



**HAL**  
open science

## Rôle des eaux souterraines sur la présence d'eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement en contexte urbain : Cas d'étude de la communauté d'agglomération de Lens-Liévin.

Lucas Jehanno, Adrien Manlay, Valentine Debois, Nicolas Devau, Géraldine Picot-Colbeaux, Pascal Goderniaux

### ► To cite this version:

Lucas Jehanno, Adrien Manlay, Valentine Debois, Nicolas Devau, Géraldine Picot-Colbeaux, et al.. Rôle des eaux souterraines sur la présence d'eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement en contexte urbain : Cas d'étude de la communauté d'agglomération de Lens-Liévin.. 10ème Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine, Laboratoire Eau et Environnement - Université Gustave Eiffel, Oct 2024, Bouguenais (Nantes), France. hal-04709034

**HAL Id: hal-04709034**

**<https://brgm.hal.science/hal-04709034v1>**

Submitted on 25 Sep 2024

**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.

# Rôle des eaux souterraines sur la présence d'eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement en contexte urbain : Cas d'étude de la communauté d'agglomération de Lens-Liévin.

JEHANNO Lucas<sup>(1,2)\*</sup>, MANLAY Adrien<sup>(1)</sup>, DEBOIS Valentine<sup>(1,2)</sup>, PICOT-COLBEAUX Géraldine<sup>(1)</sup>, DEVAU Nicolas<sup>(1)</sup>, GODERNIAUX Pascal<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – \* l.jehanno@brgm.fr

<sup>(2)</sup> Geology and Applied Geology – Polytech Mons – Université de Mons

Les interactions entre les eaux souterraines et le réseau d'assainissement de la communauté d'agglomération de Lens-Liévin, située dans le Nord de la France, ont mené localement à des non-conformités lors de l'exploitation du réseau d'assainissement et des stations d'épuration, remettant en cause la politique de développement économique de l'agglomération. Les intrusions d'eaux souterraines dans le réseau d'assainissement pourraient en être la cause.

La vulnérabilité du réseau à l'infiltration par des eaux souterraines a été estimée à travers une comparaison de l'altitude de la surface piézométrique de la nappe avec celle du réseau d'assainissement, sur la base de l'hypothèse que les tronçons du réseau sous le niveau piézométrique ont le plus à risque d'être ennoyés. L'altitude piézométrique a été évaluée à travers des campagnes piézométriques réalisées en 2022 ainsi qu'à travers un modèle hydrodynamique 3D de l'hydrosystème pour reconstituer les niveaux piézométriques passés. Le modèle a été construit à l'aide du code de calcul MARTHE et les simulations ont été réalisées en régime transitoire. Ces 2 démarches ont permis d'identifier les tronçons du réseau les plus vulnérables au risque d'ennoyement, ceux-ci sont similaires à ceux identifiés de manière empirique par le gestionnaire du réseau. Il est également montré qu'une fraction du réseau est située systématiquement sous le niveau piézométrique, à minima 0.4% lors d'une période exceptionnelle de basse eaux (1997) et pouvant monter jusqu'à 14.7% lors d'une année exceptionnelle de hautes eaux (2001).

L'utilisation du modèle hydrodynamique permet également de tester l'évolution de la vulnérabilité du réseau selon différents scénarios prospectifs rendant possible l'anticipation d'actions à mettre en œuvre sur le réseau pour orienter les décisions de gestion et élaborer des solutions d'adaptation. Cependant, une méthode de modélisation considérant les rétroactions entre la dynamique de la nappe et celle des eaux usées parcourant le réseau d'assainissement reste à développer.

**Mots-clés : hydrogéologie urbaine, réseau d'assainissement, eau claire parasite, piézométrie, modélisation hydrodynamique.**

## *Groundwater contribution to parasitic water in sewer network in an urban catchment: case study of Lens-Liévin city (northern France)*

The interactions between groundwater and the sewerage network of the Lens-Liévin urban area, located in the north of France, locally lead to non-compliances in the operation of the sewerage network and the wastewater treatment plants questioning the city's economic development policy. Indeed, the inflow of groundwater within the sewerage network could be the cause.

The vulnerability of the network to intrusion of groundwater was estimated through a comparison of the altitude of the piezometric surface of the aquifer with the altitude of the sewer network, based on the assumption that network sections below the piezometric level are most at risk of being flooded. The piezometric altitude was assessed through piezometric campaigns conducted in 2022 and through a 3D hydrodynamic model of the hydrosystem to reconstruct past piezometric levels. The model was built using the MARTHE calculation code, and simulations were performed in transient flow. These two approaches allowed for the identification of the network sections most vulnerable to the risk of flooding, which are similar to those identified empirically by the network manager. It is also shown that a fraction of the network is consistently located below the piezometric level, at a minimum of 0.4% during an exceptional low-water period (1997). This fraction can increase to 14.7% during an exceptional high-water year (2001).

