométrie par rapport à un modèle à 1 réservoir (+0,1)*

*Modèle avec La-Selle-La-Forge (BSS3) > Ceaucé (BSS2)*

BV de la Varenne

# Modèles

- **Modèle La-Selle-La-Forge (BSS003UKQC – BSS3 - /!\ hors bassin)**
  - Meilleur modèle : Sim5 (Réservoir double + seuil)

*Convenable pour le secteur*

**Paramètres de calage**

| n°BV | Paramètres Hydroclimatiques | Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0équil.) (mm/an) | Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti0 | Superficie du bassin versant (km2) Opti1 | Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti0 | Correction globale des Pluies (%) Opti1 | Correction globale de l'ETP (%) Opti1 | Capacité du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Capacité du réservoir sol progressif (mm) Opti1 | Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti1 | Temps de 1/2 percolation vers la nappe (mois) Opti1 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°1 (mois) Opti1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BSS3 | s Hydroclimat | 0.00000 | 0.00000 | 517.00000 | 224.80359 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 145.62320 | 9.66894 | 1.69424 | 0.16199 |

| Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti0 | Seuil d'écoulement souterrain n°1 (rés. double) (mm) Opti0 | Temps de 1/2 tarissement du débit souterr. n°2 (mois) Opti0 | Temps de réaction ('retard') du débit (pas de temps) Opti0 | Facteur d'échange souterrain externe (%) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol 'réserve utile' (mm) Opti0 | Déficit initial du réservoir sol progressif (mm) Opti0 | Seuil de ruissellement par débordement (mm) Opti0 | Temps de 1/2 ruissell. par débordement (Pas de temps) Opti0 | Temps de 1/2 décroiss. maximal du ruissellement (mois) Opti0 | Facteur de correction de la superficie du bassin (-) Opti0 | Coefficient d'emmagasinement de la nappe (%) Opti0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05000 | 10.51451 | 0.89173 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.05000 | 1.000E-04 | 1.00000 | 0.33578 |

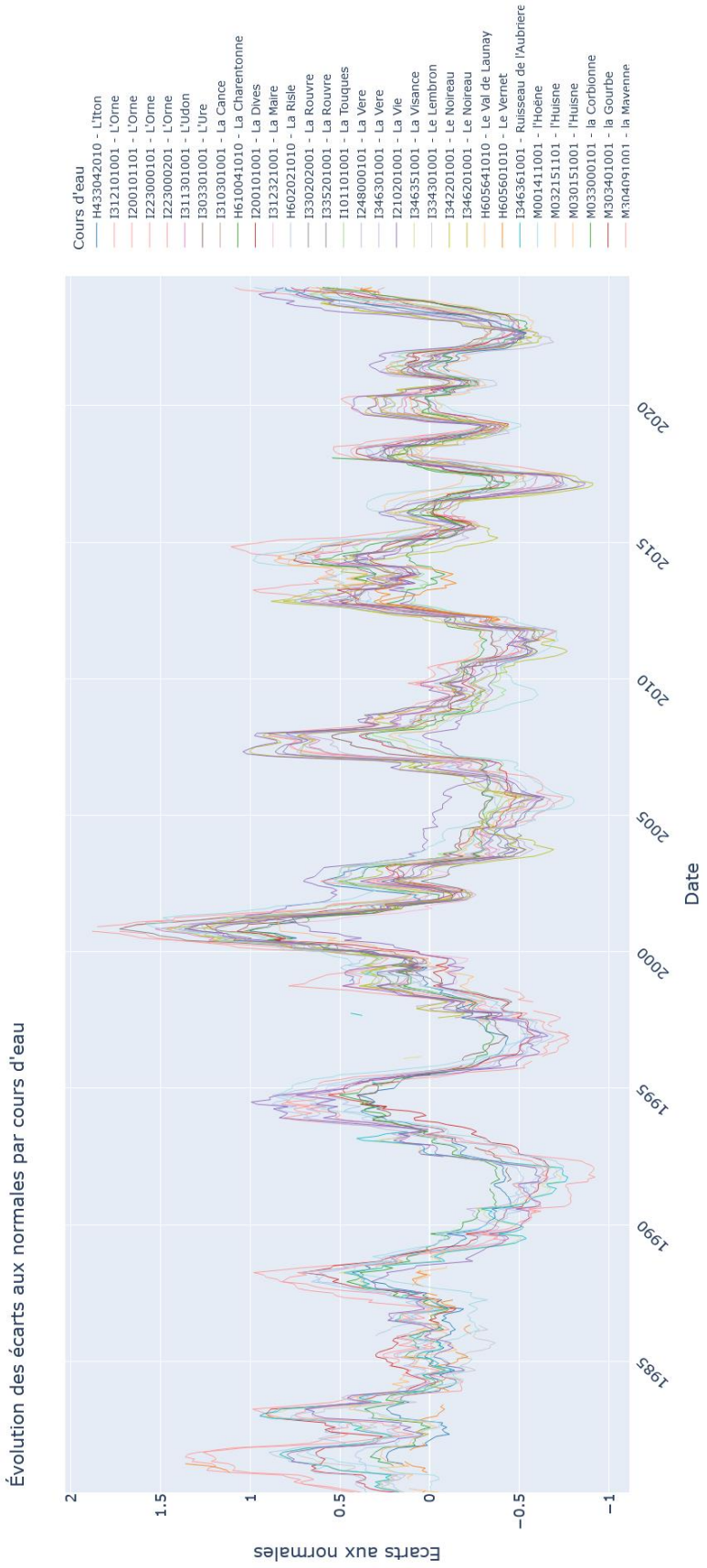
*Convenable pour le secteur*

**Bilan hydrologique**

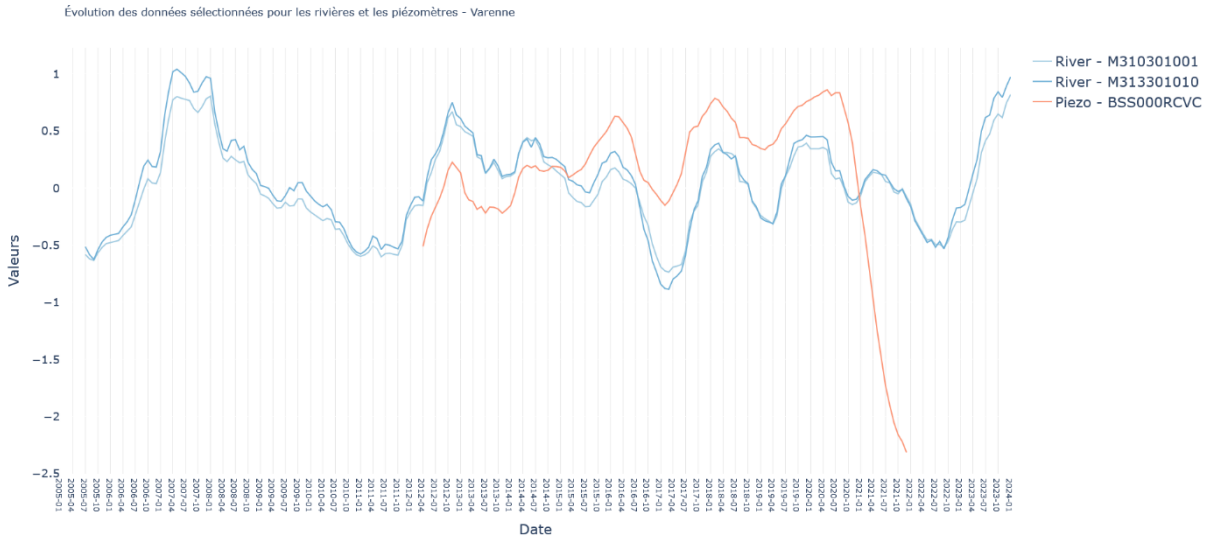
| Neige | Pluie | ETR | Reprise | Pluie_Effic | Fonte_Neig | Q_rapide | QRuis_Débo | Q_souterr1 | Q_souterr2 | Q_échange | Pomp_Napp | Dif_Stock | %Q_souterr | %Q_échange | %Q_rapide | Alim_sout1 | Alim_sout2 | Bassin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 917.769 | 525.118 | 0.000 | 392.909 | 0.000 | 298.844 | 0.000 | 18.769 | 77.181 | 0.000 | 0.000 | -2.142 | 24.304 | 0.000 | 76.059 | 95.932 | 0.000 | BV Varenne 3 |

