



HAL
open science

Comment passer de la prévision des sécheresses hydrogéologiques à leur gestion anticipée? Utilisation de MétéEAU Nappes dans un aquifère crayeux du Nord de la France

Bruno Mougin, Cyril Bourgeois, Adrien Manlay, Noémie Neverre

► To cite this version:

Bruno Mougin, Cyril Bourgeois, Adrien Manlay, Noémie Neverre. Comment passer de la prévision des sécheresses hydrogéologiques à leur gestion anticipée? Utilisation de MétéEAU Nappes dans un aquifère crayeux du Nord de la France. LHB Hydroscience Journal, 2023, LHB: HYDROSCIENCE JOURNAL - Special Section: Secheresse-Etiages 2023, 10.1080/27678490.2023.2282073 . hal-04350578

HAL Id: hal-04350578

<https://brgm.hal.science/hal-04350578>

Submitted on 18 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Comment passer de la prévision des sécheresses hydrogéologiques à leur gestion anticipée ? Utilisation de MétéEAU Nappes dans un aquifère crayeux du Nord de la France

Bruno Mougin, Cyril Bourgeois, Adrien Manlay & Noémie Neverre

To cite this article: Bruno Mougin, Cyril Bourgeois, Adrien Manlay & Noémie Neverre (14 Dec 2023): Comment passer de la prévision des sécheresses hydrogéologiques à leur gestion anticipée ? Utilisation de MétéEAU Nappes dans un aquifère crayeux du Nord de la France, LHB, DOI: [10.1080/27678490.2023.2282073](https://doi.org/10.1080/27678490.2023.2282073)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2023.2282073>



© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 14 Dec 2023.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)

Comment passer de la prévision des sécheresses hydrogéologiques à leur gestion anticipée ? Utilisation de MétéEAU Nappes dans un aquifère crayeux du Nord de la France

Bruno Mougin ^a, Cyril Bourgeois ^{b,c}, Adrien Manlay ^d and Noémie Neverre ^{b,c}

^aBRGM, F-35700 Rennes, France ; ^bBRGM, University of Montpellier, F-34000 Montpellier, France ; ^cG-eau, UMR 183, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Institut Agro, BRGM, F-34000 Montpellier, France ; ^dBRGM, F-59814 Lesquin, France

RÉSUMÉ

La présente communication se focalise sur les eaux souterraines et sur la sécheresse hydrogéologique. Les dernières années 2017–2019–2022 se sont caractérisées par des situations de sécheresses prolongées touchant des zones traditionnellement moins impactées. Face à cette problématique, le système d'alerte précoce MétéEAU Nappes a été mis en place dans un aquifère crayeux du Nord de la France exploité pour divers usages. Cet outil web permet de prévoir les niveaux piézométriques futurs et d'anticiper les risques de sécheresse à venir. Cependant, son utilisation pour gérer la ressource en eau reste limitée si elle ne s'accompagne pas de mesures permettant d'atténuer voire d'éviter les risques de sécheresses. Dans un premier temps, il a été démontré qu'une gestion anticipée, même au début de période de vidange de l'aquifère quelques mois avant la crise sécheresse peut s'avérer insuffisante, puis dans un second temps que le niveau de recharge de l'aquifère en fin d'hiver semble être un indicateur clé du risque à venir de sécheresse hydrogéologique. Pour cet aquifère, des actions de gestion de la ressource en eau devraient être menées dès la période automnale pour favoriser la recharge de l'aquifère en tant qu'assurance contre le risque de sécheresse hydrogéologique.

How can we move forward from forecasting hydrogeological droughts to managing them in advance? Application of the MétéEAU Nappes tool to a chalk aquifer in the north of France

ABSTRACT

This communication focuses on groundwater and hydrogeological drought. Recent years 2017–2019–2022 have been characterised by long droughts affecting traditionally less impacted areas. To tackle this problem, the MétéEAU Nappes early warning system was applied to a chalk aquifer in the North of France pumped by various users. This web tool enables to forecast future piezometric levels and anticipate drought risks. However, its use to manage water resources remains limited if it is not accompanied by measures to mitigate or even avoid drought risks. First, it has been shown that early management, even at the beginning of the period of emptying of the aquifer a few months before the drought crisis may prove insufficient; second, the groundwater recharge level in late winter seems to be a key indicator of the future hydrogeological drought risk. For this aquifer, water resource management actions need to be carried out as early as the autumn period to promote groundwater recharge as an insurance against hydrogeological drought risk.

MOTS-CLÉS

Anticipation ; sécheresse ; gestion ; système d'alerte précoce ; application web

KEYWORDS


Anticipation; drought; management; early warning tool; web application

1. Introduction – Contexte et objectifs du travail mené

Ces dernières années, 2017 et 2019 notamment, se sont caractérisées par des situations de sécheresses prolongées et répétées (Baudouin et al., 2020 ; Henriot et al., 2019), dont le dernier épisode en 2022 (Bertrand et al., 2023 ; Vidal et al., 2023) a conduit à la mise en œuvre de nombreux arrêtés préfectoraux dits « arrêtés sécheresse » entraînant des mesures de restriction des consommations d'eau sur la quasi-totalité du territoire français, voir même des interdictions pour certains usages (exemples : irrigation de certains types de cultures agricoles,

nettoyage des véhicules, arrosage des terrains de sport, remplissage des piscines . . .). Dans certains départements (par exemple : le Finistère, le Var, la Corrèze, l'Aveyron), des communes ont même dû recourir à des camions-citernes pour pouvoir être alimentées en eau potable.

Face à cette problématique récurrente, de nombreux systèmes d'alerte se sont mis en place pour tenter d'anticiper ces épisodes de sécheresse hydrologique (MétéEAU Nappes en France [Mougin et al., 2020], Hydrological Outlook UK au Royaume Uni [Prudhomme et al., 2017]). Si ces outils sont essentiels pour prévoir les niveaux piézométriques futurs et connaître les risques de

CONTACT Bruno Mougin  b.mougin@brgm.fr

© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

sécheresses potentielles, leur application d'un point de vue de la gestion est limitée si elle ne s'accompagne pas de mesures permettant d'atténuer voire d'éviter les risques de sécheresses.

Si les stratégies de gestion anticipée de la ressource en eau souterraine sont propres à chaque territoire en fonction de leur spécificité et des caractéristiques de l'aquifère capté, deux questions semblent pertinentes à se poser : à quel moment faut-il anticiper la sécheresse (c'est-à-dire à partir de quand peut-on, par une réduction des prélèvements, dévier suffisamment d'une trajectoire de baisse piézométrique prévoyant un niveau sous le seuil le plus critique dit de « crise »; Cf. 4 niveaux de seuils de gravité¹ dans <https://www.ecologie.gouv.fr/secheresse-economiser-leau>) ? Quels sont les indicateurs pertinents à considérer pour gérer de façon anticipée le risque de sécheresse ?

Ces questions ont été traitées sur le territoire de la Communauté d'Agglomération de Béthune Bruay Artois Lys Romane (CABBALR), située dans les Hauts-de-France.

Cet article présente la construction d'un outil de prévision des sécheresses hydrogéologiques sur le territoire de la CABBALR, puis illustre son potentiel pour aider à mettre en place une gestion anticipée de la ressource en eau souterraine, à l'aide de deux exemples fictifs. Ce travail montre qu'une anticipation printanière, quelques mois avant la crise sécheresse, s'avère être trop tardive, et que le niveau de recharge de l'aquifère en fin d'hiver est un indicateur clé du risque à venir de sécheresse hydrogéologique.

2. Site d'étude

Le territoire de la CABBALR est l'un des plus vastes ensembles intercommunaux de France (100 communes pour 280 000 habitants, sur 647 km²). Sur celui-ci, la totalité de l'eau potable consommée est produite à partir des eaux souterraines à travers 35 points de forage, ce qui lui permet de produire près de 15 millions de mètres cubes d'eau par an et d'alimenter en eau potable la totalité du territoire.

