

Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée

Anne Jost^{1*}, Shuaitao Wang², Baptiste Labarthe², Nicolas Flipo²

¹ Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, Metis, Paris

² Université Paris Sciences & Lettres, MINES ParisTech, Centre de Géosciences, Fontainebleau

* anne.jost@upmc.fr

Résumé

La Bassée, vaste plaine alluviale de la Seine située à l'amont de Paris, est une zone humide d'importance nationale, siège d'enjeux stratégiques d'aménagement du territoire. Ceux-ci ont trait à la protection contre les inondations, au transport fluvial, à la préservation de la biodiversité, à l'approvisionnement en eau potable et à l'extraction des matériaux alluvionnaires. L'exploitation intensive des sables et graviers depuis les années 1960 a façonné le paysage de la Bassée et conduit à la mise en eau de près de 10% de sa surface. Les gravières ainsi formées interagissent aussi bien avec l'aquifère local des alluvions et l'aquifère régional de la craie que directement avec l'atmosphère. Afin de simuler ces interactions, nous avons développé un module de lac au sein de la plate-forme de modélisation des hydrosystèmes EauDyssée. Les performances de ce nouvel outil ont été évaluées sur un cas synthétique, avant qu'il ne soit intégré au sein du modèle hydrogéologique de la Bassée. Nous nous appuyons sur une simulation transitoire conduite sur une quinzaine d'années pour proposer une première quantification du bilan hydrologique des gravières à l'échelle de la plaine.

Introduction

Les granulats représentent plus de la moitié des matières extraites du territoire français. Employés bruts ou transformés, ils sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Sur les 328 millions de tonnes consommées en France en 2015, près de 30% sont issues des alluvions (UNICEM et UNPG, 2017). Principalement destinés à la fabrication de bétons hydrauliques, sables et graviers alluvionnaires constituent l'un des principaux gisements franciliens, du fait de leur proximité géographique avec les lieux de consommation, la qualité de leurs matériaux et les possibilités de transport fluvial. Les sites d'exploitation se développent dans les principales vallées alluviales de la Marne et de la Seine. A l'amont de la confluence entre la Seine et l'Yonne, la Bassée tient une place prépondérante dans l'approvisionnement en granulats d'Ile-de-France. La faible épaisseur des alluvions, jusqu'à une dizaine de mètres au centre de la vallée, dans une plaine de 50 km de long sur 6 de large, entraîne une concentration importante des exploitations. Elle se traduit dans le paysage par un foisonnement de gravières, lacs artificiels qui résultent de l'extraction des matériaux alluvionnaires sous la surface piézométrique et couvrent aujourd'hui près de 10% de la surface de la plaine. De telles densités, liées à l'exploitation d'un niveau géologique donné, sont caractéristiques des grandes régions de production : les Pays-Bas ou la côte de Ravenne en Italie en présentent de semblables (Mollema et Antonellini, 2016).

La présence de gravières modifie significativement la morphologie, les cycles hydrologique et biochimique et le fonctionnement écologique d'une région. Ce sont des environnements récents, de nouveaux éléments du paysage encore peu étudiés sur le long terme. Les premières sablières font leur apparition à l'aval de Montereau, dès la seconde moitié du XIX^e siècle (Backouche et Eustache, 2003). Dans la Bassée, la plupart ont vu le jour à partir des années 1960. Dotées d'une relativement faible profondeur par rapport à leur aire, par comparaison aux lacs naturels, les gravières offrent une large surface d'échange avec l'atmosphère, propice à l'évaporation. Elles peuvent cependant être vues aussi comme de potentiels réservoirs d'eau douce. Souvent isolées des rivières et situées dans de plates plaines alluviales, elles reçoivent peu d'apport d'eau de surface et de sédiments. Leur taux de sédimentation est alors relativement faible, alimenté par les dépôts atmosphériques et les apports minéraux des eaux souterraines, les gravières étant en général traversées par un écoulement souterrain. L'accumulation et la sédimentation des matières en suspension entraînent un colmatage permanent du lit et des berges aval des gravières, renforcé par des processus biologiques. La perméabilité des berges dépend également des conditions dans lesquelles les sites d'extraction ont été réaménagés à l'issue de l'exploitation, souvent à l'aide de stériles fins et peu perméables. Il en résulte des temps de résidence de l'eau dans les gravières qui croissent avec le temps. D'un point de vue hydrochimique, les gravières peuvent constituer aussi bien un piège, source d'eutrophisation (Kattner et al., 2000), que s'appauvrir en éléments chimiques par rapport au flux amont d'eau souterraine. Elles incorporent azote et phosphore et peuvent contribuer à la dénitrification des eaux souterraines (Schanen, 1998 ; Weihartner et al., 2012) mais sont également un lieu de dépôt des métaux (Mollema et al., 2015). Dans les environnements urbains ou agricoles, elles favorisent la biodiversité en offrant de nouveaux habitats. Elles sont de fait souvent réhabilitées en tant que réserves ornithologiques, de chasse ou de pêche.

En mettant à nu la surface piézométrique, ces plans d'eau artificiels accroissent la surface occupée par les eaux de surface au sein de la plaine, ce qui favorise une évaporation directe, jugée plus élevée que l'évapotranspiration réelle d'une parcelle végétalisée dans la plupart des contextes climatiques. Dans les gravières soutenues par un flux d'eau souterraine, l'évaporation n'est limitée que par la quantité d'énergie solaire disponible. Les gravières devraient de ce fait jouer le rôle de puits pour le système aquifère. Sur son site d'étude, composé de neuf gravières réparties sur deux secteurs de la Bassée aval, Schanen (1998) enregistre un déficit d'alimentation liées aux pertes évaporatoires directes s'exerçant sur les plans d'eau lors des années sèches, engendrant des baisses importantes du niveau de la nappe alluviale, non compensées par les apports régionaux de l'aquifère de la craie. A plus long terme, le colmatage et la présence de remblais peu perméables provoquent une mise en charge de la nappe à l'amont hydraulique des gravières et son rabattement important à l'aval, illustré par de forts gradients hydrauliques, ayant pour conséquence un maintien artificiellement haut du niveau de la nappe et un stockage d'eau. L'estimation de l'impact des gravières sur le niveau de la nappe n'est donc pas aisée. La comparaison des états piézométriques ante- et post-exploitation des granulats est de plus rendue difficile par le manque d'homogénéité entre référentiels d'altitude utilisés pour mesurer les cotes (Schanen, 1998) et la concomitance de travaux d'aménagement. Dans le secteur de la Bassée aval, si la mise en place des barrages à l'amont ne rehausse la ligne d'eau à l'étiage que d'une vingtaine de centimètres, la création de chenaux de navigation plus larges, au tracé plus rectiligne, occasionne un enfoncement significatif du lit de la rivière (Steinmann et al., 2016).

Aussi bien l'évaporation à la surface des gravières que leurs échanges avec les aquifères sont difficiles à mesurer directement, bien que les systèmes de télédétection offrent des perspectives très prometteuses, en particulier la future intégration des données SWOT (Surface Water and Ocean Topography) en domaine continental. Dans cette perspective, la modélisation hydrogéologique peut contribuer efficacement à l'effort de quantification du bilan hydrologique des gravières dans leur contexte aquifère et sur le long terme. Notre démarche s'inscrit dans cette optique et repose sur la stratégie de modélisation multi-échelle développée par Labarthe et Flipo (2016) à l'interface entre bassin de la Seine et plaine alluviale de la Bassée. L'ajout d'un module de simulation des gravières à la plate-forme de modélisation des hydrosystèmes EauDyssée (Wang et al., 2016) rend possible le calcul des échanges entre plans d'eau, aquifères et atmosphère. Sa mise en œuvre à l'échelle de la plaine de la Bassée nous permet désormais de proposer une première quantification de l'impact hydrodynamique des gravières.

