



Stage de fin de première année de Master

Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)

Sujet : Les impacts hydrodynamiques des
gravières sur la nappe alluviale de la Bassée.

Etudiant : Yann Gueho, M1 ECH, UPMC.

Responsable de stage : Anne Jost, UMR 7619 Metis, UPMC.

Rapporteur : Nicolas Lemoine, UMR 7619 Metis, UPMC.

Durée du stage : du 27/04/14 au 28/07/14.

Résumé

Les gravières sont, depuis les années 1960, en pleine expansion en France, particulièrement dans la plaine de la Bassée (Vallée de la Seine). Dans cette plaine existe une nappe alluviale (nappe libre), sensible aux changements brutaux induits par l'excavation de granulats dans les premiers mètres de la plaine.

L'impact hydrodynamique de ces gravières n'a que peu été étudié, c'est pourquoi nous proposons de caractériser cet impact à l'aide du modèle de simulation des écoulements souterrains MODFLOW, en essayant de se rapprocher du cas d'étude de la plaine de la Bassée.

Pour ce faire, il a été indispensable d'acquérir des connaissances tirées de la littérature pour comprendre les phénomènes liés aux gravières, en particulier leur colmatage, puis nous avons effectué quelques tests, à partir d'un modèle simple, sur la manière de représenter ces gravières.

Un modèle plus complexe a ensuite été créé, bien qu'étant encore une version préliminaire, pour simuler l'effet des gravières au sein de la plaine de la Bassée. Le manque de données constitue cependant un frein à l'amélioration de ce modèle.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à ma responsable de stage : Anne Jost, qui a proposé ce sujet de stage. Merci à elle pour sa disponibilité, son encadrement, sa pédagogie, sa rapidité à corriger mes écrits, sa patience (j'en oublie sûrement)...

Je remercie par la même occasion les personnes que j'ai pu côtoyer dans le cadre de ce stage : Amer Mouhri, Baptiste Labarthe et Nicolas Flipo pour m'avoir aidé, guidé et s'être montrés disponibles avec moi.

Un grand merci à Vincent Thieu et ses tomates, de m'avoir supporté et pour son humour.

Je tiens à remercier l'équipe du laboratoire Métis de nous avoir accueillis, avec les autres stagiaires de M1, au sein du couloir 56-55 et d'avoir fait preuve de jovialité et de sympathie durant ce stage.

Une petite dédicace aux stagiaires, avec qui j'ai passé de bons moments : Marine « Tarte aux citrons », Tao « Speculos », Ahamada et Michael « Coupe du monde », Véro « le python-cisson », Camille « the descent », Morgan « choc'cake'master » et à celle qui se reconnaîtra ici, que je soutiens et qui me soutient.

Et pour terminer, merci à tous ceux qui liront ce rapport et apporteront quelconque critique, positive ou négative, permettant son amélioration.

Sommaire

Résumé	2
Remerciements.....	2
Sommaire	3
Liste des figures.....	4
Introduction	5
Partie I : Etat des connaissances actuelle et recherches bibliographiques	6
A/ Fonctionnement général des gravières.....	6
B/ Cas d'étude : la Bassée.....	11
Partie II : Modélisation et représentation des gravières	17
A/Le modèle MODFLOW et la représentation des gravières	17
B/Le modèle simple	19
Partie III : Modélisation de la Bassée	24
A/ Zone d'étude.....	24
B/ Construction du modèle	25
C/ Résultats de simulation	26
Conclusion	30
Bibliographie	31
Annexes.....	33

Liste des figures

Figure 1 : Photo de gravière en cours de creusement.	6
Figure 2 : Photo de gravière après exploitation.	6
Figure 3 : Impact hydrodynamique d'une gravière non colmatée.	8
Figure 4 : Impact hydrodynamique d'une gravière colmatée.	10
Figure 5 : Schématisation du système aquifère à l'échelle d'une gravière.	11
Figure 6 : Localisation géographique de la Bassée.	12
Figure 7 : Situation actuelle de la plaine de la Bassée.	13
Figure 8 : Carte géologique de la région de la Bassée.	14
Figure 9 : Evolution de la surface piézométrique pour trois états : a) conditions normales, b) conditions d'inondation et c) en été.	15
Figure 10 : Piézométrie de la nappe en rive droite de la Seine.	16
Figure 11 : Schéma explicatif du calcul du débit à l'interface rivière/aquifère.	19
Figure 12 : Coupe ouest-est du modèle simple après première simulation.	20
Figure 13 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone à flux imposé.	21
Figure 14 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone type rivière.	22
Figure 15 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone à flux imposé et barrières imperméables.	23
Figure 16 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone à perméabilité élevée et barrières imperméables.	23
Figure 17 : Contours de la plaine de la Bassée et de la zone d'étude.	24
Figure 18 : Piézométrie de référence.	26
Figure 19 : Piézométrie simulée par le modèle Bassée-2.	27
Figure 20 : Localisation et numérotation des gravières.	28
Figure 21 : Piézométrie simulée par le modèle Bassée-2, en présence de gravières colmatées.	29
Annexes.	33

Introduction

L'intensification de l'exploitation de granulats en France, à partir des années 60, a provoqué une augmentation du nombre de gravières, particulièrement dans région de la Bassée (vallée de la Seine, entre Montereau-Fault-Yonne et Marcilly-sur-Seine). Une gravière est un site d'excavation de matériaux comme le sable ou les graviers, se manifestant par un fossé creusé de quelques mètres de profondeur dont les dimensions varient et peuvent atteindre quelques centaines de mètres de longueur ou de largeur. Le creusement de ces fosses entraîne une mise à nu de la nappe, provoquant de multiples conséquences d'un point de vue hydrogéologique ou biogéochimique.

La Bassée est l'une des rares grandes zones humides encore restantes en France. Les zones humides jouent de multiples rôles et interagissent avec leur environnement. Elles constituent entre autres des habitats pour certaines espèces animales ou végétales, une zone de rétention des polluants et le siège d'échanges multiples avec les différentes eaux (nappe et rivière). Le PIREN-Seine (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine) s'attache à étudier cette zone d'intérêt certain, particulièrement au niveau des échanges nappe/rievière. Dans ce but, la mise en place d'un dispositif de suivi en continu est envisagée afin de mieux comprendre ces phénomènes.

Les gravières, très présentes dans la Bassée, s'intègrent dans leur environnement hydrodynamique avec plus ou moins d'impact. L'étude des gravières s'insère donc dans le projet du PIREN-Seine, faisant partie intégrante de la Bassée et de ses caractéristiques hydrodynamiques.

C'est ainsi dans un objectif de caractérisation des échanges nappe/gravière que s'inscrit le sujet de ce stage. Nous nous sommes donc penchés sur la question suivante : quels sont les impacts hydrodynamiques joués par les gravières sur la plaine alluviale de la Bassée ?

Le raisonnement présenté dans ce rapport s'articule en trois parties distinctes. La première comprendra une synthèse de l'état des connaissances actuelles sur les gravières, d'un point de vue généraliste, législatif et scientifique, en se basant sur des travaux précédemment effectués.

La deuxième partie se basera sur l'approche méthodologique utilisée : principalement la prise en main et la manipulation d'un modèle (MODFLOW) servant à simuler les écoulements souterrains. La création d'un modèle simple y sera décrite, ainsi que les techniques possibles de représentation des gravières dans le logiciel Processing ModFlow.

Pour terminer, l'élaboration d'un modèle représentatif de la plaine de la Bassée sera faite, dans l'optique de pouvoir simuler les changements sur la nappe liés à l'apparition des gravières.

Partie I : Etat des connaissances actuelles et recherches bibliographiques

A/ Fonctionnement général des gravières

1) Généralités sur l'extraction de granulat

Les plaines alluviales sont exploitées depuis plus de 60 ans pour leurs ressources en sables et graviers, aussi appelés granulats. Ces dernières forment la majeure partie (plus de 90%) des matériaux utilisés en France pour la construction, dans le domaine du génie civil et du bâtiment. La forte expansion de cette activité d'exploitation a eu lieu dans les années 70, comptant près de 300 millions de tonnes de granulats produites par an. Les années 50 marquent le début de la production avec 20 millions de tonnes produites par an, tandis qu'aux environs de 2000, cette production atteignait 400 millions de tonnes par an. Actuellement, l'extraction semble s'essouffler un peu, avec 379 millions de tonnes produites par an (354 millions de tonnes extraites et 25 millions de tonnes produites par recyclage) répertoriées en 2011 (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2014).

L'extraction de ces matériaux s'effectue de manière simple, en creusant dans la plaine alluviale, jusqu'à atteindre les niveaux riches en sables et graviers (alluvions anciennes). Les fosses ainsi créées sont appelées des gravières, aussi trouvées sous les noms de ballastières ou sablières. Ces gravières, sans formes particulières, peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de longueur pour plusieurs mètres de profondeur (dépendant de la profondeur des niveaux alluviaux recherchés) comme peuvent en témoigner les figures 1 et 2 ci-dessous.



Figures 1 et 2 : à gauche, gravière en cours de creusement ; à droite, gravière post-exploitation dans la région de la Bassée. (Source : Gueho Y., 2014)

2) Législation

Ainsi, la prise de conscience de la protection de l'environnement, de plus en plus d'actualité, a permis la réalisation et l'application de lois, codes ou arrêtés ministériels visant à améliorer l'insertion et la « vie » des gravières dans l'environnement, dans une optique de respect environnemental. Mimoun (2004) dresse l'inventaire des lois concernant les gravières, que nous résumons ici.

Le code minier est la première législation, datée de 1956, concernant l'encadrement des gravières. Il spécifie que « la mise en exploitation de toute carrière par le propriétaire ou ses ayants droits est subordonnée à une autorisation délivrée par le préfet, après consultation des services ministériels compétents et des collectivités locales. Il en est de même pour l'extension de l'exploitation sur des terrains non visés dans l'autorisation initiale. ». D'autres décrets et lois ont vu le jour depuis la création du code minier, dans un souci environnemental, notamment en obligeant la remise en état du site après la période d'extraction ou l'étude d'impact de la gravière sur l'environnement, en interdisant l'ouverture de gravières dans les lits mineurs des cours d'eau ou dans la zone de mobilité des cours d'eau par exemple.

En 1993, la loi Saumade est mise en place (complétée par quelques décrets en 1994), soumettant les gravières à un régime d'autorisation administrative ainsi qu'à des procédures de contrôle des exploitations. Le rabattement des nappes devient interdit pour l'exploitation des granulats. Les durées d'exploitation des gravières sont limitées à 30 ans (15 ans si la création de la gravière nécessite un défrichement), ce qui rend leurs impacts particulièrement longs, pouvant perdurer après l'exploitation.

La réhabilitation des gravières est donc devenue systématique et obligatoire après la phase d'exploitation. Les matériaux inutilisables et enlevés au sol pendant le creusement sont conservés à proximité de la gravière et servent au remblaiement de celle-ci, lorsque le moment est venu. Ce remblaiement consiste à remettre dans la fosse les matériaux préalablement mis de côté (communément appelés stériles) sur toute l'épaisseur enlevée d'alluvions. Généralement, ce remblai est constitué de terre végétale ainsi que de matériaux inintéressants pour les carriers (argiles et limons, formant les alluvions récentes). De ce fait, le remblai ne va pas du tout faire office de substitution fidèle aux terrains précédents et va posséder des caractéristiques bien différentes des alluvions extraites.

3) Impacts hydrodynamiques des gravières

3.1) Impacts sur la piézométrie

Les impacts des gravières sur l'environnement sont multiples. Plusieurs domaines sont concernés comme l'hydrologie, l'hydrogéologie ou encore la biogéochimie. L'étude de la biogéochimie passe par une bonne compréhension de l'hydrodynamisme et des flux échangés au niveau des interfaces gravière/nappe (Labarthe et al., 2013). Dans le cadre de ce stage, nous nous intéresserons donc principalement aux impacts hydrodynamiques des gravières, donc du domaine de l'hydrogéologie.

Avant toute chose, il est important de noter que les alluvions peuvent former de très bonnes réserves aquifères avec des perméabilités de l'ordre de 1^E-05 à 1^E-03 m/s. En général, la nappe alluviale est considérée comme libre, avec une surface piézométrique à quelques mètres sous la surface topographique. Ainsi, le creusement des gravières, pouvant aller jusqu'à 10 mètres, va permettre la mise à nu de la nappe, ce qui va impliquer de nombreuses conséquences, les plans d'eau faisant partie intégrante des systèmes d'écoulement souterrain (Winter, 1999). Winter & LaBaugh (2003) effectuent des travaux

assez généraux sur les fonctionnements des lacs et zones humides en lien avec les eaux souterraines. Il apparaît que les interactions lac/nappe vont dépendre à la fois des propriétés de l'aquifère, mais aussi de l'interface entre les deux milieux, ce qui peut être étendu aux interactions gravières/nappes. D'une manière générale, l'étendue des modifications induites par un plan d'eau sur la nappe est relativement locale, ne modifiant pas significativement les écoulements plus globaux ou régionaux : le plan d'eau draine la nappe à l'amont et lui en restitue une partie à l'aval.

Peaudecerf (1975) décrit les influences des gravières sur la piézométrie environnante. La création d'une fosse au milieu de la nappe alluviale va former une très grande discontinuité hydraulique : une partie du milieu poreux est retirée et la nappe est mise à nu, ce qui va correspondre à une zone de transmissivité infinie. La piézométrie va donc réagir à cette discontinuité et à cette cote piézométrique horizontale imposée. La figure 3 présente les variations de piézométrie, selon Peaudecerf (1975). Une gravière non colmatée va accroître les écoulements souterrains à sa proximité immédiate. Le niveau horizontal imposé dans la gravière induit un rabattement de la surface piézométrique en amont de la gravière et une mise en charge de celle-ci en aval.

Cependant, dans la nature, ce cas n'est absolument pas commun puisque les gravières vont subir un colmatage, qui va modifier les propriétés hydrodynamiques des berges et du fond de la gravière, non sans conséquences.