Les nappes d'eau souterraine, exploitées pour divers usages (eau potable, industrie, irrigation agricole), sont principalement présentes dans le réservoir crayeux d'âge Crétacé supérieur qui a une épaisseur productive comprise

entre 5 et 45 m (Campanien-Turonien). Cet aquifère a un comportement hydrogéologique basé sur une double cyclicité composée à la fois de cycles annuels de vidange et de recharge et de cycles basses fréquences (pluriannuels). Son niveau d'eau est notamment suivi par le piézomètre de Mazingarbe (référéncé <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?Code=00197X0049/F2#generalBSS000BXRG>) (Figure 1) qui est représentatif de la partie libre de cet aquifère. de cet aquifère inertiel (Cf. <https://brgm.hal.science/hal-02923598/document> et [Laurencelle et al., 2020]).

L'augmentation de la fréquence et de la sévérité des étiages pourrait toutefois remettre en question la capacité de production notamment d'eau potable sur ce territoire. Dans ce contexte, il apparaît essentiel pour la CABBALR de disposer d'outil d'anticipation et d'aide à la décision afin de mettre en place sa politique de gestion de la ressource et garantir l'équilibre entre les usages.

3. Matériel et méthodes

La méthodologie suivie et les résultats obtenus dans le cadre de ce travail ont été construits, présentés et débattus à l'occasion de 3 ateliers de concertation avec les gestionnaires et les usagers de l'eau² sur le site pilote de la CABBALR (à Nœux-les-Mines les 05/10/2021, 05/04/2022 et 08/11/2022).

3.1. L'outil MétéEAU Nappes

Le BRGM a développé puis mis à disposition du public début 2021 une plateforme web appelée « MétéEAU Nappes » (<https://meteeanappes.brgm.fr>), permettant le suivi du comportement actuel et futur des aquifères en France. Cet outil, qui croise des données en quasi temps réel (pluies, débits des rivières, niveaux des nappes), permet de prédire les niveaux d'eau souterraine sur divers points du territoire, sur la base d'un travail de modélisation (Mougin et al., 2020), basés sur le code de calcul <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/eros-logiciel-modelisation-hydrologique-semi-globale-bassin-versant-decoupe-sous-bassins> (Thiéry, 2018 ; Thiéry & Moutzopoulos, 1992). Ce dernier est un modèle hydro-climatique semi-distribué (modélisations globales en grappes) permettant une modélisation Pluie-Débit-Niveau piézométrique à l'échelle de bassins versants. Chaque sous-bassin est modélisé de manière globale à partir de lois physiques simplifiées, correspondant à l'écoulement d'une succession de réservoirs. La calibration des paramètres d'EROS se fait de manière automatique par une méthode d'optimisation itérative (Rosenbrock, 1960 ; Thiéry, 1988) consistant à minimiser les écarts entre valeurs observées et simulées. Après calibration d'un modèle, les prévisions réalisées par

¹« (i) Vigilance : inciter les particuliers et les professionnels à économiser l'eau (niveau de sensibilisation, pas de restriction); (ii) Alerte : réduction de tous les prélèvements en eau et interdiction des activités impactant les milieux aquatiques, restrictions en matière d'arrosage, de remplissage et de vidange des piscines, de lavage de véhicules et d'irrigation de cultures; (iii) Alerte renforcée : réduction de tous les prélèvements en eau et interdiction des activités impactant les milieux aquatiques, restrictions renforcées en matière d'arrosage, de remplissage et de vidange des piscines, de lavage de véhicules et d'irrigation de cultures; (iv) Crise : ce niveau est déclenché pour préserver les usages prioritaires, interdiction des prélèvements en eau pour l'agriculture (totalemment ou partiellement), pour de nombreux usages domestiques et pour les espaces publics. ».

²CABBALR, élus des communes, EPTB Lys (SYMSAGEL, SAGE de la Lys, DREAL Hauts de France, DDTM Pas de Calais, ARS, Agence de l'Eau Artois Picardie, Chambre d'Agriculture du Nord Pas de Calais, VEOLIA, SAUR, SUEZ, Noréade, entreprises consommatrices d'eau, agriculteurs. ...

MétéEAU Nappes sont émises à échéance +6 mois à partir des conditions climatiques passées, rejouées pour estimer la dispersion et la distribution des évolutions piézométriques futures (prévisions saisonnières dites climatiques, ou probabilistes). Une méthode adaptative de réajustement de l'état des réservoirs est utilisée afin de corriger l'état initial des prévisions (Thiéry, 1988).

Le schéma de fonctionnement complet de la plateforme MétéEAU Nappes, depuis la récupération des données jusqu'à l'émission des prévisions est décrit de façon approfondie par Surdyk et al. (2022).

3.2. Modélisation d'un piézomètre représentatif du territoire de la CABBALR et intégration dans MétéEAU Nappes

Un travail de modélisation a été réalisé sur le piézomètre de Mazingarbe (Figure 1) en intégrant notamment un historique des volumes prélevés dans la nappe autour du point d'eau. Des débits (injection ou prélèvements) peuvent être intégrés aux modèles globaux créés avec le code de calcul EROS. Ces débits agissent soit sur les eaux de surface, soit sur les eaux souterraines. Selon ce choix et le contexte hydrogéologique, il peut être pertinent d'inclure tous les prélèvements d'un bassin versant, ou au contraire uniquement les prélèvements situés dans la zone d'influence d'un piézomètre que l'on cherche à simuler (Surdyk et al., 2022).

Les résultats obtenus ont été insérés dans l'application web MétéEAU Nappes pour proposer aux utilisateurs de l'outil des niveaux de nappe prévisionnels sur 6 mois. Ces prévisions sont effectuées pour divers scénarios météorologiques, caractérisés

par leur période de retour (10 ans humide, 5 ans humide, pluie médiane, 5 ans sec, 10 ans sec, sans pluie), et pour 3 scénarios de prélèvements futurs (faible, moyen, fort).

La calibration du modèle ainsi que ses prévisions sont présentées dans la section « 4. Résultats ».

3.3. Test de l'utilisation de l'outil sur des cas théoriques illustratifs basés sur les épisodes de sécheresses de 2019 et de 2022–2023

L'objectif est de tester le potentiel de l'outil MétéEAU Nappes pour aider à mettre en place une gestion anticipée de la sécheresse hydrogéologique sur le territoire de la CABBALR.

Le piézomètre de Mazingarbe est associé à des seuils piézométriques sécheresse mensuels inscrits dans l'« Arrêté cadre interdépartemental du 2 mars 2012 relatif à la mise en place de principes communs de vigilance et de gestion des usages de l'eau en cas d'étiage sévère de la ressource ou de risque de pénurie liés aux épisodes de sécheresse dans les bassins versants des départements du Nord et du Pas-de-Calais » (Figure 2a). Ces seuils correspondent à des niveaux de restrictions croissantes des usages de l'eau.

La CABBALR n'ayant pas connu historiquement de période de sécheresse très sévère franchissant le seuil de crise (les autres seuils piézométriques sécheresse dits de vigilance et d'alerte ont néanmoins été franchis en 2017 et 2019 [Figure 2a]), l'utilisation de l'outil a été testée sur des situations fictives illustratives, permettant d'explorer des situations où le seuil de crise serait atteint.

