

# Synthèse sur le déterminisme climatique large-échelle des niveaux piézométriques de l'aquifère rhénan supérieur

Lisa Baulon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM, 3 av. C. Guillemin, 45060 Orleans, France

Cette synthèse résume les résultats de la sous-action « Analyse du déterminisme climatique de l'aquifère rhénan » (A3.6), 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).

## 1. Introduction

L'aquifère du Rhin supérieur peut se subdiviser en différents secteurs en fonction de la dynamique de la nappe (cf. sous-action 3.3 « Analyse de l'évolution historique du niveau de la nappe : calcul des tendances et des ruptures dans les séries piézométriques »). Certains secteurs sont ainsi plutôt réactifs (variations rapides de la nappe sur des échelles annuelles voire infra-annuelles), tandis que d'autres sont plutôt inertIELS (variations lentes de la nappe sur des échelles pluriannuelles). Ceci dépend en grande partie des propriétés de l'aquifère. Pour les secteurs les plus inertIELS, comme l'exemple de la nappe rhénane choisi, représenté par le piézomètre d'Epfig en France, en rive gauche du Rhin (Figure 1), les variations annuelles sont négligeables par rapport aux variations pluriannuelles. Et ces variations pluriannuelles de la nappe sont liées à des processus atmosphériques large-échelle, c'est-à-dire s'étalant sur la zone Euro-Atlantique.

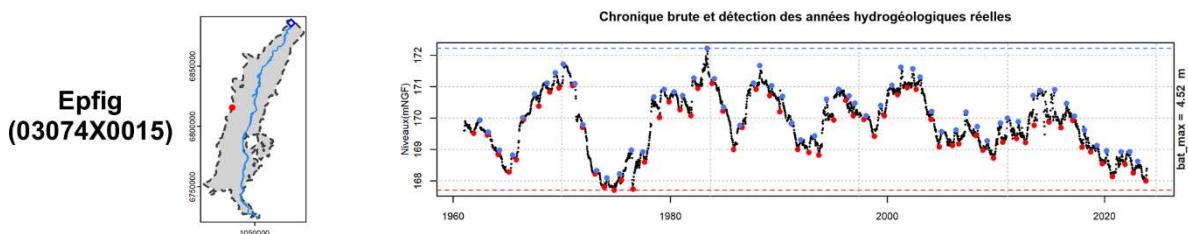


Figure 1 – Chronique piézométrique de la nappe de l'aquifère rhénan à Epfig.

## 2. Etat de l'art et méthodologie

Le périodogramme et la décomposition du signal piézométrique à Efig par transformée en ondelettes continue indique qu'il existe plusieurs variations pluriannuelles de périodicités différentes qui s'entremêlent au sein du signal piézométrique (Figure 2). Ces variations pluriannuelles présentent des périodicités de ~4 ans, ~7 ans, et ~15 ans. Les variations de ~4 ans constituent une part négligeable du signal piézométrique de l'exemple d'Efig mais elles peuvent être significatives pour d'autres piézomètres et secteurs de la nappe rhénane (e.g. l'ouvrage 30/019-8 à Burkheim en Allemagne, en rive droite du Rhin ; Annexe 1).

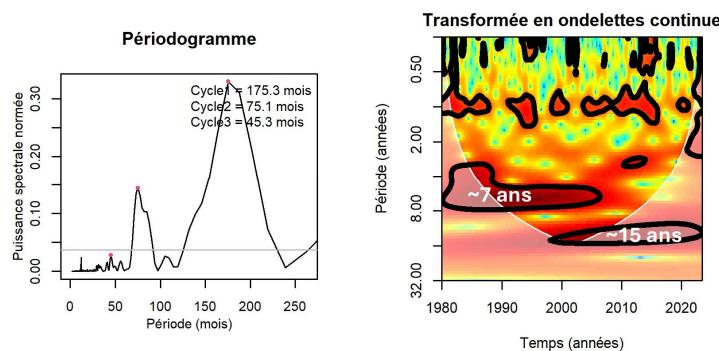


Figure 2 – Périodogramme et transformée en ondelettes continue de la chronique piézométrique d'Efig.

Ces variations pluriannuelles, aussi appelées variabilité basse fréquence, sont associées aux variations pluriannuelles des variables climatiques locales (température, précipitations, évapotranspiration). Elles sont cependant beaucoup moins marquées en amplitude dans le signal des variables climatiques puisque largement masquées par les variations hautes fréquences (infra-annuelles à annuelle). Les bassins versants et les aquifères agissent ensuite comme des filtres passe-bas qui atténuent largement les variations hautes fréquences au profit des variations basses fréquences. Le degré d'atténuation (lissage) de ces variations hautes fréquences dépend largement des propriétés physiques de l'aquifère et de son bassin versant ; et donc certains aquifères ou secteurs d'aquifères vont restituer fortement la variabilité basse fréquence climatique, alors que d'autres vont faiblement la restituer.

Tout comme pour la variabilité haute fréquence, cette variabilité basse fréquence est liée à la variabilité naturelle du climat. Les modes de circulation atmosphérique ou océanique, tels que l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) peuvent décrire cette variabilité climatique. Plusieurs études ont mis en évidence les liens entre ces modes de la circulation atmosphérique ou océanique et les fluctuations basses fréquences (pluriannuelles à multi-décennale) des variables hydroclimatiques (température, précipitations, évapotranspiration) et des niveaux piézométriques en Europe (Rust et al., 2022 et 2024 ; Neves et al., 2019 ; Liesch et Wunsch, 2019 ; Baulon, 2023). La majorité de

ces études utilisent donc des indices avec des centres d'action<sup>1</sup> prédéfinis (e.g. NAO) décrivant certains mécanismes de la circulation atmosphérique au cours du temps.

