

Création du module Libwetde simulation des interactions gravières-aquifères

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

¹Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, METIS, Paris.

²Centre de Géosciences, Mines ParisTech, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau.

*shuaitao.wang@mines-paristech.fr, *anne.jost@upmc.fr

Résumé

L'exploitation des granulats dans les plaines alluviales conduit à la création de lacs de gravières qui résultent de la mise en contact de la nappe alluviale avec l'atmosphère. Dans la zone humide de la Bassée, ces gravières occupent plus de 10% de la surface de la plaine. La manière dont ces gravières affectent la piézométrie de la nappe alluviale est mal connue. Afin de simuler les interactions aquifères-gravières, un module dénommé LibWet a été développé au sein de la plate-forme de modélisation hydro(géo)logique CaWaQS2.10. Dans ce module, la gravière (lac) est représentée par un volume d'eau recouvrant plusieurs mailles et s'étendant sur une ou plusieurs couches aquifères. Le flux d'échange vertical ou horizontal avec l'aquifère adjacent est déterminé par les conductances des interfaces aquifère-gravière et les différences de charge des mailles séparées par ces interfaces aquifère-gravière.

Les simulations peuvent être effectuées en régime permanent et en régime transitoire. Un cas d'étude synthétique a été préparé pour évaluer l'adéquation des simulations opérées à l'aide de LibWet de CaWaQSavec celles effectuées avec le module de lac LAK de MODFLOW. Les résultats s'avèrent satisfaisants et permettent d'envisager une prochaine application du module au cas des gravières de la Bassée (analyse en cours).

1 Introduction

L'exploitation de granulats en France depuis les années 60 a conduit à la création de gravières, plus particulièrement dans la zone humide de la Bassée où elles occupent plus de 10% de la surface de la plaine alluviale. Une gravière est un site d'exploitation de matériaux de construction comme le sable ou les graviers, rempli d'eau. Elle est souvent considérée comme un lac. Elle met en contact la nappe avec l'atmosphère provoquant des impacts hydrogéologiques et biogéochimiques.

Notre avons ainsi pour objectif de développer un module qui permette de simuler les interactions aquifères-gravières et de les quantifier, au sein de la plate-forme de modélisation intégrée **CaWaQS2.10**. Ce module s'appuie sur un bilan hydrologique au niveau de la gravière prenant en compte les précipitations, l'évaporation, le ruissellement et les échanges avec les aquifères adjacents. L'idée de base pour la construction de ce module est de s'appuyer sur les fonctionnalités déjà existantes dans les bibliothèques dont dispose **CaWaQS2.10** (définition des conditions aux limites, des conductances aux interfaces aquifère-gravière, résolution numérique de l'équation de la diffusivité, etc.).

Ce module a été testé sur un cas simplifié de la situation actuelle de la plaine alluviale de la Bassée en comparant ses performances avec celles du module **LAK** de **MODFLOW** (Merritt et Konikow, 2000).

2 Outil de modélisation des hydrosystèmes : CaWaQS2.10

CaWaQS(CATCHmentWaterQuality Simulator) est une plate-forme de modélisation d’hydrosystèmes régionaux. Elle a été développée dans le cadre du PIREN-Seine (Flipo et al., 2004 ;Flipo, 2005 ;Flipo et al., 2005). Dans cette étude, on utilise la dernière version **CaWaQS2.10**, principalement élaborée par Labarthe (2016) dans le cadre de sa thèse. **CaWaQS2.10** est codée en langage C. Elle se divise en trois compartiments : surface, zone non saturée et zone saturée communiquant entre eux via des interfaces (figure 1). **CaWaQS2.10** combine les bibliothèques suivantes (Labarthe, 2016) :

- **Libfp** calcule le bilan hydrique de surface au pas de temps journalier. Elle permet de calculer l’évapotranspiration réelle, de définir le stock d’eau dans le sol, de caractériser l’infiltration et le ruissellement à partir de données de précipitations et d’évapotranspiration ponctuelles.
- **Libnsat** transfère verticalement les flux d’eau infiltrés définis par le module de surface.
- **Libaq** calcule les charges de systèmes multi-couches pseudo-3D par résolution numérique de l’équation de la diffusivité en nappe captive selon un schéma aux différences finies semi-implicite. Dans cette étude, nous nous intéressons à la simulation des écoulements souterrains et utiliserons ce module.
- **Libhyd** simule les écoulements en rivière par résolution du schéma de Muskingum. La hauteur d’eau en rivière est calculée sur chaque élément de calcul en fonction du débit simulé suivant l’équation de Manning-Strickler.

Dans **CaWaQS2.10**, il n’existe pas encore un module propre qui permettrait de simuler les interactions entre l’aquifère et un plan d’eau. Notre objectif est ainsi de développer un tel module en utilisant les fonctionnalités existant déjà dans **Libaq** de sorte que l’on puisse estimer les impacts hydrodynamiques des gravières sur la plaine alluviale de la Bassée.