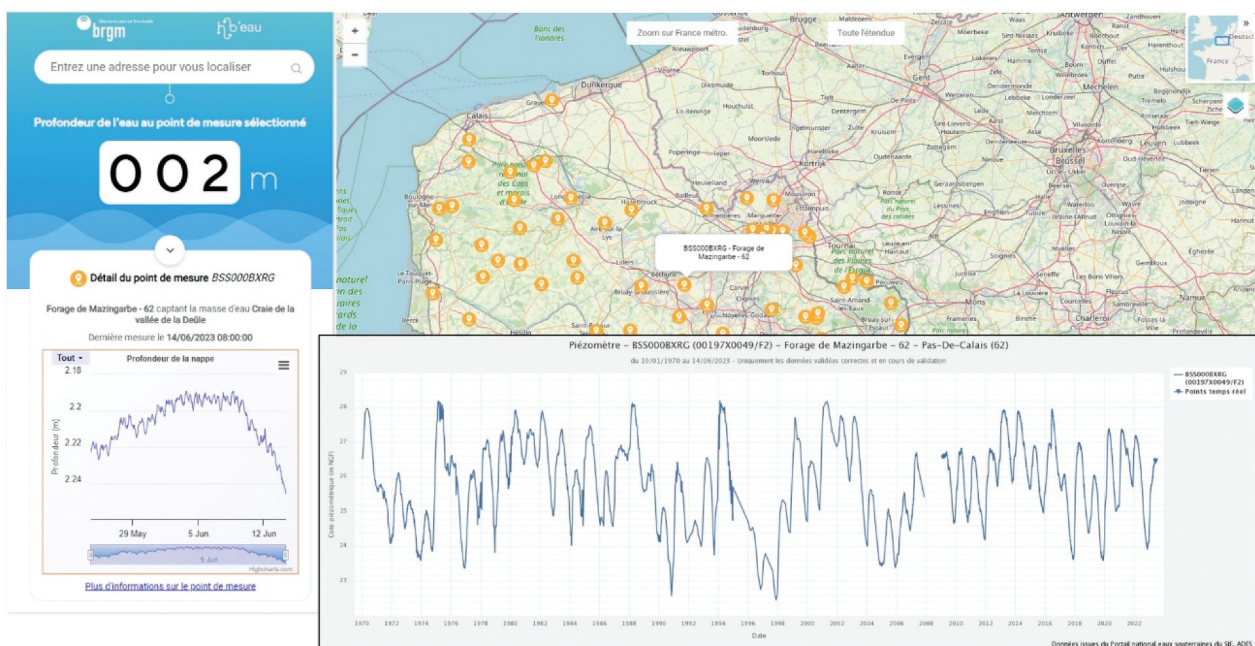


Figure 1. Localisation du piézomètre de Mazingarbe et chronique piézométrique associée sur la période 1970–2022. Sources : <https://hubeau.eaufrance.fr/> et <https://ades.eaufrance.fr/>, 2023.

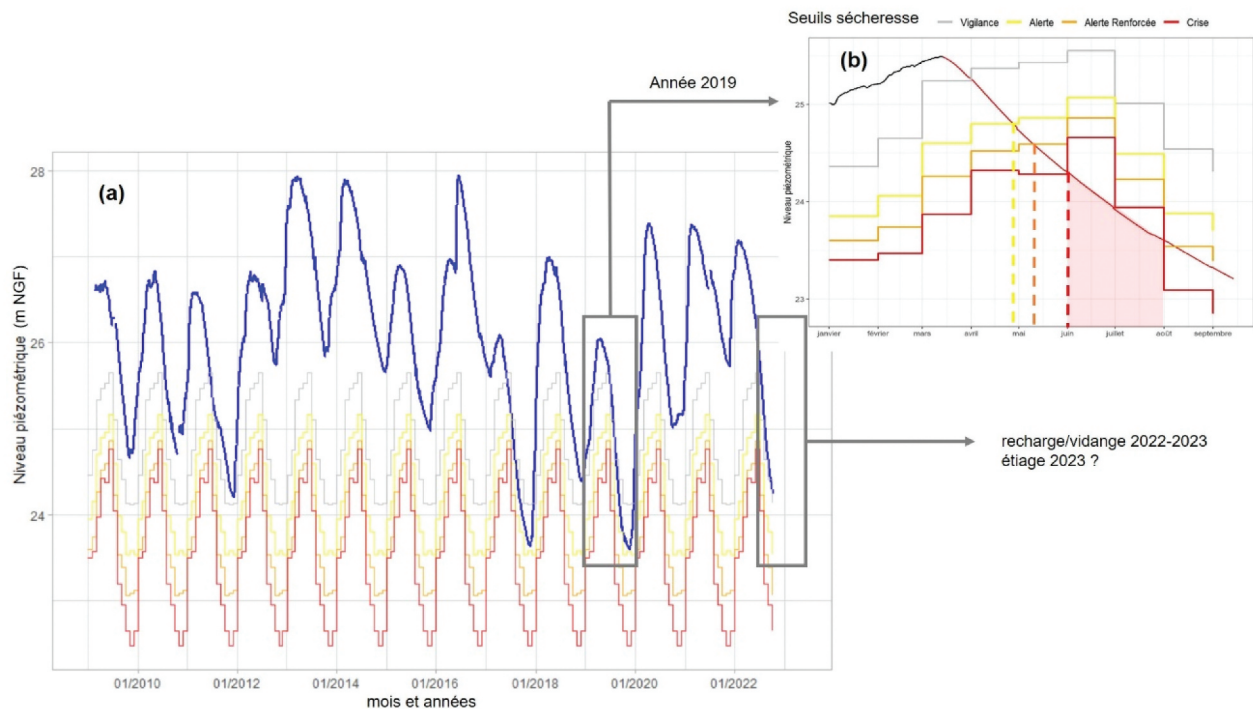


Figure 2. Évolutions des niveaux piézométriques sur le point de Mazingarbe, (a) sur la période 2009–2022 (en bleu) par rapport aux seuils sécheresse mensuels (en gris-jaune-orange-rouge), (b) chronique piézométrique réelle (en noir) puis fictive de 2019 (en rouge) en lien avec le fonctionnement potentiel du piézomètre. Source : BRGM, 2023.

3.3.1. Situation illustrative n°1

Dans un premier temps, nous avons construit une première situation fictive afin d’explorer l’impact de mesures de gestion printanières (en période de vidange de l’aquifère). Cette situation est basée sur : (i) la dynamique réelle du piézomètre de Mazingarbe de janvier à mi-mars 2019 ([Figure 2b] courbe noire), et (ii) sur une décroissance simulée du niveau piézométrique à partir de mi-mars, dans un scénario combinant absence de pluie et présence de prélèvements forts ([Figure 2b] courbe rouge qui peut être simulée avec MétéEAU Nappes). Dans cet exemple, le seuil de crise serait franchi début juin jusqu’à début août (zone colorée en rose).

Sur la base de cet exemple fictif, on se demandera si une réduction anticipée des prélèvements permettrait d’éviter de franchir le seuil de crise, et si oui à partir de quelle date faudrait-il commencer à réduire les prélèvements. Le travail consistera à tester différents niveaux de modération des prélèvements à partir de mi-mars et simuler leur impact sur le niveau piézométrique, pour évaluer si cette crise sécheresse d’été peut être évitée.

3.3.2. Situation illustrative n°2

Dans un second temps, nous avons construit une seconde situation fictive afin d’explorer l’impact de mesures de gestion automnales/hivernales (en période de recharge de l’aquifère). Cette situation est basée sur la recharge de 2022–2023 et la vidange de l’année 2023 (Figure 2a). Nous avons simulé grâce à MétéEAU Nappes les prévisions de la recharge de la nappe fin 2022-début 2023 pour différents scénarios météorologiques et de prélèvements. Puis, après cette phase de remplissage,

on évaluera comment la nappe pourrait baisser en 2023 en reproduisant artificiellement les vidanges importantes observées en 2017 et en 2022 (respectivement -2.6 et -3.2 m NGF³).

Sur la base de cet exemple fictif, on se demandera si la recharge automnale/hivernale peut être importante (ou pas) et si elle permettrait d’éviter un été sévère. Le travail consistera à suivre une trajectoire de recharge et voir si la baisse piézométrique qui s’en suit entraîne un niveau piézométrique qui descend sous les seuils sécheresse de crise.

4. Résultats

4.1. Calibration du modèle de Mazingarbe et prévisions

Le processus de calibration du modèle sous EROS détermine le meilleur ajustement des données simulées aux niveaux d’eau souterraine observés. La série sur les niveaux piézométriques de 1982 à 2020 (données extraites d’ADES) a été utilisée pour le calage même si davantage d’observations étaient disponibles, car les données disponibles sur les prélèvements (données Agence de l’Eau Artois Picardie) ne couvraient que cette période. De plus, le piézomètre de Mazingarbe est un ancien forage, ayant appartenu aux Houillères du Bassin Nord-Pas-de-Calais, qui a été utilisé pour la production d’eau

³Ces vidanges « historiques » correspondent au cumul de : (i) la vidange naturelle de la nappe en lien avec son cycle hydrodynamique et climatique, et (ii) des effets des prélèvements existants autour du piézomètre.

jusque dans les années 80 (volumes prélevés et périodes d'exploitation exactes non connues).