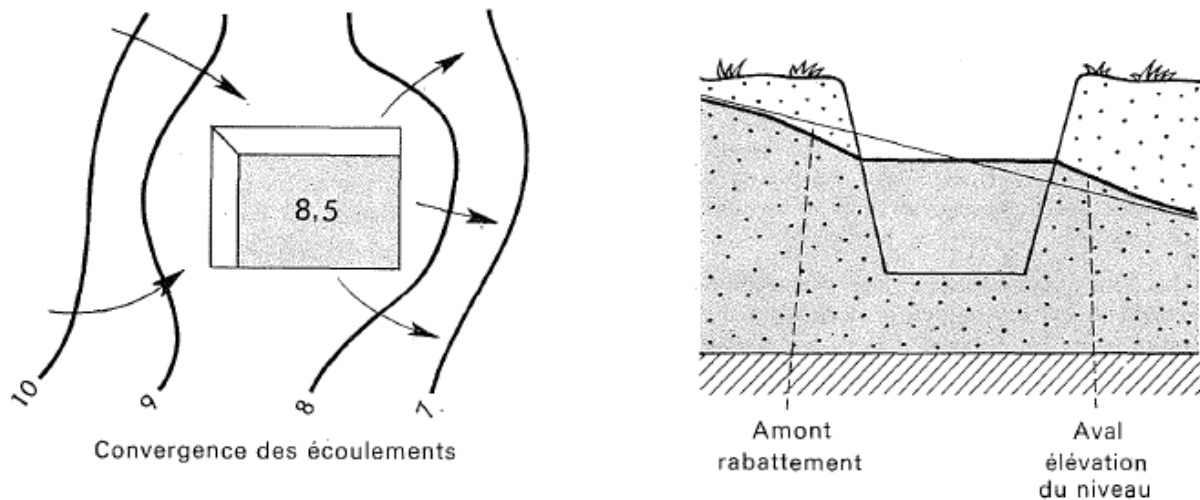


Figure 3 : Impact hydrodynamique d'une gravière non colmatée. (Source : Peaudecerf, 1975)

Le colmatage est un phénomène lié au vieillissement de la gravière, qui va modifier les échanges nappe/gravière. Le niveau des plans d'eau va varier avec les fluctuations du niveau de la nappe, les deux étant étroitement liés. Cependant, il existe un effet tampon joué par les gravières : une variation de grande amplitude du niveau de la nappe n'aura qu'un effet réduit sur le niveau du plan d'eau selon le degré de colmatage des berges (Schanen, 1998).

Peaudecerf, en 1975, mentionne le colmatage comme un phénomène encore mal connu, dont l'étude serait à approfondir. Schanen propose une synthèse de l'état des connaissances sur celui-ci en 1998.

Il existe plusieurs types de colmatage : le colmatage naturel (mécanique, biologique ou chimique) et le colmatage artificiel (lié au remblaiement).

Le colmatage mécanique consiste en le remplissage de la porosité interconnectée du milieu par les matières en suspension ou les débris végétaux (colmatage mécanique interne). Un colmatage externe peut avoir lieu en complément, consistant dans le colmatage en surface du milieu. Le colmatage biologique et physico-chimique implique divers types de colmatage : formation d'argiles gonflantes imperméables, précipitation de carbonates, développements bactériens en tapis ou encore formation de bulles de gaz dans la porosité suite à des réactions chimiques. Tous ces éléments vont rendre difficile l'écoulement des eaux souterraines au sein du milieu et vont donc modifier le trajet de l'eau à proximité. Ce colmatage naturel s'effectue avec le temps. Ainsi, une gravière fraîchement creusée aura un degré de colmatage bien plus faible qu'une gravière en fin d'exploitation. Nous pouvons donc penser que l'âge d'une gravière est un facteur non négligeable dans l'impact hydrodynamique de celle-ci.

De plus, les granulats extraits sont parfois lavés avec de l'eau (nommée eau de lavage), qui va être rejetée dans la gravière. Il s'agit d'une eau potentiellement riche en particules fines, qui va venir augmenter la capacité de colmatage de la gravière en apportant des matières en suspension qui vont pouvoir pénétrer et boucher les pores des berges/fonds.

Le colmatage s'effectue par gravité et selon le sens d'écoulement des eaux souterraines. Ainsi, le fond et les berges aval seront colmatés dans un premier temps puis la généralisation du colmatage à toutes les berges aura lieu. Notons qu'au-delà d'une certaine pente de la berge, le dépôt des particules devient difficile.

Le colmatage artificiel réside dans le remblaiement des gravières. Le remblai est constitué de matériaux beaucoup moins perméables que les alluvions extraites, ce qui va modifier les caractéristiques de l'interface gravière/nappe. Ce colmatage artificiel est effectué à une échelle de temps très courte, ce qui diffère du colmatage naturel progressif qui modifie les caractéristiques de l'interface nappe/gravière lentement dans le temps.

La figure 4 présente les effets d'une gravière colmatée sur la nappe (Peaudecerf, 1975). La première observation frappante par rapport à une gravière non colmatée est la divergence des écoulements à l'amont de la gravière. Le colmatage rend les berges imperméables, ce qui constitue un obstacle aux écoulements. De ce fait, nous observons en amont de la gravière une mise en charge de la nappe tandis qu'à l'aval, un rabattement brutal se produit (voir figure 4).

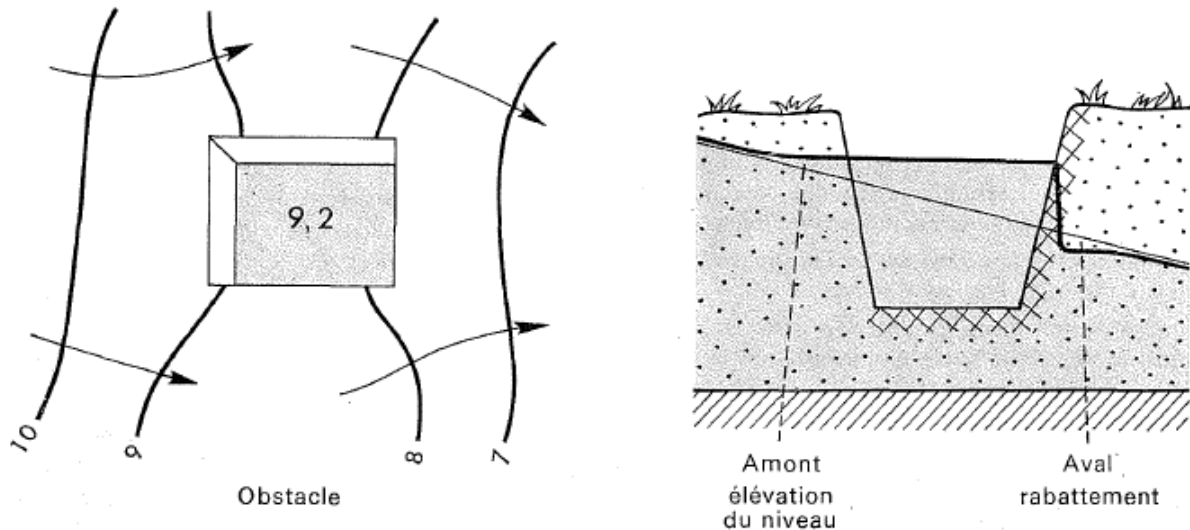


Figure 4 : Impact hydrodynamique d'une gravière colmatée. (Source : Peaudecerf, 1975)

Les eaux vont avoir tendance à contourner les berges et le fond des gravières. De plus, ce colmatage va induire une élévation du niveau d'eau de la gravière, puisqu'elle va fonctionner comme un bassin capacitif, qui va retenir l'eau. Un resserrement des isopièzes (donc augmentation du gradient hydraulique) sera donc observé à l'aval hydraulique des gravières colmatées. Les conductivités hydrauliques des barrières colmatées vont varier selon l'endroit et atteindre des valeurs plus faibles que celles des alluvions.

Les impacts hydrodynamiques des gravières peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de mètres à l'amont comme à l'aval des plans d'eau, distance dépendant de la taille des gravières.

La figure 5 résume les différentes interactions des gravières avec la nappe mais aussi l'atmosphère. Nous pouvons noter que les échanges se font horizontalement, entre la nappe alluviale et la gravière mais aussi verticalement, avec la nappe régionale (craie).

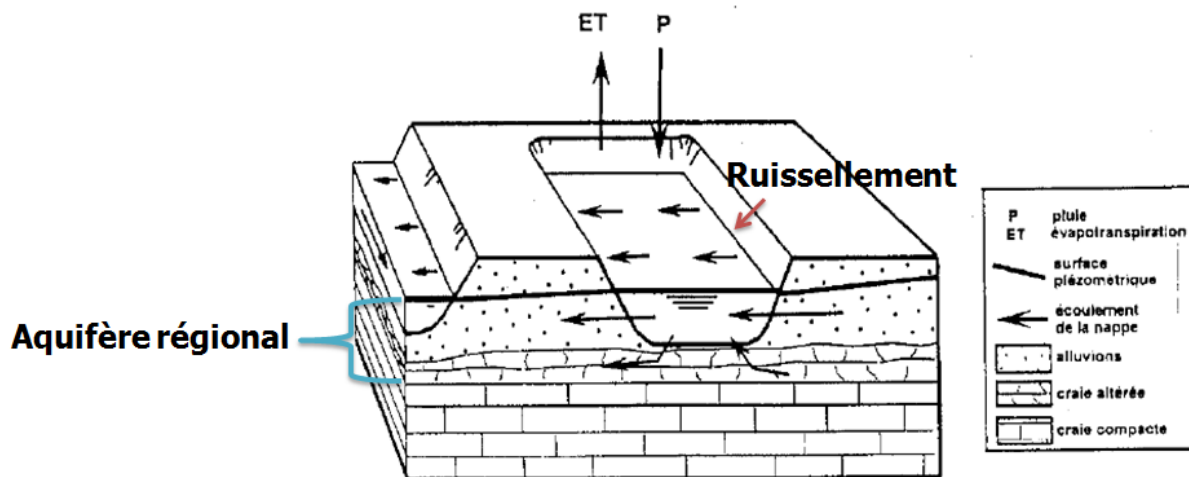


Figure 5 : Schématisation du système aquifère de la Bassée à l'échelle d'une gravière. (Source : Schanen, 1998)

3.2) Echanges gravière/atmosphère

La mise à nu de la nappe dans une gravière va impliquer des processus inexistantes avant le creusement. Tout d'abord, le plan d'eau va être sujet à l'évaporation directe, en fonction des conditions climatiques et de sa géométrie (pour un même volume, une profondeur faible et une grande surface favorisera l'évaporation). Si cette évaporation est plus importante que les précipitations, un déficit d'alimentation de l'aquifère peut apparaître. Une composante évapotranspiratoire est aussi à prendre en compte dans le cas de gravières colonisées par des espèces héliophytes ou hydrophytes, qui vont avoir un besoin particulier en eau.

La gravière est en contact direct avec l'atmosphère, ce qui facilite grandement son alimentation par les précipitations. De plus, le fait que la gravière soit une fosse induit un creux topographique, où le ruissellement des eaux de surface va converger. Ces éléments vont donc apporter ou retirer de l'eau du système, agissant ainsi sur la piézométrie générale aux alentours de la gravière.

De nombreuses interactions ont donc lieu entre les gravières et l'atmosphère, qui vont varier selon plusieurs paramètres comme la géométrie des gravières, les conditions climatiques ou encore la végétalisation des gravières. La figure 5 illustre ces interactions.

B/ Cas d'étude : la Bassée

1) Localisation et contexte morphologique

La plaine de la Bassée se situe entre la confluence de l'Aube avec la Seine et la confluence de la Seine avec l'Yonne, dans le département de la Seine et Marne (77). Elle s'étend donc sur une soixantaine de kilomètres de longueur pour 4 kilomètres de largeur en moyenne (variable, pouvant atteindre 8 km sur certains transects). La figure 6 présente le domaine

d'étude dans son cadre géographique, replacé dans l'ensemble du bassin versant de la Seine.

La plaine alluviale de la Bassée est limitée au nord et au sud par des reliefs représentant des coteaux ou terrasses liés à l'incision de la Seine et ses affluents, entre deux confluences majeures de la Seine : avec l'Aube et avec l'Yonne.

Cette zone du bassin versant de la Seine a été et continue d'être exploitée intensivement pour ses granulats. Schanen, en 1998, évalue l'aire occupée par les gravières à 6% de la surface totale de la Bassée, tandis que Bendjoudi et al. (2002) l'évaluent à 7,6% de la surface totale de la Bassée, ce qui traduit une évolution et intensification de l'exploitation des alluvions dans la plaine alluviale. Sur les 20000 hectares que compte la plaine de la Bassée, 1520 ha sont donc occupés par des gravières, en 2002. La situation actuelle est présentée figure 7.



Figure 6 : Localisation géographique de la Bassée. (Source : Wikipédia, 2014)

2) Enjeux

Il s'agit donc d'une zone relativement petite à l'échelle du bassin versant de la Seine, mais d'un intérêt grandissant notamment pour ses ressources (granulats, alimentation en eau), et à travers plusieurs projets. Entre autres, le projet réalisé par les Voies Navigables de France consiste à étendre le réseau à grand gabarit (navires de 2500 tonnes), déjà existant, jusqu'à Nogent-sur-Seine. Le projet d'aménagement de la Bassée se concentre, quant à lui, sur la création de zones « casiers » dans l'objectif de retenir les eaux de la Seine durant les crues, par pompage de la rivière, d'où l'intérêt du PIREN-Seine pour cette zone. Les zones « casiers » peuvent englober plusieurs gravières, qui forment un véritable bassin de rétention (voir figure 7, zones « casiers » délimitées en noir).

Les travaux réalisés durant ce stage apportent donc de nouvelles connaissances aux travaux réalisés dans le cadre du projet PIREN-Seine, et particulièrement aux travaux de Labarthe et al. (2013) sur la caractérisation hydrodynamique de la Bassée.

