Les gravières, fenêtres ouvertes sur la plaine de la Bassée

Anne Jost^{1,*}, Shuaitao Wang², Fanny Picourlat³, François Colleoni¹, Thomas Verbeke¹, Baptiste Labarthe², Nicolas Flipo², Fulvia Baratelli², Agnès Rivière², Nicolas Gallois²

¹ Sorbonne Université, Metis, Paris

* anne.jost@sorbonne-universite.fr

² Université Paris-Sciences-et-Lettres, Mines ParisTech, Centre de Géosciences, Fontainebleau

³ Institut Pierre Simon Laplace, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette

Sommaire

Résumé

Le satellite SWOT (Surface Water and Ocean Topography) donnera bientôt accès aux variations spatiotemporelles des eaux continentales avec une précision inégalée. Dans la plaine alluviale de la Bassée, à l'amont de Paris, le niveau d'eau relatif des gravières issues de l'exploitation intensive des granulats sera mesuré à intervalles réguliers. L'utilisation conjointe de l'observation spatiale, des mesures *in situ* et de la modélisation permettra de répondre à des enjeux majeurs de caractérisation et de gestion des ressources en eau de la plaine. Sont détaillées dans ce rapport les étapes de construction de l'outil de modélisation, de la création d'un modèle de lac à son application aux gravières de la Bassée pour la détermination des variables d'entrée clés du modèle.

Points clés

- Création d'un module hydrologique pour la simulation des lacs de gravière au sein de la plateforme de modélisation des hydrosystèmes CAWAQS;
- Mise en œuvre de cet outil pour la simulation hydrodynamique des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée;
- > Analyse de la réponse des gravières aux forçages dont elles sont l'objet.

^{0.} Pour citer cet article : A. Jost et al., Les gravières, fenêtres ouvertes sur la plaine de la Bassée dans Fonctionnement hydrogéophysique, Editeurs (eds.), Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine, Volume X, 2019

1 Introduction

L'exploitation des alluvions anciennes pour la production de granulats dans le val de Seine amont a donné naissance depuis les années 1960 à quelques centaines de gravières, disséminées au cœur de la plaine d'inondation de la Bassée, le long des principaux cours d'eau. Ces lacs artificiels sont autant de fenêtres ouvertes sur des resssources en eau souterraine d'importance stratégique pour la région Ile-de-France, qu'il convient de mieux connaître afin de préserver. Nouveaux objets dans un paysage déjà très remanié au cours du siècle dernier, ils n'ont été que peu étudiés sur le long terme et dans leur globalité. On leur reconnaît cependant généralement un rôle de puits vis-à-vis des nappes adjacentes, du fait de l'emprise qu'offre à l'évaporation leur surface d'eau libre, en particulier lors des années sèches (e.g. Schanen, 1998). Le remplacement du matériau granulaire par un plan d'eau altère de plus localement piézométrie et chemins d'écoulement à son voisinage (Peaudecerf, 1975; Gueho, 2014), par l'établissement d'une surface d'égal potentiel hydraulique, néanmoins possiblement représentative d'un niveau piézométrique moyen dans la nappe des alluvions. Les gravières s'offriraient ainsi à nous telles des piézomètres « géants ». Avec le développement de systèmes de télédétection toujours plus performants, l'observation satellitaire sera très bientôt en mesure de fournir un suivi régulier des fluctuations temporelles des surfaces d'eau libre de plus de 6 hectares en domaine continental (mission Surface Water and Ocean Topography). Malgré leur petite taille, les plaçant pour la plupart sous le seuil de détection, les gravières sont un bon candidat au futur suivi satellitaire, qui en donnera une vision d'ensemble. L'exploitation de telles données, à des fins de caractérisation quantitative des ressources en eau de la plaine, ne se fera pas sans l'intermédiaire d'un outil de modélisation du système couplé gravières-aquifères. C'est à l'élaboration de cet outil que nous avons œuvré au cours de la phase VII du PIREN-Seine, depuis la conception d'un module de simulation des gravières (Partie 2) à sa mise en application à l'échelle de la Bassée (Partie 3).

2 LIBWET, un module de simulation des gravières

La première étape pour répondre aux objectifs posés a été de se doter, au sein de la plate-forme de modélisation intégrée CAWAQS, d'un outil capable de simuler les fluctuations saisonnières de la cote de l'eau dans les gravières, en relation avec leur environnement. Notre choix s'est porté sur le développement in extenso d'une librairie dédiée à la simulation hydrologique des gravières, compte tenu de l'architecture modulaire de CAWAQS. Ce module s'appuie sur le calcul du bilan hydrologique de la gravière prenant en compte les précipitations, l'évaporation, le ruissellement et les échanges avec les aquifères adjacents. Il a été testé et validé sur un cas simplifié de plaine alluviale, par comparaison de ses performances avec celles du module LAK de MODFLOW (Merritt and Konikow, 2000).