The use of the hydrodynamic model also allows testing the evolution of network vulnerability under different prospective scenarios, enabling anticipation of actions to be implemented on the network to guide management

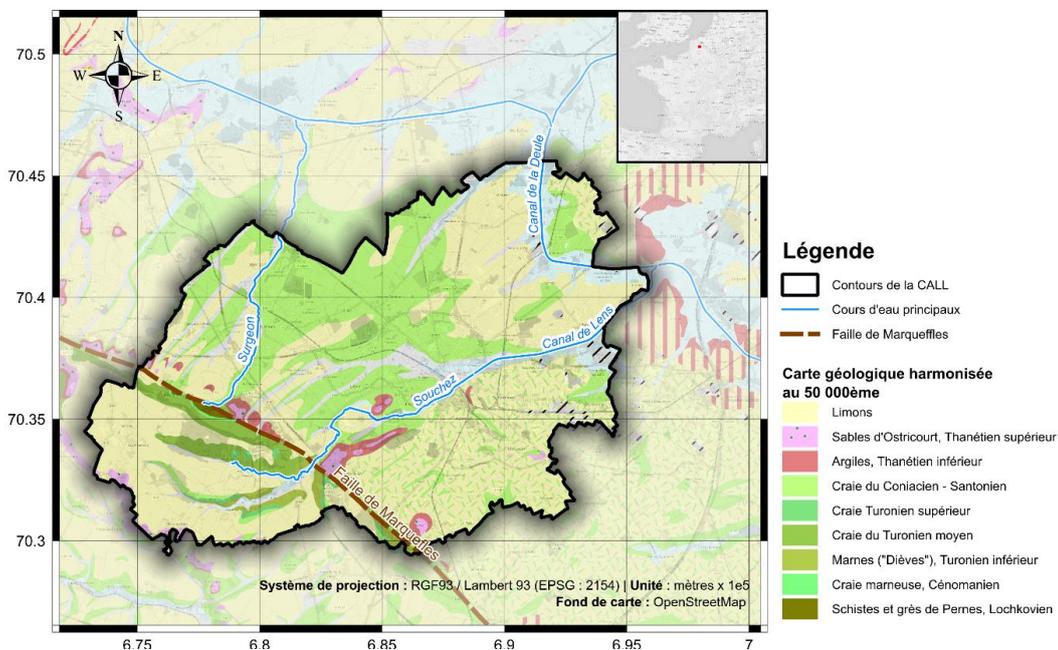
decisions and develop adaptation solutions. However, a modelling method considering the feedback between aquifer dynamics and wastewater flowing through the sewer network remains to be developed.

**Keywords:** urban hydrogeology, groundwater inflow, sewerage network, piezometry, hydrodynamic modelling.

## I CONTEXTE DE L'ETUDE ET PROBLEMATIQUE

### I.1 Contexte environnemental

Situé dans la région des Hauts-de-France, dans le département du Pas-de-Calais, à la limite entre les Plateaux de l'Artois et de la Plaine des Flandres (**Figure 1**), le territoire de la Communauté d'Agglomération de Lens-Liévin (CALL) présente une densité de population d'environ 1 000 habitants par km<sup>2</sup>, conduisant à une forte urbanisation et une artificialisation élevée du sol (46,3% du territoire). Il présente aussi des signes d'activités historiques passées, notamment l'exploitation minière débutée au XIX<sup>ème</sup> siècle et arrêtée dans les années 1990. Ces activités passées ont des conséquences encore actuelles, telles que l'existence d'une subsidence des terrains [Roussel *et al.*, 1994 ; Fomelis *et al.*, 2019]. Le secteur d'étude marque la transition entre le bassin sédimentaire dit de Paris au sud et le bassin sédimentaire dit de Bruxelles au nord, séparés par l'anticlinal faillé de l'Artois (d'axe NW-SE) à l'origine des Collines de l'Artois. Les failles les plus importantes sont de compression, peu propices à la présence de vides ou d'ouvertures. La Faille de Marqueffles située au sud-ouest de la CALL en est un exemple [Minguely, 2007]. Cette faille est peu perméable et toujours active [Camelbeeck *et al.*, 2012; Duguey *et al.*, 2000) (**Figure 1**). La CALL s'étend depuis les collines de l'Artois au sud-est de cet axe et au-delà au nord-est au droit de l'aquifère de la craie (Coniacien-Santonien) dont la nappe d'eau souterraine est libre avec un toit sub-affleurant. Cette situation est associée à différentes problématiques notamment d'inondations locales [*cf.* SYMSAGEL, 2017]. Cet état de fait implique une gestion complexe des ressources en eau et des réseaux techniques permettant leur utilisation. Dans ce cadre, la gestion du réseau d'assainissement est identifiée depuis plusieurs années comme un problème majeur.



**Figure 1.** Localisation de la CALL et urbanisation du territoire.

## I.2 Problématique vis à vis du réseau d'assainissement et partenariat entre le BRGM, VEOLIA et la CALL

La CALL compte cinq systèmes d'assainissement de tailles variables en termes de superficie et d'abonnés. Un système d'assainissement est composé d'une station d'épuration et d'un réseau de collecte dit réseau d'assainissement. Ces réseaux sont principalement unitaires (*i.e.* ils collectent les eaux de pluie et les eaux usées) et permettent de traiter les eaux usées de 110 000 abonnés. Ces réseaux collectent annuellement plus de 17 millions de m<sup>3</sup> d'eau.