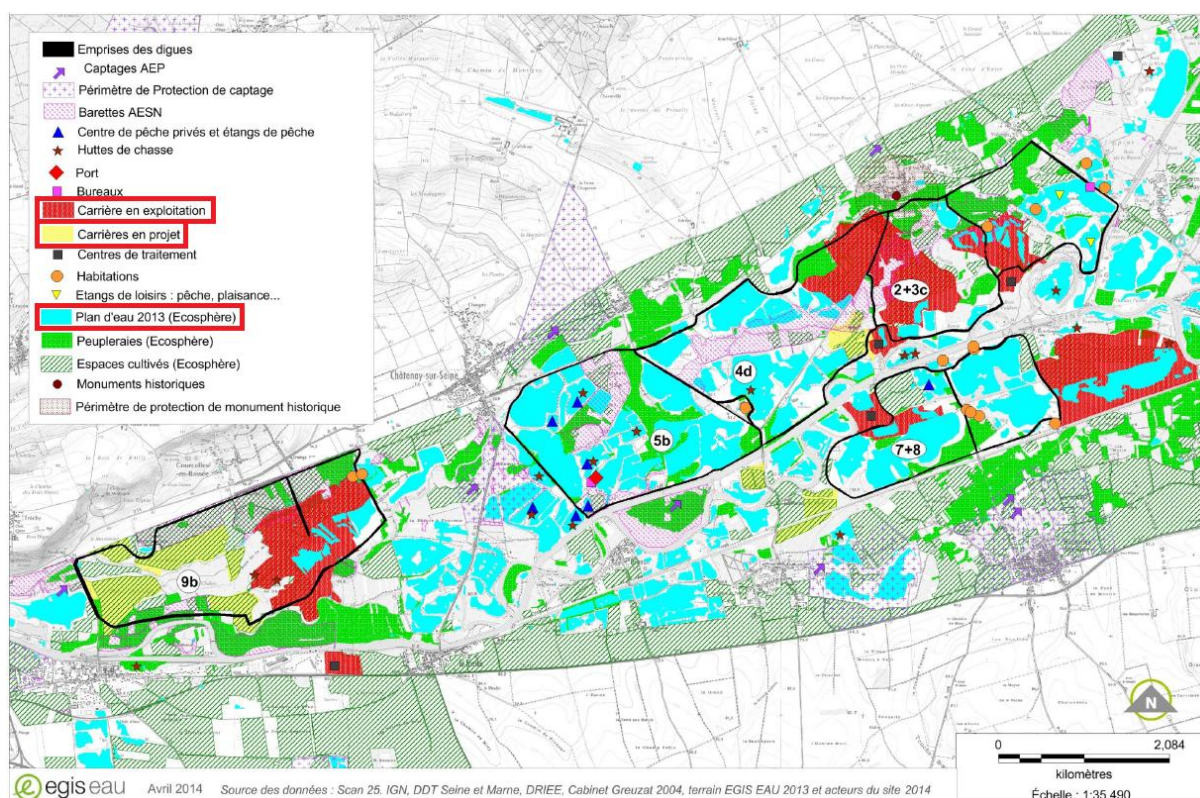


Figure 7 : Situation actuelle de la plaine de la Bassée. (Source : egis eau, 2014)

3) Contexte géologique et hydrogéologique

La plaine de la Bassée est constituée en grande partie de dépôts alluvionnaires du Quaternaire reposant sur une couche de craie datée du Crétacé. La géologie de la zone a été décrite par Schanen (1998) et Weng (2000). Nous nous contenterons de rappeler les informations importantes, en nous appuyant sur la figure 8 ci-dessous.

Les alluvions se situent au centre des vallées et paléo-vallées de la plaine. Leur épaisseur peut atteindre 12 mètres au centre des vallées et quelques mètres à leurs bordures (3 à 5 m). Il existe deux types d'alluvions dans la Bassée (déposées au Quaternaire) : les alluvions modernes, datées de l'Holocène, et les alluvions anciennes, datées du Würmien. Ces deux types d'alluvions ne présentent pas les mêmes caractéristiques. Les alluvions modernes sont essentiellement constituées de limons et d'argiles tandis que les anciennes sont faites de sables, graviers et galets, ce qui en fait une couche à la granulométrie beaucoup plus grande. Ces dernières sont donc l'objet de la convoitise des graviers, et se situent généralement sous une couche d'alluvions récentes de quelques mètres d'épaisseur.

La craie constituant le substratum de ces alluvions est une couche d'une puissance pouvant atteindre 600 mètres, datée du Sénonien (Crétacé supérieur). Cette craie peut subir une altération lors de son contact avec les alluvions, se manifestant à travers trois faciès d'altération, possédant chacun des propriétés différentes.

Il existe aussi une couverture tertiaire, datée de l'Yprésien (Eocène), dans le secteur nord-ouest de la Bassée, composée d'argiles et de sables.

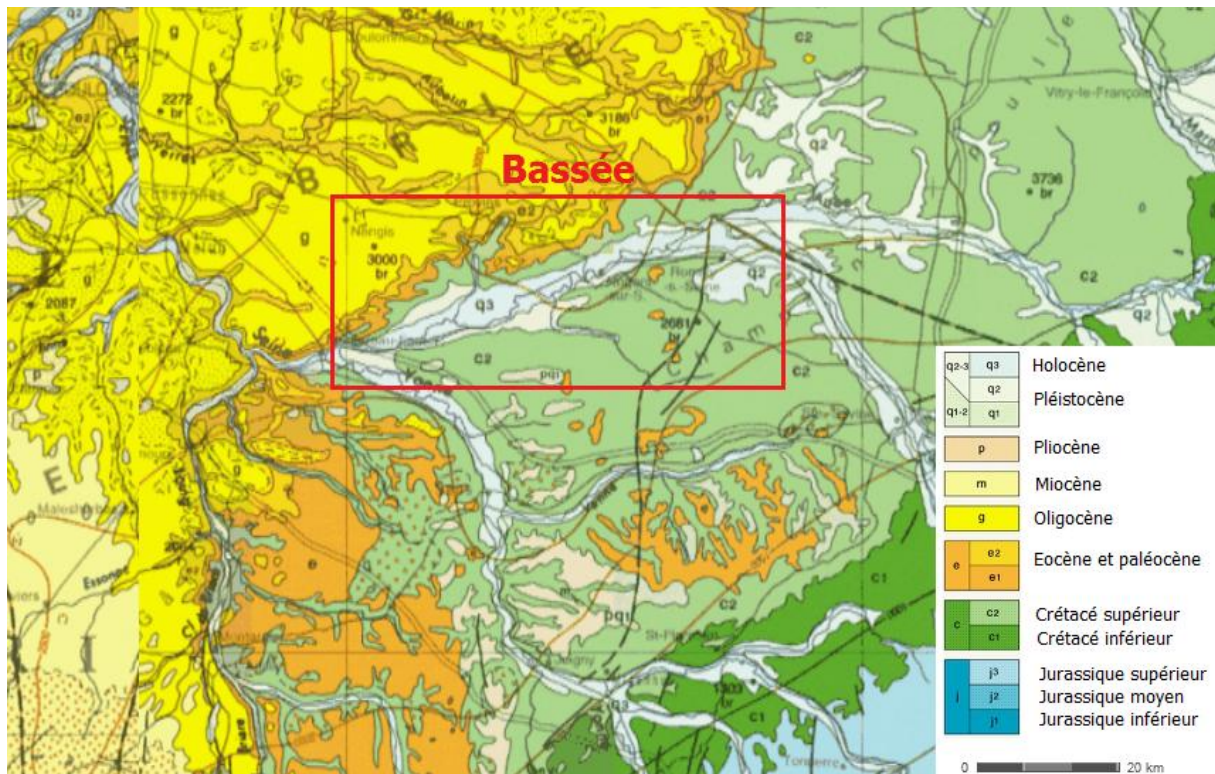


Figure 8 : Carte géologique de la région de la Bassée. (Source : Géoportail, 2014)

D'un point de vue hydrogéologique, deux systèmes aquifères se distinguent dans ce domaine : l'aquifère de la craie et l'aquifère alluvial. Ces deux aquifères ont beaucoup été étudiés, particulièrement par Mégnien (1979) qui en donne les caractéristiques principales. Il est important de noter que l'aquifère de la craie ne s'étend pas sur les 600 mètres de puissance de la couche, mais seulement sur les quarante mètres supérieurs (Weng, 2000).

De manière générale, l'aquifère de la craie est uniquement alimenté par les précipitations, tandis que l'aquifère alluvial reçoit à la fois une recharge des précipitations et une recharge par l'aquifère de la craie, avec qui des interactions vont avoir lieu (horizontalement et verticalement).

Les perméabilités mesurées au sein de la craie sont inférieures aux perméabilités des alluvions, en général. Weng (2000) donne des valeurs de porosité totale de 39% et 30%, respectivement pour la craie et les alluvions. Des valeurs de transmissivité moyenne ont été calculées, avec $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les alluvions et $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la craie (Mégnién, 1979). Bien entendu, il existe une hétérogénéité spatiale de ces paramètres (Fleckenstein et al., 2006), liée par exemple à la présence de lentilles argileuses moins perméables ou encore à une différence de faciès d'altération pour la craie.

Les travaux et études réalisés dans la région ont permis de mieux comprendre les interactions de la nappe avec la Seine (Greiner, 1997 ; Schanen, 1998 ; Weng, 2000 Bendjoudi et al., 2002), comme peuvent en témoigner les figures 9 et 10.

La figure 9 présente les trois états possibles d'interaction : en conditions normales (la nappe alimente la rivière), en inondation (les écoulements sont parallèles à la rivière) et en été (la rivière alimente la nappe) dans la région de Marcilly-sur-Seine, en limite amont de la Bassée.

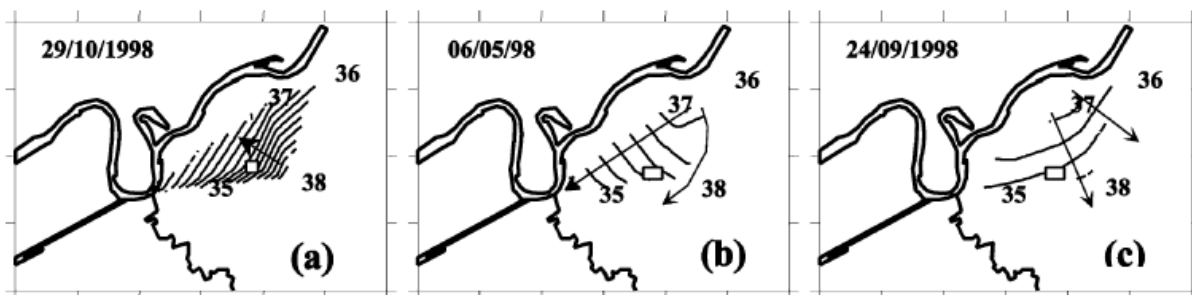


Figure 9 : Evolution de la surface piézométrique pour trois états : a) conditions normales, b) conditions d'inondation et c) en été. (Source : Bendjoudi et al., 2002)

La figure 10 présente la piézométrie en conditions normales dans le secteur d'Egigny. Nous pouvons noter un cas comparable au cas 9.a ci-dessus : la nappe alimente la rivière, les écoulements se font vers celle-ci, d'un amont hydraulique vers l'aval. De plus, la présence de gravières dans la zone a été étudiée par Schanen, en 1998, qui met en évidence certains de leurs impacts. Nous pouvons remarquer, de manière générale, que les gravières vont venir modifier les écoulements de la nappe.

Dans le cadre de sa thèse, Schanen (1998) a réalisé un modèle basé sur l'optimisation du bilan hydrologique afin de déterminer l'ensemble des paramètres hydrodynamiques de la zone, et ce même au niveau des gravières. Ses résultats indiquent des perméabilités faibles au niveau des berges (variant entre $1,8 \cdot 10^{-8}$ et $3,9 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ selon le degré de colmatage et l'emplacement de la berge face aux écoulements), traduisant bien un colmatage lorsque celles-ci sont faibles. Dans le cas d'un colmatage, les écoulements sont modifiés, l'eau contourne les gravières (voir figure 10). En parallèle, les valeurs de transmissivité aux interfaces, trouvées à l'aide du modèle, varient entre $4 \cdot 10^{-7}$ et $8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La variabilité

de ces valeurs dépend du degré de colmatage des berges : les faibles valeurs sont retrouvées aux interfaces aval des gravières, fortement colmatées.

L'ensemble de ces informations apporte donc de nombreuses connaissances sur les gravières et leur environnement, ainsi que sur les effets induits par le colmatage des gravières. Dans le cadre de ce stage, notre intérêt se porte sur l'hydrodynamisme impliqué par les gravières. Afin de mieux comprendre les impacts des gravières, nous avons utilisé le modèle MODFLOW permettant la simulation des écoulements souterrains, même en présence de gravières, ce qui fera l'objet des deux parties suivantes.

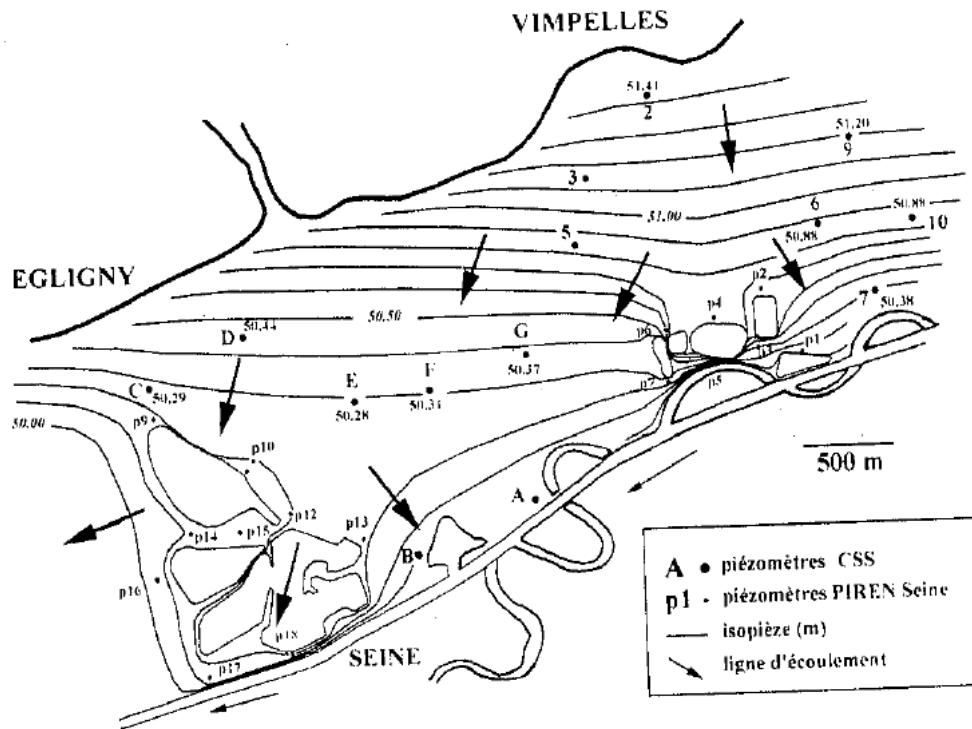


Figure 10 : Piézométrie de la nappe en rive droite de la Seine, en octobre 1995. (Source : Schanen, 1998)

Partie II : Modélisation et représentation des gravières

A/ Le modèle MODFLOW et la représentation des gravières

1) MODFLOW

Le modèle utilisé dans le cadre de ce stage est le modèle MODFLOW (USGS, v1996). Il s'agit d'un modèle tridimensionnel, dont l'objectif est la simulation des écoulements souterrains en milieu saturé, selon la méthode des différences finies (ce qui implique la création d'un maillage carré pour représenter la zone d'étude).

