

Synthèse sur la caractérisation de l'hydrodynamisme de l'aquifère rhénan supérieur

Lisa Baulon¹, Manceau JC.¹, Giuglaris E.²

¹ BRGM, 3 av. C. Guillemin, 45060 Orleans, France

² BRGM, rue du Pont-du-Péage Bâtiment H1, 67118 Geispolsheim, France

Cette synthèse est issue du travail réalisé dans le cadre de la sous-action « Analyse de l'évolution historique du niveau de la nappe : calcul des tendances et des ruptures dans séries piézométriques. », (A3.3), réalisé dans le cadre de l'action « Caractérisation de l'évolution des nappes en fonction de divers facteurs (climatiques/anthropiques) » du projet Interreg GRoundwater EvoluTions and resilience of Associated biodiversity – Upper Rhine (GRETA). Pour toute précision sur la méthodologie ou les résultats, le lecteur est invité à consulter le rapport BRGM/RP-74683-FR.

1. Objectif, contexte et méthodes

Les aquifères quels qu'ils soient permettent à la fois le stockage et l'écoulement des eaux souterraines. De grandes disparités dans ces propriétés accumulatrices et conductrices existent entre aquifères, selon le contexte géologique (propriétés des roches, structures géologiques) et la taille de l'aquifère notamment : ces paramètres peuvent ainsi être définis comme internes au système aquifère. En outre, la dynamique des eaux souterraines dépend également de conditions externes à ce système qui reçoit des apports d'eau et subit des exports d'eau. Ces conditions externes sont parfois nommées conditions aux limites du système aquifère et traduisent les échanges entre les eaux souterraines et les autres composantes de l'hydrosystème. Peuvent être cités 1) les échanges avec l'atmosphère, par l'infiltration des précipitations via le sol et son occupation (ex. couvert végétal) et via la zone non-saturée, et 2) les échanges avec les eaux de surface qui peuvent selon les cas de figure drainer (c'est le cas typique des sources) ou alimenter la nappe d'eau souterraine.

Au-delà de ce régime « naturel » des eaux souterraines, l'influence humaine peut également venir modifier ces conditions aux limites via l'exploitation des eaux souterraines pour différents usages, via une modification du régime des eaux de surface (mise en place d'infrastructures sur un cours d'eau par exemple), ou une modification des conditions d'infiltration (changement d'occupation du sol, système de recharge maîtrisée).

La bonne caractérisation spatiale et temporelle du fonctionnement d'un système aquifère, c'est-à-dire des modalités internes et externes explicitées ci-dessus, participe à sa bonne gestion, qu'elle soit saisonnière ou bien à plus long terme, notamment dans le contexte de changement global actuel.

Cette caractérisation n'est toutefois pas chose aisée puisque les facteurs explicatifs, qu'ils soient internes ou externes, ne sont pas toujours quantifiables et/ou observables, qu'ils varient dans le temps et/ou dans l'espace et que leurs effets se combinent. L'évolution de l'altitude du



AGENCE
DE L'EAU
RHIN-MEUSE



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable
brgm



Karlsruher Institut für Technologie



Interreg

Rhin Supérieur | Oberrhein



Cofinancé par
l'Union Européenne
Kofinanziert von
der Europäischen Union



niveau piézométrique est intégratrice de toute cette complexité et, à ce titre, son analyse doit permettre la description spatio-temporelle du fonctionnement hydrogéologique d'un territoire sous réserve 1) d'une couverture suffisamment fine du réseau de suivi (en temps et en espace) et 2) de l'élaboration d'indicateurs permettant de décrire la dynamique des eaux souterraines, avec en particulier, la discrimination des différents facteurs explicatifs de cette dynamique.

Le secteur d'étude, la partie sud de l'aquifère alluvial du Rhin supérieur est localisé dans la plaine du Rhin, entre les contreforts des Vosges (France) et de la forêt Noire (Allemagne). Ce réservoir important concentre des enjeux de différentes natures puisque sa ressource est exploitée pour de multiples usages anthropiques par des prélèvements en forage : usages industriels, alimentation en eau potable ou encore usages agricoles.

Par ailleurs, la nappe de l'aquifère rhénan joue un rôle prépondérant d'alimentation en eau de zones humides et est intimement liée au réseau hydrographique de surface, en témoignent les nombreux cours d'eau phréatiques, de part et d'autre de la frontière franco-allemande. Dans ce contexte complexe, l'identification des facteurs explicatifs majeurs de la dynamique de la nappe, c'est-à-dire explicatifs des évolutions historiques du niveau de la nappe est primordiale, notamment pour pouvoir ensuite prévoir les évolutions futures possibles.

En outre, la nappe rhénane bénéficie d'une densité remarquable de points de suivi piézométriques (1680 chroniques ; Illustration 1¹) permettant une caractérisation fine de la nappe dans le temps et dans l'espace.