Hors période d'orage, des volumes conséquents, largement supérieurs aux volumes d'eau usée attendus, sont identifiés circulant dans le réseau. Etant un réseau unitaire, celui-ci ne devrait drainer que des eaux usées et pluviales. Or, par temps sec, la nuit (consommation d'eau potable moindre) on observe des débits anormaux qui transitent dans le réseau. Des inspections ont révélé le transit d'eau claire parasite au sein de ce dernier. Cette eau claire parasite est attribuée à l'intrusion d'eau de la nappe de la craie en lien avec des défauts d'étanchéité du réseau.

Cette situation peut conduire au dépassement de la capacité de stockage du réseau d'assainissement et de traitement de la station d'épuration. Cela entraîne une augmentation des rejets par les déversoirs d'orage dans le milieu naturel (en moyenne, 15-20% du volume transitant dans le système de Loison-sous-Lens) et participe à la dégradation des cours d'eau recevant ces rejets non traités.

Des rejets par temps sec et/ou des rejets trop fréquents par temps de pluie entraînent un fonctionnement non-conforme de celui-ci, que ce soit par temps de pluie ou par temps sec.

L'exploitant VEOLIA réalise un bilan des flux par an par sous-système de son réseau d'assainissement dans lequel les termes du débit à la station d'épuration sont partitionnés. Les chiffres suivants (volume et pourcentage du débit total) sont donnés pour le système de Loison-sous-Lens (**Figure 2**). Dans un premier temps, le volume de nappe est défini en période sèche et nocturne (1.59 Mm<sup>3</sup>, 21%) ; le volume d'eaux usées issues des abonnés au réseau d'eau potable est basé sur les données de consommation en eau potable (4.37 Mm<sup>3</sup>, 57%) ; le volume de ruissellement correspond à la part des eaux pluviales rejoignant le réseau (1.10 Mm<sup>3</sup>, 14%) ; le volume de ressuyage par le sol est constitué de la part des pluies s'infiltrant après les événements pluvieux (0.59 Mm<sup>3</sup>, 8%).

Le réseau d'assainissement est ainsi dysfonctionnel au regard du cadre réglementaire national défini dans le code de l'environnement, le code général des collectivités territoriales, l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux réseaux d'assainissement collectif, ainsi que les contraintes particulières définies dans le cadre du SAGE, qui imposent de limiter les rejets par temps sec. Cette non-conformité du fonctionnement du réseau d'assainissement est sanctionnée par l'application d'indemnités par jour de dysfonctionnement et par des contraintes sur les actions d'urbanisation, ayant de fait un impact sur la politique de développement de l'agglomération.

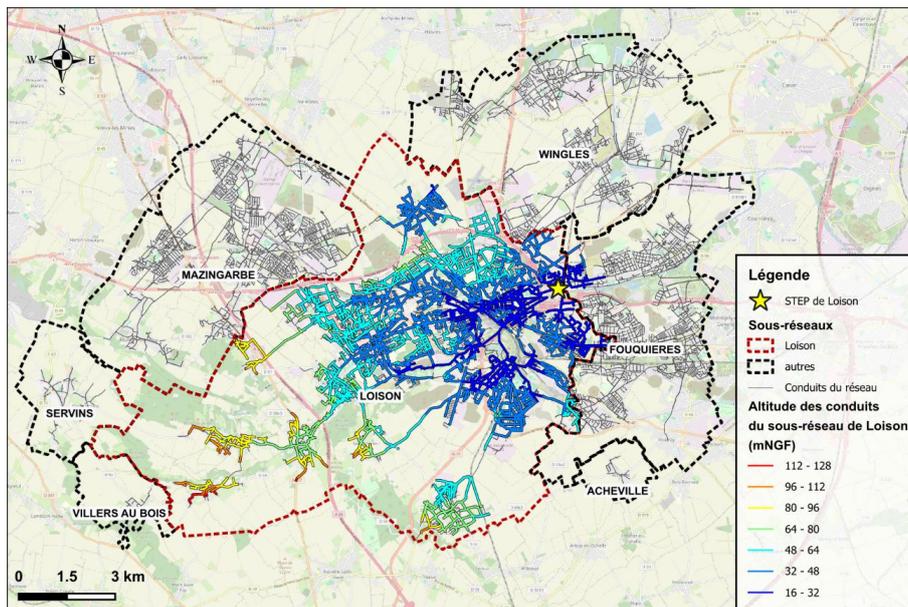
L'hypothèse principale formulée pour expliquer la présence d'eaux claires parasites est une possible infiltration d'eau souterraine de l'aquifère libre dans les tronçons du réseau d'assainissement devenus poreux ou fissurés. Phénomène connu, l'eau claire parasite peut provenir de l'infiltration d'eau de pluie mais aussi de l'infiltration d'eau souterraine (Ellis, 2001). C'est essentiellement ce second point qui constitue la problématique de l'exploitant VEOLIA. Pour qu'une infiltration d'eau souterraine vers le réseau d'assainissement soit possible, le niveau piézométrique de l'aquifère le plus superficiel doit être supérieur à l'altitude du réseau non étanche [Boukhemacha *et al.* 2015 ; Rodriguez *et al.* 2020]. Des méthodes de quantification existent et ont été comparées dans la littérature (De Bénédictis et Bertrand-Krajewski, 2005 ; Beheshti *et al.*, 2015).