1 La Bassée, un territoire aux multiples enjeux

1.1 Connaissance géologique et hydrogéologique de la Bassée

Située entre la confluence de la Seine avec l'Aube à l'amont et l'Yonne à l'aval, la plaine alluviale de la Bassée entaille les puissantes formations crayeuses du Crétacé supérieur du bassin de Paris (Figure 1). La morphologie du val de Seine est le résultat d'une succession de phases d'érosion et de sédimentation fluviales donnant naissance à plusieurs nappes alluviales au cours des deux derniers cycles glaciaires (Deleplancque, 2016). Si les plus anciennes sont étagées et forment terrasses, les plus récentes s'emboîtent au sein de la plaine actuelle, dominée par des plateaux de faible relief. Le remplissage alluvionnaire de la Bassée est complexe, caractérisé par une large diversité de faciès hydrogéomorphologiques, qui ont été décrits en particulier dans le cadre du PIREN-Seine (e.g., Fustec et al., 2001). Depuis longtemps, la région a été reconnue comme un site majeur d'étude par le programme. Les premières études approfondies remontent cependant aux années 1960, conduites par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) avec le concours de la Ville de Paris (SGR, 1965). Disposant de moyens conséquents ayant permis de nombreux inventaires et sondages de reconnaissance, ces travaux avaient pour objectif principal la caractérisation des ressources en eau des alluvions, aux potentialités jugées très favorables du fait de sa situation au pied de la cuesta tertiaire d'Ile-de-France.

Les nombreux forages réalisés ont permis une description fine du remplissage alluvial (Mégny, 1979) et d'en estimer l'épaisseur, de quelques mètres à l'aplomb des paléodômes du substratum jusqu'à une douzaine de mètres dans l'axe des paléothalwegs, pour une moyenne de 7 m. La carte de la puissance des alluvions dans la plaine utilisée pour définir la géométrie de notre modèle (Section 3.2) a été établie par krigeage à partir des logs de forage (Labarthe, 2016 d'après Deleplancque, 2016). Les dépôts les plus anciens sont datés du Pléistocène. Ils se composent principalement de sables et graviers calcaires issus des formations jurassiques de l'amont du bassin, parfois associés à des éléments plus fins. Ils forment un ensemble homogène et l'essentiel de la masse alluvionnaire. Ils n'affleurent que sur les zones les plus élevées de la plaine, les fonds de vallée étant recouverts par les alluvions holocènes, dont la texture limoneuse témoigne d'une sédimentation typique de systèmes méandriformes.

La craie qui forme substratum est blanche et fine à cordons de silex discontinus, homogène, massive et saine en profondeur. Elle n'est fissurée que sur une trentaine de mètres de profondeur. Profondément remaniée en surface par l'altération éocène (Vernoux et al., 2003), elle est décrite comme pâteuse, plastique ou encore grumeleuse sous les alluvions, dans des cuvettes de dissolution auxquelles succèdent des dômes de craie plus compacte (Mégny, 1979). Cet horizon semi-perméable de craie molle sépare là où il est présent la nappe de la craie de celle des alluvions en plaine, avec laquelle elle est par ailleurs en connexion hydraulique. Bien qu'épaisse de 350 m, la craie n'est productive que sur les premières dizaines de mètres où elle est fracturée, ce qu'elle est d'autant moins sous recouvrement tertiaire sur le versant nord.

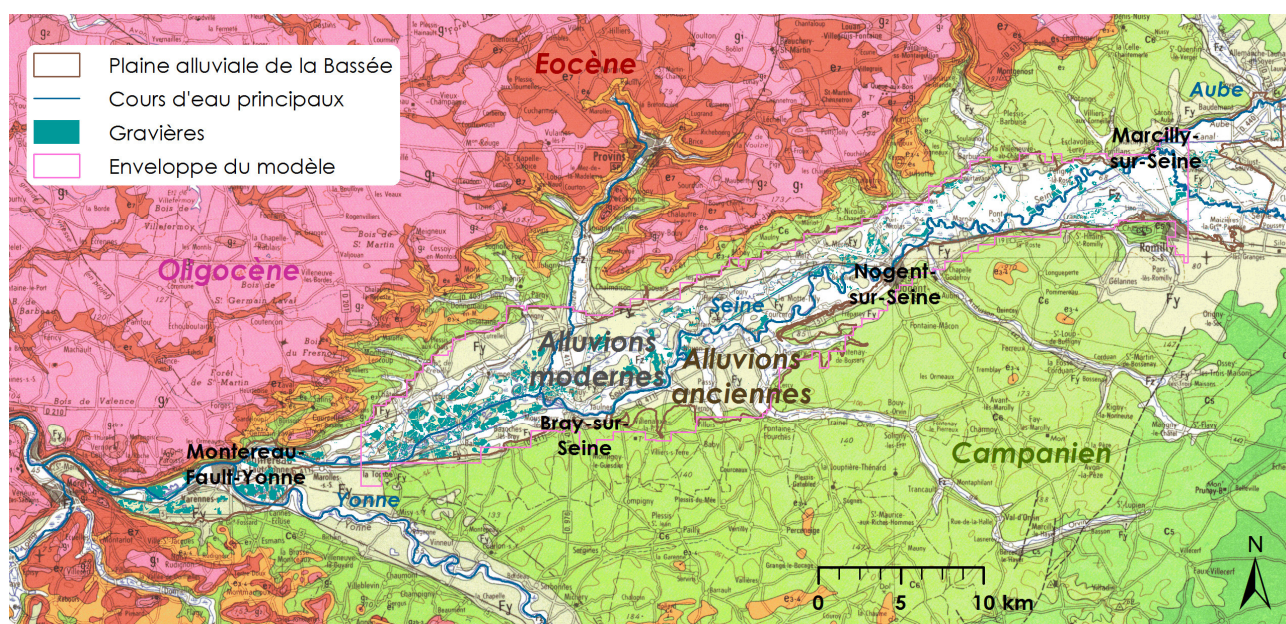


Figure 1. Cadre géologique de la Bassée. D'après la carte géologique au 1/250 000^e (BRGM).

Dans les alluvions, la nappe est libre et très peu profonde, en moyenne à 2 m sous la surface du sol. La granulométrie plus grossière des alluvions anciennes leur confère aussi bien une porosité importante qu'une forte perméabilité, de $2,5$ à $8,5 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ (Mégnyen, 1979), qui couplées à de bonnes conditions d'alimentation, en font un authentique gîte aquifère. L'allure du contact craie-alluvions, bien que globalement parallèle à la surface du sol, présente des irrégularités sources de transmissivités variables. La mosaïque alluviale liée à la complexité des héritages morpho-sédimentaires est aussi à l'origine d'hétérogénéités locales des propriétés hydrodynamiques. La craie elle-même est considérée comme étant de 2 à 10 fois moins transmissive que les alluvions (Mégnyen, 1979).

S'agissant de son fonctionnement hydrodynamique, la zone humide alluviale doit être ainsi considérée tout autant dans ses particularités locales que dans sa globalité, incluant un plus vaste hydrosystème, qui prenne en compte les apports issus de l'aquifère de la craie. Le schéma conceptuel de fonctionnement initial (Mégnyen, 1979) suppose que la vallée de Seine joue le rôle d'un drain pour la nappe alluviale dont le gradient hydraulique est de l'ordre de $0,5\text{‰}$ et elle-même alimentée par celle de la craie. Si les alluvions sont abondamment alimentées par l'infiltration directe de l'eau issue des précipitations favorisée par une topographie plate et un sol perméable, elles le sont à près de 75% par les eaux de l'aquifère crayeux (Fustec et al., 2001), que ce soit à travers leurs limites latérales ou par drainance ascendante. Ce principe de fonctionnement moyen intègre cependant des situations hydrologiques contrastées, où le sens des échanges entre Seine et alluvions peut se voir inversé, la piézométrie de la nappe alluviale répondant très rapidement aux variations de la cote en rivière. Ces conditions particulières se produisent de façon transitoire en période de crue mais aussi à l'amont des barrages-écluses, en lien avec la gestion anthropique de la cote de la Seine ou encore à la faveur des méandres du fleuve. Labarthe (2016) complexifie la vision du fonctionnement de la plaine en considérant sa dynamique à différentes échelles spatio-temporelles, sur la base de travaux de modélisation numérique. Il met ainsi en évidence des écoulements circulaires qui conduisent l'aquifère alluvial à alimenter un aquifère régional crayeux lui-même drainé par l'exutoire fluvial, circulations dont l'extension latérale dans la plaine varie au cours du cycle hydrologique.

