Impact des aménagements de la Seine et lacs de gravières sur le fonctionnement hydrogéologique de la plaine alluviale de la Bassée.

Gurpreet Dass[1*], Anne Jost[1], David Eschbach[1,2], Agnès Ducharne[1]

[1] Sorbonne université, CNRS, EPHE, METIS, F-75005 Paris, France
[2] Ville et Eurométropole de Strasbourg (Direction espaces publics et naturels), France

[*] gurpreet.dass@sorbonne-universite.fr

Résumé

L'activité humaine a profondément modifié le paysage de la plaine alluviale de la Bassée depuis le milieu du XIX^{e} siècle. À travers cette étude, nous avons essayé de quantifier l'impact des aménagements de la Seine ainsi que de l'extraction de granulats sur le fonctionnement hydrogéologique de cette plaine. Ce travail a été réalisé en situation de basses eaux à l'aide d'un modèle hydrogéologique représentant les aquifères de la Bassée, soit ceux des alluvions et de la craie. Une simulation comparant la Seine en 1839 et la Seine d'aujourd'hui a montré une élévation du niveau de la nappe des alluvions de près de 80 cm et de 79 cm dans la nappe de la craie. L'intégration des gravières dans l'hydrosystème entraine quant à elle une baisse du niveau piézométrique de près de 26 cm dans les alluvions et de 25 cm dans la craie. Lorsque ces deux pressions sont combinées et confrontées à une plaine ante-aménagement datant de 1839, une élévation de 60 cm dans l'aquifère des alluvions est simulée. Cette étude préliminaire semble indiquer que les aménagements de la Seine ont un impact bien plus important que l'extraction de granulats.

Points clefs

- ✓ *Simulation d'une hausse moyenne du niveau piézométrique de près de 80 cm dans les aquifères de la Bassée, suite à la mise en place d'écluses, de barrages et de la chenalisation de la Seine, en situation de basses eaux*
- ✓ *Simulation d'une baisse moyenne du niveau piézométrique de près de 26 cm dans les aquifères de la Bassée, suite à l'apparition de gravières dans la plaine, en situation de basses eaux*
- ✓ *Comparaison de simulations hydrogéologiques d'une plaine ante-exploitation datant de 1839 à une plaine contemporaine post-aménagement*

Abstract

Since the mid-19th century, human activity has profoundly modified the Bassée landscape. Through this study, we tried to quantify the impact of the Seine river modification as well as the extraction of gravel and sand in the plain on the hydrogeology of the plain. This work was carried out under low flow conditions using a hydrogeological model, representing the alluvial and chalk aquifers of the Bassée. A comparison of a simulation between the Seine in 1839 and the Seine today showed a rise in the level of the alluvial aquifer of nearly 80 cm and 79 cm in the chalk aquifer. The integration of gravel pits in the hydrosystem lead to a drop in the groundwater level of nearly 26 cm in the alluvium and 25 cm in the chalk. When these two pressures are combined and confronted with an almost "natural" state of the study area from 1839, an elevation of 60 cm in the alluvial aquifer is simulated. This preliminary study seems to indicate that the works that the Seine river underwent are more impactful than the extraction of aggregates.

Key points

- ✓ Simulation of an average elevation of nearly 80 cm in the aquifers of the Bassée, due to the construction of levees, dams and the Seine river channelization, under low flow conditions
- ✓ Simulation of an average drop of nearly 26 cm in the aquifers of the Bassée, due to gravel pit lakes, under low flow conditions
- ✓ Comparison of a simulated alluvial plain from 1839 without any anthropogenic pressure with a plain from the 21st century under anthropogenic pressure

Introduction

Ellis et Ramankutty (2008) avaient conclu dans leur étude que plus de 75 % de la surface terrestre libre de glace est à présent impactée par l'activité humaine. Ceci s'explique en partie par l'expansion des zones urbaines, qui entraine une demande croissante en terre habitable, mais également en matériaux de construction tels que le gravier ou le sable. Cette extraction de granulats a connu une accélération, surtout depuis les années 1960. De plus, ces villes densément peuplées doivent être protégées contre les catastrophes naturelles telles que les crues. Une augmentation du nombre de rivières contrôlées par des barrages-réservoirs est ainsi observée depuis le XXe siècle (Lehner *et al.*, 2011). Les aménagements subis par ces cours d'eau sont réalisés dans de nombreux buts, tels que le soutien à l'étiage pour permettre la navigation sur ces fleuves tout au long de l'année ou bien l'irrigation, pour répondre à la demande croissante en denrées alimentaires.

La Bassée est un territoire profondément marqué par l'activité humaine. C'est pourquoi les équipes du PIREN-Seine s'y intéressent depuis de nombreuses années. À travers l'étude de cartes anciennes ou bien de photographies aériennes, l'équipe d'ArchiSeine (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018 ; Lestel *et al.*, 2018) a par exemple pu reconstruire l'évolution de la Seine et de ses aménagements depuis 1839. La reconstitution de l'évolution spatiale et temporelle des zones d'extraction de granulats a également été réalisée par traitement d'images satellites (Picourlat *et al.*, 2018 ; Teillaud, 2018). Ces jeux de données, qui ne cessent d'être enrichis à chaque nouvelle phase du PIREN-Seine, ont également pu être exploités dans le but de comprendre l'impact de ces pressions anthropiques sur le fonctionnement hydrogéologique de la plaine, à travers une approche de modélisation (Jost *et al.*, 2017, 2019). L'objectif de cette étude est de poursuivre ce travail pour tenter de quantifier l'impact des aménagements de la Seine et des lacs de gravières sur les aquifères de la Bassée. Dans un premier temps, l'impact de chacune de ces pressions anthropiques prises individuellement est simulé à l'aide d'un modèle hydrogéologique de la plaine et en situation de basses eaux. Dans un second temps, une plaine se rapprochant de son état « ante-anthropisation » en 1839 est comparée par le biais de la modélisation à une plaine couverte de lacs de gravières avec une Seine chenalisée, dont l'écoulement est contrôlé par des écluses et barrages-réservoirs.

1. La Bassée, une zone fortement anthropisée

1.1. Un territoire au cœur de nombreux enjeux

La Bassée est une plaine alluviale, qui se situe entre la confluence de la Seine avec l'Aube en amont et le Loing en aval, après la confluence Seine-Yonne, couvrant une surface de près de 400 km^2 (Figure 1). Ses contours géologiques sont définis par l'affleurement des alluvions. Cette plaine est alimentée par les eaux issues des précipitations et de l'aquifère régional de la craie. Ce dernier est productif sur les 30 premiers mètres de sa formation correspondant à la craie fissurée, sur laquelle repose la couche des alluvions, qui abrite également une réserve en eau douce. La capacité de dénitrification de la plaine explique la qualité de cette ressource en eau (Fustec et al., 2001), considérée d'importance régionale par le SDAGE 2022-2027 (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux). C'est également la zone humide la plus importante à proximité de la région Île-de-France, faisant de ce territoire une zone d'une grande richesse écologique, ayant abouti à son classement en « Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique » (ZNIEFF) en 1997, son inscription au Réseau Natura 2000, ainsi qu'à la création en 2002 d'une Réserve naturelle de près de 8,5 km^2. De plus, elle abrite l'un des gisements de granulats les plus importants à proximité de la région Île-de-France, dont l'exploitation a abouti à la mise en eau de près de 10 % de la plaine (Picourlat *et al.*, 2018). Lors de l'extraction de granulats, la zone d'extraction, également appelée carrière, peut être mise en eau par apport d'eau souterraine et de précipitations, formant ainsi des gravières. Ces lacs d'origine anthropique peuvent, à la fin de leur exploitation, être réaménagés pour des activités récréatives telles que la baignade ou bien la pêche, mais également être préservés comme habitats naturels pour de nombreuses espèces animales et végétales. La Bassée aval a connu un développement de l'activité agricole, au détriment de l'élevage bovin, grâce à la diminution de la fréquence des événements de crues (e.g. Baron et Piketty, 2001 ; Fustec *et al.*, 2001). Ceci a notamment été permis grâce aux barrages-réservoirs situés en amont de la plaine, mis en place en 1966 pour le lac-réservoir Seine et en 1990 pour l'Aube, mais également dans les années 1970 par la mise en grand gabarit de la Seine de l'écluse de la Grande-Bosse, en aval de Bray-sur-Seine jusqu'à Montereau-Fault-Yonne (Baron et Piketty, 2001). Cette activité agricole est à son tour en déprise du fait de l'activité des carrières.

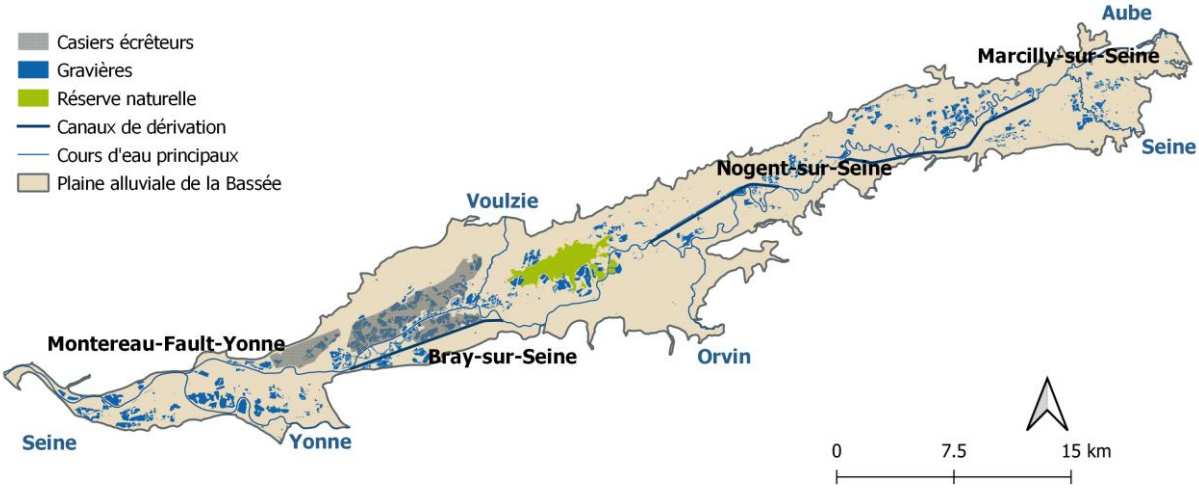

Figure 1 : La plaine alluviale de la Bassée et ses enjeux.