La majorité de ces études utilisent donc des indices de téléconnexion connus (par exemple NAO), qui sont définis par la localisation de zones de haute ou basse pression atmosphérique à des endroits spécifiques et décrivent les mécanismes de circulation atmosphérique au fil du temps.

Cependant, il est possible que ces indices ne décrivent pas au mieux la variabilité hydro(géo)logique locale. C'est pour cela que de nouvelles approches statistiques ont été développées permettant à partir du signal hydrologique local d'identifier les forçages climatiques large-échelle de la variabilité hydrologique locale (Massei et al., 2017 ; Baulon, 2023). C'est ce type d'approches, et plus précisément une analyse composite par niveau d'échelle<sup>2</sup> (Baulon, 2023), qui est utilisée pour identifier les forçages climatiques large-échelle de la variabilité basse fréquence des niveaux piézométriques de l'aquifère du Rhin supérieur. De plus, l'analyse est réalisée individuellement pour chacune des variabilités basses fréquences (~4 ans, ~7 ans, ~15 ans) puisque les schémas et mécanismes atmosphériques associés à chacune de ces variabilités basses fréquences diffèrent (Dieppois et al., 2016 ; Massei et al., 2017 ; Fossa, 2020 ; Baulon, 2023).

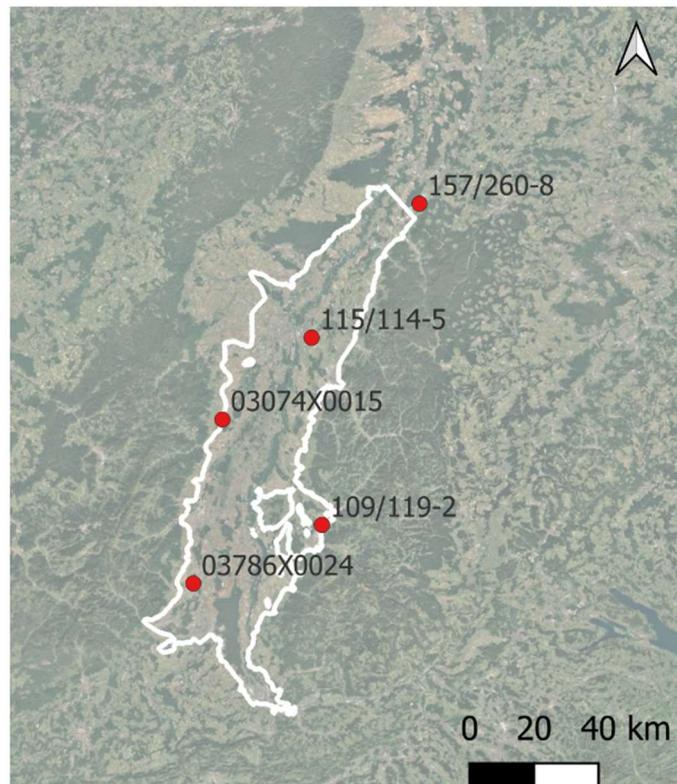
La recherche des drivers climatiques large-échelle se focalise sur la variabilité basse fréquence car la variabilité haute fréquence (infra-annuelle à annuelle) de la piézométrie est plus susceptible d'être affectée par des forçages locaux naturels (propriétés du bassin versant et de l'aquifère, influence du Rhin ou des cours d'eau, effets climatiques locaux) ou anthropiques (e.g. pompage). Elle est donc, pour la piézométrie, souvent peu associée à la variabilité climatique large-échelle.

Enfin, l'analyse est réalisée pour 5 piézomètres situés dans différents secteurs de la nappe rhénane, soit en contexte réactif ou bien inertiel (Figure 3), sur la période 1961-2022. Les chroniques piézométriques sont présentées en Figure 4.

---

<sup>1</sup> Localisation de l'anticyclone ou de la dépression atmosphérique.

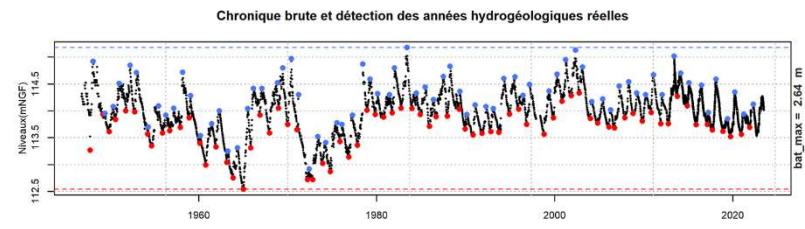
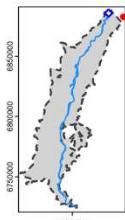
<sup>2</sup> Analyse qui consiste pour chaque fréquence (échelle) du signal piézométrique (e.g. ~7 ans, ~15 ans) à identifier le forçage atmosphérique sur la zone Euro-Atlantique (i.e. le positionnement des anticyclones et dépressions atmosphériques) qui explique ses variations au cours du temps.