Aujourd'hui, la Bassée fait figure de laboratoire pour l'étude des interactions entre aquifère régional, aquifère alluvial et eaux de surface, qu'elles soient rivières, noues ou gravières. Étudiée depuis longtemps par le PIREN-Seine, elle continue d'être un site privilégié d'investigations pour le programme, d'autant plus qu'elle est aussi le siège d'importants enjeux d'aménagement du territoire.

1.2 Ressources naturelles et enjeux territoriaux

La Bassée est en effet aussi bien une zone humide d'importance à l'échelle nationale qu'il importe de préserver qu'au centre d'enjeux stratégiques relatifs au transport fluvial, à la prévention des crues, aux ressources d'eau et de granulats, usages parfois contradictoires qu'il convient de concilier.

Le territoire expose aujourd'hui deux visages (Figure 2). À l'est de Bray-sur-Seine, la Bassée amont a un caractère rural et agricole, avec une faible densité de population. Elle préserve son rôle d'aire naturelle d'expansion des crues et conserve quelques milieux naturels remarquables tels que des forêts alluviales et des prairies humides, dont une réserve classée Natura 2000. À contrario, tout en gardant un caractère rural et périphérique, la Bassée aval a vu sa physionomie modifiée par les activités humaines. Les carrières en sont le moteur économique. L'exploitation intensive des granulats et la chenalisation de la Seine y ont entraîné une diminution de la fréquence et des zones d'expansion des inondations et le drainage des sols, favorisant les cultures céréalières intensives au détriment de l'élevage bovin (Baron et Piketty, 2001 ; Hagemaijer et Klaphake, 2007).

La région propose un tourisme de nature, centré sur les activités de plein air : chasse, pêche et nautisme y sont par exemple pratiqués sur d'anciennes carrières réaménagées. Le contexte actuel est cependant à la décroissance urbaine, qui fait état d'un déclin démographique assorti d'un affaiblissement économique et s'accompagne d'une diminution importante de la demande en eau (Lainé et al., 2016). La Bassée est néanmoins d'un intérêt régional majeur en tant que réserve en eau stratégique. Les prélèvements actuels couvrent des besoins agricoles, industriels et d'alimentation en eau potable avec des ouvrages captant principalement la partie supérieure de la craie. L'exploitation future en réponse à des besoins régionaux en eau potable pourrait se concentrer dans les secteurs, dits barrettes, réservés prioritairement à cet effet depuis plus de 50 ans.

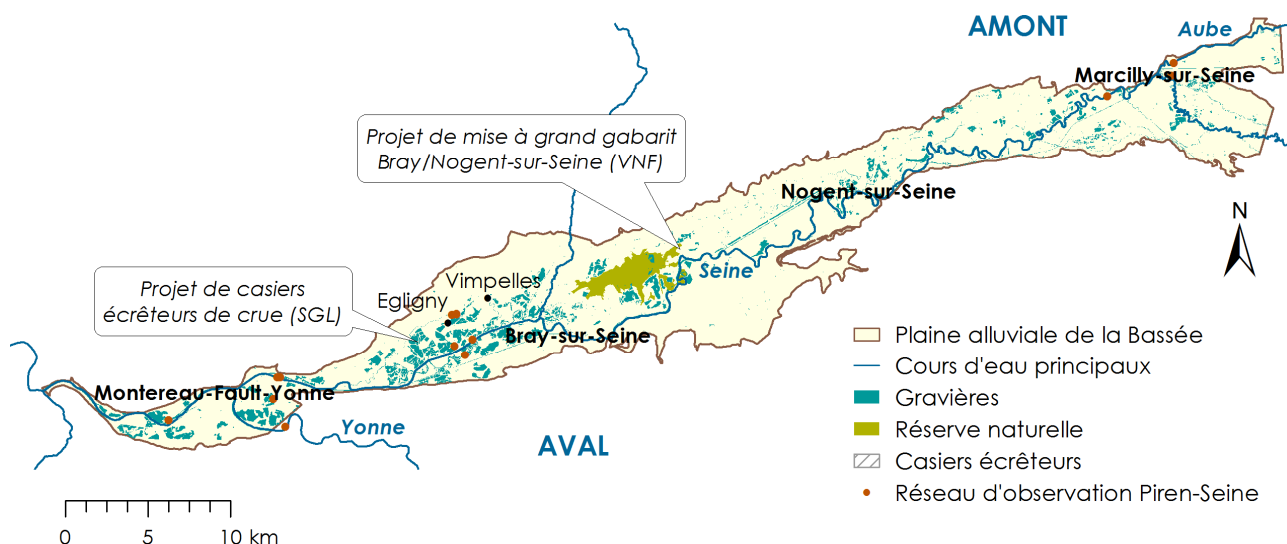


Figure 2. Plaine alluviale de la Bassée : les gravières représentent aujourd'hui environ 10% de sa superficie.

Deux projets d'envergure sont aujourd'hui à l'étude (Figure 2). L'un propose de prolonger la section à grand gabarit du canal de navigation jusqu'à Nogent-sur-Seine (projet Voies Navigables de France) tandis que le second vise à restaurer les capacités de rétention d'eau de la Bassée aval lors des crues (projet Seine Grands Lacs), afin de ralentir le pic de débit de la Seine et d'éviter les concomitances à la confluence avec l'Yonne.

Façonnée par ces aménagements importants, qui courent depuis le XIX^e siècle et se poursuivent à l'heure actuelle, la Bassée est en constante évolution. Le fonctionnement hydrologique de son corridor fluvial en a été altéré et ce, particulièrement à l'aval, où pullulent les gravières.

2 Le module de gravière au sein de la plate-forme EauDyssée

Près de 350 plans d'eau se répartissent dans la plaine, principalement à l'aval, bien que l'extraction de granulats ait tendance à en grignoter petit à petit l'amont (Figure 2). Deux lots de gravières ont été instrumentés et suivis régulièrement au cours de la seconde moitié des années 1990 dans un secteur de Seine-et-Marne proche de la confluence de la Seine et de l'Yonne, à Egligny et Vimpeles, révélant toute la complexité et la diversité de leur fonctionnement hydrogéochimique (Schanen, 1998). Situés au sein du périmètre des futurs casiers écrêteurs de crue, ils sont de nouveau l'objet d'une étude détaillée de leurs caractéristiques hydrodynamiques, dans la zone du casier pilote (projet Seine Grands Lacs, Figure 2). Ce même secteur est traversé par l'un des transects d'observation mis en place dans le cadre du programme actuel PIREN-Seine (Figure 2). Gravières, noue, Vieille Seine et Seine, aquifères des alluvions et de la craie sont suivis à haute fréquence en température et pression depuis deux ans. Les données acquises, couplées à celles des partenaires de notre projet dans la Bassée, permettront d'affiner notre compréhension des échanges entre les différentes unités en jeu au cours de l'année hydrologique. La synthèse de ces mesures locales et leur intégration à l'ensemble de la plaine alluviale doit s'appuyer sur un modèle. L'approche par modélisation offre la possibilité de quantifier les flux entre gravières et aquifères à l'échelle globale. Le développement du modèle Bassée incluant les gravières en tant qu'annexes hydrauliques fait l'objet de ce présent rapport.