C'est pourquoi ce territoire est un terrain d'étude intéressant pour mieux comprendre comment l'anthropisation d'une plaine alluviale, motivée par son développement économique et ici également celui de la région parisienne, peut impacter son fonctionnement hydrodynamique, d'autant plus que d'autres travaux d'envergure sont en cours de réflexion dans la plaine. Le prolongement de la mise en grand gabarit de la Seine est ainsi envisagé, pour permettre aux bateaux de 2 500 tonnes de circuler depuis Bray-sur-Seine jusqu'à Nogent-sur-Seine (Voies Navigables de France, VNF). Un second projet visant à éviter la crue simultanée de la Seine et de l'Yonne par stockage d'eau est en cours de test, à l'aide de casiers écrêteurs de crue entre Bray-sur-Seine et Montereau-Fault-Yonne, constitués majoritairement d'anciennes gravières (projet de l'EPTB Seine Grands Lacs).

1.2. Aménagements de la Seine

La Seine, qui traverse la Bassée, connecte la plaine à la région parisienne. Elle a connu depuis le XVI^e siècle des aménagements ayant pour but jusqu'à la fin de la première moitié du XIX^e siècle d'améliorer les

conditions de navigation sur la Seine, notamment pour le transport de marchandises et de bois de flottage. Parmi ces aménagements, il est possible de citer la suppression des seuils et hauts-fonds, ces derniers pouvant entrainer un arrêt de la navigation sur la Seine en situation de basses eaux, ou bien la mise en place d'écluses (Fustec *et al.*, 2001). A cet objectif s'est ajoutée la protection des zones agricoles contre les crues depuis la seconde moitié du XIX^{e} siècle. La reconstitution de l'évolution historique de ces modifications est détaillée dans de précédents rapports du PIREN-Seine (Fustec *et al.*, 2001 ; Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018) ainsi que dans le rapport ArchiSeine (Lestel et al., 2018).

L'histoire des aménagements de la Seine reflète l'évolution des besoins de la plaine, mais également de la région Île-de-France, marquée au XX^{e} siècle par un regain d'intérêt pour la navigation ayant abouti à des travaux de grande ampleur tels que la mise en grand gabarit de la Seine dans les années 1970, le rescindement de méandres ainsi que la création des barrages-réservoirs de la Seine et de l'Aube. Ces travaux ont entrainé une augmentation de la pente et des vitesses d'écoulement dans la Seine (Baron et Piketty, 2001). La rectification du tracé de la Seine par rescindement de méandres, curages et reprofilage des berges a abouti à une perte de 10 km de linéaire sur le secteur de la Bassée depuis 1839, ainsi qu'une modification de la largeur et de la profondeur du cours d'eau (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018). En parallèle, des écluses et des barrages ont été mis en place le long de la Seine ou le long des canaux de dérivation, dont les premiers sont datés du milieu du XIX^{e} siècle (Fustec *et al.*, 2001 ; Eschbach et Lestel, 2018).

La découverte d'un ensemble de cartes d'une grande précision datant de 1839 et couvrant la Seine entre Nogent-sur-Seine et Montereau-Fault-Yonne a permis à l'équipe d'ArchiSeine de reconstituer le tracé de la Seine à cette époque (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018 ; Lestel et al., 2018). La reconstitution du profil en long de la Seine en 1839 a été permise par numérisation et géoréférencement de cartes anciennes issues des archives des Ponts et Chaussées (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018 ; Lestel *et al.*, 2018). Pour les données les plus récentes, l'étude de photographies aériennes et de données VNF a permis à la même équipe de reconstituer le tracé de la Seine pour 2010, la ligne d'eau à l'étiage pour 2007 ainsi que l'altitude du lit de la Seine (Lestel *et al.*, 2018). Une élévation moyenne de 3 m de la ligne d'eau en situation de basses eaux entre Nogent-sur-Seine et Bray-sur-Seine a ainsi été mise en évidence, avec un enfoncement moyen du lit de la Seine de 1 m entre 1839 et 2007. Pour le tronçon s'étendant de Bray-sur-Seine à Montereau-Fault-Yonne, cette élévation est de 1,5 m avec un enfoncement moyen de près de 2 m (Lestel *et al.*, 2018).

1.3. Gisement de granulats

Les sables et graviers alluvionnaires constituent des matières premières utilisées dans le domaine du bâtiment et des travaux publics et dont la demande connait une accélération depuis les années 1960, notamment dans la région Île-de-France. Elle atteint actuellement 30 Mt/an, dont 13 Mt/an pour la petite couronne qui n'en produit que 1,5 Mt/an, nécessitant donc l'importation de granulats, notamment en provenance de la Bassée (UNICEM, 2017). La pression urbaine croissante en région parisienne s'est retranscrite dans la Bassée par une intensification des exploitations, qui s'est d'abord concentrée en aval de la plaine, s'étendant ensuite vers l'amont, contrainte entre autres choses par la disponibilité des surfaces exploitables. Les gravières sont responsables de la mise en eau de près de 10 % de la plaine et occupent dans 70 % des cas des terres cultivables (UNICEM, 2017). Elles sont également les témoins de l'évolution de la réglementation et des techniques de réaménagement des carrières post-exploitation, les plus anciennes étant très souvent remblayées ou réhabilitées pour le développement d'activités telles que la pêche, les sports nautiques ou bien la baignade. Depuis les années 1990, la préservation de ces habitats écologiques est privilégiée. Par exemple en Île-de-France, 50 % des anciennes zones d'extraction sont classées en ZNIEFF de type 2 (UNICEM, 2017).

Les gravières sont des lacs en communication directe avec les aquifères voisins. Dans le cas des gravières de la Bassée, elles communiquent avec l'aquifère des alluvions à travers leurs berges latérales et avec l'aquifère de la craie à travers leur lit. Ces plans d'eau perturbent le gradient hydraulique, entrainant un rabattement du niveau piézométrique en amont hydraulique du lac et une élévation du niveau de la nappe en aval (Fig. 2 b) par rapport à la situation ante-exploitation (Figure 2 a) (Peaudecerf, 1975). Les flux d'eau et de sédiments traversant ces lacs peuvent entrainer le développement d'une zone à faible perméabilité aux interfaces lacs-aquifères, préférentiellement à l'aval et dans le fond des lacs : le phénomène s'appelle le colmatage (Darmendrail, 1986). En cas de colmatage des berges aval et du lit des gravières, le niveau de la nappe est surélevé en amont et abaissé à l'aval (Figure 2 c) par rapport à la situation ante-exploitation (Figure 2 a). C'est l'évolution qui est la plus probable, car les sédiments suivent le sens d'écoulement et se concentrent donc dans le fond et à l'aval des lacs (e.g. Blanchard, Keime et Lansiart, 1991). Le colmatage ne dépend néanmoins pas seulement du phénomène de sédimentation. En effet, le type d'aménagement réalisé à la fin de l'exploitation et le degré d'eutrophisation du lac peuvent également favoriser son développement.

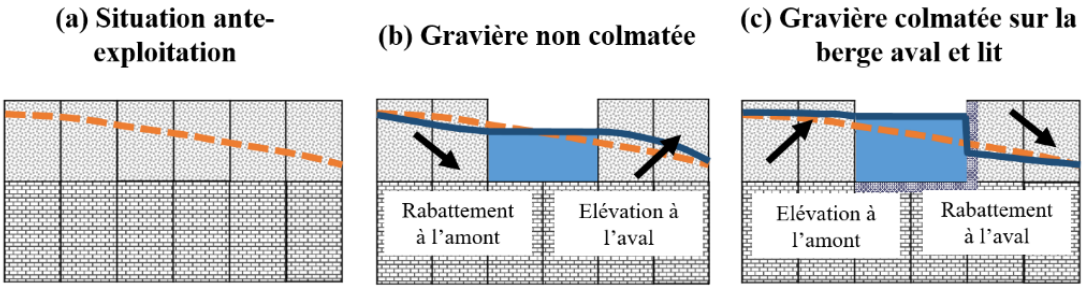

Figure 2 : Conséquences de la création d'une gravière sur le gradient hydraulique d'une nappe, avec en pointillé orange le niveau de la nappe avant et en ligne continue bleue le niveau après la création d'une gravière (Peaudecerf, 1975 ; Colleoni, 2019).

L'étude de l'impact des gravières sur le fonctionnement hydrodynamique de la plaine de la Bassée à l'aide d'une approche de modélisation a mis en évidence une baisse moyenne de 10 cm dans la nappe des alluvions suite à l'intégration des gravières dans l'hydrosystème (Jost *et al.*, 2017). Les lames d'eau évaporées au niveau des lacs sont, dans un climat tempéré comme celui de la Bassée, très souvent supérieures à l'évapotranspiration du sol ante-exploitation, entrainant une perte d'eau pour le système (Mollema et Antonellini, 2016 ; Jost *et al.*, 2017). Jost *et al.,* (2017) et Picourlat (2018) mettent en évidence que ces pertes d'eau sont compensées à 75 % par l'aquifère de la craie et 25 % par celui des alluvions. Il est tout de même important de noter que cela dépend également du type de sol présent avant l'exploitation, sol nu ou bien végétalisé, et du type de végétation.