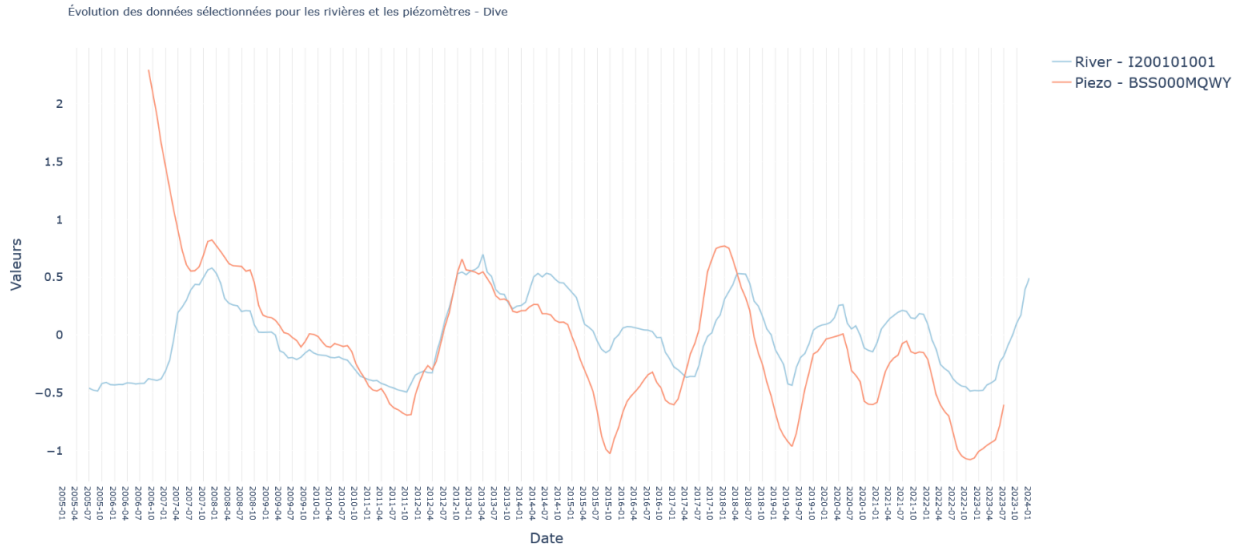
*=> Bilan semblant très correct pour le secteur de socle*

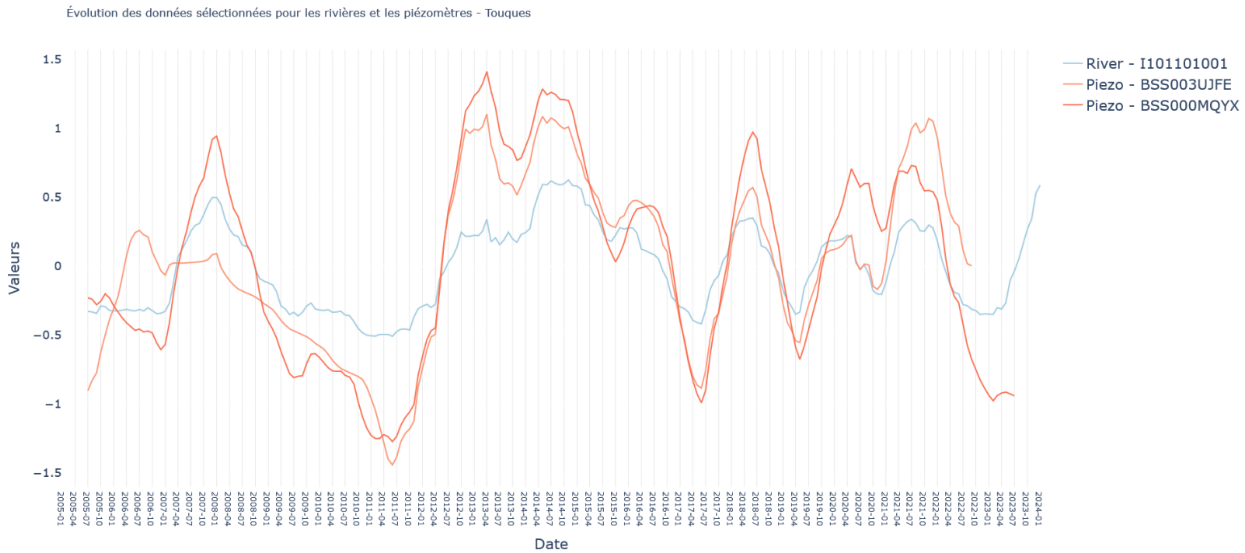
# Annexe 3 Ecarts aux normales des cours d'eau classés par bassins versants

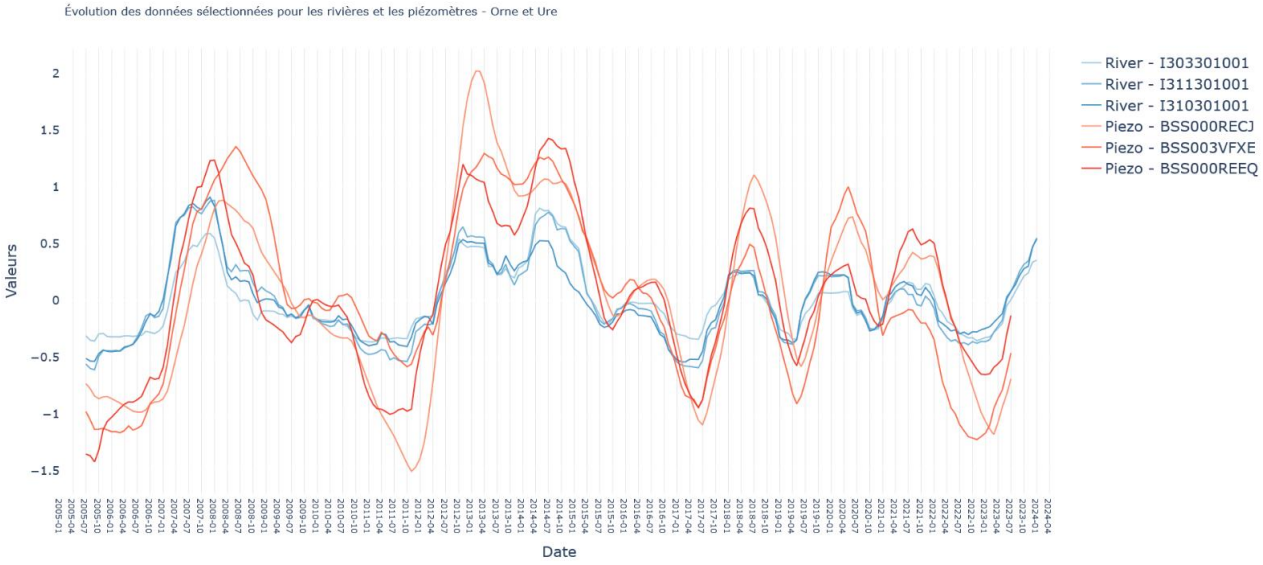

Évolution des écarts aux normales par cours d'eau
Ecarts aux normales
2
1.5
1
0.5
0
−0.5
−1
1985
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2020
Date
Cours d'eau
H433042010 - L'Iton
I312101001 - L'Orne
I200101101 - L'Orne
I223000101 - L'Orne
I223000201 - L'Orne
I311301001 - L'Udon
I303301001 - L'Ure
I310301001 - La Cance
H610041010 - La Charentonne
I200101001 - La Dives
I312321001 - La Maire
H602021010 - La Risle
I330202001 - La Rouvre
I335201001 - La Rouvre
I101101001 - La Touques
I248000101 - La Vere
I346301001 - La Vere
I210201001 - La Vie
I346351001 - La Visance
I334301001 - Le Lembron
I342201001 - Le Noireau
I346201001 - Le Noireau
H605641010 - Le Val de Launay
H605601010 - Le Vernet
I346361001 - Ruisseau de l'Aubrière
M001411001 - l'Hoëne
M032151101 - l'Huisne
M030151001 - l'Huisne
M033000101 - la Corbionne
M303401001 - la Gourbe
M304091001 - la Mayenne