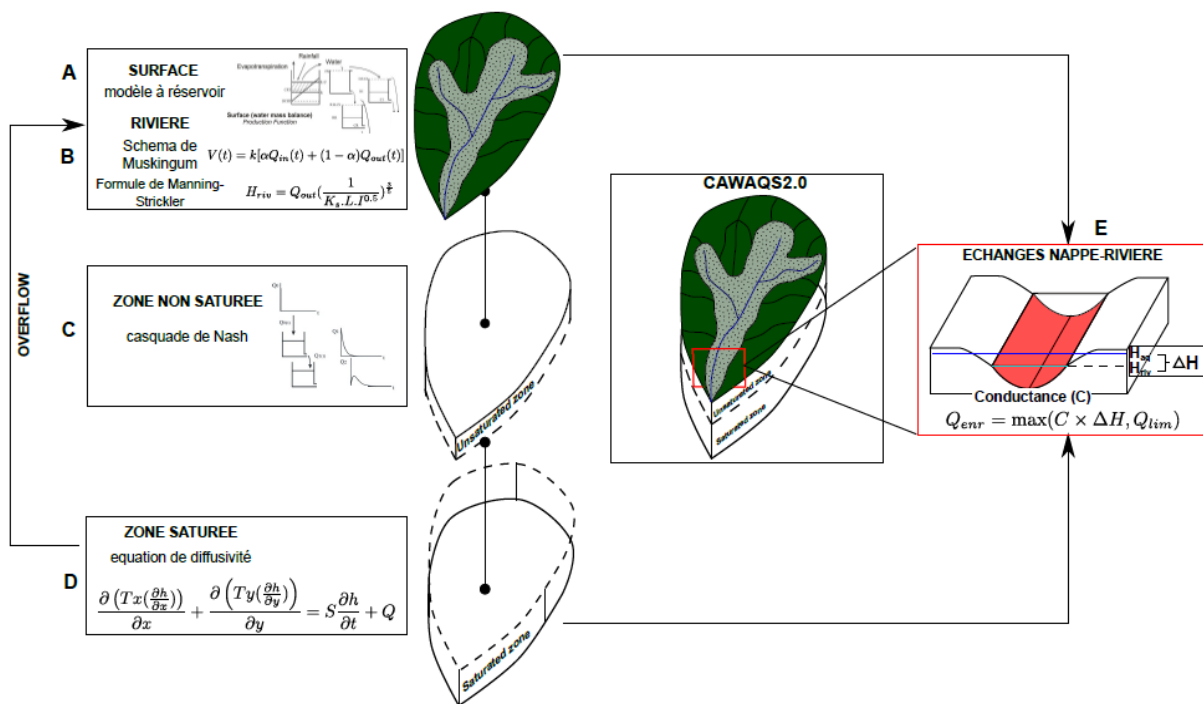


Figure 1 : Schéma du fonctionnement de la plate-forme de modélisation des hydrosystèmes **CaWaQS2.10**. Source : Labarthe, 2016.

3 Formulation mathématique

Le module développé dans cette étude est nommé *LibWet*. Il s’inspire en partie du module *LAK* de *MODFLOW*. Les hypothèses de base ont été posées en fonction de l’objectif de ce travail, à savoir la modélisation des interactions entre aquifères et gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. On suppose ainsi (i) que les gravières sont creusées jusqu’à la craie et (ii) qu’elles ne débordent pas ni ne s’assèchent.

Dans cette partie, on détaille la théorie et la formulation mathématique du module *LibWet*. Les points essentiels sont de quantifier les échanges entre la gravière et l’aquifère adjacent et de calculer le bilan hydrologique de la gravière. Les échanges sont estimés selon la loi de Darcy.

En régime transitoire, on représente la gravière comme une condition aux limites de type Dirichlet (charge constante) à chaque pas de temps. La possibilité de définir une telle condition aux limites existe déjà dans *Libaq*. À la fin de chaque pas de temps, on effectue le bilan hydrologique au niveau de la gravière en prenant en compte les précipitations, l’évaporation, le ruissellement et les échanges nappe-gravière (figure 2) afin de calculer la cote de la gravière. Ce nouveau niveau de la gravière est utilisé au pas de temps suivant.

Afin de déterminer l’état d’équilibre du système, les charges dans l’aquifère et dans la gravière sont calculées de manière itérative, jusqu’à ce que la différence de charge entre deux itérations (une fonction déjà existante dans *Libaq*) soit inférieure à la tolérance du critère d’arrêt fixée. Afin de calculer la cote de la gravière, on effectue un bilan hydrologique après chaque itération de la résolution de l’équation de la diffusivité pour le calcul des charges dans l’aquifère. La charge nouvellement calculée est imposée à la gravière à l’itération suivante jusqu’à convergence.