Actuellement, la priorisation, faite par l'exploitant, des tronçons sur lesquels des travaux de maintenance sont envisagés pour limiter la présence des eaux claires parasites se base sur une analyse multicritères. Cette analyse intègre les caractéristiques du réseau, les historiques d'interventions, les inspections vidéo et des informations qualitatives sur le contexte géologique, hydrogéologique et climatique. Ces outils ne sont toutefois pas suffisants pour permettre une gestion efficace et pertinente de la présence d'eau claire parasite car ils intègrent des informations ayant des échelles spatiales trop différentes. De surcroît, la dimension temporelle associée à ces données, telle que la dynamique saisonnière et pluriannuelle de la nappe et la dynamique saisonnière et journalière des flux d'eaux usées, n'est pas prise en compte. Les limites de ces outils d'aide à la décision conduisent donc à une

difficulté pour identifier les secteurs du réseau d'assainissement affectés par l'infiltration d'eaux claires parasites.

Pour dépasser ces limites, il est nécessaire d'affiner la compréhension des interactions complexes entre les écoulements d'eau souterraine dans l'aquifère (grand cycle de l'eau) et les flux d'eau dans le réseau d'assainissement (petit cycle de l'eau). Pour ce faire, VEOLIA EAU, en charge de la gestion du réseau d'assainissement de la CALL, a sollicité un partenariat avec le BRGM dans le cadre du renouvellement du contrat de délégation de service public débuté en 2021. A travers un projet de Recherche et Développement (R&D), qui constitue une part de la délégation de service public, l'objectif est d'intégrer spatialement et temporellement la dynamique du réseau d'assainissement à celle de son environnement naturel pour en optimiser sa gestion dans un contexte de changement climatique et de modification des usages. Ce projet constitue une part de la délégation de service publique pour l'assainissement réalisée par VEOLIA EAU pour la CALL.

L'étude se concentre sur une partie du réseau d'assainissement de la CALL vulnérable à ces intrusions d'eaux claires parasites : le sous-réseau de Loison (**Figure 2**).



**Figure 2.** Sous-systèmes d'assainissement de la CALL.

Pour comprendre le rôle de l'eau souterraine sur la présence d'eaux claires parasites dans le réseau d'assainissement de la CALL, plusieurs travaux sont initiés et décrits ci-dessous.

## II MATERIELS ET METHODES

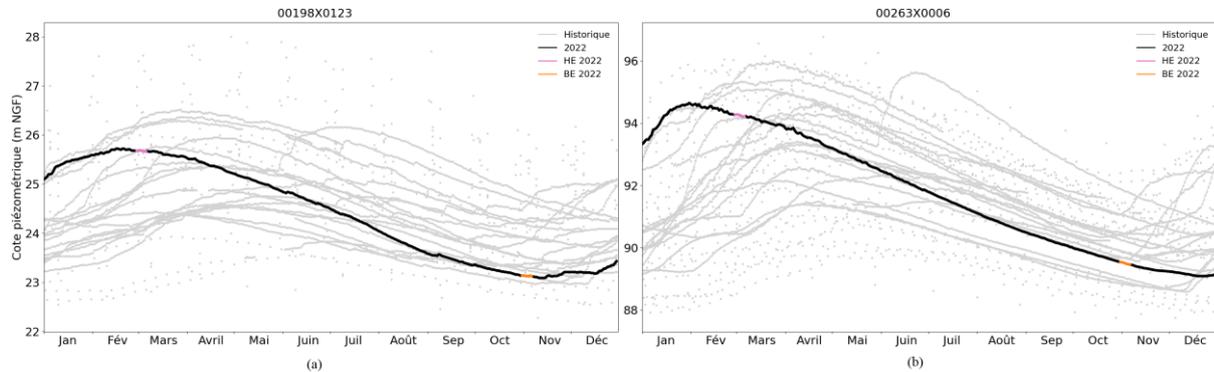
Afin de localiser les tronçons vulnérables, un indicateur reposant sur le croisement entre l'altitude des tronçons du réseau d'assainissement et la cote piézométrique peut être utilisé. Il est ainsi possible de distinguer les tronçons situés en-dessous de la surface piézométrique par une soustraction des deux altitudes.

Pour calculer la cote piézométrique, deux méthodes ont été retenues. La première se fait par mesures directes sur le terrain dans les ouvrages accessibles (puits, forages, piézomètres) interpolées puis représentées par une carte piézométrique, cette dernière ayant été réalisée en 2022. Pour pouvoir estimer la cote piézométrique passée, une seconde méthode s'appuie sur la modélisation hydrodynamique maillée. Quant à l'altitude du réseau, cette dernière a été mesurée lors d'une campagne de nivellement réalisée par l'opérateur VEOLIA EAU (**Figure 2**).