Il s'appuie sur l'existant, à savoir une chaîne de modèles emboîtés, du bassin de la Seine à la plaine alluviale, construite selon l'architecture de la plate-forme EauDyssée. Cet outil de modélisation distribuée des hydrosystèmes continentaux (e.g., Flipo et al., 2012) couple des modules spécifiques pour simuler les transferts d'eau au sein et entre les différents réservoirs du cycle de l'eau, depuis la surface jusqu'au compartiment souterrain. Version revisitée du code MODCOU (Ledoux et al., 1984), également connue sous le nom de CAWAQS (Flipo et al., 2007), la plate-forme se divise conceptuellement en trois composantes : surface, zones non saturée et saturée. Ses modules autonomes calculent le bilan hydrologique à l'aide de

fonctions de production, les transferts des lames d'eau ruisselées sur les versants par isochronisme, les écoulements en rivières selon le schéma de Muskingum, le transfert en zone non saturée via une cascade de réservoirs, les échanges entre rivières et nappes selon la loi de Darcy et l'écoulement souterrain en zone saturée à l'aide de l'équation de la diffusivité (Figure 3). Dans l'objectif de ce travail, il lui a été adjoint un module de simulation des gravières, dénommé LIBWET (Wang et al., 2016).

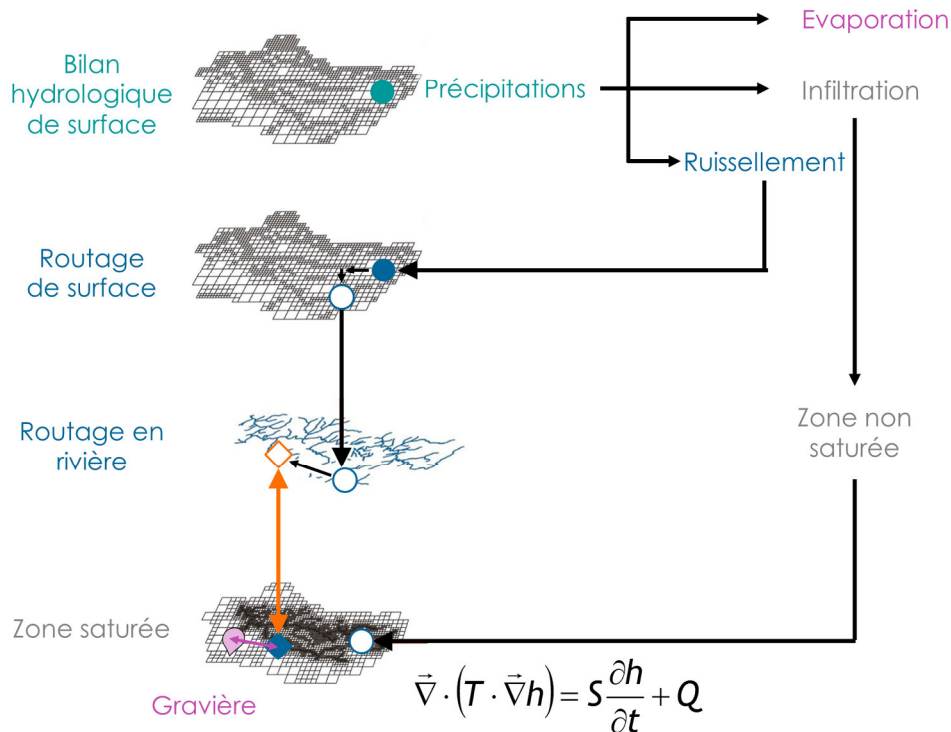
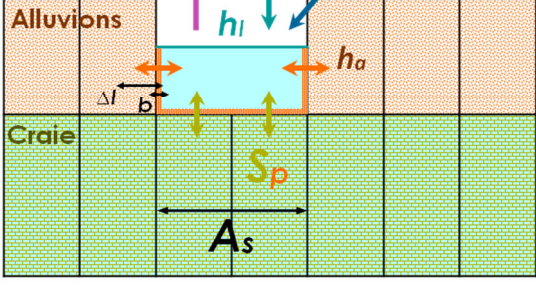


Figure 3. Principe de fonctionnement général de la plate-forme de modélisation des hydrosystèmes EauDyssée.

LIBWET a pour tâche de calculer les échanges entre une gravière et les aquifères adjacents, aussi bien latéraux via ses berges que verticaux, à travers son fond. Les flux d'eau échangés par unité de surface à travers une interface gravière-aquifère sont fonction du gradient de charge entre les deux unités et d'une conductance spécifique équivalente, moyenne harmonique des conductances spécifiques de l'aquifère et du lit de la gravière. Les flux échangés à travers chaque interface entre la gravière et l'aquifère sont sommés et participent au bilan hydrologique de la gravière. Ce bilan, réalisé à chaque pas de temps, tient également compte des pertes ou apports d'eau liés au ruissellement, aux précipitations, à l'évaporation calculée selon la formule de Penman (1956) pour les surfaces d'eau libre (Tableau 1). LIBWET fonctionne aussi bien en régime permanent que transitoire. Les performances numériques du module de gravière ont été évaluées par comparaison au module de lac LAK de MODFLOW (Merritt et Konikow, 2000) sur un cas étalon représentatif du système Bassée, décrit dans Wang (2016). Les différences de charge calculée par les deux codes utilisant leur module de lac respectif sont de l'ordre de grandeur des différences de charge simulée entre les deux codes en l'absence de gravière. LIBWET fait même preuve de meilleures compétences que LAK en matière de convergence numérique pour une taille de pas de temps décroissante. 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.

Tableau 1. Interactions gravière/aquifères décrites par le module LIBWET de la plateforme EauDyssée. Où Q débit [$L^3.T^{-1}$], K_a et K_l conductivités hydrauliques de l'aquifère et du lit ou des berges de la gravière respectivement [$L.T^{-1}$], A section perpendiculaire à l'écoulement [L^2], h_a charge hydraulique de l'aquifère [L], h_l cote de la gravière [L], Δl moitié de la taille d'une maille aquifère dans le sens de l'écoulement [L], b épaisseur du lit ou des berges de la gravière [L], C conductance spécifique équivalente [T^{-1}], S_p flux total échangé entre la gravière et les aquifères [$L^3.T^{-1}$], M le nombre d'interfaces gravière-aquifère, n indice du pas de temps, Δt pas de temps [T], P précipitations [$L^3.T^{-1}$], E évaporation [$L^3.T^{-1}$], R ruissellement [$L^3.T^{-1}$], A_s surface au sol de la gravière [L^2]. D'après Wang (2016).

	Flux traversant une interface nappe-gravière
	$Q = CA(h_a - h_l)$ où $\frac{1}{C} = \frac{b}{K_l} + \frac{\Delta l}{K_a}$
	Somme des échanges individuels
	$S_p = \sum_m^M C_m (h_{am}^n - h_l^{n-1})$
	Bilan hydrologique de la gravière
	$h_l^n = h_l^{n-1} + \Delta t \frac{P - E + R + S_p}{A_s}$

3 Quantification des impacts hydrodynamiques des gravières

3.1 Impacts hydrodynamiques des gravières

La mise en place d'un plan d'eau artificiel, en lieu et place du milieu poreux, altère localement la piézométrie de l'aquifère et perturbe les chemins d'écoulement à ses abords. En tant que surface équipotentielle, la gravière modifie le gradient hydraulique initial (Figure 4.a) par un abaissement de la surface piézométrique à l'amont et une élévation à l'aval (Figure 4.b). Ce cas de figure n'est cependant pas courant. Le colmatage lié à son vieillissement et le remblayage des berges de la gravière font de celle-ci un obstacle à contourner et se traduisent par une mise en charge amont et un fort rabattement aval (Figure 4.c). L'amplitude de ces perturbations est donc conditionnée par le degré de colmatage, lui-même dépendant de l'âge du plan d'eau mais aussi du mode d'exploitation et des conditions de remise en état, et est également fonction de son orientation par rapport à la direction de l'écoulement souterrain, des profondeurs, taille et forme de l'étendue d'eau (e.g., Gueho, 2014).