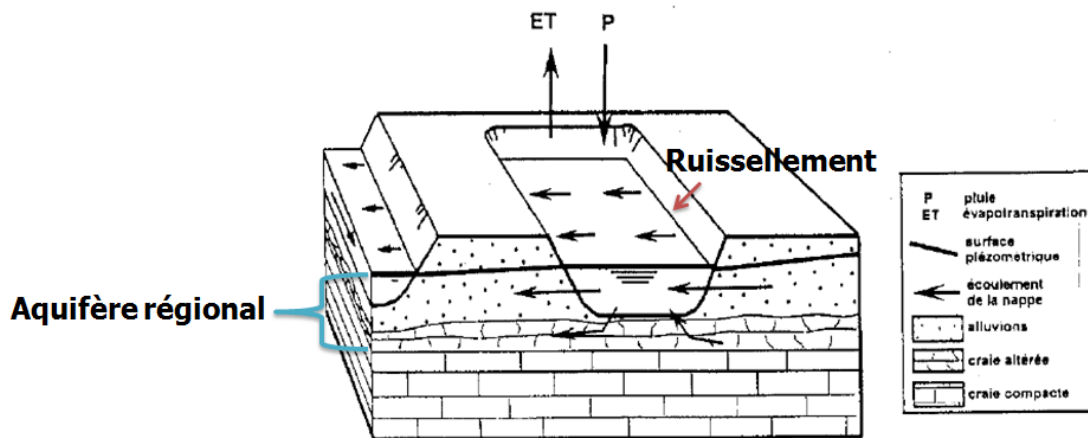


Figure 2 : Schématisation du système aquifère à l'échelle d'une gravière. Source : Schanzen, 1998.

3.1 Les échanges entre la gravière et l'aquifère adjacent

Selon la loi de Darcy, le flux volumique Q traversant une interface entre la gravière et l'aquifère s'écrit :

$$Q = \frac{KA}{\Delta l} (h_a - h_l) = C(h_a - h_l) \quad (1)$$

Avec

Q : le flux volumique [L^3/T]

K : la conductivité hydraulique équivalente [L/T]

A : la section mouillée perpendiculaire au sens de l'écoulement [L^2]

Δl : la distance entre les points où sont mesurées h_l et h_a [L]

h_l : la cote de la gravière [L]

h_a : la charge de l'aquifère [L]

L et T sont les unités de longueur et de temps.

On note $C = \frac{KA}{\Delta l}$ la conductance [L^2/T]. Pour les interfaces verticales, une conductance par mètre d'épaisseur devrait être estimée puis multipliée par l'épaisseur mouillée afin de déduire les échanges horizontaux. Dans la version actuelle du code, on considère que les flux traversent entièrement les interfaces verticales comme les interfaces horizontales.

La figure 3 illustre plus précisément le principe prenant en compte l'épaisseur et la perméabilité du lit de la gravière. À noter que la gravière peut s'étendre sur plusieurs couches du modèle. La conductance du lit de la gravière s'écrit :

$$C_b = \frac{K_b A}{b} (2)$$

Avec

K_b : la conductivité hydraulique du lit de la gravière [L/T]

A : la section mouillée perpendiculaire au sens de l'écoulement [L^2]

b : l'épaisseur du lit de la gravière (figure 3) [L]

La conductance de l'aquifère s'écrit :

$$C_a = \frac{K_a A}{\Delta l} (3)$$

Avec

K_a : la conductivité hydraulique de l'aquifère [L/T]

A : la section mouillée perpendiculaire au sens de l'écoulement [L^2]

Δl : la moitié de la dimension de la maille de l'aquifère adjacent dans le sens de l'écoulement [L] (figure 3)

On peut ainsi en déduire une conductance équivalente C (dans l'équation 1) :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_a} \text{ où } C = \frac{A}{\frac{b}{K_b} + \frac{\Delta l}{K_a}} (4)$$

Dans la version actuelle de **LibWet**, les conductances spécifiques équivalentes pour les interfaces verticales et horizontales gravière-aquifère sont directement définies par l'utilisateur avant la simulation.