Dans le cadre du travail de modélisation réalisé ici, il n'apparaît pas pertinent d'inclure les prélèvements en limite de bassin versant, car ils n'ont plus d'influence sur le piézomètre de Mazingarbe. Afin de définir la zone d'influence des prélèvements autour du piézomètre, plusieurs méthodes de sélection des prélèvements en eaux souterraines ont été testées (Figure 3) :

- tampon arbitraire de 5 km autour du point d'intérêt ;
- rayon d'action fictif autour du piézomètre (calculé à partir des paramètres hydrodynamiques moyens connus dans le secteur et d'un pompage continu pendant 1 an sans limite hydrogéologique), soit environ 10 km pour le rayon maximum, et 6.5 km pour un rabattement de la nappe inférieure à 1 m ;
- délimitation d'une emprise d'influence à partir des isopièzes modélisées par un modèle hydrodynamique en régime permanent (pompages de l'année 2008 pris en compte ; Buscarlet et al., 2011).

In fine, les différentes méthodes de sélections aboutissent ici à des résultats de sélection assez proches.

La méthode de détermination à partir des isopièzes simulées a été retenue, résultant du compromis entre l'efficacité de la méthode, sa pertinence (il semble préférable de baser la sélection sur des arguments hydrogéologiques plutôt qu'arbitraires, tels qu'une distance tampon sous SIG) et sa rapidité de mise en œuvre (la méthode du rayon d'action nécessitant plusieurs calculs préalables, d'autant que les paramètres hydrodynamiques ne sont pas toujours disponibles). Sur la période 1982–2020, 49 points d'eau ont été individualisés à l'intérieur du « contour manuel » de la Figure 3 dont 6 d'entre eux concentrent 87% des prélèvements totaux (2 points à usage eau potable et 4 à usage industriel). Les divers usages existant autour du piézomètre ont été représentés sur les Figures 4a et 4b. On note une prépondérance des usages eau potable et industriel, ainsi qu'une baisse régulière des prélèvements depuis 1982 jusqu'en 2012 puis une stabilisation ensuite. Au moment de la modélisation, comme les données de 2020 étaient incomplètes, les prélèvements de 2019 ont été extrapolés en 2020.

Ces données historiques de prélèvements ont ensuite été intégrées dans la modélisation. Le modèle est construit sur la période 1982–2020 au pas de temps journalier, avec 15 années de démarrage, soit une période de calibration de 1997 à 2020 (Figure 5).

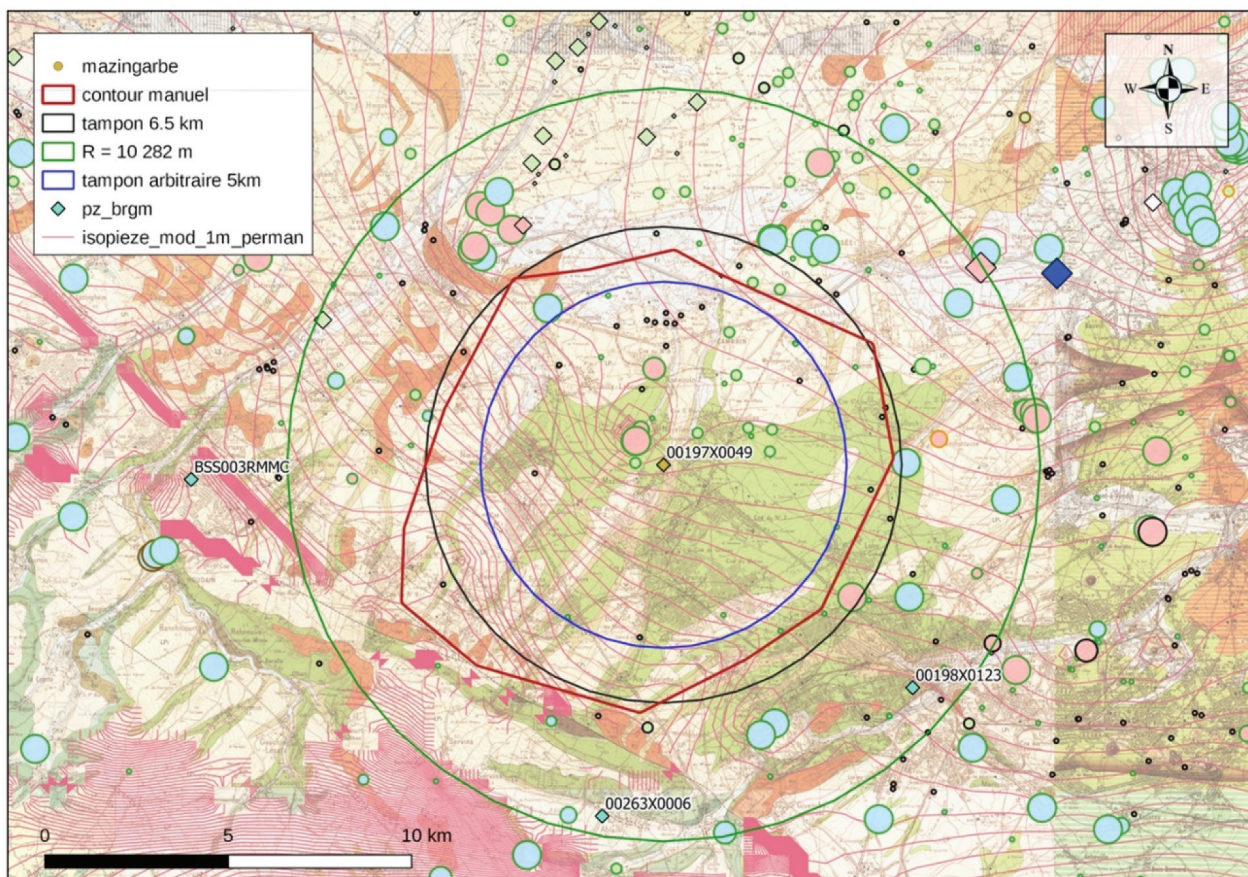


Figure 3. Inventaire des prélèvements pour la modélisation globale et méthodes de sélection des prélèvements (les points d'eau sont coloriés selon leurs usages : eau potable (en bleu), industrie (en rose), irrigation agricole (en vert) ; leur taille varie selon l'importance des volumes prélevés en 2008). Source : BRGM, 2023.