2.1 La plate-forme de modélisation des hydrosystèmes CAWAQS

CAWAQS (CAtchment WAter Quality Simulator) est une plate-forme de modélisation distribuée et modulable des hydrosystèmes régionaux (Flipo, 2005; Labarthe, 2016). Cet outil couple des modules spécifiques pour simuler les tranferts d'eau au sein et entre les différents réservoirs du cycle de l'eau, depuis la surface jusqu'au compartiment souterrain. La plate-forme se divise conceptuellement en trois composantes : surface, zones non saturée et saturée (Figure 1) et regroupe les librairies suivantes :

LIBFP calcule le bilan hydrologique de surface à l'aide de fonctions de production;

- LIBNSAT assure le transfert vertical des flux d'eau infiltrés calculés par le module de surface, grâce à une cascade de réservoirs;
- LIBHYD simule les écoulements en rivière par résolution du schéma de Muskingum;
- **LIBAQ** calcule les charges hydrauliques dans un système multi-couche pseudo-3D par résolution numérique de l'équation de la diffusivité pour la nappe captive, selon un schéma aux différences finies semi-implicite.

Dans CAWAQS, il n'existait pas de module propre permettant de simuler les interactions entre l'aquifère et un plan d'eau. Notre objectif fut ainsi de développer un tel module en utilisant les fonctionnalités existant déjà dans LIBAQ, de sorte que l'on puisse estimer les impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée.



Figure 1. La plate-forme de modélisation des hydrosystèmes CAWAQS.

2.2 LIBWET

2.2.1 Formulation mathématique du module LIBWET

LIBWET (Wang, 2016) a pour tâche de calculer la cote d'un plan d'eau libre, compte tenu de ses échanges avec l'atmosphère, les eaux de surface et les aquifères adjacents, par le calcul de son bilan hydrologique. Ce bilan, illustré en Figure 2, tient ainsi compte des pertes ou apports d'eau du fait du ruissellement R [L³/T], des précipitations P [L³/T], de l'évaporation E [L³/T] et des infiltrations d'eau souterraine S_p [L³/T] (positives si entrantes) aussi bien latéralement via ses berges que verticalement à travers son lit. Pendant un intervalle de temps Δt [T], le bilan s'écrit :

$$h_{l}^{n} = h_{l}^{n-1} + \Delta_{t} \frac{P - E + R + S_{p}}{A_{s}}, \tag{1}$$

où h_l^n et h_l^{n-1} sont respectivement les cotes [L] de la gravière au pas de temps actuel et au pas de temps précédent et A_s est la surface au sol de la gravière [L²]. Le flux d'eau q [L.T⁻¹] échangé par unité de surface à travers une interface gravière-aquifère est fonction du gradient de charge entre les deux unités et d'une conductance spécifique équivalente C [T⁻¹] :

$$q = C(h_a - h_l),\tag{2}$$

où h_a [L] est la charge de l'aquifère et h_l [L] la cote de la gravière.

La conductance spécifique C est prise égale à la moyenne harmonique des conductances spécifiques de l'aquifère C_a [T⁻¹] et du lit de la gravière C_q [T⁻¹] :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_g} + \frac{1}{C_a} \quad \text{où} \quad C_g = \frac{K_g}{b} \quad \text{et} \quad C_a = \frac{K_a}{\Delta l}, \quad (3)$$

b [L] étant l'épaisseur du lit ou des berges de la gravière et Δl [L] la demi-taille de la maille aquifère dans le sens de l'écoulement (Figure 2). S_p est la somme des flux individuels échangés à travers les M interfaces gravière-aquifère : $S_p = \sum_m^M C_m(h_{am} - h_l)$, où h_{am} est la charge de l'aquifère dans l'élément voisin de la m^{ième} interface Figure 2. Conceptualisation des interactions de aquifère-gravière au pas de temps n, h_l la charge de la gravière au pas de temps n-1 et C_m la conductance spécifique de la m^{ième} interface aquifère-gravière.



la gravière avec son environnement.