Ce modèle résout l'équation de la diffusivité :

$$\text{div}(\bar{K} \times \text{grad}h) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

$$\text{Régime permanent} \Leftrightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

$$\text{Régime transitoire} \Leftrightarrow \frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$$

Dans le cadre de ce stage, l'utilisation de ce modèle a été rendue possible par l'intermédiaire de l'interface Processing Modflow for Windows (PMWIN, v5.3, 2005).

L'utilisation de MODFLOW est donc toute indiquée pour notre problème : nous tenterons de simuler l'impact hydrodynamique des gravières sur les écoulements dans une nappe alluviale.

Le modèle prend en entrée tous types de paramètres :

- La géométrie (épaisseur des couches, discrétisation spatiale),
- Le type d'aquifère (libre, captif, variable) et le régime (permanent ou transitoire)
- Les paramètres hydrodynamiques (retrouvés dans l'équation de la diffusivité : K, et Ss en régime transitoire),
- Les conditions aux limites (flux imposés, charge imposée et condition mixte),
- Les paramètres temporels et conditions initiales dans le cas d'une simulation en régime transitoire.

2) Représentation d'une gravière dans PMWIN

Il existe plusieurs techniques possibles, via l'utilisation des modules disponibles dans PMWIN, pour simuler une gravière. L'ensemble des descriptions des modules est disponible dans la notice du logiciel PMWIN (Chiang & Kinzelbach, 1998). De manière générale, de nombreuses études ont été réalisées sur la modélisation des échanges nappe/rivière, nappe/zone humide ou encore nappe/lac. Certains modules y sont utilisés et décrits. Par exemple, Smerdon et al. (2007, 2012) s'intéressent particulièrement au module « lac » de MODFLOW, tandis que Rushton K. (2007) et Munz et al. (2011) décrivent le module « rivière » de MODFLOW.

L'utilisation de ces modules est envisageable dans le cas d'une gravière. Notons aussi que le module « barrière de flux horizontal » permet de modifier les perméabilités des faces latérales de certaines mailles, permettant la simulation d'un colmatage des berges.

Dans notre cas, la version de l'interface utilisée ne possède pas l'ensemble des modules, si bien que le module « lac » (permettant la simulation de la charge du plan d'eau) n'a pas pu être testé, contrairement aux modules « rivière » et « barrière de flux horizontal ».

Ce dernier fonctionne simplement : l'utilisateur a juste besoin d'inscrire une valeur de perméabilité (en réalité, il s'agit d'une perméabilité divisée par l'épaisseur de la barrière, qui dans notre cas a été fixée à 1 m) sur la face latérale de la maille où il souhaite définir la barrière. La barrière est effective sur toute l'épaisseur de la couche. Cela forme, a priori, un bon moyen de représenter un colmatage mais s'applique à toute l'épaisseur de la nappe.

Le module rivière fonctionne différemment. Il s'agit d'une condition aux limites de type mixte, c'est-à-dire traduisant la relation entre les flux et une charge imposée. La principale caractéristique de ce module est la conductance. Elle est définie selon l'expression :

$$C = K \cdot L \cdot W / M$$

avec C la conductance (m^2/s) du lit de la rivière, K la perméabilité de ce dernier (m/s), L la longueur de la rivière dans la maille (m), W la largeur de la rivière dans la maille (m) et M l'épaisseur du lit de la rivière (m).

Ce module spécifie au modèle que les bords de la rivière sont imperméables (rendant inutile l'utilisation du module « rivière » en même temps que le module « barrière de flux horizontal ») et que les seules relations de la rivière avec l'aquifère sont verticales et peuvent s'exprimer à partir de la conductance précédemment citée. La formule du débit à l'interface est donnée par la relation suivante, dépendant des charges :

$$Q = C \cdot (H_{riv} - h)$$

avec Q le débit à l'interface rivière/aquifère (positif si le flux se fait vers l'aquifère, m^3/s), C la conductance définie ci-dessus (m^2/s), H_{riv} la charge d'eau dans la rivière (m) et h le niveau piézométrique simulé dans la maille (m). Pour une valeur de conductance tendant vers l'infini, cela revient à imposer la charge, tandis que si la conductance tend vers 0, le débit sera imposé.

La figure 11 illustre les différents membres de l'équation.

Quel que soit le code/module utilisé, il n'existe que peu de travaux sur l'impact hydrodynamique des gravières. L'un des rares exemples est Mimoun (2004) qui modélise les gravières en fonction de l'état de la piézométrie (basses ou hautes eaux). Il utilise une condition aux limites à charge imposée pour la modélisation des gravières, ce qui rend cette charge invariable. Cependant, cette technique ne prend pas en compte d'éventuels colmatages des berges puisqu'elle ne comprend aucune modification de perméabilités aux abords de la gravière. Il est toutefois possible de représenter implicitement les effets d'un colmatage en donnant une valeur de charge plus forte dans la gravière que la piézométrie de référence. Cela représenterait le fait qu'à cause du colmatage, la gravière devient un véritable bassin de rétention de l'eau, mais nécessite donc des mesures de la charge dans les gravières.

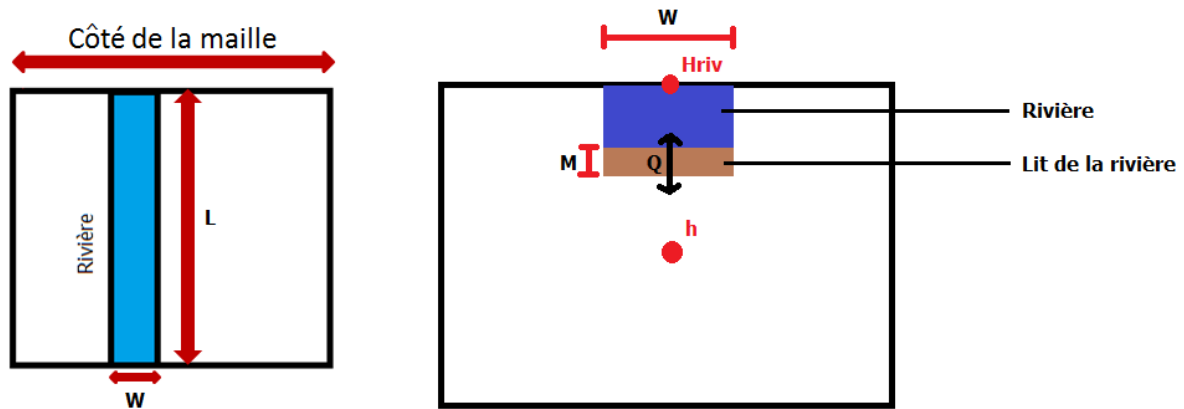


Figure 11 : Schéma explicatif du calcul du débit et de la conductance à l'interface rivière/aquifère.

B/ Le modèle simple

1) Construction

Le premier travail réalisé pour l'aspect modélisation de ce stage a été de construire un modèle simple, disposant des mêmes propriétés que la plaine de la Bassée, afin de tester et comprendre les effets d'une ou plusieurs gravières sur la nappe.

Le contexte a été simplifié au maximum comme suit :

- Elaboration d'un modèle monocouche (alluvions de 10 m d'épaisseur constante, formant un aquifère libre).
- Conductivité hydraulique homogène dans toute la couche (0,006 m/s, soit une transmissivité de 0,06 m²/s).
- Recharge globale homogène en tout point (1,5^E-07 m/s). La valeur a été fixée aussi forte pour traduire la somme de la recharge de surface et de la recharge par la craie.
- Maillage peu étendu (mailles de 62,5*62,5 m, organisées dans un modèle à 50 colonnes et autant de lignes).
- Pente topographique constante (8 ‰), altitude de la bordure ouest : 150 m, altitude de la bordure est : 125,5 m. Ces valeurs ne sont pas représentatives de la Bassée, mais n'affectent pas les résultats, puisque la pente est similaire à celle observée en Bassée.
- Bordure est représentant une rivière, avec une condition aux limites à charge imposée (charge fixée à 124,5 m).

Il est important de noter que les valeurs utilisées de manière homogène ont été fixées en fonction des informations trouvées dans la littérature (Schanen, 1998 ; Weng, 2000 ; Bendjoudi et al., 2002 ; Labarthe et al., 2013).

La piézométrie simulée par ce modèle simple sans modification liées aux gravières est présentée figure 12 en coupe et figure A1 en carte, en annexe. C'est à partir de cette piézométrie de référence que les propriétés de modélisation des gravières seront fixées. Notons toutefois que le gradient hydraulique simulé n'est pas représentatif de celui présent

en Bassée d'un ordre de grandeur : 0,06 % pour les résultats de Schanen (1998) contre 0,6% pour la simulation.

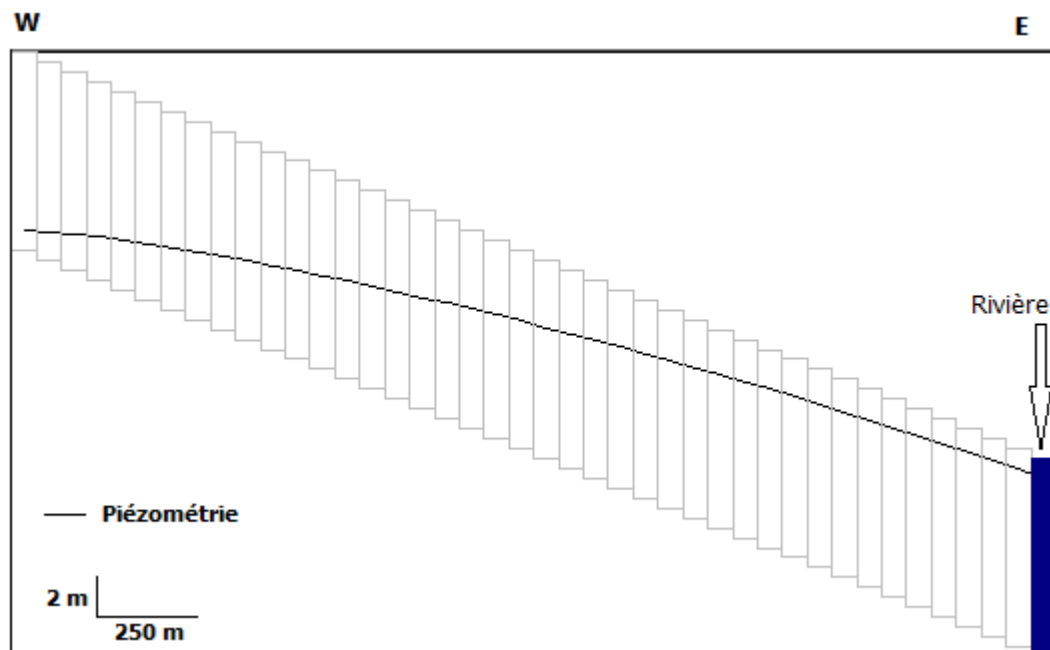


Figure 12 : Coupe ouest-est du modèle simple après première simulation.

2) Résultats obtenus et critique

Plusieurs tests ont été réalisés avec les diverses techniques présentées auparavant. En résumé, les différentes méthodes testées ont été : le module « rivière », le module « barrière de flux horizontal », une charge imposée dans la gravière et une perméabilité de 1 m/s dans la gravière (traduisant une absence de résistance à l'écoulement, la nappe s'équilibre d'elle-même avec la gravière). Il a été parfois possible de combiner deux techniques différentes comme la perméabilité élevée et l'ajout de barrière imperméable en bordure de gravière.

L'ensemble de ces méthodes ne vont pas servir à représenter les mêmes gravières, particulièrement en ce qui concerne le degré de colmatage des berges. Pour chacun des tests, la zone gravière possède les mêmes caractéristiques, pour permettre une meilleure comparaison des résultats : géométrie, distance à la rivière entre autres.

La figure A2 en annexe présente les résultats d'une simulation de gravière, en charge imposée. Les paramètres restent les mêmes que ci-dessus. Le niveau imposé à la gravière est de 129 m, pour une piézométrie en état normal variant entre 129 et 130,5 m.

Nous observons, à l'issue de cette simulation, une convergence des écoulements vers la gravière en amont de celle-ci et une divergence des écoulements à l'aval. La coupe réalisée à l'aide du modèle PMPATH (figure 13) illustre parfaitement le cas, décrit par Peaudecerf (1975), d'une gravière sans colmatage (voir figure 3 pour rappel). Nous pouvons observer par rapport à la piézométrie initiale un rabattement à l'amont et une mise en charge à l'aval, ce qui traduit bien l'absence de colmatage. Pour des raisons de clarté, les mailles à charge imposée ont été effacées et sont représentées par un blanc.