2. Stratégie de modélisation pour l'étude de l'impact des aménagements de la plaine sur son fonctionnement hydrodynamique

2.1. Modèle hydrogéologique de la plaine de la Bassée

Pour réaliser cette étude, un modèle hydrogéologique représentant la Bassée emboîté dans un modèle régional couvrant le bassin de la Seine est utilisé (Flipo, Gallois et Schuite, 2021). Développé lors de la précédente phase du PIREN-Seine (Jost *et al.*, 2017 ; Picourlat *et al.*, 2018 ; Jost *et al.*, 2019), ce dernier est construit autour de la plate-forme de modélisation CaWaQS, basée sur le code MODCOU-NEWSAM (de Marsily *et al.*, 1978 ; Ledoux, 1980). Ce modèle est composé de différentes librairies permettant de simuler les flux d'eau dans chacun des compartiments d'un hydrosystème : la surface, la zone non saturée et la zone saturée, de manière indépendante ou conjointe. Le bilan hydrologique est calculé en surface à l'aide d'un modèle à réservoirs qui répartit les précipitations en flux d'eau évaporés, infiltrés et ruisselés. La fraction qui ruisselle est alors directement transférée au réseau hydrographique discrétisé, où la hauteur d'eau est estimée selon le schéma de Muskingum (Cunge, 1969). L'eau infiltrée est transférée verticalement dans la zone vadose à travers une cascade de Nash jusqu'à l'aquifère. Le niveau piézométrique de l'aquifère est alors estimé à chaque pas de temps par résolution de l'équation de la diffusivité en 2-D. Un module récemment développé par Wang et al. (2016), qui se base sur le module LAK de MODFLOW (Merritt et Konikow, 2000), permet d'estimer le niveau d'eau dans les lacs et les flux d'eau entre le lac et les aquifères voisins.

Le modèle régional du bassin versant de la Seine est composé de 8 couches représentant les différentes formations géologiques constitutives de ce bassin sédimentaire (Flipo, 2015 ; Labarthe, 2016 ; Flipo, Gallois et Schuite, 2021). Le maillage présente une résolution pouvant aller de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Le modèle local de la Bassée est quant à lui composé de deux couches représentant l'aquifère des alluvions et l'aquifère de la craie, avec un maillage uniforme de 50 m par 50 m pour la couche des alluvions et des mailles carrées de 50 m et 100 m de côté pour la couche de la craie. Le modèle intègre 323 km^2 des 400 km^2 qui constituent la plaine alluviale de la Bassée. L'épaisseur des alluvions, en moyenne de 6 m, est dérivée des travaux de Deleplancque *et al.*, (2013) qui avaient estimé l'épaisseur de cette couche par traitement de données de sondages. Le champ de transmissivité des alluvions, qui permet de tenir compte de l'hétérogénéité des conditions hydrodynamiques sur la plaine, a été établi par Labarthe (2016) par estimation des flux d'eau grâce à une méthode d'inversion et à l'aide d'une carte piézométrique de référence. Le champ de transmissivité de la craie est quant à lui directement issu du modèle régional du bassin de la Seine.

Imposée en entrée du modèle, la recharge correspond à la lame d'eau infiltrée calculée par le module de surface du modèle régional du bassin de la Seine, par résolution du bilan hydrologique. Les flux d'eau issus des aquifères régionaux de la craie et des alluvions sont imposés aux limites du modèle local. Les hauteurs

d'eau dans les cours d'eau principaux (Seine, Orvin, Voulzie et Aube) sont des conditions aux limites à charge imposée.

Les simulations présentées dans les parties suivantes sont réalisées en régime permanent et en situation de basses eaux, avec des forçages calculés par le modèle régional du bassin de la Seine sur le mois de septembre de la période 1995-2019.

2.2. Stratégie pour l'étude de l'impact des aménagements de la Seine

L'impact des aménagements de la Seine sur l'hydrogéologie de la Bassée est étudié par comparaison de deux états de la plaine. Une première simulation est réalisée avec une Seine méandriforme, sans écluse et sans barrage-réservoir à l'amont (RIV1839). La seconde simulation intègre la Seine avec tous les aménagements qu'elle a subis depuis le milieu du XIX^{e} siècle (RIV2007).

La ligne d'eau de la Seine pour septembre 2007, reconstruite par les équipes du PIREN-Seine (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018) depuis Nogent-sur-Seine, est comparée à la ligne d'eau simulée par le modèle régional du bassin de la Seine, moyennée pour le mois de septembre sur la période 1995-2019 (Figure 3). Le modèle régional sous-estime la hauteur d'eau dans le cours d'eau de près de 8 m en moyenne. Pour la simulation RIV2007, la ligne d'eau reconstituée en septembre 2007 est donc utilisée. Cette donnée est spatialisée sur la Seine du modèle local de la Bassée, à l'aide des écluses et barrages servant comme points de repère. La base de données des obstacles à l'écoulement Sandre fournit la localisation des écluses et barrages sur les cours d'eau français ainsi que, lorsque disponible, une estimation de la chute de hauteur d'eau à l'étiage entre l'amont et l'aval de ces obstacles.

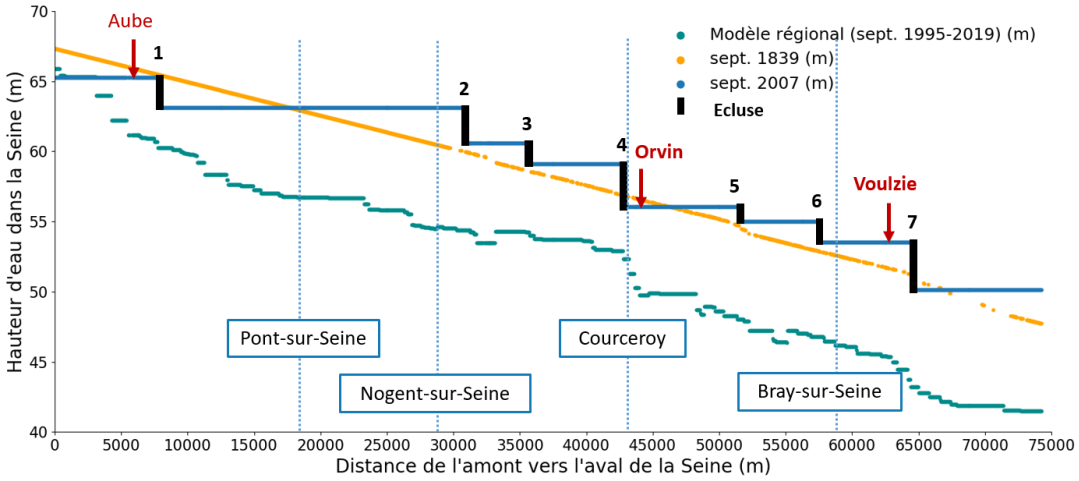

Figure 3 : Ligne d'eau en situation de basses eaux de la Seine, issue du modèle régional sur la période septembre 1995-2019 (Flipo, Gallois et Schuite, 2021), des données VNF datant de septembre 2007 et déduite par régression linéaire des cartes des Ponts et Chaussées en septembre 1839 (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018 ; Lestel et al., 2018).

Parmi les 6 écluses indiquées le long du talweg 2010 indiqué en gris sur la Figure 4, l'écluse n°4, qui entraine une chute de la ligne d'eau de près de 3 m (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016; Eschbach et Lestel, 2018) n'a pas pu être repérée sur la Seine à l'aide des photographies aériennes. Cette écluse, située entre le barrage de Beaulieu en amont (Figure 4 : écluse n°3) et le barrage du Vézoult en aval (Figure 4 : écluse n°5) a donc été positionnée au niveau de la buse confluence à Courceroy. L'écluse n°1, située à Conflans-sur-Seine, ne présente aucune indication concernant la chute d'eau à l'étiage dans la base de données Sandre. Elle se situe sur le tronçon non couvert par les travaux de Steinmann, Lestel et Dumont (2016) et Eschbach et Lestel (2018). Une chute de hauteur d'eau de 2,16 m a été imposée arbitrairement en son aval hydraulique, correspondant à la moyenne des chutes de hauteur d'eau à l'étiage le long de la Seine sur l'extension du modèle. La valeur de hauteur d'eau dans la Seine en amont de cette écluse correspond à la hauteur d'eau en aval de l'obstacle rehaussée de 2,16 m, donnant ainsi une hauteur d'eau de 65,26 m. Pour les affluents, la même méthode est utilisée. Pour un affluent donné, la hauteur d'eau de la confluence de l'affluent avec la Seine jusqu'à la première écluse, en remontant vers l'amont, correspond à la hauteur d'eau dans la Seine au point de jonction. La ligne d'eau est ensuite rehaussée de la valeur de chute de hauteur d'eau à l'étiage. L'Aube ne présentant pas d'écluse sur l'extension du modèle, elle s'est vue attribuer une valeur de hauteur d'eau unique de 65,26 m.

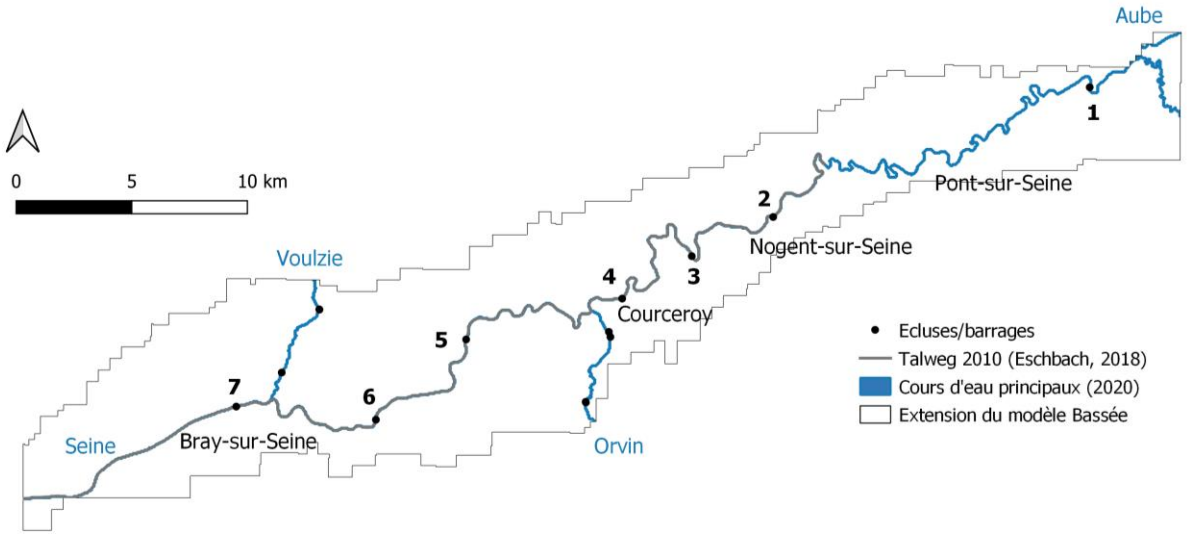

Figure 4 : Tracé des cours d'eau inclus dans le modèle de la Bassée pour la simulation RIV2007 et localisation des écluses utilisées pour la spatialisation de la ligne d'eau 2007 (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018).