L'équation 1 est un schéma explicite, utilisé pour la résolution en régime permanent. En régime transitoire, la résolution est également possible selon un schéma implicite ou semi-implicite, en introduisant : $\bar{h_l} = (1 - \theta)h_l^{n-1} + \theta h_l^n$, où $0 \le \theta \le 1$. En régime permanent, afin de déterminer l'état d'équilibre du système, les charges dans les aquifères et dans la gravière sont calculées de manière itérative, jusqu'à convergence. Le bilan hydrologique dans la gravière pour la détermination de la cote du plan d'eau est effectué après résolution de l'équation de la diffusivité :

$$h_l = \frac{P - E + R + \sum_m^M C_m h_{am}}{\sum_m^M C_m} \tag{4}$$

En régime transitoire, la cote de la gravière au pas de temps précédent est d'abord utilisée comme condition aux limites de type 1 pour le calcul des charges des aquifères, avant celui de la nouvelle cote de la gravière au pas de temps courant, selon l'équation suivante :

$$h_{l}^{n} = \frac{h_{l}^{n-1} + \Delta t \frac{P - E + R + (\sum_{m}^{M} C_{m} h_{am} - (1 - \theta) h_{l}^{n-1} \sum_{m}^{M} C_{m})}{A_{s}}}{1 + \frac{\theta \Delta t}{A_{s}} \sum_{m}^{M} C_{m}}.$$
(5)

2.2.2 Validation du module LIBWET par comparaison au module LAK de MODFLOW sur un cas d'étude simplifié

Les perfomances numériques du module de gravière ont été évaluées par comparaison à l'un des seuls modules équivalents de lac actuellement disponibles, le code LAK associé à MODFLOW (Merritt and Konikow, 2000); et ce, sur un cas étalon composé d'une gravière en connexion avec deux aquifères, représentatif des zones d'exploitation des granulats en milieu alluvionnaire.

La gravière, couvrant plus de 9 hectares, est creusée dans une couche d'alluvions jusqu'à un substratum crayeux, au centre d'un domaine de dimensions 3125 m x 3125 m, discrétisé en mailles de 62,5 m de côté (Figure 3). La topographie est plane, à une altitude de 126 m. La nappe des alluvions est alimentée à l'ouest par un flux latéral, en surface par la recharge et est en connexion hydraulique avec la nappe de la craie, ellemême délimitée par des conditions aux limites de flux nul. Les alluvions sont drainées par une rivière, représentée par une charge imposée le long de la bordure est du domaine d'étude. Le scénario proposé, ainsi que les paramètres du modèle, sont résumés dans le Tableau 1.



Figure 3. Description du domaine d'étude.

Le ruissellement est considéré nul. La gravière est alimentée par les précipitations et sujette à une reprise évaporatoire. Une même conductance spécifique est choisie pour le lit et les berges de la gravière, qui se traduit par des conductances spécifiques équivalentes de $3,95.10^{-5}$ s⁻¹ pour les interfaces verticales (berges/alluvions) et de $4,5.10^{-6}$ s⁻¹ pour les interfaces horizontales entre le fond de la gravière et la craie.

Deux simulations sont conduites, en régime permanent et en régime transitoire, avec les deux couples de modèles, en utilisant un pas de temps de un jour et le schéma explicite des modules de lac. Les forçages restent constants au cours de la simulation transitoire, initialisée selon des conditions éloignées de l'état d'équilibre, la cote d'origine de la gravière étant notamment fixée à son minimum, au toit de la craie. Pour une simulation suffisamment longue, la solution en régime transitoire doit converger vers l'état d'équilibre simulé en régime permanent.

	Alluvions	Craie	Gravière (lit & berges)	Rivière
Conductivité hydraulique horizontale K_h (m.s ⁻¹)	6.10^{-3}	5.10^{-4}		
Conductivité hydraulique verticale K_v (m.s ⁻¹)	6.10^{-4}	5.10^{-5}		
Coefficient d'emmagasinement S (-)	0,06	0,001		
Epaisseur <i>e</i> (m)	6	20		
Conductance spécifique C (s ⁻¹)			$4,98.10^{-5}$	
Conditions initiales h_0	123	122	120	124,5
Conditions aux limites				
Dirichlet h_r (m)				124,5
Neumann q_{lat} (m ³ .s ⁻¹)	$1,83.10^{-1}$			
Recharge I (mm.an ⁻¹)	218			
Précipitations P (mm.an ⁻¹)			675	
Evaporation E (mm.an ⁻¹)			710	

Tableau 1. Définition du domaine d'étude.

Un premier jeu de simulations a permis de s'assurer de la similarité des résultats produits par les deux codes CAWAQS et MODFLOW en l'absence de gravière. En régime permanent, les différences de charges simulées sur le domaine d'étude sont inférieures à 1,9 mm et négligeables au regard de la précision du calcul. En régime transitoire, un état d'équilibre – défini par des différences de charges inférieures à 1 mm entre deux itérations temporelles successives – est atteint au bout de 235 jours et correspond, quel que soit le code, aux conditions stationnaires. L'écart entre charges simulées par les deux codes est maximum en début de simulation, atteignant 4 cm au bout de quelques jours.