Outre les modifications piézométriques, l'influence des gravières se fera sentir sur les débits échangés entre la nappe et les cours d'eau et sur l'état des réserves en eau de la plaine, que conditionnent les caractéristiques des aquifères alluvial et régional et l'état de colmatage qui contribue à limiter les échanges entre nappe et gravière. A l'échelle annuelle, l'évaporation directe sur le plan d'eau, supérieure aux précipitations, est compensée par le flux issu de la nappe, soit un déficit d'alimentation pour cette dernière (Figure 4.b). D'un point de vue transitoire, l'introduction d'une gravière atténue les fluctuations de la nappe et joue un rôle tampon. Au cours de l'année, les séquences d'évaporation et de recharge sur la gravière sont aussi sources d'oscillations, propagées à la nappe (Ferrand, 1995).

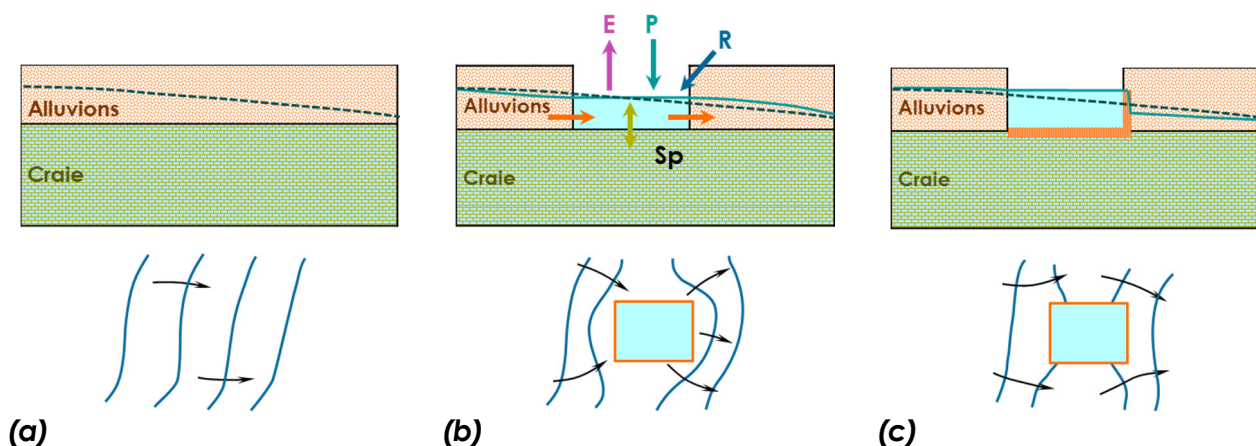


Figure 4. Schématisation en coupe (haut) et en carte (bas) de l'impact potentiel des gravières sur la piézométrie de l'aquifère adjacent, ici des alluvions. (a) Piézométrie initiale, (b) modifiée par l'introduction d'une gravière, (c) dont les berges aval et le fond sont colmatés. D'après Peaudecerf (1975).

Le programme PIREN-Seine a déjà consacré un volet spécifique aux carrières alluvionnaires de la Bassée (Schanen, 1998 ; Fustec et al., 2001). L'étude a porté sur un ensemble de 9 gravières de la Bassée aval, d'âge et d'aménagement différents, instrumentées d'échelles limnimétriques, d'un bac à évaporation et d'un réseau de 16 piézomètres à proximité. L'analyse concernait aussi bien les conséquences hydrodynamiques de leur présence sur les échanges entre gravières, nappe et Seine en aval que le transfert d'éléments nutritifs de la nappe à la gravière. Le premier point a mis en évidence un colmatage partiel, plus particulièrement sur les berges aval et lié au remblaiement. Une quantification des transmissivités aux interfaces a pu être proposée à l'aide d'un modèle d'optimisation hydrologique (Schanen et al., 1998). Elles s'échelonnent entre $4 \cdot 10^{-7}$ et $8,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Sur la base de ces estimations, une conductance spécifique moyenne de $4,25 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a été retenue pour toute interface gravière-aquifère dans le cadre de ce travail. Cependant, la réduction des échanges entre nappes et plans d'eau est d'autant plus forte que ceux-ci sont anciens et colmatés ou qu'ils ont servi de bassin de décantation recevant des fines de lavage. On recommande de fait aujourd'hui le maintien de portions de berges sans remblayage

à l'issue de l'exploitation pour éviter le fort rabattement aval. Le second phénomène mis en évidence est le déficit d'alimentation de la nappe lié à l'évaporation s'exerçant sur les étendues d'eau libre, que ne compense pas entièrement la recharge issue de la nappe de la craie sous-jacente. Les années sèches peuvent ainsi avoir une réelle incidence sur le niveau de la nappe, a fortiori si elles sont consécutives. A la suite de ces travaux, notre présente étude est un premier pas vers la synthèse de ces observations à l'échelle de la plaine, par le biais d'une modélisation numérique distribuée décrivant le complexe gravières-nappe alluviale-nappe de la craie, emboîté dans le bassin de la Seine.

3.2 Modèle mathématique de la plaine de la Bassée incluant les gravières

L'architecture globale du modèle retenu repose sur le schéma suivant (Figure 5) : un modèle incluant craie et alluvions est développé à l'échelle locale de la plaine, qui tire l'hétérogénéité de ses paramètres hydrodynamique d'une procédure de calibration inverse et ses conditions aux limites, d'un modèle régional au maillage plus grossier construit sur l'ensemble du bassin de la Seine (Labarthe, 2016). Le modèle s'inscrit ainsi dans la lignée des récents travaux qui ont visé à décrire la dynamique des relations entre le réseau hydrographique, sa plaine alluviale et son aquifère régional, sur l'exemple de la Bassée, via une stratégie de modélisation multi-échelle (Labarthe et Flipo, 2016). Il en diffère en ceci que seule est ici considérée l'échelle locale mais en adjoignant aux alluvions la formation de craie sous-jacente et les gravières. Par souci de simplicité, on considère en effet que le fond de chaque gravière atteint le substratum, générant des échanges verticaux directs entre le plan d'eau et l'aquifère de la craie (Tableau 1).

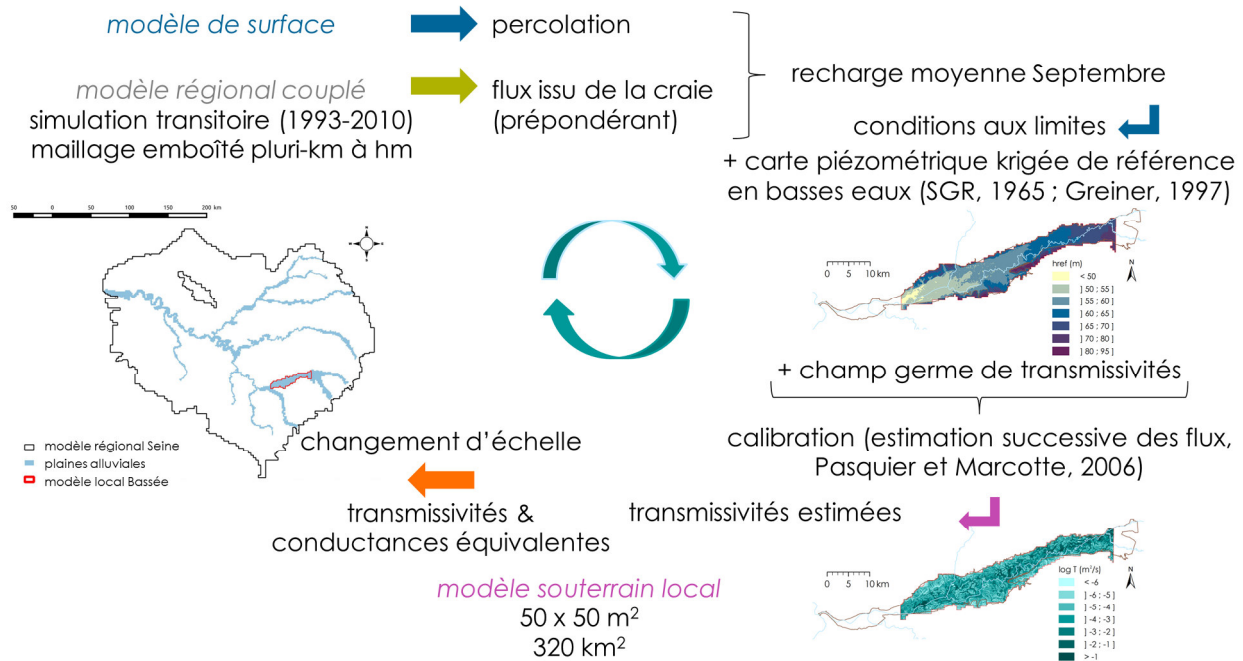


Figure 5. Stratégie de modélisation multi-échelle : du bassin de la Seine à la plaine de la Bassée. D'après Labarthe (2016).