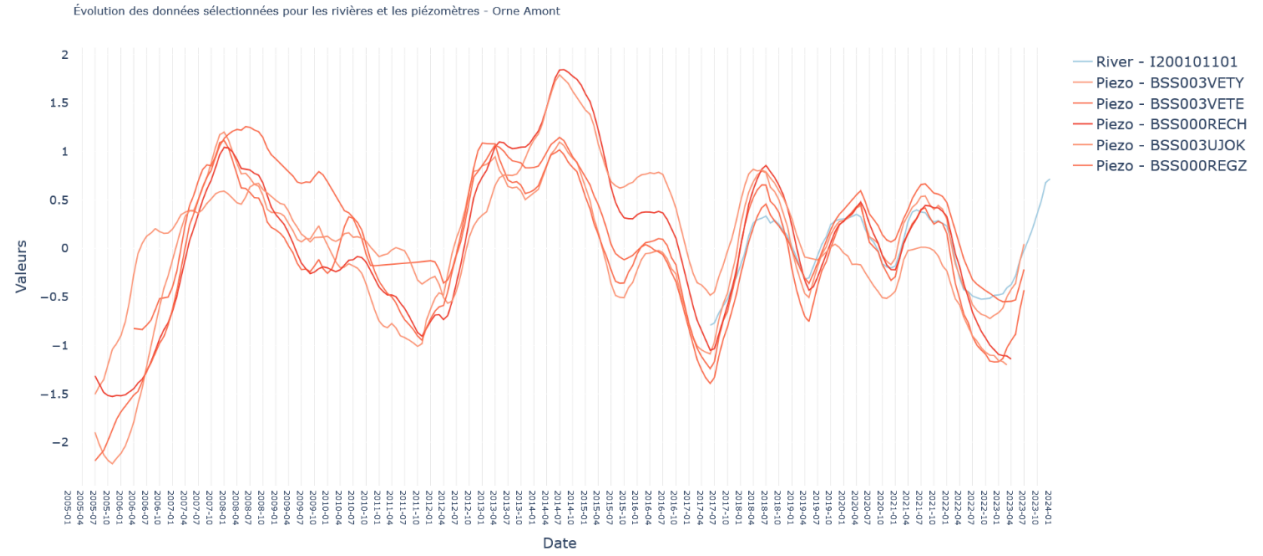
# Annexe 4 Comparaisons des écarts aux normales piézométriques et de débit par bassins versants individualisés

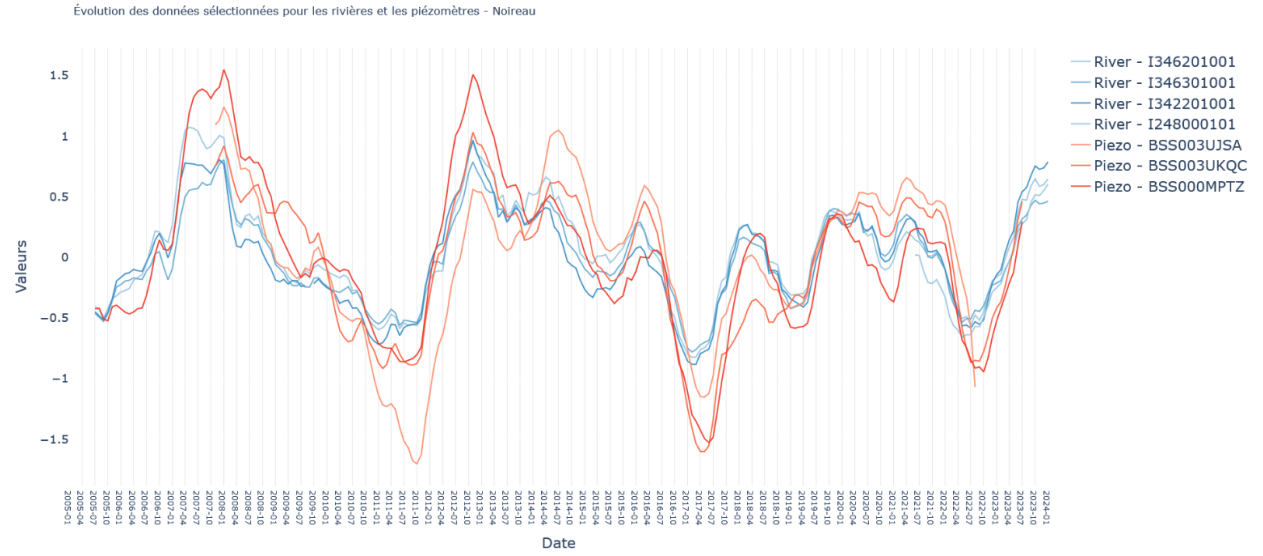

Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Varenne
River - M310301001
River - M313301010
Piezo - BSS000RCVC
Valeurs
Date

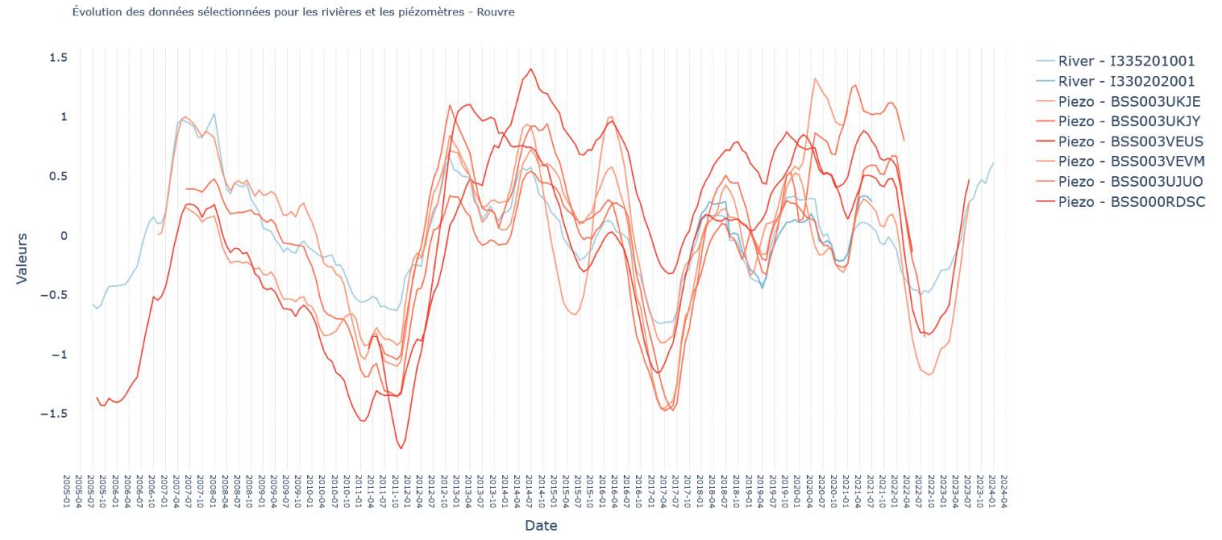

Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Dive
River - I200101001
Piezo - BSS000MQWY
Valeurs
Date


Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Touques
River - I101101001
Piezo - BSS003UJFE
Piezo - BSS000MQYX
Valeurs
Date