¹ Source des données : l'APRONA (Association pour la Protection de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace) côté français (complétées par quelques chroniques fournies par VNF – Voies Navigables de France) et de la LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) côté allemand

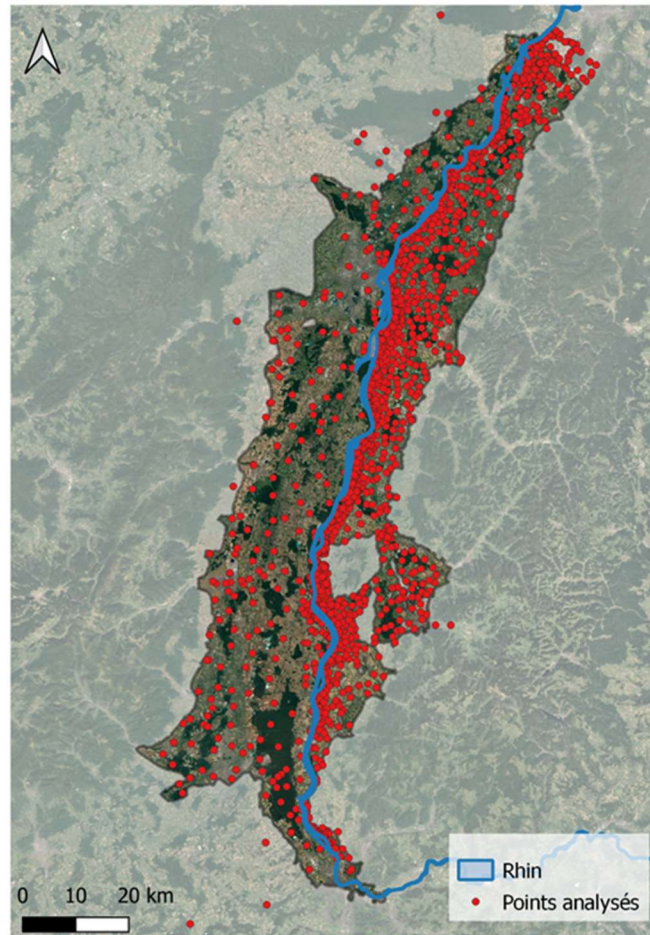


Illustration 1 : Localisation des piézomètres dont les données ont été analysées au cours de l'étude.

Pour mener à bien cette caractérisation, des indicateurs piézométriques ont été développés, selon différentes approches et méthodologies complémentaires : des analyses temporelles et spectrales ont été menées sur les chroniques piézométriques seules, puis des analyses corrélatoires entre les chroniques piézométriques et, respectivement, les chroniques climatiques (pluie efficaces) et les chroniques de débit du Rhin. Le jeu d'indicateurs obtenus permet *in fine* de discuter les tendances et les ruptures identifiées dans les chroniques piézométriques, les propriétés hydrodynamiques (inertie) de la nappe rhénane ainsi que l'importance relative des différents forçages extérieurs (influence climatique, influence du Rhin, influence des prélèvements) dans les variations piézométriques. A partir de la combinaison de ces résultats, une première sectorisation du fonctionnement hydrodynamique de la nappe rhénane est proposée. Cette sectorisation hydrodynamique permettra notamment dans les tâches ultérieures du projet de i) construire les modèles qui serviront aux simulations de niveaux de nappe en prenant bien en compte les différents forçages de la piézométrie, ii) analyser la réponse de la nappe aux extrêmes climatiques en fonction de son inertie.

2. Carte hydrodynamique basée sur les indicateurs piézométriques et ses secteurs

Les indicateurs développés au cours de cette étude permettent d'aboutir, simplement et sans l'utilisation d'approches plus élaborées de clustering ou de modélisation, à une première carte hydrodynamique de la nappe rhénane en fonction des forçages explicatifs de la piézométrie (Illustration 2). Cette carte est amenée à évoluer en fonction des résultats issus de ces approches de sectorisation plus élaborées.

Trois grands ensembles peuvent être identifiés à partir des indicateurs (les couleurs dans le texte sont associées aux couleurs sur la carte en Illustration 2) :

- 1) Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages ayant pour **forçage dominant le débit du Rhin**.
Il s'agit des ouvrages présentant une corrélation importante avec les débits du Rhin et qui sont, en toute logique, situés à proximité du Rhin. Compte-tenu de l'influence anthropique liée à la gestion des barrages sur le Rhin, ce sont souvent les piézomètres soit éloignés des aménagements soit situés en aval qui présentent un lien important avec les débits du Rhin.
- 2) Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages ayant pour **forçage dominant le climat**. Il s'agit des piézomètres pour lesquels la corrélation entre leurs hauteurs piézométriques et les hauteurs des pluies efficaces moyennées est importante. Ces ouvrages sont situés pour la plupart dans la plaine, éloignés du Rhin, mais certains sont tout de même situés à proximité du fleuve. Ces secteurs de la nappe dont le forçage dominant est le climat peuvent être subdivisés en 3 sous-ensembles :
 - a. *Les secteurs de la nappe avec une dynamique peu inertielle (avec une dominance de fluctuations rapides et annuelles)*
 - b. *Les secteurs de la nappe avec une dynamique moyennement inertielle*
 - c. *Les secteurs de la nappe avec une dynamique très inertielle (avec une dominance de fluctuations lentes et pluriannuelles)*
- 3) Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages ne présentant **pas de forçage clairement identifié**. Il s'agit des ouvrages pour lesquels la corrélation avec les débits du Rhin et les pluies efficaces moyennées sur l'impluvium sont faibles. Bien souvent, ces ouvrages sont situés à proximité du Rhin, et en amont des barrages.

Pour les secteurs de la nappe dont la dynamique est essentiellement liée aux variations climatiques 2), des baisses saisonnières se produisent parfois sur les niveaux piézométriques, plaidant pour un forçage temporaire additionnel de type prélèvements estivaux (prélèvements pour l'irrigation, reprise par les plantes par évapotranspiration, ...), s'ajoutant au forçage climatique. Une analyse basée sur la précocité des étiages a permis de **sous-sectoriser la nappe en fonction de l'influence présumée de tels prélèvements sur la dynamique de la nappe** :

- Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages avec **un impact fortement suspecté des prélèvements estivaux sur la dynamique de la nappe** via des basses eaux précoces : il s'agit des ouvrages dont les dates médianes des basses-eaux sont comprises entre juin et fin août. Les piézomètres concernés sont indiqués par une bordure noire sur l'Illustration 2.
- Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages pour lesquels **l'impact des prélèvements estivaux sur la dynamique de la nappe est plus incertain**, avec une précocité moindre des basses-eaux. Il s'agit des ouvrages dont les dates médianes des basses-eaux apparaissent durant le mois de septembre. Les piézomètres concernés sont indiqués par une bordure grise sur l'Illustration 2.