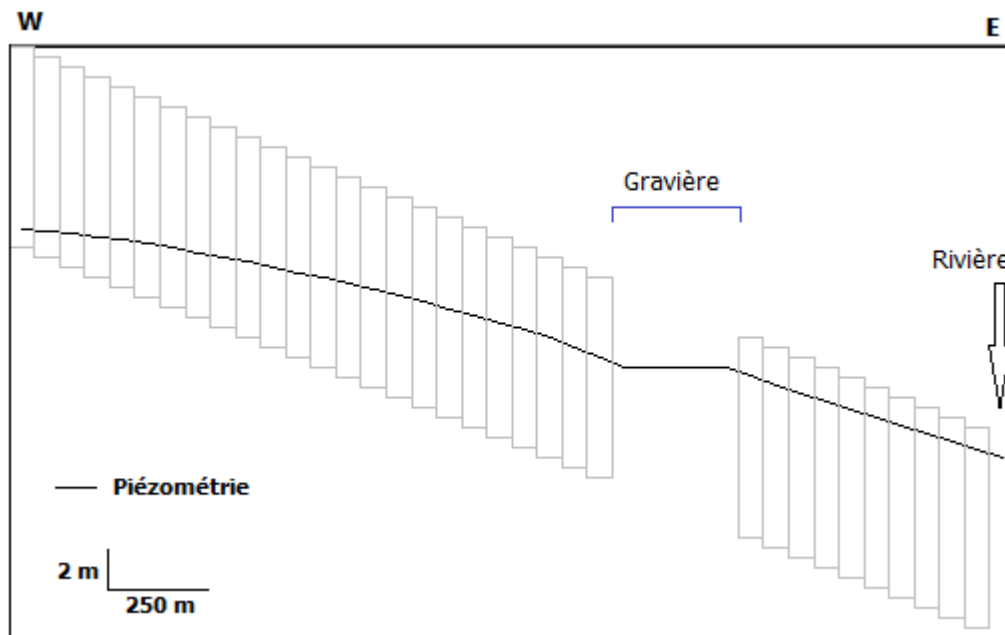


Figure 13 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone à charge imposée.

Parallèlement, un test a été effectué avec les mêmes caractéristiques, mais avec le module « rivière ». La conductance a été volontairement fixée à $4 \text{ m}^2/\text{s}$ pour représenter une gravière non colmatée, ce qui va correspondre à une condition aux limites à charge imposée. La charge a été fixée à 129 m. Les résultats sont présentés figure A3 en annexe et en coupe figure 14.

Nous pouvons remarquer que les résultats semblent très proches entre les deux techniques en ce qui concerne la modélisation de gravières non colmatées.

En ce qui concerne le colmatage, trois tests ont été réalisés : d'une part, l'utilisation de barrières de flux horizontal en complément de la gravière à charge imposée ou d'une zone à la perméabilité fixée à 1 m/s , et d'autre part la diminution de la conductance des mailles dans le cas du module rivière pour simuler le colmatage important du fond.

Deux de ces tests ont fonctionné et ont donné des résultats comparables à la figure 4 (Peudecerf, 1975). La modification de la conductance n'a pas donné de résultats flagrants (piézométrie inchangée, l'utilisation du module rivière pour les gravières colmatées a donc été abandonnée.

Les perméabilités des barrières ont été fixées à 10^{-6} m/s pour simuler le colmatage. Les différents résultats sont observables dans les figures A4 et A5 en annexe, et les coupes associées (figures 15 et 16). La charge imposée dans la gravière a été fixée à 130,5 m.

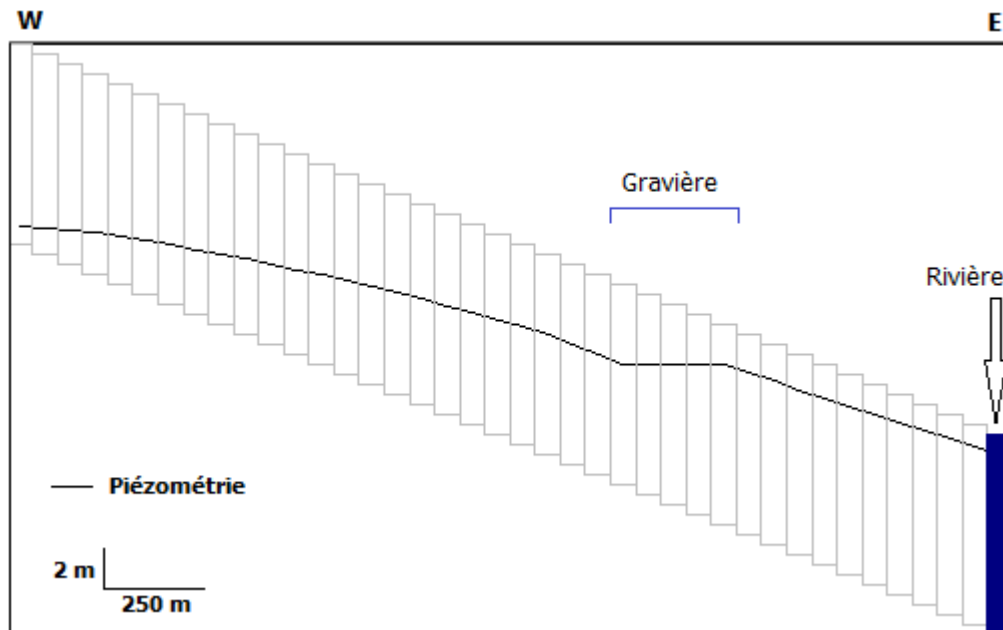


Figure 14 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone type rivière.

Plusieurs observations et conclusions peuvent en être tirées.

Dans les deux cas, l'évolution de la piézométrie face à cette perturbation est similaire : en amont des gravières, les écoulements divergent car l'eau ne peut passer et est contrainte de contourner l'obstacle que forme la gravière. En aval, les écoulements convergent derrière la gravière.

Ces observations sont appuyées par les coupes, qui mettent en évidence une rupture brutale de la pente piézométrique au niveau des barrières imperméables. La mise en charge de la nappe à l'amont n'est pas très prononcée mais existe quand même. A l'aval, le rabattement est très important et marqué.

Ces observations viennent justifier le choix de la méthode à utiliser pour la représentation des gravières : charge imposée pour une gravière non colmatée, et barrières de flux horizontal en complément d'une zone à perméabilité importante ou d'une zone à charge imposée assez élevée en ce qui concerne les gravières colmatées. Les résultats obtenus sont semblables à ceux retrouvés dans la littérature et la partie I.

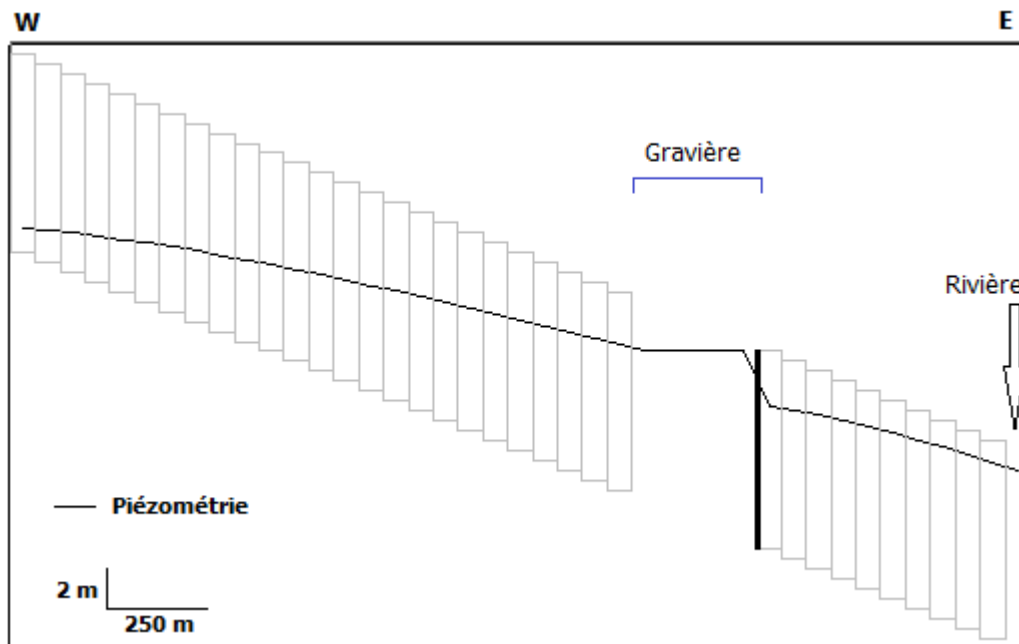


Figure 15 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone à charge imposée et barrières imperméables.

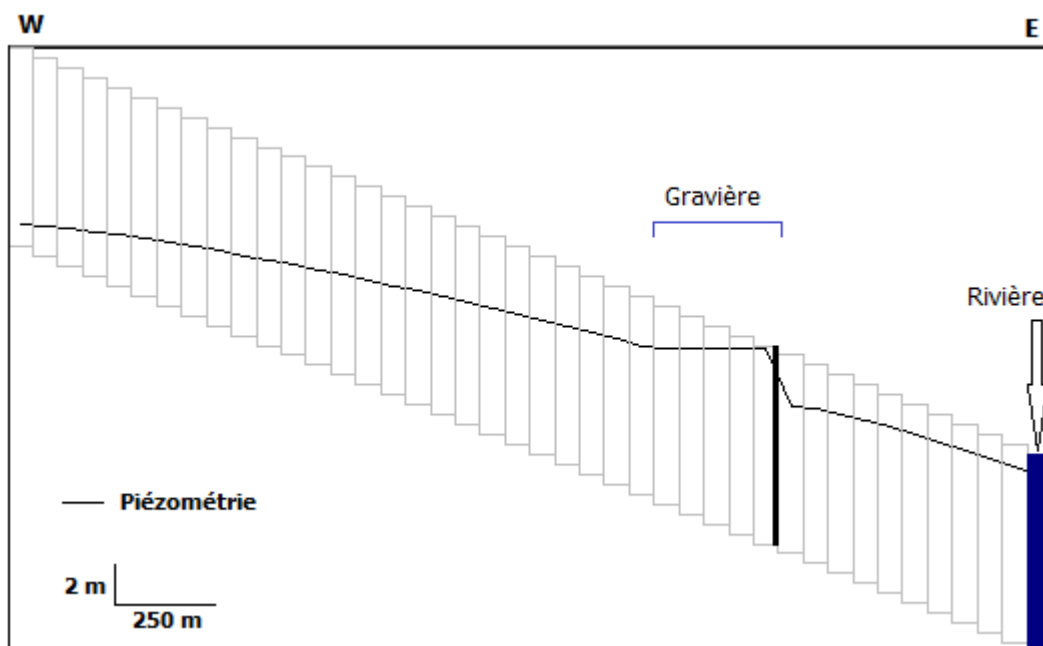


Figure 16 : Coupe ouest-est du modèle simple après ajout d'une zone à perméabilité élevée et barrières imperméables.

Ces tests nous ont permis de déterminer la méthode de représentation des gravières dans l'interface PMWIN. La suite du travail de modélisation a été de créer un autre modèle, se rapprochant au mieux de notre zone d'étude : la Bassée. La troisième partie s'attache donc à la description et aux résultats de ce modèle Bassée.

Partie III : Modélisation de la Bassée

A/ Zone d'étude

La création d'un deuxième modèle représentatif de la Bassée a nécessité la sélection d'une sous-zone d'étude, présente dans la Bassée. Pour une facilitation de la modélisation, il est important d'utiliser un domaine d'étude relativement réduit, évitant la construction d'un maillage trop important sur PMWIN.

Cette sous-zone d'étude est présentée figure 17. Elle se situe entre les villes de Montereau-Fault-Yonne et Bray-sur-Seine, soit sur le secteur aval de la plaine de la Bassée. C'est dans cette zone que les travaux de Schanen (1998) ont été réalisés (secteur d'Egigny et de Vimpelles). Il a donc été judicieux de sélectionner cette zone pour avoir certains points de comparaison. De plus, c'est dans cette zone de la Bassée que l'abondance de gravières est la plus forte, et c'est aussi l'une des zones que le PIREN-Seine va équiper. L'installation des dispositifs de suivi des gravières sera donc faite dans cette zone. Nous nous sommes préférentiellement intéressés à la plaine en elle-même, en ignorant les coteaux situés au nord et au sud et composés de craie et d'alluvions anciennes, déconnectés de la plaine. A cet endroit, la plaine est traversée par deux cours d'eau majeurs : la Seine (cours d'eau méridional) et la Vieille Seine (cours d'eau septentrional).

Contours de la Bassée et de la zone d'étude

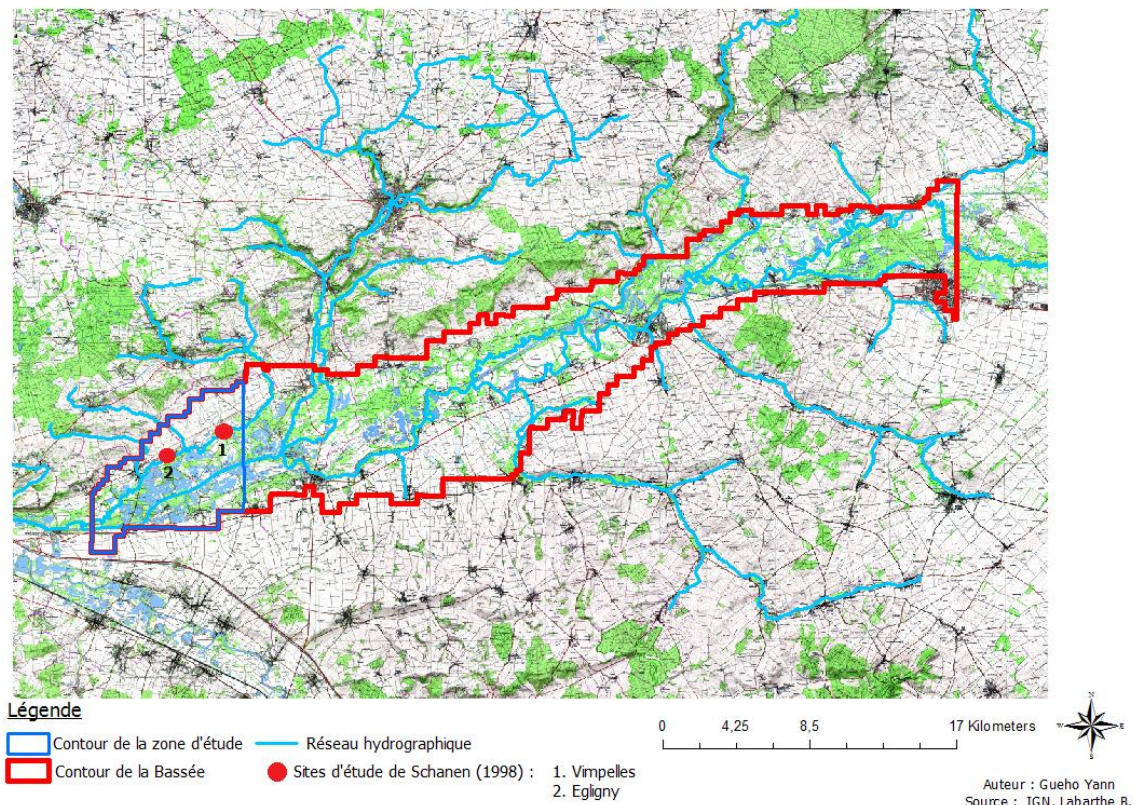


Figure 17 : Contours de la plaine de la Bassée et de la zone d'étude.

