RAPPORT DE STAGE

# ÉTUDE PRÉLIMINAIRE POUR LA GESTION QUANTITATIVE DES NAPPES DE L'ÉOCÈNE MOYEN ET INFÉRIEUR DU BASSIN DE PARIS

Joti Rouillard

Août 2024

*Rapport de stage de fin de Master 2 réalisé entre le 11 Mars et le 24 Juillet 2024*

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES
*Liberté*
*Égalité*
*Fraternité*

Direction Régionale Environnement
Aménagement Logement Hauts-de-France
75 rue de la Vallée
80000 Amiens

| | |
|---|---|
| Titre du document : | **Etude préliminaire pour la gestion quantitative des nappes de l'Eocène moyen et inférieur du bassin de Paris** |
| Cadre et nature du travail : | Rapport de stage de fin de Master 2 |
| Dates de début et de fin : | 11/03/2024 – 24/07/2024 |
| Date de publication : | 08/08/2024 |
| Auteur : | Joti Rouillard |
| Encadrement : | Christophe Raoul & Hugo Marchioni |
| Structure d'accueil | Direction Régionale Environnement Aménagement Logement Hauts de France / Service Eau et Nature |
| Résumé : | Ce stage s'inscrit dans le cadre du lancement de démarches « volumes prélevables » pour les aquifères de l'Eocène du bassin de Paris. Ce rapport présente les principaux résultats du stage : recensement de données hydrogéologiques, cartographie de la pression quantitative sur la ressource, préconisations pour les futures Etudes Volumes Prélevables (bassins-versants prioritaires, implantation de nouveaux ouvrages de suivi, modèles numériques). |
| Mots-clés : | Hydrogéologie, aquifères, gestion quantitative, Etudes Volumes Prélevables, cartographie, pression de prélèvement, tendances statistiques, modèles numériques |
| Nombre de pages : | 40 pages + 11 pages d'annexes. |

## Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier Hugo. Tout au long du stage et au quotidien, tu as été un tuteur très disponible, que ce soit pour m'apporter des connaissances, pour m'écouter, pour me conseiller - mais aussi pour me recadrer quand je partais un peu trop en exploration ! Merci à toi pour ta bienveillance. Un grand merci aussi à Christophe et Marc, qui m'ont fait confiance, m'ont accueilli et m'ont permis de travailler dans un service d'exception à Amiens. Je pense qu'une bonne atmosphère entre les collègues vient d'abord de bons cadres, alors félicitations à vous ! Merci à mes compagnons de bureau - Hugo, mais aussi Céline et Jérôme - de m'avoir donné une place dans cette nouvelle Cité Administrative, et de m'avoir chaleureusement inclus dans vos vies (et sur votre porte, en version miniature). Enfin, plus généralement, un très grand merci à tous mes collègues au SEN, et à mes compagnons de table de jeu - Noé, Catherine, Quentin, Esther, et puis Quentin (devinez lequel est lequel), Camille et les autres... Venir au travail dans de telles conditions était un vrai plaisir, et j'espère sincèrement vous revoir !

# Sommaire

**Présentation de la DREAL et du SEN** **1**

**Introduction** **1**

**1 Synthèse documentaire et bibliographique** **2**

1.1 Hydrogéologie régionale . . . . . 2

1.2 Réseau d'observation hydrogéologique . . . . . 3

1.3 Climat régional . . . . . 8

1.4 Prélèvements . . . . . 8

**2 Production d'outils graphiques et cartographiques pour les DDT de l'Oise et de l'Aisne** **11**

2.1 Evolution régionale du climat et des prélèvements en eau . . . . . 11

2.2 Délimitation de nouvelles unités hydrogéologiques . . . . . 13

2.3 Pression sur la ressource en eaux souterraines . . . . . 13

2.4 Tendances statistiques sur les chroniques piézométriques et débitmétriques . . . . . 16

2.5 Communication des livrables aux DDT . . . . . 19

**3 Préparation des futures Etudes de Volumes Prélevables** **22**

3.1 Cadre théorique . . . . . 22

3.2 Modélisation par bilan de flux simple . . . . . 22

3.2.1 Méthodologie . . . . . 23

3.2.2 Résultats . . . . . 24

3.2.3 Discussion . . . . . 24

3.3 Modélisation par le logiciel Gardenia . . . . . 26

3.3.1 Méthodologie . . . . . 26

3.3.2 Résultats . . . . . 29

3.3.3 Discussion . . . . . 32

**4 Préconisations à l'issue du stage pour les futures Etudes de Volumes Prélevables 34**

**5 Conclusion 38**

**Références 38**

**Annexes 41**

## Présentation de la DREAL et du SEN

Ce stage a été effectué à la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Hauts-de-France, au sein du Service Eau et Nature (SEN) à Amiens. Les DREAL regroupent les services déconcentrés en région du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT). Elles déclinent les politiques nationales de développement durable, de transition énergétique, de planification territoriale et d'urbanisme à l'échelle régionale. Au sein de la DREAL Hauts-de-France, le SEN anime les politiques liées à la préservation de la biodiversité et des paysages, de la qualité et de la quantité de la ressource en eau, ainsi qu'à la prévention des risques naturels. En dehors du SEN, la direction régionale Hauts-de-France du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a fourni un réel appui scientifique et technique lors de plusieurs points de parcours.

## Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau du 23 Octobre 2000, ou DCE (Parlement Européen, Fontaine et Glavany 2000) est un texte réglementaire fondamental pour orienter la politique de l'eau en Europe. Elle fixe comme objectif général aux états de la Communauté Européenne l'atteinte du bon état qualitatif et quantitatif de l'ensemble des masses d'eau de surface et souterraines sur leurs territoires.

Au cœur du bassin de Paris, les couches aquifères du Lutétien et de l'Yprésien (Eocène moyen et inférieur) contiennent une nappe d'eaux souterraines d'un volume conséquent. Appelée indifféremment "nappe des sables de Cuise" ou "nappe du Lutétien-Yprésien" dans la suite de ce rapport, son importance a été reconnue par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Seine Normandie 2022 - 2027, qui en a classé une partie comme "nappe stratégique" pour l'alimentation en eau potable, avec des implications réglementaires (Agence de l'Eau Seine Normandie 2022).

Au cours des dernières années, les demandes d'instruction pour de nouveaux prélèvements d'eau dans cette nappe, notamment pour l'irrigation, se sont multipliées, donnant lieu à des alertes de la part de l'Agence Régionale de Santé sur de possibles tensions sur la ressource. Les prélèvements pour irrigation sont particulièrement importants en période d'étiage, au cours de laquelle ils sont particulièrement susceptibles de mener à une dégradation écologique des cours d'eau. La Mission Régionale d'Autorité Environnementale Hauts-de-France a fait part, sous la forme d'une lettre officielle à l'Agence de l'Eau Seine Normandie et au Préfet Coordonnateur de Bassin, de ses préoccupations concernant l'équilibre quantitatif de la nappe des sables de

Cuise. Le territoire n'est que partiellement couvert par les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), des structures essentielles pour le portage d'études hydrogéologiques (AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE 2022). Ce défaut de couverture mène donc à un défaut de connaissances sur la nappe.

Pour maintenir une ressource pérenne en eau de consommation et préserver les qualités écologiques des cours d'eau dans le bassin parisien, dans un contexte de changement climatique, la mise en place dans les prochaines années de modalités de gestion adaptées pour la nappe des sables de Cuise sera cruciale. Ces modalités de gestion, conformément au Plan Eau gouvernemental de 2023, reposeront sur des démarches de types "Volumes Prélevables" (GOUVERNEMENT FRANÇAIS 2023).

Ce stage a deux objectifs principaux. Premièrement, le recensement et la synthèse de données sur la nappe du Lutétien – Yprésien, donnant lieu à la production d'outils cartographiques simples. Ces outils d'aide à la décision doivent répondre aux besoins immédiats des services d'instruction des demandes de prélèvements des Directions Départementales des Territoires (DDT) de l'Aisne et de l'Oise.

Deuxièmement, la préparation des futures Etudes de Volumes Prélevables (EVP) qui seront conduites sur la nappe du Lutétien – Yprésien. Cette phase doit notamment apporter aux services de l'Etat une proposition de zones prioritaires pour les futures EVP, mais également des informations importantes sur le volet « modélisation » des EVP.

# 1 Synthèse documentaire et bibliographique

## 1.1 Hydrogéologie régionale

La zone d'étude est limitée au Nord par l'extension de l'Yprésien (Fig. 1 ; Cartes géologiques départmentales harmonisées au 1/50 000, BRGM (2019)). Au Sud, bien que l'Eocène du bassin parisien s'étende bien au-delà, et afin de restreindre la complexité administrative de l'étude, elle s'arrête aux alluvions de la Seine et de la Marne.

Pour les suivis de la Directive Cadre Européenne, les aquifères de l'Eocène du bassin de Paris, dans leur partie Nord, sont séparés administrativement en 4 masses d'eau souterraines (Fig. 1 ; BRGM (2010)). Séparées par les alluvions du cours inférieur de l'Aisne, ainsi que les limites des bassins versants de l'Automne et de l'Ourcq, ces masses d'eau sont :

— l'Eocène du Valois (code HG104)

— l'Eocène du bassin versant de l'Ourcq (HG105)

— le Lutétien-Yprésien du Soissonnais-Laonnois (HG106) et

— l'Eocène et Craie du Vexin français (HG107).

L'Eocène du bassin parisien comprend deux principaux intervalles aquifères : un premier, datant du Bartonien (41.2 à 37.7 Millions d'années / Ma), constitué d'une succession de plusieurs couches de sables et de calcaires, et un second, datant du Lutétien - Yprésien (56.0 à 41.2 Ma) et constitué des calcaires du Lutétien et des sables du Cuisien (Fig. 2 ; Fiches de caractérisation des Masses d'eau souterraines, AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE et BRGM (2015a,b,c,d) ).

Les marnes et caillasses du Lutétien supérieur constituent une couche semi-perméable, permettant des échanges d'eau lents entre ces deux systèmes aquifères. Les couches aquifères du Lutétien-Yprésien reposent dans toute leur extension sur une couche d'argiles imperméables, les argiles du Sparnacien (Yprésien inférieur). Il y a généralement communication hydraulique entre les nappes du Lutétien et de l'Yprésien, avec un niveau de référence commun. Cependant, une strate imperméable lacunaire, les argiles de Laon, s'intercale entre les calcaires lutétiens et les sables du Cuisien sur une partie du territoire. Là où ces argiles sont le plus présentes (plaine de France, en particulier), la nappe des sables de Cuise peut avoir un fonctionnement indépendant de la nappe du Lutétien, avec un régime captif (AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE et BRGM 2015a,b,c,d).

Au Sud, au niveau de la plaine de France, du Vexin et du bassin versant de l'Ourcq, l'Eocène moyen et inférieur est sous couverture de l'Eocène supérieur (Fig. 3, Fig. S-1 en annexe). Quelques buttes témoins oligocènes subsistent également. Au Nord, le Lutétien et l'Yprésien affleurent, et sont (parfois profondément) entaillés par les cours d'eau (Fig. 3, Fig. S-1).

Deux campagnes de mesures piézométriques ont été menées sur le système aquifère du Lutétien-Yprésien au cours des saisons de basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 (BAULT et al. 2015). Les cartes extrapolées à partir de ces mesures montrent que la piézométrie est principalement structurée par les vallées de l'Aisne, de l'Oise, de la Seine (au niveau de Paris) et de l'Ourcq, qui représentent des creux piézométriques, et par la cuesta de la montagne de Reims, qui représente une crête piézométrique (Fig. S-2 en annexe).

### 1.2 Réseau d'observation hydrogéologique

Dans le territoire étudié, un bon nombre de stations hydrométriques et piézométriques a été installé dès la fin des années 60 et au cours des années 70, procurant des chroniques de plus de 40 ans. Ces chroniques sont suffisantes pour bien appréhender même les zones où les nappes sont les plus inertielles. Depuis les

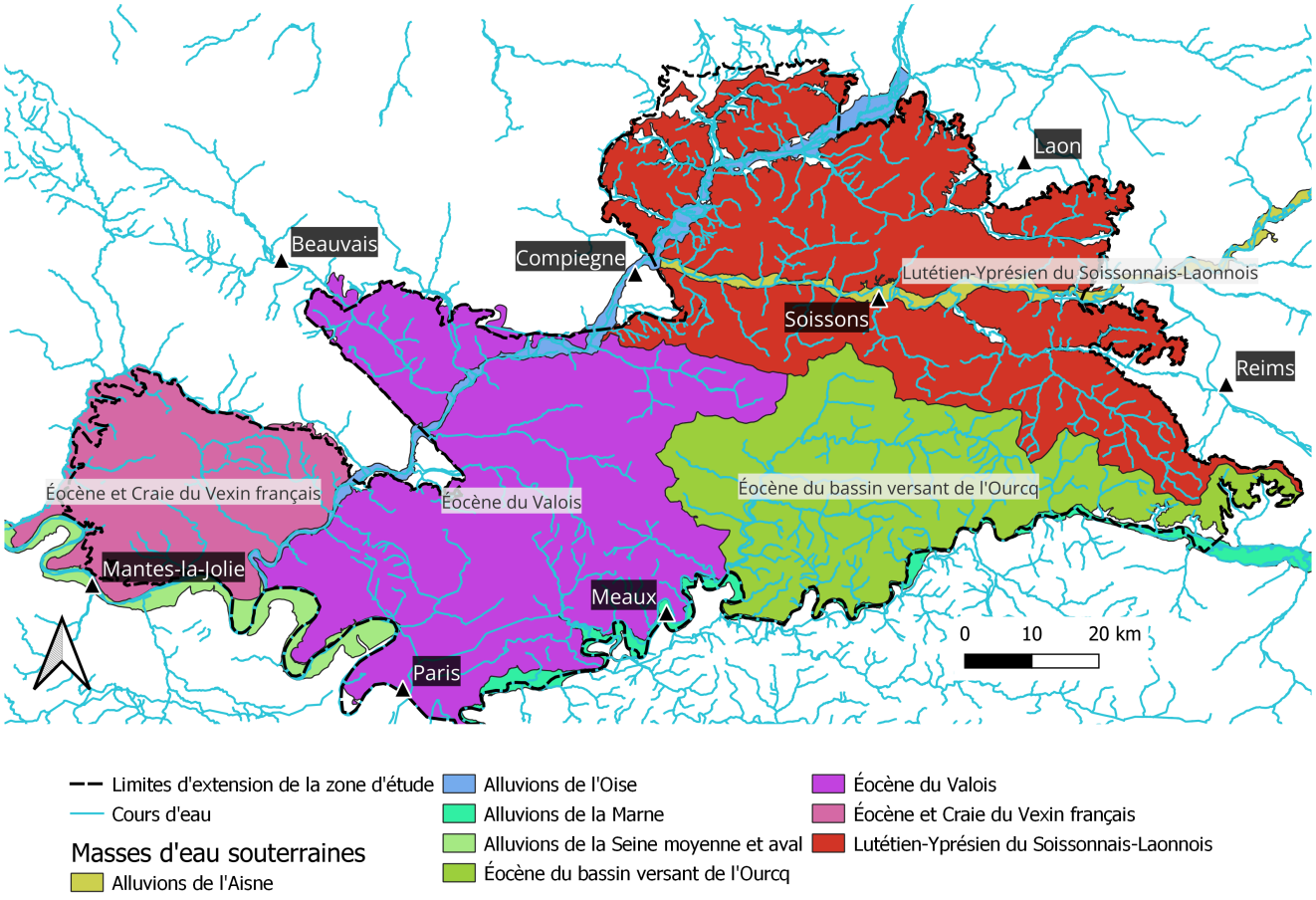


FIGURE 1 – *Masses d'eau souterraines (au sens de la DCE) éocènes dans la partie Nord du bassin parisien, et principaux aquifères alluviaux associés. Source données : BD-Eau, BRGM.*

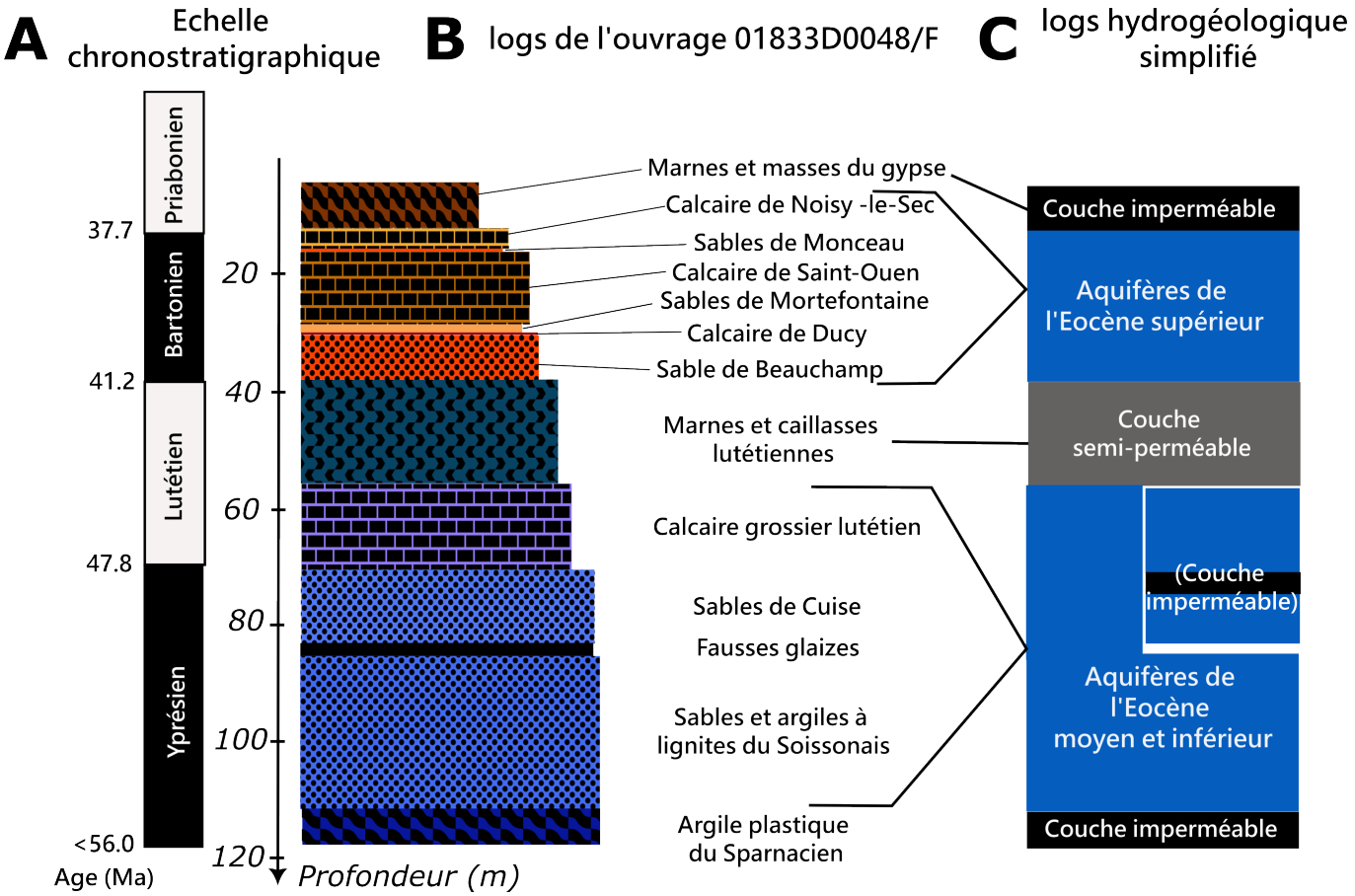


FIGURE 2 – *Structure hydrogéologique verticale de l'Eocène du bassin de Paris.* ***A*** *: Echelle chronostratigraphique de l'Eocène (International Commission on Stratigraphy, 2022). Noter que l'étage de l'Yprésien a été appelé (et est encore appelé dans le bassin de Paris) l'étage du Cuisien.* ***B*** *: représentation graphique du logs géologique observé au niveau de l'ouvrage 01833D0048/F (BRGM / Infoterre). Les profondeurs forées sont notées sur l'axe vertical à gauche.* ***C*** *: Log hydrogéologique simplifié corrélé aux couches décrites en* ***B****, et contruit à partir des Fiches Masses d'Eau Souterraines HG104, HG105, HG106 et HG107 (SIGES Seine Normandie). Au niveau du logs représenté, les argiles de Laon sont absentes, et une couche de fausses glaises traverse les sables de Cuise.*

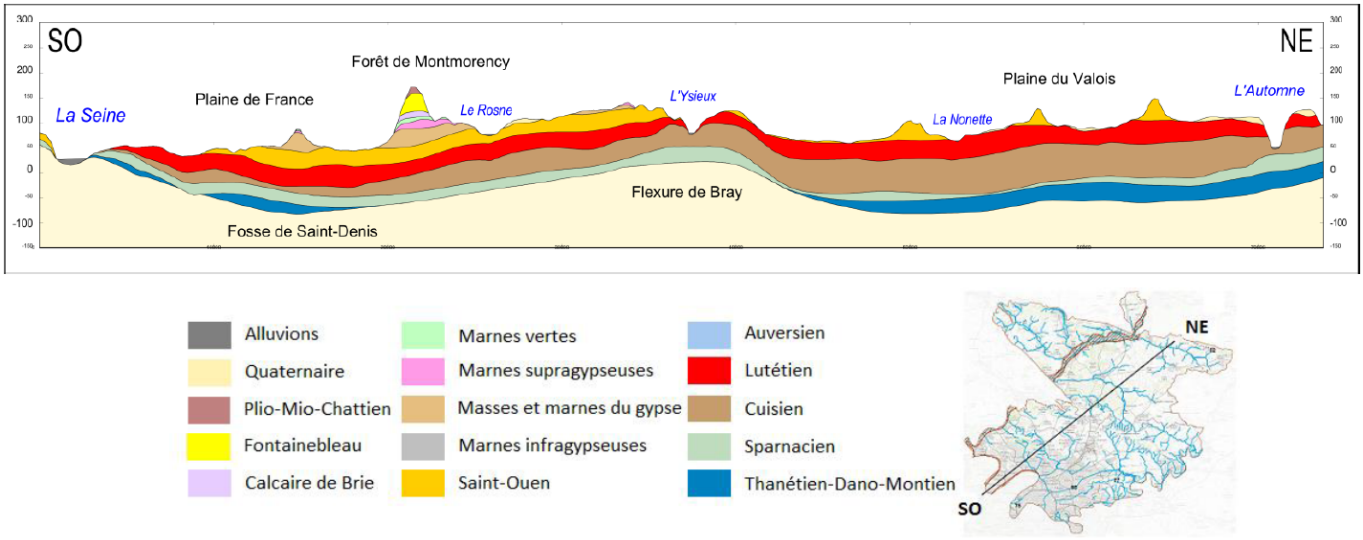


FIGURE 3 – *Coupe géologique Sud-Ouest / Nord-Est au sud de la zone d'étude . Elle montre la structure générale tabulaire, et un léger relèvement des couches du Sud-Ouest vers le Nord-Est (altéré néanmoins par la flexure de Bray). En conséquence, au Sud-Ouest, ce sont les couches du Bartonien qui affleurent majoritairement, avec quelques buttes témoins Oligocènes. Vers le Nord-Est, ce sont les couches du Lutétien-Yprésien qui affleurent majoritairement. Source : Fiche MESO HG104, SIGES Seine Normandie.*

années 2000, de nouvelles stations ont été régulièrement implantées sur le territoire étudié et permettent d'améliorer notre connaissance hydrogéologique. Alors que les mesures pouvaient être espacées de plusieurs semaines, voire mois dans les années 1960 à 1990, l'automatisation a depuis mené à une intensification et à une régularisation du suivi, avec des mesures quotidiennes.