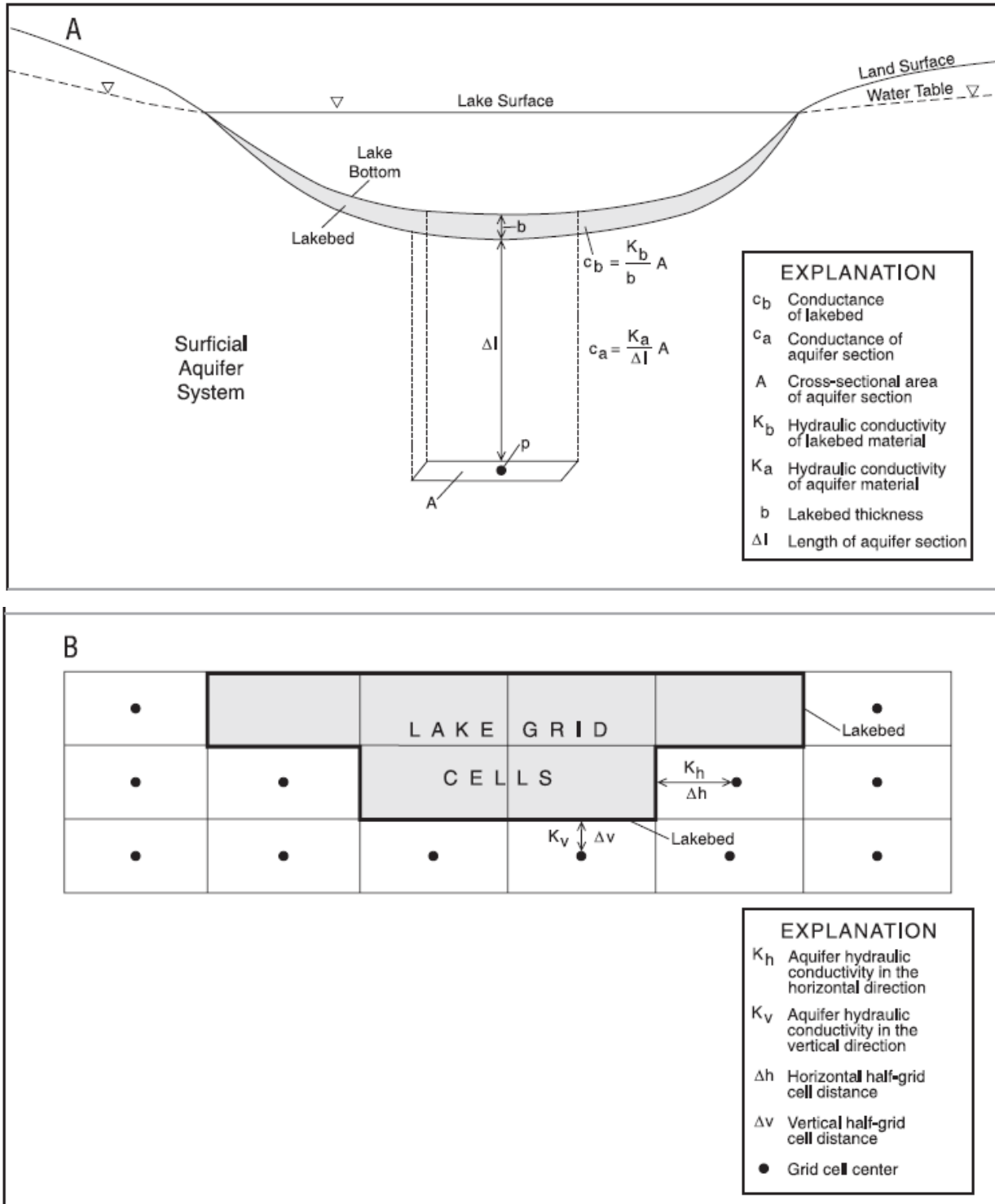


Figure 3 : Concepts utilisés pour estimer les échanges gravière-aquifère. Source : Merritt et Konikow, 2000.

3.2 Bilan hydrologique

Afin de calculer le niveau d'eau dans la gravière, un bilan hydrologique (figure 2) au niveau de celle-ci est fait à l'issue de chaque pas de temps. Cette approche est proposée par Sacks et al. (1992) et décrite par Merritt et Konikow (2000). Dans ce bilan, on prend en compte les précipitations, l'évaporation, l'échange nappe-gravière et le ruissellement.

L'équation du bilan hydrologique s'écrit :

$$h_l^n = h_l^{n-1} + \Delta t \frac{p-e+rnf+Sp}{A_s} \quad (5)$$

Avec

h_l^n et h_l^{n-1} : le niveau de la gravière au pas de temps actuel et au pas de temps précédent [L]

Δt : le pas de temps [T]

p : les précipitations [L^3/T]

e : l'évaporation [L^3/T]

rnf : le ruissellement [L^3/T]

Sp : l'échange nappe-aquifère pendant le pas de temps [L^3/T], une valeur positive signifie que le flux entre dans la gravière.

A_s : la surface au sol de la gravière [L^2]

Les interfaces (M au total) aquifère-gravière sont identifiées dans *LibWet*. Selon la formule (1), l'échange nappe-gravière individuel (pour chaque interface aquifère-gravière) est calculé à chaque pas de temps. Sp est la somme de ces échanges individuels :

$$Sp = \sum_m^M C_m (h_{am} - h_l) \quad (6)$$

Avec

h_{am} : la charge de l'aquifère pour l'élément voisin de la $m^{\text{ième}}$ interface aquifère-gravière au pas de temps n

h_l : la charge de la gravière [L] au pas de temps n-1

C_m : la conductance de la $m^{\text{ième}}$ interface aquifère-gravière

L'équation (5) est valable lorsque le niveau du lac ne varie pas beaucoup entre chaque pas de temps. Si le pas de temps augmentait, les solutions seraient oscillantes, l'amplitude de ces oscillations augmentant avec le pas de temps (Merritt et Konikow, 2000). On introduit alors un θ qui permet de calculer les échanges nappe-aquifère en utilisant h_l^{n-1} (le niveau de la gravière au pas de temps précédent) et h_l^n (le niveau inconnu, à résoudre pour le pas de temps actuel) :

$$\bar{h}_l = (1 - \theta)h_l^{n-1} + \theta h_l^n \quad (7)$$

Avec $0 \leq \theta \leq 1$, défini par l'utilisateur.

L'équation (7) est ainsi un schéma semi-implicite ($0 < \theta < 1$). L'équation (5) est un schéma explicite ($\theta = 0$). Quand $\theta = 1$, on ignore le niveau du lac au pas de temps précédent (h_l^{n-1}). C'est un schéma implicite.

Si on remplace h_l par \bar{h}_l dans l'équation (5), on obtiendra l'équation (8) suivante :

$$h_l^n - h_l^{n-1} = \Delta t \frac{p-e+rnf+\sum_m^M C_m (h_{am}-\bar{h}_l)}{A_s} \quad (8)$$

À partir de l'équation (8), on peut déduire la formule (9) :

$$h_l^n = \frac{h_l^{n-1} + \Delta t \frac{p-e+rnf+(\sum_m^M C_m h_{am} - (1-\theta)h_l^{n-1} \sum_m^M C_m)}{A_s}}{1 + \frac{\theta \Delta t}{A_s} \sum_m^M C_m} \quad (9)$$

Quand $\theta = 0$, l'équation (9) redevient l'équation (5).