Le tracé de la Seine en 1839, reconstitué par Steinmann, Lestel et Dumont (2016) et Eschbach et Lestel (2018), s'étend de l'aval du modèle jusqu'à Nogent-sur-Seine comme indiqué sur la Figure 5 par le talweg 1839. La Seine est complétée à l'aide du tracé de la Seine actuelle (en 2020). La littérature indiquant que les travaux les plus lourds ont eu lieu en aval de la plaine, il est raisonnable de faire l'hypothèse que le tracé de la Seine en amont de la plaine a peu évolué entre 1839 et 2020 (Eschbach et Lestel, 2018). Pour les affluents de la Seine inclus dans le modèle, leur tracé actuel a également été gardé, la littérature ne fournissant pas assez d'information justifiant d'en modifier leur tracé. Comme pour la ligne d'eau de septembre 2007, les reconstitutions de 1839 ne couvrent pas la Seine sur toute l'extension du modèle de la Bassée. Dans une première approche, les hauteurs d'eau le long du linéaire ont été attribuées par régression linéaire, à l'aide d'une pente de 0,24 ‰ estimée entre les limites aval et amont du talweg 1839 sur l'extension du modèle.

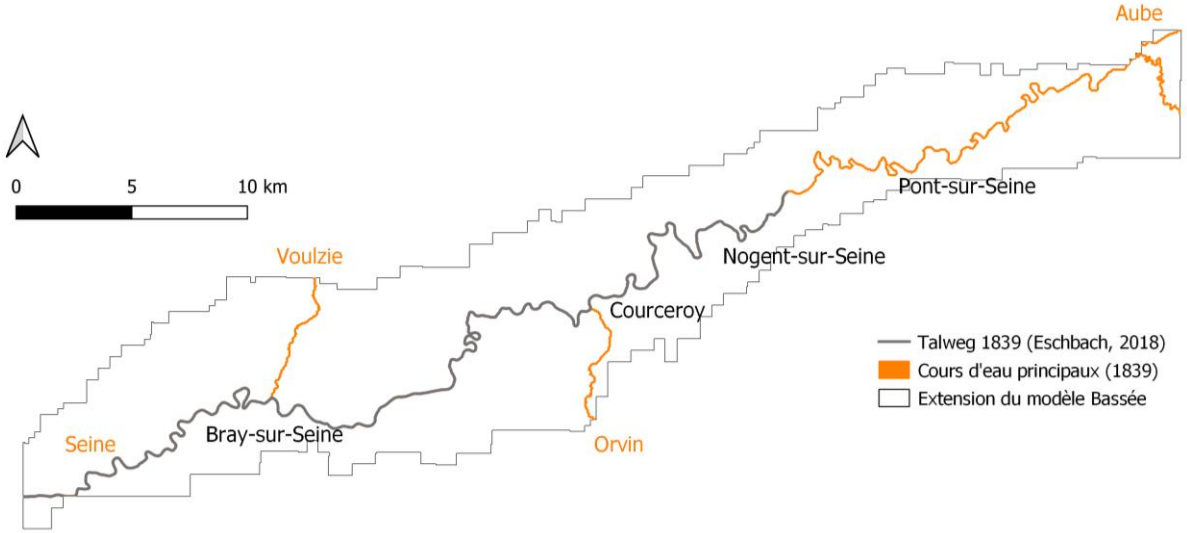

Figure 5 : Tracé des cours d'eau inclus dans le modèle Bassée, pour la simulation RIV1839, avec une Seine méandriforme (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016; Eschbach et Lestel, 2018; Lestel *et al.*, 2018).

Sur la Figure 3, la ligne d'eau estimée par régression linéaire pour 1839 est indiquée en orange. Elle se situe en dessous de la ligne d'eau issue des données VNF (Steinmann, Lestel et Dumont, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018), sauf pour le tronçon en amont de l'écluse n°2, depuis Pont-sur-Seine, là où les deux lignes d'eau ont été extrapolées. Une incertitude existe pour la ligne d'eau 2007 en amont du modèle, du fait de la valeur arbitraire imposée à la hauteur de chute à l'étiage pour l'écluse n°1.

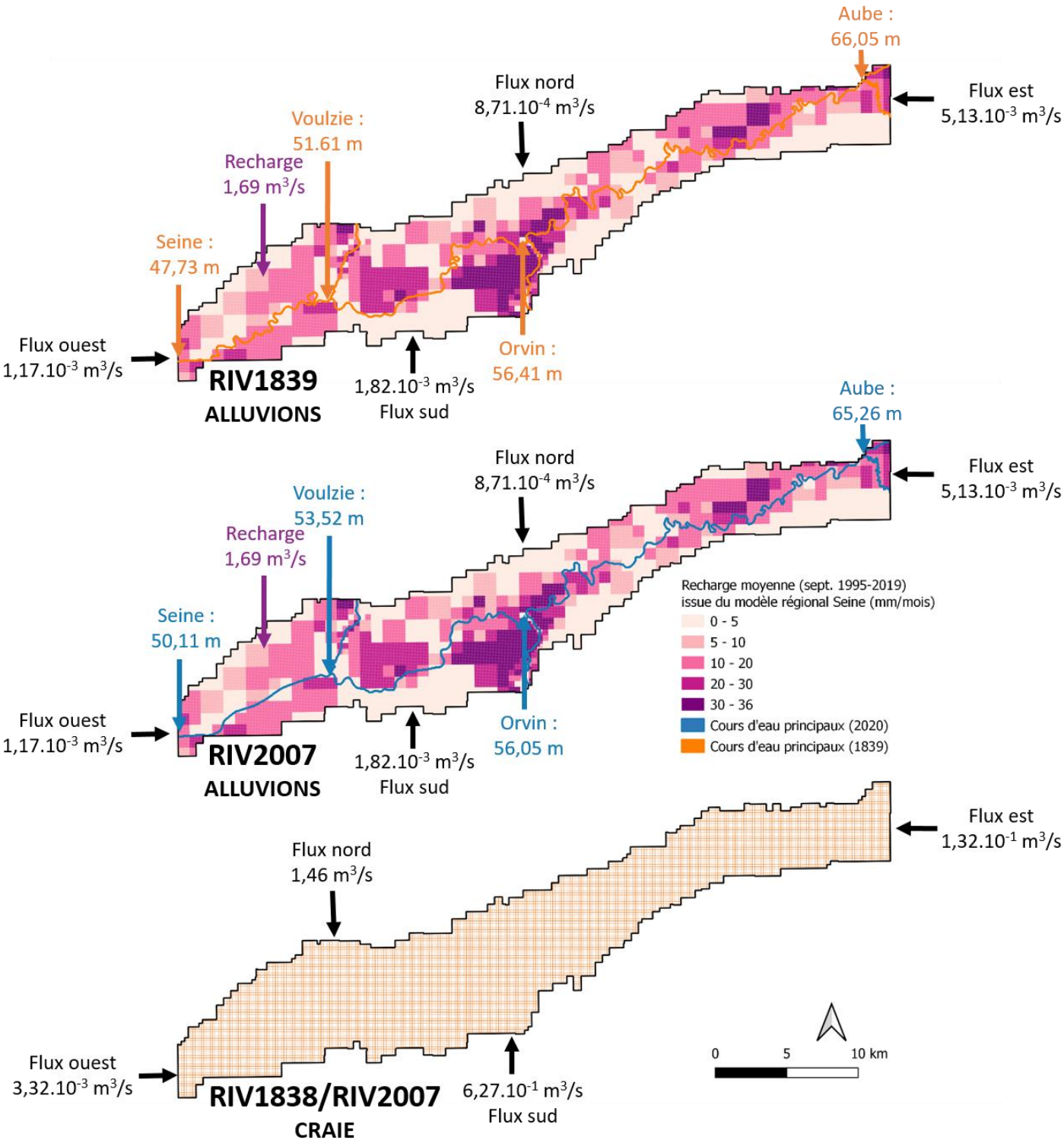

Figure 6 : Pour la simulation RIV1839 et RIV2007 : flux d'eau imposés pour chaque direction aux limites du modèle local pour les couches des alluvions et de la craie (m^3/s) ; Recharge moyenne imposée à la couche des alluvions (m^3/s) ; Hauteur d'eau moyenne imposée à la maille la plus aval de chacun des cours d'eau principaux (m).

Les flux d'eau imposés aux limites du modèle local de la Bassée et calculés par le modèle régional Seine, sont présentés sur la Figure 6. Au total, $8{,}99.10^{-3}$ m^3/s sont issus de l'aquifère des alluvions et 2,22 m^3/s de celui de la craie. Les hauteurs d'eau imposées dans la Seine s'étendent de 67,33 m en amont à 47,73 m en aval en 1839 et de 65,26 m en amont à 50,11 m en aval pour 2007. La recharge totale imposée à la Bassée par le modèle du bassin de la Seine est de 1,69 m^3/s.

2.3. Stratégie pour l'étude de l'impact des gravières

Afin d'évaluer l'impact des gravières sur le fonctionnement hydrodynamique de la plaine alluviale de la Bassée, les plans d'eau actuels sont intégrés dans la simulation avec la Seine méandriforme et sans plan d'eau (RIV1839_LAC). Un total de 1073 plans d'eau a été recensé à l'aide de Google Satellite et d'images issues de Landsat-8 et Sentinel-2 sur la plaine alluviale de la Bassée pour septembre 2020. Seulement 427 sont intégrés dans le modèle, car l'extension du modèle est plus petite par rapport à celle issue de ses limites géologiques. De plus, ne sont intégrées dans le modèle que les gravières d'au moins deux mailles consécutives dont la surface est couverte d'au moins 50 % d'eau.