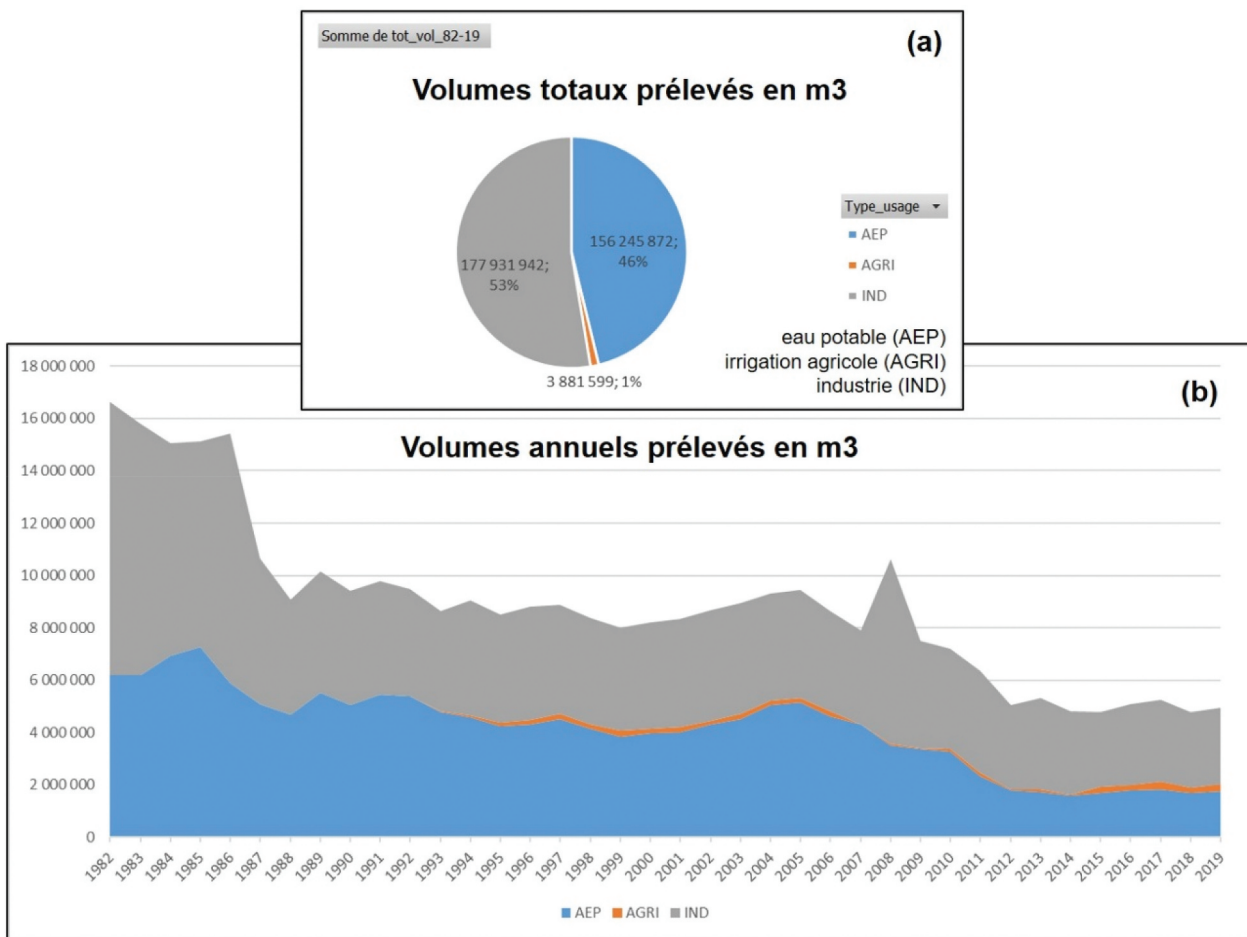


Figure 4. Inventaire des prélèvements pour la modélisation globale, (a) pourcentages des volumes totaux prélevés par usage sur la période 1982–2019, (b) évolution annuelle des volumes prélevés par usages. Source : BRGM, 2023.

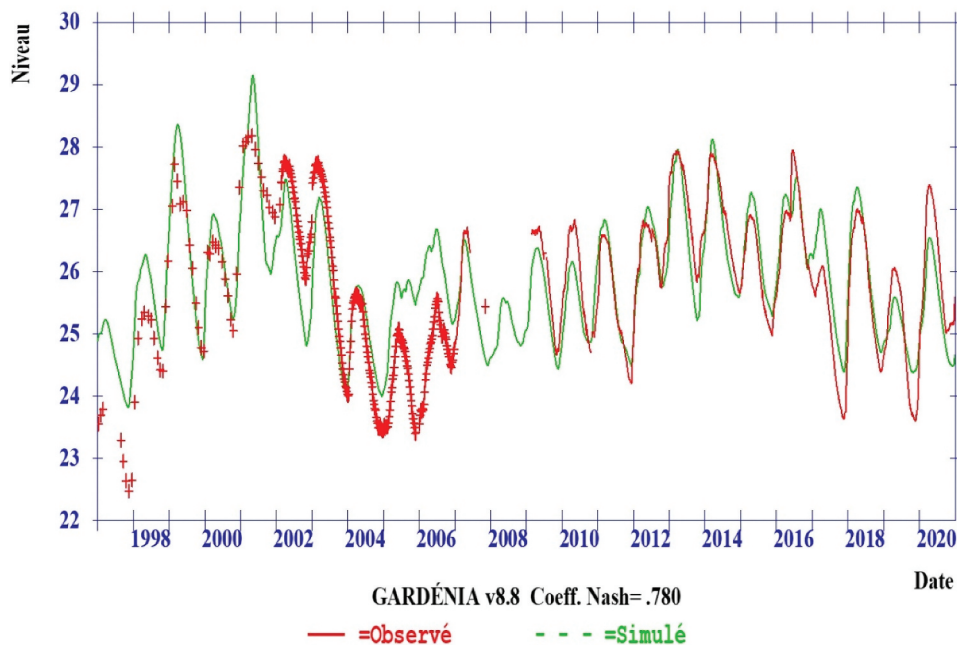


Figure 5. Calage du modèle de Mazingarbe (pluie-niveau piézométrique-prélèvements) sur la période 1997–2020 (niveau en m NGF). Source : BRGM, 2023.

Les données météorologiques de pluie et d'évapotranspiration (ETP) à la station de Lille-Lesquin (station 59343001) ont été utilisées. Faute de station hydrologique en rivière suffisamment proche du piézomètre et représentative du même hydrosystème, le travail s'est focalisé sur un modèle pluie-niveau piézométrique.

Le processus d'optimisation (processus de calibration automatique sous EROS) a permis d'obtenir une calibration satisfaisante, avec un critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) évalué à 0.78 (Figure 5). Le niveau piézométrique est toutefois surestimé par le modèle lors de certains étiages, qui sont donc moins bien reproduits. Cette surestimation est notamment visible sur les dernières années de la période de calibration ou encore sur la période 2004–2007, au cours de laquelle la vidange n'est pas simulée en 2005 (année pourtant sèche d'un point de vue météorologique). Cette surestimation pourrait être liée à une méconnaissance de certains prélèvements, induisant des sorties d'eau non modélisées, ainsi qu'à une prise en compte imparfaite des données de précipitation/ETP (données de la station de Lille).

La ré-analyse d'événements passés a été réalisée sur différentes années permettant d'apprécier le comportement du modèle en mode prévision, qui a été jugé satisfaisant. A titre d'exemple, l'évaluation de la capacité de prévision des niveaux piézométriques à Mazingarbe, réalisée avec l'outil MétéEAU Nappes par une analyse comparative des prévisions et observations à l'étiage 2021, est présentée en Figure 6. Les différents scénarios prévisionnels ont permis une bonne anticipation de l'évolution du niveau piézométrique lors des deux premiers mois de prévision. Le niveau observé se situe ainsi entre le scénario médian et le scénario 5 ans humide.

Les prévisions réalisées avec différents scénarios de pompage ont permis d'analyser l'influence des usages en cours d'étiage. A l'instar de la méthodologie proposée dans MétéEAU Nappes, trois scénarios (faible, moyen, fort [Figure 6]) ont été utilisés après détermination à partir de l'historique des prélèvements utilisés par le modèle (les prélèvements des années 2018–2009–2008 ont respectivement été retenus avec 4.8, 7.5 et 10.6 millions de m³/an). Les scénarios fort et moyen conduisent tous deux à des prévisions plus éloignées des observations, avec un décrochage en début de prévision. Ce décrochage est dû au changement brutal de régime de prélèvement entre la fin de la calibration et le début des prévisions. Compte tenu de la baisse historique des prélèvements depuis 2008, les scénarios fort et moyen traduisent une situation qui est moins représentative de la situation actuelle. Le scénario faible permet des prévisions plus proches de la réalité.

4.2. La gestion anticipée en période de vidange – Situation illustrative n°1

En faisant varier les prélèvements (existants dans la zone d'influence autour du piézomètre) et la date à laquelle on commence à les faire diminuer (Figure 7a et 7b), on constate que dans cette situation fictive illustrative seule une réduction drastique des prélèvements de 50% permettrait d'éviter une crise sécheresse (cf. « scénario de prélèvement faible » en Figure 7a). Une réduction moins importante mais néanmoins significative de l'ordre de 25% permettrait seulement de limiter la durée de la crise (durée de 1 mois au lieu de 2) (cf. « scénario de prélèvement moyen » en Figure 7a).