En revanche, ce \bar{h}_l n'est pas utilisé pour estimer le flux nappe-aquifère à chaque itération de la résolution de l'équation de la diffusivité de chaque pas de temps en régime transitoire dans *LibWet*. Il est utilisé une seule fois à l'issue de chaque pas de temps.

3.3 Solution en régime permanent

En régime permanent, on effectue le bilan hydrologique après chaque itération de la résolution de l'équation de la diffusivité. Le niveau de la gravière estimé selon ce bilan hydrologique est imposé à la prochaine itération. Les solutions convergent vers un état d'équilibre pour lequel le flux d'entrée est égal au flux de sortie, pour l'aquifère autant que pour la gravière. On peut ainsi chercher cet état d'équilibre au niveau de la gravière à partir des échanges nappe-gravière (Sp) et des autres termes (p , e et rnf , équation 8) après chaque itération de la résolution de l'équation de diffusivité.

Selon l'équation (8), on cherche $h_l^n - h_l^{n-1} = 0$. Afin de réduire le nombre d'itérations, on utilise toujours le schéma explicite (équation 5) en régime permanent. Un θ non nul renseigné par l'utilisateur est automatiquement converti en 0 dans le code de *LibWet*. On peut ainsi tirer la formule (10) pour calculer le niveau de la gravière après chaque itération en régime permanent :

$$h_l = \frac{p-e+rnf+\sum_m^M C_m h_{am}}{\sum_m^M C_m} \quad (10)$$

L'utilisateur peut définir le seuil ε du critère d'arrêt tel que les itérations s'achèvent lorsque $|h_l^n - h_l^{n-1}| < \varepsilon$. Par défaut, ε est égal à 10^{-7} m dans *LibWet*.

3.4 Solution en régime transitoire

En régime transitoire, la charge de la gravière est constante pendant chaque pas de temps et est utilisée comme condition aux limites pour calculer les charges de l'aquifère. Puis, à l'issue de chaque pas de temps, après que la solution a été trouvée pour l'aquifère, l'équation (9) est utilisée dans le code de *LibWet* pour obtenir la cote de la gravière.

4 Validation de *LibWet* par comparaison avec *LAK* de *MODFLOW*

4.1 Description du cas d'étude

Le cas d'étude préparé est un zoom simplifié de la zone de la Bassée. Deux couches sont représentées : les alluvions et la craie (figure 4). La zone d'étude est de dimensions 3125 m × 3125 m × 26 m. On suppose que l'épaisseur des alluvions est égale à 6 m et celle de la craie égale à 20 m. Le toit des alluvions est à la cote 126 m (NGF). La topographie de la zone d'étude est plane. Une rivière se situe à l'est de la zone avec une charge imposée de 124,5 m.

Les perméabilités des deux couches sont homogènes : $6 \cdot 10^{-3}$ m/s pour les alluvions et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s pour la craie. Le coefficient d'emmagasinement des alluvions est fixé à 0,06 et celui de la craie est égal à 0,001.

La nappe alluviale est alimentée par trois composantes : les précipitations efficaces, un flux latéral à l'ouest et le flux ascendant de la craie. Selon Schanen (1998), la recharge par la pluie efficace était de 211 mm/an en 1994 dans la plaine de la Bassée. Le flux latéral à l'ouest est fixé à $1,85 \cdot 10^{-3}$ m³/s au total.

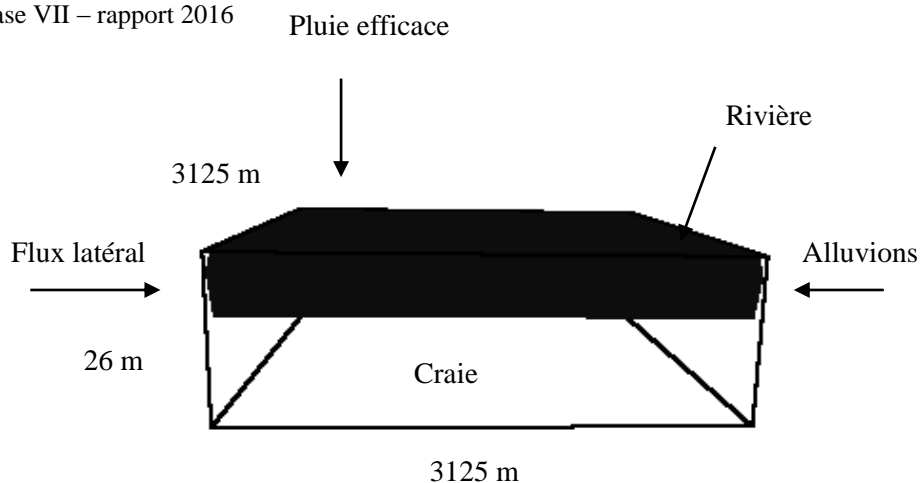


Figure 4 : Bloc diagramme de la zone d'étude.