Il est important de noter que nous ne possédons actuellement pas de données récentes mesurées sur le terrain, ce qui empêche tout calage de notre modèle à l'aide d'observations. Les campagnes de mesures et de mise en place de dispositifs entreprises par le PIREN-Seine tendent à combler ce manque de données, dans les parties amont et aval de la Bassée, et

vont permettre la validation et le calage de notre modèle. Plus précisément, le projet du PIREN-Seine vise à installer un réseau de dispositifs de mesures sous forme de triplets (Seine, alluvions et craie) ainsi que de points gravières afin d'étudier les échanges gravière/nappe/rivière. Les travaux de Labarthe et al. (2013) s'inscrivent dans ce projet et visent à caractériser le fonctionnement hydrodynamique de la Bassée, en utilisant plusieurs modèles d'échelles différentes (régional, intermédiaire et local) et en les emboîtant. Les résultats issus de cet emboîtement sont actuellement en cours de validation.

B/ Construction du modèle

L'objectif final de l'élaboration du modèle Bassée est de complexifier le modèle simple décrit dans la partie II, et d'étendre la modélisation à l'ensemble de notre sous-zone d'étude. La complexification consiste en la prise en compte des hétérogénéités de la plaine alluviale, et à essayer de trouver une simulation se rapprochant le plus possible de la piézométrie de référence (obtenue par krigeage à partir des données de Mégrien en septembre 1965, et fournie par Labarthe et al. (2013)). L'ajout de gravières sera alors effectué pour illustrer leur impact hydrodynamique sur la nappe alluviale.

Au moment de la rédaction de ce rapport, les champs de données de la transmissivité et de la recharge de la plaine de la Bassée sont en cours de validation, ce qui handicape la création de ce modèle Bassée, basé sur l'hétérogénéité de ces paramètres dans la plaine. Ces paramètres sont issus des travaux de Labarthe et al. (2013) : la transmissivité est issue d'une méthode d'inversion, tandis que la recharge est issue du modèle Marne-Loing utilisé et décrit dans ces mêmes travaux.

N'étant pas en possession de résultats utilisables pour le moment, nous avons procédé à une étape supplémentaire : l'élaboration d'un modèle moins représentatif de la Bassée, en faisant l'approximation de l'homogénéité de certains paramètres.

Ce nouveau modèle ne semble pas être calé sur la piézométrie de référence, mais il se rattache quand même bien à une représentation de la Bassée, puisque les valeurs moyennes utilisées pour les différents paramètres sont représentatives de celle-ci.

La construction de ce modèle Bassée-2 s'est basée sur le maillage créé et utilisé par Labarthe et al. (2013) sur toute la Bassée. Il s'agit d'un maillage en 62,5*62,5 m. Comme dit précédemment, ce maillage a été découpé, de sorte à n'obtenir que l'aval de la plaine, en gommant les coteaux.

La topographie utilisée provient d'un MNT de résolution 25 m (IGN). Nous avons décidé de travailler dans un cas de nappe captive, même si cela ne traduit pas la réalité, permettant au logiciel de travailler directement sur les transmissivités, et ainsi d'éviter les problèmes liés à l'épaisseur des alluvions (faibles épaisseurs près des coteaux parfois problématiques).

La piézométrie de référence représente l'objectif de la simulation, c'est pourquoi nous avons utilisé ces valeurs de référence au niveau des mailles à charge imposée (rivières et bordures du modèle).

La recharge a été fixée à une valeur moyenne représentative de la Bassée (10^{-9} m/s), s'apparentant à la recharge de surface. La recharge par la craie n'a pas été prise en compte à travers cette valeur, mais plutôt via la piézométrie de référence imposée en bordure de modèle.

La transmissivité est l'unique variable hétérogène du modèle. Le champ utilisé a été obtenu par krigeage (Labarthe et al. 2013), à partir de diverses données d'interprétation d'essais de pompage (BRGM). La carte de ces transmissivités est disponible figure A6, en annexe.

C/ Résultats de simulation

La piézométrie de référence est présentée figure 18 et la piézométrie simulée par le modèle Bassée-2 est disponible figure 19. Dès lors, une première comparaison peut être faite. Les grandes variations de la piézométrie sont similaires : directions d'écoulement et gradients hydrauliques. Par exemple, nous observons dans les deux cas des écoulements dirigés des coteaux vers les rivières (au nord et au sud), et entre les deux rivières, les écoulements semblent se faire de l'amont vers l'aval, parallèles à l'écoulement des rivières. Nous pouvons noter que pour la piézométrie simulée, cet écoulement entre les deux cours d'eau semble, cependant, légèrement dirigé vers le nord et la Vieille Seine. Les gradients hydrauliques sont inférieurs à 1‰, ce qui correspond bien avec les observations trouvées dans la littérature (notamment Schanen, 1998).

Bien entendu, ces deux piézométries ne peuvent pas coïncider parfaitement, puisque l'une prend en compte les hétérogénéités de la plaine tandis que l'autre traduit des conditions beaucoup plus homogènes.

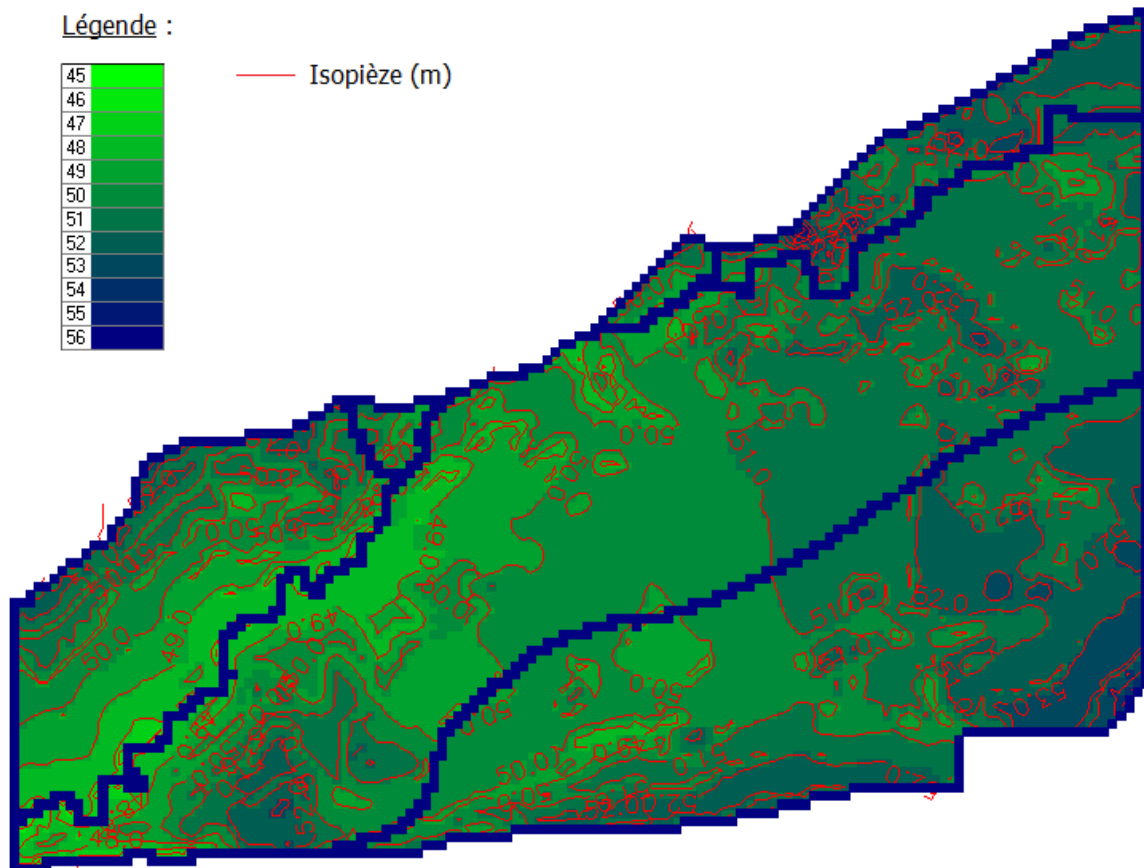


Figure 18 : Piézométrie de référence (les charges imposées sont en bleu foncé).

Par ailleurs, la piézométrie de référence ne semble pas en accord avec la piézométrie trouvée par Schanen (1998) dans la zone (partie I, figure 10), qui présente entre les deux

cours d'eau, des écoulements dirigés de la Vieille Seine vers la Seine. Cette situation n'est pas reproduite par la piézométrie de référence. La différence entre ces deux piézométries pourrait provenir de la date à laquelle ont été faites les mesures (septembre 1965 pour la piézométrie de référence, contre octobre 1995 pour la piézométrie de Schanen), de la densité et répartition différente des points d'observation ainsi que de la méthode d'interpolation.

Au contraire, notre modèle semble simuler des écoulements de la Seine vers la Vieille Seine. Celui-ci est cependant basé sur la piézométrie de référence, il est donc normal que les résultats simulés se rapprochent plus de celle-ci que de la piézométrie de la figure 10.

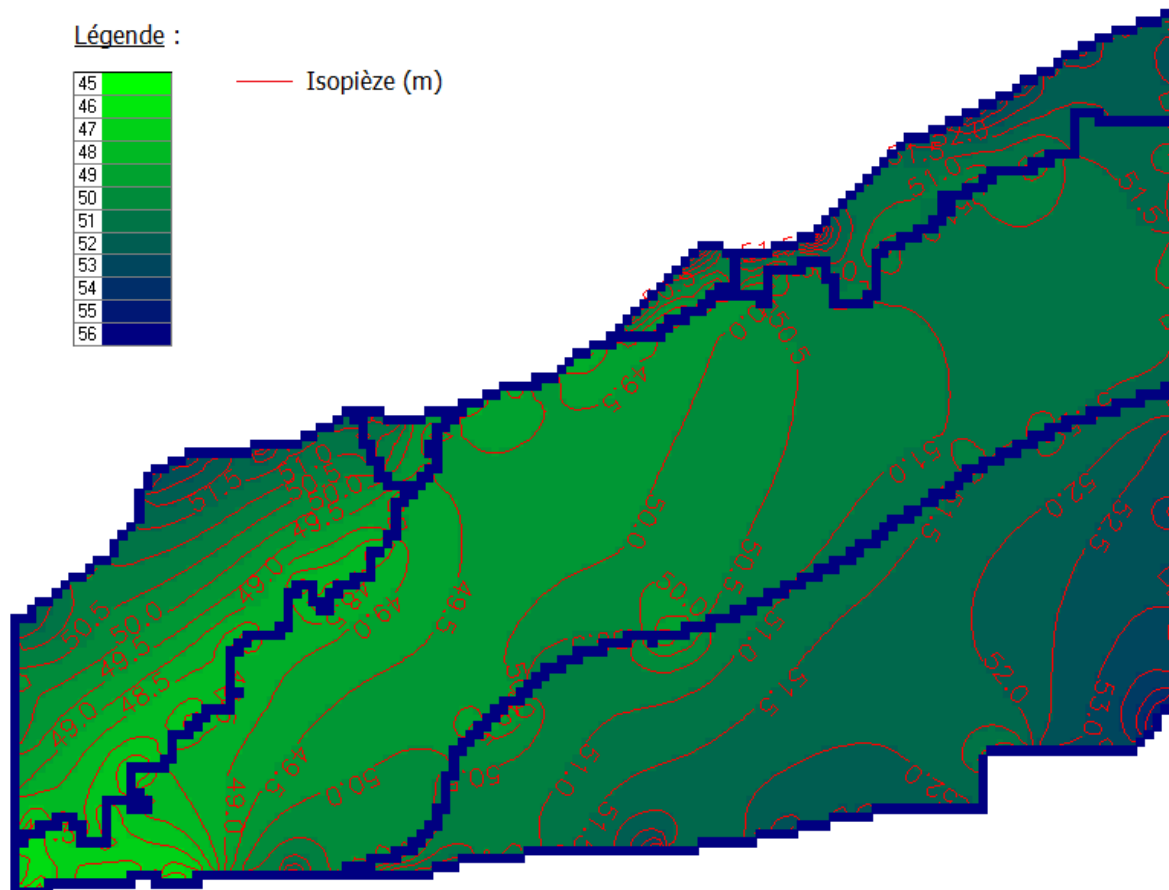


Figure 19 : Piézométrie simulée par le modèle Bassée-2 (les charges imposées sont en bleu foncé).

L'intensification de l'extraction des granulats a été observée à partir des années 1960, nous nous attendons donc à retrouver des gravières globalement colmatées au niveau des interfaces avec la nappe, particulièrement les berges aval des gravières (Schanen, 1998). Comme vu dans la partie II, l'ajout des gravières dans ce modèle s'est fait par augmentation de la transmissivité ($10 \text{ m}^2/\text{s}$) et implantation de barrières de flux horizontal.

L'utilisation de la combinaison charge imposée/barrière de flux horizontal aurait aussi pu être envisagée, mais pour des questions de clarté des résultats et de rapidité de manipulation (il n'est pas nécessaire de spécifier les charges imposées avec la méthode choisie), nous n'avons pas retenu cette option. Un aperçu des gravières est disponible figure 20, ci-dessous. Celles-ci ont été choisies selon leur taille (300 m de côté et plus), et placées à l'aide de la carte IGN de la zone.