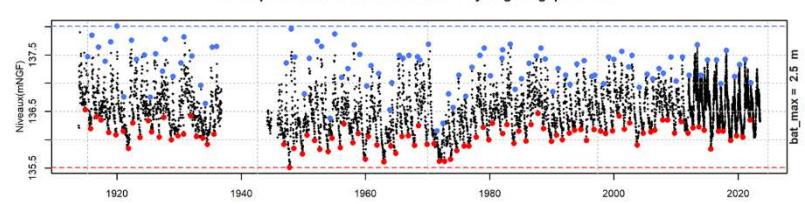
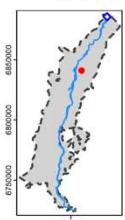
- Piézomètres
- ◻ Aquifère du Rhin supérieur

*Figure 3 – Localisation des 5 piézomètres sélectionnés, en contexte inertiel ou réactif, pour l'identification des forçages climatiques de la variabilité basse fréquence des niveaux piézométriques de l'aquifère rhénan.*

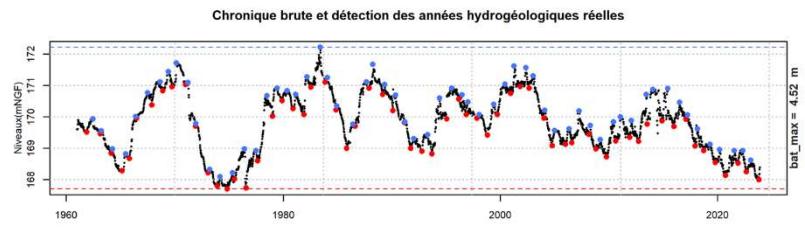
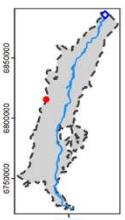
**Ettlingen**  
(157/260-8)



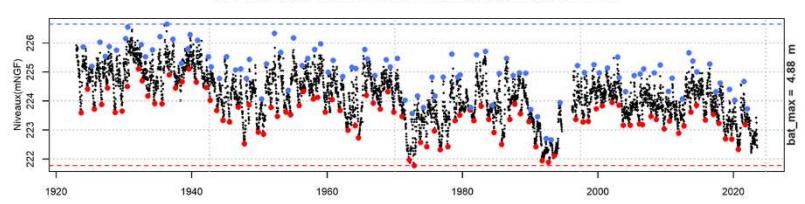
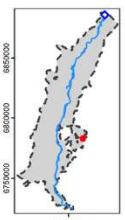
**Kork**  
(115/114-5)



**Epfig**  
(03074X0015)



**Gundelfingen**  
(109/119-2)



**Merxheim**  
(03786X0024)

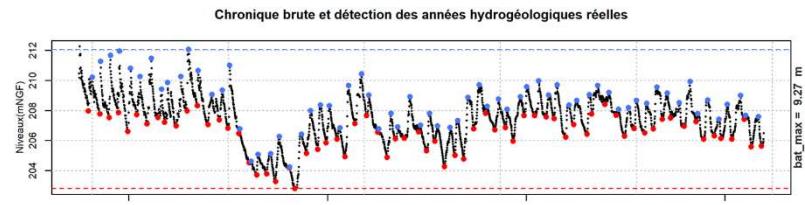
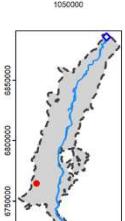


Figure 4 – Chroniques piézométriques des 5 piézomètres sélectionnés pour l'identification des forçages climatiques de la variabilité basse fréquence des niveaux piézométriques.

### 3. Forçages climatiques large-échelle des niveaux piézométriques

Les forçages climatiques large-échelle de la variabilité basse fréquence des niveaux piézométriques sont identiques pour tous les piézomètres analysés de l'aquifère rhénan. Par conséquent, seuls les résultats pour le piézomètre d'Epfig sont présentés. Les résultats pour l'ensemble des piézomètres analysés sont disponibles en Annexe 2.

La Figure 5 définit la structure atmosphérique associée à la variabilité des niveaux piézométriques. Brièvement, pour chaque maille du champ atmosphérique est calculée la corrélation entre une fréquence des hauteurs géopotentielles<sup>3</sup> (e.g. ~7 ans) et cette même fréquence pour la piézométrie de l'aquifère rhénan. Ce calcul, réalisé pour toutes les mailles du champ atmosphérique, va faire ressortir des zones de hauteurs géopotentielles anti-correlées à la piézométrie (en bleu) et des zones corrélées (en rouge). Il en ressort une carte indiquant des structures atmosphériques, à partir desquelles il est possible de déduire les mécanismes atmosphériques qui contrôlent chacune des variabilités basses fréquences du signal piézométrique.

La lecture de ces cartes se fait donc comme pour une carte de corrélation. Ainsi, une zone bleue indique une anti-corrélation entre les hauteurs géopotentielles pour une latitude-longitude donnée et les niveaux piézométriques, et cela pour une fréquence donnée. Par exemple, des hauteurs géopotentielles anormalement basses (souvent synonymes de dépression atmosphérique) lorsque les niveaux piézométriques ont tendance à être hauts ; ou au contraire, des hauteurs géopotentielles anormalement hautes lorsque les niveaux piézométriques ont tendance à être bas.

A l'inverse, une zone rouge indique une corrélation entre les hauteurs géopotentielles pour une latitude-longitude donnée et les niveaux piézométriques, toujours pour une fréquence donnée. Par exemple, des hauteurs géopotentielles anormalement hautes (souvent synonymes d'anticyclone) lorsque les niveaux piézométriques ont tendance à être hauts ; ou au contraire, des hauteurs géopotentielles anormalement basses lorsque les niveaux piézométriques ont tendance à être bas.