L'introduction d'une gravière impacte la distribution des équipotentielles et de fait la répartition des lignes de courant au voisinage proche du plan d'eau, convergentes à son amont et divergentes à l'aval (Figure 4). La nappe des alluvions est rabattue à l'amont de la gravière et mise en charge à l'aval (Figure 5). Entre les deux simulations CAWAQS et MODFLOW, les différences de charges simulées dans la nappe des alluvions n'excèdent pas 2,1 mm (Figure 4), ordre de grandeur comparable au cas sans gravière. Le bilan hydrologique de la gravière est détaillé dans le Tableau 2. Le déficit imposé E - P, de près de 9 m³.jour⁻¹ (soit 35 mm.an⁻¹), se traduit par un flux net entrant dans la gravière de même intensité, dont les trois quarts sont issus de la nappe des alluvions. La différence entre les flux calculés par chaque code est de 0,12% du flux total entrant.

En régime transitoire à pas de temps journalier, les cotes de la gravière simulées selon les trois schémas, explicite, semi-implicite et implicite, de LIBWET ne se superposent qu'à l'équilibre (277 jours). Seule la résolution selon le schéma explicite permet d'obtenir des résultats comparables à ceux de LAK, malgré quelques différences en début de simulation, maximales le premier jour (0,1 m) mais



Figure 4. Différences de charges (m) entre MODFLOW et CAWAQS et isopièzes (m) simulées en régime permanent dans l'aquifère des alluvions en présence d'une gravière.



Figure 5. Profils piézométriques ante- et post-gravière simulés par CAWAQS *le long d'une ligne d'écoulement ouest-est dans les alluvions et traversant le plan d'eau, ainsi que dans la craie.*

Tableau 2. Calcul du bilan hydrologique de la gravière en régime permanent.

	Cote	Précipitations	Evaporation	Flux d'entrée	Flux de sortie
	(m)	$(m^3.jour^{-1})$	$(m^3.jour^{-1})$	$(m^3.jour^{-1})$	$(m^3.jour^{-1})$
CAWAQS	125,0545	173,34	182,25	460,86	451,95
MODFLOW	125,0528	173,34	182,25	461,42	452,51
Différence	-0,0017	-	-	0,56	0,56

du même ordre de grandeur que celles qui séparent les charges simulées par LAK selon le schéma de résolution utilisé. En schéma explicite, les cotes de la gravière simulée par LIBWET pour des pas de temps décroissants (un jour, un demi-jour et un quart de jour) sont similaires (inférieures à à 0,015 m dès le troisième jour de simulation). L'évolution temporelle des charges simulées avec les deux codes à pas de temps 0,25 jour est finalement comparée en deux points choisis à l'amont et à l'aval de la gravière dans les alluvions et dans la gravière elle-même (voir localisation en Figure 4). La Figure 6 illustre la convergence des charges dans l'aquifère et la gravière vers leurs valeurs d'équilibre. Pour la

gravière, la différence de cote entre les deux simulations est maximale au premier jour de simulation (0,025 m) et décroît avec le temps (Figure 7). Elle est supérieure, quoiqu'acceptable, à celle obtenue au même point dans les alluvions en l'absence de gravière (0,004 m).



Figure 6. Evolution temporelle des charges simulées par CAWAQS et MODFLOW (schéma explicite, pas de temps de 0,25 jour) dans la gravière et dans l'aquifère des alluvions, de part et d'autre de la gravière le long d'une ligne d'écoulement.



Figure 7. Comparaison détaillée CAWAQS-MODFLOW en trois points (représentés en Figure 4) pour le régime transitoire (schéma explicite, pas de temps de 0,25 jour).

Ainsi validé et opérationnel, LIBWET a été officiellement intégré dans la plate-forme de modélisation comme un module à part entière, qui peut être activé si besoin est.

2.3 Simulation de l'impact hydrodynamique des gravières avec LIBWET

L'impact de l'introduction d'une gravière sur le comportement hydrodynamique d'un système hydrogéologique composé de deux aquifères connectés en interaction avec une rivière a été évalué sur la base du même cas étalon ayant servi à la validation du module LIBWET. Différentes configurations relatives à l'éloignement de la gravière vis-à-vis de la rivière, son orientation par rapport au sens de l'écoulement et le colmatage différentiel de ses berges ont été considérées (Colleoni, 2019). Leurs simulations confirment et illustrent des résultats déjà établis depuis longtemps (e.g. Peaudecerf, 1975) et connus de la profession (Figure 8).





(b) Gravière située à 250 m de la rivière.

(c) Gravière située à 250 m de la limite amont du système.



Figure 8. Profils piézométriques ante- et post-gravière simulés par CAWAQS le long d'une ligne d'écoulement ouest-est dans les alluvions et traversant le plan d'eau, pour différentes configurations de la gravière.