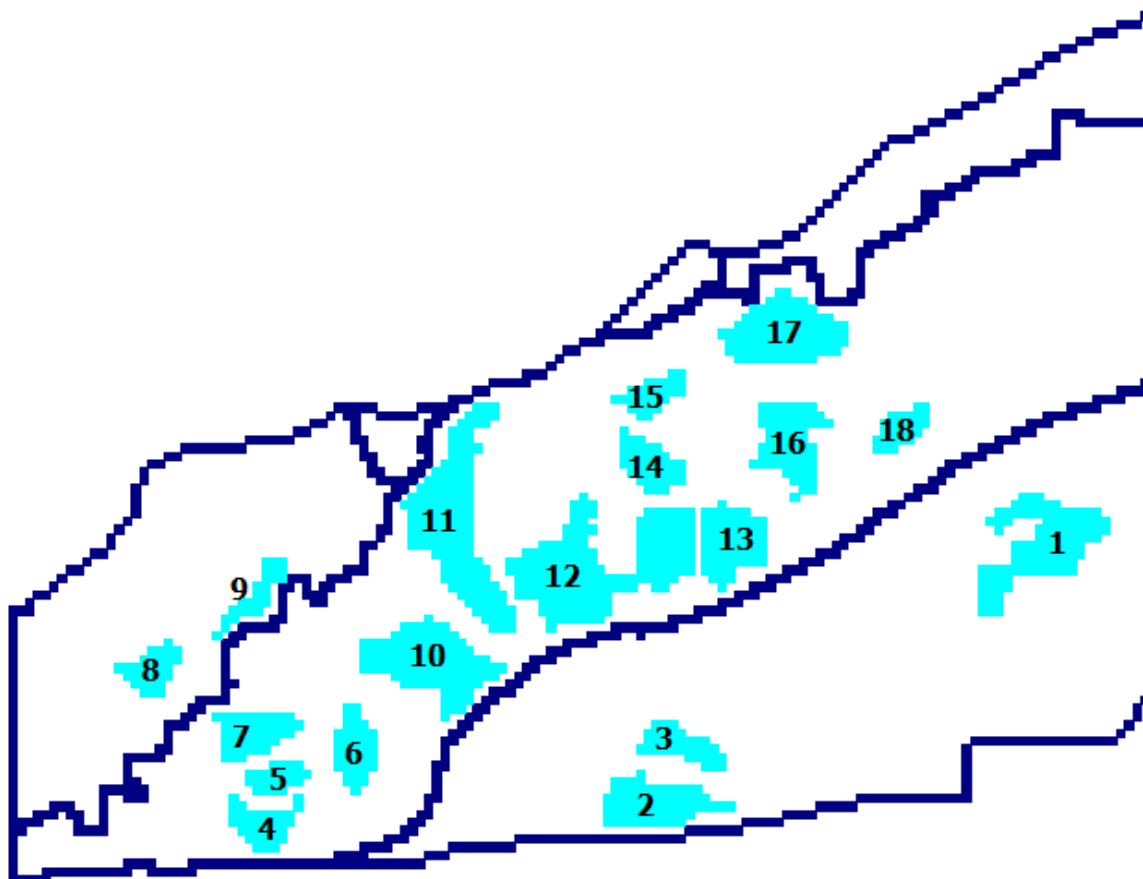


Figure 20 : Localisation et numérotation des gravières, en bleu clair (bleu foncé : mailles à charge imposée).

Les résultats de la simulation avec gravières sont présentés figure 21 et mettent en évidence plusieurs choses. Afin de ne pas masquer la piézométrie, les gravières ne sont pas figurées sur la figure. Il est important de noter que les barrières de flux horizontal ont vu leurs perméabilités fixées à 10^{-5} m/s. Elles ont, de plus, été placées perpendiculaires (dans la limite du possible) au sens d'écoulement de la nappe, en utilisant la piézométrie de référence.

De manière générale, les écoulements sont toujours situés des coteaux vers les cours d'eau, ce qui traduit la non modification des écoulements régionaux. Localement, les gravières vont cependant venir modifier les écoulements.

Parmi les exemples les plus flagrants, nous pouvons noter que :

- La gravière 1 provoque la divergence des écoulements à l'amont (bombement de l'isopièze 52,5 m),
- Les gravières 2 et 3 vont impacter les écoulements, notamment en induisant la modification de l'isopièze 52 m, qui traduit le contournement de la gravière par l'eau,
- La gravière 6 accentue la faible divergence des écoulements observée dans la piézométrie sans gravière, en modifiant l'isopièze 50 m, mettant ainsi en évidence une mise en charge à l'amont.

Ces quelques observations vont dans le sens des observations faites à partir des tests du modèle simple, en partie II : la divergence des écoulements à l'amont a bien lieu, formant la mise en charge de la nappe. Du point de vue du rabattement aval, sa mise en évidence n'est pas flagrante, à cette échelle, mais peut être observée au niveau de la gravière 8 (passage

d'un niveau de plus de 49 m à un niveau inférieur à 48,5 m à l'aval. Il en va de même pour la gravière 2, avec des valeurs à plus de 52 m à l'amont contre des valeurs inférieures à 51,5 m à l'aval.

Légende :

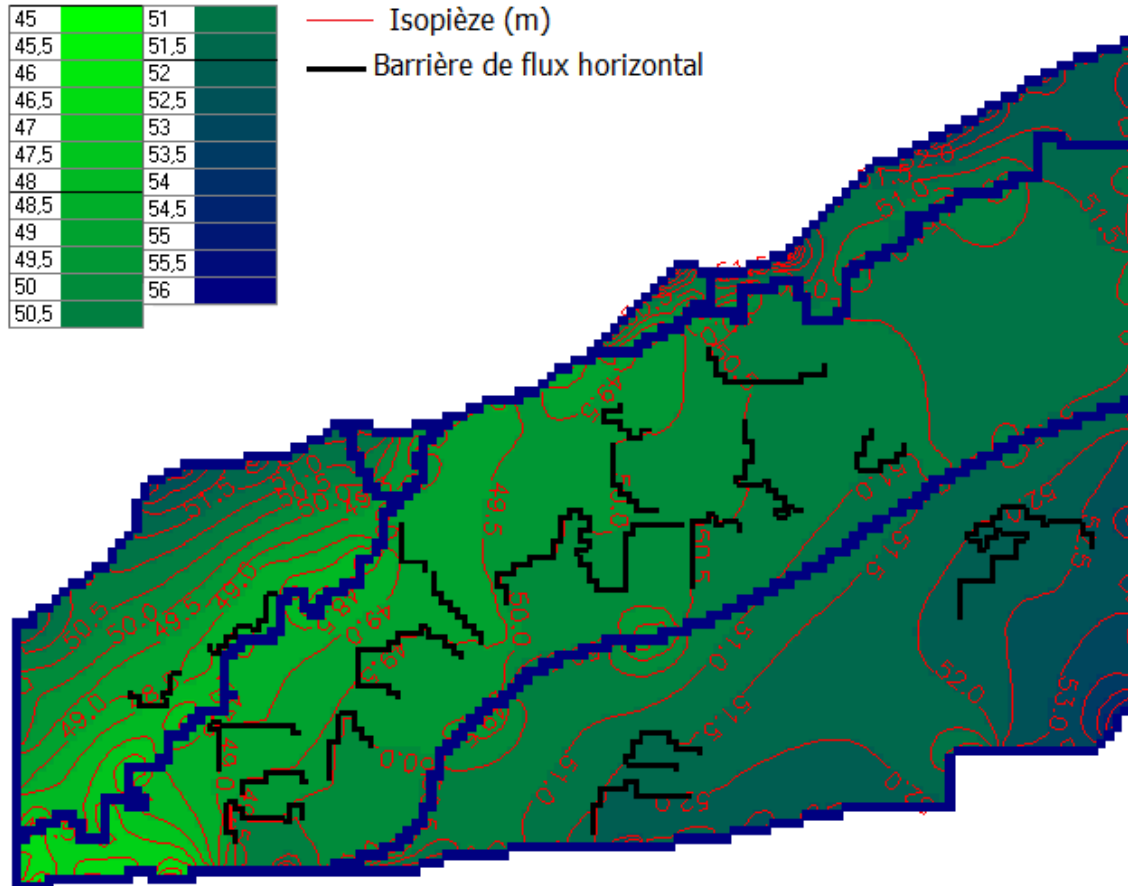


Figure 21 : Piézométrie simulée par le modèle Bassée-2, en présence de gravières colmatées (les charges imposées sont en bleu foncé).

La modélisation des gravières dans ce modèle semble donc plutôt fonctionner, à la vue de la simulation. Les résultats obtenus semblent s'accorder avec les résultats obtenus dans les tests du modèle simple, ainsi qu'aux observations recueillies dans la littérature.

L'amélioration de ce modèle peut passer par plusieurs points :

- L'acquisition de données de terrain au niveau des gravières, ainsi qu'au niveau de la nappe pour caler et valider la représentation des gravières.
- L'amélioration de la piézométrie de référence (en prenant en compte les gravières), passant aussi par le point ci-dessus.
- La complexification du modèle : prise en compte des hétérogénéités (transmissivité, recharge), augmentation de la taille du modèle (extension à l'ensemble de la plaine), ajout d'une couche de craie.
- La prise en compte des interactions des gravières avec l'atmosphère, complexifiant encore plus le modèle, et nécessitant, là aussi, des données.

L'ensemble de ces points permettrait de se rapprocher du cas réel de la plaine de la Bassée et de construire le modèle Bassée.

Conclusion

Les résultats du modèle Bassée-2 sont encourageants et incitent à la recherche de l'amélioration de ce modèle (qui est à terme, l'objectif de la fin de ce stage, en juillet). Ils confirment les observations trouvées dans la littérature, notamment la mise en charge de la nappe à l'amont et un rabattement brutal en aval des plans d'eau colmatés.

Cette amélioration passe inévitablement par l'acquisition de données de terrain, ce qui est en parfait accord avec le projet PIREN-Seine. La mise en place de dispositifs de mesure en continu à l'aval comme à l'amont serait extrêmement bénéfique au calage et à la validation de notre modèle, ce qui permettrait plusieurs autres types de simulation : en régime transitoire, avec différents état des eaux (hautes ou basses eaux) ou encore l'implémentation d'une couche de craie pour prendre en compte d'éventuelles interactions avec la nappe régionale.

A la vue des différents résultats obtenus, de nombreux points de mesure autour des gravières permettraient un affinage du calage. Cependant, le projet PIREN-Seine ne prévoit pas la mise en place de dispositifs de mesure par dizaines autour des gravières, mais l'installation de quelques points gravières en continu. Ces points seraient particulièrement intéressants (piézomètres) s'ils étaient situés en amont ou aval hydraulique des gravières, puisque la piézométrie est fortement impactée à ces endroits particuliers.

Le pouvoir tampon des gravières par rapport aux variations piézométriques saisonnières n'a pas été étudié en détail dans ce rapport, et reste un phénomène peu étudié. Le projet SWOT (Surface Water Ocean Topography), développé par la NASA, a pour objectif de mesurer les niveaux d'eau dans les lacs, zones humides, rivières et océans du monde entier afin d'observer et de comprendre les variations des masses d'eau dans le temps et l'espace. Ce projet se base sur des mesures par satellite des niveaux des plans d'eau. Des mesures aéroportées seront effectuées en Bassée afin de tester le matériel qui sera embarqué dans le satellite. Là encore, ce matériel a besoin d'être calé avec des mesures de terrain, qui pourront être fournies par le PIREN-Seine. Les gravières, constituant des plans d'eau, seront alors étudiées en tant que proxy du stock d'eau dans la plaine alluviale. Une étude approfondie du rôle tampon des gravières serait alors à envisager, et pourrait notamment se baser sur le modèle créé.

Bibliographie

Bendjoudi, H., P. Weng, R. Guérin, and J. F. Pastre. "Riparian Wetlands of the Middle Reach of the Seine River (France): Historical Development, Investigation and Present Hydrologic Functioning. A Case Study." *Journal of Hydrology* 263, no. 1 (2002): 131–55.

BRGM. « Etude hydrogéologique de faisabilité du projet Bassée. »

Chiang, W-H., Kinzelbach, W. "Processing ModFlow, a simulation system for modeling groundwater flow and pollution." *Manuel d'utilisation de l'interface PMWIN* (Décembre 1998) : 331 p.

Fleckenstein, Jan H., Richard G. Niswonger, and Graham E. Fogg. "River-Aquifer Interactions, Geologic Heterogeneity, and Low-Flow Management." *Ground Water* 44, no. 6 Understanding (November 2006): 837–52. doi:10.1111/j.1745-6584.2006.00190.x.

Greiner, I., 1997. Analyse de la variabilité fonctionnelle de la plaine alluviale de la Seine et modélisation des transferts de nitrates. Doctoral Thesis, University Paris VI. 241 p.

Labarthe, B., Flipo, N., Abasq, L., Deleplancque, B., Jost, A., Mouhri, A., De Fouquet, C. « Première caractérisation hydrodynamique des échanges dans la plaine alluviale de la Bassée. » *Rapport PIREN-Seine 2013, phase 6* (2013) : 1-40.

Megnien, C., 1979. Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. Doctoral Thesis, University of Paris VI. Mémoire BRGM n°98. 532 p.

Mimoun, D., 2004. Spatialisation de l'information : une aide à l'analyse hydraulique et paysagère développée lors de la réhabilitation des sites post-industriels – Cas des réaménagements des gravières en eau en milieu alluvionnaire. Doctoral Thesis, University Jean Monnet, Saint Etienne, 378 p.

Munz, Matthias, Stefan Krause, Christina Tecklenburg, and Andrew Binley. "Reducing Monitoring Gaps at the Aquifer-River Interface by Modelling Groundwater-Surface Water Exchange Flow Patterns." *Hydrological Processes* 25, no. 23 (November 15, 2011): 3547–62. doi:10.1002/hyp.8080.

Peaudecerf, P. "Effets Des Gravières Sur Le Comportement Hydrodynamique Des Nappes D'eau Souterraines." *La Houille Blanche*, no. 2–3 (March 1975): 133–40. doi:10.1051/lhb/1975007.

Rushton, Ken. "Representation in Regional Models of Saturated River-aquifer Interaction for Gaining/losing Rivers." *Journal of Hydrology* 334, no. 1–2 (February 2007): 262–81. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.10.008.

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 de l'université Paris VI.

Smerdon, B. D., Mendoza, C. A., Devito, K. J. "Simulations of fully coupled lake-groundwater exchange in a subhumid climate with an integrated hydrologic model." Water resources research, vol 43, n°1, W01416 (2007).

Smerdon, B.D., Mendoza, C. A., Devito, K. J. "The impact of gravel extraction on groundwater dependent wetlands and lakes in the boreal plains, Canada." Environmental Earth Sciences, vol 67, n°5 (November 2012) : 1249-1259.