Les structures atmosphériques reliées à la variabilité ~4 ans et ~15 ans sont à peu près identiques (Figure 5). Il s'agit de deux centres dépressionnaires qui s'étendent sur l'Atlantique, et suivent sensiblement la trajectoire du Gulf Stream, jusqu'en mer du Nord

---

<sup>3</sup> La hauteur géopotentielle désigne l'altitude pour laquelle on atteint une pression donnée : par exemple les hauteurs géopotentielles à 500hPa désigne l'altitude dans l'atmosphère pour laquelle on atteint la pression de 500hPa. Cette altitude évolue au cours du temps en un point donné du globe en fonction des conditions atmosphériques. C'est un indicateur des systèmes de dépression ou d'anticyclone. Cette altitude de la surface de pression de 500hPa a tendance à augmenter en présence d'anticyclone, et à diminuer en présence de dépression. En climatologie, l'utilisation des hauteurs géopotentielles à 500hPa est souvent préférée à l'utilisation des pressions à la surface de la mer car elles permettent une meilleure approximation des écoulements de l'atmosphère (i.e. sans impact de la rugosité terrestre).

lorsque les niveaux de précipitations et piézométriques sont hauts. Cette circulation d'ouest conduit à un apport d'humidité massif depuis l'Atlantique sur le territoire du fossé rhénan supérieur. A l'inverse, ce type de structure atmosphérique associée à des bas niveaux de précipitation et piézométriques évoque une situation de blocage avec un système de haute pression sur l'Atlantique Nord empêchant l'apport d'humidité sur le fossé rhénan supérieur.

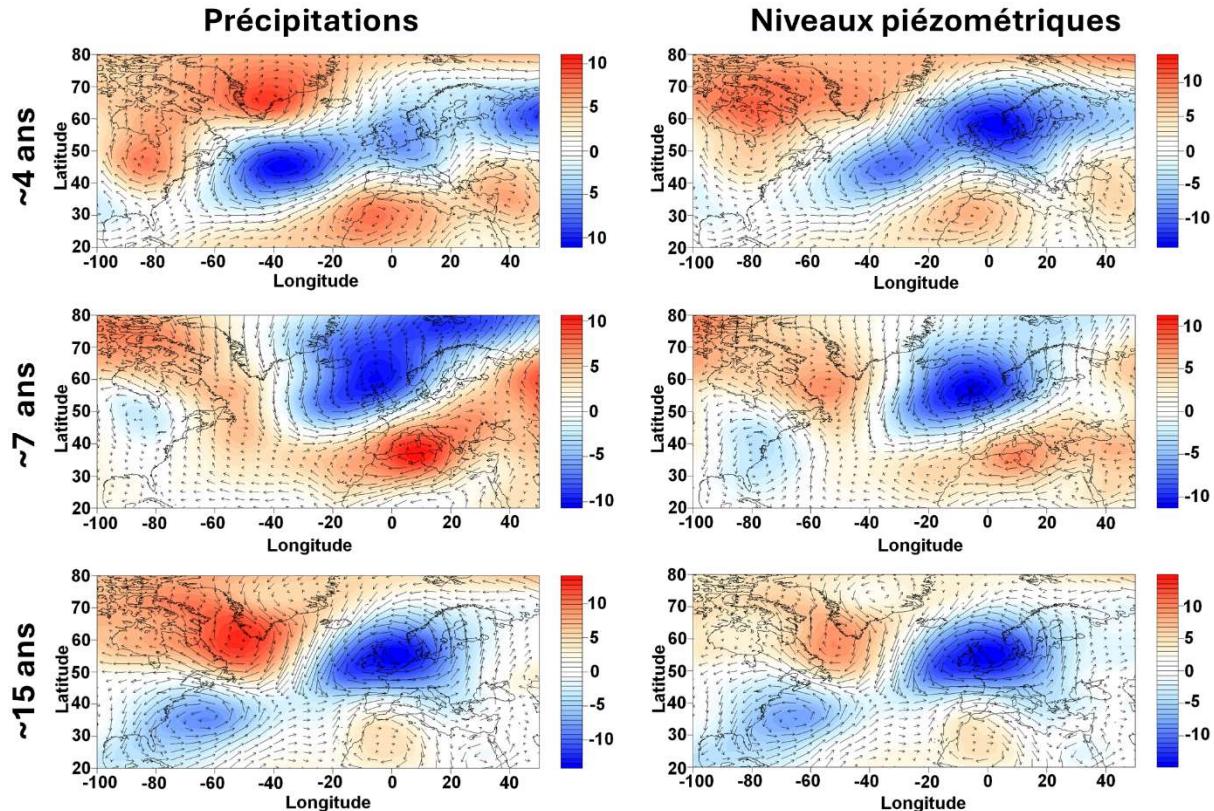


Figure 5 – Composites des données de champs atmosphériques : Z500 - hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) et vecteurs vents à 500 hPa, associés à la variabilité interannuelle à décennale des précipitations et niveaux piézométriques à Efig (nappe rhénane en rive gauche du Rhin, France).

La structure atmosphérique associée à la variabilité ~7 ans est quant à elle bien distincte. Elle est typique d'une circulation d'ouest et plus précisément d'un pattern de type NAO (Figure 5). Le signe des centres d'action indique un régime de type NAO+ lors des périodes de hauts niveaux piézométriques interannuelles, et de type NAO- lors des périodes de bas niveaux piézométriques.

Un régime NAO+ implique alors un creusement de la dépression nord-islandaise et un gonflement de l'anticyclone des Açores, ce qui entraîne une augmentation du gradient de pression méridional. Dans ce contexte, le rail de dépression migre vers le nord de l'Europe, ce qui engendre des conditions chaudes et humides dans ces régions (Hurrell, 1995 ; Hurrell et Deser, 2015 ; Figure 6). Les centres d'actions de la dépression nord-islandaise et de l'anticyclone des Açores doivent être décalés plus au sud que leur position « standard » (indiquée en Figure 6) afin que le rail de dépression affecte fortement

la région de l'aquifère du Rhin supérieur et y apporte des conditions anormalement humides. C'est donc ce qu'indique la structure atmosphérique identifiée en Figure 5.