AGENCE
DE L'EAU
RHIN-MEUSE



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable
brgm



KIT
Karlsruher Institut für Technologie



La Région
Grand Est



Interreg
Rhin Supérieur | Oberrhein



Cofinancé par
l'Union Européenne
Kofinanziert von
der Europäischen Union



greta

- Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages pour lesquels **aucun impact des prélèvements estivaux sur la dynamique de la nappe n'est identifié** par l'indicateur basé sur la précocité des basses-eaux. Pour ces secteurs, la dynamique de la nappe et des basses eaux dépend principalement de l'influence climatique. Les piézomètres concernés sont indiqués par une bordure blanche sur l'illustration 2.

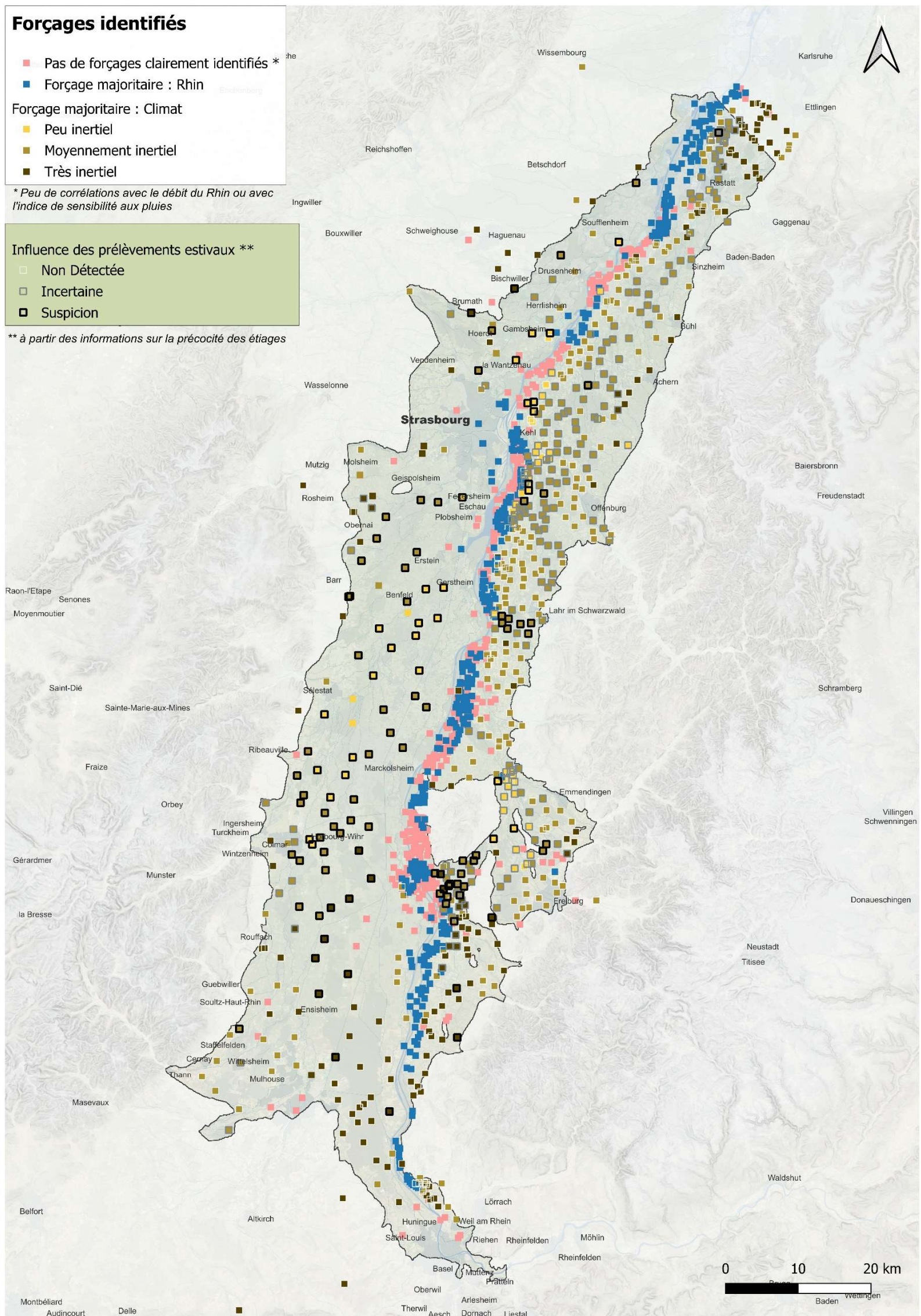
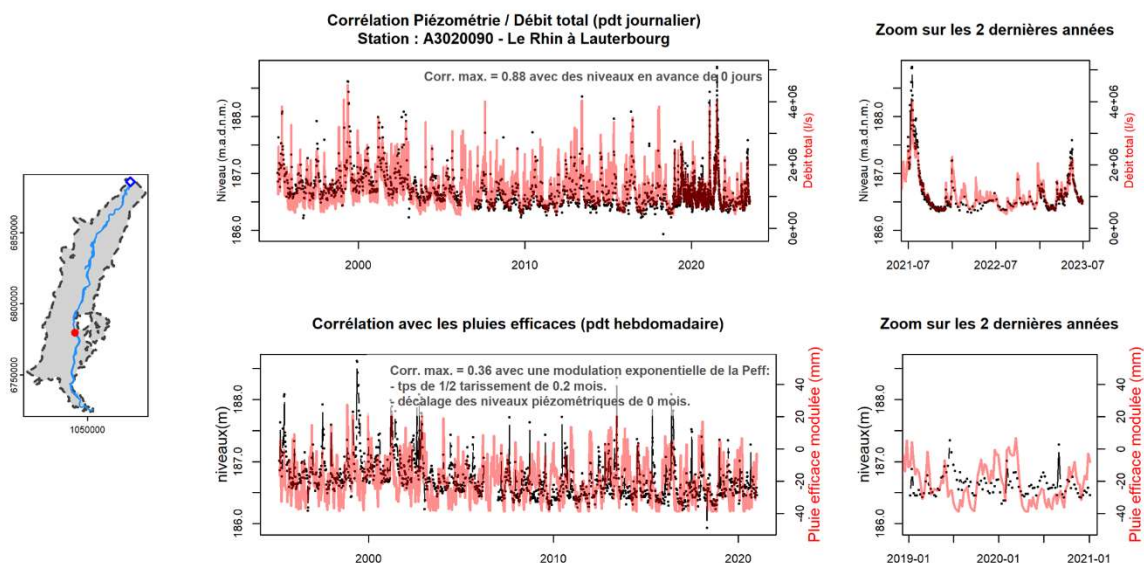