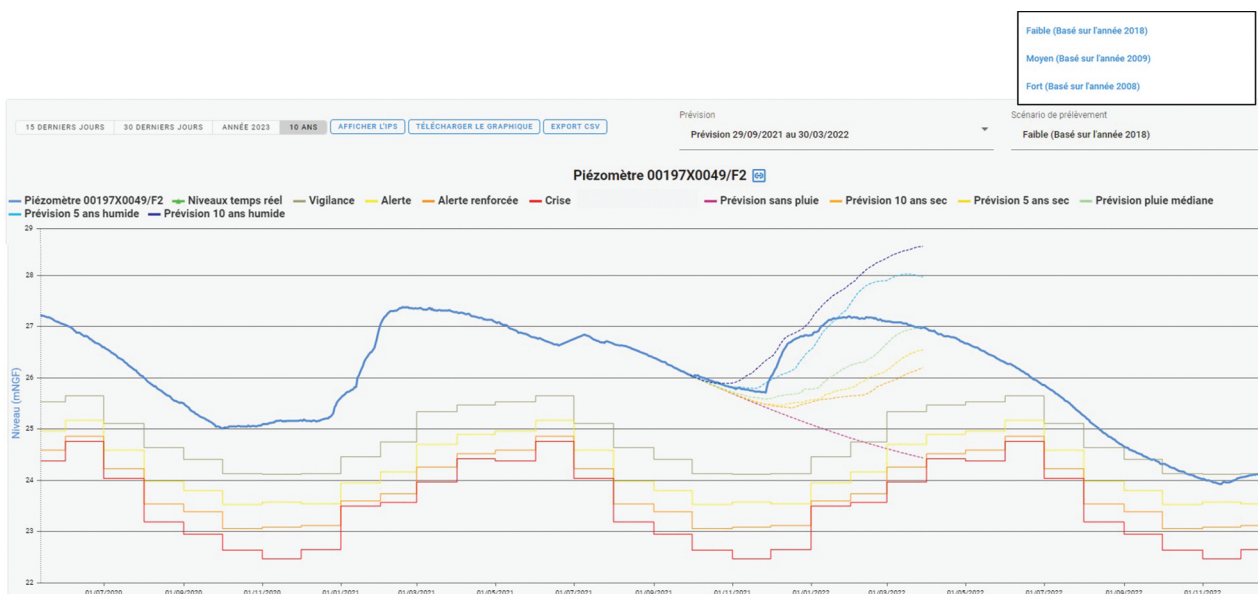


Figure 6. Prévisions de niveaux piézométriques à Mazingarbe sur 6 mois du 29/09/2021 au 30/03/2022 visibles dans MétéEAU Nappes. Source : BRGM, 2023.

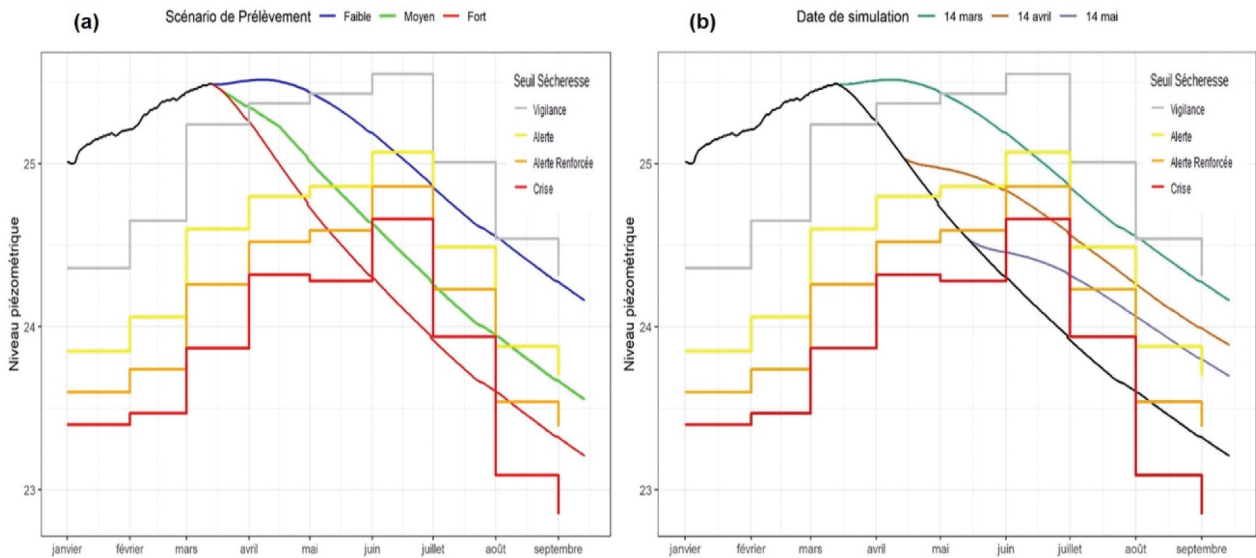


Figure 7. (a) Impact de réductions préventives des prélèvements sur le niveau piézométrique et sur l'atteinte du seuil de crise (les courbes verte et bleue illustrent respectivement les trajectoires de niveau correspondant à une réduction des prélèvements de 25 et 50%). (b) Efficacité d'une réduction de prélèvement sur les niveaux piézométriques et sur l'atteinte du seuil de crise en fonction de la date à laquelle les mesures de restrictions préventives ont été mises en œuvre. Source : BRGM, 2023.

La Figure 7b montre ce qu'il se passerait si la décision de réduire les prélèvements de 50% était prise plus tardivement (1 mois plus tard – courbe marron, 2 mois plus tard – courbe violette) mais toujours avant la situation de crise estivale. On constate alors que plus on retarde la décision, plus il est difficile (voir impossible) d'éviter une situation de crise.

S'il est donc techniquement possible d'éviter le franchissement du seuil de crise, cela demande des restrictions supérieures à celles atteignables par les arrêtés préfectoraux lorsque l'on est dans la période de crise sécheresse. En l'absence d'une ressource de substitution disponible (eaux de surface, ou un aquifère proche avec une dynamique piézométrique différente), cela implique que cette anticipation est trop tardive pour pouvoir être efficace. Ainsi, dans le cas d'aquifères à cycle annuel, avec des saisons de vidange et de recharge, se concentrer sur la période de vidange revient à négliger la moitié de la dynamique du système.

4.3. La gestion anticipée en période de recharge – Situation illustrative n°2

Pour le piézomètre de Mazingarbe, la nappe suit des variations annuelles et pluriannuelles qui dépendent de son inertie et de son remplissage par les pluies efficaces. Une analyse de la chronique piézométrique (Figure 2a) permet de remarquer que les seuils sécheresses sont franchis les années où les niveaux piézométriques ont été les plus bas en fin de période de recharge (~26 m NGF). Le niveau de remplissage atteint à la fin de cette période de recharge semble donc être un facteur clé. En effet, en 2022 (Figure 8a), les seuils d'alerte n'ont pas été franchis alors que la

vidange a été exceptionnelle (-3,2 m contre un maximum de -2,6 m les années précédentes). Cela est dû au fait que le niveau piézométrique en fin de recharge était relativement haut en mars 2022 (~27 m NGF). Par contre, dans le cas où cette pluviométrie ne serait pas au rendez-vous lors de l'hiver 2022-2023 (exemple d'une prévision fictive alternative MétéEAU Nappes tenant compte d'une pluviométrie avec période de retour 10 ans sec), le niveau piézométrique ne remonterait que juste en-dessous de 26 m NGF (Figure 8b). Si la vidange 2023 de l'aquifère était identique à celle de l'été 2022 (autour de -3 m NGF), cela entraînerait alors un passage prolongé sous le seuil de crise, entraînant des restrictions d'usages de l'eau. Une vidange identique à celle de 2019 conduirait à une situation à peine meilleure [cf. « Projection sécheresse type 2019 » en Figure 8b].

Le niveau de recharge de la nappe semble donc être un facteur clé à regarder pour les acteurs de la gestion anticipée de la sécheresse. En effet, la hauteur des niveaux piézométriques en fin de période de recharge constitue une sorte d'assurance pour éviter la sécheresse estivale hydrogéologique à venir ou au contraire un signal d'alarme.