Weng, P., 2000. Fonctionnement hydrologique d'une zone humide alluviale, relations avec l'aquifère sous-jacent et les rivières. Exemple de la Seine moyenne. Doctoral Thesis, University Paris VI, Paris, 200 p.

Winter, Thomas C. "Relation of Streams, Lakes, and Wetlands to Groundwater Flow Systems." Hydrogeology Journal 7, no. 1 (1999): 28–45.

Winter, Thomas C., and James W. LaBaugh. "Hydrologic Considerations in Defining Isolated Wetlands." Wetlands 23, no. 3 (2003): 532–40.

Références internet

Indicateurs de développement durable territoriaux : la production de granulats, site du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Consulté le 07/05/2014, disponible sur <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/498/1346/production-granulats.html>.

Bassin de la Seine, site de Wikipédia l'encyclopédie libre. Consulté le 07/05/2014, disponible sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Bassin_de_la_Seine.

Géoportail, portail des territoires et des citoyens. Consulté le 07/05/2014, disponible sur <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>.

ModFlow and Related programs, site de l'USGS science for a changing world. Consulté le 12/05/2014, disponible sur <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/>.

Processing ModFlow for Windows version 5.3, site de PMWIN. Consulté le 12/05/2014, disponible sur <http://www.pmwin.net/pmwin5.htm>.

BD Alt, site de l'IGN (Institut National de l'information Géographique et forestière). Consulté le 02/06/2014, disponible sur <http://professionnels.ign.fr/bdalti>.

Annexes

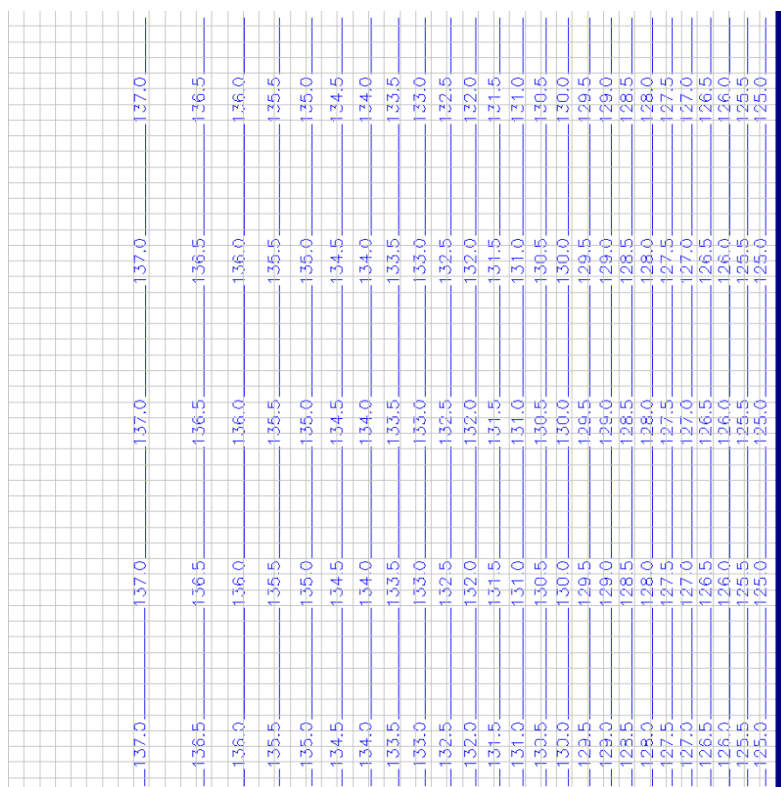


Figure A1 : Simulation de la piézométrie (m) en conditions normales.

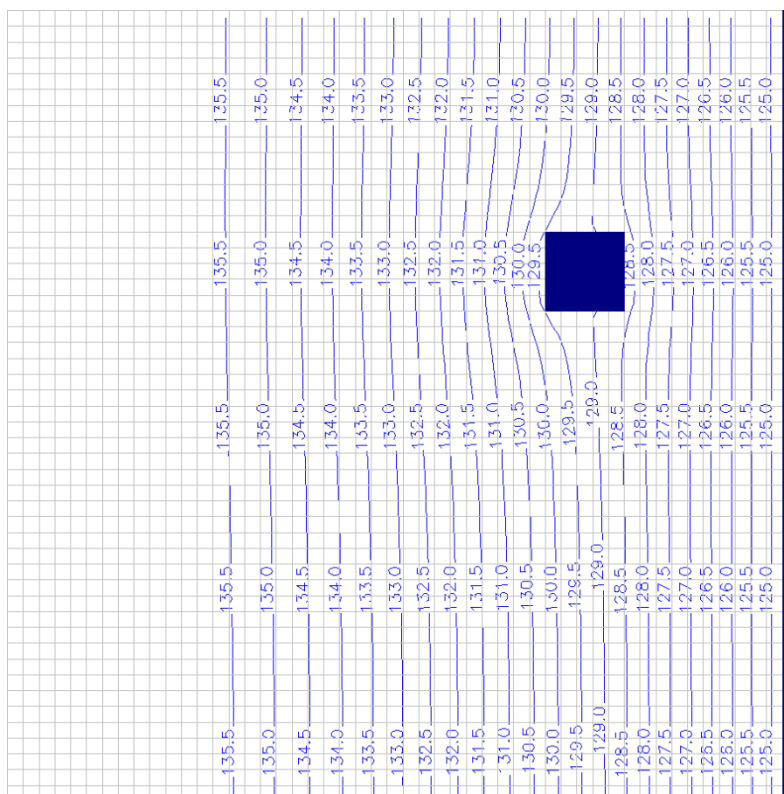


Figure A2 : Simulation de la piézométrie (m) avec zone à charge imposée (129 m, bleu foncé).

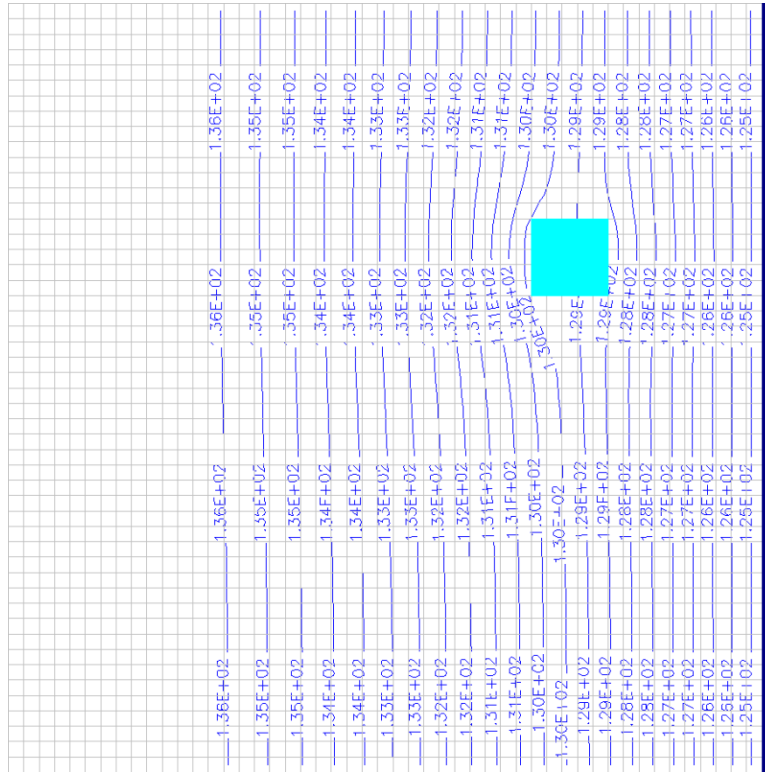


Figure A3 : Simulation de la piézométrie (m) avec zone type rivière ($C = 4 \text{ m}^2/\text{s}$, hauteur d'eau = 129 m, bleu clair).

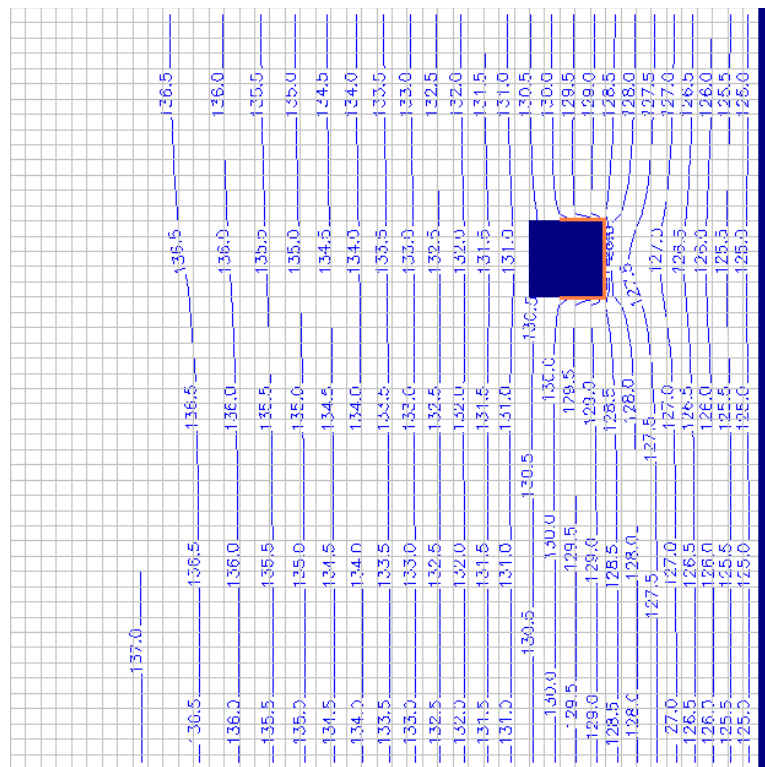


Figure A4 : Simulation de la piézométrie (m) avec zone à charge imposée (130,5 m, bleu) et barrière imperméable associée (perméabilité = 10^{-6} m/s , orange).

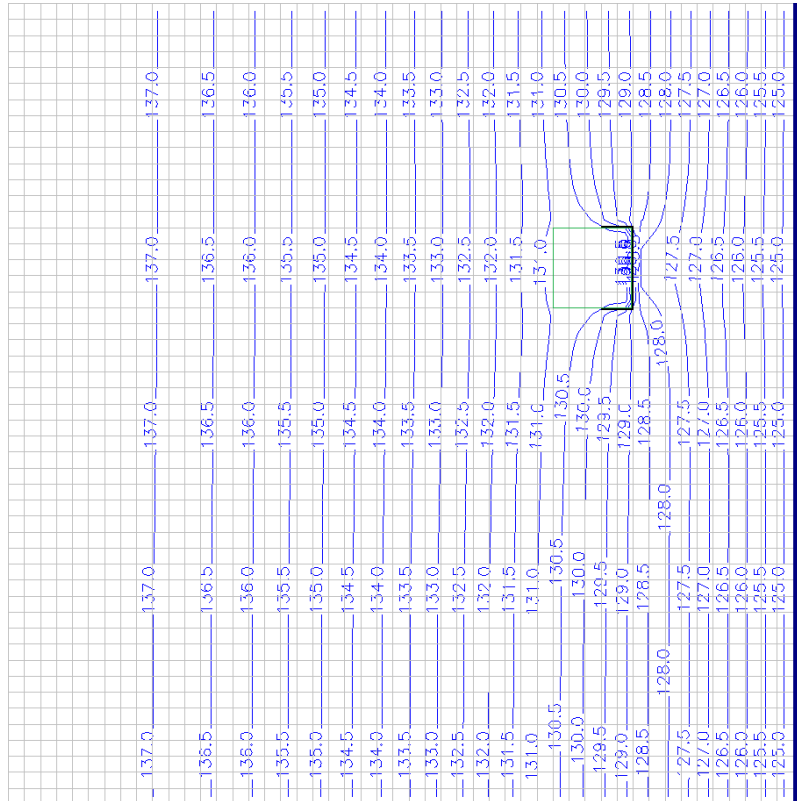
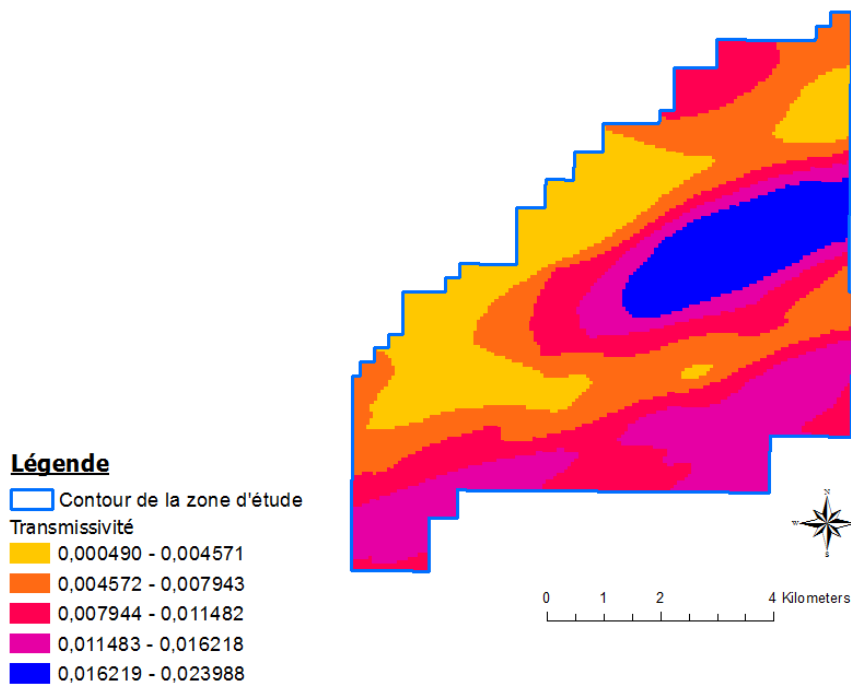


Figure A5 : Simulation de la piézométrie (m) avec zone à forte perméabilité ($1 \text{ m}^2/\text{s}$, vert) et barrière imperméable associée (perméabilité = 10^{-6} m/s , noir).



Auteur : Gueho Yann
Source : Labarthe B.

Figure A6 : Carte de la transmissivité (m^2/s) de la zone d'étude.