Illustration 2 : Carte hydrodynamique de la nappe rhénane basée sur les indicateurs piézométriques calculés dans cette étude.

2.1. Secteurs de la nappe ayant pour forçage dominant le Rhin

Dans le but d'identifier les secteurs de la nappe influencés par le Rhin, la ressemblance entre la chronique débitmétrique du Rhin à Lauterbourg et les chroniques piézométriques a été évaluée à l'aide d'une analyse corrélatoire. Les secteurs où une bonne corrélation est notée sont soit situés en aval d'aménagements hydroélectriques du Rhin (Illustration 3), soit dans la partie amont de la zone d'étude et à proximité du Vieux Rhin.

Ouvrage 2003/019-1 – Aval de la centrale hydroélectrique de Brisach



Ouvrage 02351X0013 – Aval de la centrale hydroélectrique de Gambsheim

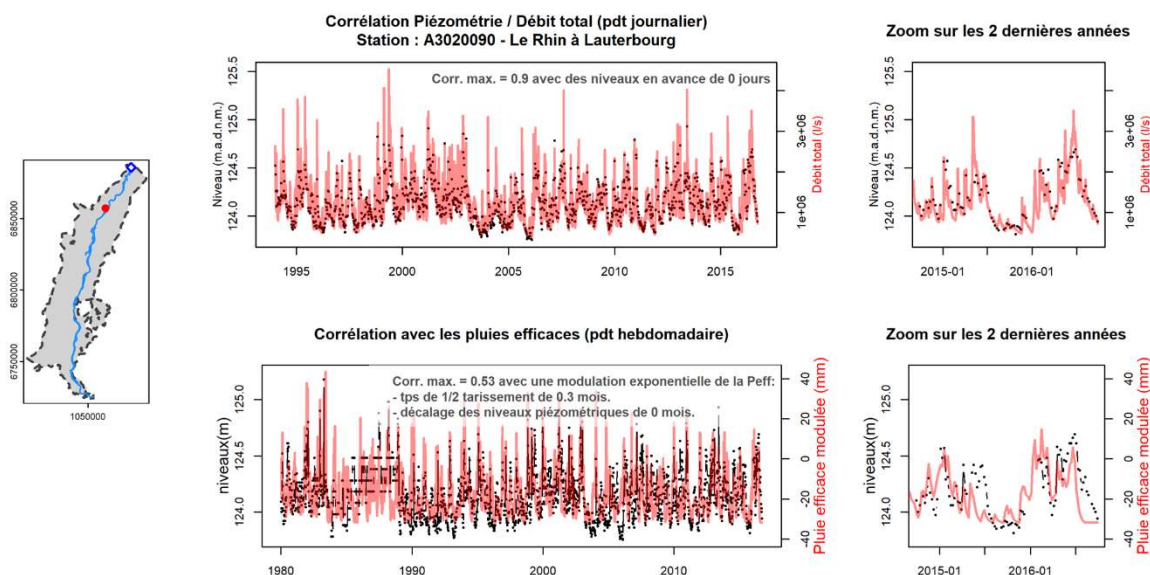


Illustration 3 : Corrélation croisée entre les niveaux piézométriques et le débit total ou les pluies efficaces modulées pour deux ouvrages situés en aval d'aménagements hydroélectriques sur le Rhin.

En parallèle, ces secteurs présentent une piézométrie plus faiblement corrélée à la pluviométrie (Illustration 3). Les niveaux des eaux souterraines du secteur évoluent donc principalement selon les niveaux du Rhin dont les variations sont différentes de celles de la pluie efficace du secteur d'étude : le Rhin est influencé fortement par sa partie alpine (en amont de la zone d'étude, en Suisse) et présente un régime nivo-glaciaire avec des étiages en hiver et des hautes-eaux au printemps.

2.2. Secteurs de la nappe ayant pour forçage dominant le climat

D'autres secteurs de la nappe présentent quant à eux des niveaux contrôlés majoritairement par les variations climatiques annuelles voire pluriannuelles, via la recharge des nappes. Pour identifier ces secteurs, la ressemblance entre la piézométrie et la pluie efficace modulée a été évaluée à l'aide d'une analyse corrélatoire.