Le régime NAO+ implique quant à lui des pressions anormalement hautes au niveau de la dépression nord-islandaise et des pressions anormalement basses au niveau de l'anticyclone des Açores, ce qui entraîne une diminution du gradient de pression méridional (Figure 6). Dans ce contexte, le rail de dépression migre vers la région méditerranéenne. Des conditions froides et sèches sont alors observées au nord de l'Europe (Hurrell, 1995) et dans la région du fossé rhénan supérieur.

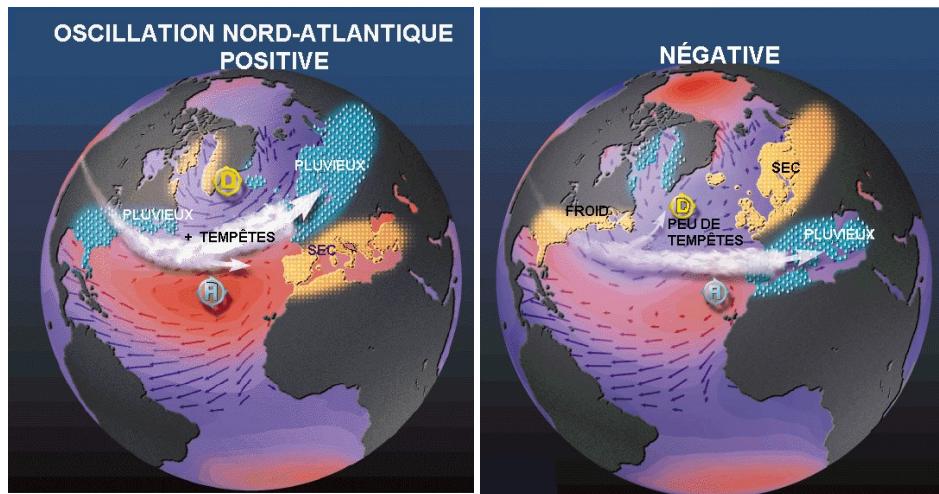


Figure 6 – Schéma de l'effet des phases positives (NAO+) et négatives (NAO-) de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) sur le climat européen. Source : NOAA.

## 4. Conclusion

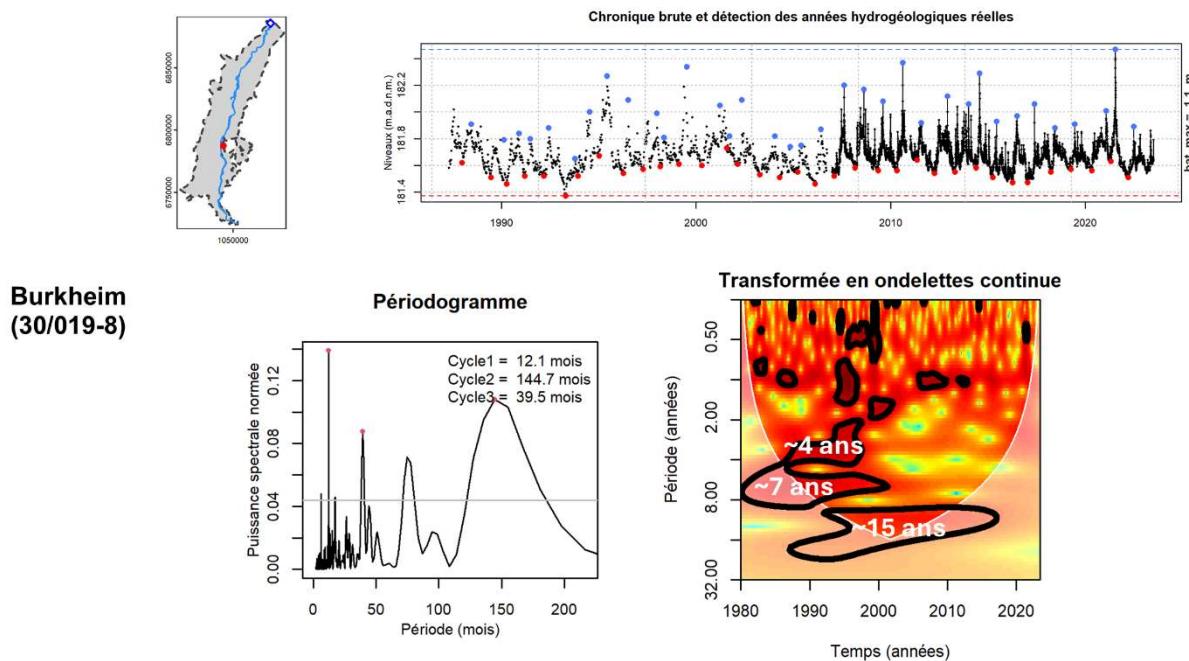
Pour l'ensemble de la nappe de la région du fossé rhénan supérieur, les mécanismes atmosphériques large-échelle associés à chacune des échelles de variabilité basse-fréquence de la piézométrie sont identiques. L'analyse des 5 piézomètres quadrillant l'aquifère rhénan indique des structures et mécanismes atmosphériques similaires. Ces résultats s'accordent avec les résultats d'une précédente étude analysant la piézométrie des aquifères du Bassin parisien dans laquelle les mêmes structures atmosphériques sont identifiées (Baulon, 2023). Cela signifie que les influences climatiques locales (e.g. effet de Foehn lié aux Vosges) affectent peu la variabilité interannuelle à décennale des précipitations et de la piézométrie de l'aquifère dans le fossé rhénan supérieur.