Ainsi, en offrant une plus grande surface d'échange face à l'écoulement des eaux, une gravière orientée perpendiculairement par rapport aux lignes de courant aura-t-elle un impact piézométrique plus limité (Figure 8a). Le rabattement maximal par rapport à la situation d'origine ante-gravière, enregistré à l'amont de celle-ci, est de moindre ampleur (2,6 cm contre 6,8 cm dans le cas de référence, Figure 5). La contribution de l'aquifère des alluvions au flux total entrant dans la gravière est renforcée (à hauteur de 80%).

L'influence de la gravière sur la piézométrie des alluvions est d'autre part d'autant plus accentuée que celle-ci se situe proche de la rivière (Figures 8b & 8c), là où le gradient hydraulique initial est plus marqué. Les flux échangés entre nappes et gravière croissent (de près de 70% par rapport au cas de référence) alors qu'ils diminuent presque d'autant lorsque la gravière est positionnée en amont.

Quant au colmatage des berges et du lit de la gravière, il donne lieu à des situations hydrologiques contrastées, selon les interfaces affectées (Figures 8d & 8e). Si seules les berges amont sont perméables à l'écoulement (une conductance spécifique équivalente de 10^{-8} s⁻¹ est imposée aux interfaces à l'aval, latérales et au lit de la gravière), la gravière n'est plus alimentée que par la nappe des alluvions et drainée par celle de la craie. Les flux échangés s'amenuisent (ne représentant plus que 3% du flux entrant de la gravière équivalente non colmatée). La cote de la gravière s'équilibre à une altitude nettement plus élevée (125,143 m) que dans le cas de référence (cf. Tableau 2) et comparativement à la situation piézométrique initiale, avec un rabattement prononcé à son aval (gradient hydraulique de 2,7‰, soit dix fois supérieur au gradient initial). La situation s'inverse lorsque la gravière est entièrement colmatée. Sa cote chute de près de 16 cm à son amont, par rapport à la piézométrie naturelle. Les flux échangés se limitent à l'entrée d'eau compensant strictement la reprise évaporatoire (9 m³.jour⁻¹), principalement assurée par l'aquifère de la craie.

Ces quelques cas d'étude simples, conduits en régime permanent pour une gravière de forme rectangulaire, illustrent par leur diversité celle qui peut être rencontrée en conditions naturelles. S'y ajoute l'influence de l'hétérogénéité des propriétés physiques des aquifères adjacents.

3 Modélisation hydrodynamique des gravières au sein de la plaine de la Bassée

3.1 Stratégie de modélisation multi-échelle

Dans un second temps, le travail a porté sur le développement d'un modèle hydrodynamique de la plaine de la Bassée, incluant les gravières actuelles et les deux aquifères principaux avec lesquelles elles interagissent, à savoir l'aquifère régional de la craie et celui, plus local, des alluvions. L'architecture de ce modèle repose sur une stratégie d'emboîtement, visant à ne représenter localement que la plaine elle-même, délimitée en surface par l'extension à l'affleurement des alluvions, depuis la confluence de la Seine avec l'Aube à l'amont et l'Yonne à l'aval (Figure 9). Le modèle ainsi défini tire ses conditions aux limites (de type 2) du modèle régional reproduisant le fonctionnement de l'hydrosystème Seine (Flipo, 2019). En sont également issues la recharge, calculée par le module de surface LIBFP en ayant recours aux réanalyses SAFRAN (Quintana-Seguí et al., 2008; Vidal et al., 2010), et les hauteurs d'eau imposées en Seine d'après les estimations du module hydraulique LIB-HYD. L'échelle locale autorise la construction d'un maillage plus raffiné, de $50x50 \text{ m}^2$ pour la couche des alluvions et de $100 \times 100 \text{ m}^2$ pour la couche de la craie. Elle permet également la prise en compte de l'hétérogénéité du champ de transmissivités des alluvions obtenu par une procédure d'inversion (Labarthe, 2016). La transmissivité de la craie et les coefficients d'emmagasinement des deux couches correspondent en revanche à ceux du modèle régional. Deux types de simulation sont conduites, en régime permanent pour des conditions moyennes de basses eaux correspondant au mois de septembre et en régime transitoire, pour la période courant d'août 1993 à juillet 2018.



Figure 9. Stratégie de modélisation multi-échelle : du bassin de la Seine à la plaine de la Bassée. Service géologique régional du bassin de Paris (1965); Greiner (1997); Pasquier and Marcotte (2006).

3.2 Les gravières de la plaine de la Bassée

La description des gravières prises en compte dans le modèle de la Bassée repose sur un recensement effectué à partir des orthophotographies de l'IGN datant de 2014. Il a conduit à l'identification de 391 plans d'eau couvrant a minima deux mailles de la couche des alluvions (Figure 10). L'analyse des orthoimages permet d'évaluer l'emprise spatiale des gravières à près de 8% du domaine d'étude, avec une densité plus forte à l'aval de la plaine. L'exploitation des images Landsat depuis 1988 a fourni de plus une vision continue de l'évolution des surfaces en eau dans la plaine et l'année de création de chacune d'entre elles (Picourlat et al., 2018).