Les stations piézométriques suivant les niveaux de nappe du Lutétien-Yprésien sont recensées en ligne sur le portail national d'Accès aux Données sur les Eaux souterraines (EAU-FRANCE 2024b) et sont localisées Fig. 4-A et en annexe Fig. S-3. Les chroniques piézométriques publiques correspondantes ont été collectées et les graphes sont montrés en annexe (Fig. S-4 et S-5). Les chroniques montrent des cyclicités et des inerties variables, avec 1) des piézomètres pour lesquels la cyclicité principale est une *cyclicité saisonnière* (Fig. 4-B), 2) des piézomètres avec une *cyclicité interannuelle* marquée (5 – 10 ans), montrant une forte inertie (Fig. 4-C), et 3) des piézomètres avec *cyclicités saisonnière et interannuelle* (Fig. 4-D).

Au premier abord, le type de cyclicité ne semble pas seulement contrôlé par la géologie, puisque des piézomètres à forte cyclicité interannuelle peuvent être retrouvés aussi bien dans le sud, où les aquifères du Lutétien-Yprésien sont sous couvert de l'Eocène supérieur, que dans le Nord, où les aquifères sont superficiels (Fig. 4). Sur cette zone géographiquement étendue, le fonctionnement de la nappe semble donc variable à l'échelle locale ( 10 km).

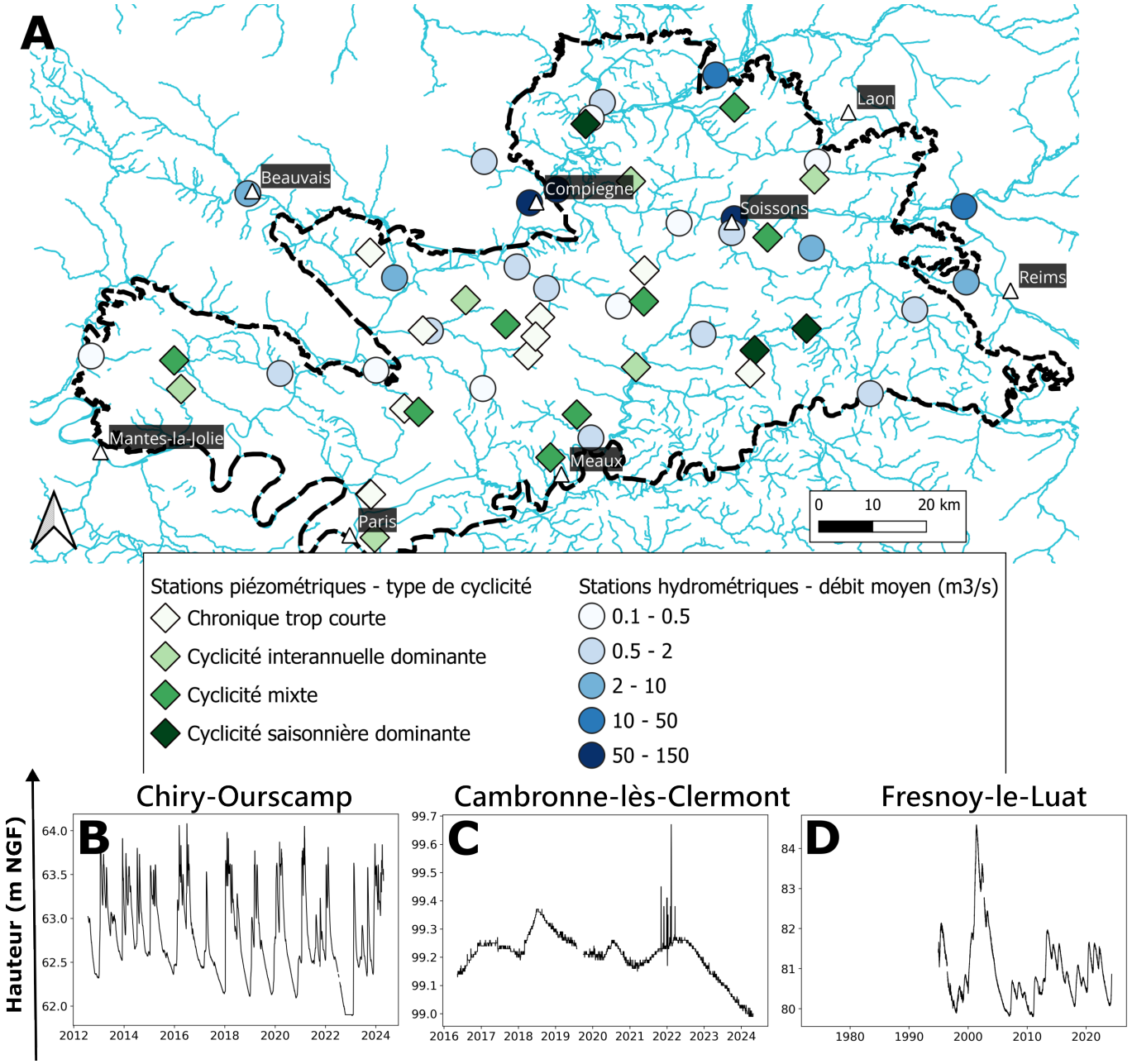


FIGURE 4 – *Réseau d'observation hydrogéologique régional.* ***A*** *: localisation des ouvrages . Les stations hydrométriques mesurant quotidiennement le débit des cours d'eau (stations débitmétriques) sont localisées par des cercles , avec une nuance de bleu indiquant le débit moyen (calculé sur l'ensemble de la chronique). Les stations piézométriques suivant quotidiennement les niveaux de nappe du système aquifère du Lutétien-Yprésien sont localisées par des carrés, avec une nuance de vert indiquant le type de cyclicité observé. Le type de cyclicité n'est pas interprété lorsque la chronique a une durée inférieure à 10 ans.* ***B, C, D*** *: Exemples de chroniques piézométriques avec une cyclicité saisonnière (****B****), interannuelle (****C****) ou mixte (****D****). Sources : ADES, Hydroportail / Eau-France).*

A l'étiage, les cours d'eau dans la zone d'étude sont soutenus par la nappe du Lutétien-Yprésien. Les stations hydrométriques sont localisées Fig. 4-A et en annexe Fig. S-6. Les chroniques correspondantes ont été recensées et collectées depuis le site Hydroportail (EAU-FRANCE 2024a) et les graphes sont fournis en annexe (Fig. S-7 et S-8). Notons que plusieurs stations le long des cours de l'Oise, de la Seine et de la Marne ne sont pas considérées, car le bassin drainé par ces cours d'eau s'étend bien au-delà de la zone d'étude. Certains cours d'eau, en particulier ceux avec les plus faibles débits, montrent une plus grande importance de l'alimentation de la nappe dans leur débit (débit de base plus important ; cf. courbes rouges Fig. S-7 et S-8).

### 1.3 Climat régional

Les données hydroclimatiques dans la zone d'étude ont été obtenues via les résultats de modélisation de la chaîne de modèles Safran – Isba – Modcou, ou SIM (Centre National de la Recherche Météorologique et Centre de Géosciences des Mines ParisTech ; LE MOIGNE et al. (2020)). Les résultats de modélisation de la chaîne SIM, calibrés par les données des stations météorologiques et avec une grille à mailles de 8x8 km, sont mis à disposition du public par Météo France (MÉTÉO FRANCE 2024). Alors que Safran modélise le comportement atmosphérique, Isba modélise les interactions atmosphère – biosphère – sol, et Modcou modélise le réseau hydrologique de surface. Les paramètres hydroclimatiques (précipitation, évapotranspiration potentielle, température, ruissellement, évapotranspiration réelle, recharge des nappes) simulés à un pas de temps quotidien ont été collectés sur l'ensemble de la période 1959 – 2023 dans la zone d'étude. La carte des recharges moyennes annuelles calculées par le modèle est montrée Fig. 5.

### 1.4 Prélèvements

La connaissance des points de forage d'eau et des volumes prélevés dans les aquifères du Lutétien-Yprésien est fondamentale pour réaliser une étude sur l'équilibre quantitatif de ces aquifères. L'Agence de L'Eau Seine Normandie (AESN) a fourni pour cette étude des données de volumes de prélèvement homogènes, annuelles et géolocalisées, renseignant la masse d'eau captée ainsi que l'usage de l'eau. Quelques éléments sont cependant à noter. Premièrement, ces données ne remontent pas avant 2008, une période limitée puisqu'on considère généralement que les modèles hydroclimatiques doivent reposer sur *a minima* 30 ans de données (ARGUEZ et VOSE 2011 ; WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION 2024). Ensuite, elles ne sont pas exhaustives, du fait notamment de l'imprécision sur les volumes d'irrigation et de l'absence d'obligation de déclaration pour les prélèvements inférieurs à 1000 $m^3$ par an. Une erreur, d'ordre de grandeur inconnu et sans doute variable d'année en année, est donc présente. D'autres jeux de données, ceux-ci précisant les

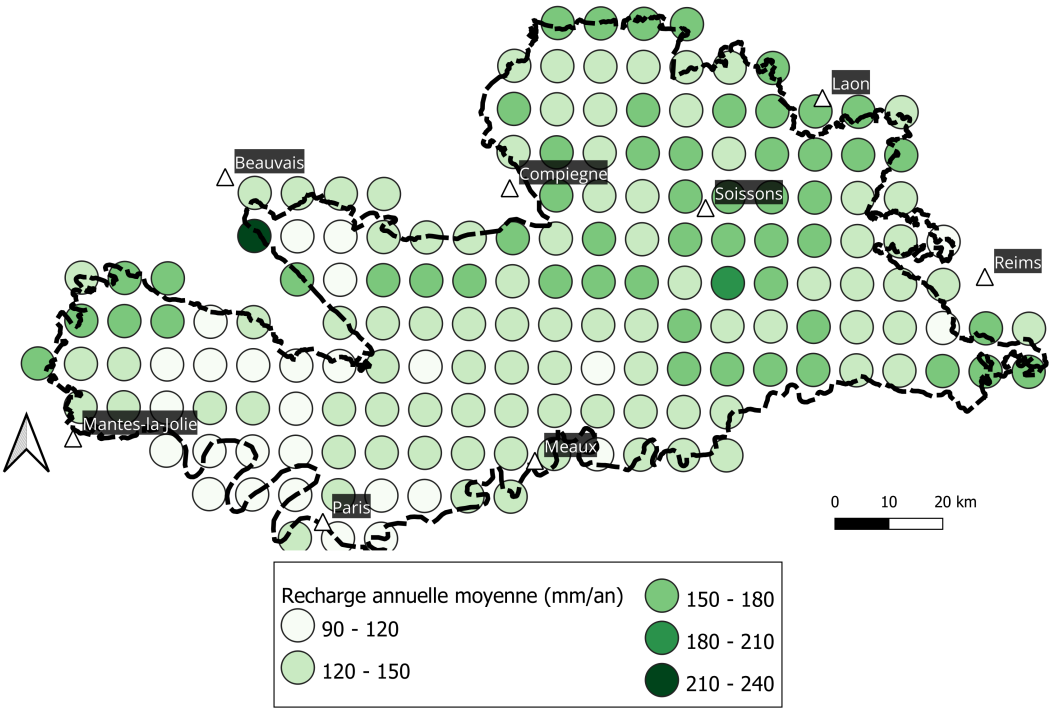


FIGURE 5 – *Recharge annuelle moyenne (1959 – 2023) sur la zone d'étude, en mm/an. Ces valeurs sont obtenues à partir de la chaîne de modèles Safran-Isba-Modcou, avec un maillage de 8x8 km. Sources données : Météo France / data.gouv.fr.*

volumes autorisés, ont été fournis par les DDT de l'Aisne et de l'Oise. Mais le manque d'homogénéité sur la nomenclature des points de forage, ainsi que le manque d'information sur les masses d'eau captées, et la temporalité des prélèvements, empêchent la fusion de ces différents jeux de données. C'est donc le jeu de données de l'AESN qui a été utilisé ici. La carte des points de prélèvements dans le Cuisien, avec le volume annuel moyen associé, est présentée Fig. 6.

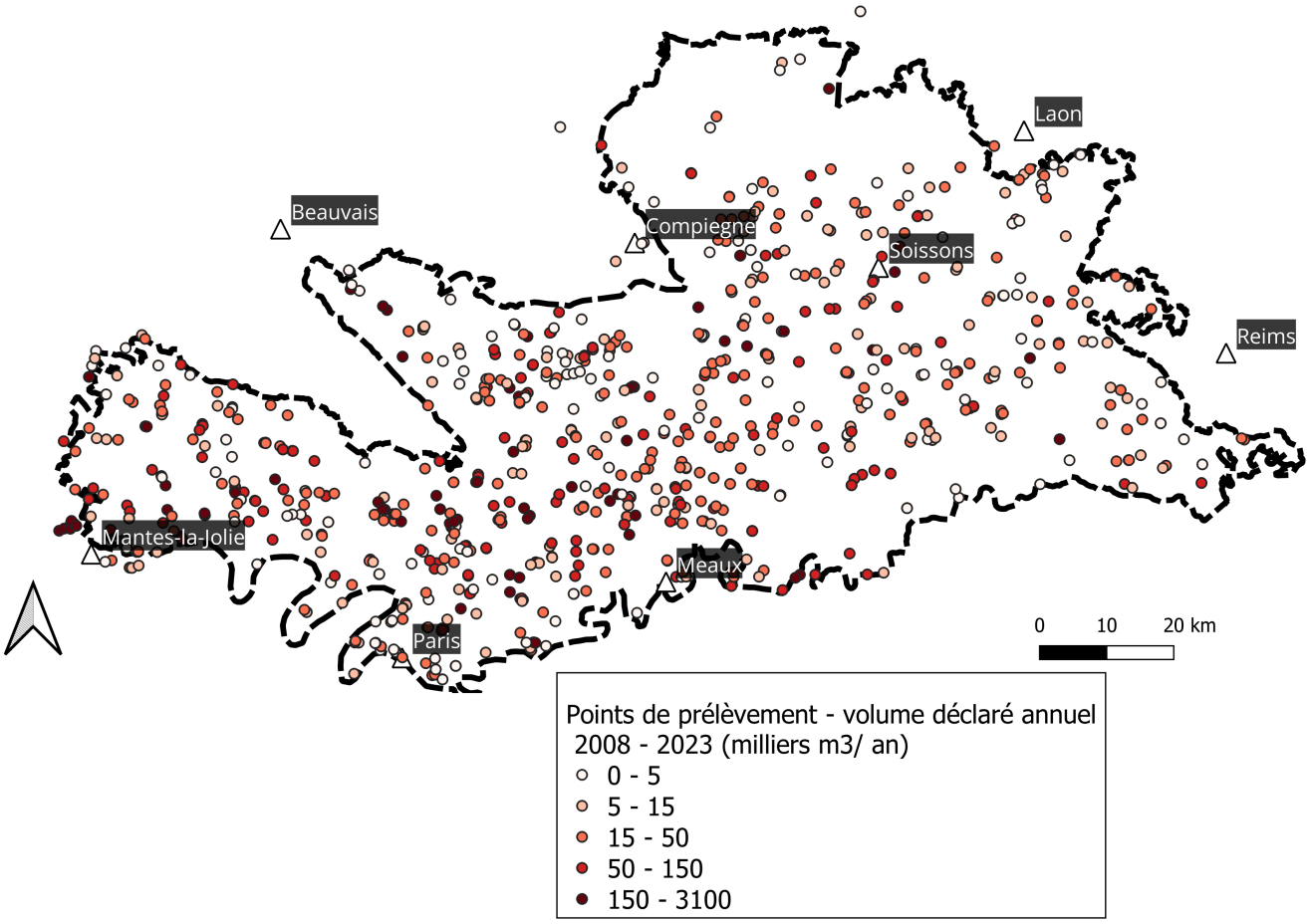


FIGURE 6 – *Carte des points de prélèvement d'eau dans les aquifères du Lutétien-Yprésien déclarés sur la zone d'étude. Source données : Agence de l'Eau Seine-Normandie.*

# 2 Production d'outils graphiques et cartographiques pour les DDT de l'Oise et de l'Aisne

Les DDT sont des services déconcentrés de l'État à l'échelle départementale, compétentes en matière de politiques d'aménagement et de développement durables des territoires. A ce titre elle ont notamment en charge l'instruction et le suivi des demandes de prélèvements d'eau. Ce travail doit amener aux DDT de l'Aisne et de l'Oise des outils d'aide à la décision avec une caution scientifique pour les demandes de nouveaux prélèvements. Ces outils consistent en 1) la cartographie de la pression de prélèvement et 2) la localisation des zones enregistrant des chutes de niveaux de nappe et de débits dans les cours d'eau. Des graphes illustrant l'évolution hydroclimatique et l'évolution des prélèvements sont également fournis pour indication. Ces outils doivent permettre aux DDT de savoir *quelles sont les zones dans lesquelles les demandes de nouveaux prélèvements devraient être considérées avec le plus de prudence.*

## 2.1 Evolution régionale du climat et des prélèvements en eau

Les principaux paramètres hydrologiques (précipitations, évapotranspiration réelle, ruissellement et recharge) montrent une forte variabilité interannuelle (lame d'eau annuelle illustrée par des points Fig. 7). Le lissage (moyenne roulante) décennal ne montre cependant pas de tendance forte (courbes Fig. 7). Cette impression est confirmée par des tests statistiques de Mann-Kendall avec une limite de significativité de 0.05 pour $p$ (KENDALL 1975 ; MANN 1945). Les tests indiquent une absence de tendance significative pour ces paramètres sur la période 1959 – 2023 ( Table S-1 en annexe). Les températures moyennes, *a contrario*, montrent une forte tendance à l'augmentation, tendance significative estimée à 0.033 °C/an.

La Fig. 8-A montre que depuis 2008, les prélèvements en eaux dans les aquifères du Lutétien-Yprésien et recensés par l'AESN au nord de la Seine ne montrent pas d'augmentation significative. On note une baisse conséquente des volumes extraits pour l'Alimentation en Eau Potable entre 2013 et 2014 ; l'origine de cette baisse n'est pas connue. Cependant, elle pourrait provenir d'un changement de nappe d'eau prélevée pour certains gros forages, d'une rénovation des réseaux (menant à une diminution des fuites, mais peu probable pour une baisse aussi importante et rapide) ou encore d'un problème de fiabilité des données. Les volumes pour l'irrigation, qui représentent une portion faible du volume total, mais très variable d'année en année, montrent une tendance générale marquée à l'augmentation. Localement, cependant, ce constat régional cache des situations variées et parfois plus préoccupantes (Fig. 8-B,C,D). Les bassin de l'Automne et de la Nonette, par exemple, subissent globalement une augmentation de prélèvements liée à une expansion marquée de

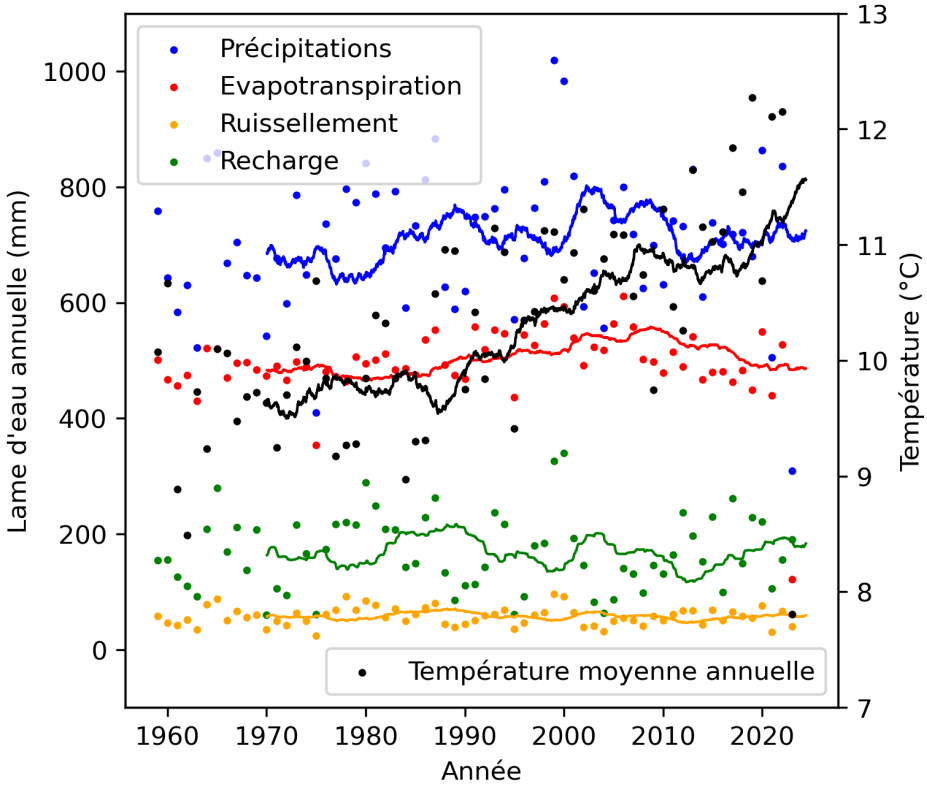


FIGURE 7 – *Evolution des principaux paramètres hydroclimatiques (précipitations, évapotranspiration réelle, ruissellement, recharge et température) sur la période 1959 – 2023. Les différents paramètres, représentés par différentes couleurs, sont exprimés en lame d'eau cumulée annuelle (axe vertical de gauche) excepté pour la température, exprimée en °C (axe vertical de droite). Les points représentent les cumuls annuels bruts (moyenne pour la température), et les lignes représentent un lissage sur 10 ans. Source données : Météo France / data.gouv.fr.*

.

l'irrigation depuis 2014-2015 (Fig. 8-B,C).