Comme dans les secteurs inertiels, la piézométrie de la nappe dépend essentiellement de mécanismes climatiques large-échelle, il paraît important de bien les prendre en compte dans les modèles de prévision/projection des niveaux de nappe. Par exemple, les résultats de cette étude peuvent avoir des répercussions dans le choix des modèles GCM/RCM utilisés pour réaliser les projections sous changement climatique dans le cadre du projet Interreg GRETA (Action 5 – « Simulation de l'impact du changement climatique jusqu'en 2100 »). L'idée pourrait être de sélectionner les simulations puis projections des modèles GCM/RCM qui reproduisent au mieux cette variabilité basse fréquence, et éventuellement les modes de circulation atmosphériques identifiés ici, ce qui n'est pas toujours le cas. Une simulation correcte de cette variabilité basse fréquence est en effet essentielle car pour certains secteurs de la nappe, la variabilité basse fréquence explique plus de 80% de la variabilité des niveaux piézométriques.

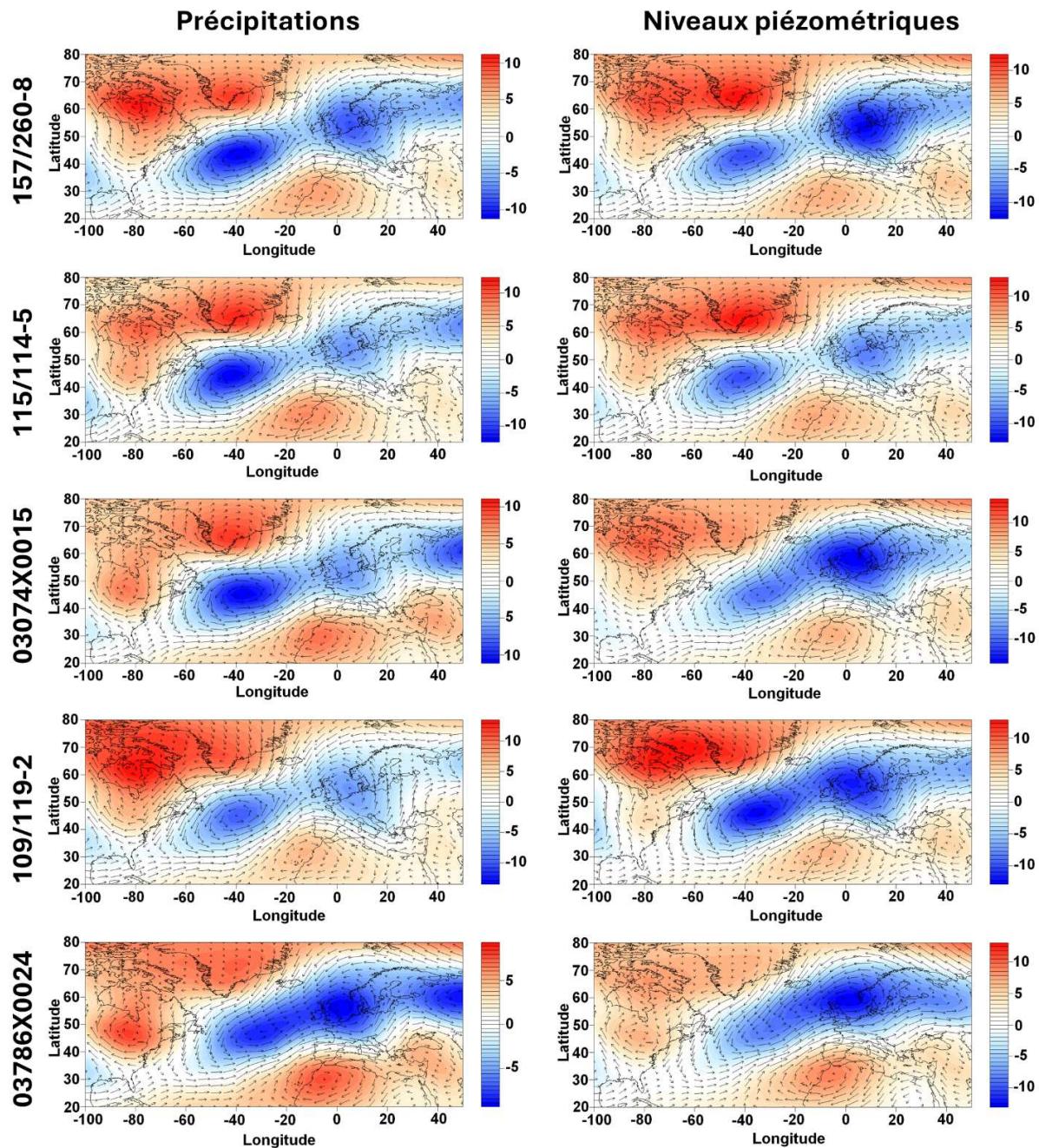
## 5. Références

- Baulon, L., 2023. Déterminisme climatique et hydrogéologique de l'évolution à long terme des niveaux piézométriques. Thèse de doctorat. Normandie Université.
- Dieppois, B., Pohl, B., Rouault, M., New, M., Lawler, D., Keenlyside, N., 2016. Interannual to interdecadal variability of winter and summer southern African rainfall, and their teleconnections. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 6215–6239. <https://doi.org/10.1002/2015JD024576>
- Fossa, M., 2020. Non-linear and non-stationary hydroclimate variability in France and the Euro-Atlantic area (phdthesis). Normandie Université.
- Hurrell, J.W., 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science* 269, 676–679. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>
- Hurrell, J.W., Deser, C., 2015. Northern Hemisphere climate variability during winter: Looking back on the work of Felix Exner. *Meteorol. Z.* 24, 113–118. <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0578>
- Liesch, T., Wunsch, A., 2019. Aquifer responses to long-term climatic periodicities. *J. Hydrol.* 572, 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.060>