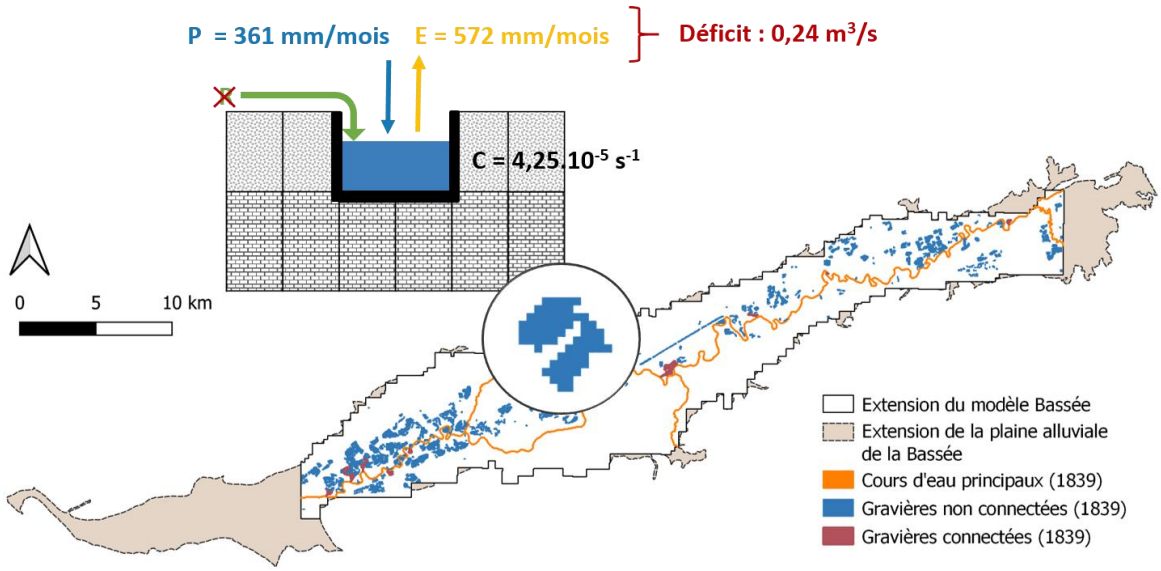

Figure 7 : Paramètres du module gravière, pour la simulation RIV1839_LAC.

La distinction est également faite entre les plans d'eau connectés et non connectés aux cours d'eau. Pour les gravières connectées à la Seine, représentées en rouge sur la Figure 7, la hauteur d'eau dans la Seine au point de jonction de la gravière avec la Seine est imposée à la gravière. La littérature indique que les battements de nappe dans les gravières connectées sont principalement contrôlés par le cours d'eau auquel elles sont liées (Saplairoles *et al.*, 2007). Pour les gravières non connectées, indiquées en bleu sur la Figure 7, le niveau d'eau dans le lac ainsi que les flux d'eau échangés avec les aquifères voisins à travers les berges et le lit du lac sont calculés par le module gravière (Libwet) de CaWaQS (Wang *et al.*, 2016). Le niveau d'eau dans chaque gravière est estimé par résolution du bilan hydrologique, à l'aide de données de précipitations issues des réanalyses SAFRAN (Habets *et al.*, 2008) et d'évaporation calculée par le modèle Flake (Mironov, 2008), forcé par les mêmes réanalyses SAFRAN (Ottlé *et al.*, 2020), pour septembre 1995-2019. Le ruissellement est supposé nul du fait de la topographie de la zone d'étude. Les gravières sont creusées jusqu'au toit de la craie et les échanges avec les aquifères voisins se font à travers les interfaces lac-aquifère dont la conductance spécifique est de $4{,}25.10^{-5}$ s^{-1}. Cette valeur correspond à une valeur moyenne, issue des travaux de Schanen *et al.*, (1998), qui avaient trouvé des valeurs allant de 4.10^{-4} s^{-1} à 2.10^{-8} s^{-1} pour 5 gravières de la Bassée. En situation de basses eaux et pour la simulation RIV1839_LAC, les gravières jouent le rôle de puits pour l'hydrosystème, car les précipitations sont inférieures à l'évaporation. Ceci se traduit par un déficit de 0,24 m^3/s sur l'ensemble du modèle (Figure 7).

2.4. Stratégie pour l'étude de l'impact combiné des aménagements de la Seine et des gravières

La situation de la plaine « ante-anthropisation », c'est-à-dire avec une Seine méandriforme et non aménagée et sans gravières (RIV1839), est confrontée à celle de la plaine actuelle (RIV2007_LAC) avec une Seine aménagée et avec gravières. Pour la simulation RIV2007_LAC, 432 plans d'eau sont intégrés dans le modèle. Il y a plus de gravières que dans la simulation RIV1839_LAC, car sont également inclus les anciens méandres. L'évolution des surfaces en eau dans la Bassée depuis les années 1950 jusqu'à aujourd'hui

s'expliquant surtout par l'intensification de l'extraction de granulats, les différents types de plans d'eau sont tous dans ce rapport décrit comme des gravières.

3. Résultats et discussion

3.1. Confrontation de la simulation RIV1839 aux observations

La plaine simulée sans gravière et avec une Seine méandriforme (RIV1839) aboutit à des charges piézométriques dans les alluvions allant de 48 m à 99 m, avec des écoulements convergeant vers la Seine (Figure 8).

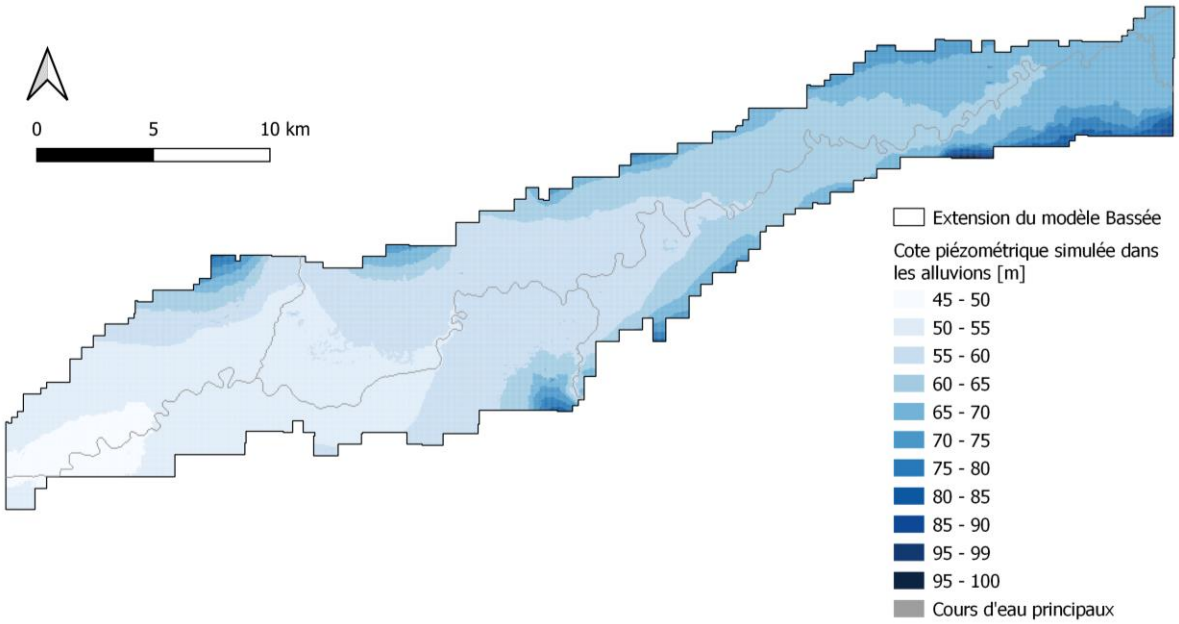

Figure 8 : Carte piézométrique des alluvions, issue de la simulation avec la Seine de 1839 et sans gravière (RIV1839).

Ces charges hydrauliques sont confrontées à des mesures piézométriques datant de septembre 1965 (Mégnien, 1965) en aval de la plaine jusqu'à Nogent-sur-Seine, et de septembre 1994 (Greiner, 1997) en amont à partir de Pont-sur-Seine (Figure 9). Des différences (RIV1839 - H_Mégnien) allant de -4 m à +5 m, sont observées par comparaison avec les mesures datant de septembre 1965, avec une MAE (erreur moyenne absolue) de 68 cm et une RMSE (racine carrée de l'écart quadratique moyen) faible de 1,45 m. Sur la Figure 10 (a), on observe en effet que dans les alluvions, la simulation RIV1839 est positivement corrélée avec les observations, avec un coefficient de corrélation (R^2) de 0,93. En 1965, les 6 barrages entre Nogent-sur-Seine et Varennes en aval de Montereau-Fault-Yonne étaient cependant déjà présents (Mégnien, 1965) alors que le nombre de gravières était encore faible (Picourlat *et al.*, 2018). Les différences entre les observations et la simulation RIV1839 à l'étiage pourraient être notamment dues aux écluses, la Seine étant encore méandriforme jusqu'en 1970 et les barrages-réservoirs en amont de la zone d'étude n'étant également pas encore construits.

La zone couverte par les points de Greiner (1997) présente en 1994 déjà 52 gravières sur les 88 recensées en 2020 et les barrages-réservoirs datant de 1960 et 1990 existent également déjà. C'est pourquoi à l'amont les observations sont comparées à la simulation RIV2007. Des différences allant de -4,6 m à +12 m (RIV2007 - H_Greiner), avec une MAE de 39 cm et une RMSE élevée de 3,79 m, sont observées à l'amont de la plaine par comparaison de la simulation RIV2007 aux observations datant de septembre 1994 (Greiner, 1997). Ces différences ne peuvent pour le moment pas être expliquées mais mettent en évidence une incertitude sur les simulations en amont du modèle. En effet, la Figure 10 (b) montre que la simulation RIV2007 et les observations de Greiner (1997) ne sont pas corrélées. Même si les différences supérieures à 5 m ne sont observées qu'en 4 points en bordure du modèle, il est nécessaire de poursuivre la validation des sorties du modèle local de la Bassée, à l'aide des nouvelles mesures piézométriques acquises dans le cadre du programme PIREN-Seine.