## 2.2 Délimitation de nouvelles unités hydrogéologiques

La gestion de l'eau, sur un territoire aussi large que la zone d'étude, requiert fréquemment la délimitation d'unités de gestion. L'unité de gestion doit avoir une cohérence hydrogéologique. Dans l'idéal, un forage d'eau en un point de l'unité affecte les niveaux de nappe seulement dans cette unité ; il ne devrait pas y avoir de flux net entre les unités. Les masses d'eau au sens de la DCE constituent un premier découpage (BRGM 2010). Cependant, leur grande taille atténue l'hétérogénéité et pourrait occulter des déséquilibres locaux. Nous proposons ici deux autres découpages. Le premier est le découpage par petits bassins versants hydrographiques (ci-après nommés simplement "bassins versants"). Les bassins versants ont une cohérence hydrologique évidente pour les eaux de ruissellement. De plus, la topographie est généralement retranscrite – bien qu'atténuée - au niveau de la piézométrie pour les nappes libres. Les lignes de crête topographiques peuvent donc être assimilées, en première approximation, à des lignes de partage des eaux souterraines (donc des frontières à flux nul).

Le deuxième découpage repose sur les discontinuités hydrogéologiques majeures :

— Les grandes crêtes piézométriques mises en évidence par la campagne piézométrique de 2013-2014 (Bault et al. 2015), qui sont autant de grandes lignes de partage des eaux souterraines

— Les incisions par les cours d'eau qui, lorsqu'elles découvrent le mur des aquifères (les argiles du Sparnacien), sont un obstacle aux flux dans la nappe. Elles ont été cartographiées à partir de la BD Charm (BRGM 2019).

— Les nappes alluviales (Aisne, Oise) qui altèrent, là encore, les flux souterrains dans la nappe. Elles ont été localisées à partir du découpage des masses d'eau DCE disponible sur la BSS Eau (BRGM 2010).

Sur la base de ces discontinuités, un ensemble de grandes unités hydrogéologiques, cartographié Fig. 9, est donc proposé.

Ce sont ces deux découpages (grandes unités hydrogéologiques et bassins versants hydrographiques) qui seront utilisés pour cartographier la pression de prélèvement.

## 2.3 Pression sur la ressource en eaux souterraines

La pression sur les eaux souterraines, ou pression de prélèvement, peut être évaluée par le ratio entre les prélèvements et la recharge des nappes dans une unité hydrogéologique au cours d'un pas de temps. En syn-

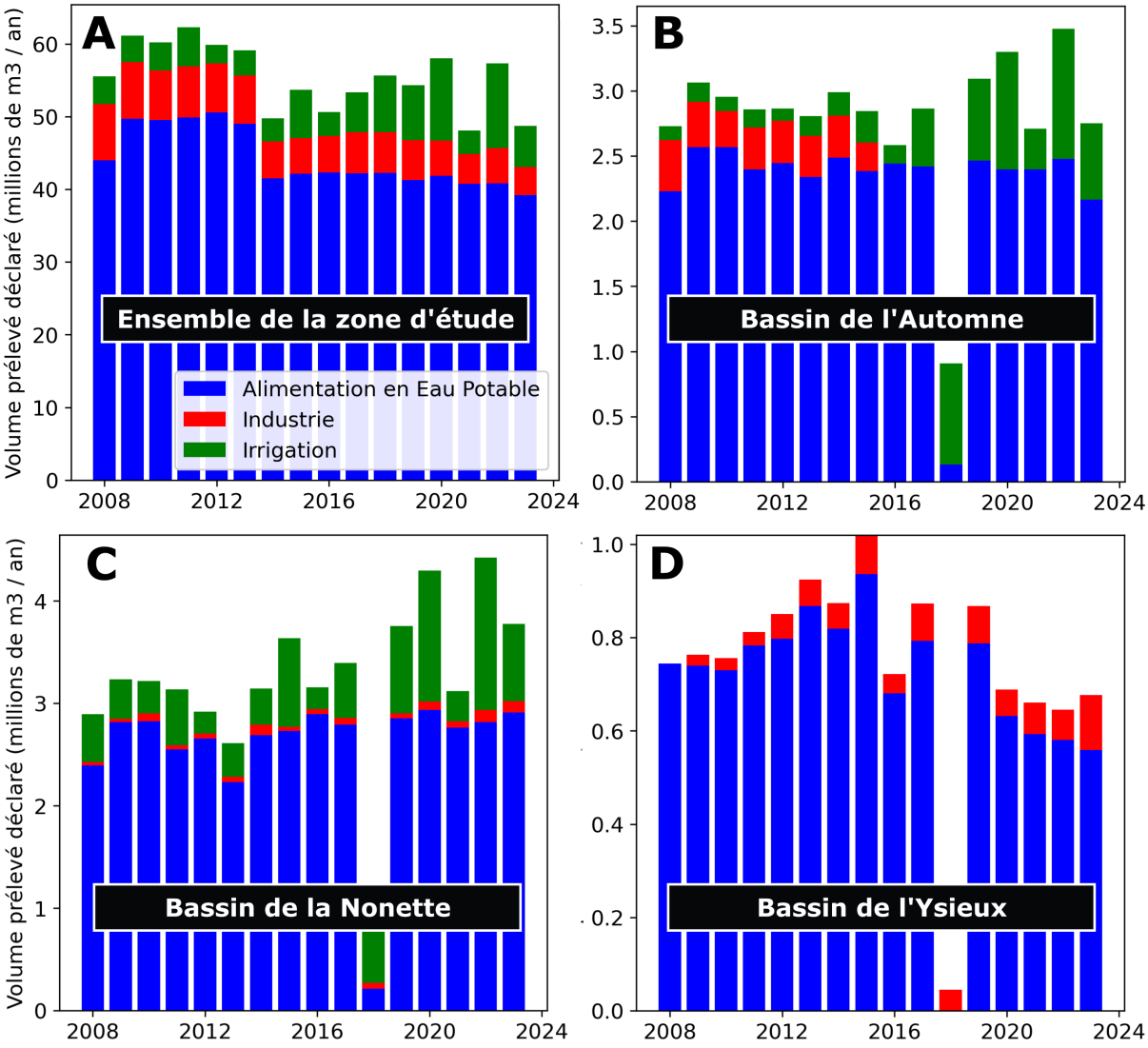


FIGURE 8 – *Evolution des prélèvements annuels déclarés à l'AESN sur la période 2008 – 2023, par usage, sur toute la zone d'étude (**A**) et sur les bassin de l'Automne (**B**), de la Nonette (**C**) et de l'Ysieux (**D**). Seuls les prélèvements dans les aquifères du Lutétien-Yprésien sont considérés.*

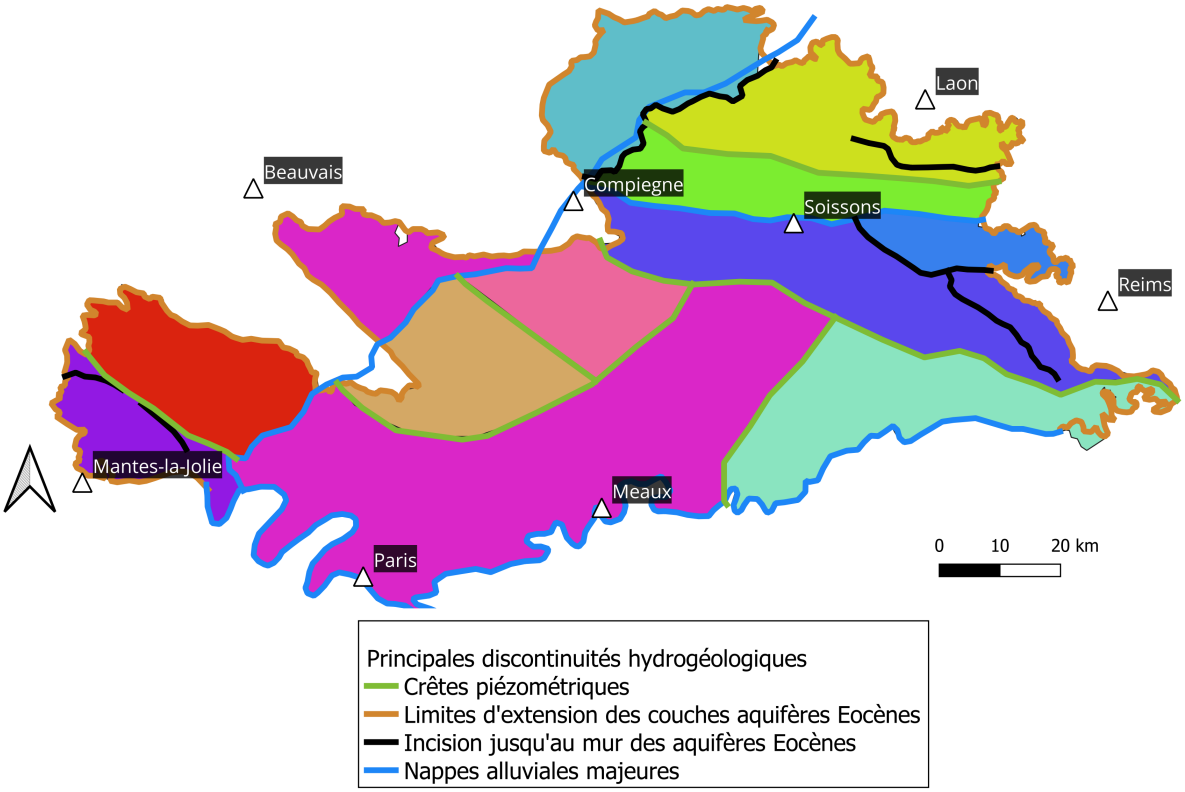


FIGURE 9 – *Découpage en unités hydrogéologiques proposé à partir de la cartographie des principales discontinuités. En vert, les grandes crêtes piézométriques mises en évidence par la cartographie de la piézométrie réalisée en 2013-2014. En brun, limites d'extension latérale de l'Yprésien (Carte harmonisée 1/50000$^e$, BDCharm-50/BRGM). En bleu, nappes alluviales majeures perturbant les flux dans la nappe (BD Eau/BRGM). En noir, incision par des cours d'eau jusqu'au mur des aquifères du Lutétien-Yprésien, rompant la communication latérale dans la nappe (Carte harmonisée 1/50000$^e$).*

thétisant de nombreuses études, ARNAUD (2017) a constaté empiriquement qu'une pression de prélèvement supérieure à 15% dans une masse d'eau souterraine, en contexte d'aquifère libre, conduit à un déséquilibre quantitatif sur le long terme, et des valeurs supérieures à 10% doivent être synonymes de vigilance. Ces valeurs ont été reprises par le guide d'évaluation de l'état des eaux souterraines 2019 (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES, LEQUIEN et GOURCY 2019). Le recensement des zones avec une pression de prélèvement supérieure à 10 ou 15% peut donc constituer une bonne hiérarchisation pour l'instruction de nouveaux prélèvements par les DDT.

Dans le cadre de cette étude, la pression de prélèvement est calculée selon la formule :

$$\frac{V_{pvt,ann}}{H_{rech,ann}S} \quad (1)$$

Avec $V_{pvt,ann}$ ($m^3$) les prélèvements annuels moyens déclarés à l'AESN dans les aquifères du Lutétien-Yprésien dans l'unité considérée entre 2008 et 2023, $H_{rech,ann}$ (m) la lame d'eau de recharge annuelle moyenne dans l'unité sur la période 1959 - 2023 calculée par SIM, et $S$ ($m^2$) la surface de l'unité.

Notons que l'absence de tendance significative pour l'évolution de la recharge sur cette période nous affranchit du risque de biais tendanciel dans le calcul de la moyenne. Pour indication, les cartes de la recharge moyenne et des volumes de prélèvements par bassin versant sont fournies en annexe Fig. S-9 et S-10.

La carte des pressions de prélèvement par bassin versant (Fig. 10) montre une pression plus importante dans les zones de forte population (plaine de France et sud du Vexin, avec des pressions entre 15 et 30% ) et les zones d'irrigation (plaine de Meaux, vallée de l'Oise). Le bassin de l'Ourcq et les unités au nord de l'Aisne montrent des pressions de prélèvement beaucoup plus faibles sur le Lutétien-Yprésien, inférieures à 5%.

La carte des pressions de prélèvement dans les grandes unités hydrogéologiques (Fig. 11) montre généralement une augmentation de la pression du Nord-Est (avec une recharge moyenne plus importante et des prélèvements plus bas) au Sud-Ouest. Cependant, les contrastes sont atténués à l'échelle de ces grandes unités, et seul le sud du Vexin montre une pression de prélèvement supérieure à 10%. En gardant en tête les valeurs empiriques de 10 et 15%, le choix de l'unité hydrogéologique (bassin versant ou grande unité) va donc être important pour les décisions concernant les instructions de nouveaux prélèvements.

### 2.4 Tendances statistiques sur les chroniques piézométriques et débitmétriques

La tendance d'évolution des niveaux de nappe ou des débits dans les cours d'eau représente un indicateur empirique crucial de l'équilibre quantitatif local des nappes. Des tests de Mann-Kendall avec une limite de

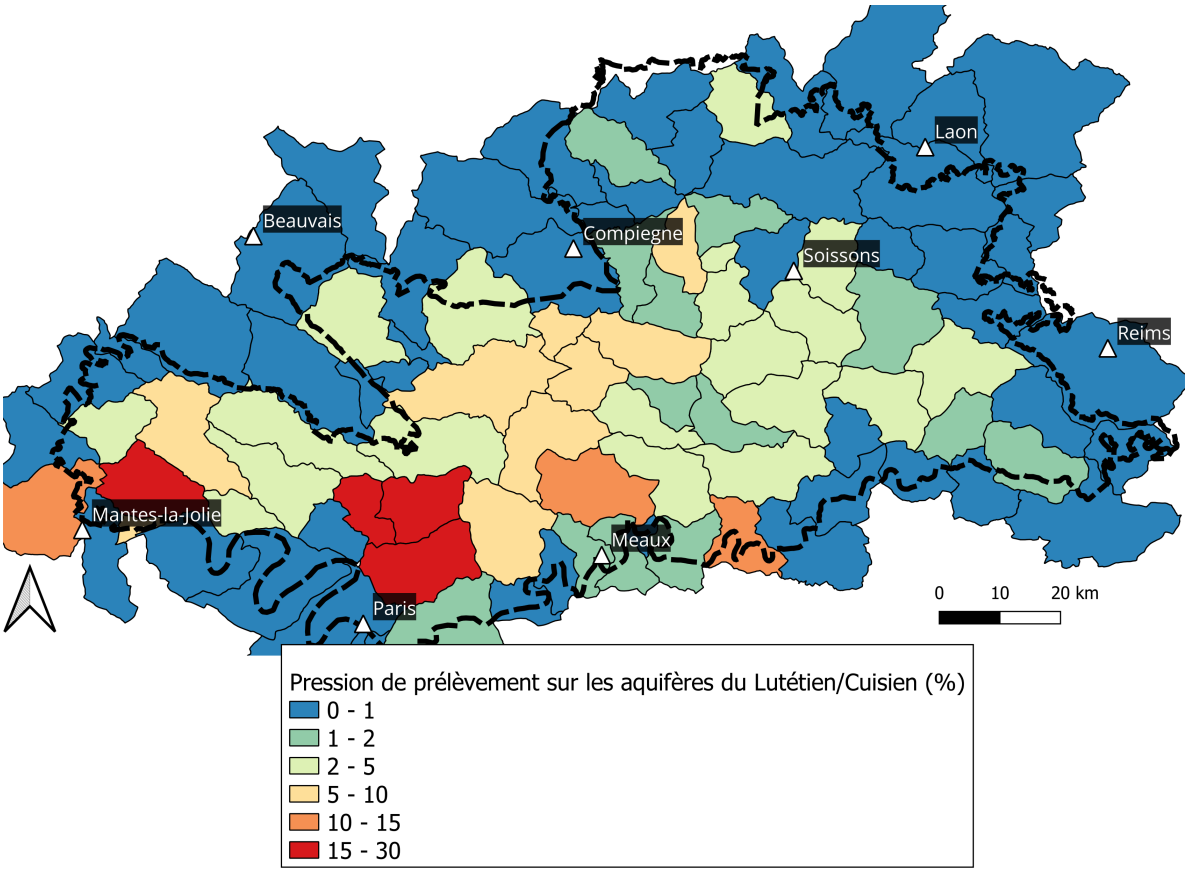


FIGURE 10 – *Pression de prélèvement dans les aquifères du Lutétien-Yprésien calculée par bassin versant. Les prélèvements annuels moyens (période 2008 – 1959) par bassin versant sont rapportés au volume de recharge annuel moyen dans le bassin versant (période 1959 – 2023 ; pas de variation significative détectée pour la recharge sur cette période, cf. paragraphe précédent).*

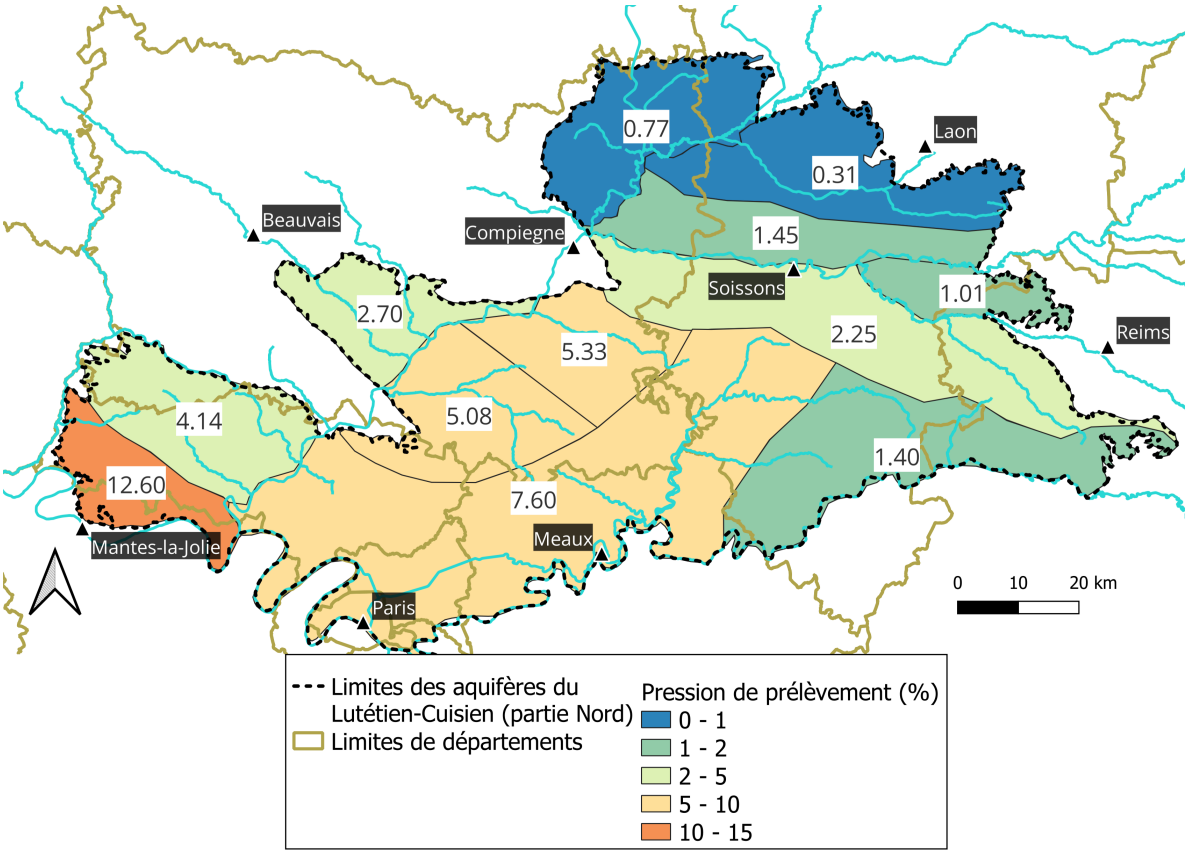


FIGURE 11 – *Pression de prélèvement dans les aquifères du Lutétien-Yprésien calculée par grande unité hydrogéologique. Les prélèvements annuels moyens (période 2008 – 1959) par unité sont rapportés au volume de recharge annuel moyen dans l'unité (période 1959 – 2023).*

significativité à $p = 0.05$ ont été réalisés pour évaluer l'existence de tendances statistiquement significatives pour les niveaux de nappe et les débits. Pour les chroniques piézométriques, les tests sont réalisés sur les moyennes annuelles – ligne verte Fig. 12. Pour les chroniques débitmétriques, ce sont les débits à l'étiage qui sont principalement soutenus par les nappes ; dans le contexte de cette étude, les tests sont donc réalisés sur les premiers déciles annuels des chroniques (considérés comme une approximation des débits d'étiage) - ligne rouge Fig. 12.