- Massei, N., Dieppois, B., Hannah, D.M., Lavers, D.A., Fossa, M., Laignel, B., Debret, M., 2017. Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation: Application to the Seine river catchment, France. *J. Hydrol.* 546, 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.008>
- Neves, M.C., Jerez, S., Trigo, R.M., 2019. The response of piezometric levels in Portugal to NAO, EA, and SCAND climate patterns. *J. Hydrol.* 568, 1105–1117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.054>
- Rust, W., Bloomfield, J.P., Cuthbert, M., Corstanje, R., Holman, I., 2022. The importance of non-stationary multiannual periodicities in the North Atlantic Oscillation index for forecasting water resource drought. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 26, 2449–2467. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2449-2022>
- Rust, W., Bloomfield, J.P., Holman, I., 2024. Long-range hydrological drought forecasting using multi-year cycles in the North Atlantic Oscillation. *J. Hydrol.* 641, 131831. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131831>

# Annexe 1 – Chronique brute, périodogramme et transformée en ondelettes continue du piézomètre de Burkheim



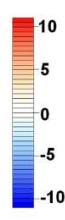
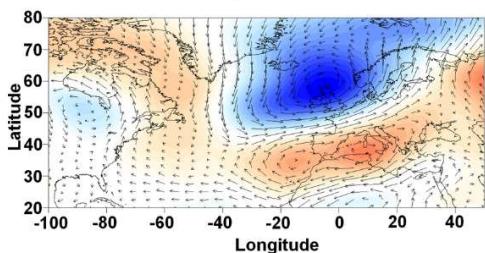
## Annexe 2 – Analyse composite pour les 5 piézomètres de l'aquifère rhénan



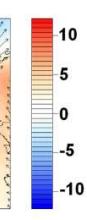
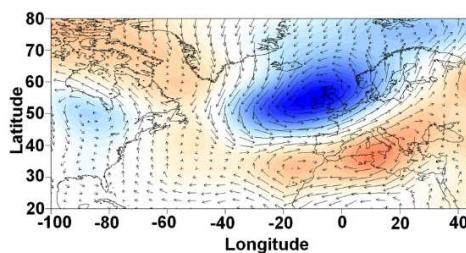
Composites du Z500 (m) et vecteurs vents à 500 hPa associés à la variabilité interannuelle (~4 ans) des précipitations et niveaux piézométriques de chaque piézomètre de l'aquifère rhénan sélectionné.

### Précipitations

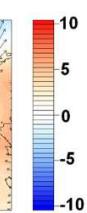
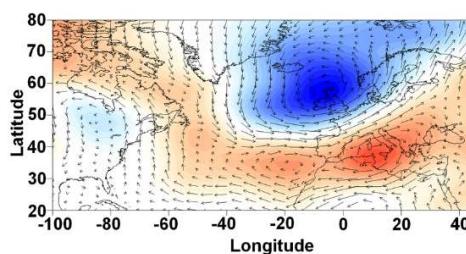
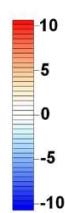
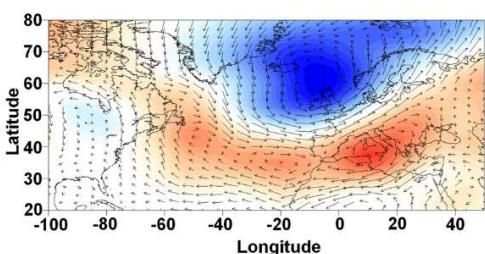
**157/260-8**



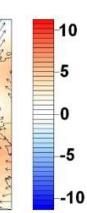
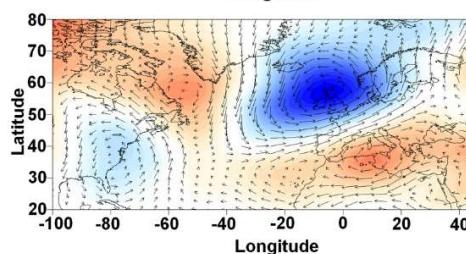
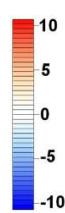
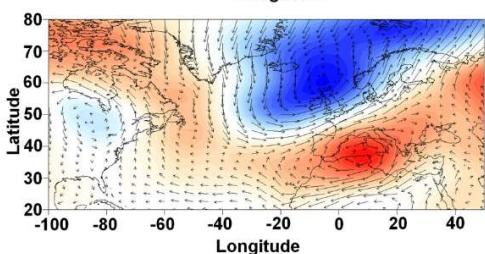
### Niveaux piézométriques



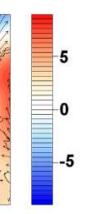
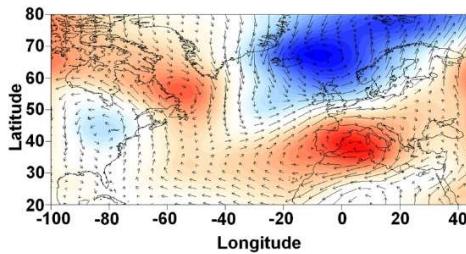
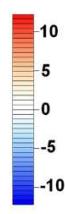
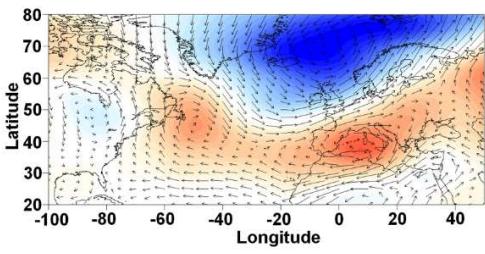
**115/114-5**