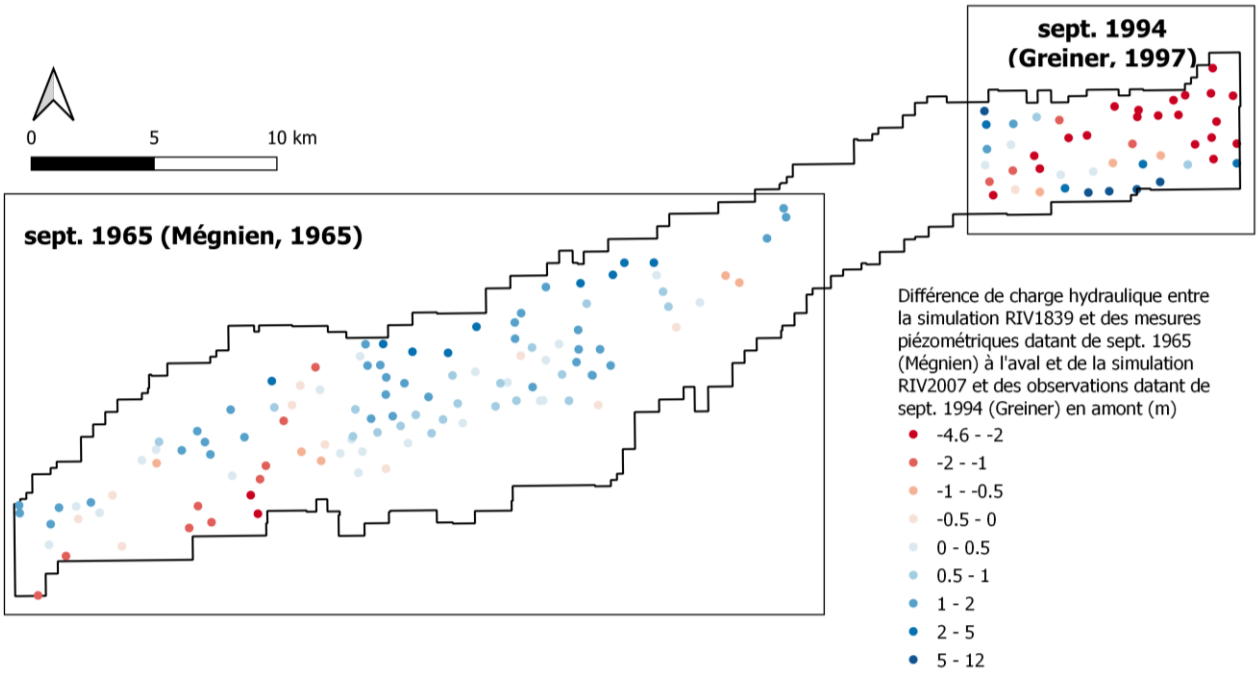

Figure 9 : Carte des différences piézométriques dans les alluvions, constatées entre la simulation RIV1839 et les mesures piézométriques datant de septembre 1965 à l'aval (Mégnien, 1965) et la simulation RIV2007 et les mesures piézométriques datant de septembre 1994 à l'amont (Greiner, 1997) de la plaine.

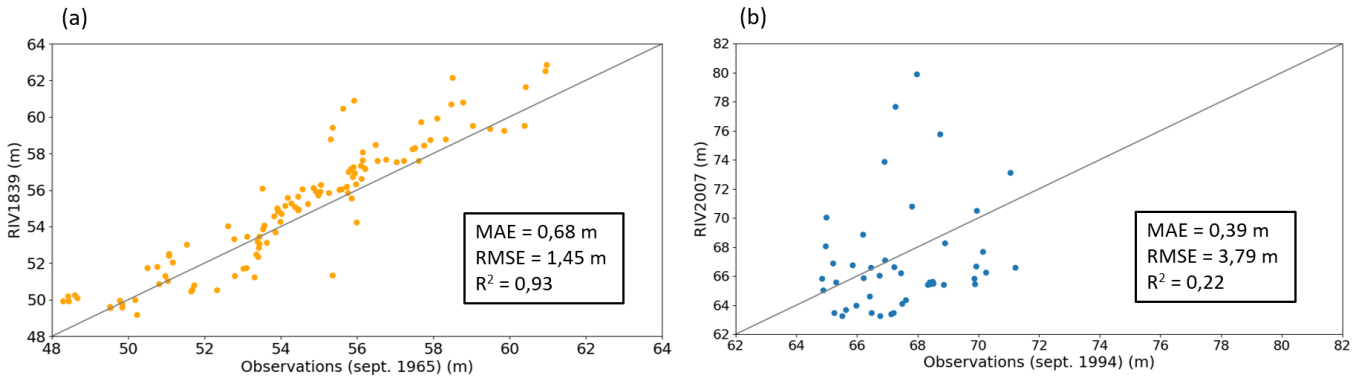

Figure 10 : Graphique des observations vs. simulations dans les alluvions pour (a) la simulation RIV1839 et les observations datant de septembre 1965 (b) la simulation RIV2007 et les observations datant de septembre 1994, avec MAE = erreur moyenne absolue ; RMSE = racine carrée de l'écart quadratique moyen et R^2 = coefficient de corrélation.

3.2. Impact des aménagements des cours d'eau

Lorsque la simulation RIV2007 est confrontée à la simulation RIV1839, une élévation moyenne de 80 cm dans la nappe des alluvions est observée (Figure 11). Le niveau piézométrique varie de -2 m à +3 m, correspondant aux différences minimales et maximales observées entre la ligne d'eau datant de septembre 1839 et celle de septembre 2007. Les zones où la nappe alluviale est rehaussée par rapport à 1839 correspondent aux zones où le niveau dans les cours d'eau en 2007 est plus élevé qu'en 1839. Une baisse du niveau de la nappe est observée en amont de la plaine, car la ligne d'eau imposée pour la simulation RIV2007 est en dessous de celle de RIV1839 (Figure 3). Sur la Figure 11, l'Orvin est également clairement visible, car sa confluence avec la Seine se situe en aval de l'écluse n°4, un point dans le modèle où la Seine de septembre 2007 se situe 1 m en dessous de la Seine de 1839. Il existe cependant une incertitude sur la ligne d'eau à l'étiage en amont de la plaine, tout comme à l'aval de l'écluse n°4. Une hauteur d'eau constante de 63,1 m est imposée sur près de 23 km entre les écluses n°1 et n°2, or il est peu probable que le niveau dans la Seine soit constant sur un tel linéaire. Il serait donc nécessaire d'affiner la simulation RIV2007, en imposant par exemple une ligne d'eau croissante entre les écluses, selon une pente qui reste à estimer. De même, la hauteur d'eau en

amont de l'écluse n°1 doit être encore précisée et confrontée aux observations actuelles. La méthode de traitement des données de hauteur d'eau dans la Seine et ses affluents peut donc changer la dynamique simulée en certaines zones de la plaine.

En période d'étiage, les barrages et écluses permettent de maintenir un niveau d'eau suffisant dans la Seine pour permettre la navigation. Ces aménagements entrainent globalement une élévation de la hauteur d'eau dans les cours d'eau par rapport à une situation sans soutien d'étiage. Cette élévation de la hauteur d'eau dans la Seine entraine une élévation du niveau de la nappe des alluvions. Rood *et al.* (1995) ont également constaté une hausse du niveau de la nappe phréatique en relation avec une hausse de la hauteur d'eau dans la rivière St. Mary, au Canada. Ce cours d'eau fortement anthropisé est contrôlé par le barrage-réservoir de St. Mary datant de 1951 ainsi que de nombreux canaux construits pour répondre au besoin croissant d'eau pour l'irrigation des terres agricoles. Cette connexion entre nappe et rivière s'explique par le contexte géologique de la zone, la zone riparienne étant constituée de formations très perméables, graviers et sables, comme dans le cas de la plaine alluviale de la Bassée.

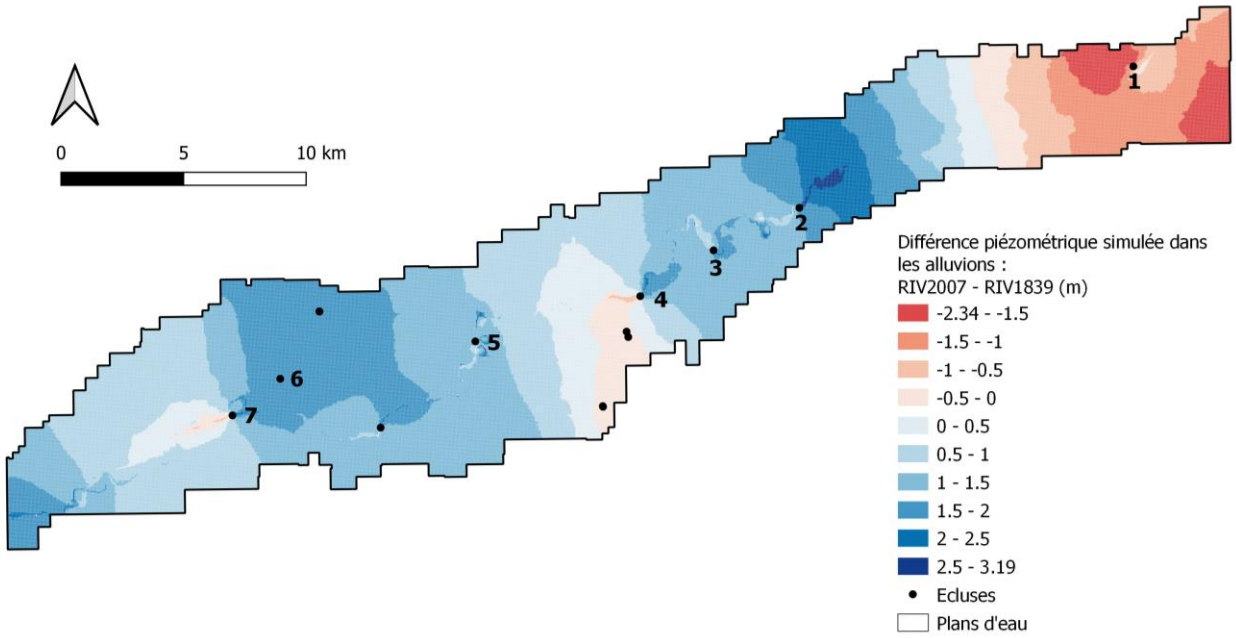

Figure 11 : Différence piézométrique simulée dans la nappe des alluvions, pour la plaine avec la Seine actuelle aménagée (rescindement de méandres, écluses, barrages-réservoirs) et la Seine de 1839, méandriforme : RIV2007 - RIV1839 (m).