### II.1 Interpolation des données piézométriques issues des campagnes de mesures 2022

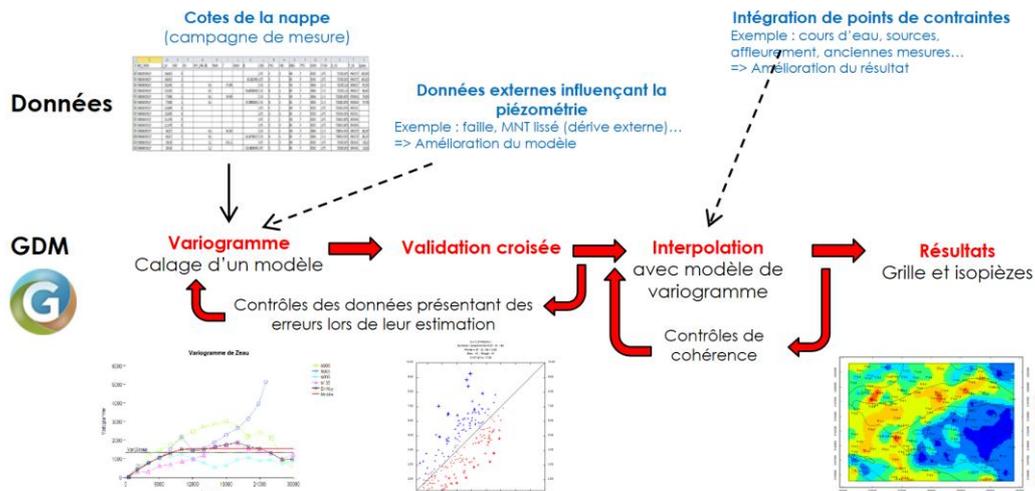
Afin de déterminer le niveau piézométrique de la nappe de la craie en hautes eaux (HE) et basses eaux (BE), deux campagnes de mesures de niveau d'eau ont été réalisées en mars 2022 et en novembre 2022, respectivement. Les situations HE et BE ont bien été mesurées par les campagnes 2022 (**Figure**

3). Entre les HE et BE, une amplitude de 2 mètres de l'altitude piézométrique s'observe au niveau de la Plaine des Flandres et de 4 mètres en amont dans les collines. L'année 2022 présente une particularité avec une période de HE précoce (1 mois) et une période d'étiage tardive (1 mois) par rapport à l'historique. Ces campagnes, d'une durée d'une semaine, ont ciblé des ouvrages souterrains captant l'aquifère de la craie (piézomètres, forages industriels et agricoles, puits) et des cours d'eau supposés connectés à la nappe.



**Figure 3** : Chroniques de l'altitude piézométrique de la nappe de la craie en 2022 au sein de l'historique. (a) Piézomètre à Lens dans la Plaine des Flandres. (b) Piézomètre à Ablain-Saint-Nazaire dans les collines de l'Artois.

Sur base de ces données, une interpolation géostatistique de l'altitude piézométrique a été réalisée en utilisant le logiciel GDM (Geological Data Manager) [Bourguin, 2020]. La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage avec pour dérive externe la topographie (**Figure 4**).



**Figure 4.** Démarche d'interpolation des mesures piézométriques.

## II.2 Simulation des niveaux piézométriques historiques de la nappe de la craie (1990 à 2020)

Afin d'avoir une information temporelle plus étendue que les hautes et basses eaux 2022, et ainsi estimer l'altitude de la nappe sur une plus grande période, une approche par la modélisation numérique a ensuite été suivie. Cela permet d'avoir une information sur l'effet saisonnier de la dynamique de la nappe. La modélisation hydrodynamique a également l'avantage de calculer des flux d'eau et des stocks.

Le modèle régional dit "de la Craie du Nord-Pas-de-Calais" (modèle NPC) est le modèle le plus étendu et le plus récent [Buscarlet *et al.*, 2011] (**Figure 5**). Ce dernier est un modèle hydrodynamique 3D multicouches maillé construit sous le code MARTHE [Thiéry, 2010 ; Thiéry, 2021] qui prend en compte le réseau hydrographique principal du territoire, les prélèvements d'exploitation et qui intègre le calcul de bilan hydroclimatique (évapotranspiration réelle, ruissellement et recharge) selon le

schéma du code de calcul GARDENIA (modèle global) [Thiéry, 2014]. Une extraction du modèle a été faite afin de créer un modèle centré sur la CALL. Celui-ci calcule le bilan hydroclimatique au pas de temps journalier tandis que les charges hydrauliques, les débits des cours d'eau et les bilans de nappe sont calculés mensuellement. Le modèle est calibré sur des chroniques piézométriques de plusieurs ouvrages ainsi que sur les débits de deux cours d'eau, la Deûle (incluant la Souchez) et le Surgeon sur la période allant de 1990 à 2020. En chaque pas de temps du modèle les surfaces piézométriques sont éditées pour le territoire de la CALL.