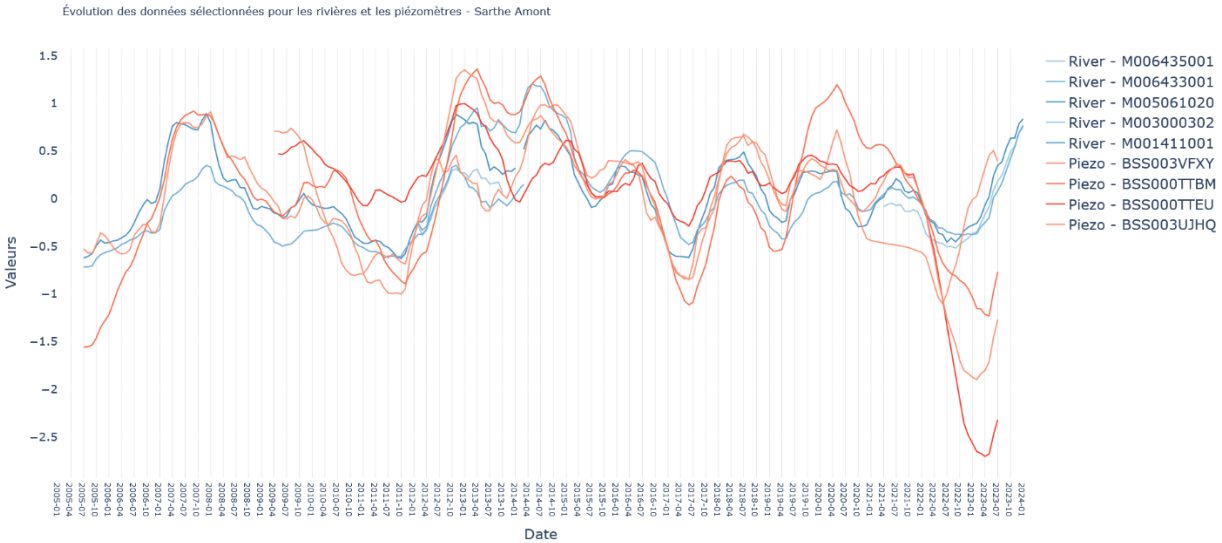

Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Orne et Ure
Valeurs
Date
River - I303301001
River - I311301001
River - I310301001
Piezo - BSS000RECJ
Piezo - BSS003VFXE
Piezo - BSS000REEQ


Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Orne Amont
Valeurs
Date
River - I200101101
Piezo - BSS003VETY
Piezo - BSS003VETE
Piezo - BSS000RECH
Piezo - BSS003UJOK
Piezo - BSS000REGZ

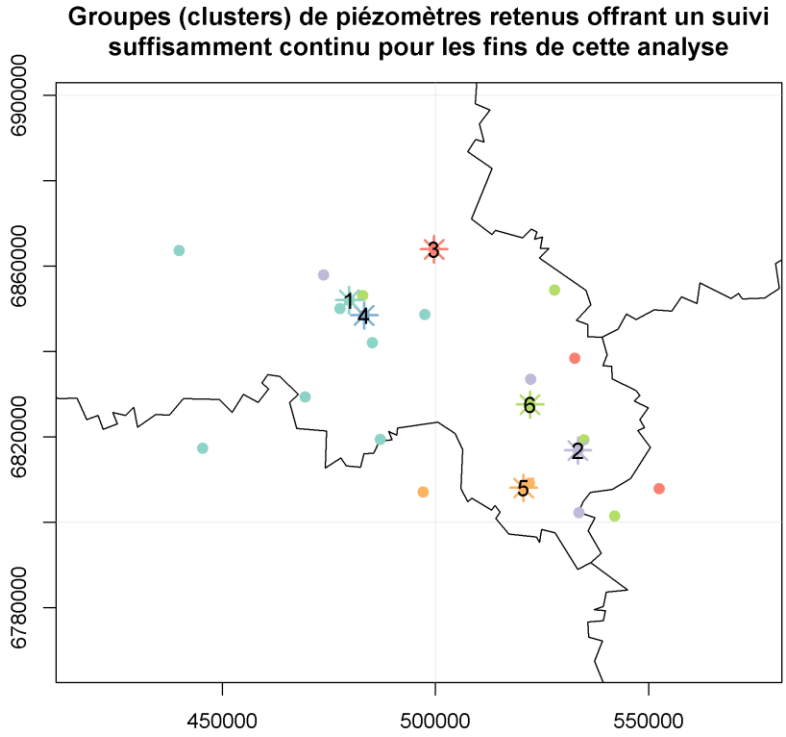

Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Noireau
Valeurs
Date
River - I346201001
River - I346301001
River - I342201001
River - I248000101
Piezo - BSS003UJSA
Piezo - BSS003UKQC
Piezo - BSS000MPTZ

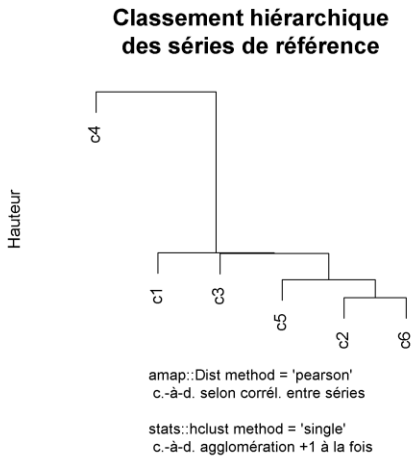

Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Rouvre
Valeurs
Date
River - I335201001
River - I330202001
Piezo - BSS003UKJE
Piezo - BSS003UKJY
Piezo - BSS003VEUS
Piezo - BSS003VEVM
Piezo - BSS003UJUO
Piezo - BSS000RDSC

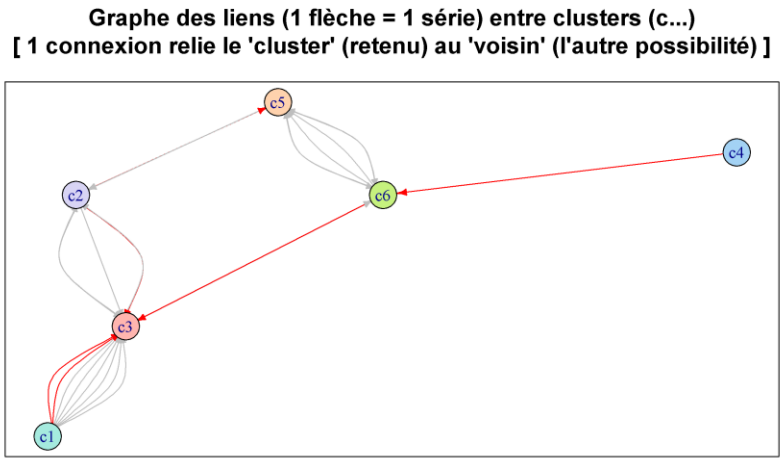

Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Huisne
Valeurs
Date
River - M030151001
River - M032151101
River - M033000101
Piezo - BSS000TTKJ
Piezo - BSS000TTQN
Piezo - BSS000TTJF
Piezo - BSS000TTPJ
Piezo - BSS000TTNK
Piezo - BSS000TTXC
Piezo - BSS000TTXH
Piezo - BSS003XOOC
Piezo - BSS000VXYR
Piezo - BSS000VXYQ
Piezo - BSS003UJPY
Piezo - BSS000VYFB
Piezo - BSS000VYHZ

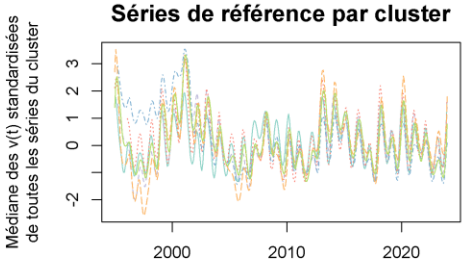

Évolution des données sélectionnées pour les rivières et les piézomètres - Sarthe Amont
Valeurs
Date
River - M006435001
River - M006433001
River - M005061020
River - M003000302
River - M001411001
Piezo - BSS003VFXY
Piezo - BSS000TTBM
Piezo - BSS000TTEU
Piezo - BSS003UJHQ