On construit une gravière de 10 hectares environ au centre de la zone d'étude creusée jusqu'à la craie, c'est-à-dire que la gravière a une profondeur de 6 m. La gravière couvre 24 mailles de la première couche. La pluie efficace (211 mm/an, soit $6,9 \cdot 10^{-9}$ m/s) n'alimente pas la gravière. Les précipitations et l'évaporation sont indépendamment imposées à la gravière, $2,14 \cdot 10^{-8}$ m/s et $2,25 \cdot 10^{-8}$ m/s respectivement (Schanen, 1998). Dans notre cas d'étude, le ruissellement est considéré comme nul.

Deux valeurs de conductance spécifique sont définies pour les interfaces de la gravière dans *LibWet*. Pour les interfaces verticales (berges/alluvions), la conductance spécifique est de $3,95 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ et pour les interfaces horizontales entre le fond de la gravière et la craie de $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

4.2 Résultats

4.2.1 Simulation en régime permanent

La figure 5 illustre les différences de charge et les isopièzes simulées par les deux codes. On observe d'abord que les isopièzes sont bien superposées. De plus, la forme des isopièzes près de la gravière ressemble à celle de la figure 6, un phénomène évoqué par Peaudecerf (1975). Les flux convergent à l'amont et divergent à l'aval de la gravière.

Les différences des charges simulées entre les deux codes (*LibWet* et *LAK*) sont inférieures à 2,2 mm. Ces différences sont du même ordre de grandeur que celles obtenues quand on compare des simulations sans la gravière.

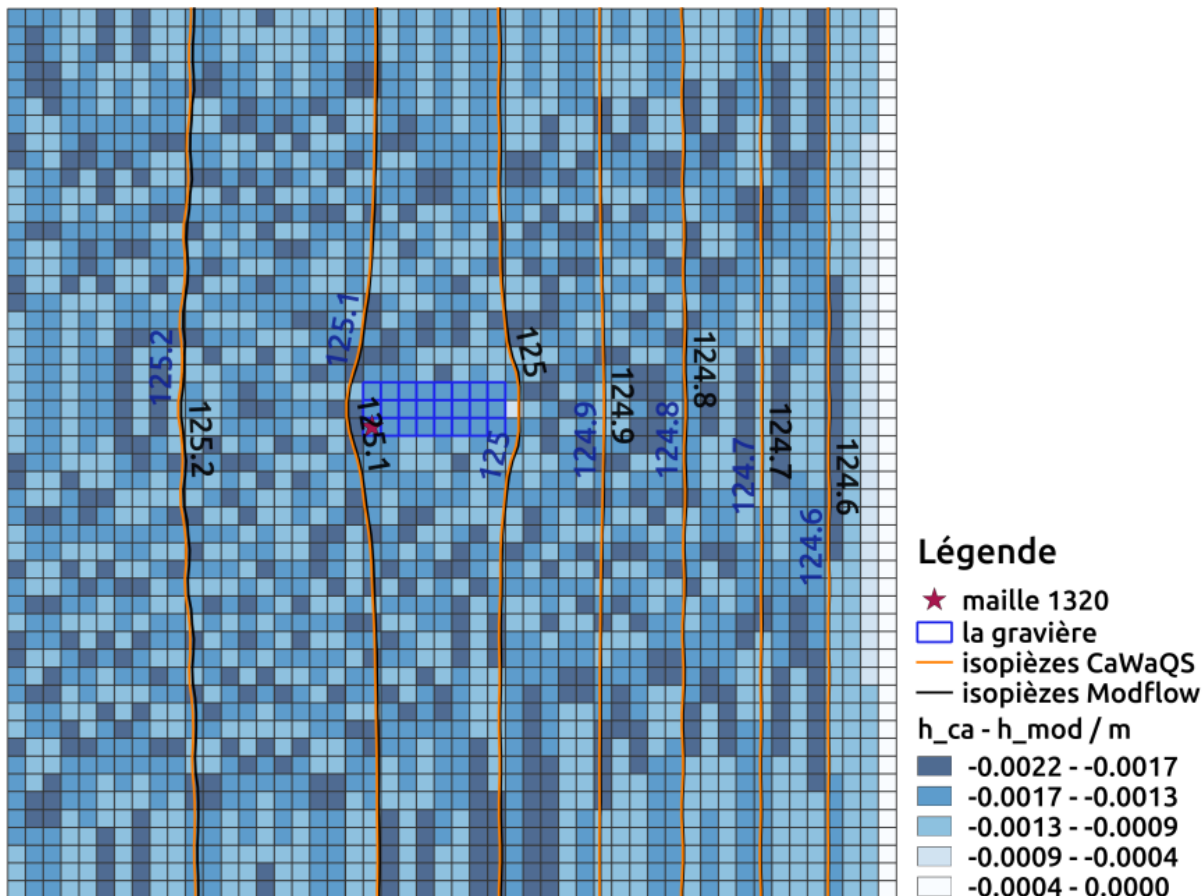


Figure 5 : Comparaison des charges simulées en régime permanent par CaWaQS (h_{ca}) et MODFLOW (h_{mod}), en présence d'une gravière.