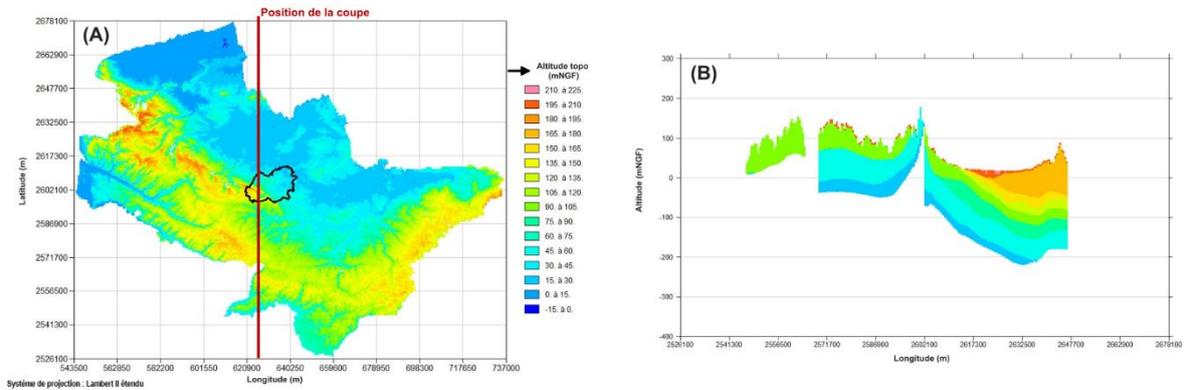


Figure 5. Vue cartographique et en coupe du modèle NPC avec position de la CALL.

### III RÉSULTATS

#### III.1 Croisement de la carte piézométrique mesurée avec l'altitude du réseau

Les campagnes piézométriques ont permis d'acquérir plus d'une centaine de mesures fiables et robustes qui ont ensuite été interpolées. Durant les périodes de hautes eaux (mars 2022) et de basses eaux (octobre 2022), 12.3 % et 4.9 % du réseau d'assainissement sont situés sous le niveau de la nappe de la craie, respectivement (Figure 6, réseau vulnérable indiqué en rouge).

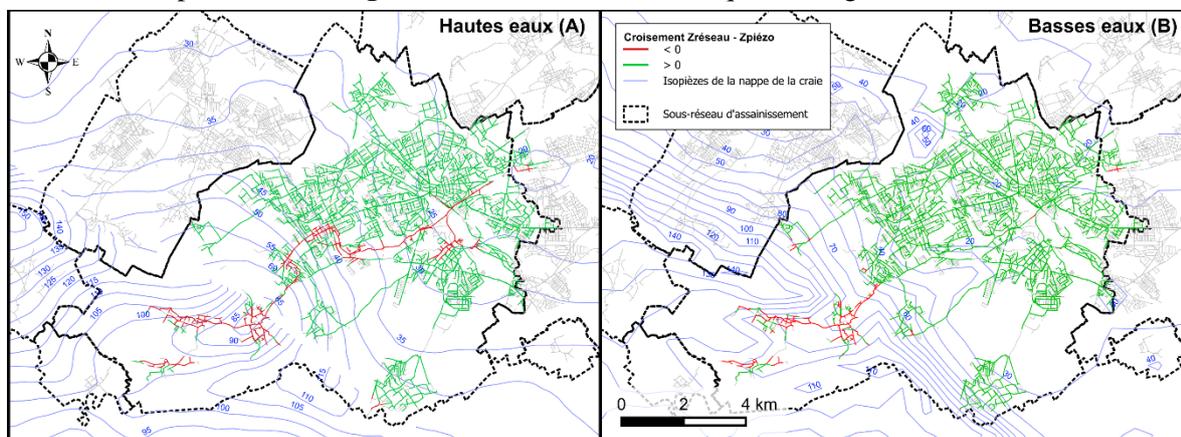


Figure 6. Croisements de l'altitude du réseau avec la piézométrie mesurée interpolée en hautes eaux (A) et en basses eaux (B) 2022.

D'après ce croisement, l'amont du réseau, au sud-ouest de la faille de Marqueffles est constamment ennoyé durant toute l'année 2022.

D'un point de vue général, les tronçons du réseau potentiellement les plus vulnérables à l'intrusion d'eau en provenance de la nappe sont principalement situées à proximité du cours d'eau de la Souchez.

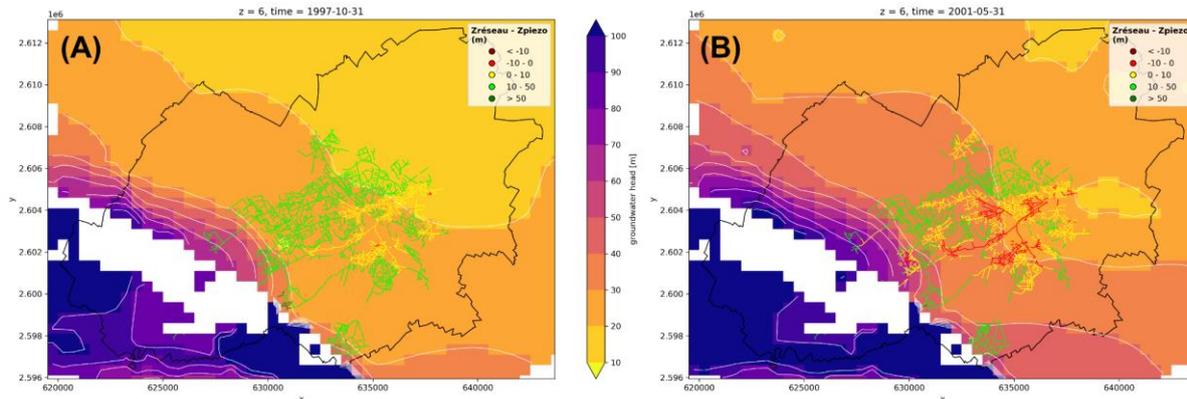
#### III.2 Croisement de la carte piézométrique simulée avec le réseau