Pour chaque chronique, et pour s'assurer de la rigueur des comparaisons, les tests ont été menés sur les mêmes intervalles de temps (si disponibles selon la chronique) : 1980 – 2022, 1990 – 2022, et 2000 – 2022. Les résultats de ces tests statistiques sont compilés dans les tables S-2 et S-3 en annexe. Les tests sur la période 2000 – 2022 sont cartographiés Fig. 13.

Les cartes obtenues montrent généralement très peu de chroniques (débits ou niveaux de nappe) avec une hausse significative. Les chroniques montrant une baisse ou une absence de tendance dominent régionalement. L'amplitude de ces baisses peut être assez élevée, avec des chutes du débit d'étiage interprétées par les tests de Mann-Kendall autour de 1-3 % par an, et des chutes du niveau piézométrique de 1-10 cm/an. L'ampleur des baisses annuelles interprétées augmente pour des périodes testées plus récentes (par exemple des chroniques 1970 – 2022 à 2000 – 2022), indiquant des baisses qui s'accélèrent depuis 1970. La confluence de l'Aisne et de l'Oise semble particulièrement affectée par la baisse des niveaux de nappe et des débits (Fig. 13). Cette zone devrait donc faire l'objet d'une attention toute particulière lors des instructions de dossiers pour des nouveaux prélèvements.

## 2.5 Communication des livrables aux DDT

Les livrables qui ont été fournis aux DDT sont les suivants :

— Cartes des pressions de prélèvement.

— Cartes de tendances statistiques des chroniques de débits et de niveaux de nappe pour les périodes 1980-2023, 1990-2023 et 2000-2023.

— Cartes combinant les pressions de prélèvement et les tendances statistiques.

— Couches SIG principales produites pour la cartographie

— Descriptifs des couches SIG produites et des cartes

Les livrables ont été présentés par le stagiaire au cours de réunions à des agents des DDT de l'Oise et de l'Aisne pour faciliter leur compréhension et accélérer leur prise en main. Le travail a également été présenté

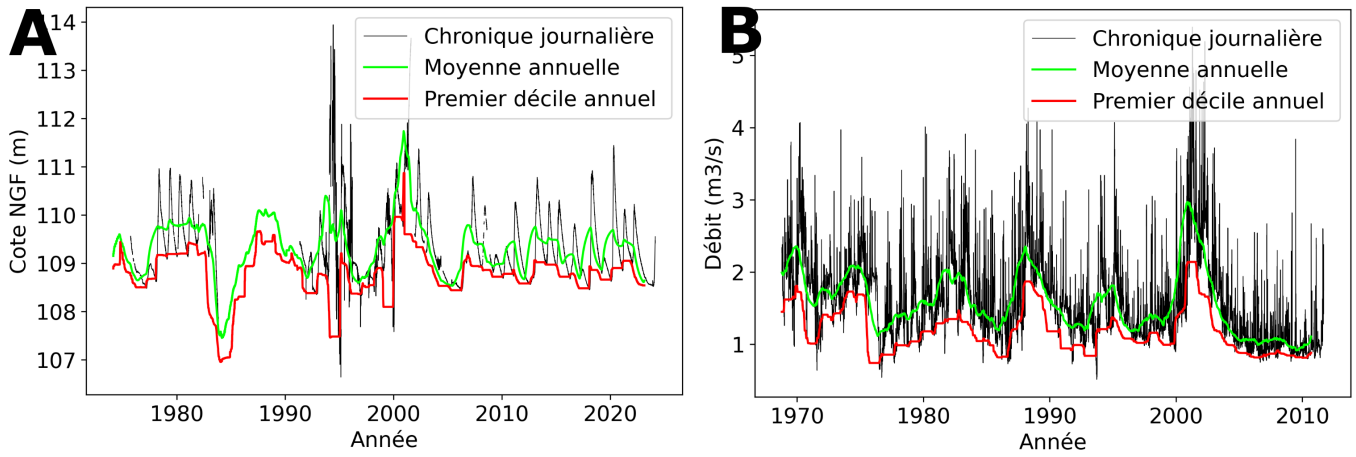


FIGURE 12 – *Deux exemples de chronique piézométrique (**A**, station d'Armentières-sur-Ourcq) et hydrométrique (**B**, station de Ver-sur-Launette, mesurant le débit de la Launette) illustrant les séries sur lesquelles les tests de tendance significative sont menées. En noir, données quotidiennes. En vert, moyenne roulante annuelle, utilisée pour le test de tendance sur la chronique piézométrique. En rouge, premier décile roulant annuel, utilisé pour le test de tendance sur la chronique hydrométrique.*

par le stagiaire à l'Agence Régionale de Santé et à l'Autorité Environnementale (DREAL Hauts-de-France).

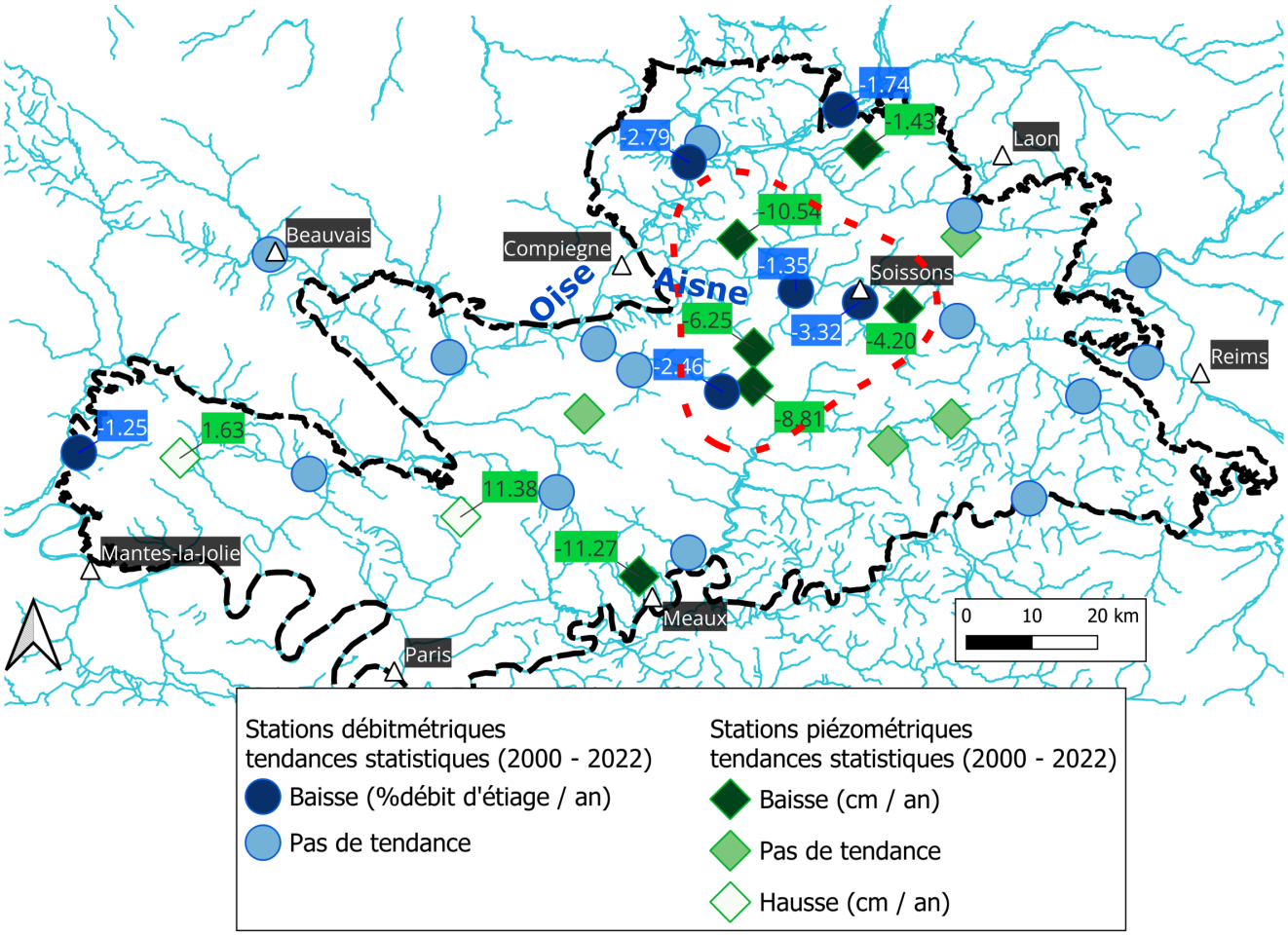


FIGURE 13 – *Tendances statistiques des niveaux de nappe (stations piézométriques) et des débits d'étiage dans les cours d'eau (stations débitmétriques) sur la période 2000 – 2022. Pour les stations montrant une tendance significative à la hausse ou à la baisse, une étiquette (fond vert pour les niveaux de nappe, fond bleu pour les débits de cours d'eau) indique la tendance calculée par le test de Mann-Kendall (en % du débit d'étiage/an pour les cours d'eau et en cm/an pour les nappes). Toutes les stations dans la zone délimitée par la ligne tiretée rouge enregistrent une baisse significative entre 2000 et 2022.*

# 3 Préparation des futures Etudes de Volumes Prélevables

## 3.1 Cadre théorique

La gestion quantitative raisonnée de la nappe des sables de Cuise va reposer sur des démarches "Volumes Prélevables" qui seront portées par des gouvernances locales comme des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux. La démarche générale qui doit être suivie par les EVP est fixée par l'instruction ministérielle du 14 Décembre 2023 (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES, BÉCHU et EL HAÏRY 2023). Cet arrêté s'appuie sur un rapport de synthèse du BRGM (ARNAUD 2016), indiquant que les démarches EVP doivent comporter :

1. Une définition des objectifs environnementaux (niveaux de nappe permettant le maintien des zones humides ou le maintien de débits minimum biologiques à l'étiage)
2. Un inventaire des prélèvements et rejets anthropiques
3. Une caractérisation hydrogéologique du système
4. Une définition des indicateurs de gestion (les grandeurs à suivre - mesures de stations piézométriques ou débitmètres - et leurs valeurs-seuils pour déclencher des mesures de réduction de prélèvements)
5. une définition des volumes prélevables ; généralement, des volumes mensuels sont préconisés

La modélisation hydrogéologique du système est un aspect central dans les EVP. Dans un contexte de changement climatique de plus en plus marqué, et avec l'augmentation générale des besoins en irrigation, cette modélisation doit avoir un aspect prédictif : elle doit pouvoir prévoir les variations de niveau de nappe dues à un changement de climat ou de prélèvements. Au cours de ce stage, deux modèles hydrogéologiques sont appliqués dans la nappe des sables de Cuise, mettant en évidence leurs avantages respectifs et plusieurs points de vigilance cruciaux.

## 3.2 Modélisation par bilan de flux simple

Nous testons dans cette partie le potentiel d'un modèle par bilan de flux simple pour modéliser les variations de niveau de nappe lors de futures EVP.

### 3.2.1 Méthodologie

Une approche par bilan de flux simple prend en compte les flux connus en entrée et en sortie d'une unité hydrogéologique et évalue si ces flux permettent de reproduire la variation de piézométrie dans cette unité. Dans cette approche, on fait l'hypothèse que les unités considérées sont idéales et qu'il n'existe pas de transferts latéraux souterrains avec les autres unités. Si les variations sont mal reproduites (par exemple si les flux entrants sont plus importants que les flux sortants, mais que la piézométrie ne montre pas de tendance à la baisse sur le long terme) cette approche met en évidence des problèmes de connaissance sur les flux. Cela peut provenir d'échanges souterrains avec d'autres unités (la définition des unités peut alors être à revoir), de flux non-négligeables dans les nappes alluviales, ou encore de problèmes de mesures.

Le principe de l'approche adoptée est présenté Fig. 14. Les flux considérés sont, en entrée, la recharge, et en sortie, les débits à l'exutoire de l'unité (corrigés du ruissellement) et les prélèvements. L'approche a été testée sur le bassin de l'Automne entre 2008 et 2023, avec :

— Les données de recharge et de ruissellement quotidiens (données SIM, moyenne spatiale sur le bassin)
— Les données de débit moyen quotidien mesurées proche de l'exutoire du bassin (station de Saintines)
— Les données de prélèvement AESN dans le bassin transformées en chroniques quotidiennes virtuelles, en faisant les hypothèses 1) d'une répartition annuelle homogène des prélèvements pour l'AEP et l'industrie et 2) d'une répartition des prélèvements pour l'irrigation sur la période Mai – Août.

La variation de lame d'eau quotidienne $dH_{quot}$ peut être calculée selon la formule suivante :

$$dH_{quot} = h_{rech,quot} - (Q_{exutoire}\Delta t - h_{ruiss,quot}) - \frac{V_{pvt,quot}}{S} \tag{2}$$

Avec $h_{rech,quot}$ (m) la lame d'eau de recharge quotidienne, $Q_{exutoire}$ ($m^3/s$) le débit quotidien moyen mesuré à l'exutoire du bassin, $\Delta t$ (s) l'intervalle de temps (quotidien), $V_{pvt,quot}$ ($m^3$) le volume de prélèvements quotidiens et $S$ ($m^2$) la surface du bassin.

Cette lame d'eau simulée peut ensuite être convertie en une variation de piézométrie en considérant une porosité de l'aquifère $s$ :

$$dP_{quot} = \frac{1}{s} dH_{quot} \tag{3}$$

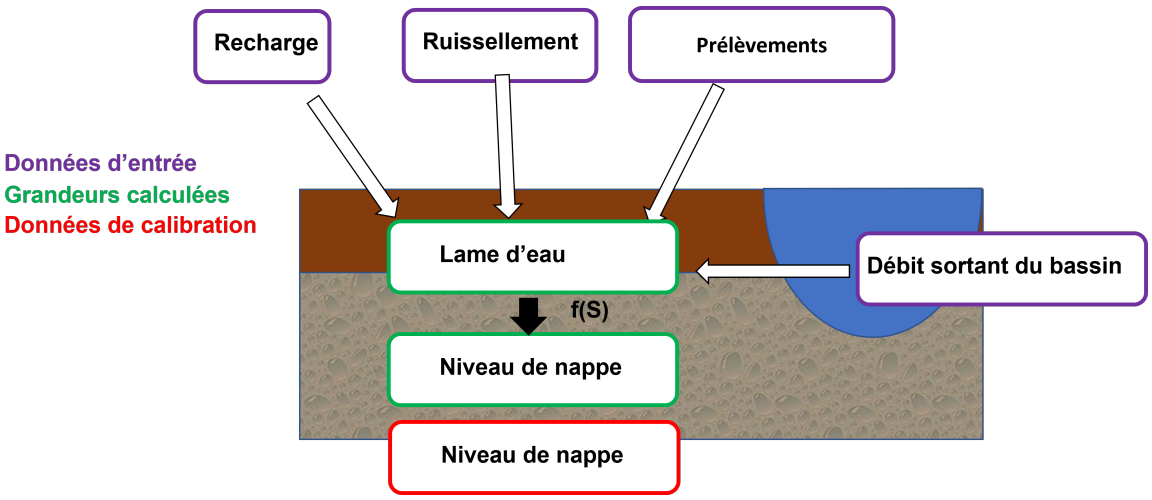


FIGURE 14 – *Principe de l'approche de modélisation de la piézométrie par bilan de flux simple. A partir des données de recharge et du débit sortant du bassin, corrigé du ruissellement, la variation de lame d'eau dans une unité hydrogéologique est calculée. En introduisant un coefficient de porosité, cette variation est convertie en un niveau de nappe simulé qui peut être comparé au niveau de nappe réel. Les données de prélèvement peuvent aussi être ajoutées comme flux sortants.*

### 3.2.2 Résultats

Les résultats de l'approche par bilan simple sur le bassin de l'Automne sont illustrés Fig. 15.

Les variations de lame d'eau dues à la recharge (courbe verte Fig. 15) et au débit sortant corrigé (courbe bleue) sont bien plus importantes que les variations de lame d'eau dues aux prélèvements (courbe rouge). En considérant une porosité théorique de 10%, on voit que les variations de piézométrie simulées par ce modèle suivent généralement les variations mesurées.

### 3.2.3 Discussion

Appliqué au bassin versant de l'Automne, le modèle de bilan simple peut généralement reproduire les variations piézométriques. Cependant, deux écueils majeurs doivent être pris en compte :

— Seul un bassin a été testé. Les capacités de ce type de modèle à reproduire les variations piézométriques devraient être testées sur d'autres bassins, et notamment des sous-bassins et/ou des bassins traversés par des nappes alluviales.

— Les variations piézométriques ne sont pas reproduites finement ; il est probable que ce type de modèle, au-delà de sa simplicité et de sa robustesse conceptuelle, n'ait pas un potentiel prédictif suffisant pour déterminer des volumes prélevables.

Cette étude indique qu'un modèle de bilan de flux simple pourrait être utilisé pour une EVP dans des cas

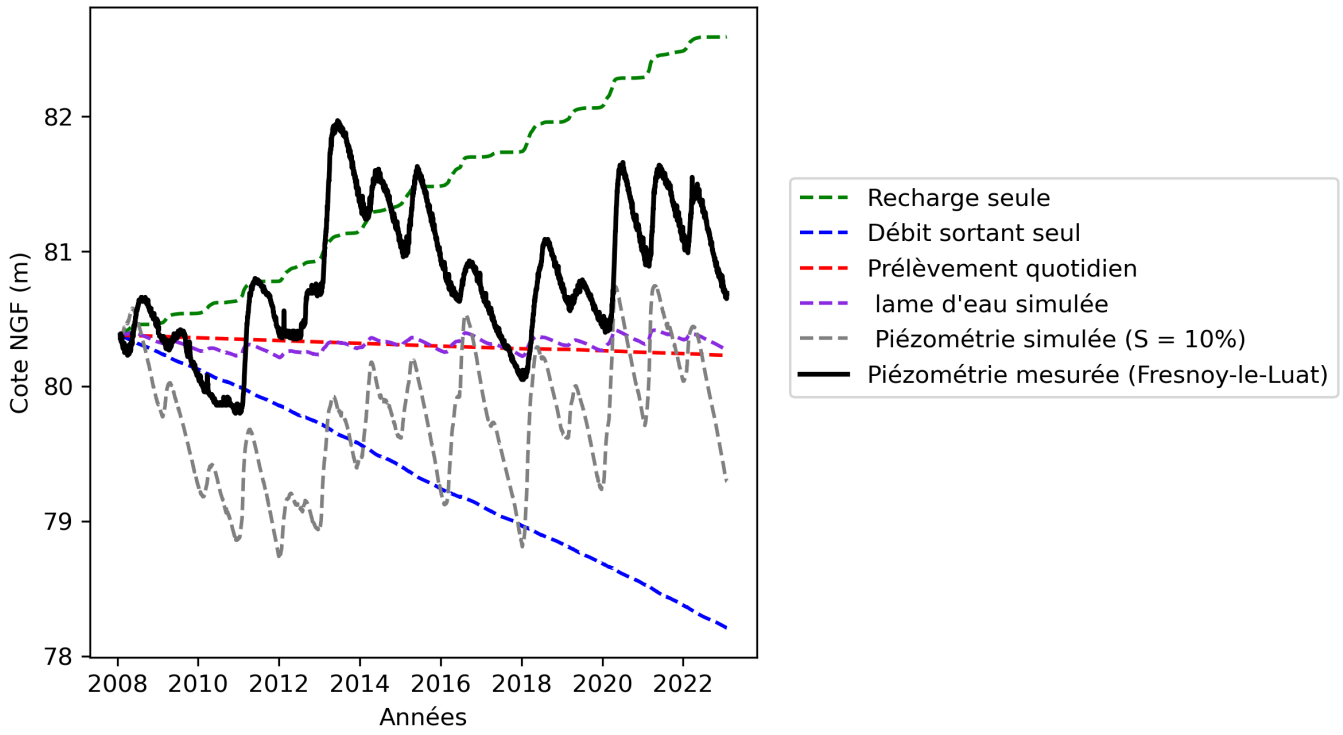


FIGURE 15 – *Modélisation de la piézométrie par bilan entrées – sorties sur le bassin versant de l'Automne. L'évolution de la lame d'eau souterraine dans le bassin due respectivement à la recharge, au débit sortant corrigé et aux prélèvements est montrée en vert, bleu et rouge. La variation de lame d'eau totale (somme de ces trois composantes) est montrée en violet. Cette variation est convertie en piézométrie simulée en faisant l'hypothèse d'une porosité totale de 10%, et peut être comparée avec la piézométrie réelle mesurée à Fresnoy-le-Luat.*

idéaux, avec des contextes hydrogéologiques simples pour lesquels tous les flux peuvent être mesurés. Dans ces cas idéaux, un tel modèle pourrait avoir une capacité prédictive suffisante pour une EVP. Cependant, dans la majorité des cas et plus précisément pour les unités hydrogéologiques du Lutétien-Yprésien, des modèles plus complexes devront être utilisés.