# Annexe 5 Clustering des piézomètres du département de l'Orne



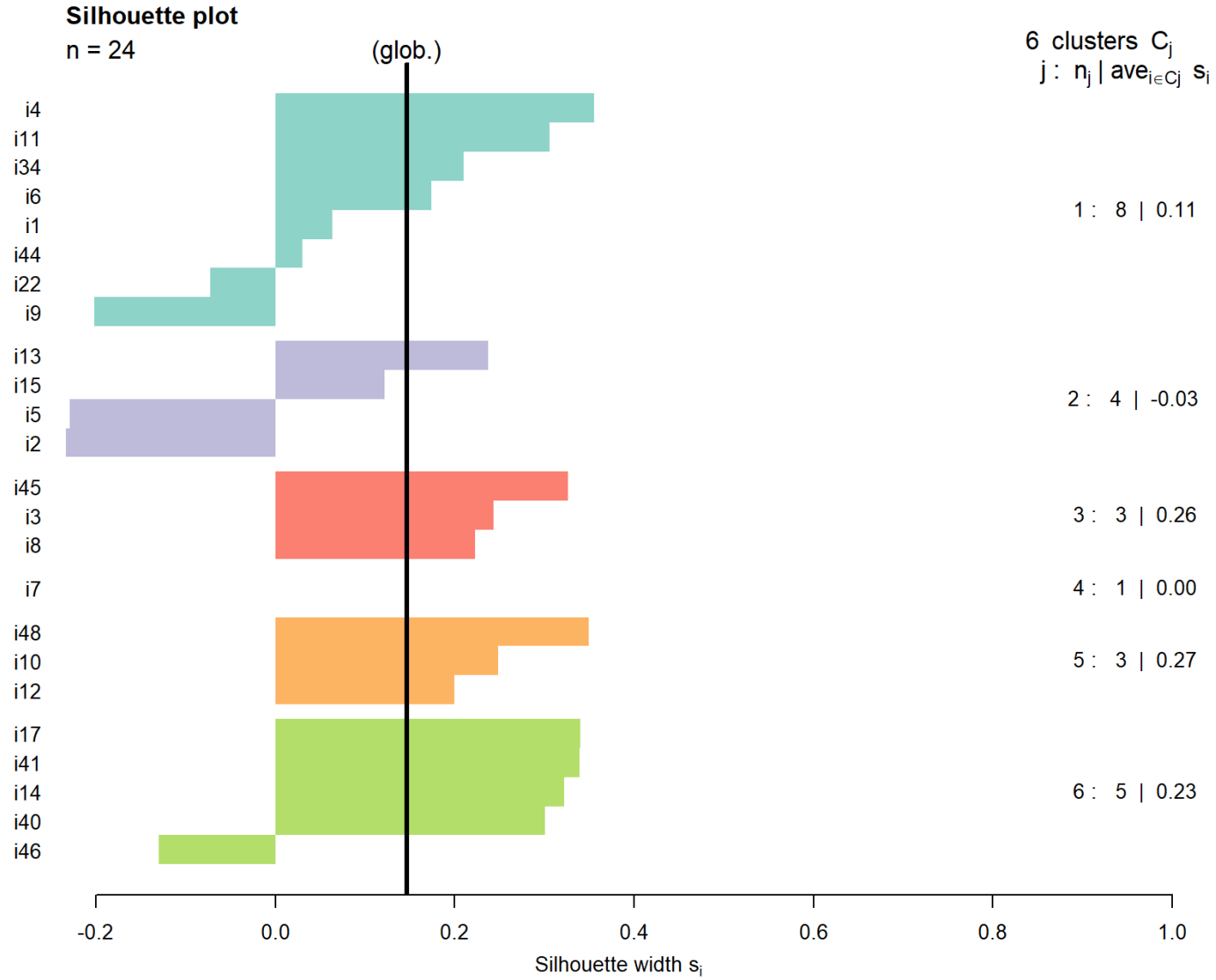



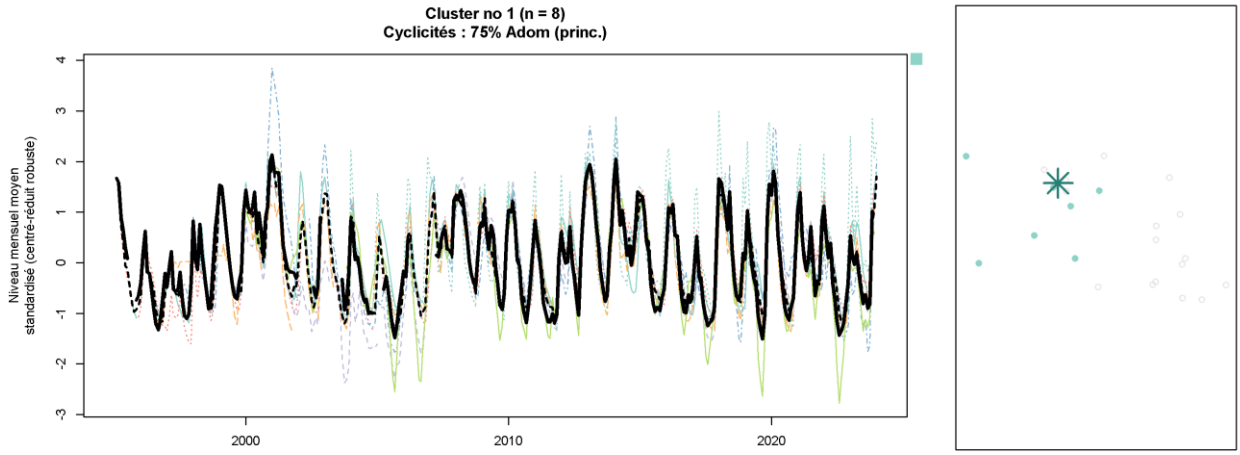

r : Corrélation linéaire entre les séries de référence de chaque cluster

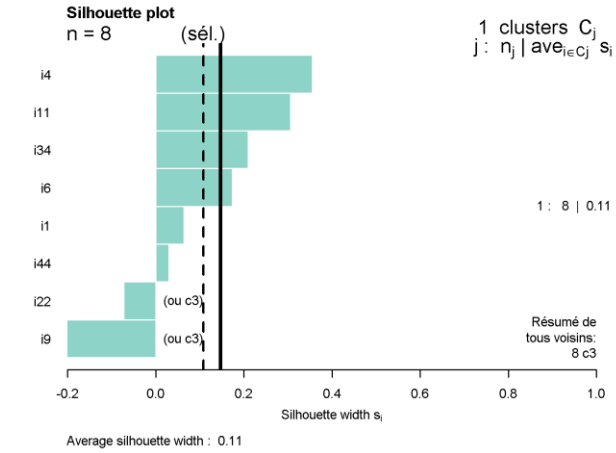
c1
c2
c3
c4
c5
c6

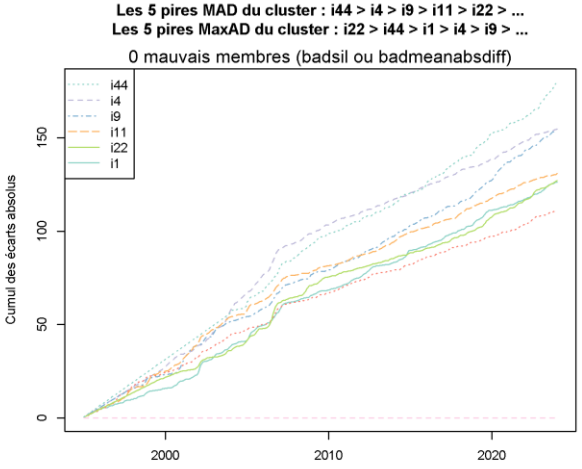
| | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 |
|---|---|---|---|---|---|
| c2 | 0.79 | | | | |
| c3 | 0.88 | 0.88 | | | |
| c4 | 0.49 | 0.60 | 0.69 | | |
| c5 | 0.72 | 0.87 | 0.77 | 0.51 | |
| c6 | 0.74 | 0.92 | 0.86 | 0.71 | 0.90 |