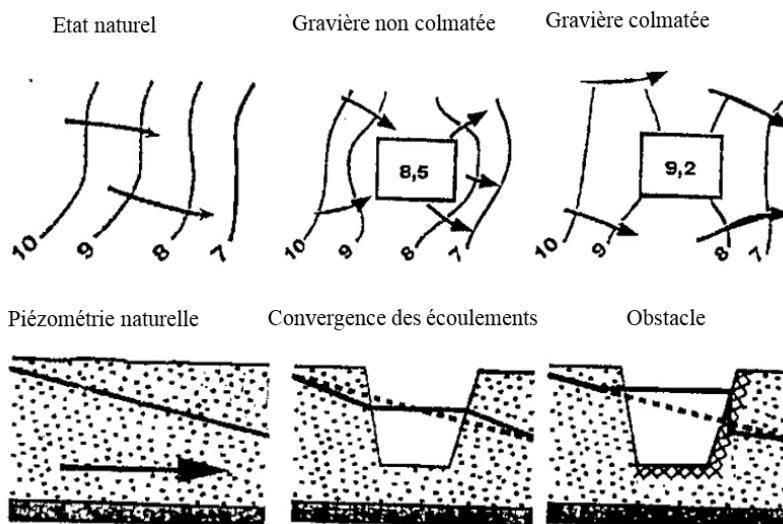


Figure 6 : Influence d'une gravière et du colmatage sur la surface piézométrique et les écoulements. Source : Peaudecerf, 1975.

4.2.2 Simulation en régime transitoire

La figure 7 compare la piézométrie simulée à l'équilibre et en régime permanent. Les isopièzes simulées au bout de 850 jours (pas de temps = 1 jour) par les deux logiciels se superposent avec celles simulées en régime permanent. Les différences de charge à l'équilibre sont inférieures à 2 mm, ce qui est cohérent avec la figure 5(simulation en régime permanent).

On compare maintenant les résultats des simulations des deux codes à pas de temps 0,25 j (figure 8). Les deux simulations semblent donner des résultats similaires (figure 8). La différence maximale de charge calculée pour la gravière entre ces deux simulations est estimée à 0,023 m. Elle est du même ordre que la différence de charge calculée pour la maille aquifère 1320 en régime transitoire en l'absence de gravière (différence maximale de 0,018 m, Wang, 2016).

Les autres résultats concernant la validation de *LibWet* sont détaillés dans le mémoire de Master 2 de Wang(2016).

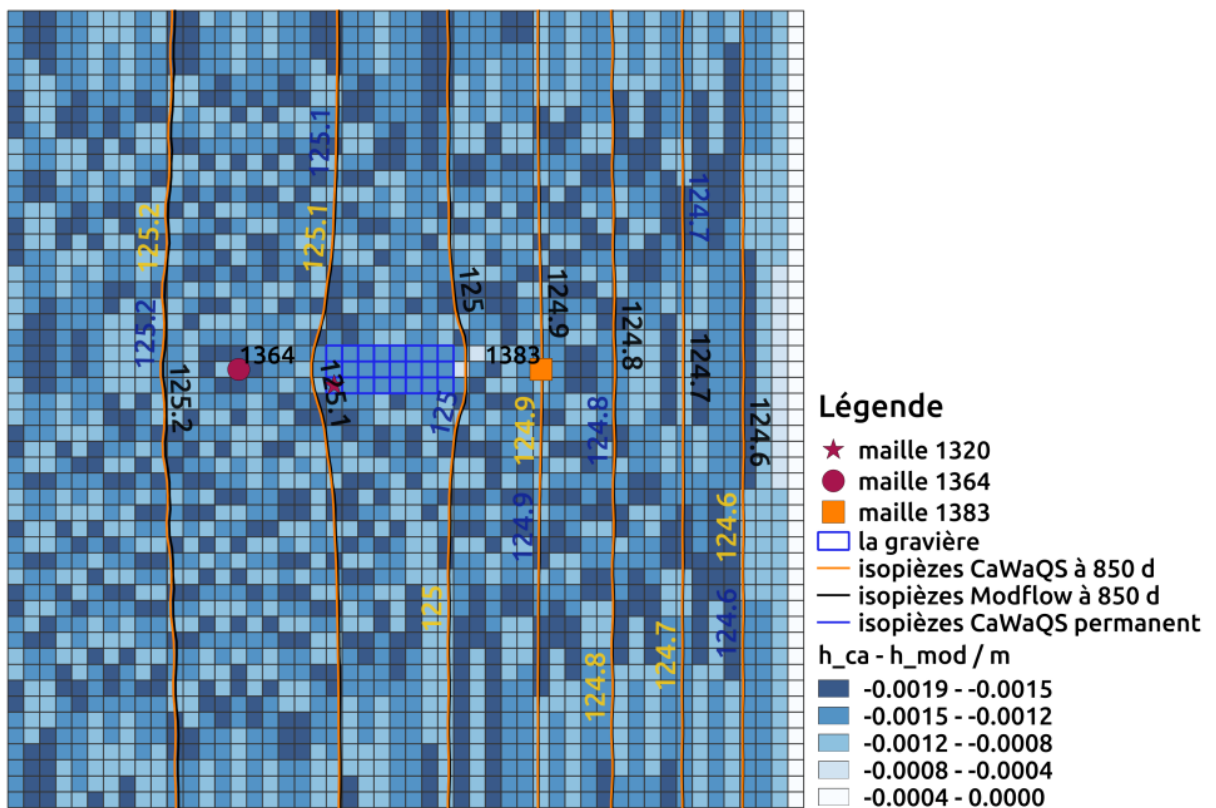


Figure 7 : Comparaison de la piézométrie simulée au bout de 850 jours et en régime permanent par CaWaQS et MODFLOW (nappe alluviale).