## 3.3 Modélisation par le logiciel Gardenia

Le modèle Gardenia a été développé par le BRGM, et il a été utilisé précédemment pour des démarches Volumes Prélevables (voir par exemple COMPÈRE et THINON-LARMINACH (2021)). Pour ce stage, il a été conseillé par le bureau régional Hauts-de-France du BRGM lors de réunions et il a été testé en plusieurs secteurs du territoire étudié.

### 3.3.1 Méthodologie

Le fonctionnement général de Gardenia est illustré Fig. 16. Dans ce modèle global, qui a été conçu pour être utilisé sur un bassin versant, les paramètres d'entrée (précipitations, évapotranspiration potentielle, prélèvements) sont convertis en un niveau de nappe simulé grâce à des fonctions de transfert (THIÉRY 2014). En prenant en compte ce niveau de nappe simulé et les données d'entrée, un débit à l'exutoire est simulé. Ces fonctions reposent sur des phénomènes physiques ; Gardenia n'est donc pas un modèle de type Machine Learning pur, et certains des flux modélisés (par exemple, le flux percolant à la base de la zone non-saturée) ont pu être validés expérimentalement (THIÉRY 2014). Les fonctions de transfert utilisent des paramètres qui peuvent être soit fournis par l'utilisateur, soit varient entre des bornes (ce sont les paramètres calibrés). Au cours de la calibration, le modèle modifie la valeur des paramètres calibrés pour diminuer l'écart entre les niveaux de nappe / débits simulés et les niveaux de nappe / débits mesurés. Le modèle utilise le coefficient de Nash (NASH et SUTCLIFFE 1970) comme métrique de la qualité de l'ajustement. La moyenne des coefficients de Nash pour les deux chroniques, débits et nappes, est utilisée lorsque les deux séries sont fournies.

L'avantage de Gardenia par rapport à un modèle de bilan simple est sa plus grande souplesse, puisqu'un grand nombre de paramètres peuvent être calibrés, incluant des paramètres inertiels (temps caractéristique de percolation, temps caractéristique de vidange), mais aussi la réserve utile du sol, la proportion de ruissellement, la porosité, et un facteur d'apport souterrain externe. Cette souplesse permet généralement à Gardenia d'obtenir des simulations proches des données à partir de fonctions à base physique.

Gardenia peut aussi être appliqué lorsque les données de niveaux de nappe ou de débits de rivière sont

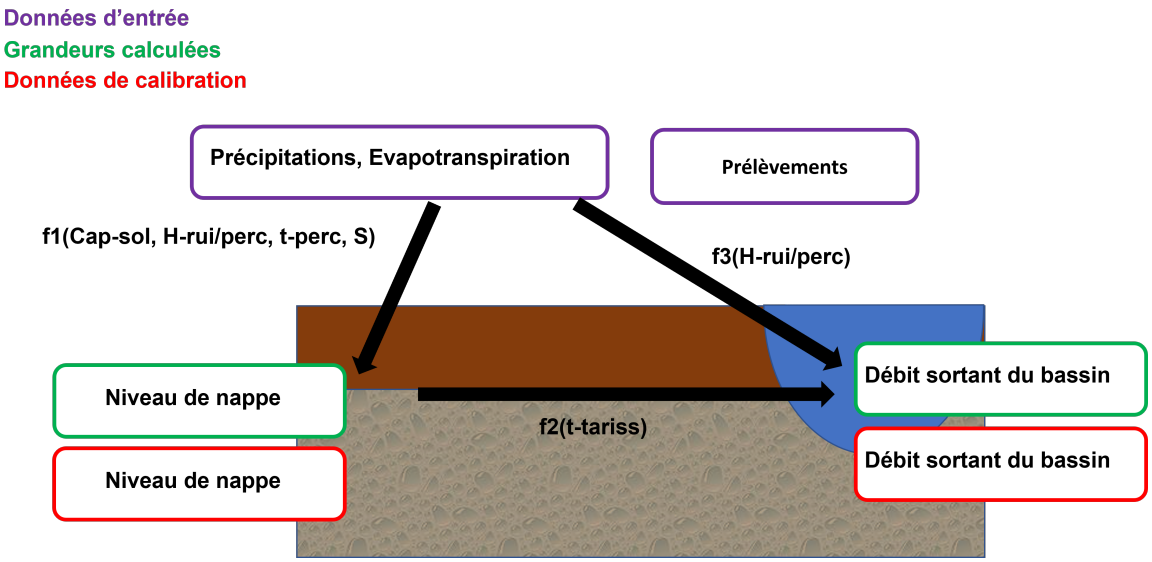


FIGURE 16 – *Principe général du modèle Gardenia, conçu pour un bassin versant. Les données d'entrée sont converties en niveaux de nappe et en débits sortants simulés par des fonctions de transfert à base physique. Noter la présence dans le modèle d'un réservoir « sol », non illustré ici. Les paramètres des fonctions de transfert sont ajustés pour minimiser l'écart entre les grandeurs calculées et les données de calibration. Cap-sol : réserve utile du sol ; H-rui-perc : seuil de hauteur d'eau précipitée pour laquelle le ruissellement est équivalent à la percolation ; t-perc : temps caractéristique de percolation depuis le réservoir sol vers la nappe ; S : coefficient d'emmagasinement de l'aquifère ; t-tariss : temps caractéristique de vidange des nappes vers les cours d'eau.*

absentes. Cependant, la combinaison des deux types de données est conseillée par les concepteurs pour la calibration car considérée comme plus robuste. De plus, seules les chroniques piézométriques montrant une cyclicité saisonnière permettent d'obtenir une bonne calibration par Gardenia (échanges avec M. Parmentier, hydrogéologue au BRGM).

Dans le cadre de ce stage, nous avons recensé l'ensemble des bassins pour lesquels 1) des données piézométriques à cyclicité saisonnière ou mixte étaient disponibles, dans le bassin ou à proximité et 2) des données de débits à l'exutoire du bassin sont disponibles, sur une période concomitante à la période de suivi piézométrique. Les résultats de ce recensement sont montrés Fig. 17.

Pour chacun de ces bassins, Gardenia a été appliqué avec différentes modifications, décrites Table 1. La qualité de la calibration est évaluée dans le modèle par le critère de Nash calculé sur la série des niveaux de nappe.

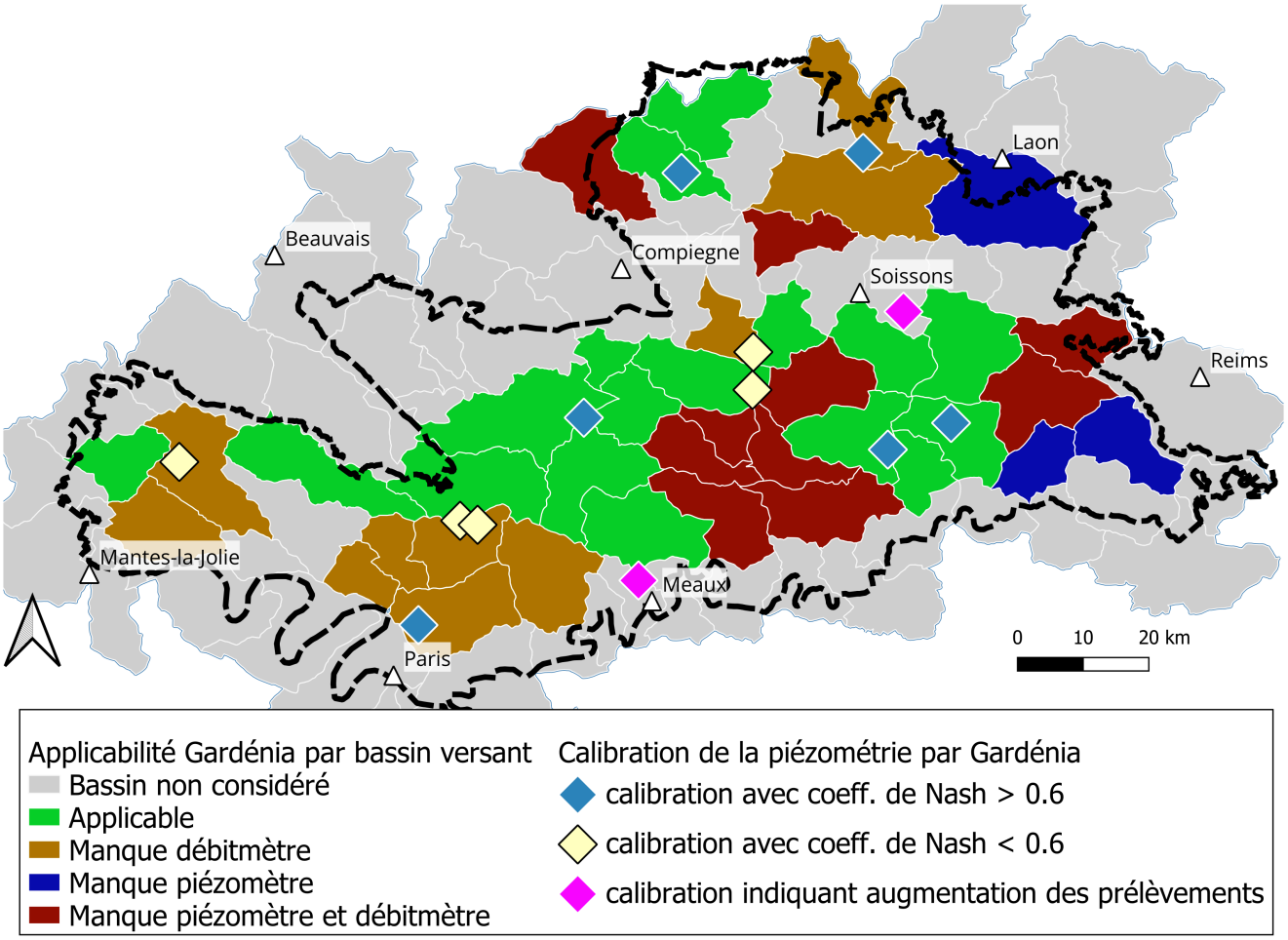


FIGURE 17 – *Applicabilité du modèle Gardenia dans la zone d'étude et résultats obtenus pour les différents piézomètres avec la version V0 du modèle (cf. Table 1 pour une descriptions des versions). Seuls les piézomètres montrant une cyclicité saisonnière ou mixte, prérequis à l'utilisation pour une calibration Gardenia, sont localisés. Les bassins versants sur lesquels une calibration double piézomètre/débitmètre est possible sont colorés en vert. Les bassins pour lesquels une calibration double n'est pas possible sont colorés en brun, bleu et pourpre. Avec la version V0 du modèle Gardenia, une calibration avec un coefficient de Nash supérieur à 0.6 a été atteinte pour les piézomètres en bleu. Un coefficient inférieur à 0.6 a été atteint pour les piézomètres en beige. Les deux piézomètres en rose montrent une amélioration de la qualité de calibration lorsque seule la première ou la deuxième moitié de la chronique sont considérées ; l'hypothèse explicative la plus parcimonieuse pour cette amélioration est une augmentation de prélèvements entre les deux parties de chronique.*

| Nom modèle | Calibration | Période | Prélèvements ? | Bornes | Echange souterrain |
|---|---|---|---|---|---|
| V1 | Nappe et débits | Tout | Non | Par défaut | Non |
| V2 | Nappe et débits | Tout | Non | Par défaut | **Oui** |
| V3 | Nappe et débits | **Première moitié** | Non | Par défaut | Non |
| V0 | **Nappe** | Tout | Non | **Elargies** | Non |
| V4 | Nappe | **A partir de 2008** | Non | Elargies | Non |
| V5 | Nappe | A partir de 2008 | **Oui** | Elargies | Non |

TABLE 1 – *Modifications apportées au modèle dans les différentes versions utilisées, indiquées en caractères gras.*

### 3.3.2 Résultats

Les coefficients de Nash obtenus pour les simulations réalisées pour les différents piézomètres et avec les différentes contraintes (V0 à V5) sont montrés Table 2.

La version V1 montre une qualité de calibration très inégale selon les piézomètres et les bassins. Pour les piézomètres de Chiry-Ourscamp et de Fresnoy-le-Luat, Gardenia obtient un coefficient de Nash entre 0.64 et 0.92, correspondant à une calibration moyenne à excellente, alors que pour les piézomètres de Chars, Vivières, Villers-Cotterêts, Puiseux, Villeron et Penchard, la calibration est de (très) faible qualité, avec des coefficients de Nash entre 0.04 et 0.17. L'exemple du couple Fresnoy-le-Luat / Courteuil est illustré Fig. 18-A.

La version V2 du modèle Gardenia, intégrant la possibilité d'échanges souterrains dans la modélisation, joue principalement sur la modélisation des débits à l'exutoire et ne modifie presque pas la qualité de la calibration des piézométries.

La version V3 montre que, pour les piézomètres d'Acy et Chars (indiqués en rose Fig. 17), la qualité de la calibration est sensiblement améliorée lorsque seule la première partie de la chronique recouvrante est sélectionnée. L'exemple du piézomètre d'Acy, dans le Soissonnais, est illustré Fig. 18-B, C.

La version V0, à comparer avec la version V1, montre qu'ignorer les données de débit, ainsi qu'une plus grande liberté sur les paramètres, mène fréquemment à une augmentation du coefficient de Nash ; l'augmentation est particulièrement importante pour les piézomètres de Chiry-Ourscamp, Chars et Vivières. Le coefficient de Nash pour la piézométrie étant la seule métrique de calibration et les bornes de calibration étant plus larges, le modèle peut explorer une plus grande partie de l'espace multiparamétrique pour atteindre un Nash plus élevé, supérieur à 0.6 pour 6 piézomètres (figurés en bleu Fig. 17 ). En dépit de ces facteurs facili-

| Couple Piézomètre / Débitmètre (communes) | V1 | V2 | V0 | V3 | V4 | V5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Chiry-Ourscamp / Noyon | 0.64 | 0.24 | 0.54 | 0.77 | | |
| Chiry-Ourscamp / Passel | 0.72 | 0.72 | 0.71 | 0.78 | | |
| Acy / Soissons | 0.38 | 0.33 | 0.6 | 0.45 | 0.77 | 0.8 |
| Chars / Nesles-la-Vallée | 0.1 | 0.26 | 0.26 | 0.39 | 0.79 | 0.79 |
| Chars / Ambleville | 0.06 | 0.11 | 0.21 | 0.39 | | 0.78 |
| Fresnoy-le-Luat / Saintines | 0.74 | 0.75 | | 0.87 | 0.78 | 0.71 |
| Fresnoy-le-Luat / Courteuil | 0.92 | 0.94 | | 0.96 | | |
| Vivières / Ambleny | 0.17 | 0.03 | | 0.73 | 0.47 | 0.76 |
| Villers-Cotterêts / Ambleny | 0.04 | 0.5 | 0.05 | 0.09 | 0.8 | |
| Villers-Cotterêts / Saintines | 0.56 | 0.12 | 0.13 | 0.56 | | 0.82 |
| Armentières-sur-Ourcq / Chouy | 0.51 | 0.54 | | 0.6 | | 0.92 |
| Fère-en-Tardenois / Chouy | 0.58 | 0.57 | | 0.62 | 0.82 | 0.90 |
| Puiseux-en-France / Luzarches | 0.09 | 0.12 | | 0.18 | 0.18 | 0.81 |
| Villeron / Luzarches | 0.16 | 0.16 | | 0.01 | | |
| Penchard / Congis-sur-Thérouanne | 0.05 | 0.06 | 0.2 | 0.14 | 0.51 | |

TABLE 2 – *Qualité de calibration de la piézométrie (coefficient de Nash-Sutcliffe) atteinte par Gardenia pour différents couples piézomètres / hydromètres et pour différentes contraintes du modèle. Première colonne : nom de la commune d'implantation du piézomètre / nom de la commune d'implantation de l'hydromètre. Les colonnes suivantes correspondent aux différentes versions du modèle Gardenia (cf. table 1).*

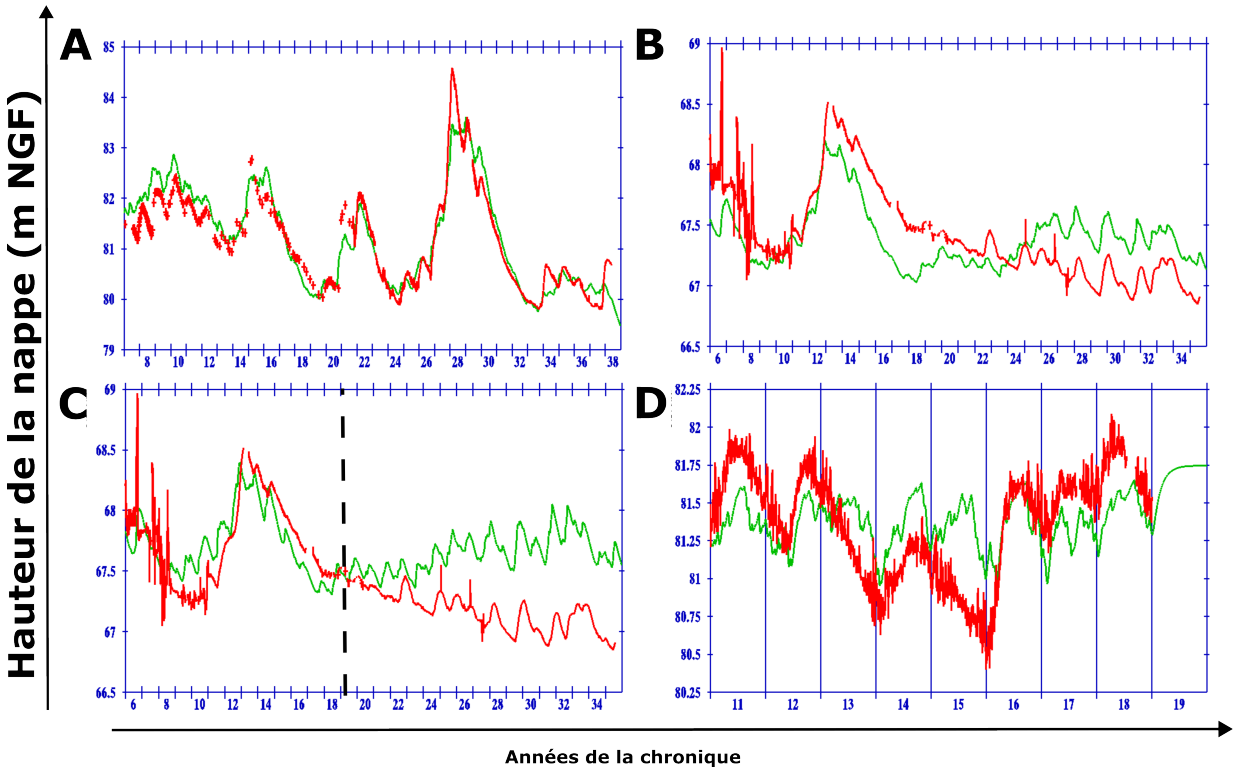


FIGURE 18 – *Exemples de calibration Gardenia de la piézométrie de la nappe des sables de Cuise (en m NGF). En rouge, piézométrie mesurée. En vert, série simulée par Gardenia. L'axe des abscisses correspond au numéro de l'année dans la chronique recouvrante piézomètre/hydromètre, en supposant que la première année de la chronique a le numéro 1.* ***A*** *: calibration V1 du piézomètre de Fresnoy-le-Luat, couplé à l'hydromètre de Courteuil.* ***B, C*** *: calibrations V1 (****B****) et V3 (****C****) du piézomètre implanté à Acy (en mNGF), couplé à l'hydromètre de Soissons. Pour* ***C****, seule la partie des données allant jusqu'à l'année 17 des chroniques (ligne tiretée noire) est sélectionnée pour la calibration. Cette sélection améliore la qualité de la calibration (le coefficient de Nash-Sutcliffe augmente de 0.38 à 0.6).* ***D*** *: Calibration Gardenia V0 du piézomètre implanté à Puiseux-en-France.*

tants, pour 5 piézomètres, la calibration reste moyenne à mauvaise, avec un coefficient de Nash compris entre 0.01 et 0.45 (figurés en jaune Fig. 17 ; exemple de calibration Fig. 18-D ).

La version V4, à comparer avec V0, montre que, pour les piézomètres d'Acy, Chars et Penchard, la qualité de la calibration est plus élevée lorsque seule la dernière partie de la chronique est considérée. Ce résultat est cohérent avec la comparaison précédente version V3 / version V1, avec les mêmes piézomètres concernés.

La version V5, enfin, à comparer avec V4, permet d'étudier la capacité de Gardenia à estimer l'influence des prélèvements sur la piézométrie. Les coefficients de Nash sont généralement identiques à ceux trouvés par la version V4, excepté pour les piézomètres de Vivières et Puiseux en France, pour lesquels la prise en compte des prélèvements mène à une forte augmentation du coefficient. Le coefficient d'influence, calculé par Gardenia, correspond à l'influence d'une augmentation du débit de prélèvement quotidien sur le niveau de nappe. Un coefficient d'influence de $10^{-5}$ signifie qu'une augmentation de débit de prélèvement quotidien de $1m^3$ / jour dans le bassin conduit à une diminution du niveau de nappe dans le bassin de $10^{-5}$ m (1 cm de baisse pour une augmentation de 1000 $m^3$/j). Les coefficients d'influence trouvés sont consignés Table 3.

Les coefficients d'influence sont négatifs pour certains couples piézomètre / bassin et positifs pour d'autres, ce qui est fortement incohérent.