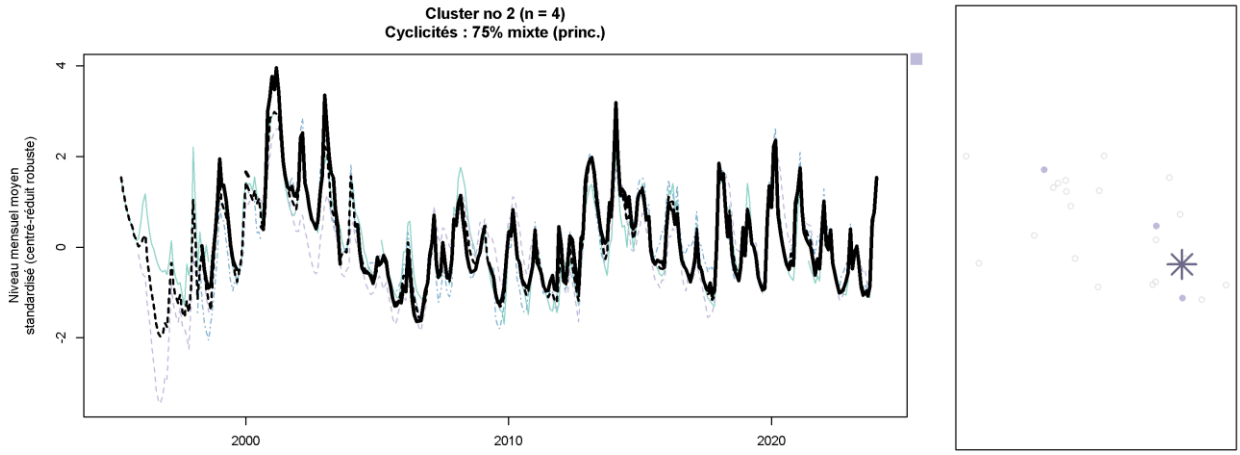


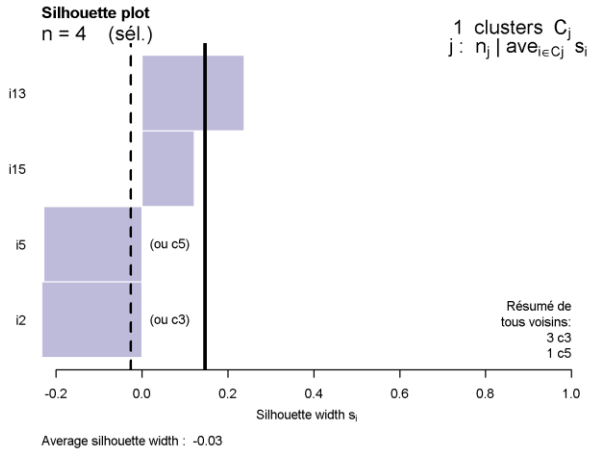

Average silhouette width : 0.15

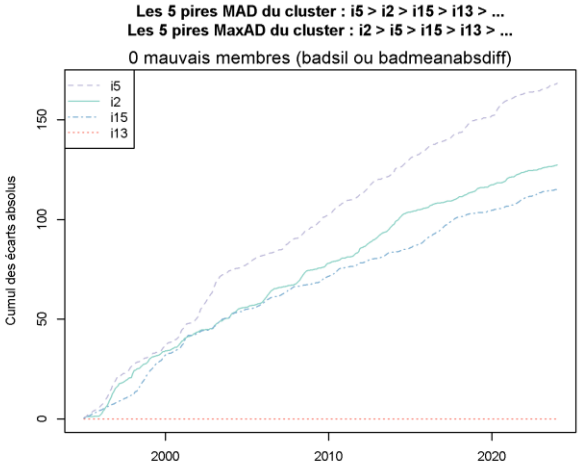

Cluster no 1 (n = 8)
Cyclicités : 75% Adom (princ.)
Niveau mensuel moyen standardisé (centré-réduit robuste)
2000
2010
2020

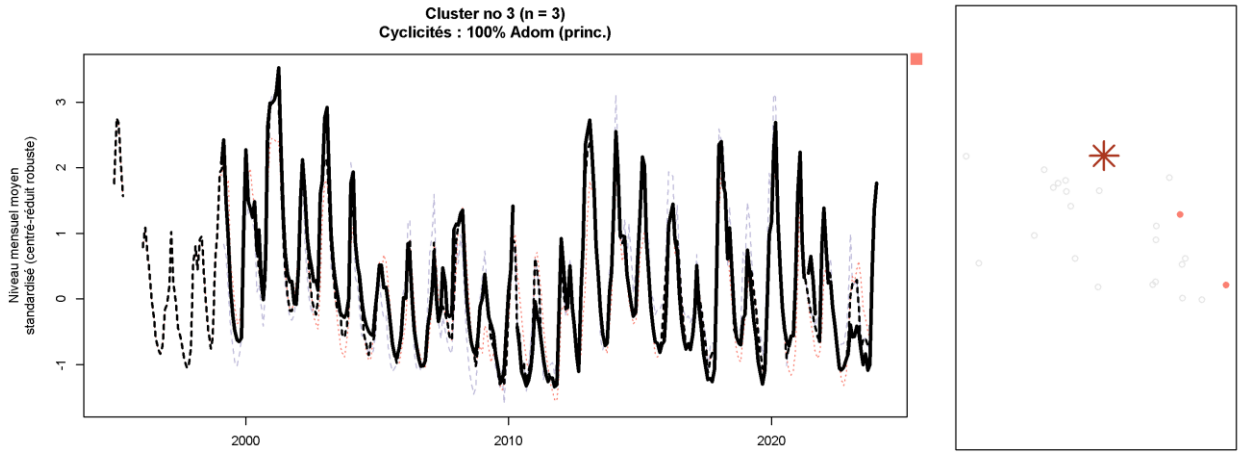

Silhouette plot
n = 8
(sél.)
1 clusters C_j
j : n_j | ave_{i∈Cj} s_i
i4
i11
i34
i6
i1
i44
i22
i9
(ou c3)
(ou c3)
1 : 8 | 0.11
Résumé de tous voisins: 8 c3
Silhouette width s_i
Average silhouette width : 0.11

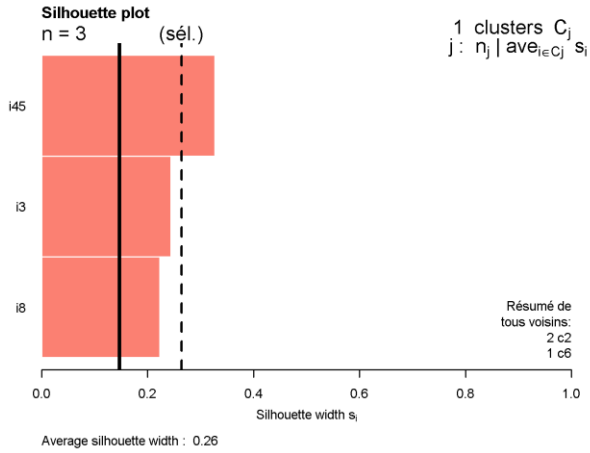

Les 5 pires MAD du cluster : i44 > i4 > i9 > i11 > i22 > ...
Les 5 pires MaxAD du cluster : i22 > i44 > i1 > i4 > i9 > ...
0 mauvais membres (badsil ou badmeanabsdiff)
i44
i4
i9
i11
i22
i1
Cumul des écarts absolus
2000
2010
2020