Figure 10. Gravières incluses dans le modèle mathématique de la plaine de la Bassée, avec date de création.

L'âge des gravières est un facteur supposé déterminant de leur degré de colmatage, malgré un taux de sédimentation des matières en suspension jugé faible au regard d'apports extérieurs limités. La littérature (e.g. Schanen, 1998, pour la Bassée) fait état d'un colmatage souvent différentiel, guidé par le sens d'écoulement de l'eau et ainsi plus marqué à l'aval mais également dépendant de l'historique d'exploitation et de réaménagement. L'analyse conjointe des chroniques piézométriques (craie et alluvions) et de fluctuations des niveaux dans les gravières de la Bassée indique cependant un équilibre entre les entités, témoin d'un faible colmatage (e.g. Setec Hydratec, 2018). L'état des berges et du lit de l'ensemble des plans d'eau apparaît donc difficile à estimer a priori. On choisit dans un premier temps un jeu unique de paramètres les décrivant dans le modèle, avec une épaisseur des interfaces fixée à 2 m et une conductivité hydraulique à $8,5.10^{-5}$ m.s⁻¹ sur la base de la moyenne estimée par Schanen et al. (1998), soit une conductance spécifique des berges et du lit de 4,25.10⁻⁵ s⁻¹. On fait de plus l'hypothèse simplificatrice que les gravières sont creusées uniformément jusqu'au substratum crayeux, communiquant ainsi avec l'aquifère des alluvions via leurs interfaces verticales et directement avec l'aquifère de la craie via leurs interfaces horizontales.

Le bilan hydrologique de chaque gravière est calculé pour un ruissellement nul, la topographie étant particulièrement plate à leurs abords et les exploitations aménagées de façon à les protéger des intrusions d'eau de surface. Les données journalières de précipitations et celles nécessaires au calcul de l'évaporation sont issues des réanalyses SAFRAN. L'évaporation est le terme le plus délicat à évaluer (e.g. Hayashi and van der Kamp, 2007; McMahon et al., 2013) mais il est majeur puisqu'il fixe les quantités d'eau perdues par le système hydrogéologique du fait de la présence des gravières dans la plaine. La plupart des formulations utilisées pour les lacs et les zones humides font appel à la fois à des termes énergétiques et aérodynamiques. L'équation de Penman (1956), qui néglige la transpiration des plantes lacustres émergentes ou à feuilles flottantes, a été ici employée pour le calcul de l'évaporation de l'eau libre à chaque pas de temps, bien qu'elle soit susceptible de la surestimer. Une analyse plus poussée de ce terme est nécessaire, notamment à travers la comparaison de différentes méthodes d'évaluation de l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre, mais devant prendre en compte les spécificités des gravières. Pour des plans d'eau artificiels, de petite taille et peu profonds, établis dans un matériau perméable et drainés par les eaux souterraines, la contribution de ces

dernières au bilan énergétique des lacs de gravière pourrait être significative (Hayashi and van der Kamp, 2007), du fait des différences d'inertie thermique entre chaque compartiment. A court terme, il est prévu de confronter les estimations obtenues des flux d'évaporation à celles calculées par le modèle FLAKE (Mironov, 2008), fondé sur une représentation paramétrique du bilan d'énergie dans les lacs et récemment appliqué aux lacs réservoirs de Seine ainsi qu'aux gravières de la Bassée (Bernus et al., 2018).

3.3 Hydrodynamisme des gravières

L'approche par modélisation offre la possibilité de quantifier les flux entre gravières et aquifères à l'échelle de l'ensemble de la plaine et de simuler les fluctuations de la cote des gravières en réponse aux forçages appliqués. Seront présentés ici les résultats relatifs aux performances du modèle de la Bassée dans ce dernier domaine, en cherchant à identifier dans un premier temps les forçages et paramètres auxquels il est le plus sensible. On se référera à Jost et al. (2017) pour une estimation du bilan hydrologique des gravières et à Picourlat (2018) pour une analyse des variations d'amplitude de la cote des gravières à l'échelle de l'ensemble de la plaine. Deux gravières situées à l'aval de la Bassée, dans le secteur d'Egligny-Vimpelles, sont choisies pour illustration et font, ou ont fait partie, du réseau de surveillance hydrologique mis en place dans le cadre du PIREN-Seine (voir localisation en Figure 10). L'une se trouve à proximité de la Vieille Seine, à une distance d'environ 1,5 km de la Seine (T6G2 dans la nomenclature du réseau) et la seconde, à seulement 50 m de la Seine (T6G4).