En plaine, les évolutions observées des niveaux piézométriques répondent nettement aux apports dus aux précipitations efficaces et à la recharge de la nappe : le forçage climatique apparaît donc comme un moteur fortement explicatif des variations piézométriques observées. Il est à noter que, de façon générale, de meilleurs coefficients de corrélation ont été obtenus non pas en calculant des pluies efficaces locales mais des pluies efficaces globales/régionales calculées sur les bassins versants en rive gauche du Rhin pour les ouvrages français et en rive droite pour les ouvrages allemands : cela traduit une alimentation de la nappe en plaine dépendante (i) des précipitations locales, mais également (ii) issues des reliefs par l'intermédiaire d'échanges souterrains ou superficiels via le réseau hydrographique provenant des Vosges ou de la Forêt Noire. A noter également que les évolutions de la nappe dans les secteurs de plaine éloignés du Rhin, même si elles sont fonction du forçage climatique, sont loin d'être similaires puisque la nappe selon les secteurs n'a pas la même réponse à ce forçage (pas la même inertie). Ceci est abordé dans la section 2.2.1 de cette synthèse.

Les secteurs où la corrélation entre niveau piézométrique et pluie efficace est bonne sont également ceux où des tendances à la baisse sur les basses et moyennes eaux piézométriques sont souvent observées depuis 1980 et 2000, généralement en concordance avec les tendances à la baisse (pas forcément statistiquement significative) des pluies efficaces.

2.2.1. Degré d'inertie de ces secteurs

Pour les secteurs affectés majoritairement par le forçage climatique, les vitesses de réaction de la nappe à la recharge (ce qu'on appelle parfois l'inertie) peuvent être très variées en fonction des propriétés locales du système aquifère.

Se dégagent ainsi différents sous-secteurs en fonction du degré d'inertie de la nappe :

- Les **secteurs les plus inertiels** qui réagissent lentement à la recharge et qui varient majoritairement sur des échelles de temps pluriannuelles (Illustration 4a).
- Les **secteurs à faible inertie** qui réagissent rapidement à la recharge et qui varient majoritairement sur des échelles de temps annuelles à infra-annuelles (Illustration 4b).

- Les **secteurs à inertie moyenne** qui varient majoritairement sur des échelles de temps annuelles à pluriannuelles (Illustration 4c).

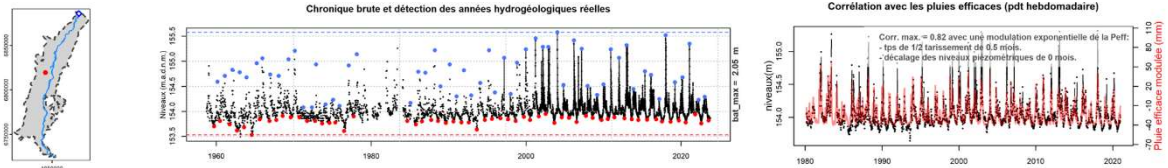
a.

Ouvrage 04133X0033 – Munchhouse (Forêt de la Hardt)



b.

Ouvrage 03081X0038 - Matzenheim



c.

Ouvrage 02725X0025 - Schaeffersheim

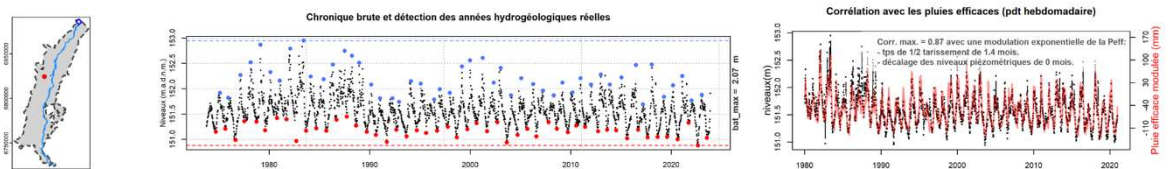


Illustration 4 : Exemple d'ouvrages situés dans des secteurs avec différentes inerties de la nappe avec un ouvrage situé dans un secteur particulièrement inertiel (a), un secteur à faible inertie (b), et un secteur à inertie moyenne (c).

Les **secteurs inertiels** se situent principalement :

- Au nord de Rastatt, en Allemagne et au nord de la zone d'étude, avec une zone d'assez faible superficie mais bien marquée spatialement ;
- Au sud de la zone d'étude, de part et d'autre de la frontière, avec une portion de la nappe également inertielle, toujours assez marquée spatialement et assez étendue ;
- De façon plus partielle, à proximité du piémont, en bordure de la plaine. Ces zones se retrouvent assez régulièrement aux limites du secteur d'étude et semblent assez faiblement étendues.

En outre, le décalage temporel entre les pluies efficaces et les niveaux piézométriques est plutôt conséquent (1 à 6 mois) au nord de Rastatt et au niveau de la forêt de la Hardt. Ces deux secteurs se caractérisent par un niveau de la nappe profond, et ainsi une épaisseur de zone non-saturée relativement importante, ce qui pourrait expliquer ces décalages. Le décalage d'une demi-année dans le sud de l'aquifère du Rhin supérieur pourrait être aussi lié à une alimentation (au moins partielle) du Rhin, ou bien à des relations avec d'autres nappes inertiels (Sundgau).