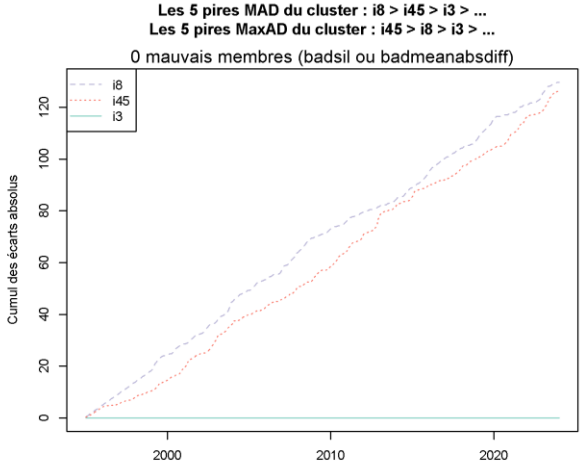

Cluster no 2 (n = 4)
Cyclicités : 75% mixte (princ.)
Niveau mensuel moyen standardisé (centré-réduit robuste)
4
2
0
-2
2000
2010
2020

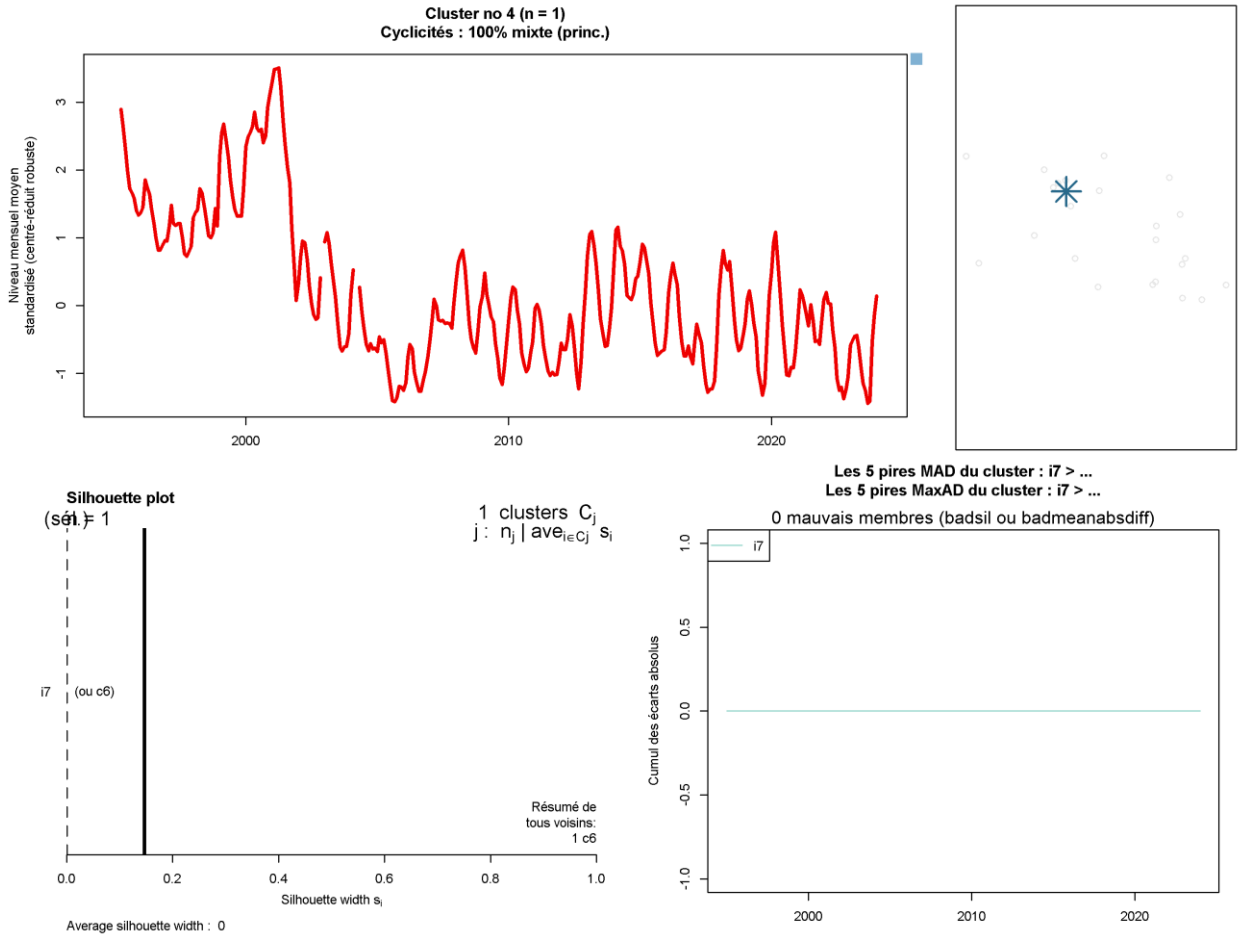

Silhouette plot
n = 4 (sél.)
1 clusters $C_j$
j : $n_j$ | $ave_{i∈Cj}$ $s_i$
i13
i15
i5
i2
(ou c5)
(ou c3)
Résumé de tous voisins:
3 c3
1 c5
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Silhouette width $s_i$
Average silhouette width : -0.03


Les 5 pires MAD du cluster : i5 > i2 > i15 > i13 > ...
Les 5 pires MaxAD du cluster : i2 > i5 > i15 > i13 > ...
0 mauvais membres (badsil ou badmeanabsdiff)
i5
i2
i15
i13
Cumul des écarts absolus
150
100
50
0
2000
2010
2020

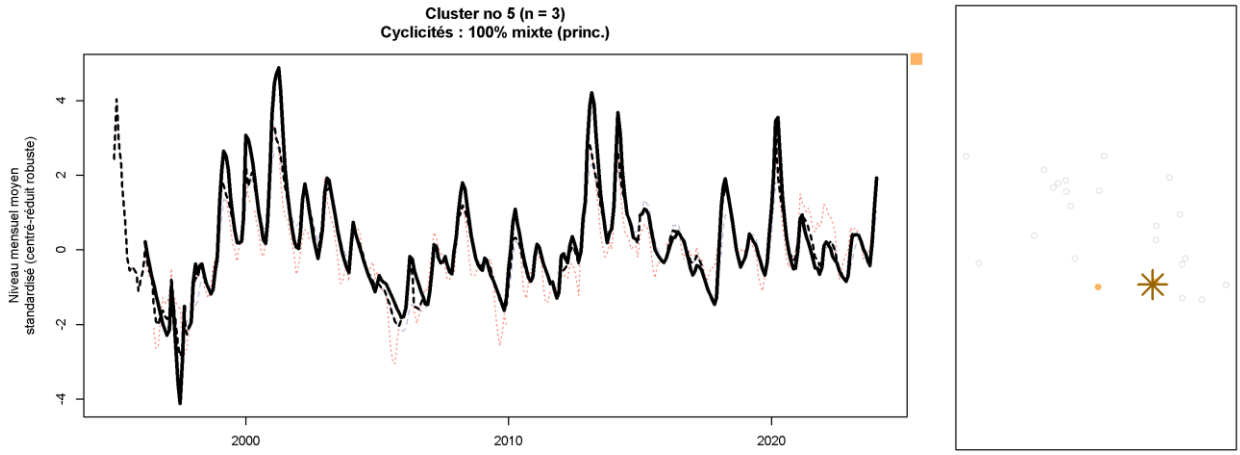

Cluster no 3 (n = 3)
Cyclicités : 100% Adom (princ.)
Niveau mensuel moyen
standardisé (centré-réduit robuste)
-1
0
1
2
3
2000
2010
2020