Les résultats issus du croisement entre altitude piézométrique simulée et celle du réseau d'assainissement montrent que la part du réseau vulnérable à l'infiltration d'eau souterraine varie au

cours du temps. En période de très basses eaux (octobre 1997) 0.4% des tronçons du réseau sont ennoyés. Pour de très hautes eaux (mai 2001), 14.7% sont sous la surface piézométrique (**Figure 7**). Une partie du réseau est systématiquement ennoyée et correspond à 0.4% du réseau.

#### IV DISCUSSION

D'un point de vue spatial, les deux approches montrent que les tronçons du réseau les plus susceptibles d'être vulnérables à l'infiltration sont situés dans les zones où la nappe est sub-affleurante (proche des cours d'eau en fond de vallées). Les deux approches confirment également l'importance du saut piézométrique causé par la faille de Marqueffles dans le degré de vulnérabilité du réseau. Le réseau semble plus vulnérable au sud-ouest de la faille.



**Figure 7.** Croisement de l'altitude du réseau avec la cote piézométrique simulée de la couche crayeuse (coniacien-santonien) du modèle 3D en période de basses eaux (A) et en hautes eaux (B).

D'un point de vue temporel, la dynamique de la nappe de la craie est inertielle. Ainsi, la cote piézométrique est fortement conditionnée par l'état du système précédemment, en particulier dépendante de la recharge hivernale passée. Par exemple, les simulations indiquent un haut taux de réseau ennoyé en mai 2001, période de hautes eaux avant laquelle les recharges hivernales ont été fortes. Les résultats de 1997 s'expliquent également par le déficit de recharge hivernale les années précédentes. Il est clair qu'il y a un effet saisonnier de la dynamique de la nappe sur le réseau d'assainissement. Les résultats de ces croisements d'altitude sont cohérents avec les observations et interprétations de l'opérateur du réseau VEOLIA EAU (d'après leur bilan des flux et leurs inspections visuelles ponctuelles) et ajoute néanmoins des informations de vulnérabilité vis à vis des eaux claires parasites de nappe en tout point du réseau sur les périodes passées, actuelles et futures.

Cependant, la principale limite de cette approche par croisement d'altitude est qu'elle ne constitue qu'une approche qualitative ne permettant que d'évaluer une vulnérabilité potentielle du réseau d'assainissement. Le modèle développé ne prend pas en compte explicitement les interactions entre petit cycle (réseau) et grand cycle de l'eau (eaux souterraines), ce qui peut biaiser localement le calcul des niveaux piézométriques car les pertes d'eaux souterraines dans le réseau ne sont pas représentées, par exemple. Il est ainsi nécessaire d'affiner notre compréhension des échanges d'eau entre le réseau et l'aquifère crayeux en tenant compte de la variabilité spatio-temporelle des deux cycles.

#### V PERSPECTIVES

Plusieurs verrous liés à la caractérisation des interactions entre l'environnement aquatique et le réseau d'assainissement ne permettent pas de déterminer et quantifier comment le contexte hydrogéologique contrôle la présence d'eaux claires parasites dans le réseau d'assainissement. L'infiltration d'eaux claires parasites dans le réseau peut se faire en provenance de la nappe ou des eaux de recharge provenant de la surface ou des eaux de surface. L'existence de ces différentes sources d'eau conduit à des difficultés dans l'identification de l'origine des eaux claires parasites. Ainsi, il est actuellement impossible de déterminer si les mêmes sources d'eau sont à l'origine de la surcharge du réseau tout au long de l'année hydrologique et si tous les tronçons du réseau présentent la même vulnérabilité.

Pour dépasser les limites exposées ci-dessus, un doctorat a débuté en mars 2024, fruit d'un partenariat entre le BRGM, l'Université de Mons et VEOLIA EAU. L'objectif global de ce doctorat est d'identifier, de quantifier et prédire les impacts des conditions hydrogéologiques dans l'aquifère sur le fonctionnement du réseau d'assainissement. Ce sujet s'inscrit donc dans un changement de paradigme consistant à ne plus étudier de manière indépendante le petit cycle de l'eau et le grand cycle de l'eau mais de les étudier de manière conjointe. Ce doctorat se décline sous trois objectifs. Il s'agira dans un premier temps de préciser le modèle conceptuel et de le rendre cohérent et intégrateur des processus contrôlant le grand cycle et le petit cycle de l'eau. Cela sera fait sur la base d'une consolidation, d'une analyse et d'un traitement croisé des chroniques de mesures déjà disponibles sur le territoire d'études. Le second objectif sera de caractériser localement les interactions entre nappe et réseau où elles sont effectives par la mise en place d'un dispositif expérimental in situ. Notamment, des campagnes d'essais de traçage sont envisagées dans un secteur spécifique. Le troisième objectif sera de proposer une méthodologie de modélisation tenant compte des flux d'eau entre le réseau d'assainissement et l'aquifère, le tout intégré dans la dynamique de l'hydrosystème crayeux.