La comparaison des réponses hydrodynamiques de ces deux gravières permet d'étudier premièrement l'impact de la distance à la Seine sur l'amplitude annuelle simulée de leur niveau d'eau (Figure 11a). A proximité de la Seine, la cote de la gravière reproduit fidèlement les fluctuations de la cote imposée en rivière. L'amplitude maximum est atteinte lors de la crue de janvier 2018, avec une hausse de l'ordre de 2,5 m de son niveau, comparativement aux basses eaux précédant l'épisode. Le signal est naturellement atténué, lissé et déphasé avec l'éloignement à la Seine. Le marnage n'est plus que d'environ 1 m à l'hiver 2018 et la cote des hautes eaux n'est pas la plus élevée de la série temporelle, contrairement au cas précédent.

Le niveau d'eau calculé dans les gravières varie de concert avec les niveaux piézométriques simulés dans les alluvions et la craie à l'amont de la gravière (Figure 11b). L'évolution temporelle de la cote de la gravière amont est en particulier très similaire à celle de la charge de la craie. A proximité de la Seine, la cote de la gravière est voisine des charges simulées dans les nappes de la craie et des alluvions lors des récessions printanières, du fait d'un léger déphasage temporel du pic de crue. Elle leur devient alors même supérieure en cas de crue majeure.

Pour compléter l'analyse, une comparaison des cotes simulées de la gravière amont est faite pour trois configurations différentes témoignant, au regard du cas de base (simulation initiale notée i), de l'impact des paramètres hydrodynamiques des aquifères, ici le coefficient d'emmagasinement S des alluvions, combiné à la prise en compte de la variation temporelle de la cote de la Seine (Figure 11c). Deux simulations supplémentaires en régime transitoire ont ainsi été conduites i) pour des valeurs de S globalement inférieures (simulation s) puis ii) en y associant une condition aux limites stationnaire en Seine correspondant aux basses eaux (simulation n). Il apparaît que la réponse de la gravière est dépendante des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère, l'amplitude de sa cote étant plus prononcée à plus faible coefficient d'emmagasinement de la couche des alluvions. D'autre part, même à distance de la Seine, ses fluctuations dictent celles de la gravière qui, en leur absence, ne répondent principalement qu'aux fluctuations de la recharge.

Cet examen mérite d'être étendu à toutes les gravières de la Bassée et à l'ensemble des forçages et paramètres auxquels elles sont sujettes, de façon à en hiérarchiser l'influence relative, préalablement à l'étape d'assimilation des observations spatiales et *in situ* à des fins de calibration du modèle.

(a) Comparaison entre gravière amont et aval.



(b) Comparaison entre gravière T6G2, alluvions et craie.



(c) Comparaison entre différentes configurations de simulation.



Figure 11. Simulations de l'évolution temporelle des cotes de deux gravières de la Bassée de 1994 à 2018.

4 Conclusion

A l'issue de la phase VII du PIREN-Seine, nous disposons d'un outil mathématique conçu pour le suivi du bilan d'eau des lacs de gravière drainés par des flux d'eau souterraine. Ce module, dénommé LIBWET, est intégré dans la chaîne de modélisation des hydrosystèmes CAWAQS et couplé au calcul des charges hydrauliques dans les aquifères adjacents. Il permet de simuler l'évolution temporelle des

niveaux d'eau dans les gravières, en réponse aux forçages météorologiques qui leur sont appliqués et compte tenu des caractéristiques hydrologiques et physiques de leur environnement local. On montre en particulier au moyen d'expériences *in silico* que la cote moyenne d'une gravière donnée est déterminée par le degré de colmatage de ses berges et de son lit (Partie 2). Les gravières faiblement colmatées sont en équilibre hydrodynamique avec les aquifères adjacents et, ainsi représentatives des conditions d'écoulement régnant dans ceux-ci, elles offrent la possibilité d'un suivi des ressources en eau de l'hydrosystème.

L'impact du colmatage aux interfaces entre gravière et nappes se traduit également dans le marnage des gravières, d'autant plus prononcé que les berges et le lit sont peu perméables (Picourlat et al., 2018) mais également déterminé par les propriétés hydrodynamiques des aquifères au voisinage du plan d'eau (Colleoni, 2019). Les facteurs de contrôle des fluctuations de la cote des plans d'eau incluent aussi naturellement l'évolution temporelle du bilan net entre les précipitations reçues par la gravière et ses pertes évaporatoires ou encore celle de la recharge des nappes. L'influence de la variation de la cote en rivière est majeure mais s'atténue avec la distance.