3.3. Impact des lacs de gravières

La Figure 12 représente la différence de charge hydraulique simulée entre la simulation avec gravières (RIV1839_LAC) et sans gravière (RIV1839). Ces différences s'étendent de -5 m à +0,62 m dans les alluvions et de -1 m à 0 m pour la craie. En situation de basses eaux, avec les données de précipitations et d'évaporation imposées aux gravières du modèle de La Bassée, les gravières entrainent un déficit de recharge pour l'hydrosystème. L'intégration des gravières connectées et non connectées dans le modèle de la Bassée se traduit dans notre cas par une baisse moyenne du niveau de la nappe de 26 cm dans les alluvions et de 25 cm dans la craie. Les gravières, qui sont creusées jusqu'au toit de la craie dans le modèle, semblent avoir autant d'impact sur les deux aquifères. Notons qu'en moyenne à l'étiage, un tiers des flux d'eau entrant dans les gravières non connectées proviennent de l'aquifère de la craie.

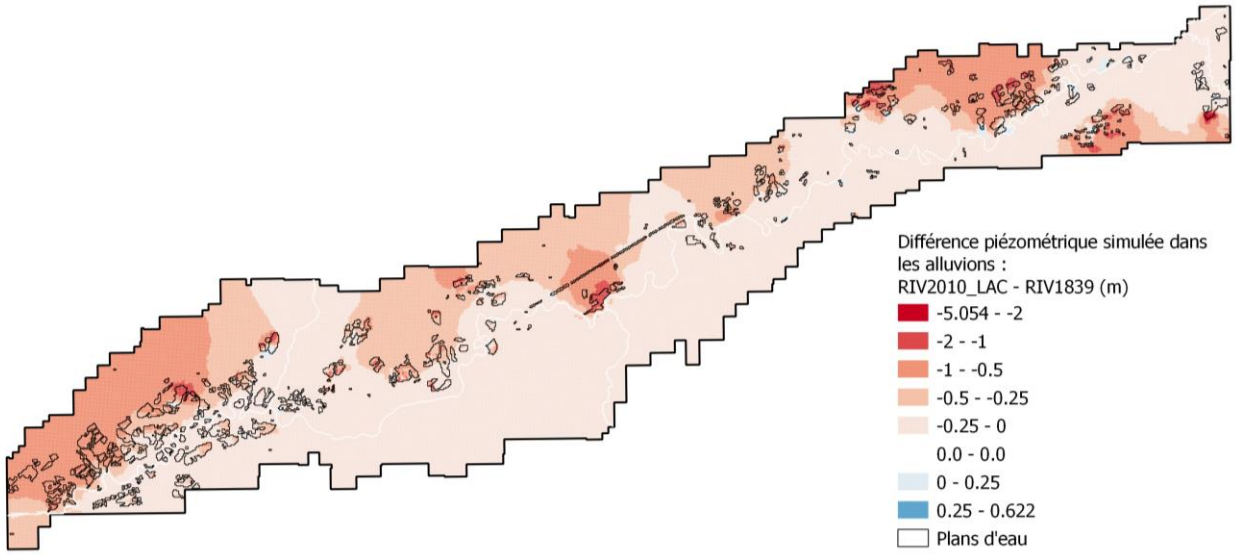

Figure 12 : Différence piézométrique simulée dans les alluvions avec et sans gravières, pour la plaine avec les cours d'eau de 1839 : RIV1839_LAC - RIV1839 (m).

La littérature (e.g. Peaudecerf, 1975) indique qu'une gravière non colmatée entraine un abaissement de la nappe en amont et une élévation en aval du lac (Figure 2 b). La nappe des alluvions subit une baisse sur plus de 97 % de sa surface, dont près de 99 % est inférieure à 1 m. Le nombre important de gravières dans la Bassée entraine par effet cumulatif un rabattement de la nappe en amont et en aval de la plupart des gravières. Cette baisse reste néanmoins plus marquée en amont qu'en aval. Dans leur étude, Bessière *et al.* (2013) avaient quantifié par modélisation l'abaissement du niveau piézométrique de la nappe alluviale de l'Ariège, autour des gravières actuelles d'une surface totale de 179 ha, mais également autour de futures gravières de surface plus grande occupant alors près de 446 ha. Alors qu'un abaissement de quelques dizaines de centimètres était observé pour les gravières actuelles en moyenne annuelle, l'augmentation de la taille des gravières avait entrainé une baisse de l'ordre de 2 m. Dans notre cas, les variations métriques de la nappe par endroits n'ont pour le moment pas été attribuées à la taille, la densité de gravières ou bien encore à la valeur de transmissivité dans les alluvions et la craie pour la zone considérée. Il est donc nécessaire de poursuivre l'effort d'analyse de ces résultats pour comprendre ce qui entraine des différences de charge hydraulique dans la nappe pouvant atteindre par endroits 5 m dans les alluvions.

Au niveau des gravières connectées à la Seine, une baisse moyenne de 38 cm entre le niveau moyen dans la nappe ante-exploitation et la cote de la gravière est simulée, dans l'emprise du plan d'eau considéré. Cette baisse est contrôlée par la hauteur d'eau dans le cours d'eau, mais dépend également de la forme de la gravière, du gradient hydraulique initial, etc. (Peaudecerf, 1975)

Au sein des gravières non connectées, une baisse moyenne de la cote de l'eau de 43 cm, contre 25 cm dans les alluvions hors gravières, est simulée. Cet abaissement est près de 20 cm plus important dans les gravières non connectées que dans l'aquifère voisin. En effet, les baisses du niveau piézométrique liées à l'apparition d'une gravière deviennent quasi-négligeables dans un rayon de quelques kilomètres autour du lac (e.g. Bessière *et al.*, 2013).

3.4. Impact combiné des aménagements de la Seine et lacs de gravières

Lorsque la simulation de la plaine avec une Seine aménagée et des gravières (RIV2007_LAC) est comparée à la simulation sans gravière et avec la Seine de 1839 (RIV1839), une élévation moyenne du niveau de la nappe de 60 cm dans les alluvions et de 59 cm dans la craie est observée. Ces résultats sont en accord avec les conclusions issues des simulations précédentes, qui ont mis en évidence que les aménagements de la Seine affectaient de manière plus importante les aquifères de la Bassée en situation de basses eaux que les gravières. En période d'étiage, les aménagements de la Seine et les gravières ont des effets opposés sur les aquifères. Ceci explique que la hausse piézométrique moyenne observée après intégration des aménagements de la Seine est plus élevée que celle intégrant les deux pressions anthropiques.

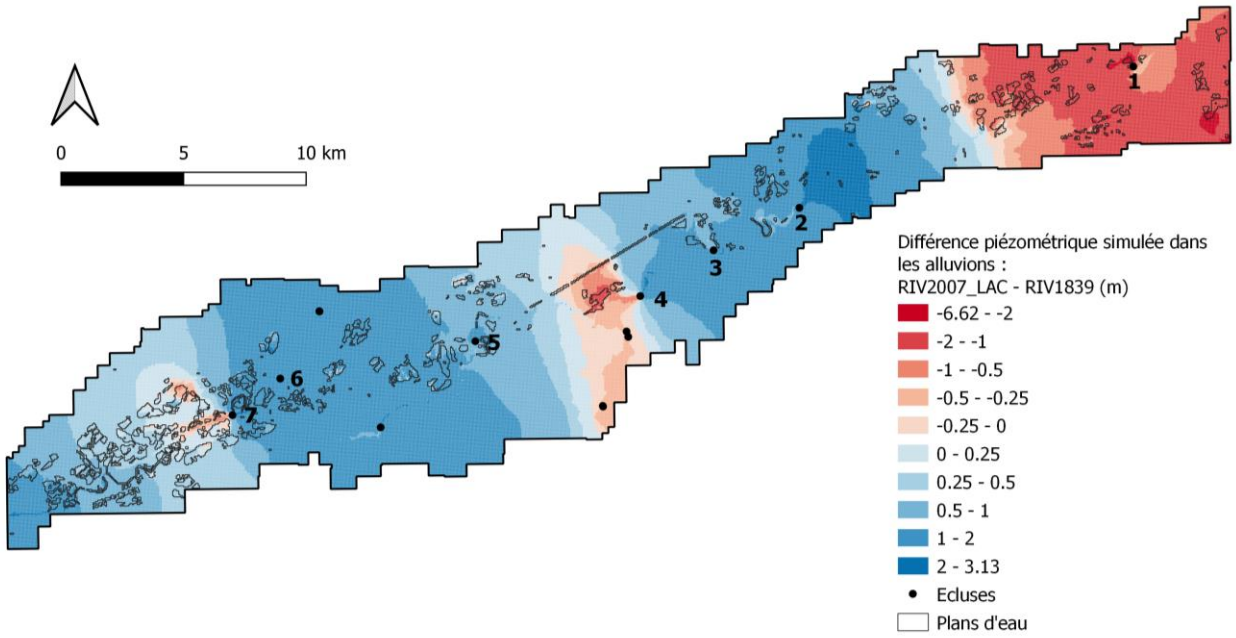

Figure 13 : Différence piézométrique simulée dans les alluvions : RIV2007_LAC - RIV1839 (m).