### 3.3.3 Discussion

Dans le territoire étudié, 13 piézomètres suivant les niveaux de nappe du Lutétien-Yprésien montrent une cyclicité saisonnière et peuvent être utilisés par Gardenia pour réaliser des calibrations hydrogéologiques.

Pour 5 piézomètres (en beige Fig. 17), les variations mesurées n'ont pas pu être reproduites de manière satisfaisante sur l'ensemble des chroniques (version V0). L'origine de ce résultat n'est pas connue, mais il pourrait provenir 1) d'effets locaux altérant les mesures au niveau de ces piézomètres et/ou 2) de flux anthropiques (canaux, rejets...) non simulés par les fonctions de transfert Gardenia. *Des études supplémentaires devraient être menées dans ces bassins pour tester ces hypothèses.*

Deux piézomètres (en rose Fig. 17) indiquent une meilleure calibration lorsqu'une partie de la chronique est sélectionnée (versions V3 et V4). Pour ces deux piézomètres, si la calibration est réalisée sur la première partie de chronique, les niveaux de nappe prédits sur la deuxième partie sont supérieurs aux niveaux de nappe observés. Le fonctionnement hydrogéologique étant probablement resté le même, l'hypothèse explicative la plus parcimonieuse est celle d'une augmentation importante des prélèvements entre ces deux parties de chronique. Ce résultat concorde aussi avec notre connaissance du territoire, puisqu'il y a eu une importante

| Couples piézomètre / Hydromètre | Coefficient d'influence ($m/m^3$) |
|---|---|
| Acy / Soisssons | -3.9 $10^{-5}$ |
| Chars / Nesles-la-Vallée | 1.1 $10^{-5}$ |
| Chars / Ambleville | 3.0 $10^{-5}$ |
| Fresnoy-le-Luat / Saintines | 8 $10^{-5}$ |
| Vivières / Ambleny | 3.5 $10^{-4}$ |
| Villers-Cotterêts / Saintines | 3.4 $10^{-5}$ |
| Armentières-sur-Ourcq / Chouy | -8.4 $10^{-5}$ |
| Fères-en-Tardenois / Chouy | 4.8 $10^{-5}$ |
| Puiseux-en-France / Luzarches | -4.5 $10^{-4}$ |

TABLE 3 – *Facteurs d'influence des prélèvements trouvés pour 8 couples piézomètres / bassins.*

augmentation des autorisations de prélèvement pour irrigation dans la région du Soissonnais, et la plaine de Meaux est aussi fortement irriguée (dires d'expert, Didier Lhomme, DREAL Hauts-de-France). *Les bassins à proximité de ces piézomètres, dans la plaine de Meaux et dans le Soissonnais, devraient constituer des cibles prioritaires pour les futures études de volumes prélevables*.

Une bonne calibration Gardenia a été atteinte pour 6 piézomètres sur l'ensemble des chroniques (version V0 – en bleu Fig. 17). Cependant, même lorsque la qualité de calibration est élevée, la question du potentiel de prédiction de ce modèle demeure. Pour mieux y répondre, des études d'apprentissage (évolution de la qualité de la calibration en fonction de la longueur de chronique considérée) pourraient par exemple être menées .

Dans le cadre de futures études de volumes prélevables, enfin, l'interprétation par le modèle de l'influence des prélèvements (version V5) est fondamentale. Pour les 8 couples piézomètres/bassin considérés, avec la version V5, des coefficients de Nash-Sutcliffe compris entre 0.71 et 0.92 ont été obtenus sur la période 2008 - 2023, indiquant une calibration bonne à excellente. Cependant, pour trois piézomètres, le coefficient d'influence interprété sur la période 2008 - 2023 est négatif, alors qu'il est positif pour cinq d'entre eux. Une augmentation du débit de prélèvement dans un bassin ne devant logiquement pas mener à une augmentation du niveau de nappe dans ce bassin, ces résultats poussent à une très *grande vigilance dans l'utilisation des résultats de Gardenia pour l'interprétation de coefficients d'influence de prélèvement*, même lorsque la calibration semble de bonne qualité.

Une difficulté générale dans l'interprétation des résultats de Gardenia provient du fait que deux jeux de

paramètres hydrogéologiques distincts peuvent aboutir à deux calibrations de bonne qualité. Les paramètres hydrogéologiques interprétés ne doivent donc pas être utilisés en-dehors de ce contexte de modélisation. Une description fine de l'espace multidimensionnel de calibration, de ses minima et maxima locaux et globaux, pourrait être utile pour mieux comprendre les écueils de chaque calibration. Les contraintes temporelles du stage n'ont cependant pas permis ce type d'exploration.

# 4 Préconisations à l'issue du stage pour les futures Etudes de Volumes Prélevables

Dans le contexte des futures Etudes de Volumes Prélevables (EVP) qui seront réalisées sur le territoire étudié, des préconisations peuvent être faites.

Premièrement, une bonne couverture piézométrique et hydrométrique sera un facteur crucial lors de la caractérisation et de la modélisation hydrogéologique, quelles que soient les démarches et les modèles numériques choisis pour les EVP.

Plusieurs bassins versants dans la région ne sont pas équipés de stations hydrométriques. Pour améliorer la connaissance des débits écoulés, des ruissellements et des drainages depuis la nappe, l'implantation de stations hydrométriques à l'exutoire (ou un peu en amont) de ces bassins est proposée (Fig. 19).

Les discontinuités hydrogéologiques principales présentées Fig. 9 séparent les masses d'eau souterraines en unités entre lesquelles les flux sont réduits. Des prélèvements dans une petite unité peuvent mener à une baisse plus rapide des niveaux de nappe que dans une unité de taille plus conséquente. Chacun de ces ensembles, en particulier les plus petits, devrait donc être suivi par au moins une station piézométrique. Une proposition d'implantation de nouvelles stations piézométriques est présentée Fig. 20.

Ce stage nous permet enfin de cibler les territoires à prioriser pour les futures Etudes de Volumes Prélevables. A partir des résultats présentés précédemment, différents arguments peuvent être avancés pour prioriser un territoire :

— Une pression de prélèvement moyenne annuelle supérieure à 15% (Fig. 10).

— Une tendance marquée à la baisse pour les chroniques de niveaux de nappe et les débits dans les rivières (Fig. 13)

— Une calibration Gardenia indiquant une augmentation des prélèvements (Fig. 17, piézomètres en rose )

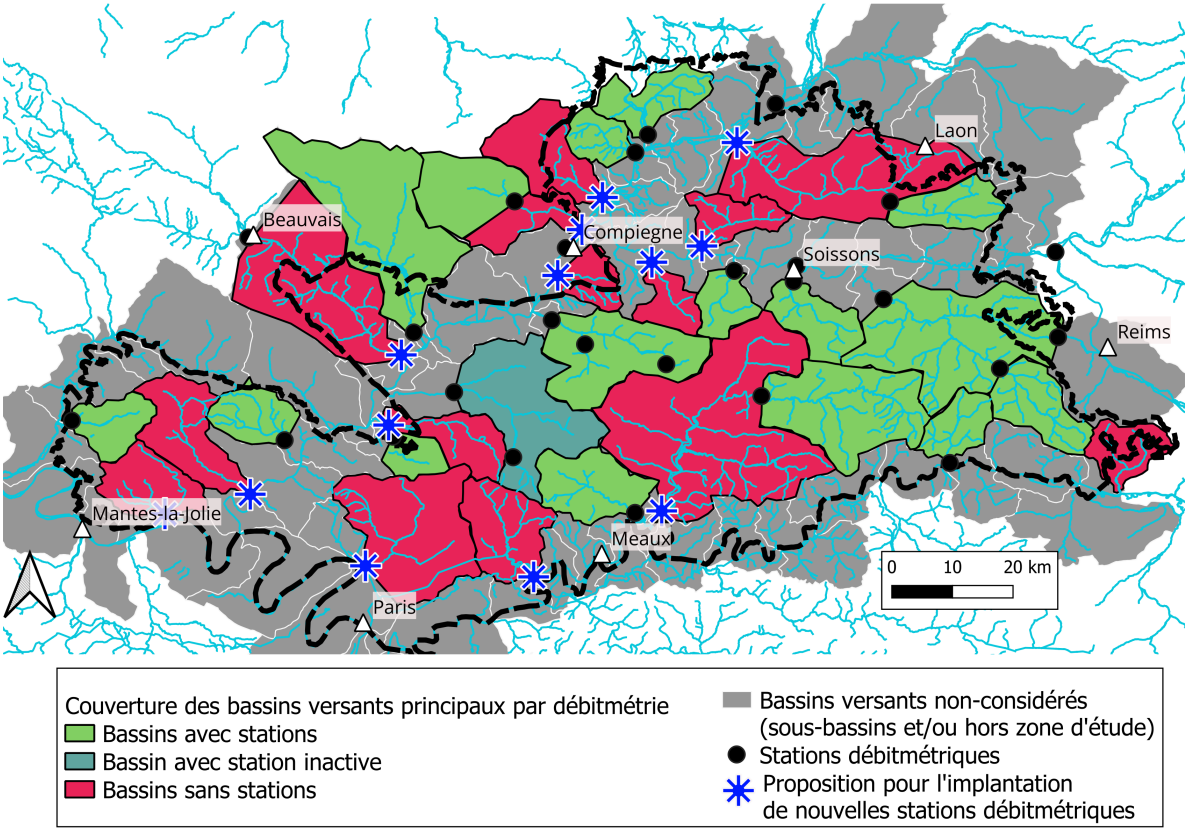


FIGURE 19 – *Préconisation pour l'implantation de nouvelles stations débitmétriques. Les sous-bassins versants et les bassins ne drainant pas les aquifères du Lutétien-Yprésien ne sont pas considérés.*

— Une calibration Gardenia de mauvaise qualité (Fig. 17, piézomètres en beige)

La priorisation sur la base de ces différents arguments est cartographiée Fig. 21.

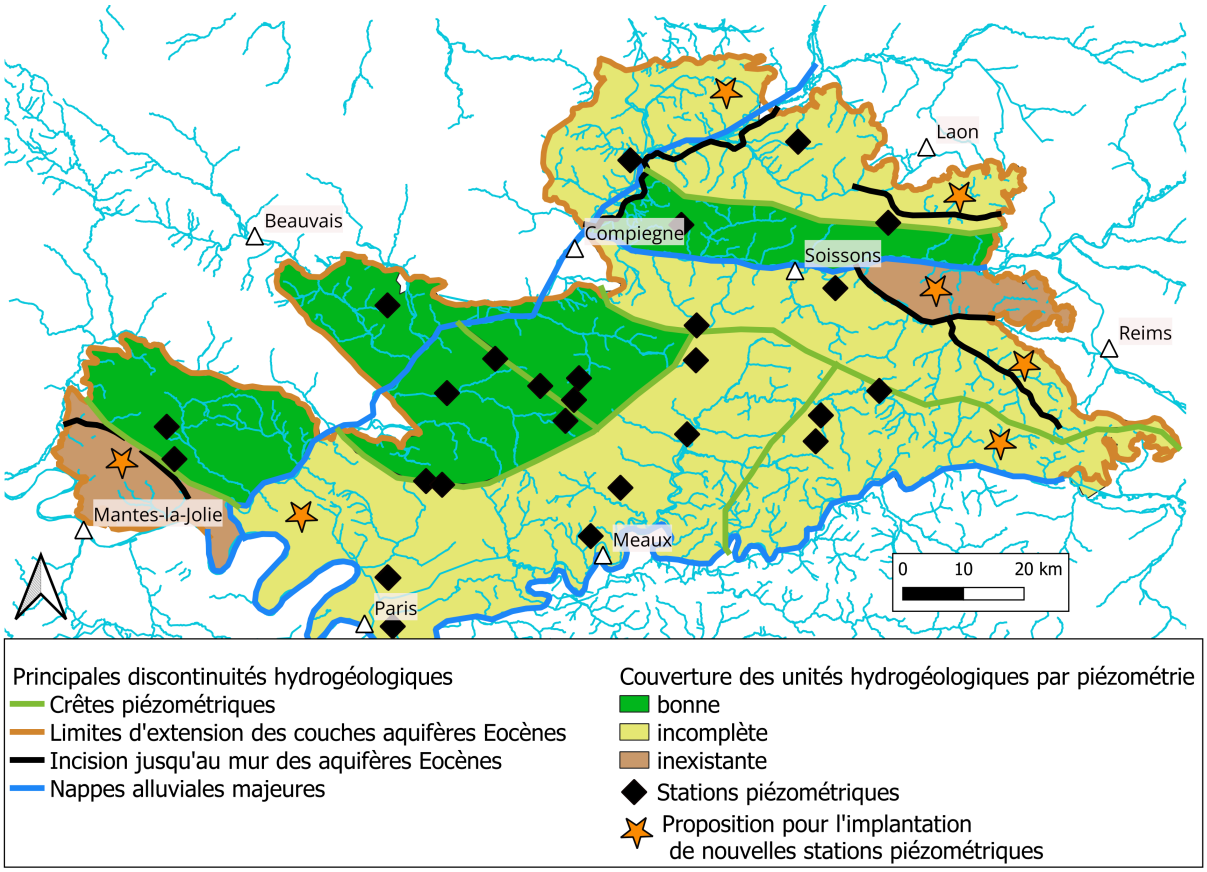


FIGURE 20 – *Préconisations pour l'implantation de nouvelles stations piézométriques. A l'Est, les incisions par les cours d'eau délimitent des masses d'eau souterraines plus ou moins indépendantes et de taille restreinte, dans lesquelles l'implantation de nouvelles stations serait cruciale.*

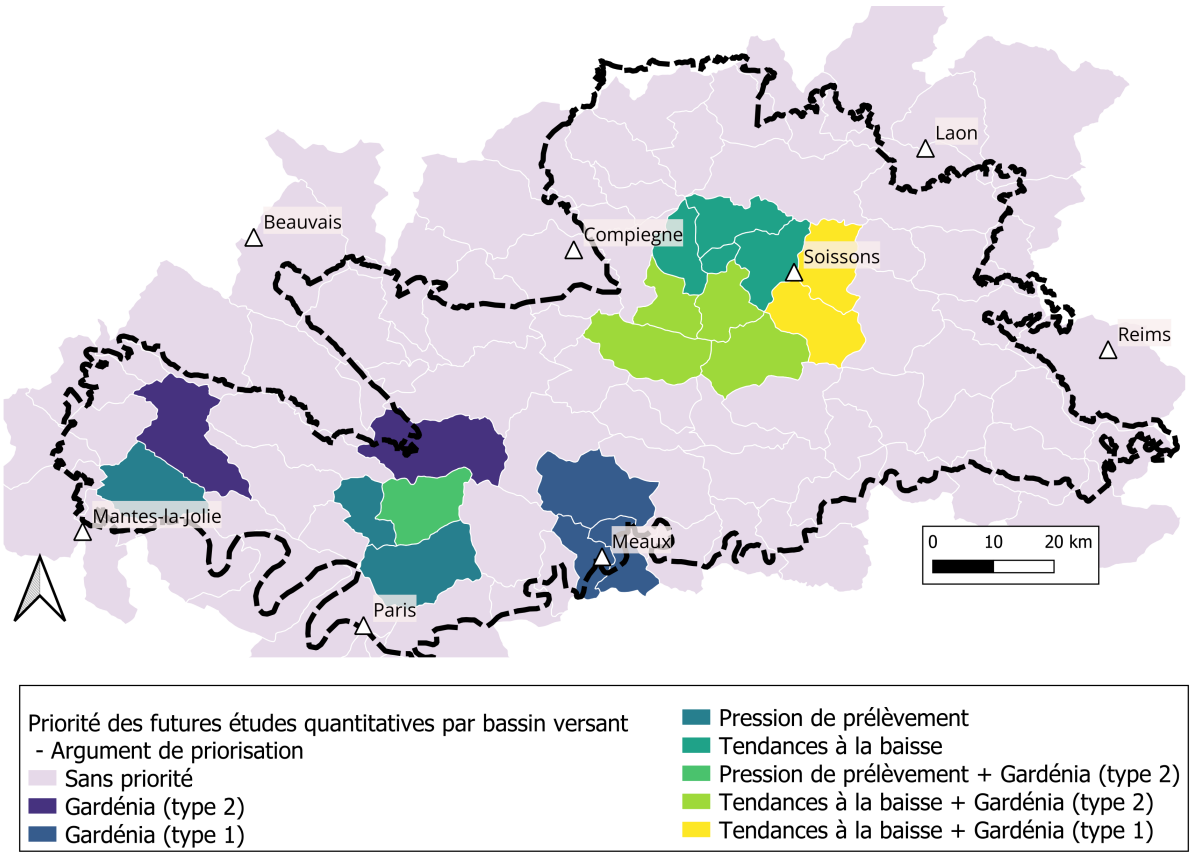


FIGURE 21 – *Cartographie d'aide à la priorisation des futures études quantitatives. Les bassins sur lesquels les futures EVP devraient être menées en priorité sont indiqués, ainsi que le type d'argument pour cette priorisation. « Gardenia (type 2) » correspond aux bassins à proximité de piézomètres pour lesquels Gardenia n'atteint pas une bonne calibration. « Gardenia (type 1) » correspond aux bassins à proximité de piézomètres pour lesquels la calibration indique une augmentation des prélèvements. « Pression de prélèvement » montre des bassins pour lesquels la pression de prélèvement est supérieure à 15%. « Tendance à la baisse » correspond à la confluence entre l'Aisne et l'Oise, où une baisse des débits et des niveaux de nappe est observée.*

# 5 Conclusion

La nappe du Lutétien-Yprésien, sise au coeur du bassin parisien, représente une ressource en eau stratégique pour l'alimentation en eau potable. Dans un contexte de changement climatique, l'augmentation des prélèvements pour l'irrigation dans cette nappe soulève des préoccupations concernant son équilibre quantitatif.

Ce stage s'est inscrit dans le lancement de démarches "volumes prélevables" pour la nappe du Lutétien-Yprésien. Alors que le territoire manque d'instances pilotes (SAGE) pour la gestion quantitative, le stage a permis 1) un **recensement des données du réseau d'observation hydrogéologique**, 2) la **cartographie des zones les plus en tension** (afin de répondre aux besoins urgents des DDT), 3) le test et la **discussion de deux modèles numériques** utilisables pour les futures EVP, 4) des **préconisations d'implantation** pour le réseau piézométrique et débitmétrique, et 5) une **préconisation de bassins à cibler en priorité** pour les futures EVP.

Au-delà de ce travail, le stage aura été l'occasion pour moi de m'immerger dans une administration publique, de me familiariser avec les acteurs, la réglementation et la gouvernance complexes du domaine de l'eau en France. Enfin, il aura été le contexte idéal pour confirmer et préciser mes objectifs et pour réaliser ma transition professionnelle, avec le poste que j'occupe actuellement à l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

# Références


[Age22] AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE. *Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux 2022 - 2027 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands*. 2022.

[AB15a] AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE et BRGM. *Fiche de caractérisation de la masse d'eau HG104*. 2015.

[AB15b] AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE et BRGM. *Fiche de caractérisation de la masse d'eau HG105*. 2015.

[AB15c] AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE et BRGM. *Fiche de caractérisation de la masse d'eau HG106*. 2015.

[AB15d] AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE et BRGM. *Fiche de caractérisation de la masse d'eau HG107*. 2015.

[AV11] A. ARGUEZ et R.S. VOSE. “The Definition of the Standard WMO Climate Normal : The Key to Deriving Alternative Climate Normals”. In : *Bulletin of the American Meteorological Society* 92.6 (2011), p. 699-704. DOI : 10.1175/2010BAMS2955.1.

[Arn16] L. ARNAUD. *Estimation des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre : retour d'expériences sur les méthodes utilisées, identification des problèmes rencontrés, recommandations*. BRGM/RP-64615-FR. Onema / BRGM, 2016.

[Arn17] L. ARNAUD. *Estimation prélèvements / ressource dans le cadre de la DCE : compléments méthodologiques pour les eaux souterraines*. BRGM/RP-67212-FR. BRGM, 2017.

[Bau+15] V. BAULT et al. *Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le bassin parisien*. BRGM/RP-64887-FR. BRGM, 2015.

[BRG10] BRGM. *BSS-Eau / Eaux souterraines*. 2010.

[BRG19] BRGM. *BD-Charm 50 / Cartes géologiques départmentales au 1/50 000*. 2019.

[CT21] F. COMPÈRE et M. THINON-LARMINACH. *Reconstitution et caractérisation des régimes hydrologiques naturels sur les unités hydro(géo)logiques cohérentes négociées du SAGE SNMP, et calcul de l'impact du changement climatique sur quatre d'entre elles. Rapport final*. BRGM/RP-71074-FR. BRGM, 2021.

[Eau24a] EAU-FRANCE. *Hydroportail*. 2024.

[Eau24b] EAU-FRANCE. *Portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines*. 2024.

[Gou23] GOUVERNEMENT FRANÇAIS. *Plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau - 53 mesures pour l'eau*. 2023.

[Ken75] M.G. KENDALL. *Rank-correlation methods*. London : Griffin, 1975. ISBN : 0195208374.

[Le +20] Patrick LE MOIGNE et al. “The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France”. In : *Geoscientific Model Development* 13.9 (2020), p. 3925-3946. ISSN : 1991-9603. DOI : 10.5194/gmd-13-3925-2020.

[Man45] H. B. MANN. “Nonparametric tests against trends”. In : *Econometrica : Journal of the econometric society* 13.3 (1945). DOI : https://doi.org/10.2307/1907187.

[Mét24] MÉTÉO FRANCE. *Données quotidiennes SIM*. 2024.

[MBE23] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES, C. BÉCHU et S. EL HAÏRY. *Instruction du 14 décembre 2023 relative à la mise en œuvre du décret n° 2021-795 du 23 juin 2021 et du décret n° 2022-1078 du 29 juillet 2022 relatifs à la gestion quantitative de la ressource en eau*. 14 déc. 2023.