A l'échelle régionale du bassin de la Seine, sont calculés : le bilan hydrologique de surface par unité de sol selon une approche conceptuelle semi-distribuée, les hauteurs d'eau dans le réseau hydrographique et les écoulements souterrains (Figure 3). Le compartiment souterrain englobe 7 formations aquifères, des alluvions à la craie du Crétacé supérieur, séparées par des épontes semi-perméables. A l'échelle locale de la plaine de la Bassée, l'alimentation est double : via la percolation des eaux précipitées et infiltrées, calculée par le modèle de surface et issue de la craie, en chaque limite principale du modèle. Le modèle local est en effet emboîté dans le modèle régional (Figure 6.a). La hauteur d'eau en rivière y est supposée fixe et est imposée sur les cours d'eau majeurs. Les propriétés hydrodynamiques des alluvions à l'échelle locale dérivent d'un processus de calibration par estimation successive des flux (Labarthe, 2016 d'après Pasquier et Marcotte, 2016). Cette méthode d'inversion s'appuie sur une information piézométrique de référence, ici une carte krigée des basses eaux et tient compte des conditions aux limites de flux imposées par le modèle régional. Le champ de transmissivités qui en résulte est une image de l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques de la plaine alluviale (Figure 5).

L'incidence hydrodynamique des gravières est évaluée en introduisant près de 350 plans d'eau dans le modèle local (Figure 6.a), gravières de petite taille et concentrées principalement à l'aval. Une simulation transitoire est alors conduite à l'échelle locale sur près de deux décades (1993-2010), ainsi qu'une simulation de référence en régime permanent. De même que le bilan hydrologique du modèle régional a été établi sur la base des données météorologiques journalières issues des réanalyses SAFRAN (Vidal et al., 2010), les échanges de chaque gravière avec l'atmosphère le sont également à partir de ces données. Le ruissellement direct vers les plans d'eau est ici considéré comme nul, la topographie étant particulièrement plate à leurs abords et les exploitations aménagées de façon à les protéger des intrusions d'eaux de surface. L'évaporation est le terme le plus délicat à évaluer. La formule originale de Penman (1956) a été ici retenue, bien qu'elle ne soit en principe recommandée que pour les plans d'eau de profondeur inférieure à 2 m (McMahon et al., 2013). La comparaison à d'autres méthodes d'estimation de l'évaporation, peut-être via la réimplantation d'un bac à évaporation dans une gravière de la Bassée, pourrait être envisagée à terme.

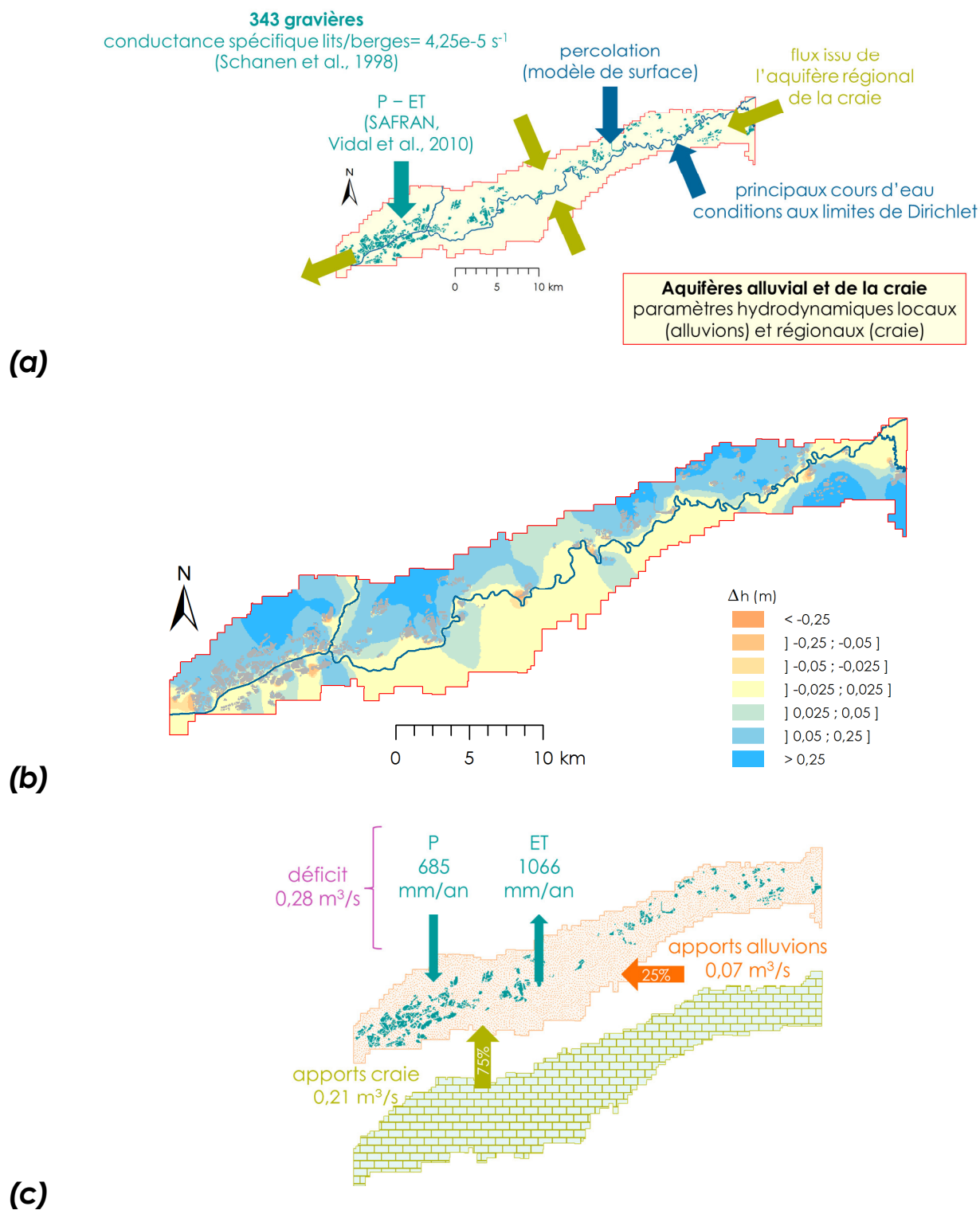


Figure 6. Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée.
(a) Schéma de principe du modèle souterrain local, incluant aquifères des alluvions et de la craie et près de 350 gravières.

(b) Impact piézométrique des gravières en régime permanent de l'ordre de 0,1 m.

$$\Delta h = h_{0\text{gravière}} - h_{\text{gravières}}$$

(c) Bilan hydrologique des gravières (1995-2010).