Le module de simulation des gravières étant validé, il est actuellement en cours de mise à jour, pour une plus grande flexibilité d'utilisation, concernant notamment le calcul de l'évaporation. La future comparaison aux flux de surface simulés par le modèle de lac FLAKE sur la base d'un bilan d'énergie et appliqué aux mêmes objets (Bernus et al., 2018) devrait être informative quant au choix de la méthode d'estimation la plus appropriée. A plus long terme, un calcul équivalent du bilan énergétique spécifique aux gravières pourrait être intégré dans LIBWET et couplé au transport de chaleur dans les aquifères déjà implémenté dans CAWAQS, pour la prise en compte des interactions thermiques entre nappes et gravières.

Du point de vue hydrodynamique, l'assimilation des pseudo-observations de variation du niveau des gravières déjà générées par le simulateur SWOT, combinée aux mesures *in situ* acquises dans la Bassée depuis quelques années, contribuera à renforcer la chaîne de modélisation par la mise en place d'une procédure d'ajustement des paramètres de calibration du modèle de lac, en vue d'un outil d'interprétation opérationnel au lancement du satellite prévu le 24 septembre 2021.

Bibliographie

- A. Bernus, C. Ottlé, K. Petrus, S. Biancamaria, C. Perrin, N. Flipo, A. Jost, A. Rivière, D. Desroches, and A. de Lavenne. Contribution of the SWOT mission to Seine reservoirs and gravel pits evaporation modeling. In AGU Fall Meeting Abstracts, volume 2018, pages OS53C–1338, Dec 2018.
- F. Colleoni. 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, 2019.
- N. Flipo. *Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin.* PhD thesis, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- N. Flipo. 200 ans d'évolution de la ressource en eau du bassin de la seine. In *Fonctionnement hydrogéophysique*, volume III of *Rapport de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine*. 2019.
- I. Greiner. 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, 1997.
- Y. Gueho. Les impacts hydrodynamiques des gravières sur la nappe alluviale de la bassée. Mémoire de Master, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2014.
- M. Hayashi and G. van der Kamp. 10 water Level Changes in Ponds and Lakes : The Hydrological Processes. In Edward A. Johnson and Kiyoko Miyanishi, editors, *Plant Disturbance Ecology*, pages 311 – 339. Academic Press, Burlington, 2007. doi:10.1016/B978-012088778-1/50012-1.
- A. Jost, S. Wang, L. Labarthe, and N. Flipo. Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. Rapport technique, PIREN-Seine, 2017.
- B. Labarthe. *Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle.* PhD thesis, MINES ParisTech, PSL Research University, 2016.
- T. McMahon, M. Peel, L. Lowe, R. Srikanthan, and T. McVicar. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data : a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17:1331–1363, 2013. doi:10.5194/hess-17-1331-2013.
- M Merritt and L Konikow. Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model. Report 00-4167, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, 2000. 146 p.
- D. Mironov. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model. COSMO Technical Report 11, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany, 2008.
- P. Pasquier and D. Marcotte. Steady- and transient-state inversion in hydrogeology by successive flux estimation. *Advances in Water Resources*, 29 :1934–1952, 2006. doi:10.1016/j.advwatres.2006.02.001.
- P. Peaudecerf. Effet des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines. *La Houille Blanche*, 2/3 :133–140, 1975. doi:10.1051/lbb/1975007.
- H. Penman. Estimating evaporation. Eos Trans. AGU, 37:43-50, 1956.
- F. Picourlat. Modélisation de l'impact hydrodynamique des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, Sorbonne Université, Paris, 2018.
- F. Picourlat, A. Jost, S. Teillaud, P. Passy, F. Baratelli, and N. Flipo. Impact des aménagements anthropiques dans la plaine de la Bassée : le cas des gravières. Rapport technique, PIREN-Seine, 2018.

- P. Quintana-Seguí, P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel. Analysis of near-surface atmospheric variables : Validation of the SA-FRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47:92–107, 2008.
- O. Schanen. Analyse et modélisation de l'impact hydrodynamique et biogéochimique des lacs de gravières sur la nappe alluviale du val de Seine. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1998.
- O. Schanen, H. Bendjoudi, A. Levassor, and E. Fustec. Quantification des écoulements nappegravières, en zone alluviale, par optimisation du bilan hydrologique. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 326 :107–112, 1998. doi:10.1016/S1251-8050(97)87454-X.
- Service géologique régional du bassin de Paris. Possibilités aquifères des alluvions du val de Seine entre Nogent-s-Seine et Montereau. Rapport technique, BRGM, 1965.
- Setec Hydratec. Interprétation du suivi piézométrique. Année 2016-2017. Rapport technique, EPTB Seine Grands Lacs, 2018.
- J.-P. Vidal, E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, and J.-M. Soubeyroux. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.*, 30(11) :1627–1644, 2010. doi:10.1002/joc.2003.
- S. Wang. Création d'un module de simulation des interactions gravières-aquifères et application à la plaine alluviale de la Bassée. Mémoire de Master, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2016.