[MLG19] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES, A. LEQUIEN et L. GOURCY. *Guide d'évaluation de l'état des eaux souterraines*. 2019.

[NS70] J.E. NASH et J.V. SUTCLIFFE. "River flow forecasting through. 1 : A conceptual model discussion of principles". In : *Journal of Hydrology* 10.3 (1970), p. 282-290. DOI : 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

[PFG00] PARLEMENT EUROPÉEN, N. FONTAINE et J. GLAVANY. "Directive 2000/60/CE du parlement Européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau". In : *Journal Officiel des Communautés Européennes* (23 oct. 2000).

[Thi14] D. THIÉRY. *Logiciel Gardénia version v8.2 - guide d'utilisation*. BRGM/RP-62797-FR. BRGM, 2014.

[Wor24] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Climate*. 2024. URL : https://wmo.int/topics/climate.

# Annexes

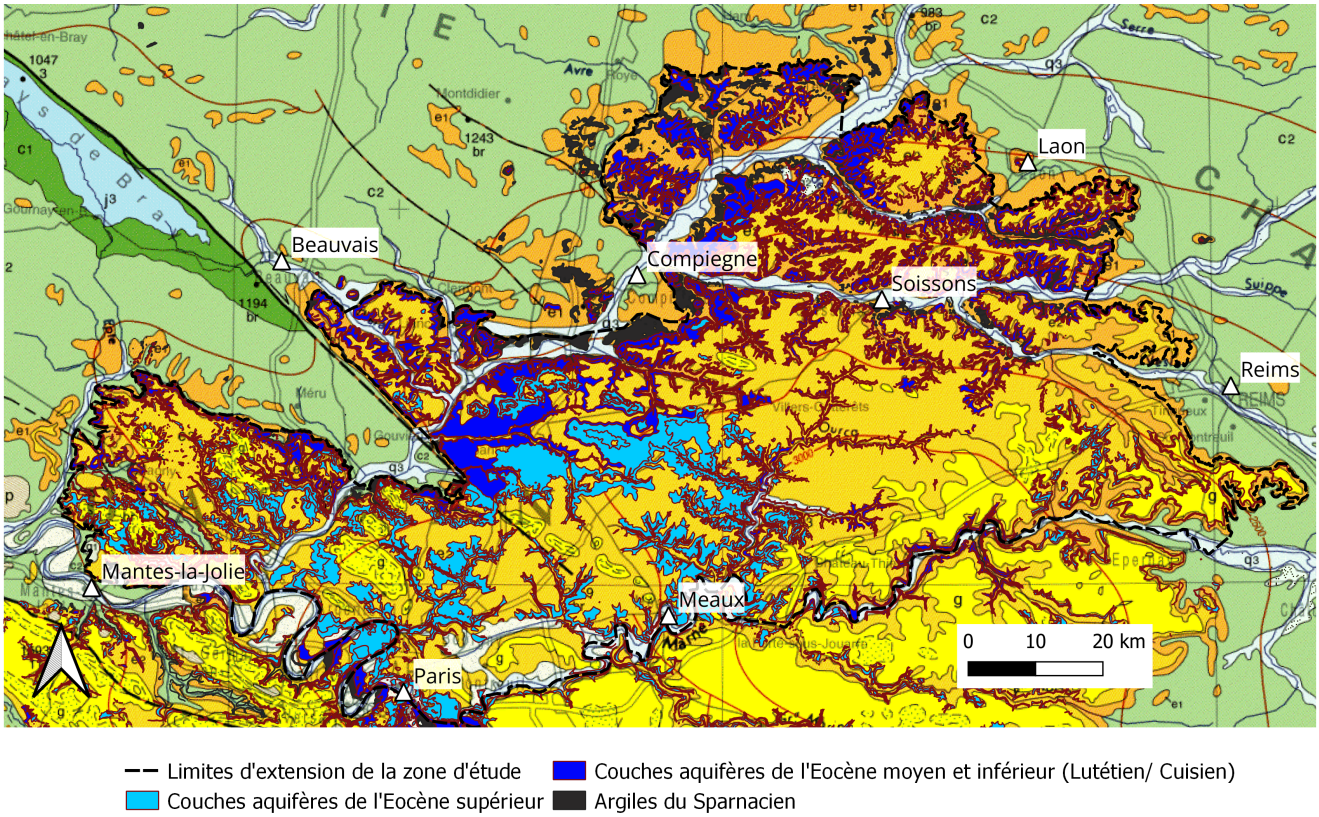


FIGURE S-1 – *Couches aquifères Eocènes dans leur contexte géologique régional. Le fond de carte est un extrait de la carte géologique imprimée au 1/1000 000 (Crétacé supérieur montré en vert, Eocène - hors couches aquifères - en orange/jaune, Oligocène en jaune clair et alluvions récentes en blanc bleuté). Les affleurements des couches aquifères du Bartonien et du Lutétien-Yprésien, extraits par agrégation de couches depuis la carte géologique harmonisée au 1/50 000, sont marqués respectivement en bleu clair et en bleu sombre. Sources : Infoterre / BRGM.*

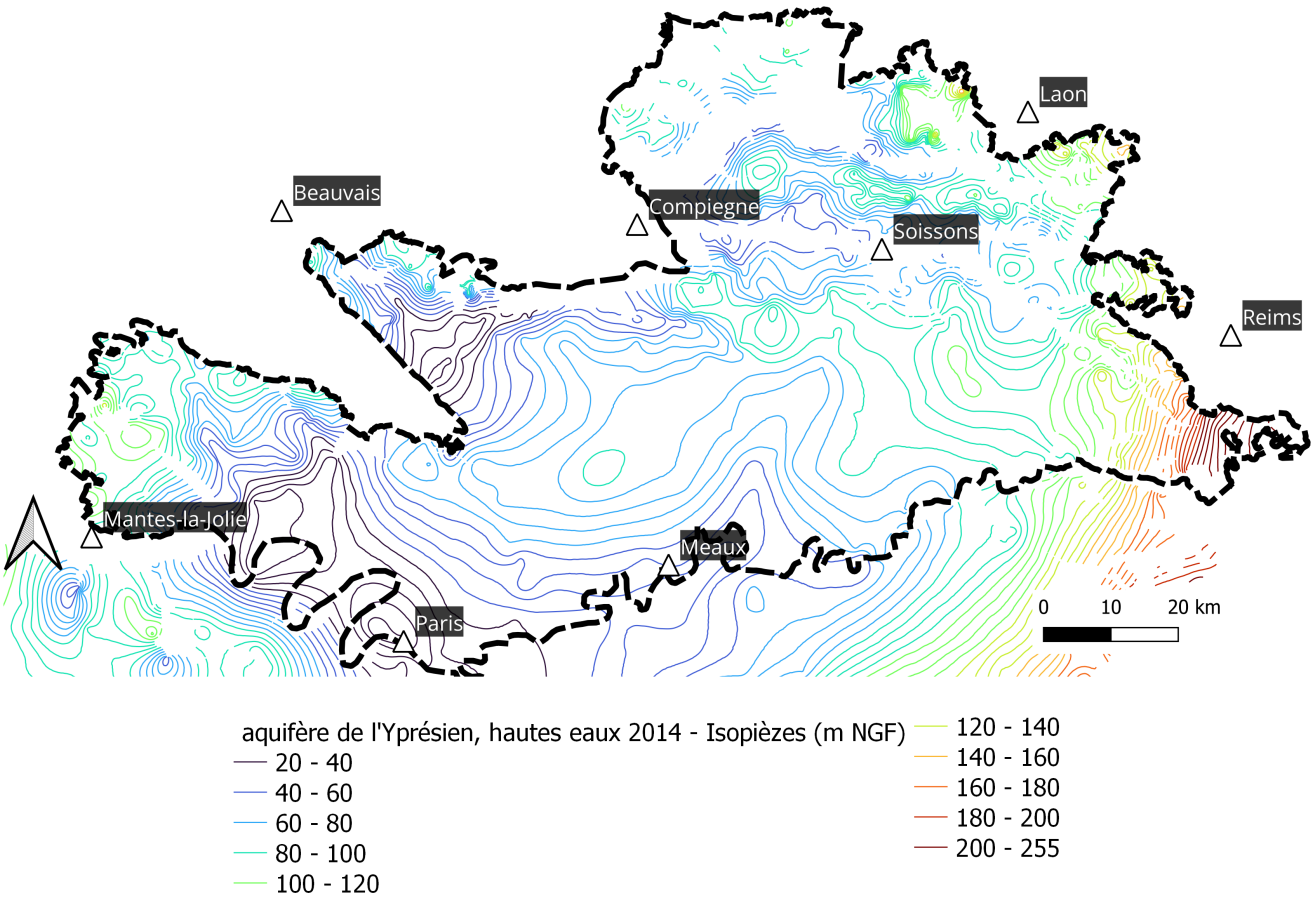


FIGURE S-2 – *Carte piézométrique de l'Yprésien obtenue par interpolation de mesures réalisées lors d'une étude menée lors des hautes eaux 2014. Source données : Bault et al., 2015.*

| Grandeur testée | Paramètre de significativité ($p$) |
|---|---|
| Précipitations (série des cumuls annuels) | 0.44 |
| Evapotranspiration (série des cumuls annuels) | 0.15 |
| Ruissellement (série des cumuls annuels) | 0.95 |
| Recharge des nappes (série des cumuls annuels) | 0.69 |
| Températures (série des moyennes annuelles) | $7.8\ 10^{-9}$ |

TABLE S-1 – *Résultats du test de Mann-Kendall de tendance significative à l'évolution des principaux paramètres hydro-climatiques entre 1959 et 2023 (données SIM). Une limite de significativité de p = 0.05 est choisie, ce qui signifie que la tendance est jugée significative si p est inférieur à 0.05.*

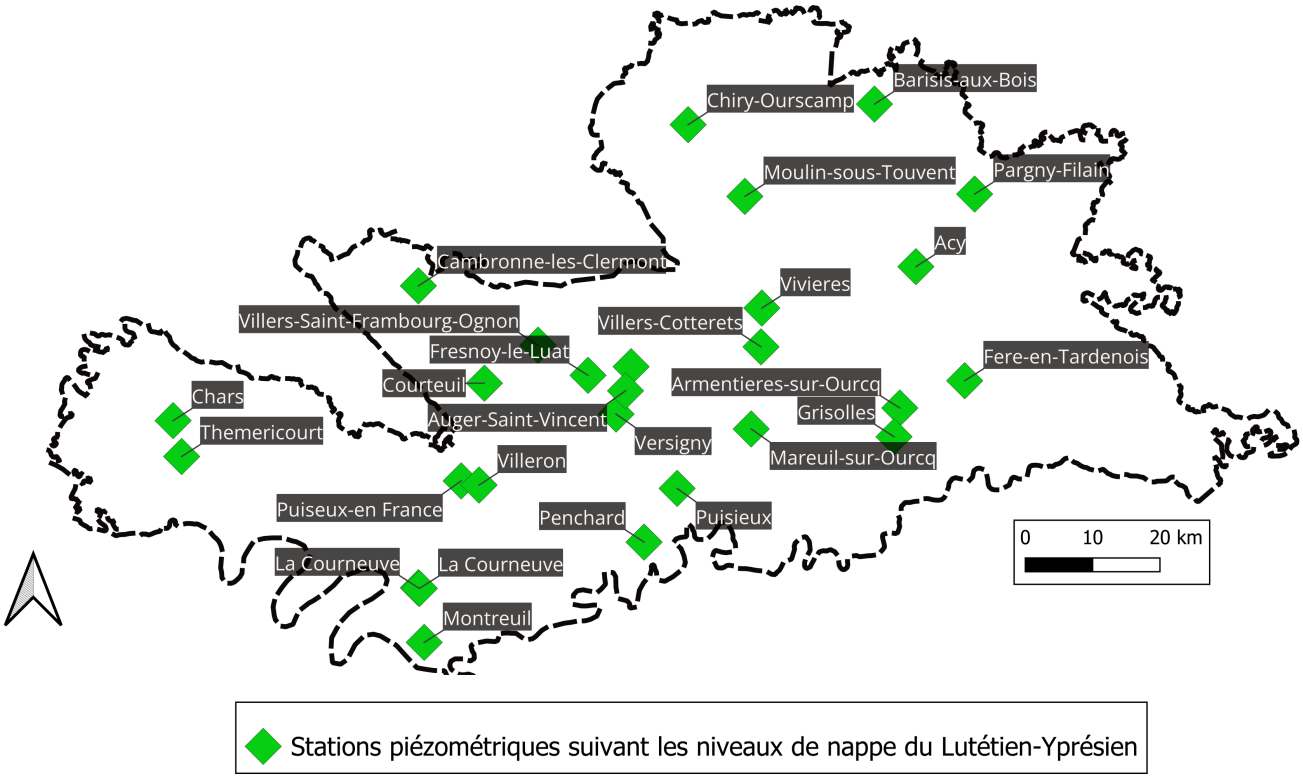


FIGURE S-3 – *Carte des stations piézométriques suivant les niveaux de nappes du Lutétien-Yprésien dans la zone d'étude, avec les noms des communes d'implantation.*

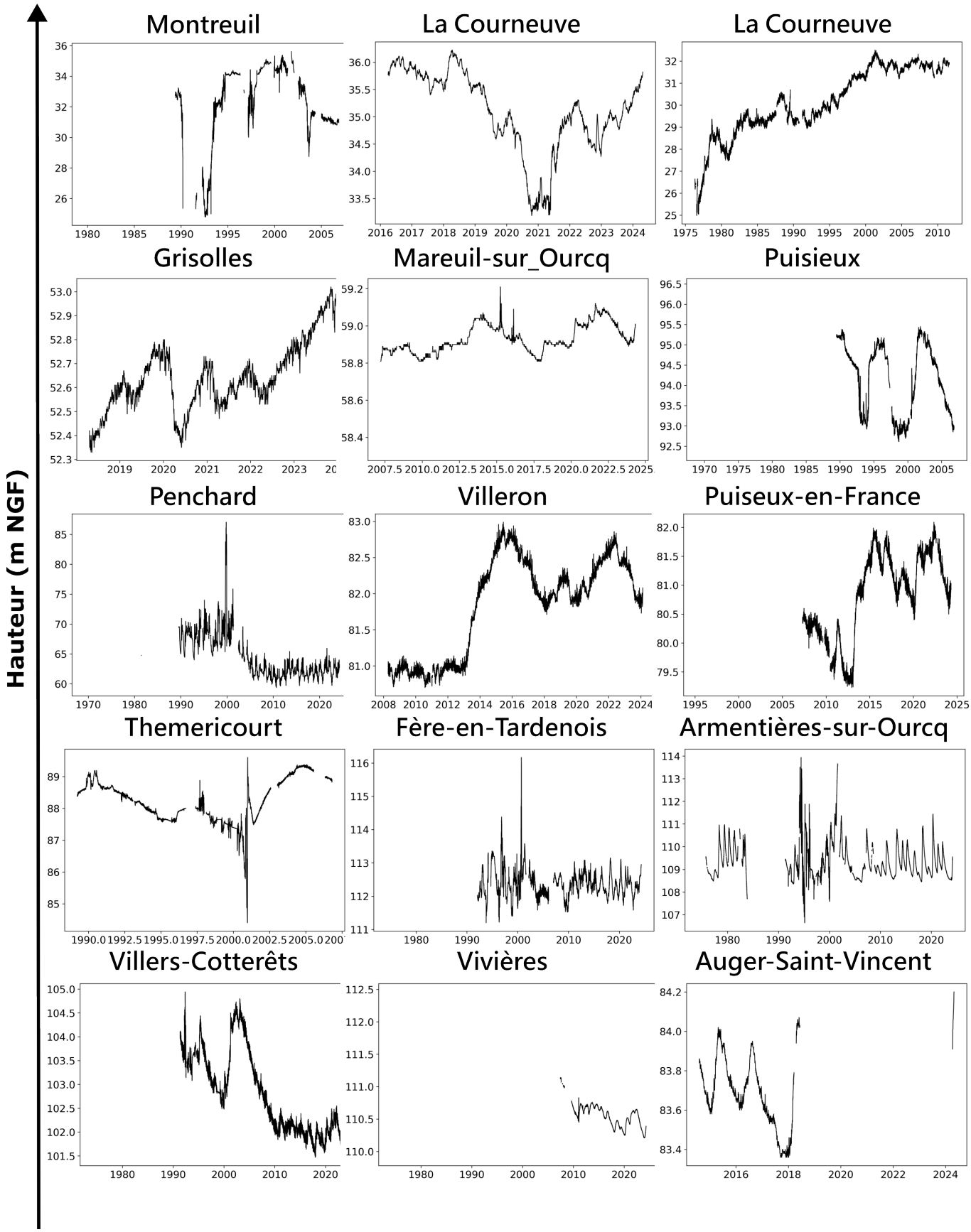


FIGURE S-4 – *Chroniques piézométriques de la nappe du Lutétien-Yprésien, en m NGF. Le titre de chaque graphe correspond à la commune d'implantation de l'ouvrage. Source des données : ADES / Eau France.*

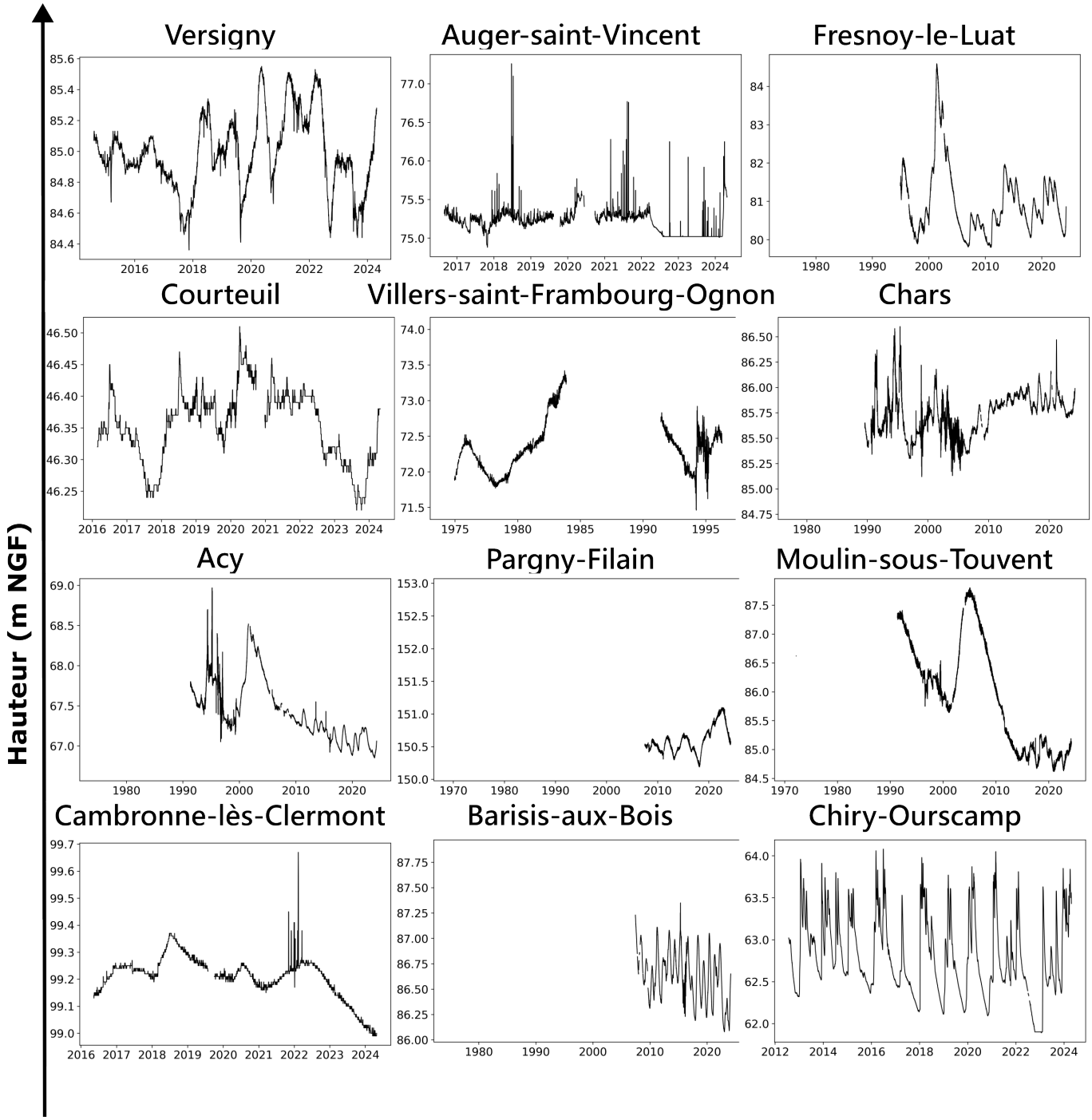


FIGURE S-5 – *Suite Fig. S-4.*

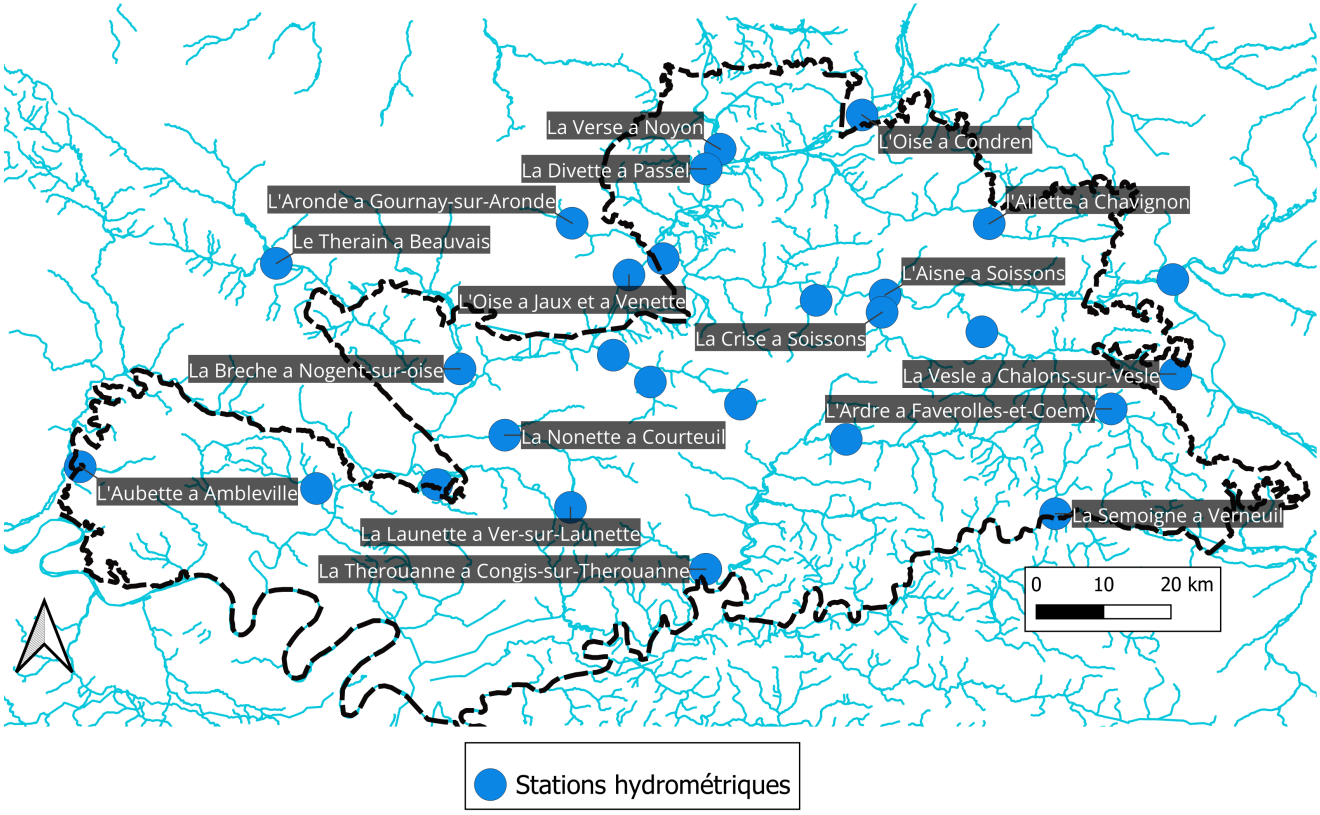


FIGURE S-6 – *Carte des stations hydrométriques suivant les débits dans les cours d'eau dans la zone d'étude, avec les noms des communes d'implantation. Certaines stations le long de la Seine, de l'Oise et de la Marne ne sont pas considérées, car les zones de drainage de ces cours d'eau s'étalent au-delà de l'Eocène du bassin de Paris.*