La Figure 6.b présente une carte des différences de charge hydraulique calculée pour une situation moyenne représentée par le régime permanent sur la période d'étude, entre une simulation sans gravières et une simulation les prenant en compte, à recharge égale. Il apparaît une baisse piézométrique attendue, liée à l'introduction des gravières, qui s'étend à l'amont hydraulique de ces dernières. Les différences sont cependant en moyenne de faible amplitude, de l'ordre de 10 centimètres. Elles se propagent jusqu'aux limites de la plaine et concernent tout autant l'aval de la Bassée que l'amont, principalement en rive droite. Cette baisse est à mettre ici en relation avec le déficit d'alimentation lié à l'évaporation sur les plans d'eau, phénomène déjà mis en évidence sur la Bassée (Schanen, 1998). Le bilan hydrologique d'ensemble des gravières de la Bassée, réalisé sur quinze années (1995-2010) en régime transitoire, permet de quantifier ces pertes, d'un montant de $0,28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 6.c). Elles sont compensées à hauteur de 75% par l'aquifère de la craie, le quart restant étant issu des alluvions. La contribution de l'aquifère de la craie à l'alimentation des gravières est à mettre en regard de l'estimation des flux moyens exfiltrés par le modèle régional, de l'ordre de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Labarthe et Flipo, 2016), soulignant l'importance du soutien de l'aquifère régional. Les valeurs moyennes obtenues sur la période d'étude sont proches de celles obtenues par la simulation équivalente en régime permanent.

Si le bilan s'équilibre d'une année à l'autre sur la période d'étude, les situations hydrologiques rencontrées sont néanmoins contrastées. Lors des années hydrologiques sèches, telles que 1995-1996 et 2005-2006, les aquifères sont très sollicités, avec une hausse notable de leur contribution par rapport au flux moyen, en particulier les alluvions dont les apports augmentent de près du double et de plus de 50% sur ces deux années respectivement. En années hydrologiques plus humides en revanche, par exemple de 1998 à 2001, le flux net entrant dans les gravières devient principalement issu de l'aquifère de la craie, le sens moyen annuel des échanges s'inversant même, de la gravière à la nappe alluviale pour l'année la plus humide, 2000-2001. A l'échelle de l'année moyenne interannuelle (Figure 7), la saison estivale est particulièrement propice au drainage des aquifères par les gravières. Ce drainage se poursuit en automne, au début de l'année hydrologique, contribuant au stockage d'eau dans les gravières. Au cœur de l'hiver, à la faveur de pluies redevenues efficaces, les gravières sont en mesure d'alimenter les aquifères. Consécutivement, elles perdent en volume dès le printemps. A noter que ce schéma de fonctionnement, tel qu'il est modélisé, ne prend pas en compte les variations de la cote de la Seine, qui influencent pourtant nettement l'aquifère des alluvions et probablement aussi les gravières, notamment en période de montée de crue, lorsque le sens des échanges nappe-rivière s'inverse (Labarthe et Flipo, 2016).

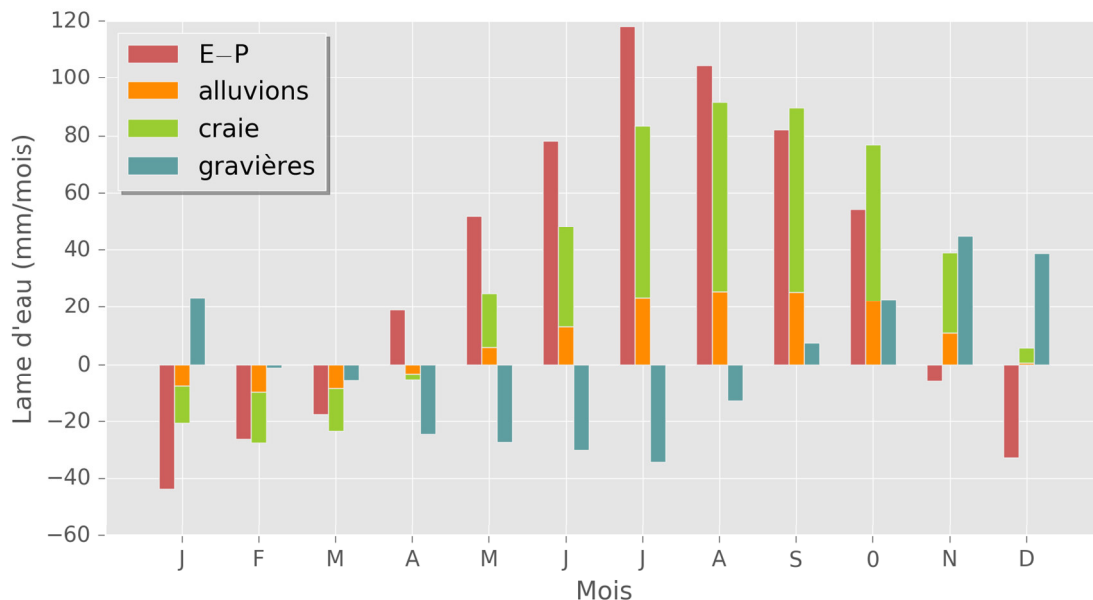


Figure 7. Bilan hydrologique des gravières de la Bassée (1995-2010) : moyennes mensuelles interannuelles exprimées en lame d'eau. Sont représentés : la différence entre évaporation et précipitations (E-P), les apports nets issus des nappes des alluvions et de la craie, les variations de stock dans l'ensemble des gravières.

Ces résultats viennent corroborer les conclusions généralement tirées de l'étude du bilan hydrologique sur les plans d'eau de faible extension et profondeur, qu'ils soient ou non artificiels. On citera notamment le cas de la vallée du Paraíba au sud-est du Brésil, où la multiplication des gravières depuis les 30 dernières années (Ronquim et al., 2017) s'accompagne d'une forte augmentation de l'évaporation (Reis et al., 2006). Dans les basses plaines alluviales de la Garonne et de l'Ariège, le déficit généré par la création des plans d'eau représente autour de 6% de la réserve de la nappe alors que ceux-ci n'occupent encore qu'1,3% de la superficie de la zone d'étude. Essentiellement liées à l'évaporation, les pertes d'alimentation sont également imputées à la mobilisation de la nappe lors de l'extraction des granulats dans les exploitations en exercice et à une baisse de l'infiltration due à l'absence de recharge de la nappe au niveau des plans d'eau (Saplaïroles et al., 2007).

L'évaporation s'exerçant sur les étendues d'eau libre est donc un puits pour le système hydrologique et s'avère en général plus élevée que l'évapotranspiration réelle de la même zone avant extraction des granulats, bien que cela dépende des conditions initiales d'occupation du sol. L'augmentation de ce type de surface en eau, dans un contexte de changement climatique, devrait donc amplifier le phénomène (Mollema et Antonellini, 2016). Malgré leur petite taille, les gravières sont une composante non négligeable de l'évaporation directe de l'eau depuis les lacs et réservoirs artificiels, qu'il convient de répertorier, y compris à une échelle plus globale.

4 Conclusions et perspectives

L'utilisation d'énormes quantités de sables et graviers dans le monde actuel conduit à la prolifération de lacs artificiels, objets récents du paysage encore peu étudiés sur le long terme. Ils occupent des plaines alluviales qui sont des zones sensibles du territoire, associées à de nombreux enjeux d'aménagement et zones humides fragiles. La création d'étendues d'eau libre, en mettant à nu la nappe, contribue à modifier le fonctionnement hydrologique du corridor fluvial. La mise en œuvre d'une modélisation numérique à l'échelle de la Bassée en val de Seine prenant en compte les quelques 350 gravières qui peuplent la plaine nous a permis d'en quantifier les principales conséquences hydrodynamiques. Une légère baisse piézométrique et des pertes évaporatoires conséquentes sont simulées, en accord avec les impacts majeurs décrits dans la littérature. On montre l'importance de considérer l'emboîtement de la plaine alluviale dans son système hydrogéologique régional, le déficit d'alimentation lié à l'évaporation sur les étendues d'eau étant ici principalement compensé par les flux provenant de l'aquifère régional de la craie. Cette première étape de modélisation doit être poursuivie dans plusieurs voies.