Par la précision du modèle conceptuel des interactions entre le petit et le grand cycle de l'eau, les résultats de ce doctorat pourront être mobilisés afin d'améliorer la gestion des ressources en eau en contexte urbain afin de limiter les impacts sur les réseaux techniques. Les concepts et les outils développés durant cette thèse constitueront un prérequis pour envisager la possible réutilisation possible des eaux claires parasites, s'inscrivant ainsi dans le développement de nouvelles solutions pour une gestion intégrée de l'eau à l'échelle d'un territoire. Ces résultats seront également mobilisables pour répondre à des questionnements analogues posés sur d'autres secteurs du territoire français ou à l'international. Il est à souligner que ces questionnements de gestion des eaux souterraines en contexte urbain seront amenés à s'amplifier dans les années à venir au regard de l'expansion urbaine s'opérant en France et à l'étranger depuis plusieurs décennies et dans les décennies futures.

## VI REFERENCES

- Beheshti M., Saegrov S., Ugarelli R.M. (2015). *Infiltration/Inflow Assessment and Detection in Urban Sewer System*. Vann Journal.
- Bénédictis J., Bertrand-Krajewski J-L. (2005). *Infiltration in sewer systems: Comparison of measurement methods*. Water Science & Technology. 52. 219-227. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0079>.
- Boukhemacha M. A., Gogu C., Serpescu I., Gaitanaru D., Bica I. (2015). - A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest city, Romania. *Hydrogeology Journal*, 23(3):437–450. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-014-1220-3>.
- Bourgine, B. (2020). - *GDM - Outils (Géo)statistiques, Manuel de référence*. BRGM/RC-67538-FR.
- Buscarlet, E., L. Pickaert, Ph. Stollsteiner, T. Klinka, A. Wuilleumier, and F. Asfirane. (2011). - *Modélisation de La Nappe de La Craie – Calage Du Modèle Hydrodynamique En Régime Transitoire*. Rapport final. BRGM/RP-60217-FR.
- Camelbeeck T., Verbeeck K., Lecocq T., Vanneste K., Sébrier M., Bergerat F., Jomard H., Baize S., Colbeaux J.-P. & Vanduycke S. (2012). - *The recent activity of the Marqueffles fault (Artois). Moving Plates and Melting Icecaps*. Processes and Forcing Factors in Geology, 4TH Inter. Geol. Belgica Meeting, Bruxelles.
- Ellis, J. B. (2001) *Sewer Infiltration/Exfiltration and Interactions with Sewer Flows and Groundwater Quality*. INTERURBA II, Lisbon, 19-22, pp. 311-319.
- Foumelis, M., Raucoules, D., Morel, J. (2019). - *Mesure de la déformation du sol sur le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais par interférométrie radar*. BRGM/RP-69194-FR.
- Minguely, B. (2007). - *Caractérisation géométrique 3-D de la couverture sédimentaire méso-cénozoïque et du substratum varisque dans le Nord de la France : apports des données de sondages et des données géophysiques*. [Thèse de Doctorat]. Lille, France : USTL.
- Morel, J., et Pascal D. (2018). - *Revisitation de la surveillance par nivellement des mouvements de terrain sur le Bassin Houiller du Nord Pas-de-Calais*. BRGM/RP-67610-FR.
- Rodriguez, F., Le Delliou, A.-L., Andrieu, H., Gironás, J. (2020). - *Groundwater Contribution to Sewer Network Baseflow in an Urban Catchment-Case Study of Pin Sec Catchment, Nantes, France*. *Water*, 12(3):689. <https://doi.org/10.3390/w12030689>.

- Roussel, I., Meilliez F., Carlier, E., (1994). – Noir, bleu, vert, les différentes couleurs de l’environnement du bassin minier. *Hommes et Terres du Nord*, 1(1):41–47. <https://doi.org/10.3406/htn.1994.2453>.
- Syndicat Mixte pour le SAGE de la Lys (SYMSAGEL). (2017). - *Programme d’Actions de Prévention des Inondations (PAPI) 3 du bassin versant de la Lys*.
- Thiéry, D. (2010). - Modélisation des écoulements souterrains en milieu poreux avec MARTHE. *Traité d’hydraulique environnementale, Logiciels d’ingénierie du cycle de l’eau*. Vol. 9., édité par J.-M. Tanguy. Paris: Hermes Science publ. : Lavoisier. p. 77–94.
- Thiéry, D. (2014). - *Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d’utilisation*. BRGM/RP-62797-FR.
- Thiéry, D. (2021). - *Code de Calcul MARTHE Version 7.8 - Modélisation 3D Des Écoulements et Des Transferts Dans Les Hydrosystèmes - Notice d’utilisation*. BRGM/RP-69541-FR.