Les **secteurs à faible inertie et à inertie moyenne** se situent plutôt au centre de la zone d'étude. L'inertie de ce secteur central n'est toutefois pas homogène mais évolue de façon assez continue. A noter que la nappe est faiblement inertielle :

- Plutôt aux abords du Rhin ;
- A proximité de l'Ill et de la Zembs ;

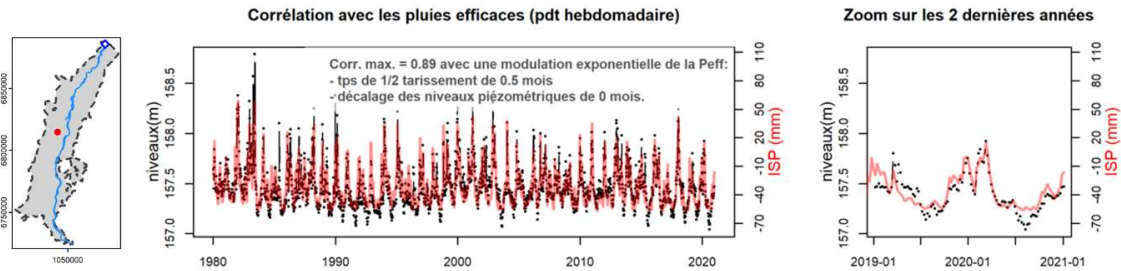
- Sur le flanc Est du Kaiserstuhl.

2.2.2. Influence des prélèvements estivaux (prélèvements pour l'irrigation, reprise évapotranspiratoire, ...)

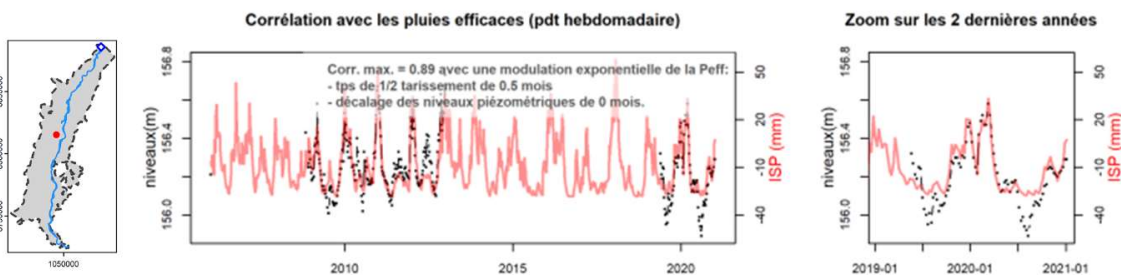
L'analyse plus poussée de certaines chroniques montre que, dans certains secteurs où la corrélation pluie efficace-niveaux piézométriques est globalement bonne, des baisses saisonnières se produisent sur les niveaux piézométriques en période estivale sans que ces évolutions ne soient visibles sur les pluies efficaces (modulées²) (Illustration 5). Ceci plaide pour un forçage temporaire additionnel de type prélèvements estivaux, s'ajoutant au forçage climatique et impactant la dynamique de la nappe. Etant donné les caractéristiques de la zone d'étude, les prélèvements estivaux envisagés sont principalement de deux types : les prélèvements par des forages pour l'irrigation et la reprise par les plantes directement dans la nappe du couvert végétal/forestier (évapotranspiration) dans un contexte de nappe peu profonde (présence de zones humides).

² La méthodologie du calcul des pluies efficaces modulées est disponible dans le rapport BRGM/RP-74683-FR.

Ouvrage 03081X0025 - Rossfeld



Ouvrage 03082X0264 - Herbsheim



Ouvrage 03078X0333 - Muttersholtz

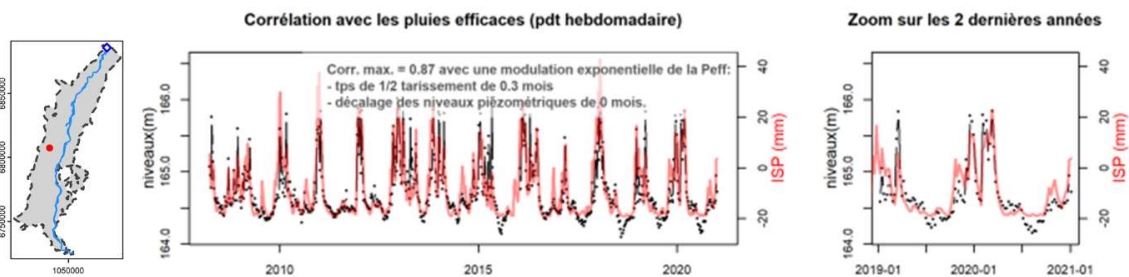


Illustration 5 : Exemples de moins bonnes corrélations entre la piézométrie et les pluies efficaces modulées durant l'été.

La précocité des étiages (i.e. la date des étiages) semble souvent permettre l'identification des ouvrages potentiellement impactés par ces prélèvements. En effet, les basses eaux piézométriques sont naturellement atteintes à partir d'octobre. Mais sur le secteur d'étude, les étiages peuvent apparaître plus tôt, ce qui est probablement le signe de phénomènes additionnels. En fonction de la précocité de l'étiage, trois types de secteurs sont identifiés :

- Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages avec **un impact fortement suspecté des prélèvements estivaux sur la dynamique de la nappe** (basses eaux comprises entre juin et fin août).
- Les secteurs de la nappe regroupant les ouvrages pour lesquels **l'impact des prélèvements estivaux sur la dynamique de la nappe est plus incertain** (basses eaux durant le mois de septembre).
- Les **secteurs de la nappe regroupant les ouvrages pour lesquels aucun impact des prélèvements estivaux sur la dynamique de la nappe n'est identifié** (basses eaux à partir du mois d'octobre).