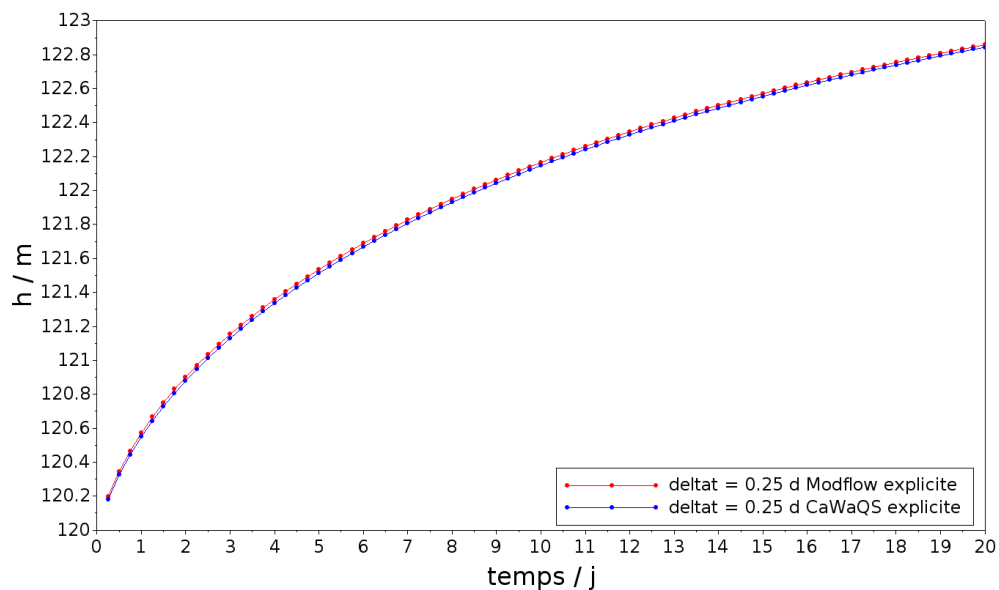


Figure 8. Comparaison des charges de la gravière simulées par **CaWaQSet MODFLOW** à pas de temps 0,25 jour pour les 20 premiers jours.

5 Conclusions

Le module **LibWet** a été développé au sein de la plate-forme **CaWaQS** pour simuler les interactions hydrodynamiques entre l'aquifère et les gravières. Ce module a été comparé sur un cas test avec le module **LAK** de **MODFLOW 2005** au sein de l'interface **ModelMuse** (Winston, 2009). À partir des résultats obtenus, on peut conclure que :

- La simulation en régime permanent de **LibWet** donne presque les mêmes résultats que celle de **LAK**. Les différences de charges simulées sont inférieures à 2,2 mm, une valeur acceptable.
- Les simulations à différents pas de temps (1 j, 0,5 j et 0,25 j) sont cohérentes pour **LibWet** (différences de charge de la gravière quasiment inférieures à 0,01 m).
- Les simulations par les deux logiciels à pas de temps égal à 0,25 j se ressemblent beaucoup. La différence maximale de charge de la gravière simulée est égale à 0,023 m, une valeur acceptable par rapport à 0,018 m (simulation en régime transitoire en l'absence de gravière).

Cette comparaison prouve que le module **LibWet** est opérationnel. Une application prenant en compte les hétérogénéités des transmissivités issues du modèle de Labarthe (2016) est en cours.

Références

- Flipo N. (2005).** Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et en rivière : application au bassin de Grand Morin. Thèse de Doctorat, ENSMP.
- Flipo N., Even S., Poulin M., Théry S. et Ledoux E. (2007).** Modeling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sciences of the Total Environment*, 375 : 69-79.
- Flipo N., Poulin M. Even S. Ledoux E. Viavatten C. et Théry S. (2004).** Modélisation intégrée du bassin du Grand Morin. Choix conceptuels. Description de la plate-forme Stics-Newsam-Prose. Contribution du Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris au Programme de recherche Piren Seine. Rapport LHM/RD/04/07. Rapport technique, Ecole des Mines de Paris.
- Labarthe B. (2016).** Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle. Thèse de Doctorat, MINES ParisTech.
- Merritt M. L. et Konikow L. F. (2000).** Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4167, 153 p.
- Peaudecerf P. (1975).** Effet des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines. *La Houille Blanche*, 2/3 : 133-139.
- Sacks L. A., Herman J. S. Konikow L. F. et Vela A. L. (1992).** Seasonal dynamics of groundwater-lake interactions at Donana National Park, Spain. *Journal of Hydrology*, 136 : 123-154.
- 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.
- 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.
- Winston, R.B. (2009).** *ModelMuse*—A graphical user interface for MODFLOW–2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A29, 52 p.