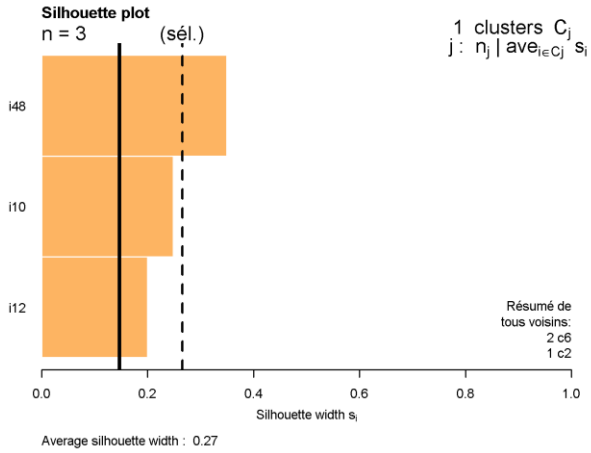

Silhouette plot
n = 3
(sél.)
1 clusters Cj
j : nj | aveiCj si
i45
i3
i8
Résumé de
tous voisins:
2 c2
1 c6
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Silhouette width si
Average silhouette width : 0.26

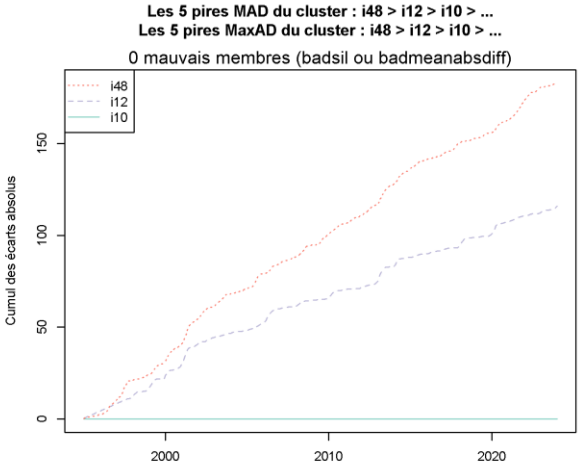

Les 5 pires MAD du cluster : i8 > i45 > i3 > ...
Les 5 pires MaxAD du cluster : i45 > i8 > i3 > ...
0 mauvais membres (badsil ou badmeanabsdiff)
i8
i45
i3
Cumul des écarts absolus
0
20
40
60
80
100
120
2000
2010
2020

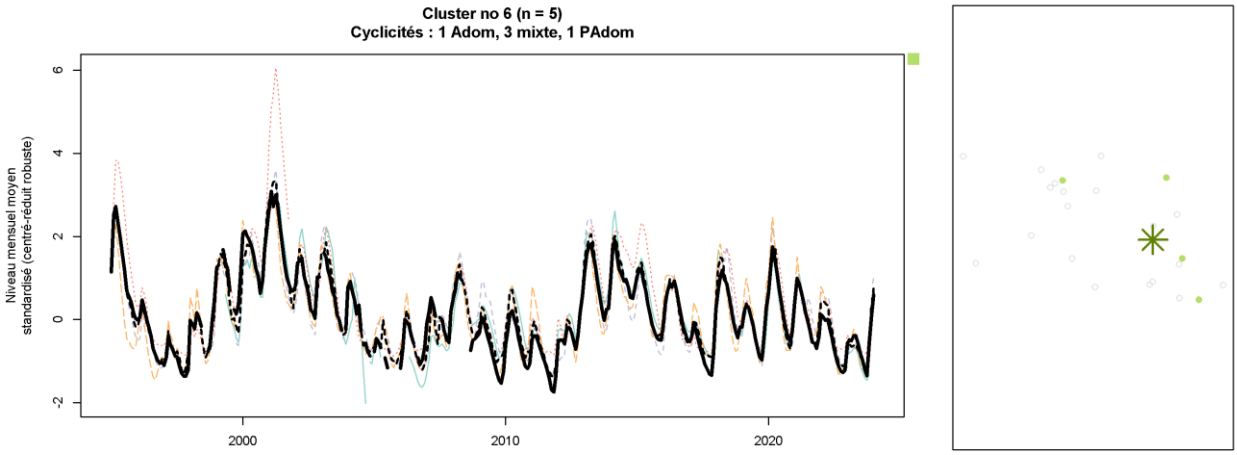


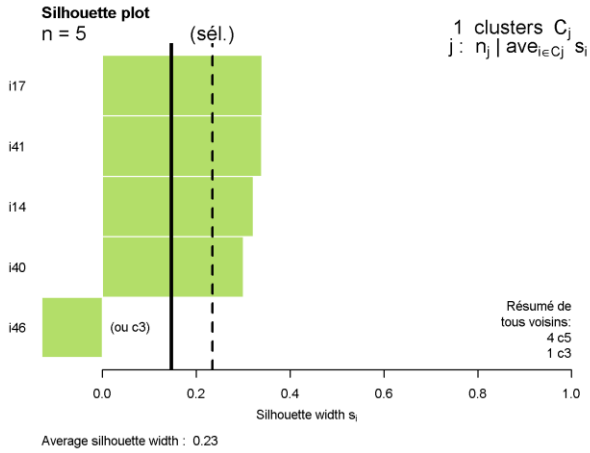

Peut-être sous l'influence de pompages

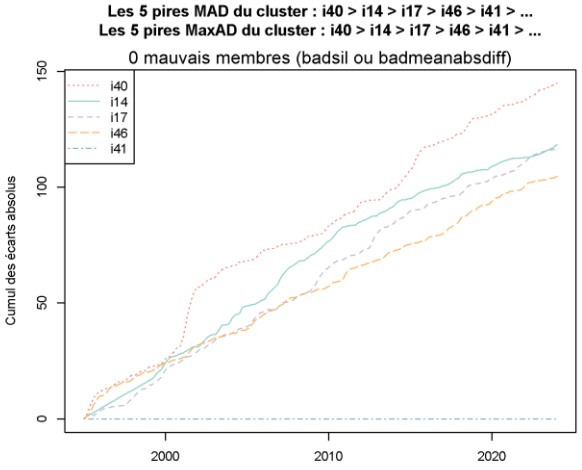

Cluster no 5 (n = 3)
Cyclicités : 100% mixte (princ.)
Niveau mensuel moyen
standardisé (centré-réduit robuste)
4
2
0
-2
-4
2000
2010
2020


Silhouette plot
n = 3
(sél.)
1 clusters Cj
j : nj | avei∈Cj si
i48
i10
i12
Résumé de
tous voisins:
2 c6
1 c2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Silhouette width si
Average silhouette width : 0.27


Les 5 pires MAD du cluster : i48 > i12 > i10 > ...
Les 5 pires MaxAD du cluster : i48 > i12 > i10 > ...
0 mauvais membres (badsil ou badmeanabsdiff)
i48
i12
i10
Cumul des écarts absolus
150
100
50
0
2000
2010
2020


Cluster no 6 (n = 5)
Cyclicités : 1 Adom, 3 mixte, 1 PAdom
Niveau mensuel moyen
standardisé (centré-réduit robuste)
6
4
2
0
-2
2000
2010
2020


Silhouette plot
n = 5
(sél.)
1 clusters $C_j$
j : $n_j$ | $ave_{i \in Cj}$ $s_i$
i17
i41
i14
i40
i46
(ou c3)
Résumé de
tous voisins:
4 c5
1 c3
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Silhouette width $s_i$
Average silhouette width : 0.23


Les 5 pires MAD du cluster : i40 > i14 > i17 > i46 > i41 > ...
Les 5 pires MaxAD du cluster : i40 > i14 > i17 > i46 > i41 > ...
0 mauvais membres (badsil ou badmeanabsdiff)
i40
i14
i17
i46
i41
Cumul des écarts absolus
150
100
50
0
2000
2010
2020

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
*Liberté*
*Égalité*
*Fraternité*

Géosciences pour une Terre durable
brgm

**Centre scientifique et technique**
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
**Direction régionale Normandie**
7 rue Andrei Sakharov, Parc de la Vatine
76130 Mont-Saint-Aignan
Tél. : 02.35.60.12.00 ; Courriel : normandie@brgm.fr
**www.brgm.fr**