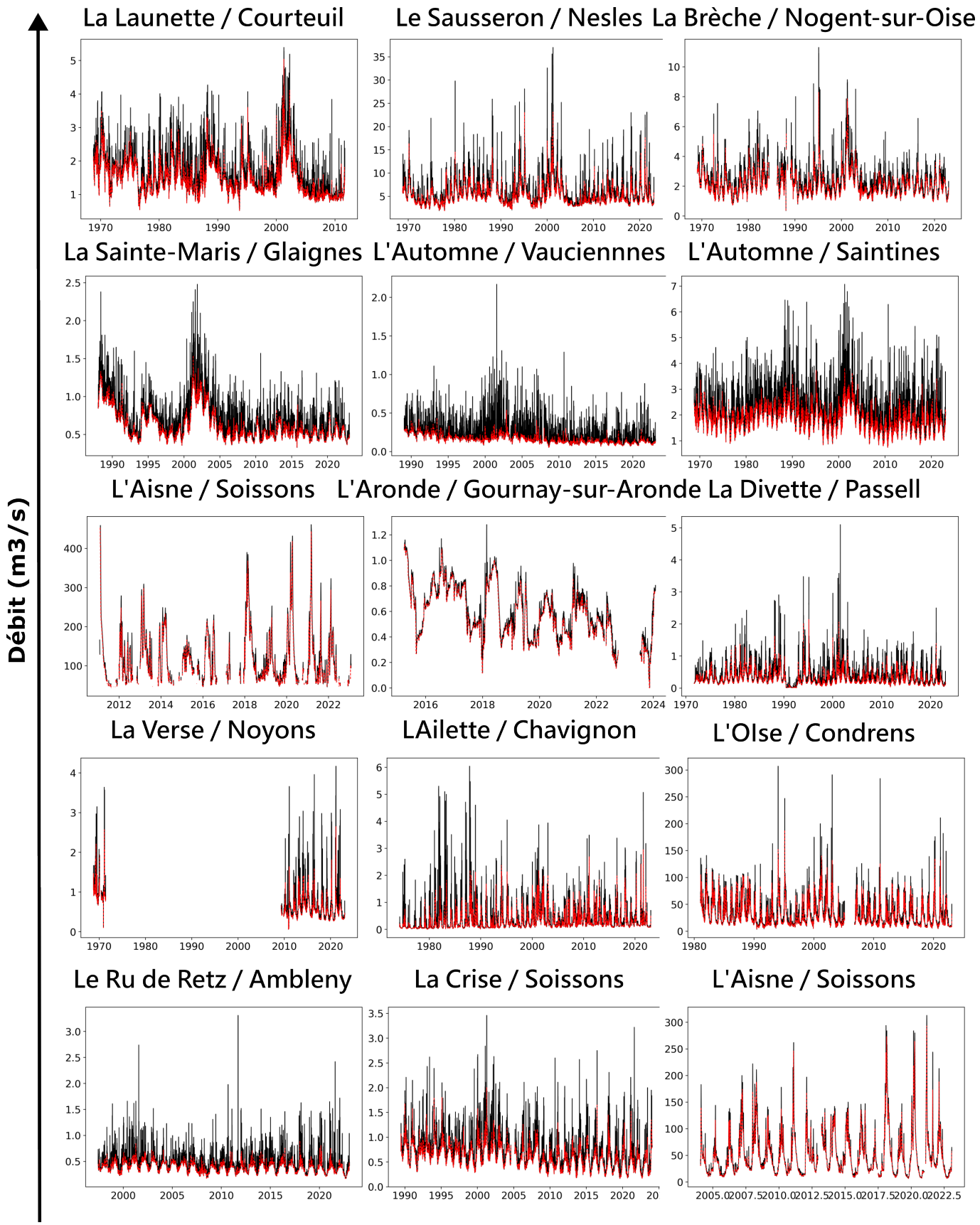


FIGURE S-7 – *Chroniques hydrométriques des débits dans les cours d'eau, en $m^3/s$. Le titre de chaque graphe correspond au cours d'eau et à la commune d'implantation de l'ouvrage. En noir, moyenne quotidienne. En rouge, débit minimal lissé sur 5 jours, correspondant à une approximation du débit de base (débit provenant du drainage de la nappe). Source données : Banque Hydro / Eau France.*

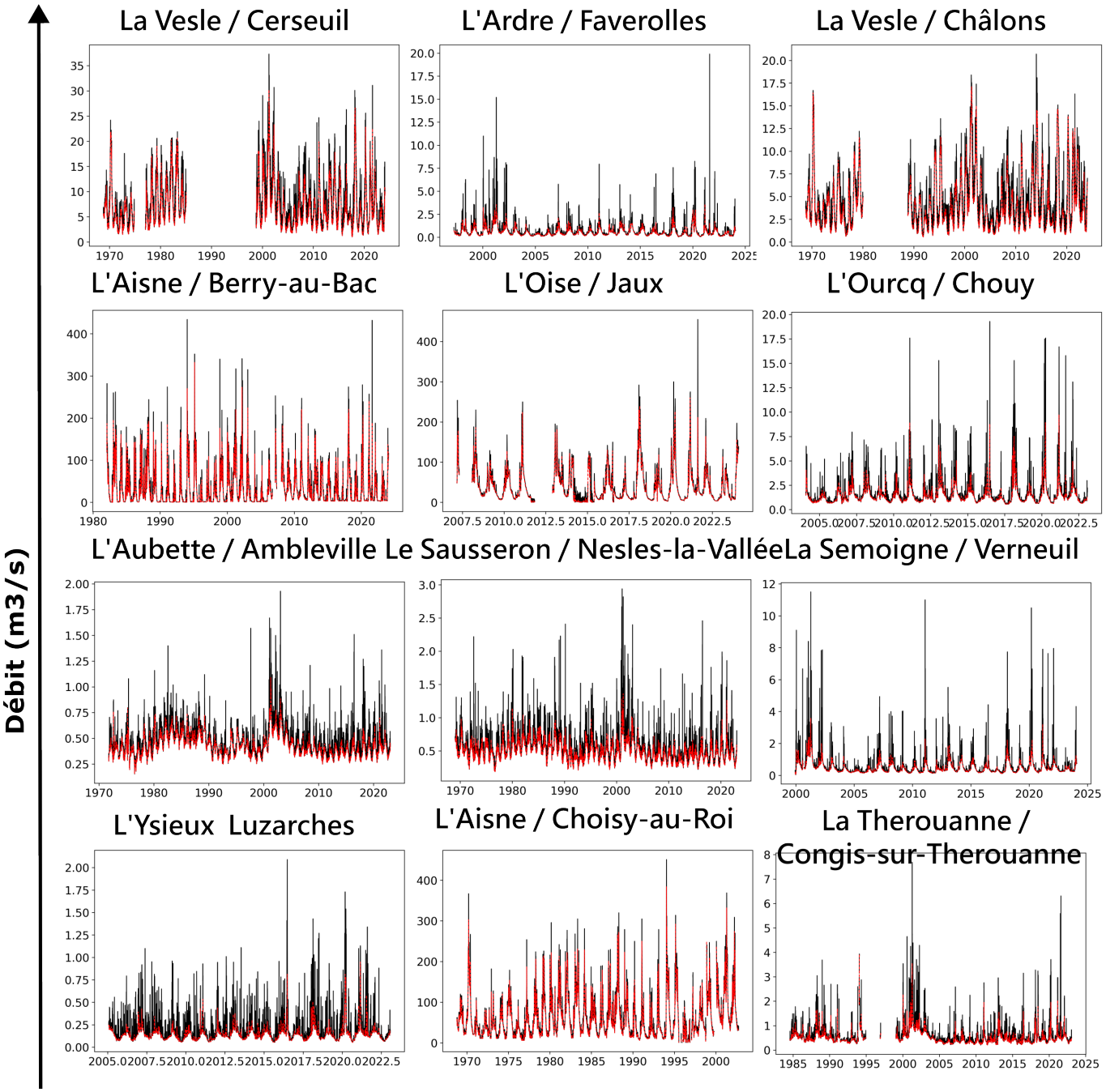


FIGURE S-8 – *Suite Fig. S-7.*

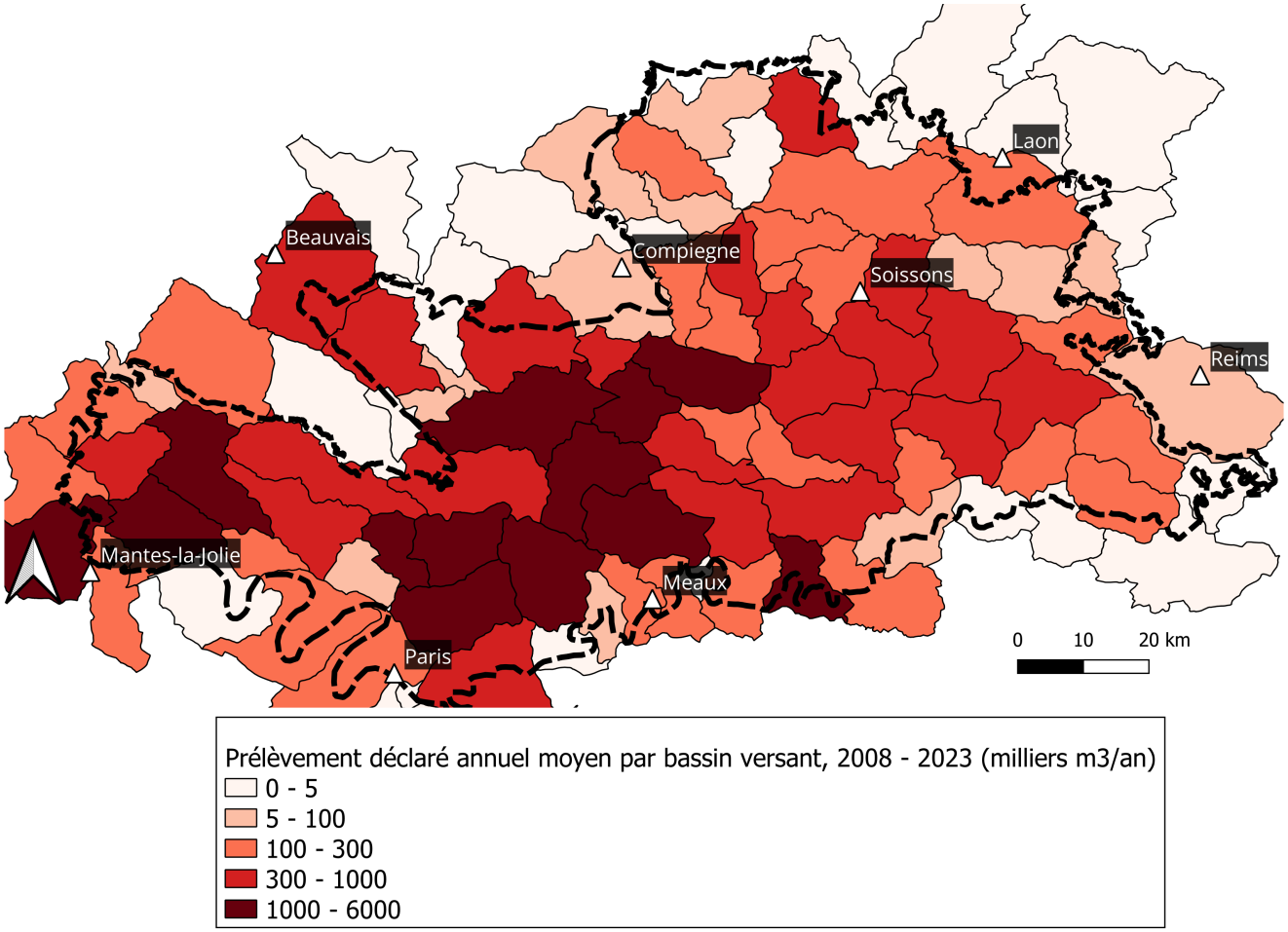


FIGURE S-9 – *Volume de prélèvement (aquifères du Lutétien-Yprésien) moyen annuel déclaré par bassin versant sur la période 2008 - 2023, en $m^3$/an. Source données : AESN.*

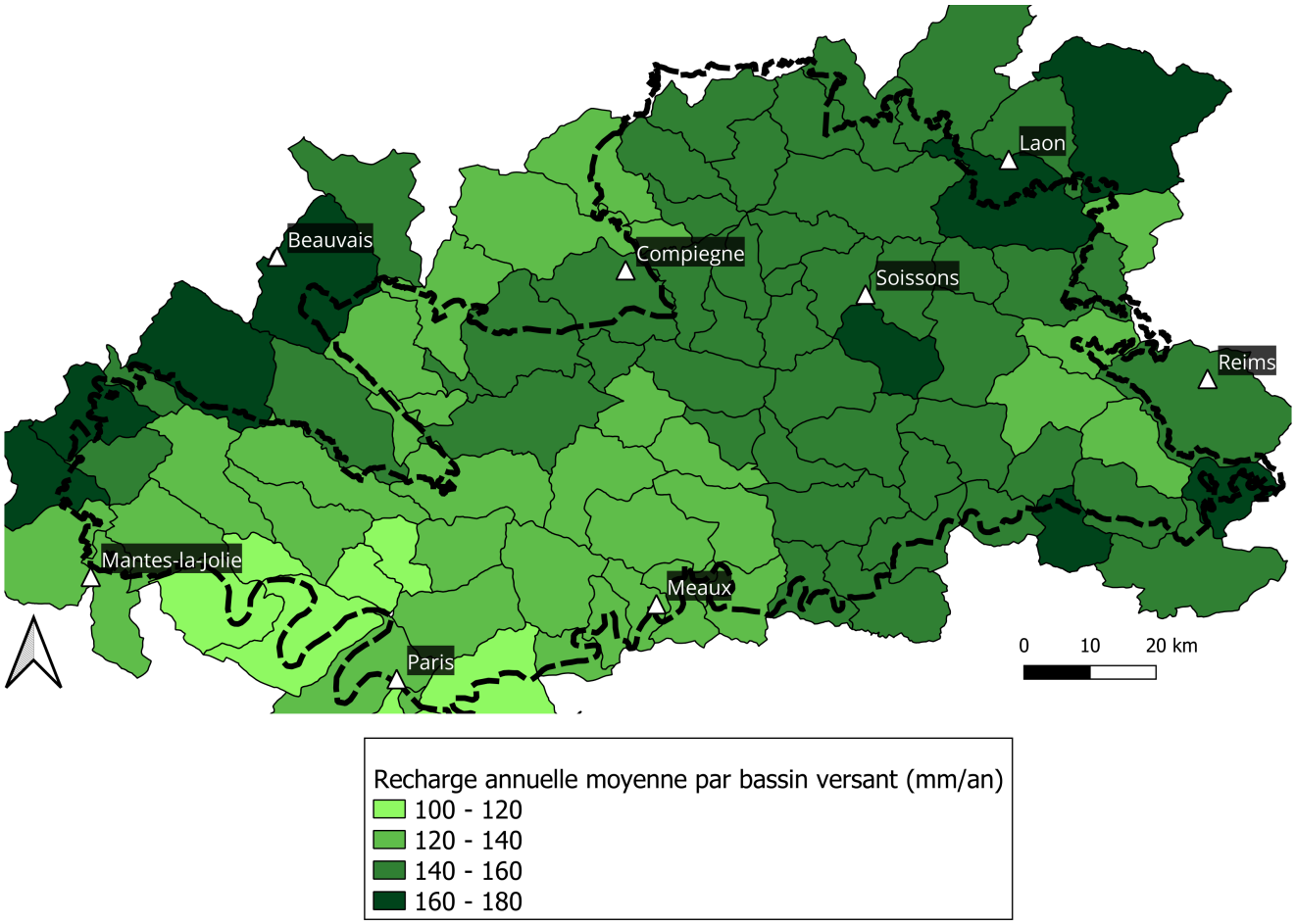


FIGURE S-10 – *Recharge des nappes moyenne par bassin versant, calculée par interpolation des données SIM, en mm/an.*

| | 1980 - 2023 | | 1990 - 2023 | | 2000 - 2023 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Station | *p* | **coeff.** | *p* | **coeff.** | *p* | **coeff.** |
| Barisis-aux-Bois | 0.90 | | 0.97 | | 0.02 | -0.01 |
| Moulin-sous-Touvent | 0.00 | -0.04 | 0.00 | -0.07 | 0.00 | -0.11 |
| Pargny-Filain | 0.22 | | 0.22 | | 0.11 | |
| Acy | 0.00 | -0.02 | 0.00 | -0.03 | 0.00 | -0.04 |
| Chars | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 |
| Fresnoy-le-Luat | 0.04 | -0.02 | 0.82 | | 0.75 | |
| Vivières | 0.00 | -0.06 | 0.00 | -0.06 | 0.00 | -0.06 |
| Villers-Cotterêts | 0.00 | -0.06 | 0.00 | -0.07 | 0.00 | -0.09 |

TABLE S-2 – *Résultats du test de tendance significative de Mann-Kendall appliqué aux niveaux de nappe (moyenne annuelle) sur différentes stations et différents intervalles temporels. p : paramètre de significativité.* ***coeff.*** *: Coefficient directeur de la droite de corrélation interpolée (m/an)) pour les tests avec p inférieur à 0.05. Les intervalles temporels pour lesquels il n'y a pas de valeur p correspondent à des intervalles pour lesquels la chronique n'est pas complète.*

| | 1980 - 2023 | | 1990 - 2023 | | 2000 - 2023 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Station | *p* | **coeff.** | *p* | **coeff.** | *p* | **coeff.** |
| La Thérouanne / Congis-sur-Thérouanne | | | 0.52 | | 1.00 | |
| Le Sausseron / Nesles-la-Vallée | 0.00 | -2.88 | 0.82 | | 0.20 | |
| L'Aubette / Ambleville | 0.00 | -2.98 | 0.68 | | 0.02 | -4.46 |
| La Semoigne / Verneuil | | | | | 0.67 | |
| L'Aisne / Berry-au-Bac | | | 0.00 | 111.55 | 0.77 | |
| La Vesle / Chalons-sur-Vesle | 0.50 | | 0.25 | | 0.62 | |
| L'Ardre / Faverolles-et-Coemy | | | | | 0.32 | |
| La Vesle / Braine et Cerseuil | 0.01 | -57.41 | 0.18 | | 0.19 | |

TABLE S-3 – *Résultats du test de tendance significative de Mann-Kendall appliqué aux débits dans les cours d'eau (premier décile annuel) sur différentes stations et différents intervalles temporels. p : paramètre de significativité.* ***coeff.*** *: Coefficient directeur de la droite de corrélation interpolée ($m^3$/(s*an)) pour les tests avec p inférieur à 0.05. Les intervalles temporels pour lesquels il n'y a pas de valeur p correspondent à des intervalles pour lesquels la chronique n'est pas complète.*