Sur la base de cette classification, plusieurs zones peuvent alors être mises en évidence :

- En Alsace/France :
 - **Une zone de superficie importante d'Ensisheim à Strasbourg** (Grand Ried) avec un impact des prélèvements estivaux fortement suspecté avec des basses eaux précoces : au sein de cette zone, au sud de Colmar, un impact sur la dynamique piézométrique estivale est identifié malgré l'inertie importante de la nappe.
 - **Une zone de plus faible taille au nord de Strasbourg** avec un impact des prélèvements estivaux fortement suspecté avec des basses eaux précoces.
- Mais également en Bade-Wurtemberg/Allemagne :
 - **Plusieurs zones de faible superficie mais avec une densité de points importante au Sud du Kaiserstuhl, au centre du secteur d'étude à proximité de Lahr/Schwarzwald** avec un impact des prélèvements estivaux fortement suspecté avec des basses eaux précoces.
 - **Une zone de superficie plus importante au Nord du secteur d'étude (d'Offenburg à Sinzheim environ)** mais pour laquelle les incertitudes sont également plus importantes (basses eaux en septembre), ainsi qu'une **petite zone à l'extrême Nord** du secteur d'étude avec les mêmes caractéristiques.

L'illustration 6 montre un exemple de l'évolution de la date des étiages piézométriques pour un piézomètre situé au Sud du Kaiserstuhl. Les statistiques sur la date de l'étiage (graphiques du bas) indiquent une plus grande précocité de l'étiage à partir des années 1980 : la date médiane des basses eaux évoluant des mois de novembre/janvier à début septembre.

Ouvrage 105/019-0 – Breisach am Rhein – Sud du Kaiserstuhl

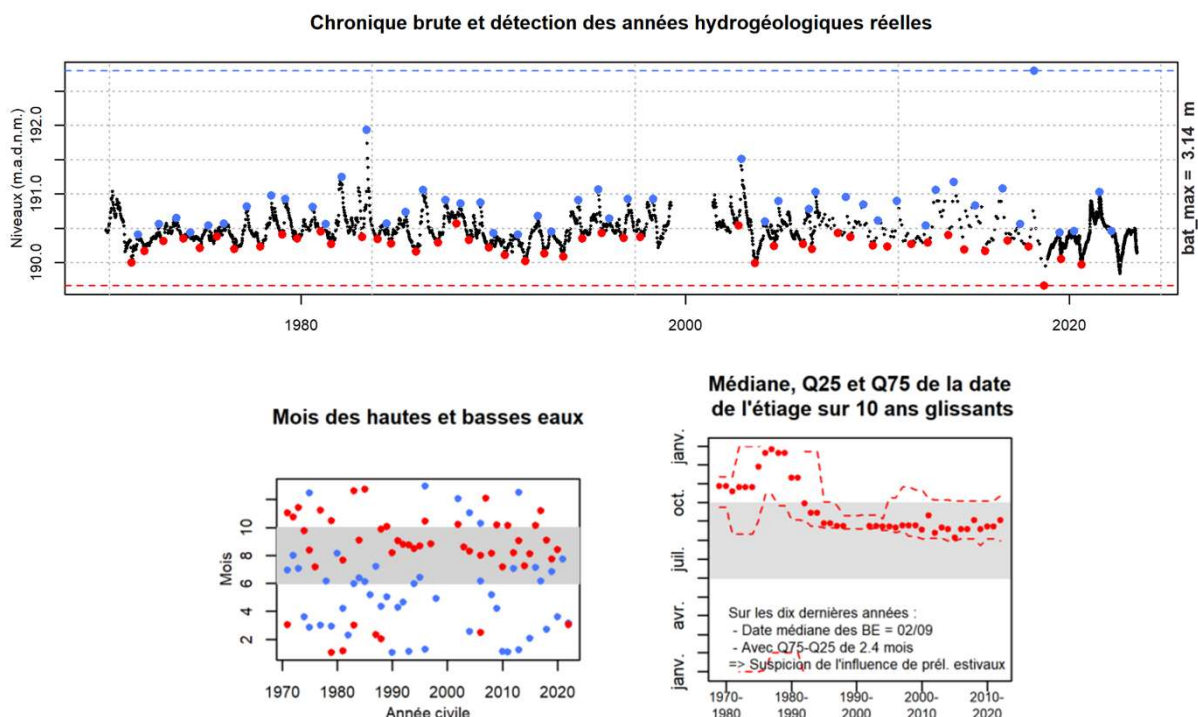


Illustration 6 : Evolution de la date des étiages piézométriques pour un piézomètre situé au Sud du Kaiserstuhl.

L'analyse des données piézométriques horaires, lorsqu'elles sont disponibles, permet de préciser l'analyse basée sur la précocité des étiages, notamment lorsqu'il est difficile de trouver une relation avec les volumes prélevés en lien avec l'irrigation (difficulté fréquente en Allemagne, excepté pour la zone au sud du Kaiserstuhl). Les chroniques piézométriques horaires peuvent en effet mettre en évidence des fluctuations piézométriques intra-journalières provenant de la variation des prélèvements au cours d'une journée. Si ces variations dépassent les variations journalières, l'influence de prélèvements sur la piézométrie peut être suspectée, particulièrement lorsqu'elles se produisent en période estivale.

Au sud du Kaiserstuhl, par exemple, les variations horaires jugées importantes par mois se concentrent entre les mois de juin et août avec un maximum en juillet (Illustration 7). De plus, la distribution temporelle des descentes et remontées piézométriques au cours de la journée (en rouge) plaident pour la présence d'un forage avec pompage intermittent à proximité. Ceci semble corroborer l'analyse de précocité des étiages et l'influence de pompes en nappes à proximité du piézomètre.