Le niveau de recharge minimum à atteindre pour se sécuriser face au risque de sécheresse hydrogéologique peut s'anticiper, grâce au système d'alerte précoce MétéEAU Nappes, de la même façon que cet outil permet d'anticiper un risque de sécheresse estivale. Sur le site de Mazingarbe, les simulations réalisées (Figure 9) montrent qu'une baisse des prélèvements de l'ordre de 50% effectuée dès la fin de la période d'étiage (entre mi-octobre et fin novembre 2022) permettrait de relever le niveau piézométrique d'environ +0.5 m NGF et de pouvoir ainsi affronter une période

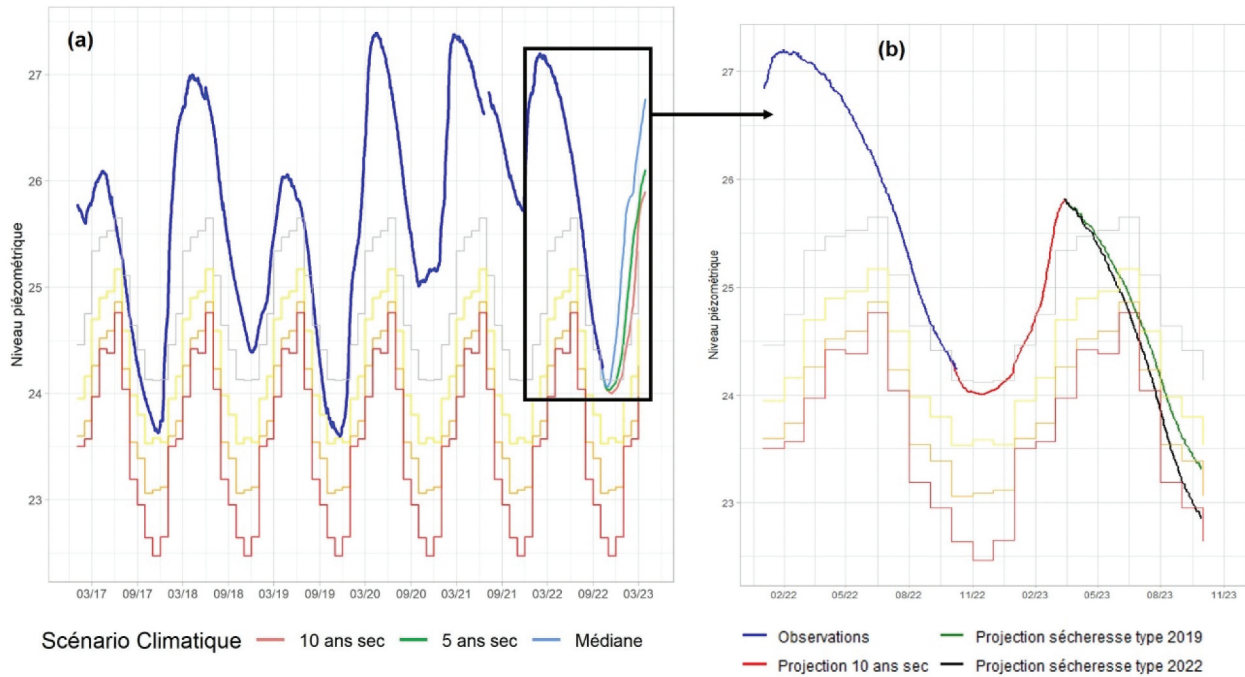


Figure 8. (a) Exemples de simulations MétéEAU Nappes du niveau piézométrique en fin de période de recharge au point de Mazingarbe (prévisions sur 6 mois de début octobre 2022 à fin mars 2023). (b) Projection du niveau piézométrique en fin d'été 2023 suite à un déficit pluviométrique en hiver 2022 (en noir : baisse de niveau similaire à 2022, en vert : similaire à 2019; remarque : la courbe rouge de la Figure 8b correspond à celle de la Figure 8a). Source : BRGM, 2023.

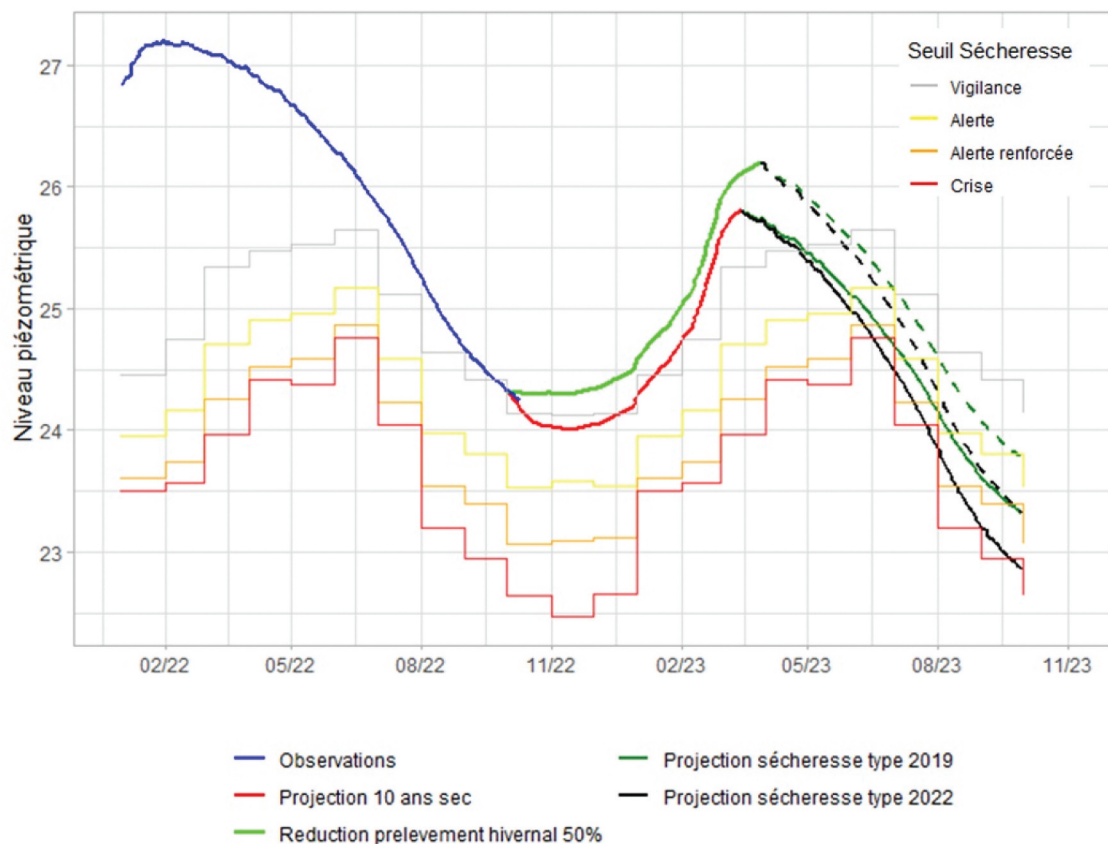


Figure 9. Impact sur les niveaux piézométriques au point de Mazingarbe d'une baisse des prélèvements hivernaux de 50% en octobre 2022 (en vert clair : impact d'une réduction des prélèvements de 50%, en pointillés noirs : projection d'une baisse de niveau similaire à 2022, en pointillés verts : similaire à 2019). Source : BRGM, 2023.

de sécheresse comme celle de 2022 en évitant des passages prolongés sous le seuil de crise.

Ces niveaux de réductions restent relativement importants et difficiles à mettre en œuvre. Néanmoins, les options pour réduire les prélèvements dans la nappe en hiver s'avèrent plus nombreuses. Contrairement à la période estivale, les eaux de surface peuvent être mobilisables, ce qui est le cas sur la CABBALR grâce aux échanges d'eau avec le territoire voisin (prélèvements dans la rivière de la Lys). Les eaux non conventionnelles provenant de situations de débordement pourraient également être mobilisées (inondations par remontée de nappe dans les zones affaissées par l'exploitation minière). Ces options de substitution permettraient d'atténuer, par un phénomène de report spatial, l'impact d'une baisse des prélèvements pour les utilisateurs de l'eau. De plus, d'autres mesures ayant plus d'impact en période hivernale, comme celles favorisant l'infiltration, pourraient influencer directement sur le niveau de recharge, et par conséquent diminuer le recours à une réduction des prélèvements dans la nappe crayeuse libre.