La Figure 13 met bien en évidence les limites des différentes écluses et le tracé de l'Orvin, dont la ligne d'eau a été abaissée pour RIV2007_LAC par rapport à RIV1839. Les hausses maximales atteignent 3 m et correspondent aux différences positives maximales constatées par comparaison de la simulation RIV2007 et RIV1839. En amont de la plaine, les effets liés aux aménagements de la Seine et gravières se cumulent. Dans cette zone, la simulation RIV2007 montre une baisse de près de 1 m dans les alluvions et la simulation RIV1839_LAC de près de 31 cm par rapport aux résultats de la simulation RIV1839. Par effet cumulatif, une baisse moyenne de 1,30 m est simulée en amont de Pont sur Seine. Cette baisse peut atteindre 6 m par endroits, ce qui pourrait impliquer en période d'étiage un dénoyage complet des gravières, qui font en moyenne 6 m d'épaisseur. Ceci n'ayant pas été observé d'après l'analyse de photos aériennes et compte tenu des incertitudes liées à la reconstruction de la ligne d'eau en amont de la plaine, il n'est pas encore possible de conclure au sujet de l'impact conjoint de ces pressions dans cette zone.

Conclusion et perspectives

En période d'étiage, la chenalisation de la Seine et la mise en place d'écluses et de barrages-réservoirs ont entrainé une hausse moyenne de près de 80 cm de la nappe des alluvions par rapport à 1839. Les gravières jouent quant à elles le rôle de puits pour l'hydrosystème en situation de basses eaux, entrainant une baisse moyenne du niveau de la nappe des alluvions de 25 cm. Pour le mois de septembre, la plaine au XXI^{e} siècle, avec une Seine aménagée et 432 gravières, présente donc une piézométrie dans les alluvions et dans la craie, respectivement 60 cm et 59 cm plus élevée qu'en 1839. Cette hausse est due à une ligne d'eau en entrée du modèle pour la Seine contemporaine en moyenne plus élevée que celle de 1839, sauf au niveau de l'amont de la plaine. La méthode utilisée pour reconstituer la ligne d'eau à l'amont de l'écluse de Nogent-sur-Seine ou celle des affluents présente toutefois des incertitudes et doit être perfectionnée. Les tests réalisés fournissent néanmoins des résultats mettant en évidence les effets de chacune des pressions anthropiques étudiées.

Il est nécessaire de poursuivre l'effort d'analyse de ces résultats, notamment par confrontation aux observations actuelles. Le but serait non seulement d'affiner les simulations déjà réalisées, mais également de distinguer l'impact de la chenalisation de celle de la mise en place des écluses et des barrages-réservoirs en amont de la zone d'étude. *In fine*, il serait intéressant d'intégrer une troisième pression anthropique non négligeable dans la Bassée, à savoir les prélèvements d'eau souterraine.

Remerciements

Tous nos remerciements à Ronan Steinmann qui, lors de son postdoctorat avec Laurence Lestel, a réalisé un premier traitement des données de VNF et des cartes des Ponts-et-Chaussées de 1839, ayant abouti à une première reconstitution des profils en long de 1839 et 2007. Nous remercions également Nicolas Gallois pour nous avoir fourni les données de recharge et de flux d'eau issus des aquifères des alluvions et de la craie, et calculés à l'aide du modèle régional Seine, sans lesquelles nous n'aurions pas pu réaliser nos simulations.

Bibliographie

Baratelli, F., Parlanti, P., Varrault, G., Sourzac, M., Mouchel, J.M., Saad, M., Jost, A., Guillon, S., Rivière, A. et Flipo. N (2017). Caractérisation hydro-géochimique de la plaine de la Bassée en période de crue. Rapport PIREN Seine, phase VII.

Baron, P. et Piketty. G (2001) Plaine alluviale de la Bassée. Mission conjointe de l'Inspection Générale de l'Environnement et du Conseil général des Mines. Rapport Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

Bessière, H., Klinka, T. et Saplairoles. M (2013). Evaluation de l'impact sur la ressource en eau souterraine de l'exploitation des granulats dans le milieu alluvionnaire de l'Ariège (09). Rapport BRGM RP-61982-FR.

Blanchard, F., Keime, M.-P. et Lansiart, M. (1991) Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface gravière/nappe. Rapport BRGM - R 32 248.

Colleoni, F. (2019). Apport de la modélisation sur l'étude du fonctionnement hydrodynamique de la plaine alluviale de la Bassée. Mémoire d'études d'ingénieur, Sorbonne Université, Paris.

Cunge, J. (1969). Au sujet de la méthode de calcul de propagation de crues (méthode muskingum). *J. Res. in Hydrology*, 7(2), pp. 205–230.

Darmendrail, D. (1986). Colmatage et effet filtre des berges lors de l'alimentation des nappes alluviales par les cours d'eau. Rapport BRGM 86 SGN 371 EAU.

Deleplancque, B., Weill, P., Cojan, I., Labarthe, B. et Flipo. N (2013). Architecture et hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée'. Rapport PIREN-Seine phase VI, pp. 1–25.

Ellis, E. C. et Ramankutty, N. (2008). Putting people in the map: Anthropogenic biomes of the world'. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(8), pp. 439–447.

Eschbach, D. et Lestel. L (2018). Dynamique hydro-morphologique historique de la Seine dans le secteur de la Bassée aval. PIREN-Seine phase VII.

Flipo, N. (2015) Interfaces nappe-rivière. Rapport de synthèse PIREN-Seine Phase VI.

Flipo, N., Gallois, N. et Schuite. J (2021). Recalibration du modèle CaWaQS-Seine pour l'analyse du fonctionnement hydrologique du bassin : Projet AQUIVAR : Rapport final. [Rapport de recherche] R310521NFLI, ARMINES / MINES ParisTech, pp.168.

Fustec, E., Bendjoudi, H., Gaillard, S., Weng, P., Boyer, F., Boët, P., Schanen, O., Crogennec, S. et Billen. G (2001). Fonctionnement du Territoire « Bassée ». Rapport PIREN-Seine.

Greiner I (1997). Analyse de la variabilité fonctionnelle de la plaine alluviale de la Seine et modélisation des transferts de nitrates. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J-L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset, F. et Viennot, P (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(6).

Jost, A., Wang, S., Labarthe, B. et Flipo, N (2017). Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. Rapport PIREN Seine.

Jost, A., Wang, S., Picourlat, F., Colleoni, F., Verbeke, Thomas., Labarthe, Baptiste., Flipo, N., Baratelli, F., Rivière, A. et Gallois. N (2019). Les gravières, fenêtres ouvertes sur la plaine de la Bassée. Rapport de synthèse phase VII du PIREN-Seine, Volume X.

Labarthe, B., Flipo, N., Abasq, L., Deleplancque, B., Jost, A., Mouhri, A. et de Fouquet. C (2014). Première caractérisation hydrodynamique des échanges dans la plaine alluviale de la Bassée. Rapport PIREN-Seine, phase VI.

Labarthe, B. (2016). Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle. Thèse de Doctorat, Université Paris Sciences & Lettres, Paris.

Ledoux, E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Lehner, Bernhard., Reidy Liermann, C., Revenga, C., Vörösmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., Doell, P., Endejan, M., Frenken, K., Magome, J., Nilsson, C., Robertson, J., Rödel, R., Sindorf, N. et Wisser, D (2011). High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), pp. 494–502.

Lestel, L., Eschbach, D., Steinmann, R. et Gastaldi. N (2018). ArchiSEINE : une approche géohistorique du bassin de la Seine. Fascicule #18 du PIREN-Seine.

de Marsily, G., Ledoux, E., Levassor, A., Poitrinal, D. et Salem, A. (1978). Modelling of large multilayered theory and applications aquifer systems : Theory and Applications. *Journal of Hydrology*, 36 :1–34.

Mégnien, C. (1965). Possibilités aquifères des alluvions du val de Seine entre Nogent-sur-Seine et Montereau, incluant Carte géologique et géomoprhologique de la Bassée. Rapport BRGM DSGR 65A76.

Mironov, D. V. (2008). Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction models: Description of a Lake Model. COSMO Technical Report No.11; DWD: Offenbach, Germany.

Mollema, P. et Antonellini. M (2016). Water and (bio)chemical cycling in gravel pit lakes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews* 159: 247–270.

Ottle, C., Bernus, A., Verbeke, T., Petrus, K., Yin, Z., Biancamaria, S., Jost, A., Desroches, D., Pottier, C., Perrin, C., Lavenne, A., Flipo, N. et Rivière. A (2020). Characterization of SWOT water level errors on seine reservoirs and La Bassée gravel pits: Impacts on water surface energy budget modeling. *Remote Sensing*, 12(18).

Peaudecerf, P. (1975). Effets des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines. *Houille Blanche*, 2–3, pp. 133–140.

Picourlat, F., Jost, A., Passy, P., Baratelli, F. et Flipo. N (2018). Impact des aménagements anthropiques dans la plaine de la Bassée : le cas des gravières. Rapport PIREN-Seine, phase VII.

Picourlat, F. (2018). Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, Sorbonne Université, Paris.

Rood, S., Mahoney, J., Reid, D. et Zilm. L (1995). Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the St Mary River, Alberta. *Canadian Journal of Botany*, 73(8), pp. 1250–1260.

Saplairoles, M., Desprats, J.F., Delpont, G. et Bourguignon. A (2007). Evaluation de l'impact sur la ressource en eaux souterraines de l'exploitation de granulats dans le milieu alluvionnaire de la Garonne (31). Rapport final BRGM/ RP-55673-FR.

Schanen, O., Bendjoudi, H., Levassor, A. et Fustec. E (1998). Quantification des écoulements nappe-gravières, en zone alluviale, par optimisation du bilan hydrologique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 326(2), pp. 107–112.

Steinmann, R., Lestel, L. et Dumont. A (2016). Approche géohistorique de la Seine dans la Bassée durant les deux derniers siècles. Rapport PIREN-Seine, phase VII, pp. 1–31.

Teillaud, S. (2018). Suivi temporel de l'état de la végétation de la zone humide de la Bassée (bassin de la Seine) par télédétection spatiale. Mémoire de Master 1, Sorbonne Université.

UNICEM Île-de-France, DRIEE (Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie), l'IAU (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme) (2017). Granulats en Île-de-France - Panorama régional. 3e panorama régional - UNICEM.

Wang, S., Jost, A., Labarthe, B. et Flipo. N (2016). Création du module Libwet de simulation des interactions gravières-aquifères. Rapport PIREN-Seine, phase VII.