Ouvrage 105/019-0 – Breisach am Rhein – Sud du Kaiserstuhl

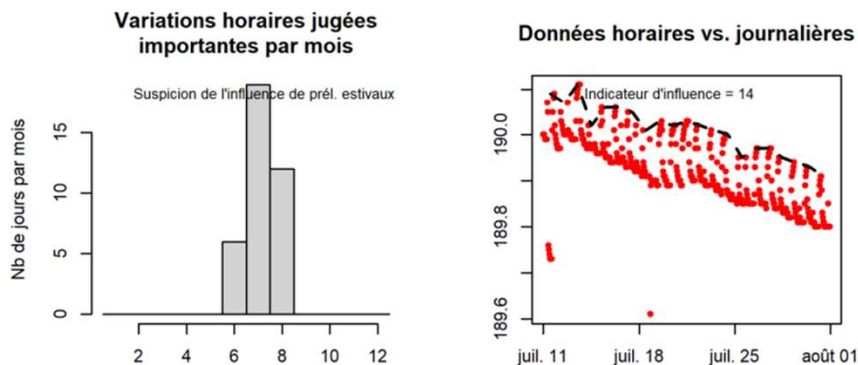


Illustration 7 : Evaluation de l'importance des variations horaires (en rouge) par rapport aux variations journalières (en noir) sur le graphique de droite. Le graphique de gauche indique le nombre de jours par mois pour lesquels les variations horaires sont nettement supérieures aux variations journalières.

Au moment d'écrire cette synthèse, et en l'état actuel des connaissances, il est difficile de distinguer véritablement l'impact respectif de la reprise évapotranspiratoire par les plantes et des prélèvements par forage pour l'irrigation sur les niveaux piézométriques. Cette analyse ne peut donc se substituer à une analyse locale basée sur la confrontation entre les observations piézométriques et les volumes prélevés (si possible à un pas de temps journalier), ou encore des données locales d'évapotranspiration.

2.3. Secteurs de la nappe n'ayant pas de forçage clairement identifié

Certains ouvrages ne présentent pas de forçage clairement identifié puisque ni les pluies locales, ni les débits du Rhin ne semblent expliquer la variabilité observée des niveaux piézométriques. Ces ouvrages sont majoritairement situés aux abords du Rhin, et principalement en amont des ouvrages de régulation. L'évolution de la hauteur du Rhin dans



AGENCE
DE L'EAU
RHIN-MEUSE



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable
brgm



Karlsruher Institut für Technologie



La Région
Grand Est



Interreg
Rhin Supérieur | Oberrhein



Cofinancé par
l'Union Européenne
Kofinanziert von
der Europäischen Union



ces secteurs, dépendant notamment des règles et modalités de régulation, pourrait expliquer les évolutions piézométriques observées. Toutefois, aucune chronique de hauteur du Rhin n'était disponible au moment de l'étude, il n'a donc pas été possible de valider l'hypothèse formulée.

Quelques ouvrages dans la plaine du Rhin ne présentent pas non plus de forçage clairement identifié des niveaux piézométriques d'après les analyses réalisées au cours de la sous-action A3.3. L'influence des débits et hauteurs des cours d'eau vosgiens et de la Forêt Noire sur la piézométrie pourrait ne pas être à exclure. Cette hypothèse sera vérifiée dans le cadre des travaux de la sous-action « Analyse et interprétation sur chaque secteur **des relations entre le niveau de la nappe, les rivières** et les prélèvements dans l'aquifère rhénan » (A3.7.).

3. Bilan de l'étude et apports pour les actions ultérieures au projet GRETA

La carte hydrodynamique de la nappe de l'aquifère du Rhin supérieur a été construite via l'analyse des chroniques piézométriques à disposition sur l'aquifère rhénan et de leur ressemblance avec les variables climatique (pluies efficaces) et hydrologique (débit du Rhin). L'analyse croisée de ces différents indicateurs du fonctionnement de la nappe permet d'aboutir à une première sectorisation hydrodynamique telle que proposée en Section 2. Les secteurs probablement soumis à une influence de prélèvements estivaux (prélèvements pour l'irrigation, reprise évapotranspiratoire, ...) ont également été identifiés.

Cette étude préalable permet une première identification des forçages contrôlant l'évolution des niveaux piézométriques, ce qui participera à :

- Une meilleure gestion de la nappe, qu'elle soit saisonnière ou à plus long terme, notamment dans le contexte de changement global actuel.
- La construction de secteurs via la sous-action A3.4. : « Classification et découpage de l'aquifère rhénan dans la zone d'étude par secteurs homogènes ou ayant un comportement hydrogéologique identique » du projet Interreg GRETA.
- La construction des modèles Gardenia ou d'intelligence artificielle qui serviront pour effectuer les simulations d'extrêmes et les projections de niveaux de nappe sous changement climatique (Sous-action A3.5. : « Développement de modèles non spatialisés reproduisant le niveau de nappe à de points d'observations choisis » du projet Interreg GRETA).
- Analyser au mieux la réponse de la nappe aux extrêmes climatiques en fonction de son inertie (Action 5 : « Simulation de l'impact du Changement Climatique jusqu'en 2100 » du projet Interreg GRETA).

Cette carte hydrodynamique pourra être mise à jour par les analyses qui seront réalisées ultérieurement dans le cadre du projet, notamment via les approches de modélisation. L'analyse des liens ESO/ESU réalisée dans le cadre de la sous-action « Analyse et interprétation sur chaque secteur **des relations entre le niveau de la nappe, les rivières et les prélèvements dans l'aquifère rhénan** » devrait également apporter des compléments d'information transfrontaliers quant au lien entre la piézométrie et les débits des cours d'eau vosgiens et de la Forêt Noire.