5. Conclusions et perspectives

La méthodologie suivie et les résultats obtenus permettent d'obtenir des éléments de réponse à la question initialement posée : comment passer de la prévision de la sécheresse hydrogéologique à sa gestion anticipée ?

Dans ce cas d'étude, avec des saisons de vidange et de recharge, se concentrer sur la période estivale revient à négliger la moitié de la dynamique du système. Dans cette période où la nappe se vidange, diminuer les prélèvements pourrait permettre d'adoucir la baisse des niveaux piézométriques, mais ne permettrait pas forcément d'infléchir de manière significative cette tendance. La sécheresse résulterait à la fois de la baisse des niveaux piézométriques en période estivale et du niveau piézométrique atteint à la fin de la période de recharge, celui-ci ayant un rôle « d'assurance-risque » en quelque sorte pendant la période de vidange. Anticiper ce niveau piézométrique de fin de remplissage permettrait de savoir de quelle marge on disposerait pour la période de vidange à venir.

Bien que soumises à des incertitudes, en premier lieu desquelles se trouvent les conditions météorologiques à venir, les conclusions sur le territoire de la CABBALR tendent à suggérer les points suivants :

- une anticipation printanière de la crise sécheresse hydrogéologique peut être trop tardive pour permettre d'éviter la crise ;
- le niveau de remplissage de l'aquifère atteint en fin d'hiver paraît être un indicateur clé à anticiper pour estimer le risque de sécheresse estivale hydrogéologique ;

- des actions peuvent être menées dès la période automnale pour favoriser la recharge de l'aquifère en tant qu'assurance contre le risque de sécheresse hydrogéologique sur l'étiage à venir.

Cependant, les résultats présentés sont assez dépendants du système aquifère et des conditions de prélèvements existants sur la CABBALR. Sur ce territoire, les mesures de gestion anticipées de la sécheresse ne sembleraient pas suffisantes, ou plus pénalisantes que les arrêtés sécheresse eux-mêmes. En effet, à court-terme, elles concernent principalement la réduction des prélèvements dans le milieu et donc la réduction de la consommation en eau. Celles-ci paraissent limitées à court terme : de l'ordre de 5 à 15% des prélèvements totaux (Dumoulin et Hubert, 2019). Il faudrait donc mettre en place des politiques d'adaptation plus structurelles par les gestionnaires de l'eau pour à la fois réduire les prélèvements et favoriser la recharge hivernale (exemples : dispositifs d'infiltration des eaux pluviales en contexte urbain, recharge maîtrisée des aquifères, gestion conjointe et dynamique eaux de surface/eaux souterraines ...).

La méthodologie et ses conclusions pourraient potentiellement s'appliquer au cas d'aquifères à cycle annuel mais ils nécessiteraient au préalable de mener une analyse hydrogéologique spécifique. Il semble donc pertinent de poursuivre l'exercice à d'autres cas d'étude pour tester si les conclusions tirées ici se retrouvent ailleurs (La gestion printanière est-elle toujours trop tardive ? Le niveau de remplissage en fin d'hiver est-il toujours un facteur clé ?), ou bien si elles sont différentes, chercher alors à établir une typologie des situations.

Remerciements

Les auteurs remercient le projet « Water for Tomorrow » d'avoir financé le travail mené de 2021 à 2023. Water for Tomorrow, partenariat transfrontalier de 5 structures en Angleterre et en France, a été financé par le programme européen INTERREG VA France (Channel Manche) England, par l'intermédiaire du Fonds Européen de Développement Régional. Les auteurs remercient également les deux relecteurs anonymes du Bureau Editorial pour leurs examens très constructifs de cet article.

Déclaration de divulgation

Aucun conflit d'intérêts potentiel n'a été rapporté par les auteurs.

Disponibilité des données

Les données qui appuient les conclusions de cette étude sont disponibles auprès de l'auteur correspondant, [Mougin B.], sur demande raisonnable.

ORCID

Bruno Mougin  <http://orcid.org/0000-0001-9151-6261>
 Cyril Bourgeois  <http://orcid.org/0000-0003-1909-2040>
 Adrien Manlay  <http://orcid.org/0000-0002-9981-2994>
 Noémie Neverre  <http://orcid.org/0000-0002-7291-0578>

Références

- Baudouin, E., Py, M., Stevens, D., & Pujos, C. (2020). *Retour d'expérience sur l'épisode caniculaire et la sécheresse 2019*. Rapport CGEDD n°013098-01, CGAAER n°19098, p. 139. <https://www.vie-publique.fr/rapport/277225-retour-dexperience-sur-lepisode-caniculaire-et-la-secheresse-2019>
- Bertrand, N., Blanc, P., Debrieu-Levrat, C., Cazin, P., Kles, V., Plante, S., & IGEDD. (2023). *Retour d'expérience sur la gestion de l'eau lors de la sécheresse 2022*. Rapport IGEDD n°014714-01, CGAAER n°22105, IGA n°22087R, p. 114. <https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/retour-d-experience-sur-la-gestion-de-l-eau-lors-a3735.html>
- Buscarlet, E., Pickaert, L., Stollsteiner, P., Klinka, T., Wuilleumier, A., & Asfirane, F. (2011). *Modélisation de la nappe de la craie - Schéma conceptuel et calage du modèle hydrodynamique en régime permanent*. Rapport BRGM/RP-59720-FR, p. 79. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59720-FR.pdf>
- Dumoulin, V., & Hubert, L. (2019). *Retour d'expérience sur la gestion de la sécheresse 2019 dans le domaine de l'eau*. Conseil général de l'environnement et du développement durable, 118 p. Rapport CGEDD n°012985-01. https://igedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0011654/012985-01_rapport-publie.pdf
- Henriot, A., Allier, D., Rambourg, D., & Winckel, A. (2019). *Sévérité des sécheresses hydrogéologiques : développement et mise en œuvre d'indicateurs*. Rapport BRGM/RP-68533-FR, p. 51. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68533-FR.pdf>
- Laurencelle M., Allier D., Henriot A., & Manceau J-C. (2020). *Calcul de l'inertie des aquifères de France métropolitaine à partir de chroniques piézométriques*. Rapport final BRGM/RP-70030-FR, p. 37. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-70030-FR.pdf>
- Mougin, B., Nicolas, J., Vigier, Y., Bessière, H., & Loigerot, S. (2020). « MétéEAU Nappes » : un site Internet contenant des services utiles à la gestion des étiages. *La Houille Blanche*, 106(5), 28–36. <https://doi.org/10.1051/lhb/2020045>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Prudhomme, C., Hannaford, J., Harrigan, S., Boorman, D., Knight, J., Bell, V., Jackson, C., Svensson, C., Parry, S., Bachiller-Jareno, N., Davies, H., Davis, R., Mackay, J., McKenzie, A., Rudd, A., Smith, K., Bloomfield, J., Ward, R., & Jenkins, A. (2017). Hydrological Outlook UK: An operational streamflow and groundwater level forecasting system at monthly to seasonal time scales. *Hydrological Sciences Journal*, 62(16), 2753–2768. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1395032>
- Rosenbrock, H. H. (1960). An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Computer Journal*, 3(3), 175–184. <https://doi.org/10.1093/comjnl/3.3.175>
- Surdyk, N., Thiéry, D., Nicolas, J., Gutierrez, A., Vigier, Y., & Mougin, B. (2022). MétéEAU Nappes: A real-time water-resource-management tool and its application to a sandy aquifer in a high-demand irrigation context. *Hydrogeology Journal*, 30(6), 1737–1749. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02509-1>
- Thiéry, D. (1988). Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model. *Journal of Hydrology*, 97(1–2), 129–148. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90070-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90070-4)
- Thiéry, D. (2018). *Logiciel EROS version 7.1. Guide d'utilisation*. Rapport BRGM/RP-67704-FR, p. 171. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67704-FR.pdf>
- Thiéry, D., & Moutzopoulos, C. (1992). *Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins: le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires*, pp. 285–295. <https://hal.science/hal-01061971/>
- Vidal, J.-P., Devers, A., Lauvernet, C., Héraut, L., & Delaigue, O. (2023, April 24–28). The outstanding 2022 hydrological drought in France within a 150-year historical context. *EGU General Assembly 2023*, Vienna, Austria. EGU23-7409. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7409>