Une représentation plus dynamique des rivières dans le modèle local devrait permettre de mesurer dans quelle mesure les échanges entre nappes et rivières sont affectés par l'existence de gravières dans la plaine. Les résultats de la modélisation numérique conduite par Bessière et al. (2013) en Ariège, qui prend en compte gravières actuelles et projets d'extension des surfaces en eau, font état d'une réduction des apports de la nappe alluviale aux cours d'eau. Entre nappes et gravières, les échanges sont contrôlés aux interfaces par la perméabilité des berges et du lit. Avec l'âge, celle-ci diminue au gré du colmatage, principalement au fond et à l'aval hydraulique et tend à isoler les gravières de la plaine. Cette variabilité spatiale de la conductance aux limites des gravières pourrait être prise en compte dans le modèle, à l'aide d'un indicateur de l'âge fourni par exemple par leur couleur, de turquoise pour les plus récentes à vert foncé pour les plus anciennes. De façon plus générale, une analyse de sensibilité aux principaux paramètres hydrodynamiques du modèle est prévue, qui viendront compléter utilement des comparaisons modèle-données s'appuyant sur le dispositif de surveillance de la plaine déployé dans le cadre de ce programme. Ces quelques points de contrôle seront utiles pour la vérification du schéma de fonctionnement proposé et pour en préciser localement la dynamique. Ils ne permettront cependant pas de résumer la diversité des gravières de la Bassée, telle qu'elle a pu être soulignée par Schanen (1998) sur un échantillon de seulement quelques plans d'eau. Seule l'observation satellitaire offrira une vision d'ensemble de la plaine et de l'état de sa ressource en eau. Les futures campagnes SWOT, à l'intégration desquelles nous travaillons déjà, sont en ce sens très prometteuses.

Bibliographie

- Backouche I, Eustache S (2003). Morillon Corvol. Une entreprise née de la Seine. Textuel, Paris, 192 p.
- Baron P, 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, 51 p.
- Bessière H, Klinka T, Saplaïroles 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, 75 p.
- Deleplanque B (2016) Caractérisation des hétérogénéités sédimentaires d'une plaine alluviale : Exemple de l'évolution de la Seine supérieure depuis le dernier maximum glaciaire. Thèse de Doctorat, Université Paris Sciences & Lettres, Paris, 275 p.
- Ferrand A (1995) Impact de la création d'un plan d'eau sur les fluctuations d'une nappe. Rapport ANTEA A 04680, 40 p.
- Flipo N, Even S, Poulin M, Théry S, Ledoux E (2007) Modelling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CaWaQS. *Sciences of Total Environment* 375: 69–79.
- Flipo N, Monteil C, Poulin M, de Fouquet C, Krimissa M (2012) Hybrid fitting of a hydrosystem model: Long-term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research* 48: W05509.
- Fustec E, Bendjoudi H, Gaillard S, Weng P, Boyer F, Boët P, Schanen O, Crogenec S, Billen G (2001) Fonctionnement du Territoire « Bassée ». Rapport PIREN-Seine, 58 p.
- 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, 281 p.
- Gueho Y (2014) Les impacts hydrodynamiques des gravières sur la nappe alluviale de la Bassée. Rapport de Master 1, Université Pierre et Marie Curie, 50 p.
- Hagemeyer M, Klaphake A (2007) Restoring floodplains on the River Seine: combining flood prevention with regional development. In: *Restoring Floodplains in Europe: policy contexts and project experiences*, Eds Moss T, Monstadt J. IWA Publishing, Londres.
- Kattner E, Schwarz D, Maier G (2000) Eutrophication of gravel pit lakes which are situated in close vicinity to the River Donau: water and nutrient transport. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters* 30: 261–270.
- 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, 316 p.
- Labarthe B, Flipo N (2016) Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale et leur aquifère régional. Rapport PIREN-Seine, 23 p.
- Lainé L, Barles S, Carré C (2016) Petites villes en décroissance et leurs services d'eau : Quelles reconfigurations ? Une appréhension dans les territoires de l'amont du bassin de la Seine. Rapport PIREN-Seine, 85 p.
- Ledoux E, Girard G, Villeneuve J-P (1984) Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche* 1/2: 101–120.
- McMahon T, Peel M, Lowe L, Srikanthan R, McVicar T (2013) Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 1331–1363.
- Mégrien C (1979) Hydrogéologie du centre du bassin de Paris : contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. Mémoires du BRGM 98, 532 p.
- Merritt M, Konikow L (2000) Documentation of a computer program to simulate lake-aquifer interaction using the MODFLOW ground-water flow model and the MOC3D solute-transport model. US Department of the Interior, US Geological Survey 4167, 153 p.

- Mollema P, Stuyfzand P, Juhasz-Holterman M, Van Diepenbeek P, Antonellini M (2015) Metal accumulation in an artificially recharged gravel pit lake used for drinking water supply. *Journal of Geochemical Exploration* 150: 35–51.
- Mollema P, Antonellini M (2016) Water and (bio)chemical cycling in gravel pit lakes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews* 159: 247–270.
- Pasquier P, Marcotte D (2006) Steady- and transient-state inversion in hydrogeology by successive flux estimation. *Advances in Water Resources* 29: 1934–1952.
- Peaudecerf P (1975) Effet des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines. *La Houille Blanche* 2/3: 133–140.
- Penman H (1956) Estimating evaporation. *Eos Trans. AGU* 37: 43–50.
- Reis B, Batista G, Targa M, Catelani C (2006) Influência das cavas de extração de areia no balanço hídrico do vale do Paraíba do Sul. *Rev. Esc. Minas* 59: 391–396.
- Ronquim C, Cordeiro G, de Amorim M, Teixeira A, Leivas J, Galdino S (2017) Competition between agricultural, urban, and sand-mining areas at the Paraíba do Sul basin in southeastern Brazil. In: *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIX*, International Society for Optics and Photonics.
- Saplaïroles M, Desprats J-F, Delpont G, Bourguignon A (2007) Evaluation de l'impact sur la ressource en eau souterraine de l'exploitation de granulats dans le milieu alluvionnaire de la Garonne (31). Rapport BRGM RP-55673-FR, 48 p.
- Schanen O (1998) 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, 377 p.
- Schanen O, Bendjoudi H, Levassor A, Fustec E (1998). Quantification des écoulements nappe-gravières, en zone alluviale, par optimisation du bilan hydrologique. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes* 326: 107–112.
- Service géologique régional du bassin de Paris (1965) Possibilités aquifères des alluvions du val de Seine entre Nogent-s-Seine et Montereau. Rapport BRGM, 1065 p.
- Steinmann R, Lestel L, Dumont A (2016) Approche géohistorique de la Seine dans la Bassée durant les deux derniers siècles. Rapport PIREN-Seine, 31 p.
- UNICEM, UNPG (2017) L'industrie française des granulats en 2015. 6 p.
- Vernoux J-F, Schomburgk S, Hanot F, Donsimoni M (2003) Projet d'aménagement du site de la Bassée - analyse des travaux de reconnaissance réalisés en 2002-2003. Rapport BRGM RP-52712-FR, 37 p.
- Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyroux J-M (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30: 1627–1644.
- Wang S (2016) Création d'un module de simulation des interactions gravières-aquifères et application à la plaine alluviale de la Bassée. Mémoire de Master 2, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 50 p.
- Wang S, Jost A, Labarthe B, Flipo N (2016) Création du module Libwet de simulation des interactions gravières-aquifères. Rapport PIREN-Seine, 12 p.
- Weilhartner A, Muellegger C, Kainz M, Mathieu F, Hofmann T, Battin T (2012) Gravel pit lake ecosystems reduce nitrate and phosphate concentrations in the outflowing groundwater. *Science of the total environment* 420: 222–228.