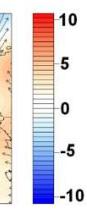
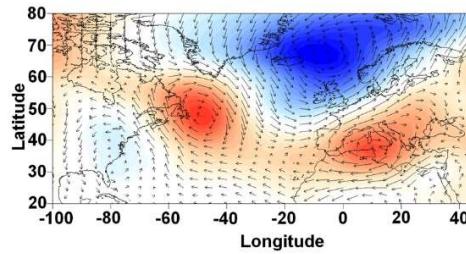
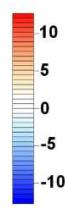
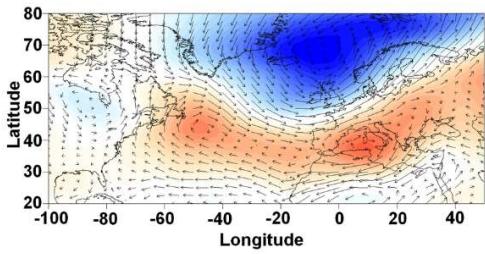
**03074X0015**



**109/119-2**



**03786X0024**

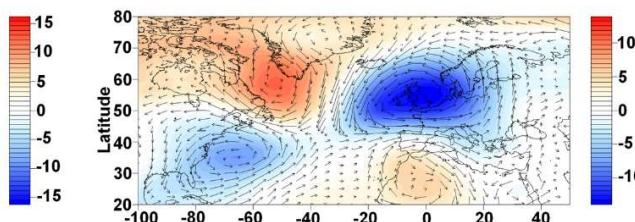
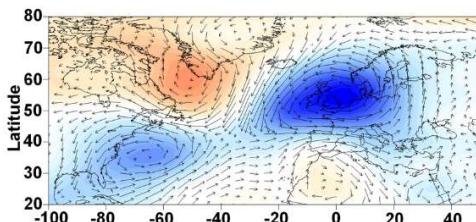


Composite du Z500 (m) et vecteurs vents à 500 hPa associés à la variabilité interannuelle (~7 ans) des précipitations et niveaux piézométriques de chaque piézomètre de l'aquifère rhénan sélectionné.

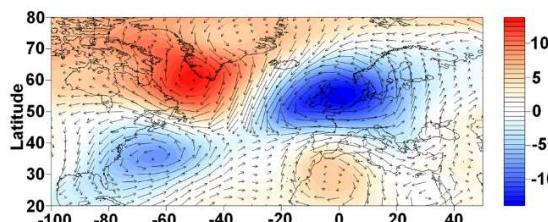
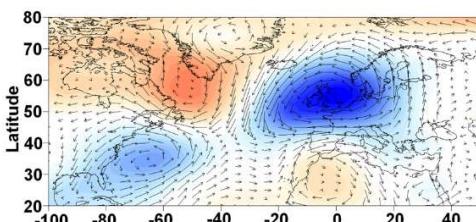
### Précipitations

### Niveaux piézométriques

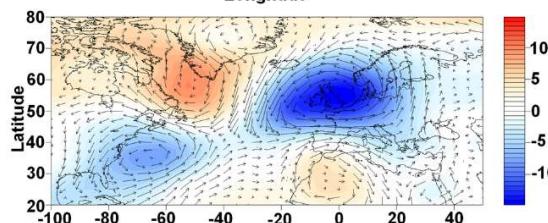
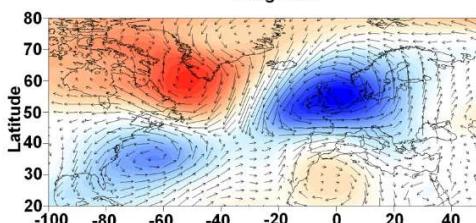
**157/260-8**



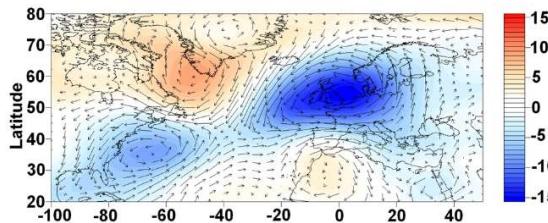
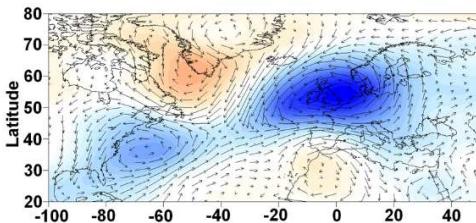
**115/114-5**



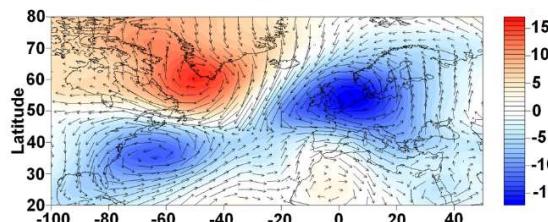
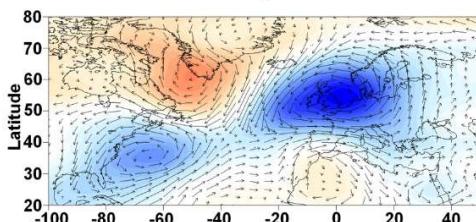
**03074X0015**



**109/119-2**



**03786X0024**



Composites du Z500 (m) et vecteurs vents à 500 hPa associés à la variabilité décennale (~15 ans) des précipitations et niveaux piézométriques de chaque piézomètre de l'aquifère rhénan sélectionné.